

# Na tomto místě bude oficiální zadání vaší práce

- Toto zadání je podepsané děkanem a vedoucím katedry,
- musíte si ho vyzvednout na studijním oddělení Katedry počítačů na Karlově náměstí,
- v jedné odevzdané práci bude originál tohoto zadání (originál zůstává po obhajobě na katedře),
- ve druhé bude na stejném místě neověřená kopie tohoto dokumentu (tato se vám vrátí po obhajobě).



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní  
Ústav Procesní a zpracovatelské techniky



Diplomová práce

## CFD simulace proudění v nádrži pro chov ryb

*Bc. Jaroslav Hanák*

Vedoucí práce: Ing. Karel Petera, Ph.D

Studijní program: Procesní technika

Obor: Strojní inženýrství

19. srpna 2016



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Karlu Peterovi, Ph.D. a konzultantu mé práce, Ing. Štěpánu Papáčkovi, Ph.D. za jejich pomoc, cenné rady, připomínky, materiály a v neposlední řadě též trpělivost a ochotu vyjít mi vstříc, když jsem byl v době dokončování práce na pracovní stáži v zahraničí.



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19.8.2016

.....





# Abstract

This thesis explores possibility of use CFD as tool for RAS system for fish production. Multiple computational models are compared with experimental data. This data was measured on a real production tank situated in a real research facility.

Based on the results of simulation, performed with an optimal mesh (according to the results of analysis of the impact of mesh elements number on the accuracy of solution), recommendation for choose of the computational model was stated.

The last point of this work is optimization of flow in a tank with baffle.

# Abstrakt

V této práci je zkoumána možnost využití CFD pro návrh nádrže na chov ryb. Jsou porovnány jednotlivé výpočetní modely s naměřenými experimentálními výsledky z reálně používané kádě využívané ve výzkumném zařízení.

Na základě výsledků simulací, provedených na té síti, která se díky analýze vlivu počtu elementů na přesnost řešení ukázala jako optimální, je pak stanoven doporučený výpočetní model.

Posledním bodem práce je zkoumání možnosti optimalizace proudění v nádrži pomocí přepážky.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Uzavřené vodní okruhy	1
1.1.1	Typy nádrží použitých pro uzavřený vodní okruh	3
1.1.2	Výhody RAS	4
1.2	Vliv rychlosti proudění na produkci ryb	5
1.3	Zvažované metody určené ke stanovení rychlosti proudění	6
1.3.1	Principy stereovize [16]	6
1.3.2	Problémy metody postavené na stereovizi	7
<b>2</b>	<b>Motivace a cíle práce</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Experimentální měření</b>	<b>11</b>
3.1	Popis systému	11
3.2	Měřicí přístroj	13
3.3	Popis měření	13
3.4	Naměřené hodnoty a jejich popis	17
<b>4</b>	<b>CFD simulace proudění</b>	<b>23</b>
4.1	Tvorba geometrie modelu	23
4.2	Tvorba sítě pro výpočetní model	24
4.3	Analýza vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení	24
4.3.1	Postup výpočtu	25
4.3.2	Použité sítě a výsledky analýzy	26
4.4	Výběr vhodného výpočetního modelu	27
4.4.1	Popis jednotlivých modelů	28
4.5	Zvažované přístupy k modelování systému	29
4.6	Popis tvorby modelu – fyzikální a numerické parametry	31
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení simulace</b>	<b>33</b>
5.1	Předběžná simulace	33
5.1.1	Kvalita hrubé sítě	33
5.1.2	Konvergence jednotlivých výpočetních modelů	34
5.2	Vyhodnocení výsledků předběžné simulace	35
5.2.1	Postup vyhodnocení	35
5.2.2	Vyhodnocení předběžné simulace	37
5.3	Simulace provedená s optimální sítí	40

5.3.1	Kvalita jemné sítě . . . . .	40
5.3.2	Konvergence použitých modelů . . . . .	41
5.4	Vyhodnocení simulace . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Optimalizace pomocí přepážky</b> . . . . .	<b>45</b>
6.1	Význam přepážky . . . . .	45
6.2	Geometrie nádoby opatřené příčkou . . . . .	45
6.3	Naměřená experimentální data . . . . .	47
6.4	Tvorba geometrie modelu, sítě a CFD modelu . . . . .	50
6.4.1	Geometrie . . . . .	50
6.4.2	Síť . . . . .	50
6.5	Výsledky simulace . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Závěr</b> . . . . .	<b>55</b>
	<b>Literatura</b> . . . . .	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Zdrojové kódy použitých programů</b> . . . . .	<b>59</b>
A.1	Stanovení GCI . . . . .	59
A.2	Vyhodnocení výsledků předběžné simulace . . . . .	61
A.3	Vyhodnocení simulací s jemnou sítí . . . . .	68
<b>B</b>	<b>Obrazová příloha</b> . . . . .	<b>75</b>
<b>C</b>	<b>Obsah příložených DVD</b> . . . . .	<b>83</b>

# Seznam obrázků

1.1	Vývoj celkové spotřeby ryb, spotřeby ryb na obyvatele a počtu obyvatel na Zemi . . . . .	2
1.2	Vývoj světové produkce ryb . . . . .	2
1.3	Příklad hybridní nádrže . . . . .	4
1.4	Stanovení rychlosti proudění pomocí stereovize . . . . .	7
3.1	Rozměry simulované nádoby . . . . .	12
3.2	Popis měřicí hlavice přístroje FlowTracker® Handheld ADV® . . . . .	14
3.3	Rozměry použité sondy . . . . .	14
3.4	Umístění vodících tyčí na nádobě . . . . .	15
3.5	Schéma umístění měřených pozic v nádobě . . . . .	16
3.6	Údaje zobrazené přístrojem FlowTracker® Handheld ADV® . . . . .	17
3.7	Orientace souřadného systému sondy . . . . .	19
4.1	Analýza vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení . . . . .	27
4.2	Sít pro výpočet pomocí laminárního a turbulentního modelu - varianta 1 . . . . .	30
4.3	Sít pro výpočet pomocí laminárního a turbulentního modelu - varianta 2 . . . . .	30
5.1	Sít použitá pro předběžnou simulaci . . . . .	33
5.2	Rozložení kvality elementů - kritérium orthogonal quality . . . . .	34
5.3	Doporučení výrobce softwaru Ansys ohledně kvality elementů - parametr orthogonal quality . . . . .	34
5.4	Rozložení kvality elementů - kritérium skewness . . . . .	34
5.5	Doporučení výrobce softwaru Ansys ohledně kvality elementů - parametr skewness . . . . .	35
5.6	Procentuální odchylky pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90° . . . . .	38
5.7	Procentuální odchylky pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 45° . . . . .	38
5.8	Grafické znázornění rychlosti $v_{XY}$ v objemu simulované nádoby pro vytipo- vané modely . . . . .	39
5.9	Použitá jemná síť . . . . .	40
5.10	Rozložení kvality elementů v jemné síti - kritérium Orthogonal Quality . . . . .	40
5.11	Rozložení kvality elementů v jemné síti - kritérium Skewness . . . . .	41
5.12	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90° . . . . .	43

5.13	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřícího přístroje 45° . . . . .	43
5.14	Grafické znázornění rychlosti $v_{XY}$ v objemu simulované nádoby pro zkoumané modely . . . . .	44
6.1	Rozměry přepážky a její umístění v rámci nádrže . . . . .	46
6.2	Definování polohy přepážky . . . . .	47
6.3	Použitá síť pro simulaci nádoby s přepážkou . . . . .	50
6.4	Rozložení kvality elementů - kritérium orthogonal quality . . . . .	51
6.5	Rozložení kvality elementů - kritérium skewness . . . . .	51
6.6	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřícího přístroje 90° . . . . .	53
6.7	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřícího přístroje 45° . . . . .	53
6.8	Grafické znázornění rychlosti $v_{XY}$ v objemu simulované nádoby s přepážkou . . . . .	54
7.1	Instalace přepážky v nádobě . . . . .	56
B.1	Průběh konvergence výpočetního modelu Spalart-Allmaras, předběžná simulace . . . . .	75
B.2	Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\epsilon$ , předběžná simulace . . . . .	76
B.3	Průběh konvergence výpočetního modelu Realizable k- $\epsilon$ , předběžná simulace . . . . .	76
B.4	Průběh konvergence výpočetního modelu RNG k- $\epsilon$ , předběžná simulace . . . . .	77
B.5	Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\omega$ , předběžná simulace . . . . .	77
B.6	Průběh konvergence výpočetního modelu SST k- $\omega$ , předběžná simulace . . . . .	78
B.7	Průběh konvergence výpočetního modelu Spalart-Allmaras u jemné sítě . . . . .	78
B.8	Průběh konvergence výpočetního modelu SST k- $\omega$ u jemné sítě . . . . .	79
B.9	Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\epsilon$ u jemné sítě . . . . .	79
B.10	Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\omega$ u jemné sítě . . . . .	80
B.11	Průběh konvergence výpočetního modelu Spalart-Allmaras u nádoby s přepážkou . . . . .	80
B.12	Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\epsilon$ u nádoby s přepážkou . . . . .	81
B.13	Průběh konvergence výpočetního modelu SST k- $\omega$ u nádoby s přepážkou . . . . .	81
B.14	Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\omega$ u nádoby s přepážkou . . . . .	81

# Seznam tabulek

3.1	Stanovení hmotnostního přítoku . . . . .	12
3.2	Naměřené hodnoty pro úhel sondy 90 stupňů . . . . .	20
3.3	Naměřené hodnoty pro úhel sondy 45 stupňů . . . . .	21
4.1	Parametry sítí použitých pro analýzu . . . . .	26
4.2	Výsledky analýzy . . . . .	26
5.1	Souřadnice zkoumaných bodů pro polohu sondy 90° . . . . .	36
5.2	Souřadnice zkoumaných bodů pro polohu sondy 45° . . . . .	36
5.3	Procentuální odchylky pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90° . . . . .	37
5.4	Procentuální odchylky pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 45° . . . . .	37
5.5	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90° . . . . .	42
5.6	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 45° . . . . .	42
6.1	Naměřené hodnoty pro úhel sondy 90 stupňů, se zarážkou . . . . .	48
6.2	Naměřené hodnoty pro úhel sondy 45 stupňů, se zarážkou . . . . .	49
6.3	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90° . . . . .	52
6.4	Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 45° . . . . .	52





# Kapitola 1

## Úvod

Od poloviny dvacátého století, kdy na zemi žilo zhruba 2,5 miliard lidí, vzrostl počet obyvatel země na 7 miliard v roce 2012. Přitom je očekáváno, že tento růst populace se nezastaví a v polovině tohoto století by po Zemi, na základě studie Organizace Spojených Národů, mělo chodit 9 miliard lidí [18].

S tímto rapidním nárůstem populace tak před lidmi vyvstává otázka, jak pro toto množství lidí zajistit dostatečný přísun kvalitních potravin. Jednou z možných odpovědí by mohly být ryby, které mají velmi výhodný poměr zkonsumované potravy na vyprodukování kilogramu masa (konkrétně jde o 2.3 kg/kg dle [18]).

Konzumace rybiho masa je výhodná z několika hledisek, jako například nízký obsah tuku a zvýšený obsah polynenasycených mastných kyselin (ty tělo využívá k redukci sérového cholesterolu, a tím snížení možnosti srdečního infarktu). Také stravitelnost rybiho masa je oproti například hovězímu velmi dobrá, a to díky kratším svalovým vláknům [4].

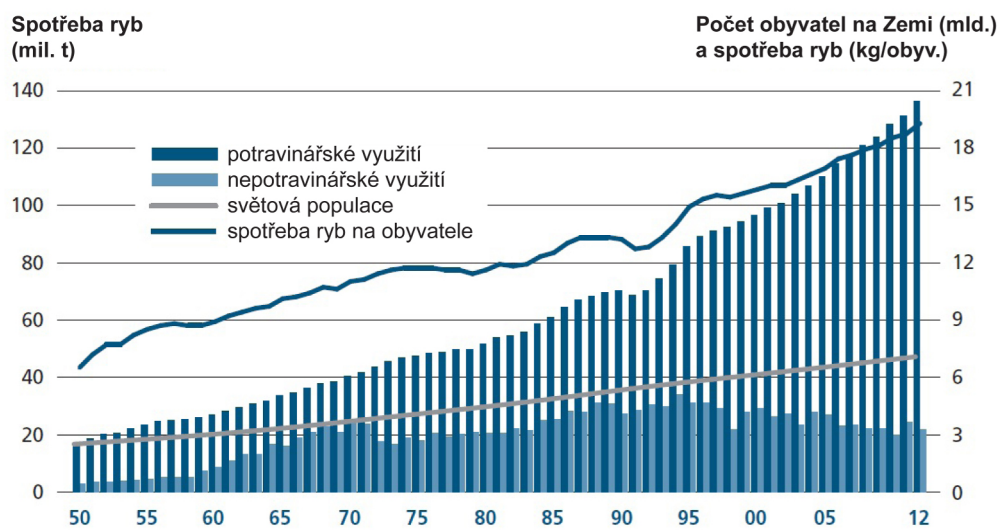
Nicméně, jak se ukazuje, pouze tradiční rybolov pro pokrytí vzrůstající poptávky (viz obrázek 1.1) po této potravině nestačí. V některých oblastech tato situace došla tak daleko, že extensivní rybolov téměř vyhubil lovené druhy ryb.

Proto, jak ukazuje graf na obrázku 1.2 sestavený z dat FAO (Food and Agriculture Organization), vzrůstající poptávku od poloviny devadesátých let kompenzuje právě rostoucí produkce ryb v akvakulturách. V roce 2012 tak tento způsob produkce rybiho masa pokryl 42% světové produkce (66,6 milionů tun z celkové produkce 158 milionů tun). Přitom 63% takto vyprodukovaných ryb vyrostlo v systémech instalovaných na souši [10].

Díky jmenovaným faktorům se tak celé odvětví produkce ryb v akvakulturních systémech těší aktuálně poměrně velkému zájmu, jak ze strany komerčních subjektů, tak výzkumných institucí. Díky jednomu výzkumnému projektu, který se právě řeší na Jihočeské univerzitě, jsem se ostatně i já dostal k tématu své diplomové práce.

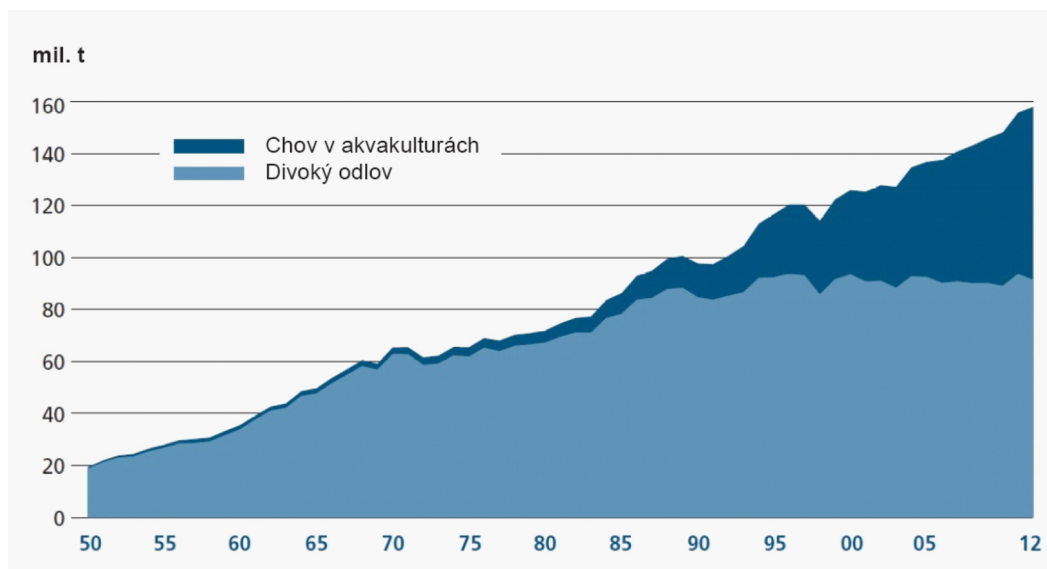
### 1.1 Uzavřené vodní okruhy

Jedním z možných způsobů, jak chovat ryby je v prostředí České Republiky, kromě tradičního rybníkářství, chov ryb v uzavřených vodních okruzích (používá se pro ně zkratka RAS z



Obrázek 1.1: Vývoj celkové spotřeby ryb, spotřeby ryb na obyvatele a počtu obyvatel na Zemi

Převzato z: [2]



Obrázek 1.2: Vývoj světové produkce ryb

Převzato z: [2]

anglického Recirculating Aquaculture Systems). Ty se skládají z nádrže určené pro růst ryb, jímky na částice odebrané ze systému, biofiltru, přívodu kyslíku a pumpy zajišťující recirkulaci vody [14].

### 1.1.1 Typy nádrží použitých pro uzavřený vodní okruh

Podle prezentace, kterou na téma chovu ryb v uzavřeném vodním okruhu připravili M.B. Timmons a J.M. Ebeling [15], jsou aktuálně nejpoužívanější tyto typy:

- Válcové nádoby - tímto typem se budu ve své práci zabírat. Současný trend u tohoto návrhu je takový, že se producenti snaží používat méně nádob, ale s větším průměrem. Tím se redukuje náklady na nutné vybavení, ale zároveň roste riziko ztráty v případě selhání nádoby.

Obvyklá geometrie pro komerční provedení tohoto typu nádrže má poměr průměru nádoby vůči výšce hladiny od 5:1 do 10:1. I když se občas používají i menší poměry jako 3:1. Dno bývá většinou ploché, či jen s nepatrným sklonem (kvůli vypouštění nádrže).

Výhody toho typu chovné nádoby jsou následující:

- Jednoduchá údržba
- Jednotná kvalita vody
- Díky tvaru nádoby v ní není jednotné rychlostní pole, což umožňuje rybám vybrat si pro ně, z hlediska proudění, optimální místo v rámci nádrže.
- Snadný odvod nečistot ze systému pomocí odtoku umístěného ve středu nádoby.

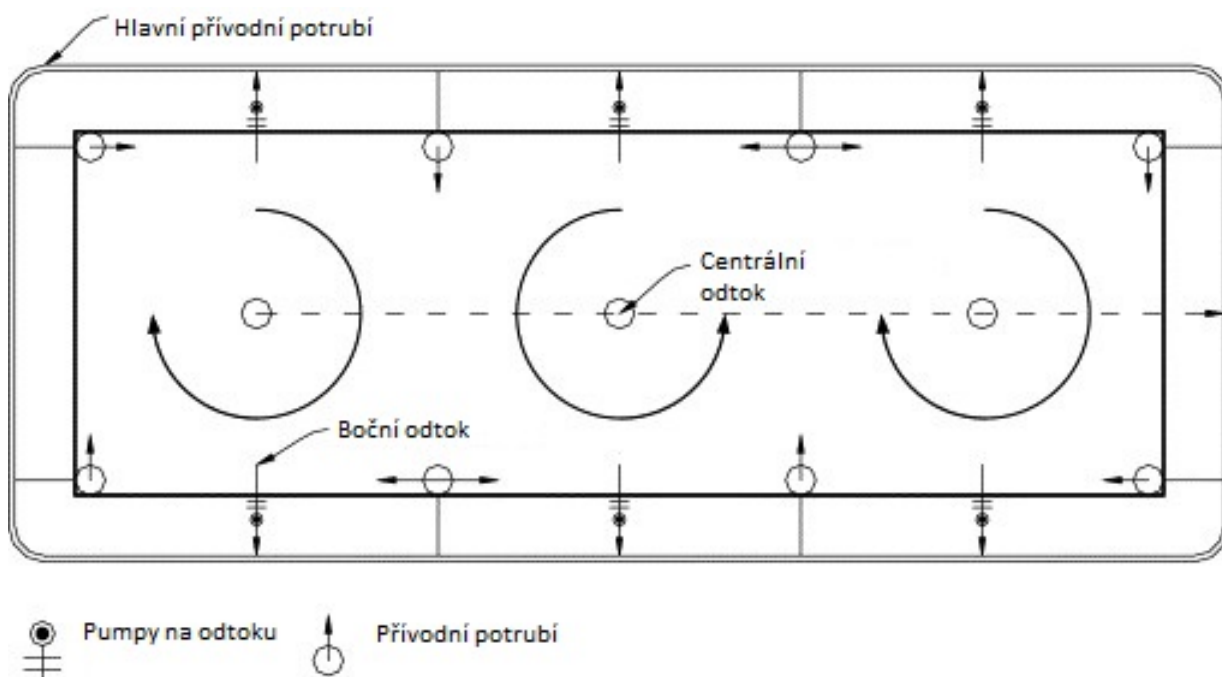
Nevýhoda tohoto typu oproti následujícímu typu pak spočívá v horším využití místa.

- Kanály/ náhony - tento typ chovného systému se původně používal pro chov lososovitých ryb v oblastech, kde je dostatek vody. To je dáno tím, že nároky na výměnu vody u tohoto typu jsou velké - objem nádrže by se měl vyměnit každých 10 až 15 minut. Toto je dáno díky nemožnosti využít proudění v nádobě pro její samočištění, tak, jak tomu je u nádob s válcovým tvarem. S tímto se pojí i velké nároky na časté čištění. Také distribuce krmění pro chované ryby není tak jednoduchá jako v případě válcovitých nádob.

Na druhou stranu výhoda tohoto tvaru nádoby spočívá v lepším vyžití místa a snadnější manipulaci s rybami.

Tvar této nádoby je obvykle udán poměrem délky ku šířce 1:10 a hloubkou nepřesahující 1 metr.

- Hybridní nádrže - tento typ se snaží kombinovat výhody obou předchozích typů. Příklad uspořádání takového systému je na obrázku 1.3. Tento systém se chová jako série za sebou zapojených válcových nádob, ovšem při lepším využití zastavěného prostoru.



Obrázek 1.3: Příklad hybridní nádrže

Převzato z: [17]

### 1.1.2 Výhody RAS

Výhody, které recirkulační systémy poskytují chovatelům ryb, jsou podle článku, který vydali L.A. Helfrich a G. Libey [14] následující:

- Široká škála velikostí vhodných pro různé účely. RAS se dá využít jak pro chovy ryb určených ke konzumaci, tak například i pro odchov mladých ryb určených k následnému vypuštění do oblastí využívaných ke sportovnímu rybolovu, či chovu ryb určených do domácích akvárií.
- Intenzifikace produkce - chov ryb v uzavřených systémech je obdobou velkochovu prasat ve vepříněch či kuřat v drůbežárnách. Oproti zmíněnému rybníkářství se také dá lépe kontrolovat úbytek ryb způsobený nemocemi, parazity, znečištěním nádrže, nepříznivými podmínkami k chovu v určitou roční dobu atd.
- Snížení nároků na množství vody a zastavěné půdy. Například při porovnání s venkovním chovem v rybníku je pro vyprodukování 45 000 kg ryb potřeba pro RAS systém pouze budova o rozloze 460 m<sup>2</sup>, kdežto rybník by zabíral 80 000 m<sup>2</sup>. Spotřeba vody oproti tradičnímu rybníku je pak pětina.
- Flexibilní možnosti umístění - díky zmíněné nenáročnosti na zastavěnou plochu se RAS dají využít například pro chov ryb v hale, a tím eliminovat klimatické faktory jako například chladné počasí (zpomalení růstu ryb), či naopak velmi horké a suché klima - např. v pouštích (zmenšení odparu vody díky umístění nádrží uvnitř budov).

Další výhodou je možnost umístění produkčního zařízení co nejbližší cílovému trhu a tím snížit náklady na dopravu.

- Široké možnosti chovu - Možnost chovat více druhů ryb, či jiných mořských plodů v témže produkčním zařízení (ať už v jedné nádrži - tzv. polykultura, či každý druh ve vlastní nádrži - tzv. monokultura) poskytuje chovatelům pokrýt aktuální poptávku trhu. Stejně jako mít několik různých velikostí toho samého živočišného druhu a tím opět lépe pokrýt poptávku.

Co se týká nevýhod tohoto systému, jde především o vyšší investiční a produkční náklady oproti klasickému rybníku. Do provozních nákladů je potřeba zohlednit energie na provoz pump, systému dodávajícího vzduch, vytápění, osvětlení atd. Také nároky na obsluhu jsou v tomto případě mnohem vyšší, protože jde o poměrně komplexní systém, při jehož selhání dochází rychle (do 15 minut maximálně) ke ztrátě celé nádrže.

## 1.2 Vliv rychlosti proudění na produkci ryb

Název této diplomové práce je CFD simulace proudění v nádrži pro chov ryb. Jaký je význam stanovení tohoto proudění? Hlavní důvod se opět skrývá ve snaze vylepšit produkci rybího masa. Velký význam na fyziologii ryb má pohyb, který musí vykonávat při plavání ve vodním toku. A je to právě rychlost proudící vody, která do značné míry udává to, jak rychle se bude ryba pohybovat.

Následující body popisující jednotlivé oblasti ze života ryb, které mohou být ovlivněny plaváním (respektive rychlostí plavání), byly uveřejněny v článku sepsaném autory A.P. Palstra a J.V. Planas [7] na základě příspěvků prezentovaných na workshopu FitFish konaném v Barceloně v roce 2010.

- Růst svalů - u ryb z nadřádu kostnatých je docíleno jejich schopnosti plavat díky zapojení svaloviny trupu. Ta u ryb z tohoto nadřádu představuje více než 50% jejich tělesné hmotnosti. Při plavání optimální rychlostí dochází k růstu svalů tvořících tuto svalovinu.

Například siven vykazoval při rychlosti plavání rovné 0.85 BL/s (délky těla za sekundu - z anglického body lengths per second) nárůst délky o 3.5% a stejně tak hmotnosti o 34%, kdežto pro rychlost 1.72 BL/s to bylo jen 0.5%, respektive 16% pro nárůst hmotnosti. Dalším příkladem může být růst větší o 38% u lososů, kteří byli nuceni plavat, oproti lososům, kteří se nemuseli pohybovat.

- Kvalita svalstva. Jedním z hlavních kritérií, podle kterých se dá posuzovat kvalita svalstva, je svalová textura. Ta je dána uspořádáním vláken svalu a charakteristikou tkáně spojující svaly (zde jde hlavně o obsah kolagenu).

Je zdokumentována lepší kvalita masa u lososů a pstruhů obecných, kteří byly nuceni plavat. Nicméně u jiných, komerčně zajímavých druhů, jako například pstruh druhový, není zatím podobná studie provedena.

Kromě zmíněného pohybu jsou zde další faktory, které ovlivňují kvalitu svalstva a producent by je tak měl vzít v úvahu. Konkrétně jde o zacházení před a po porážce, zpracování masa a jeho skladování.

- Reprodukce ryb - toto se týká hlavně tažných druhů ryb, speciálně samic ryb z čeledi úhořovitých a lososovitých. Díky tomu, že budou ryby ze zmíněných čeledí nuceny plavat, se u nich dá kontrolovat období, kdy dosáhnou sexuální vyzrálosti a tím prodloužit období jejich růstu.
- Zlepšení kvality života ryb. Pokud ryby nejsou nucené plavat rychlostí, která je pro ně optimální, mohou nastat tyto dva případy: 1) při nižších rychlostech se u ryb začne objevovat zvýšená agrese, kdy se navzájem začínají napadat. 2) pro rychlosti, které jsou naopak vyšší než je optimální rychlost pro daný druh se daná ryba vystavená takovému prostředí namáhá více než je nutné, což má vyústění v podobě kyslíkového dluhu, který způsobí nadměrnou únavu.
- Další oblastí, na kterou má rychlost plavání ryb vliv, je pak jejich zdravotní stav. Dochází ke snížení mortality, díky vytrénovanějšímu kardiovaskulárnímu systému. Také byla zaznamenána lepší imunita ryb, ke které přispívá právě pohyb.

Kromě toho jsou u RAS ještě další faktory, které ovlivňují růst ryb, a to sice: světlo, teplota, salinita vody, pH, přítomnost organických materiálů ve vodě, četnost krmení, počet ryb v chovné nádrži, obsah kyslíku a oxidu uhličitého ve vodě [9]. Nicméně tyto faktory přímo nesouvisejí s tématem mé práce a proto je zde nebudu obsáhleji popisovat.

### 1.3 Zvažované metody určené ke stanovení rychlosti proudění

Jak je vidět z předchozí podkapitoly, pro co nejefektivnější chov ryb je nutností správné nastavení rychlostního profilu v chovném tanku. Nicméně klasické měření za použití ručního přístroje je velmi časově náročné, pokud chceme dostatečně podrobně zmapovat rychlostní pole ve sledované nádrži.

Jednou z možných alternativ by mohla být PIV (particle image velocimetry) metoda. Její aplikace pro stanovení rychlostního profilu na hladině byla popsána kolektivem autorů sdružených kolem S. Kantoush [12].

Nicméně, pro tuto aplikaci není znalost rychlostního profilu pouze na hladině dostačující - z toho důvodu byla vyvinuta modifikace této metody využívající stereovizi, která dokáže poskytnout informace i o rychlostním profilu v hloubce [16].

#### 1.3.1 Princip stereovize [16]

Princip této metody spočívá v tom, že snímaná nádrž je sledována dvojicí kamer instalovaných v pevně určené vzdálenosti. U těchto kamer je známá jejich snímkovací frekvence.

Po zkalibrování kamer je následně do nádrže vypuštěna sada objektů, které mají být v rámci postprocesingu sledované (v případě [16] šlo o sadu míček napuštěných kapalinou o hustotě blízké hustotě vody - díky tomu byly volně unášeny proudem). Takto pořízená videa je poté potřeba ořezat, aby začínala stejným snímkem. Poté přichází na řadu samotný postprocesing.

Při zpracování videa dohází k tomu, že program prochází pořízený video záznam snímek po snímku. Na základě přednastavených limitů detekuje pouze míčky (či jiný sledovaný objekt)

a u tohoto objektu poté určí jeho střed. Dalším krokem je vyhledání správných párů ze snímků pořízených levou a pravou kamerou. Po tomto kroku pak následuje zapsání středů všech detekovaných objektů jak v levém, tak pravém snímku a algoritmus se přesouvá na další snímek.

Poté, co je takto zanalyzován celý záznam, přichází další fáze hledání správných párů. Nyní však nejde o pár z levé a pravé kamery, ale o správný pár ze současného a nadcházejícího snímku. Na základě známé snímkovací frekvence kamery a souřadnic středu míčku ve dvou časových okamžicích se pak dá stanovit rychlost v daném místě.

### 1.3.2 Problémy metody postavené na stereovizi

Přestože se tato metoda ukázala jako přesná (odchylka od naměřených dat byla 10%), ukázalo se, že při aplikaci na nádrž s rybami dochází k tomu, že ryby se takto vypuštěných objektů lekají, a svým pohybem je vychylují z dráhy kterou získaly díky proudění v nádrži. Díky tomu by bylo poměrně obtížné tuto metodu reálně aplikovat, protože by pro každé stanovení rychlosti bylo nutné z nádrže nejprve odebrat v ní chované ryby, a ty do ní po skončení měření vrátit.

Příklad instalace takového stereovizního systému je na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Stanovení rychlosti proudění pomocí stereovize





## Kapitola 2

# Motivace a cíle práce

Jak bylo nastíněno v předchozí kapitole, pro úspěšný chov ryb je nezbytné správně navrhnout takové proudění, které je pro chovaný druh vyhovující. Při návrhu nového typu nádrže je přitom ekonomicky nákladné stavět její prototyp a poté na něm měřit rychlostní pole. Stejně tak je časově náročné provádět měření na existujících systémech, které byly určitým způsobem modifikované za účelem vylepšení toku. Z těchto důvodů se hledají nové metody stanovení rychlosti a CFD může být jednou z nich.

Proto hlavním cílem této diplomové práce je ověřit možnost využití CFD metody pro návrh chovné nádrže využitelné u RAS systémů. Hlavní důraz v této práci je přitom kladen na správné stanovení rychlosti proudění, které je kritické pro optimální růst chovaných ryb.

Z tohoto důvodu bude v práci popsána metoda testování různých výpočetních modelů nabízených programem Ansys Fluent a vyhodnocení výsledků simulace na základě porovnání s experimentálně změřenými daty pocházejícími z chovné nádrže využívané pracovníky výzkumného centra Jihočeské univerzity.

Dále bude v práci provedena analýza vlivu počtu elementů na přesnost řešení simulace.

Posledním bodem je návrh optimalizace rychlostního pole pomocí instalace přepážky, simulace tohoto řešení a porovnání výsledků simulace s instalací tohoto vylepšení na existující chovné nádrži.



## Kapitola 3

# Experimentální měření

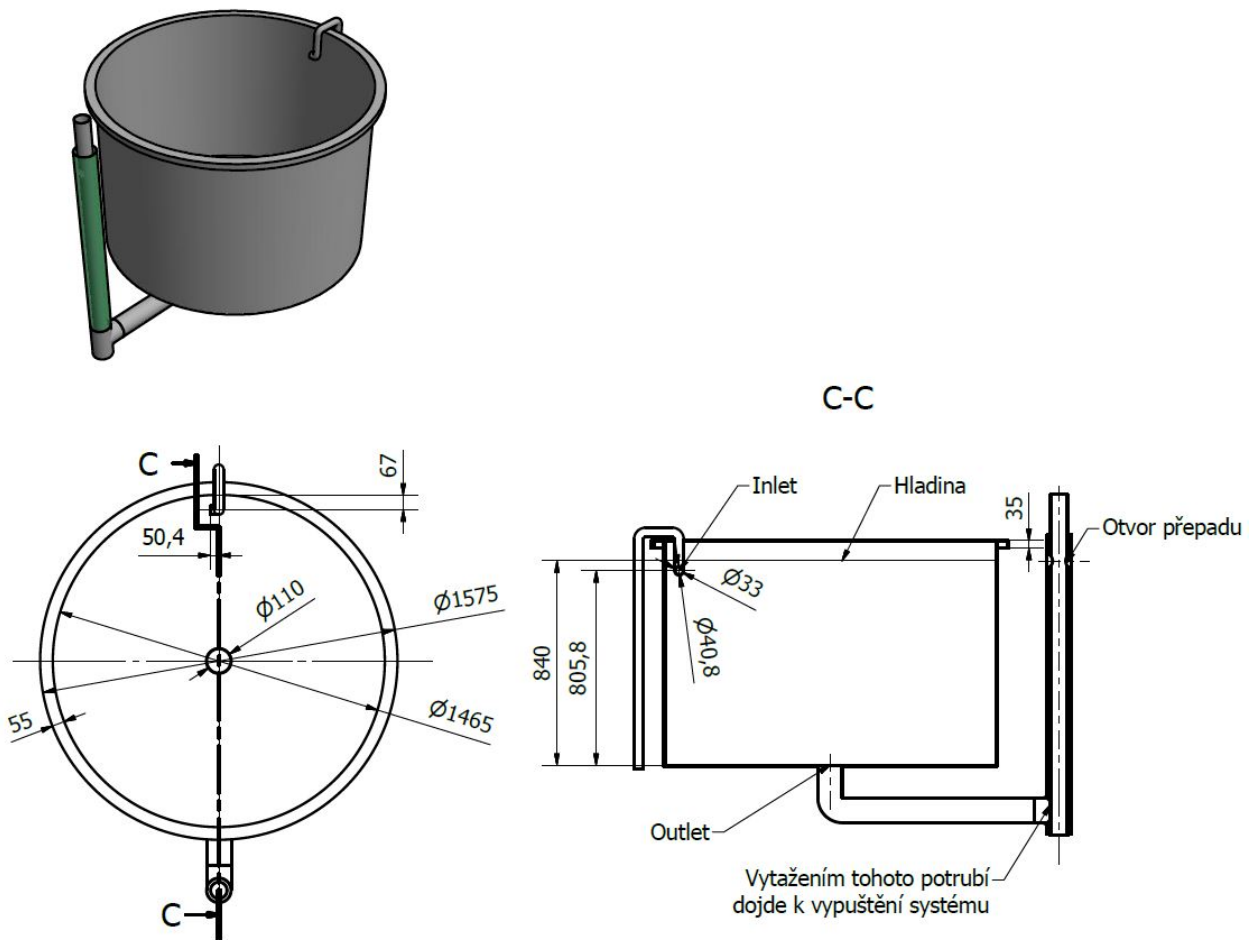
### 3.1 Popis systému

Všechna měření, která jsou popsána v této kapitole, byla provedena ve výzkumném ústavu rybářském a hydrobiologickém (VÚRH) ve Vodňanech. Toto výzkumné centrum spadá pod fakultu Rybářství a ochrany vod Jihočeské Univerzity v Českých Budějovicích a nacházejí se v něm pracoviště jako například Experimentální rybochovné pracoviště, Genetické rybářské centrum či Laboratoř intenzivní akvakultury.

Měření uvedená v této kapitole byla provedena na nádobě, která je standardně využívána místními pracovníky pro jejich výzkum. Rozměry této nádoby jsou pak na obrázku 3.1. Čerstvá voda byla do systému dodávána potrubím, které je na obrázku označeno jako "inlet". Výpust nádoby se pak nacházela na jejím dně, kde tento otvor byl opatřen hrubou mříží kvůli filtraci velkých nečistot. Na obrázku je toto místo označeno jako "outlet". Výška hladiny byla regulována pomocí výšky přepadu. Toho bylo docíleno díky využití efektu spojených nádob. K celkovému vypuštění pak sloužila konstrukce přepadu, kdy samotný výřez přepadu byl umístěn na vnitřní trubce, která mohla být vytažena z výřezu umístěného na vnější trubce. Díky tomu přepad přestal plnit svoji funkci a došlo k rapidnímu odtoku vody ze systému. Pro napuštění nádoby pak stačilo vnitřní trubku opět zasadit do výřezu ve vnější trubce, čímž se zvýšilo místo odtoku až na úroveň přepadu.

Protože tato chovná nádoba byla připojena na existující systémy rozvodu vody, bylo pro mě nemožné dodatečně instalovat další moduly, jako například průtokoměr či ventil s přesnější regulací. Kvůli tomu jsem pro zjištění objemového přítoku do systému musel využít relativně jednoduché, avšak nepřesné, metody, spočívající v měření času, za který se naplnila nádoba o objemu 5 litrů. Toto měření jsem opakoval pětkrát. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Z těchto hodnot jsem poté stanovil průměrnou hodnotu hmotnostního přítoku do systému. K tomu mi posloužila rovnice 3.1 a numerická hodnota hustoty vody v kapalném skupenství, která je uvedena v knihovně materiálu v programu Ansys Fluent ( $\rho = 0.9982 \text{ [kg/dm}^3\text{]}$ ).



Obrázek 3.1: Rozměry simulované nádoby

Měření	Čas [s]	Obj. tok $V_i$ [ $dm^3/s$ ]	Hmotnostní tok [kg/s]
1	9.65	0.518	0.517
2	10.3	0.485	0.485
3	10.2	0.490	0.489
4	9.9	0.505	0.504
5	10.2	0.490	0.489

Tabulka 3.1: Stanovení hmotnostního přítoku

$$\frac{\sum_{k=1}^n V_i}{n} \rho = \frac{2.48901427}{5} 0.9982 = 0.4969 \quad [\text{kg/s}] \quad (3.1)$$

Kde  $V_i$  [dm<sup>3</sup>/s] je objemový tok v daném měření,  $n$  je počet měření a  $\rho$  je hustota použité kapaliny - v tomto případě vody.

## 3.2 Měřicí přístroj

Pro změření experimentálních hodnot jsem použil měřicí přístroj FlowTracker® Handheld ADV® (Acoustic Doppler Velocimeter) od firmy SonTek/YSI. Ten ke stanovení rychlosti v kontrolním objemu, využívá Dopplerova efektu, který „popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného, oproti vysílanému signálu, působenu nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače“ [1].

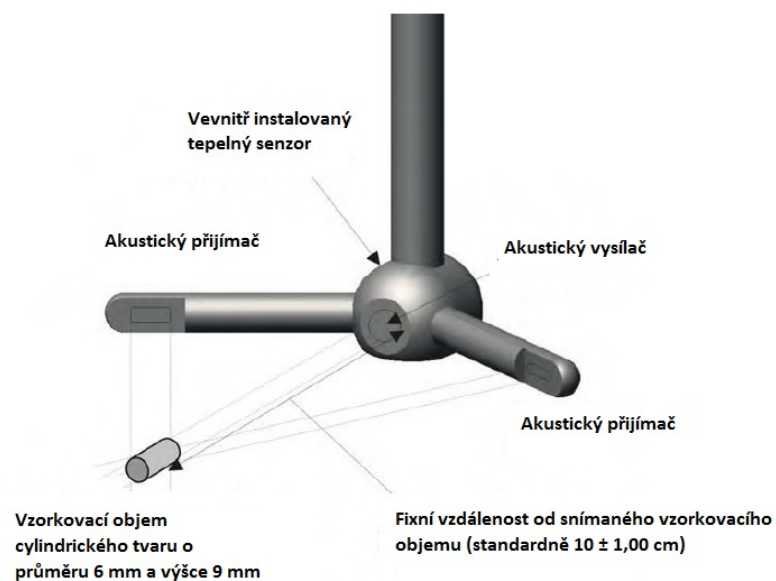
Firma SonTek/YSI dodává tento přístroj ve dvou provedeních. Ta se liší použitým počtem přijímačů signálu – ty pak určují, jestli daný model je schopen měřit rychlost v prostoru – složky rychlosti  $V_x$ ,  $V_y$  a  $V_z$  (3 přijímače), či jen v ploše – složky rychlosti  $V_x$  a  $V_y$  (2 přijímače). My jsme měli k dispozici druhou jmenovanou variantu. Popis měřicí hlavičky této varianty přístroje je na obrázku 3.2, rozměry sondy pak na obrázku 3.3. Ty jsou důležité zejména pro konkrétní stanovení měřeného místa – viz popis měření. Nicméně vzdálenost konkrétního měřeného objemu od vysílače je dle manuálu udána s přesností  $\pm 1,00$  cm [19].

Přístroj jsem použil ve standardním nastavení v River Discharge modu. Jediná hodnota, kterou jsem před samotným měřením pozměnil, byla doba vzorkování – ze standardních 45 sekund jsem ji snížil na 30 sekund z důvodu snížení celkové časové náročnosti. Pro případné budoucí měření bych však doporučil využít General mod, a to z důvodu okamžitého zobrazení složek rychlosti  $V_x$  a  $V_y$ . Díky tomu není nutné později dopočítávat složku rychlosti  $V_y$  – viz popis naměřených veličin. Nicméně ničemu jinému použití zvoleného modu nevádí (River Discharge mod je na rozdíl od General modu schopen rovnou v terénu vypočítat celkovou rychlost ve vodním toku na základě dílčích měření na jednotlivých stanovištích. A tomuto účelu jsou podřízeny zobrazované měřené veličiny [19]).

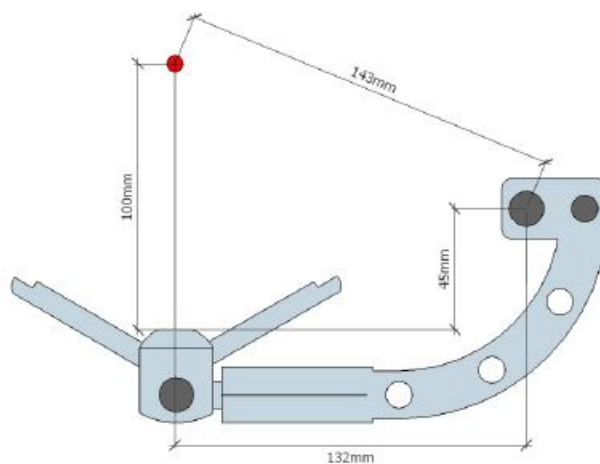
Měřicí sonda je připojena na vodící tyč, která má na sobě vyznačené dělení po 4 cm. Vršek vodící tyče je opatřen malou vodováhou, protože z důvodu přesnosti měření je nutné mít vodící tyč ve svislé měřicí pozici.

## 3.3 Popis měření

Jak již bylo řečeno, samotné měření probíhalo v nádobě na obrázku 3.1. Pro mé účely jsem si v nádobě zavedl cylindrický souřadný systém, kde jeho počátek byl umístěn ve středu kruhového dna nádoby. Jako vodící prvky, které měly zajistit přesné zopakování polohy, mi sloužily dva jekly s X profilem. Jeden z nich měl délku větší, než je průměr nádoby. Ten byl nepohyblivý a na koncích k nádobě připevněný pomocí tesařských svorek. Druhý profil měl



Obrázek 3.2: Popis měřící hlavice přístroje FlowTracker® Handheld ADV®  
Převzato z: [19]



Obrázek 3.3: Rozměry použité sondy

délku zhruba poloměru nádoby. Tyto dva profily pak byly spojeny pomocí otočného kloubu umístěného uprostřed delšího jeklu. Toto uspořádání je patrné na obrázku 3.4

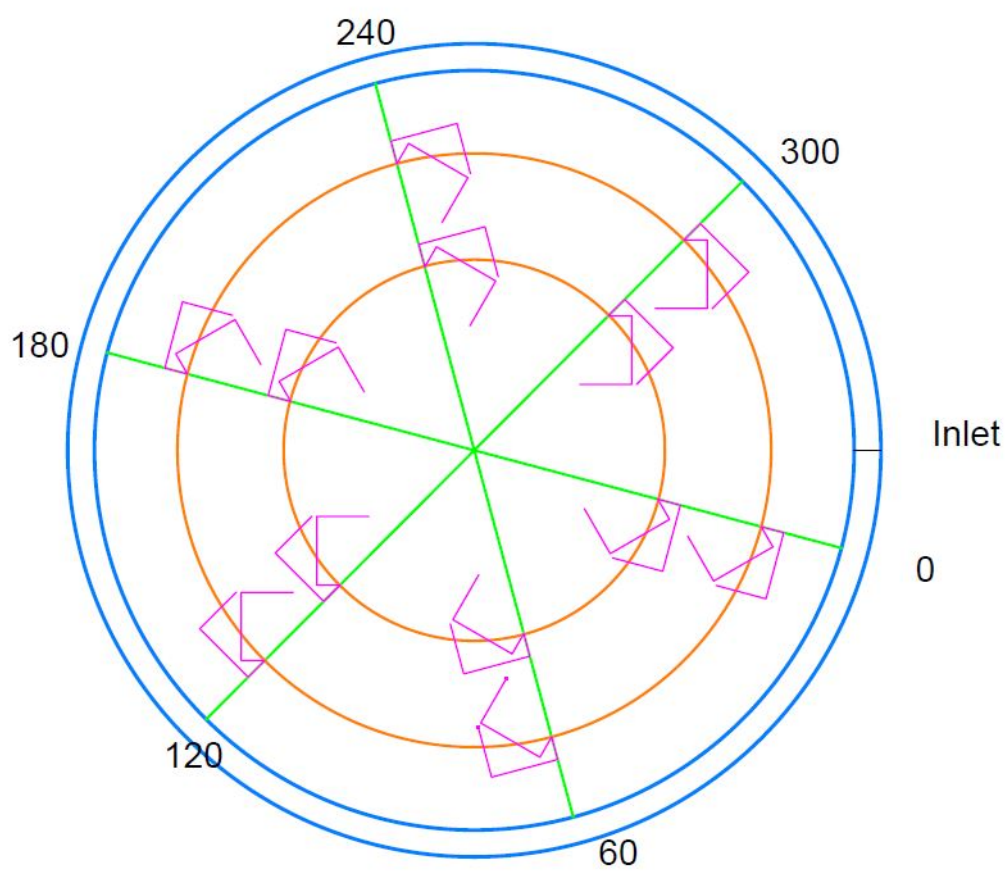


Obrázek 3.4: Umístění vodících tyčí na nádobě

Na samotné kádě jsem si vyznačil kruhové výseče po 60 stupních. Bod, který měl reprezentovat 0 stupňů, byl umístěn za přívodní potrubí, kterým do kádě vtékala voda, a to na průřezu kružnice (s poloměrem 190 mm a středem na průřezu osy přívodního potrubí a vnitřní hrany kádě) a vnitřní hrany měřeného tanku. Další body jsem pak dostal díky odměřování vzdálenosti (stanovil jsem si obvod vnitřní hrany nádoby, vydělil jej 6 a tuto hodnotu jsem zhruba dvakrát iteroval, než jsem dostal šest stejně dlouhých úseků, ležících mezi jednotlivými body značícími začátek kruhové výseče).

Na otočné vodící liště jsem pak měl umístěnou zarážku, která mi umožnila mít měřicí přístroj v úhlu 90, případně 45 stupňů vůči této liště, a značky značící dva mnou zvolené poloměry  $R_2 = 367$  mm a  $R_1 = 573$  mm (měřeno od středu nádoby). Na takto stanovených kružnicích jsem umístil spodní opěru vodící tyče měřáku (tyto kružnice jsou na obrázku vyznačeny oranžovou barvou). Toto uspořádání mi umožnilo získat dvakrát více měřených bodů. Znázornění umístění jednotlivých bodů, ve kterých probíhalo měření, je na obrázku 3.5. Další použité barvy značí:

- Zelená – pozice vodící tyče
- Modrá – vnitřní a vnější okraj nádoby
- Ružová – pozice hlavice sondy, respektive středu kontrolního objemu (na konci vzdálenějším od průřezu zelené přímky a oranžové kružnice).



Obrázek 3.5: Schéma umístění měřených pozic v nádobě



Na každé výškové hladině jsem tak měl 24 bodů k proměření. Měřil jsem na 3 hladinách, a to sice  $h_1 = 40$  mm,  $h_2 = 400$  mm a  $h_3 = 800$  mm ode dna nádoby. Výška volné hladiny se nacházela ve vzdálenosti 840 mm ode dna nádoby.

### 3.4 Naměřené hodnoty a jejich popis

Samotnému měření by měly předcházet následující úkony [19]:

- Sestavení rozmontovaného měřáku
- Terénní diagnostika přístroje (datum, kapacita baterií, teplota, čas, . . . )
- Nastavení systémových parametrů důležitých pro měření (vybrání požadovaného systému jednotek; vybrání modu sběru dat; nastavení hranice, za kterou budou změřené výsledky považované za nedůvěryhodné; nastavení doby, po kterou bude probíhat měření v jednom konkrétním objemu).
- Pojmenování datového souboru.
- Pojmenování lokace (kvůli případnému exportu naměřených dat do PC – měřák samotný má na jedné lokaci paměť na 99 měření).
- Jméno operátora přístroje
- Před prvním měřením je nutné provést automatický test přístroje

Po splnění těchto bodů se dá provádět samotné měření – na obrázku 3.6 jsou vidět údaje zobrazované při samotném měření a po skončení měření. Ty vznikají jako průměr z hodnot změřených v průběhu zvoleného časového úseku po odfiltrování tzv. outliers bodů. Operátor má možnost se rozhodnout, zda akceptuje zobrazená data a posune se na další stanoviště, či dá na případné doporučení přístroje (zobrazené na základě předem nadefinovaného threshold limitu) a měření zopakuje. V takovém případě se původně naměřená data v přístroji nesmažou, stále budou uvedena v datovém souboru, ovšem z prostředí samotného přístroje se k nim již není možné se dostat.

Loc 2.00	MDep .6D	Vel 2.25	$\sigma_V$ 0.04
Vel 2.23		Ang 5°	SNR 15.1
SNR 14.3		Spikes 0	Bnd BEST
Time 19		1:Accept	2:Repeat

(a) Hodnoty zobrazené na přístroji při měření

Převzato z: [19]

(b) Hodnoty zobrazené na přístroji po měření

Převzato z: [19]

Obrázek 3.6: Údaje zobrazené přístrojem FlowTracker® Handheld ADV®

Samotná naměřená data jsou v tabulkách 3.2 (pro 90 stupňů) a 3.3 (pro 45 stupňů). Sloupce označené jako  $R_i$   $h_i$  označují měřenou polohu kde  $R_i$  reprezentuje měřený poloměr a  $h_i$  hloubku, na které bylo dané měření provedeno.

Jednotlivé změřené a dopočítané veličiny jsou definovány takto [19]:

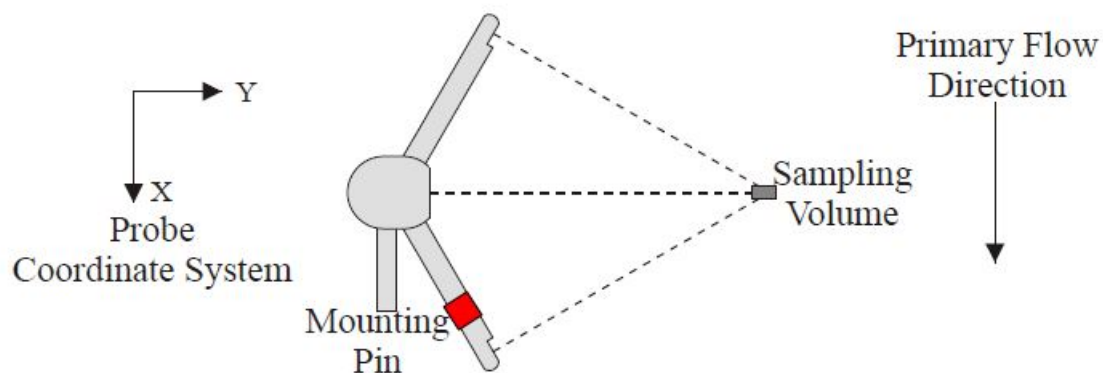
- SNR [dB] - Signal to noise ratio. Je definován jako poměr energie odraženého signálu a energie okolního šumu. Tento údaj má největší vypovídací hodnotu o kvalitě měření. Pro každé měření by měla být hodnota SNR větší než 4 dB. Pokud tomu tak není, může to být způsobeno nedostatkem rozpuštěných látek/ částic materiálu ve vodě, jejichž koncentrace má na SNR největší vliv. Toto se dá napravit pomocí přidání materiálu do vody, který pomůže lepšímu odrazu signálu. Se správnou kalibrací se pak pomocí tohoto ukazatele dá měřit koncentrace částic ve vodě. Pokud se SNR v průběhu měření odlišuje o více než 5 dB, může to značit následující problémy: rušení od ponořené překážky, vysoce turbulentní prostředí, či velmi provzdušněnou vodu. Toto však rozhodně neznamená, že by naměřená data byla nedůvěryhodná, nicméně je dobré přezkontrolovat, který ze zmiňovaných důvodů může být za tento rozdíl zodpovědný a případně měření zopakovat.
- Rychlost  $V_x$  [m/s] - tato veličina se na měřicím přístroji zobrazuje jako hodnota Vel v modu měření Discharge mode. Ve výše zmíněném General modu se pak rovnou ukazují jednotlivé složky rychlostí. Rychlost je měřena v ose x, která je pro měření ve vodních tocích předpokládána jako dominantní. Orientace osy x je dána orientací sondy – viz obrázek 3.7.
- $\sigma V_x$  [m/s] - směrodatná odchylka měření rychlosti  $V_x$
- Úhel  $\alpha$  [°] - tato měřená veličina je na displeji přístroje zobrazena jako Ang. Tento úhel je definován jako  $\arctan(\frac{V_y}{V_x})$ . Úhel o velikosti 0 stupňů by tak znamenal, že osa y přístroje je kolmá na směr toku. Z tohoto důvodu jsem tento údaj mohl využít k dopočítání následující veličiny. Standardně je velikost tresholdu pro tuto veličinu v přístroji nastavena na 20° pro měření průměrné rychlosti proudění ve vodním toku, nicméně díky povaze tohoto měření, kdy nás zajímá jak rychlost v ose x, tak y, jej můžeme ignorovat.
- Rychlost  $V_y$  [m/s] – veličina dopočítaná ze změřeného úhlu. Rychlost  $V_y$  jsem dopočítal podle rovnice 3.2.
- Rychlost  $V$  [m/s] – dopočítaná velikost rychlosti v ploše. Tato veličina byla vypočtena podle rovnice 3.3.

$$V_y = V_x \operatorname{tg}(\alpha) \quad [\text{m/s}] \quad (3.2)$$

Kde  $V_y$  je rychlost ve směru osy sondy y [m/s],  $V_x$  je rychlost ve směru osy sondy x [m/s] a  $\alpha$  je úhel [stupně] získaný pomocí měření.

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad [\text{m/s}] \quad (3.3)$$

Kde  $V_y$  je rychlost ve směru osy sondy y [m/s],  $V_x$  je rychlost ve směru osy sondy x [m/s] a  $V$  je výsledná rychlost v ploše [m/s].



Obrázek 3.7: Orientace souřadného systému sondy  
Převzato z: [19]

Pozice	Měřená veličina	$R_1, h_1$	$R_1, h_2$	$R_1, h_3$	$R_2, h_1$	$R_2, h_2$	$R_2, h_3$
0°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.073	0.084	0.075	0.048	0.057	0.067
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Úhel $\alpha$ [°]	-2	2	-3	-14	-10	-20
	Rychlost $V_y$ [m/s]	-0.003	0.003	-0.004	-0.012	-0.01	-0.024
	Rychlost $V$ [m/s]	0.073	0.084	0.075	0.049	0.058	0.071
	SNR [dB]	22.1	27	32.2	20.4	24	22.8
	60°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.088	0.077	0.073	0.055	0.057
$\sigma V_x$ [m/s]		0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001
Úhel $\alpha$ [°]		-7	-6	-10	-15	-14	-36
Rychlost $V_y$ [m/s]		-0.011	-0.008	-0.013	-0.015	-0.014	-0.033
Rychlost $V$ [m/s]		0.089	0.077	0.074	0.057	0.059	0.056
SNR [dB]		25.3	28.5	31.1	20.4	22.8	24.6
120°		Rychlost $V_x$ [m/s]	0.082	0.067	0.079	0.063	0.05
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Úhel $\alpha$ [°]	-6	-2	-9	-17	-14	-33
	Rychlost $V_y$ [m/s]	-0,009	-0.002	-0.013	-0.019	-0.013	-0.031
	Rychlost $V$ [m/s]	0,082	0.067	0.080	0.066	0.052	0.056
	SNR	23.6	25.3	32.2	20.4	23.9	26.4
	180°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.081	0.071	0.083	0.054	0.045
$\sigma V_x$ [m/s]		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Úhel $\alpha$ [°]		-7	-3	-9	-20	-22	-19
Rychlost $V_y$ [m/s]		-0.01	-0.004	-0.013	-0.02	-0.018	-0.015
Rychlost $V$ [m/s]		0.082	0.071	0.084	0.058	0.049	0.047
SNR		21.7	26.2	31.8	21.5	21.9	22.8
240°		Rychlost $V_x$ [m/s]	0.078	0.07	0.083	0.053	0.047
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
	Úhel $\alpha$ [°]	-7	-10	-10	-22	-22	-24
	Rychlost $V_y$ [m/s]	-0,01	-0.123	-0.015	-0.021	-0.019	-0.022
	Rychlost $V$ [m/s]	0.079	0.712	0.084	0.057	0.051	0.054
	SNR	23.4	25.8	32.8	20.6	20.6	26.6
	300°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.077	0.079	0.083	0.052	0.048
$\sigma V_x$ [m/s]		0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
Úhel $\alpha$ [°]		-12	-10	-17	-8	-21	-31
Rychlost $V_y$ [m/s]		-0.016	-0.014	-0.025	-0.007	-0.018	-0.029
Rychlost $V$ [m/s]		0.079	0.080	0.087	0.053	0.051	0.057
SNR		24.6	26	32.6	18.9	22.8	26.8

Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty pro úhel sondy 90 stupňů

Pozice	Měřená veličina	$R_1, h_1$	$R_1, h_2$	$R_1, h_3$	$R_2, h_1$	$R_2, h_2$	$R_2, h_3$
0°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.066	0.074	0.066	0.05	0.054	0.07
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002
	Úhel $\alpha$ [°]	28	31	30	21	28	16
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0,035	0.044	0.038	0.019	0.029	0.020
	Rychlost $V$ [m/s]	0.075	0.086	0.076	0.054	0.061	0.073
	SNR	21.6	28.8	29.9	19.5	22.3	23.2
60°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.077	0.065	0.065	0.054	0.054	0.063
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.033	0.044	0.039	0.022	0.025	0.021
	Rychlost $V$ [m/s]	0.084	0.078	0.076	0.058	0.060	0.066
	Úhel $\alpha$ [°]	23	34	31	22	25	18
	SNR	24	26.4	29.2	20	21.6	23.6
120°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.071	0.06	0.068	0.066	0.052	0.06
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Úhel $\alpha$ [°]	31	32	27	22	24	16
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.043	0.038	0.035	0.027	0.023	0.017
	Rychlost $V$ [m/s]	0.083	0.071	0.076	0.071	0.057	0.062
	SNR	20.9	24.9	30	18.5	21.5	23.8
180°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.064	0.06	0.072	0.061	0.049	0.049
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
	Úhel $\alpha$ [°]	35	34	33	17	24	20
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.045	0.041	0.047	0.019	0.022	0.018
	Rychlost $V$ [m/s]	0.078	0.072	0.086	0.064	0.054	0.052
	SNR	20.1	24.6	31.1	17.1	20.9	23
240°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.066	0.067	0.072	0.057	0.047	0.054
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
	Úhel $\alpha$ [°]	30	24	27	17	21	15
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.038	0.030	0.037	0.017	0.018	0.014
	Rychlost $V$ [m/s]	0.076	0.073	0.081	0.059	0.050	0.056
	SNR	22.5	26.4	30.5	19.3	20.8	24.9
300°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.062	0.072	0.072	0.048	0.052	0.057
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003
	Úhel $\alpha$ [°]	31	24	27	25	18	17
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.037	0.032	0.037	0.022	0.017	0.017
	Rychlost $V$ [m/s]	0.072	0.079	0.081	0.053	0.055	0.060
	SNR	22.5	27.9	30.5	20.1	19.8	24.9

Tabulka 3.3: Naměřené hodnoty pro úhel sondy 45 stupňů



# Kapitola 4

## CFD simulace proudění

### 4.1 Tvorba geometrie modelu

K samotné tvorbě geometrie, která byla použita pro simulaci, jsem použil nástroj Design-Modeler, který je součástí programu Ansys. Tento modul není sice tak uživatelsky přívětivý, jako normálně používané komerční parametrické modeláře, nicméně pro modelovanou geometrii plně dostačuje. Navíc umožňuje využití parametrů, které se dají upravovat přímo z prostředí Ansys Workbench bez toho, aby se musela daná geometrie znovu načítat z externího souboru, který byl vytvořen v jiném softwaru.

Při modelování jsem přistoupil k několika zjednodušením:

- Z důvodu snížení počtu elementů jsem nemodeloval celý potrubní systém, který slouží k odtoku vody z nádoby. Vytvořil jsem jen část jdoucí kolmo ze dna nádoby o délce 95 mm.
- Také jsem zjednodušil přívodní potrubí do systému. Modeloval jsem jen část, kterou vytékala voda do tanku, koleno a rovné přívodní potrubí o délce 500 mm, které bylo směřované kolmo k hladině. Toto uspořádání bylo zvoleno kvůli vytvoření rychlostního profilu.

Samotný objem modelované kapaliny byl rozdělen na několik dílčích celků. K tomuto dělení jsem přistoupil z důvodu lepších možností ovlivnit síťování, případně kvůli nutnosti definovat v různých oblastech jiné výpočetní modely (viz. Zvažované přístupy k modelování systému):

- Rovný úsek přívodního potrubí. Tento celek byl ukončen počáteční hranou kolene umístěného na přívodním potrubí. Tento úsek byl využit pro aplikaci sweep metody během síťování.
- Koleno přívodního potrubí a část vyústění do nádoby. Tento objem byl nutný pro některé výpočetní modely. Ve finálním modelu však není nutné jej oddělovat od tělesa vyhrazeného pro nádobu.

- Samotná nádoba. Kvůli nutnosti napojení elementů vytvořených pomocí inflation jsem do tohoto celku přidal také část přívodního potrubí. Samotná nádoba pak byla ještě v některých případech dělena horizontálně, kvůli vytvoření zón, ve kterých bude proudění kapaliny počítáno pomocí laminárního modelu – viz podkapitola výběr vhodného výpočetního modelu

Rozměry, podle kterých jsem model tvořil, jsou na obrázku 3.1. V Design Modeleru jsem také využil možnost pojmenování některých ploch, a to kvůli snadnějšímu nastavení okrajových podmínek ve Fluentu. Konkrétně šlo o plochy představující hladinu, stěny nádoby a přívodního potrubí, přívod a odvod vody ze systému.

## 4.2 Tvorba sítě pro výpočetní model

Síť pro tuto úlohu jsem vytvořil v dalším podprogramu softwarového balíku Ansys, konkrétně šlo o Ansys Meshing.

Při tvorbě sítě jsem využil předchozího rozdělení na dílčí celky. Na část, která přivádí vodu do systému, jsem použil sweep metodu a následně aplikoval inflation. Výsledkem tak je síť složená z hexa elementů se zjemněním u stěny potrubí. Konkrétně jsem použil 5 vrstev.

Na část tvořící koleno přívodního potrubí, stejně jako na zbylé plochy představující stěny, jsem taktéž aplikoval inflation. K určení počtu elementů v síti jsem jako rozhodující použil položky Max face size a Max size, které jsem měl nastavené jako parametr. Velikost většiny elementů, které se nalézají právě v centrálním prostoru nádoby, kde jsem experimentálně zjišťoval hodnoty, je totiž ovlivněna právě touto volbou. Díky změně hodnot těchto dvou parametrů jsem pak mohl jednoduše škálovat síť při určování vlivu jemnosti sítě na přesnost řešení výpočtu.

V tomto případě byly použité tetrahedral elementy.

## 4.3 Analýza vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení

Protože výsledky numerické simulace závisejí na počtu elementů, které obsahuje pro daný účel použitá síť, je nutné pokusit se dopředu stanovit takovou velikost sítě, která by vyhovovala dvěma proti sobě jdoucím kritériím – velkému počtu elementů pro co největší přesnost, a co nejkratšímu výpočetnímu času, který ovšem s počtem elementů roste.

Pro analýzu vlivu počtu elementů na kvalitu výpočtu jsou potřeba tři sítě s odlišným počtem elementů. Velikosti těchto sítí se dají stanovit podle rovnice 4.1, která určuje poměr velikosti elementů pro jednotlivé sítě. Dle doporučení by měl být tento poměr větší než 1,3.

$$r_{1,2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{1/D} \quad [-] \quad (4.1)$$

V této rovnici  $N_1$  představuje počet elementů jemnější sítě,  $N_2$  hrubší sítě a  $D$  je koeficient určující, zda je daná síť použita pro 2-D ( $D=2$ ) či 3-D případ ( $D=3$ ). Podle tohoto vzorce se tak dá snadno určit, že pro 3-D geometrii by měl poměr elementů v sítích být větší než 2,2. [3].



### 4.3.1 Postup výpočtu

Tento postup výpočtu byl publikován v článku [11].

- 1) Výběr 3 dostatečně rozdílných sítí (co se týká počtu elementů - viz rovnice 4.1). Je doporučeno používat geometricky podobné buňky sítě. Také struktura těchto sítí by měla být pro tuto aplikaci identická.
- 2) Seřazení použitých sítí podle počtu elementů v sestupném pořadí (tj.  $N_1 > N_2 > N_3$ ). Následně se pro tyto sítě spočítá podle rovnice 4.1 faktor zjemnění sítě. Poté se vypočítají koeficienty dle těchto rovnic:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\epsilon_{32}}{\epsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (4.2)$$

Kde

$$q(p) = \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (4.3)$$

a člen  $s$  se vypočte dle

$$s = 1 \operatorname{sign} \left( \frac{\epsilon_{32}}{\epsilon_{21}} \right) \quad (4.4)$$

kde  $\epsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$  a  $\epsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ .  $\phi_i$  představuje porovnávanou hodnotu stanovenou výpočtem na příslušné síti určené dolním indexem. Pokud by byla hodnota výrazu  $\epsilon_{32}/\epsilon_{21}$  záporná, značí toto oscilující konvergenci. Další faktor, který by se měl vzít v úvahu, spočívá v přílišné blízkosti hodnot  $\epsilon_{32}$ ,  $\epsilon_{21}$  nule. Pokud tato situace nastane, může to znamenat opět oscilující konvergenci, či že dané řešení se rovná přesnému řešení.

- 3) Výpočet extrapolované hodnoty řešení z rovnice:

$$\phi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (4.5)$$

Obdobně se pak dá stanovit extrapolovaná hodnota  $\phi_{ext}^{32}$ .

- 4) Grid convergence index (GCI) a stanovení odchylek

Relativní odchylka

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| 100 \quad [\%] \quad (4.6)$$

Relativní odchylka od extrapolované (teoreticky přesné) hodnoty

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{12} - \phi_2}{\phi_{ext}^{12}} \right| 100 \quad [\%] \quad (4.7)$$

Výpočet GCI, který charakterizuje míru konvergence mezi dvěma sítěmi.

$$\text{GCI}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (4.8)$$

### 4.3.2 Použité sítě a výsledky analýzy

Pro analýzu sítě jsem použil tyto následující sítě, jejichž parametry jsou uvedené v tabulce 4.1. Jako porovnávaná veličina mi posloužila tlaková ztráta vypočtená dle rovnice 4.9, kdy  $p_{out}$  byl díky použití podmínky pressure outlet vždy roven 0.

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad [\text{Pa}] \quad (4.9)$$

Síť číslo	Počet elementů N	Element quality - mesh average	Tlaková ztráta $\Delta p$ [Pa]
3	3.6175e5	0.7320	233.67462
2	7.9162e5	0.7643	231.66542
1	1.9209e6	0.78874	229.81216

Tabulka 4.1: Parametry sítí použitých pro analýzu

Tyto hodnoty jsem poté spočítal pomocí programu Matlab. Použitý kód je převzatý z [3] a doplněný o výpočty některých hodnot. Skript je k nalezení v příloze A.1. Výsledky jsou sepsané v tabulce 4.2.

Počítaná veličina	Numerická hodnota dané veličiny
$r_{21}$	1.3438
$r_{32}$	1.2983
$\phi_{ext}$	222.19 [Pa]
p	0.7373
$e_a^{21}$	0.8064 [%]
$e_a^{32}$	0.8673 [%]
$e_{ext}^{21}$	<b>3.4263</b> [%]
$e_{ext}^{32}$	4.26 [%]
$GCI_{21}$	<b>4.1410</b> [%]
$GCI_{32}$	5.1078 [%]

Tabulka 4.2: Výsledky analýzy

Jak je vidět z velikosti koeficientu  $r_{32}$ , správně bych měl použít o něco rozdílnější velikosti sítě. Nicméně hodnota je skoro rovna 1,3, a proto jsem se danou sítí rozhodl i tak použít (z důvodu toho, že jsem před provedením samotné analýzy danou sítí použil k testování jednotlivých výpočetních modelů).

Pro přesné výpočty jsem se pak na základě získaných výsledků rozhodl použít síť číslo 1 s 1 920 904 elementy. Pro tuto síť je hodnota koeficientu GCI rovna 4,141 % a odchylka od extrapolované hodnoty je 3,426 %, což mi přijde dostačující.

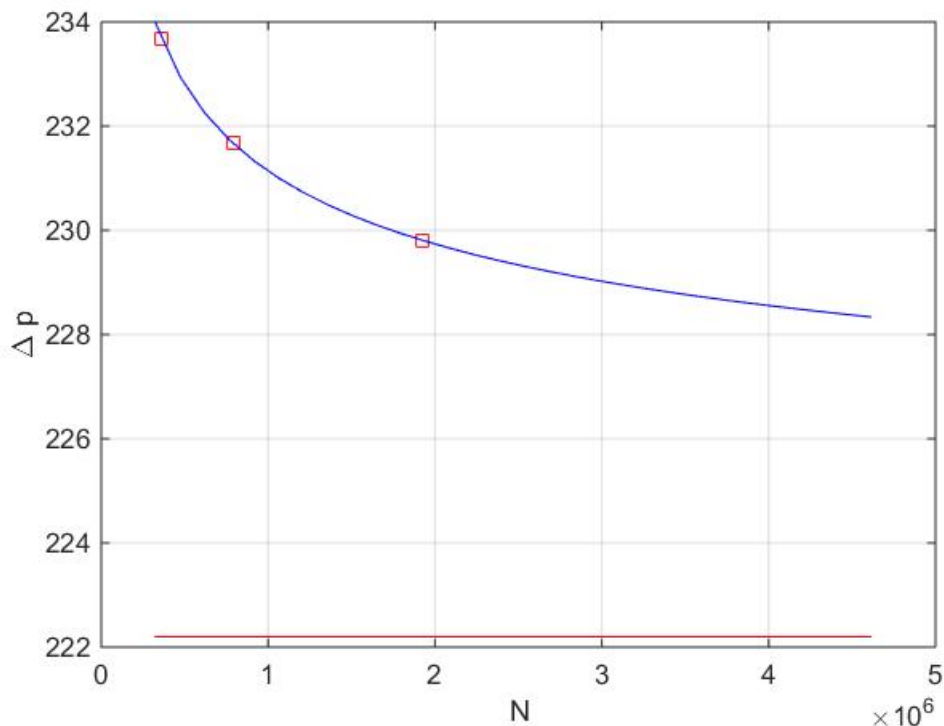
Při využití rychlosti na výstupu ze systému jako porovnávané veličiny, je poté rozdíl od vypočtené hodnoty dle 4.10 mnohem větší - velikost odchylky  $e_{ext}^{32}$  od extrapolované veličiny

je 10,83%, kdežto  $e_{ext}^{21} = 1,8041\%$ .

Rychlost na výstupu je vypočtena pro plochu výstupního potrubí  $S = 0.009503 \text{ [m}^2\text{]}$  a objemový průtok  $\dot{V} = 0.4978 \text{ [dm}^3\text{]}$  (hodnota  $\dot{V}$  je získána jako průměrná hodnota z  $V_i$  uvedených v tabulce 3.1).

Grafické znázornění výsledků analýzy je na obrázku 4.1. Červená přímka představuje hodnotu extrapolovaného řešení, modrá pak znázorňuje funkci popisující závislost stanovené tlakové ztráty na počtu elementů sítě.

$$v_{vyp} = \frac{\dot{V} \cdot 0.001}{S} = \frac{0.4978 \cdot 0.001}{0.08553} = 0.05238 \quad [\text{m/s}] \quad (4.10)$$



Obrázek 4.1: Analýza vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení

#### 4.4 Výběr vhodného výpočetního modelu

Kvůli tomu, že v modelovaném systému je v přívodním potrubí turbulentní proudění, které pak ale v samotné nádobě přechází do proudění laminárního, byl jsem nucen nejprve provést rámcové porovnání jednotlivých výpočetních modelů, které nabízí program Ansys Fluent, s naměřenými experimentálními výsledky. Tento postup mi pak napověděl, na které výpočetní modely se mám soustředit při časově náročnějších výpočtech s jemnější sítí, která se díky analýze vlivu počtu elementů na přesnost řešení ukázala jako vhodnější.

K tomuto porovnání jsem použil nejhrubší síť, která má  $3.6175e5$  elementů. Její podrobný popis je v kapitole 5.1. Tuto síť jsem zvolil z následujících důvodů:

- Hrubá síť není na výpočetní čas tak náročná, jako jemná síť.
- Školní verze programu Ansys Fluent 16.2 určená studentům je limitována na maximální počet 512 tisíc použitých elementů. Protože jsem potřeboval velmi často měnit určité parametry výpočetního modelu, nebylo by časově výhodné neustále nahrávat vytvořené modely, popřípadě stahovat výsledky, na/z výpočetní server ČVUT, který toto omezení nemá.

Při samotném testování jsem použil následující modely, které jsou postaveny na tzv. RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) přístupu k numerickému výpočtu proudění:

- Jednorovnicový model turbulence Spalart-Allmaras
- Dvourovnicové modely turbulence
  - Standard  $k-\epsilon$
  - RNG  $k-\epsilon$
  - Realizable  $k-\epsilon$
  - Standard  $k-\omega$
  - SST  $k-\omega$

#### 4.4.1 Popis jednotlivých modelů

Uvedené pořadí modelů také ukazuje, jak postupně roste jejich náročnost na výpočetní výkon (kdy Spalar-Allmaras je nejméně náročný, a SST  $k-\omega$  nejvíce. V materiálech od firmy Ansys [6] jsou jednotlivé modely popsány následovně.

- Spalart-Allmaras – ekonomické řešení pro velké sítě. Model je dobrý při nasazení na středně komplexních (quasi- 2D) sítích. Model je nasazován pro letecké aplikace - například případ obtékání křídla či střel. Další využití nalézá při simulacích, jako je obtékání trupu lodí.  
Tento model obsahuje jednu diferenciální rovnici, pomocí které počítá turbulentní kinetickou energii  $k$  [ $m^2/s^2$ ]
- Standard  $k-\epsilon$  – Robustní a často používaný model, i přes jeho známé omezení. Nepodává dobré řešení pro simulaci zahrnující obtékání křivočarých těles (jde hlavně o bod odtržení a velikost zavíření). Nicméně je vhodný pro počáteční iterace, počáteční porovnání chování alternativního návrhu a parametrické studie.  
Tento model počítá dvě diferenciální rovnice – jedna počítá kinetickou energii  $k$ , druhá pak rychlost disipace  $\epsilon$  [ $m^2s^{-3}$ ], která popisuje rozpad a zánik turbulentních vírů [8].

- Realizable  $k-\epsilon$  – Liší se od modelu Standard  $k-\epsilon$  jinou formulací rovnic popisujících kinetickou energii  $k$  a rychlost disipace. Na rozdíl od modelu Standard  $k-\epsilon$  je vhodný pro modely obsahující mezní vrstvy s vysokým nepříznivým gradientem tlaku, či recirkulaci [13].
- RNG  $k-\epsilon$  – je vhodný pro podobné aplikace jako předchozí Realizable  $k-\epsilon$  model. U nich nabízí i podobné výhody. Nicméně může konvergovat o něco obtížněji. Stejně jako u jiných  $k-\epsilon$  počítá relativně dobře plně vyvinuté turbulentní proudění volného proudu, nicméně u stěn přesnost modelu klesá.
- Standard  $k-\omega$  – podává dobrý výkon v blízkosti stěny, nicméně jeho přesnost klesá se vzdáleností od stěny. Jedná se tak přesností o opačný případ oproti modelům počítajícím kinetickou energii a rychlost disipace [8]. Rovnice pro výpočet disipace je nahrazena pomocí výpočtu specifické rychlosti disipace  $\omega$ .
- SST  $k-\omega$  – nabízí stejné výhody jako Standard  $k-\omega$  model. Není však tolik citlivý na nastavení okrajových podmínek, jako Standardní  $k-\omega$ . Přináší přesnější predikci odtržení proudu než jiné RANS modely. Je tak vhodný zejména pro simulace turbín či odstředivých čerpadel [8].

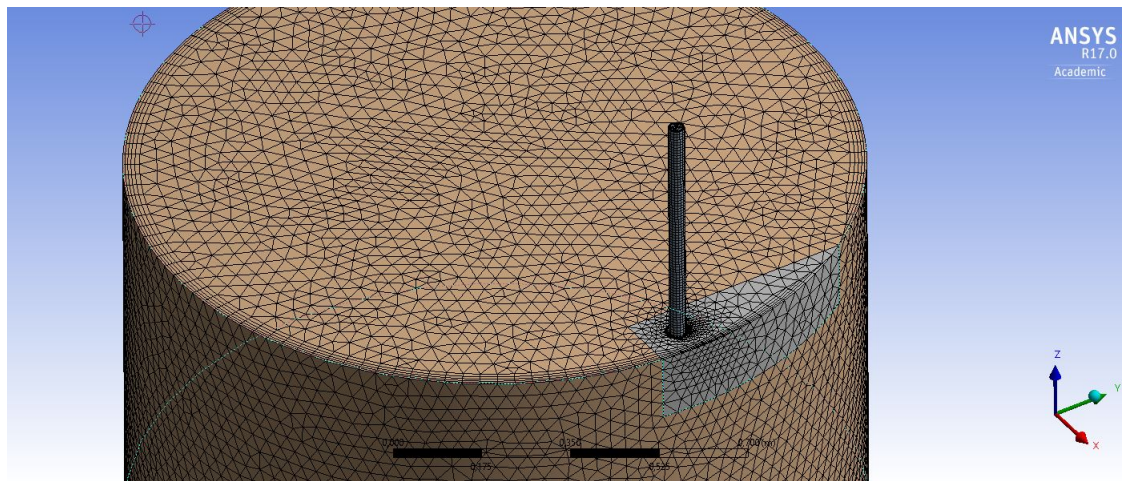
## 4.5 Zvažované přístupy k modelování systému

Nejprve jsem testoval variantu, kdy část nádoby byla vypočítána pomocí modelu pro laminární tok a část nádoby byla spočtena modelem pro turbulentní proudění. Tato možnost se dá nastavit v programu Fluent, pod volbou Cell Zone Conditions a patřičným výběrem požadované Named Selection oblasti, u které má být aplikován výpočet pomocí modelu pro laminární proudění.

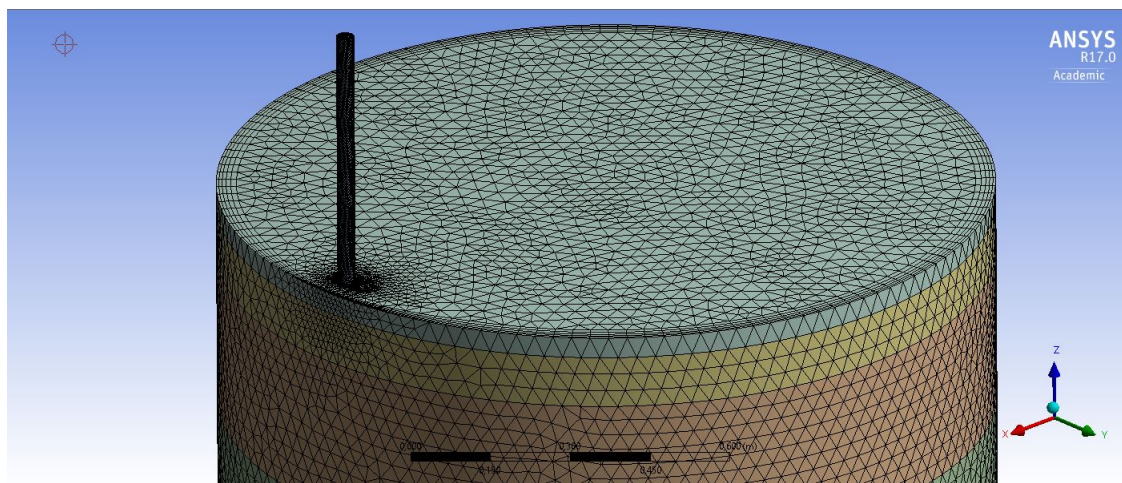
První využívaný model měl nastavenou část s turbulentním prouděním jen v blízkosti výstupu kapaliny z přívodního potrubí. Tato oblast se svým tvarem blížila kruhové výseči a je možné ji vidět na obrázku 4.2. Nicméně jak se ukázalo při samotném výpočtu, tento výpočetní model nekonvergoval a jím získaná řešení byla velmi nepřesná, v porovnání s experimentálními výsledky.

Proto jsem otestoval i druhou verzi řešení, kde byl použit turbulentní model na výpočet horní části nádoby, která sahala do hloubky 140 mm od hladiny. Toto uspořádání je zachyceno na obrázku 4.3. Nicméně přesto, že tento model již oproti minulému uspořádání konvergoval relativně uspokojivě, výsledky získané touto simulací se opět nepřiblížily těm, které jsem naměřil.

Kvůli tomu jsem celý systém počítal pomocí modelů pro turbulentní proudění. Toto není ideální řešení, nicméně většina modelů turbulence dokáže počítat i laminární proudění. Jak se ukázalo při porovnávání výsledků, toto řešení poskytuje ze zde uváděných řešení nejlepší přiblížení se experimentálním výsledkům.



Obrázek 4.2: Síť pro výpočet pomocí laminárního a turbulentního modelu - varianta 1



Obrázek 4.3: Síť pro výpočet pomocí laminárního a turbulentního modelu - varianta 2

## 4.6 Popis tvorby modelu – fyzikální a numerické parametry

V této podkapitole je uvedeno nastavení fyzikálních a numerických parametrů v programu Fluent, které jsem použil.

- General
  - Type - Pressure based
  - Velocity formulation – Absolute
  - Time – steady
  - Gravity – definována proti směru osy Z
- Models - Pouze nastavení aktuálně počítaného modelu.
- Materials
  - Fluid – water-liquid ( $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.001003 \text{ kg/ms}$ ).
  - Solid – aluminum
- Cell zone Conditions – nastavení vody jako používaného materiálu
  - Inlet – mass-flow-inlet
  - Outlet – pressure outlet
  - Hladina – symmetry
  - Steny – wall
- Solution methods – v nastavení jsem zvolil second-order stupeň přesnosti. Nicméně pro tlak by dostačoval v tomto případě i Standard.
- Monitors - Convergence Absolute Criteria pro continuity jsem nastavil na  $1e-4$ .
- Calculations Activities – nastavení požadovaného počtu iterací, po kterých se má výpočet sám uložit





# Kapitola 5

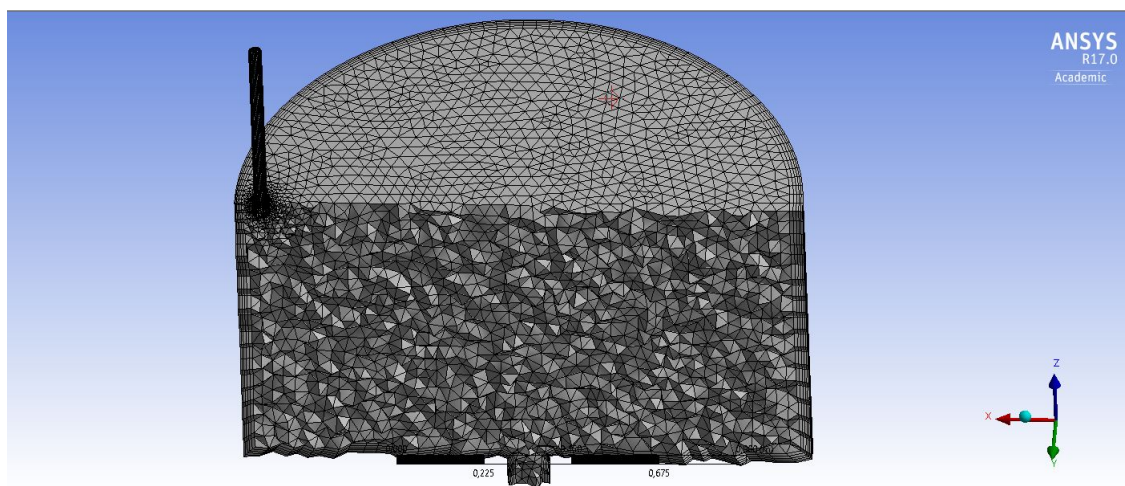
## Vyhodnocení simulace

### 5.1 Předběžná simulace

Jak bylo řečeno v kapitole 4.4, rozhodl jsem se nejprve použít hrubou síť pro rámcové porovnání všech zmiňovaných modelů. Na základě této simulace jsem pak vybral modely, které se blížily experimentálním výsledkům pro využití s jemnou, a díky tomu výpočetně náročnou, sítí.

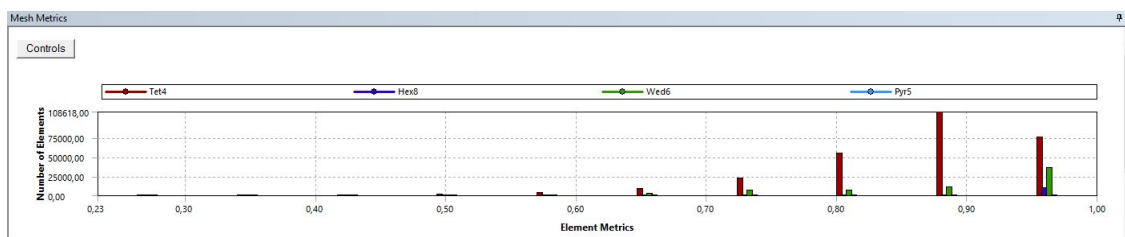
#### 5.1.1 Kvalita hrubé sítě

Použitá síť s  $3.6175e5$  elementy je na obrázku 5.1.

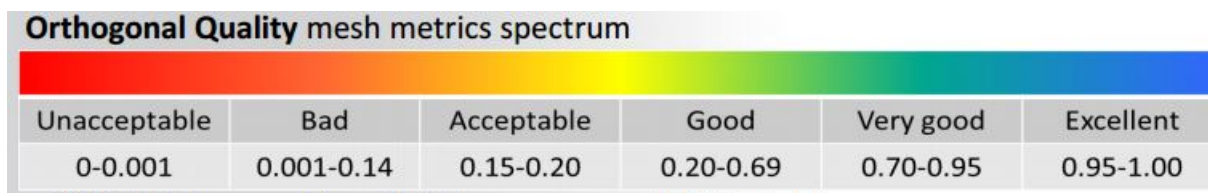


Obrázek 5.1: Síť použitá pro předběžnou simulaci

Pro parametr Orthogonal quality vychází průměrná hodnota pro tuto síť 0,8752, rozložení kvality elementů je pak na obrázku 5.2. Pro tento parametr je přitom dle [5] možné brát jako velmi dobrou síť s hodnotami od 0,7 do 0,95. (viz obrázek 5.3). Minimální ortogonální kvalita elementů je pak 0,23, což opět splňuje doporučení z materiálů k programu Ansys (doporučení je, aby minimální hodnota byla větší než 0,1).



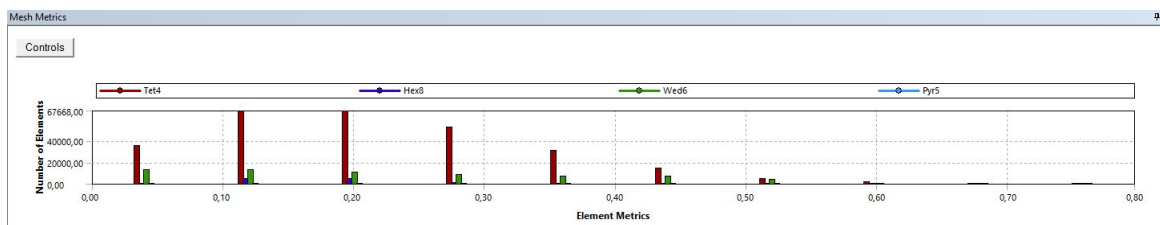
Obrázek 5.2: Rozložení kvality elementů - kritérium orthogonal quality



Obrázek 5.3: Doporučení výrobce softwaru Ansys ohledně kvality elementů - parametr orthogonal quality

Převzato z: [5]

Pro parametr Skewness vychází průměrná hodnota této sítě na 0,2142. Rozložení kvality elementů je na obrázku 5.4. I z pohledu tohoto parametru se řadí kvalita této sítě k velmi dobrým (viz obrázek 5.5). Maximální hodnota tohoto parametru pro použitou síť je 0,79, což opět splňuje doporučení výrobce softwaru [5] (maximální hodnota by neměla přesáhnout 0,95).



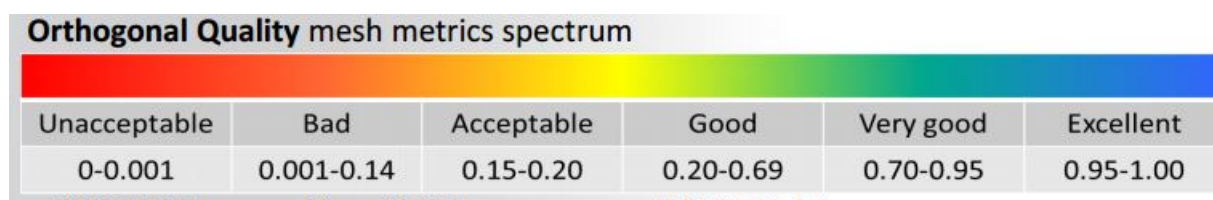
Obrázek 5.4: Rozložení kvality elementů - kritérium skewness

### 5.1.2 Konvergence jednotlivých výpočetních modelů

Na následujících obrázcích je zachycena konvergence jednotlivých použitých výpočetních modelů. Toto jsem také zohlednil při výběru, které modely dále použít pro výpočet na jemnější síti, spolu s porovnáním výsledků simulace a experimentálních výsledků. U každého z použitých modelů jsem nastavil počet iterací na 2000, případně se měla simulace zastavit, pokud by dosáhla na požadovanou hodnotu residuí (není-li řečeno jinak).

Snímky obrazovky, zachycující průběh konvergence pro jednotlivé modely jsou pak v příloze B.

- 1) Spalart-Allmaras - tento model jsem jako jediný nechal počítat zhruba 2500 iterací. Jak



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Obrázek 5.5: Doporučení výrobce softwaru Ansys ohledně kvality elementů - parametr skewness

Převzato z: [5]

je vidět z obrázku přiloženého v obrazové příloze B.1, model celkem dobře konverguje, bez výraznějších oscilací u jednotlivých residuí.

- 2) Standard  $k-\epsilon$  - Výpočetní model ani po 2000 iteracích nekonvergoval k požadované hodnotě residuí. Nicméně nedochází k příliš velkým oscilacím u jednotlivých sledovaných veličin. Průběh je v příloze B.2.
- 3) Realizable  $k-\epsilon$  - ani tento model nekonvergoval uspokojivě. navíc docházelo u všech sledovaných veličin k oscilaci. Průběh konvergence je v na obrázku B.3.
- 4) RNG  $k-\epsilon$  Další model, který nekonvergoval. Navíc docházelo k poměrně značným oscilacím u sledovaných residuí. Průběh konvergence je v na obrázku B.4.
- 5) Standard  $k-\omega$  u tohoto modelu také nebyl průběh konvergence uspokojivý, nicméně alespoň nedocházelo k oscilování sledovaných residuí, jako u některých z předchozích modelů. Průběh konvergence je v na obrázku B.5.
- 6) SST  $k-\omega$  tento model zpočátku vypadal, že bude normálně konvergovat. Nicméně jak je vidět z obrázku B.6, residuum pro kinetickou energii k se zastavilo okolo hodnoty  $5e-4$  a dále nekonvergovalo.

## 5.2 Vyhodnocení výsledků předběžné simulace

### 5.2.1 Postup vyhodnocení

K vyhodnocení simulace jsem použil nástroj Results, který je součástí Ansysu a mnou vytvořený kód v programu Matlab. Ten je uveden v příloze A.2.

Výhoda nástroje Results spočívá v tom, že dokáže najednou porovnávat více simulací. Také, na rozdíl od nástroje pro zobrazení výsledků v samotném Fluentu, lze v uživateli zkoumané plochy, body, objemy atd. uložit a díky tomu tak není nutné tyto oblasti zájmu zadávat při každém jednotlivém otevření simulace, jako je tomu v případě Fluentu.

Pro samotné vyhodnocení bylo nutné v nástroji Results definovat mnou požadovanou rychlost v ploše XY (kvůli omezení použitého přístroje, který nedisponoval třetí sondou pro stanovení rychlosti v ose Z). Tohoto se dá docílit díky definování výrazu, který slouží k výpočtu dané veličiny (v tomto případě pomocí rovnice 5.1, kde u je rychlost ve směru osy X, v pak rychlost ve směru Y), na kartě Expressions. Poté uživatel pomocí této definice vytvoří novou proměnnou na kartě Variables.

$$v_{XY} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad [\text{m/s}] \quad (5.1)$$

Vyhodnocení jsem prováděl na úsečkách rovnoběžných s osou Z systému. Počáteční bod každé úsečky byl definován polohou těžiště kontrolního objemu, který používá přístroj FlowTracker® Handheld ADV® pro stanovení rychlosti, v hloubce měření 40 mm ode dna nádoby. Koncový bod pak ležel ve výšce 800 mm ode dna nádoby, ve které probíhalo měření nejbližší hladině měřeného systému.

Tyto úsečky jsem pak použil pro vytvoření grafu, kde na ose X byla vynesena výška ode dna nádoby, a na ose Y pak byla patričná rychlost v ploše XY. Zde je nutné zmínit, že vynesené rychlosti mohou mít reálně jiné, než požadované, souřadnice X a Y, které jsou uvedené v tabulce 5.1 pro úhel 90° a tabulce 5.2 pro úhel 45°. Zetové souřadnice se ve všech případech řídili podle výšky měření - tj. z=40, 400 a 800 mm. Souřadnice jsem odečetl z grafické reprezentace měření vytvořené v programu AutoCAD (viz obrázek 3.5. Toto je dáno velikostí použitých elementů sítě, které měly v případě nejhrubší sítě maximální délku hrany 35 mm (toto je případ pro většinu elementů, nacházejících se v samotném zkoumaném prostoru nádoby). Další případný zdroj nepřesnosti pak může být způsoben polohou kontrolního objemu, kdy v manuálu výrobce je udávána tolerance  $\pm 10$  mm od akustického vysílače.

Úhel[°]	R1		R2	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
0°	466	-260	266	-207
60°	7	-533	-46	-335
120°	-459	-273	-313	-127
180°	-466	260	-267	207
240°	-7	534	46	335
300°	459	273	313	127

Tabulka 5.1: Souřadnice zkoumaných bodů pro polohu sondy 90°

Úhel[°]	R1		R2	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
0°	412	-166	212	-113
60°	62	-439	9	-240
120°	-349	-274	-204	-128
180°	-412	166	-212	113
240°	-62	439	-9	240
300°	349	274	204	128

Tabulka 5.2: Souřadnice zkoumaných bodů pro polohu sondy 45°

Data použitá pro konstrukci těchto grafů jsem následně exportoval do souboru s příponou .csv. Následoval post-processing v programu Matlab, který poskytuje větší možnosti práce s takto získanými daty. Při něm jsem získaná data roztřídil podle použitých modelů, porovnal

rychlosti ve zkoumaných bodech a stanovil procentuální odchylky od naměřených dat. Tento kód je stejný jak pro polohu sondy, kdy je měřicí hlavice natočena v úhlu  $90^\circ$ , tak i pro úhel  $45^\circ$ .

Jediný rozdíl spočívá v importovaných datech, která se mají porovnávat.

### 5.2.2 Vyhodnocení předběžné simulace

V níže uvedených tabulkách jsou průměrné odchylky, zprůměrované z hodnot získaných ve všech hladinách, které jsem experimentálně proměřoval. Jejich číselné vyjádření pro natočení měřicí hlavice přístroje FlowTracker pod úhlem  $90^\circ$  je v tabulce 5.3, pro úhel  $45^\circ$  pak v tabulce 5.4.

Úhel [°]	St. k- $\epsilon$	RNG k- $\epsilon$	SST k- $\omega$	Standard k- $\omega$	realizable k- $\epsilon$	Sp.-Allmaras
$0^\circ$	28.2	59.59	74.64	53.22	62.42	13.36
$60^\circ$	26.44	61.46	74.56	56.87	66.97	6.25
$120^\circ$	24.63	61.68	73.88	50.81	62.86	11.56
$180^\circ$	22.2	61.77	72.18	48.38	60.38	9.6
$240^\circ$	23.35	58.84	71.73	49.24	55.92	10.11
$300^\circ$	33.79	58.49	75.57	50.52	58.63	7.91

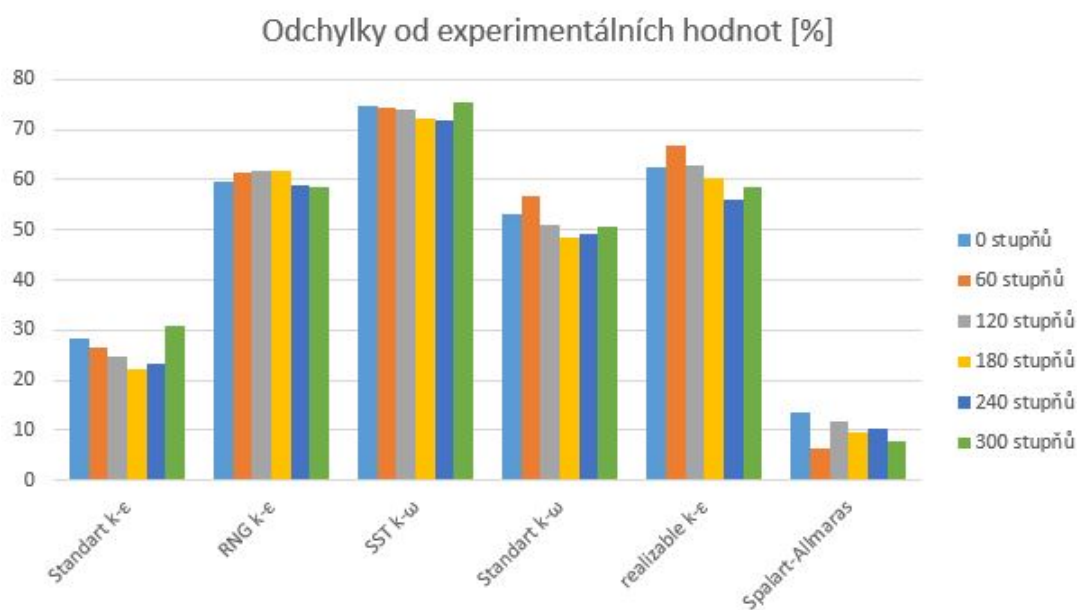
Tabulka 5.3: Procentuální odchylky pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje  $90^\circ$

Úhel [°]	St. k- $\epsilon$	RNG k- $\epsilon$	SST k- $\omega$	Standard k- $\omega$	realizable k- $\epsilon$	Sp.-Allmaras
$0^\circ$	47.64	67.66	80.7	61.89	68.83	20.89
$60^\circ$	43.86	72	80.16	67.34	75.05	20.61
$120^\circ$	41.97	71.74	79.87	64.03	73.88	20.76
$180^\circ$	40.53	70.33	78.9	59.48	71.53	19
$240^\circ$	41.19	68.55	78.94	58.51	65.77	17.7
$300^\circ$	44.35	67.17	82.39	57.73	65.22	18.31

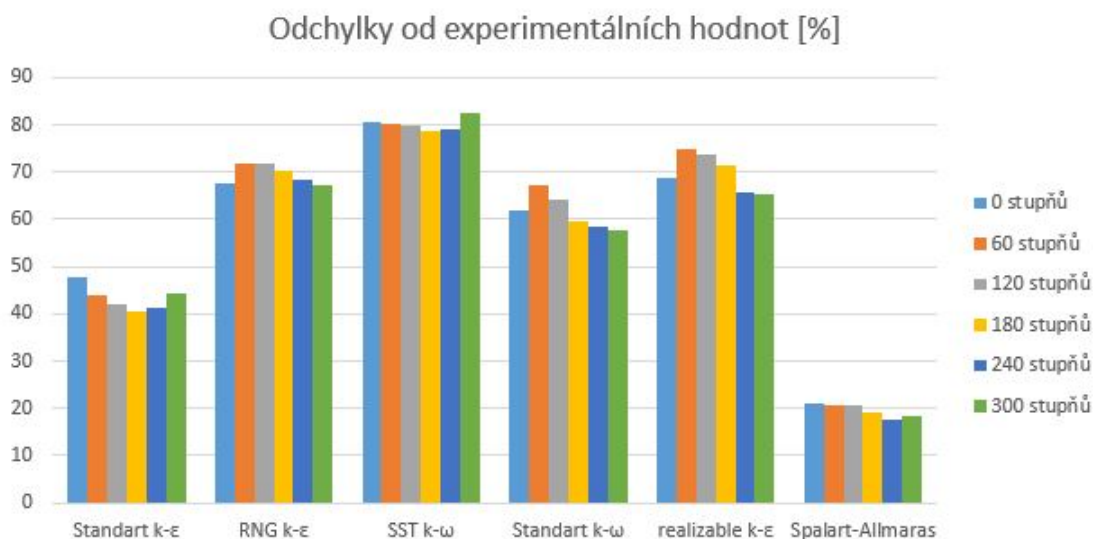
Tabulka 5.4: Procentuální odchylky pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje  $45^\circ$

Grafická reprezentace těchto dat je pak v grafech na obrázcích 5.6 a 5.7. Jak je z těchto grafů patrné, nejmenší odchylku od experimentálních dat má model Spalart-Allmaras, následovaný modely Standard k- $\epsilon$  a Standard k- $\omega$ .

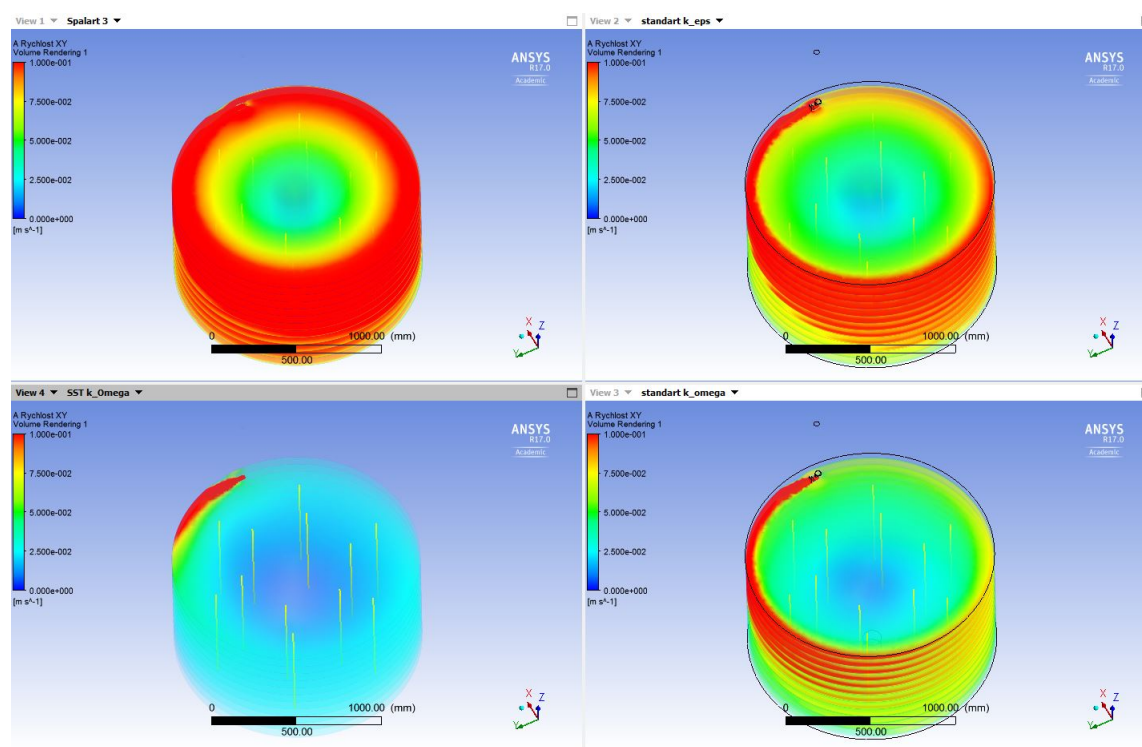
Grafické znázornění výsledku předběžné simulace pro vytipované modely (+ model SST k- $\omega$ ), získané z programu CFD Post, je na obrázku 5.8.



Obrázek 5.6: Procentuální odchyly pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřícího přístroje 90°



Obrázek 5.7: Procentuální odchyly pro výsledky simulací od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřícího přístroje 45°



Obrázek 5.8: Grafické znázornění rychlosti  $v_{XY}$  v objemu simulované nádoby pro vytipované modely

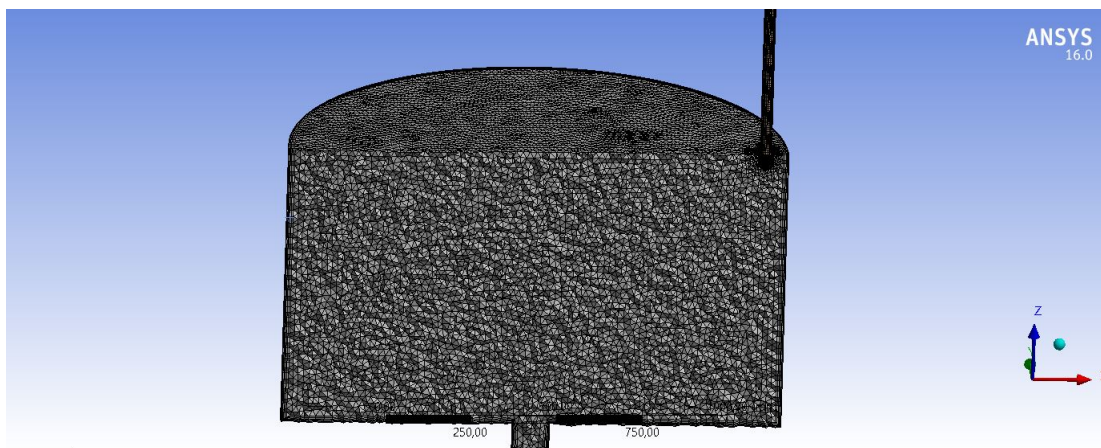
### 5.3 Simulace provedená s optimální sítí

Jak je vidět na grafech uvedených v předcházející podkapitole, výsledky simulace s hrubou sítí jsou velmi vzdálené hodnotám, které jsem experimentálně naměřil.

Navíc, jak se ukázalo analýzou vlivu sítě na výsledky simulace v podkapitole 4.3, hrubá síť nedává optimální výsledky. Proto jsem použil modely, které jsem vytipoval na základě předběžné simulace (+ model SST  $k-\omega$  - kvůli o něco lepší konvergenci při použití hrubé sítě, než jakou měl model Standard  $k-\omega$ ), spolu s jemnější sítí, která má 1.9209e6 elementů.

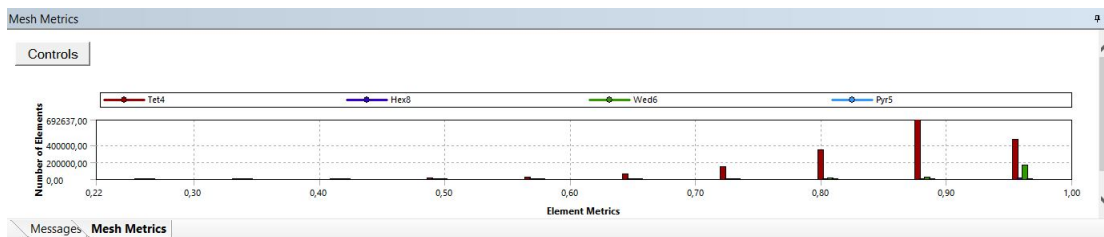
#### 5.3.1 Kvalita jemné sítě

Použitá jemná síť je na obrázku 5.9. Její kvalitu jsem posuzoval obdobně jako u hrubé sítě - tj. pomocí parametrů Orthogonal Quality (průměrná hodnota pro síť je 0.8711, minimální kvalita pak 0.22142) a Skewness (průměrná hodnota tohoto parametru u elementů sítě je 0.20928, maximální pak 0.80605).



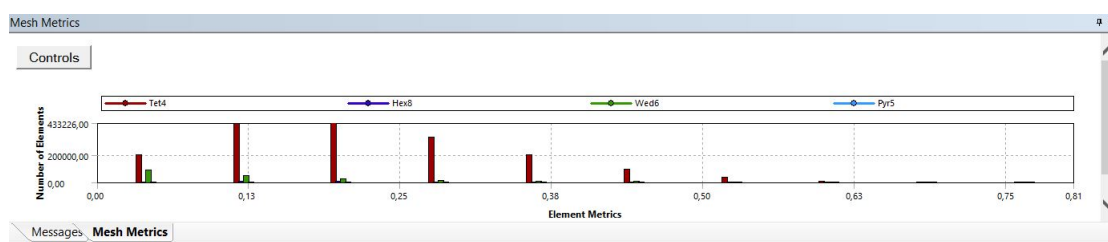
Obrázek 5.9: Použitá jemná síť

Podle doporučení výrobce softwaru Ansys tak jde o velmi dobrou síť (viz obrázky 5.3 a 5.5). Rozložení kvality elementů pro tato dvě kritéria je na obrázcích 5.10 a 5.11.



Obrázek 5.10: Rozložení kvality elementů v jemné sítí - kritérium Orthogonal Quality





Obrázek 5.11: Rozložení kvality elementů v jemné síti - kritérium Skewness

### 5.3.2 Konvergence použitých modelů

Stejně jako u hrubé sítě jsou snímky obrazovky dokumentující konvergenci jednotlivých modelů umístěné v příloze B.

- 1) Spalart-Allmaras - tento model jsem opět nechal počítat zhruba 2500 iterací. Jak je vidět z obrázku přiloženého v obrazové příloze B.7, model opět celkem dobře konverguje, nicméně ne tak rychle jako v případě hrubé sítě. Také nejsou patrné výraznější oscilace u jednotlivých residuí.
- 2) Standard  $k-\epsilon$  - Na rozdíl od simulace, u které byla použita hrubá síť, tento model při použití jemné sítě celkem dobře konverguje. Jsou však patrné mírné oscilace pro stanovené hodnoty rychlosti disipace  $\epsilon$ . Průběh je na obrázku B.9 v obrazové příloze.
- 3) Standard  $k-\omega$  - Obdobně jako u předchozího modelu, i zde dochází při použití jemnější sítě k mnohem lepší konvergenci. Nicméně i tak tento model konverguje v porovnání s dvěma předchozími o něco pomaleji. Oscilace, které jsou patrné u prvních iterací, se postupně ustálily. Průběh konvergence je v na obrázku B.10.
- 4) SST  $k-\omega$  - U tohoto modelu je patrná poměrně velká oscilace zobrazovaných residuí. Navíc model nekonverguje moc rychle. Průběh je na obrázku B.8 v příloze B.

## 5.4 Vyhodnocení simulace

Průběh vyhodnocení této simulace je víceméně identický k tomu, jak jsem vyhodnocoval předběžnou simulaci. Jediný rozdíl je mírně modifikovaný kód, který zohledňuje použití pouze 4 modelů a naopak více exportovaných hodnot (na ose Z jsem v každém měřeném bodu exportoval u hrubé sítě pouze 19 bodů, kdežto zde 44. Počet těchto bodů jsem stanovil na základě výšky simulovaného obejmu vody a velikosti použitých elementů v centrální části nádoby.)

V níže uvedených tabulkách jsou opět uvedeny zprůměrované hodnoty odchylek od naměřených experimentálních dat. Průměrná odchylka od všech naměřených bodů je pro použité modely následující:

- Standard.  $k-\epsilon$  - 7.76% pro sklon hlavice  $90^\circ$  a 22.01 % pro sklon hlavice  $45^\circ$ .
- SST  $k-\omega$  - 8.37 % pro sklon hlavice  $90^\circ$  a 23.49 % pro sklon hlavice  $45^\circ$ .

- Standard  $k-\omega$  - 9.9 % pro sklon hlavice  $90^\circ$  a 14.98 % pro sklon hlavice  $45^\circ$ .
- Spalart-Allmaras - 12.52 % pro sklon hlavice  $90^\circ$  a 17.23 % pro sklon hlavice  $45^\circ$ .

Úhel [°]	St. $k-\epsilon$	SST $k-\omega$	Standard $k-\omega$	Sp.-Allmaras
$0^\circ$	11.38	12.52	13.57	15.69
$60^\circ$	4.94	7.07	3.74	8.98
$120^\circ$	7.47	9.67	8.95	13.77
$180^\circ$	8.11	6.85	12.23	13.63
$240^\circ$	8.83	6.6	12.74	13.55
$300^\circ$	5.84	7.55	8.22	9.52

Tabulka 5.5: Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje  $90^\circ$

Úhel [°]	St. $k-\epsilon$	SST $k-\omega$	Standard $k-\omega$	Sp.-Allmaras
$0^\circ$	22.93	23.96	16.6	19.78
$60^\circ$	23.32	26.16	17.32	17.43
$120^\circ$	24.29	28.69	17.91	18.76
$180^\circ$	20.92	23.35	13.57	16.62
$240^\circ$	19.45	19.09	11.36	15.13
$300^\circ$	21.38	19.71	13.12	15.86

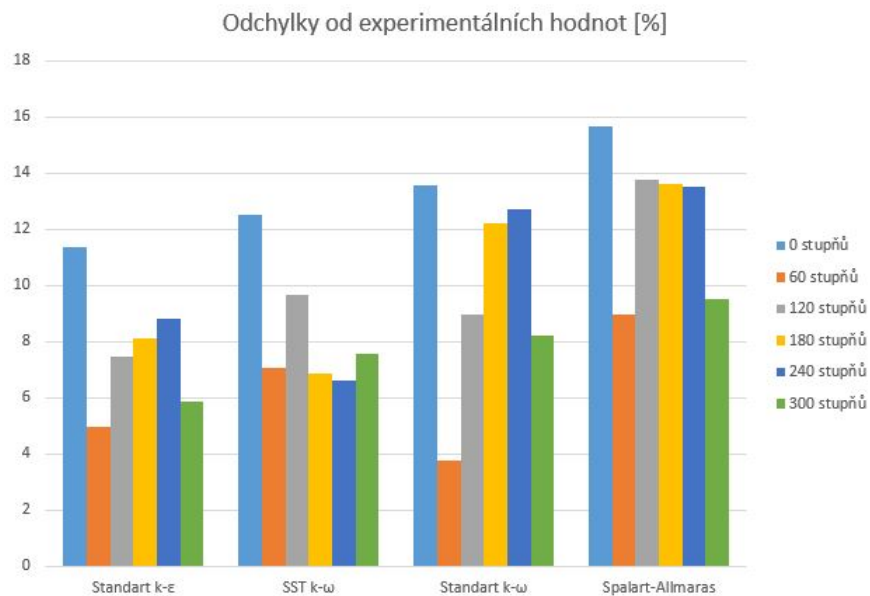
Tabulka 5.6: Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje  $45^\circ$

Grafické vyhodnocení je na obrázku 5.12 pro sklon hlavice měřicího přístroje  $90^\circ$  od vodící tyče, a 5.13 pro úhel měřáku  $45^\circ$ . Na obrázku 5.14 je grafické znázornění rychlosti  $v_{XY}$  v objemu simulované nádoby pro zkoumané modely.

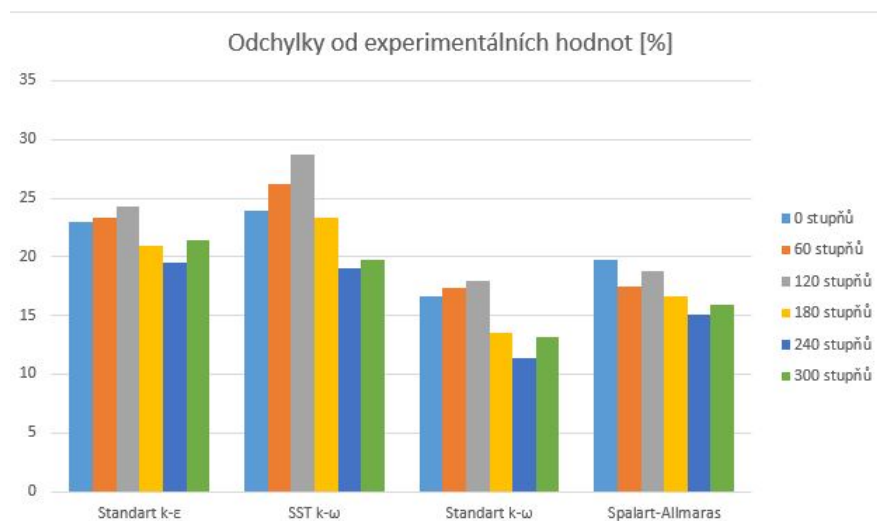
Grafické znázornění rychlosti  $v_{XY}$  v objemu simulované nádoby pro vytipované modely

Jak je vidět z uvedených dat, nejlepší výsledky podává model Standard  $k-\omega$ , který podává relativně stabilní výsledky pro oba sklony hlavice měřicího přístroje (kde zejména rychlosti změřené na poloměru R2 při sklonu hlavice  $45^\circ$  činily problém ostatním použitým modelům). Druhý nejpřesnější výsledek poskytuje model Standard  $k-\epsilon$ . Protože rozdíl mezi těmito výpočetními modely není příliš velký, doporučil bych pro aplikace podobné těm, které zkoumám ve své diplomové práci, právě model Standard  $k-\epsilon$ . Jednak tento model mnohem lépe konvergoval, a pak se také zdá být ze své definice lepší pro zamýšlený účel tohoto typu simulací, a to sice poskytnout představu o rychlostním poli uvnitř chovné nádoby, než model Standard  $k-\omega$ .

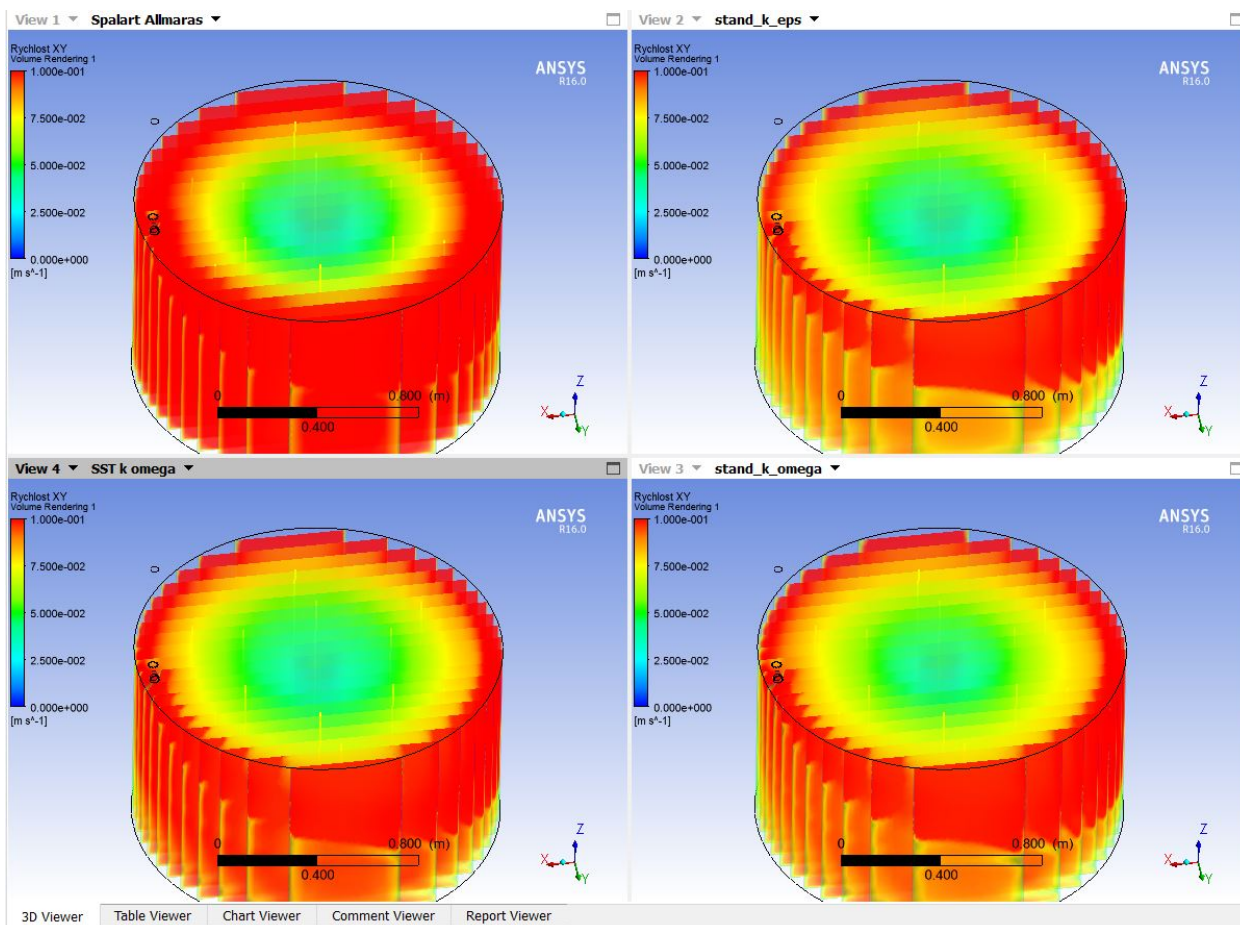
Model SST  $k-\omega$  měl podávat přesnější výsledky u stěn nádoby, což není pro toto použití úplně důležité a navíc nekonvergoval tak uspokojivě, jako jiné modely.



Obrázek 5.12: Procentuální odchyly výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90°



Obrázek 5.13: Procentuální odchyly výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 45°



Obrázek 5.14: Grafické znázornění rychlosti  $v_{XY}$  v objemu simulované nádoby pro zkoumané modely

## Kapitola 6

# Optimalizace pomocí přepážky

### 6.1 Význam přepážky

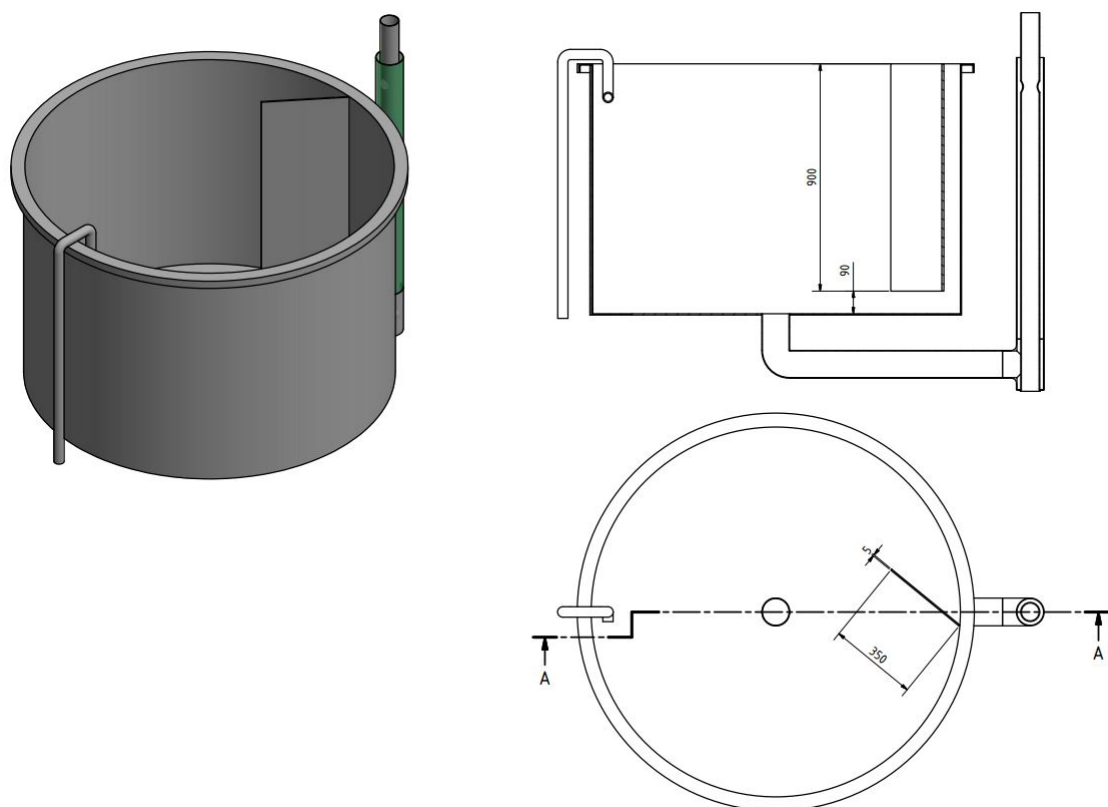
Pro použití přepážky jako nástroje optimalizujícího proudění vhodného pro ryby jsem se rozhodl po konzultaci s pracovníky Jihočeské univerzity z toho důvodu, že se díky její instalaci vytvoří v nádrži klidová zóna. Díky ní by měly mít chované ryby širší možnost výběru místa s pro ně aktuálně vyhovující rychlostí proudění [CITACE - Palstra - Forced sustained swimming exercise]. Díky tomu by se měla snížit jejich únava, která by mohla nastat, pokud by rychlost proudění v kádi nebyla pro daný druh optimalizována. Druhá výhoda použití přepážky by měla spočívat v tom, že vytvoření většího rozsahu rychlosti proudění v nádrži umožní v jednom tanku chovat více druhů s rozdílnými požadavky na rychlost proudění. Nicméně je nutné podotknout, že tyto navrhované změny je nutné experimentálně ověřit na reálné rybí populaci sledované biologi zabývajícími se jejich chovem. Jak zmíněno v podkapitole 1.2, rychlost proudění není jediný faktor ovlivňující chované ryby. V tomto případě by například mohl hrát velkou roli počet chovaných ryb, kdy při vyšších číslech by některé ryby byly nuceny plavat v oblasti s vyšší rychlostí proudění a některé v oblasti za přepážkou, a nedocházelo by k zamýšlenému pohybu ryb v prostředí chovné nádoby tak, jak bylo původně zamýšleno.

### 6.2 Geometrie nádoby opatřené příčkou

Rozměry použité přepážky jsou 900x350x5mm, výška umístění spodní hrany ode dna nádoby je pak 90mm (viz náčrt na obrázku 6.1).

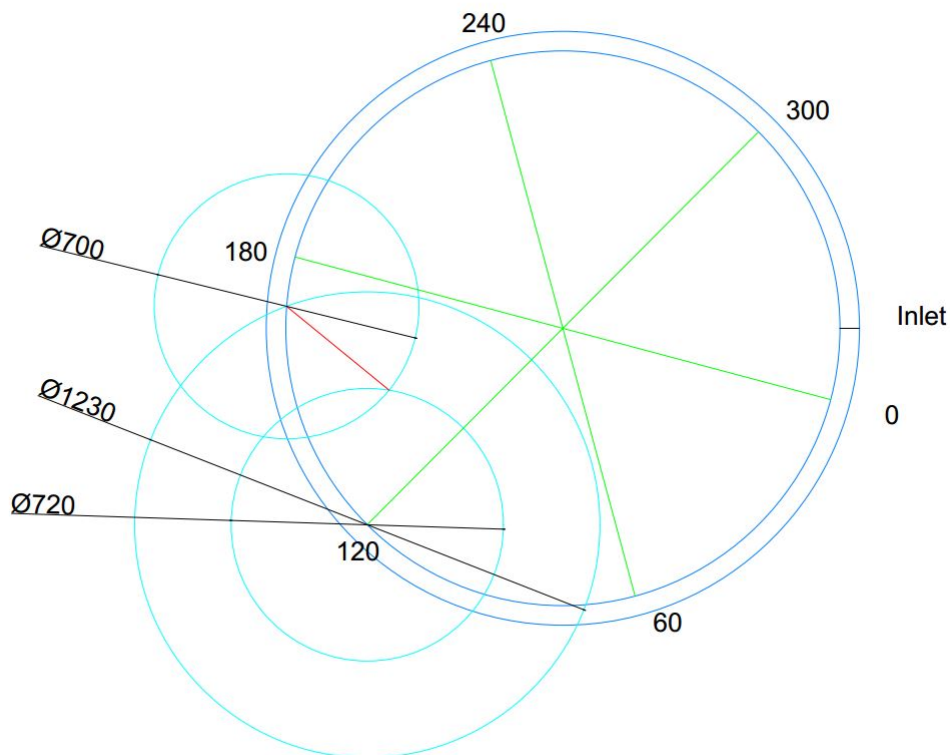
Přesné umístění přepážky v nádobě je pak na náčrtu 6.2. Bod, kde se hrana přepážky dotýká vnitřní strany nádrže, je definován jako průsečík kružnice jdoucí z bodu značícího úhel měření 120° o průměru 1230 mm a právě vnější stěny nádoby. Hrana přepážky, která ční do prostoru kádě, se pak nalézá na průsečíku kružnice o průměru 700 mm jdoucí z předchozího definovaného bodu a kružnice o průměru 720 mm jdoucí z bodu vyznačujícího úhel měření 120°.

Tmavě modré čáry na tomto náčrtu opět značí vnitřní a vnější hranu nádrže, světle modré kružnice slouží k určení polohy přepážky, zelené čáry značí polohu vodící tyče použité pro



Obrázek 6.1: Rozměry přepážky a její umístění v rámci nádrže

měření a červená čára značí polohu přepážky.



Obrázek 6.2: Definování polohy přepážky

Při vytváření modelu geometrie jsem přistoupil k zjednodušení v podobě zanedbání plochy, která pomáhala přimknout přepážku k vnitřní stěně nádoby.

### 6.3 Naměřená experimentální data

V níže uvedených tabulkách (6.1 pro sklon měřicí hlavice  $90^\circ$ , a 6.2 pro úhel přístroje  $45^\circ$ ) jsou naměřená experimentální data pro nádobu opatřenou přepážkou. Všechna měření proběhla na stejných místech, jako měření bez přepážky. Jediné měření, které jsem provedl navíc, bylo v jednom místě za přepážkou. Nicméně to jsem se nakonec rozhodl nepoužít, protože měřený kontrolní objem ležel velmi blízko stěny přepážky a tato situace není dle manuálu výrobce doporučena (kvůli velkým nepřesnostem).

Všechny uvedené veličiny jsou popsány v podkapitole 3.4.

Pozice	Měřená veličina	$R_1, h_1$	$R_1, h_2$	$R_1, h_3$	$R_2, h_1$	$R_2, h_2$	$R_2, h_3$
0°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.048	0.041	0.04	0.04	0.028	0.026
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002
	Úhel $\alpha$ [stupně]	-24	-18	-31	-50	-33	44
	Rychlost $V_y$ [m/s]	-0.021	-0.013	-0.024	-0.048	-0.018	0.025
	Rychlost $V$ [m/s]	0.053	0.043	0.047	0.062	0.033	0.036
	SNR	29	29.6	32	25.5	24.9	29.9
	60°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.026	-0.007	0.019	0.062	0.062
$\sigma V_x$ [m/s]		0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.004
Úhel $\alpha$ [stupně]		-39	-139	3	-31	-22	-25
Rychlost $V_y$ [m/s]		-0.021	-0.006	-0.001	-0.037	-0.025	-0.028
Rychlost $V$ [m/s]		0.034	0.009	0.019	0.072	0.067	0.065
SNR [dB]		26.4	29.4	31.8	30	28.4	34
120°		Rychlost $V_x$ [m/s]	0.047	-0.001	-0.027	0.069	0.048
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002
	Úhel $\alpha$ [stupně]	-39	101	16.2	10	15	16
	Rychlost $V_y$ [m/s]	-0,038	0.005	-0.008	0.012	0.013	0.016
	Rychlost $V$ [m/s]	0.061	0.005	0.028	0.070	0.050	0.058
	SNR	26.4	30.3	32.2	25.3	27.5	30.3
	180°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.049	0.033	0.038	0.026	0.047
$\sigma V_x$ [m/s]		0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
Úhel $\alpha$ [stupně]		17	-6	14	3	2	1
Rychlost $V_y$ [m/s]		0.015	-0.004	-0.010	0.001	0.002	0.001
Rychlost $V$ [m/s]		0.051	0.033	0.039	0.026	0.047	0.041
SNR		25.8	26.4	31.8	19.1	28.4	27.9
240°		Rychlost $V_x$ [m/s]	0.043	0.057	0.039	0.019	0.035
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
	Úhel $\alpha$ [stupně]	-10	2	-29	-35	-25	-20
	Rychlost $V_y$ [m/s]	-0,01	0.002	-0.022	-0.013	-0.016	-0.016
	Rychlost $V$ [m/s]	0.044	0.057	0.045	0.023	0.039	0.047
	SNR	23	28.1	29.6	19.8	25.4	26.4
	300°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.043	0.053	0.026	0.028	0.020
$\sigma V_x$ [m/s]		0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Úhel $\alpha$ [stupně]		-26	-6	-50	-39	-49	-591
Rychlost $V_y$ [m/s]		-0.021	-0.006	-0.031	-0.023	-0.023	-0.038
Rychlost $V$ [m/s]		0.049	0.054	0.041	0.036	0.031	0.045
SNR		23.8	28.6	30.7	20.2	24	27.9

Tabulka 6.1: Naměřené hodnoty pro úhel sondy 90 stupňů, se zarážkou



Pozice	Měřená veličina	$R_1, h_1$	$R_1, h_2$	$R_1, h_3$	$R_2, h_1$	$R_2, h_2$	$R_2, h_3$
0°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.054	0.029	0.04	0.049	0.031	0.047
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002
	Úhel $\alpha$ [stupně]	6	33	13	-12	4	-9
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.006	0.019	0.009	-0.010	0.002	-0.007
	Rychlost $V$ [m/s]	0.055	0.035	0.041	0.050	0.031	0.048
	SNR	27	27.5	32.4	24.9	25.3	28.8
60°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.077	0.065	0.065	0.054	0.054	0.063
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.033	0.044	0.039	0.022	0.025	0.021
	Rychlost $V$ [m/s]	0.084	0.078	0.076	0.058	0.060	0.066
	Úhel $\alpha$ [stupně]	23	34	31	22	25	18
	SNR	24	26.4	29.2	20	21.6	23.6
120°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.045	-0.003	-0.004	0.043	0.037	0.041
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.003	0.001	0.004	0.002	0.002	0.001
	Úhel $\alpha$ [stupně]	32	108	-147	50	46	47
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.028	0.009	-0.003	0.051	0.038	0.044
	Rychlost $V$ [m/s]	0.053	0.009	0.005	0.067	0.053	0.060
	SNR	28.4	28.1	33.7	25.3	27	29
180°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.015	0.026	0.013	0.02	0.029	0.019
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002
	Úhel $\alpha$ [stupně]	67	37	67	48	54	64
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.035	0.020	0.031	0.022	0.039	0.039
	Rychlost $V$ [m/s]	0.038	0.033	0.033	0.030	0.049	0.043
	SNR	21.9	29	23.4	21.2	22.5	27.9
240°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.038	0.046	0.046	0.026	0.027	0.035
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002
	Úhel $\alpha$ [stupně]	27	31	12	20	15	41
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.019	0.028	0.010	0.010	0.007	0.030
	Rychlost $V$ [m/s]	0.043	0.053	0.047	0.028	0.028	0.046
	SNR	19.7	29.4	29.6	18.2	25.3	23.4
300°	Rychlost $V_x$ [m/s]	0.04	0.047	0.045	0.03	0.025	0.042
	$\sigma V_x$ [m/s]	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002
	Úhel $\alpha$ [stupně]	5	33	2	-5	-3	-6
	Rychlost $V_y$ [m/s]	0.035	0.031	0.002	-0.003	-0.001	-0.004
	Rychlost $V$ [m/s]	0.040	0.056	0.045	0.030	0.025	0.042
	SNR	21.9	29.4	28.4	21.5	25.5	30.2

Tabulka 6.2: Naměřené hodnoty pro úhel sondy 45 stupňů, se zarážkou

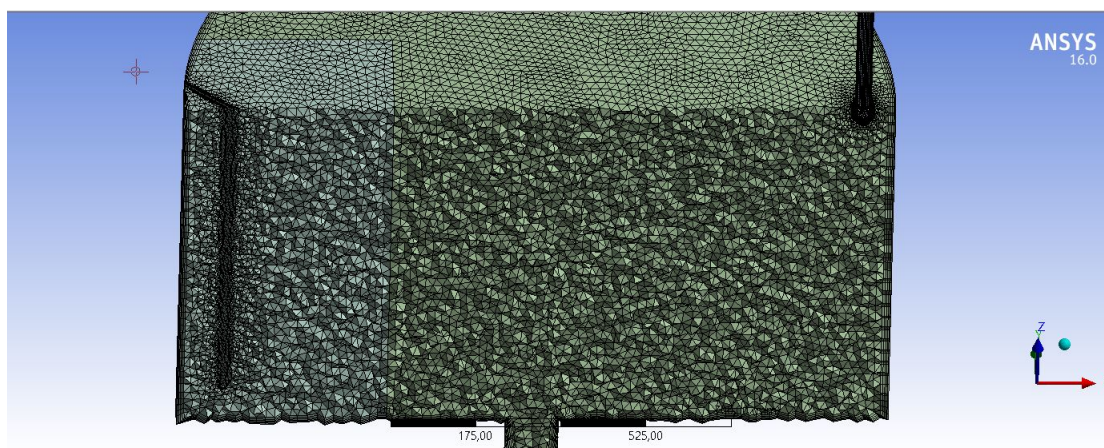
## 6.4 Tvorba geometrie modelu, sítě a CFD modelu

### 6.4.1 Geometrie

Při tvorbě geometrie jsem opět využil Design Modeler, ve kterém jsem modifikoval geometrii pro nádobu bez zarážky získanou z předcházející simulace. K umístění přepážky jsem využil podobný postup, jaký je nastíněn na obrázku 6.2. Při "vyříznutí" přepážky z modelovaného objemu, který má představovat kapalinu, je nutné si dát pozor na to, aby těleso přepážky čnělo nad hladinu - pokud má pouze stejnou výšku jako hladina, dojde k tomu, že v geometrii zůstane na hladině plocha v místě, kde by měla být horní plocha přepážky. Toto má za následek to, že při síťování dojde ke kritické chybě a okolí přepážky se nepovede vysítovat.

### 6.4.2 Síť

Při tvorbě sítě, která je na obrázku 6.3, jsem použil podobný postup jako u tvorby sítě pro nádobu bez přepážky. Na přívodní potrubí jsem tak opět použil metodu sweep a u stěn vytvořil pomocí inflation okrajové vrstvy. Jediná změna je okolí přepážky, kdy jsem v jejím nejbližším okolí nastavil velikost elementů sítě na polovinu velikosti elementů nastavených v centrálním prostoru nádoby.



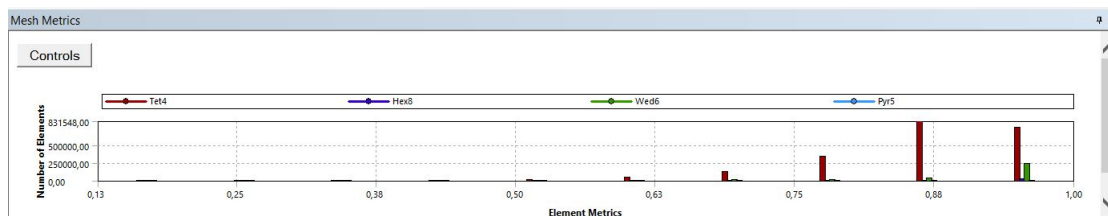
Obrázek 6.3: Použitá síť pro simulaci nádoby s přepážkou

Také jsem v okolí přepážky vytvořil kvádřovou sekci o rozměrech podstavy 600x500 mm a jdoucí ode dna nádrže až k hladině. Tato sekce posloužila k lepšímu průběhu síťování, kdy jsem nejprve nechal vysítovat tuto sekci a pak zbytek modelovaného systému.

Velikost sítě pro tuto simulaci jsem zvolil na základě výsledků analýzy vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení provedených pro tuto síť + výsledek analýzy u sítě vytvořené pro nádobu bez zarážky. K tomu jsem musel přistoupit z toho důvodu, že došlo k oscilující konvergenci, jak značí záporná hodnota koeficientu  $\epsilon_{21} = -1.1152e-4$ . Důvodem, proč k tomuto mohlo dojít, je to, že jsem analýzy vlivu počtu elementů provedl s výpočetním modelem Spalart-Allmaras a ne s modelem Standard  $k-\omega$ , který se ukázal jako přesnější.

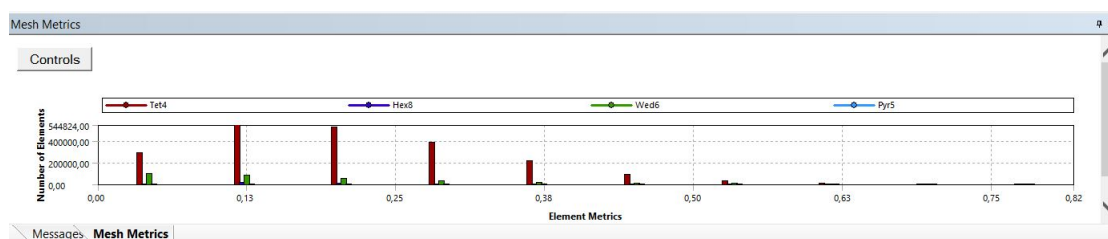
Použitá síť pro tuto simulaci tak má 2 387 544 elementů. Průměrná kvalita sítě posuzovaná

dle kritéria Orthogonal quality je 0.877, při minimální hodnotě 0,1258 - síť tak splňuje doporučení tvůrců programu Ansys. Rozložení kvality elementů je na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Rozložení kvality elementů - kritérium orthogonal quality

Pro kritérium Skewness pak průměrná kvalita elementů sítě má hodnotu 0.2034, a maximální hodnota, které některý z elementů dosahuje je 0.8191. Opět tak síť splňuje doporučení. Rozložení kvality elementů dle tohoto kritéria je na obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Rozložení kvality elementů - kritérium skewness

Průběh konvergence jednotlivých výpočetních modelů je pak v obrazové příloze B. Ze získaných průběhů je pak patrné že:

- 1) Spalart-Allmaras - Model konverguje bez viditelných oscilací, jak je patrné z obrázku B.11. Výpočet jsem nechal běžet 2000 iterací.
- 2) Standard  $k-\epsilon$  - Model konverguje celkem rychle, jsou ovšem jasně patrné mírné oscilace. Průběh je na obrázku B.12 v obrazové příloze.
- 3) Standard  $k-\omega$  - Model v tomto případě téměř nekonverguje. Navíc jsou patrné celkem jasně viditelné oscilace - viz obrázek B.13.
- 4) SST  $k-\omega$  - Konvergence modelu se zastavila na hranici zhruba  $1e-1$ . Navíc jsou stejně jako u předchozího modelu patrné oscilace - viz obrázek B.14 v příloze B.

## 6.5 Výsledky simulace

Nastavení simulace jsem použil podobné tomu, které popisují v podkapitole 4.6. K vyhodnocení simulace jsem znovu použil program Matlab data exportovaná z modulu Results. Díky tomu, že jsem použil stejnou velikost elementů ve zkoumaném prostoru nádrže, jako u simulace systému bez narážky, nebylo nutné použít kód více modifikovat (kromě správného

seřazení použitých výpočetních modelů).

Porovnání výsledků simulace s experimentálními daty je v tabulce 6.3 (pro měření provedená přístrojem se sklonem hlavičky měřicího přístroje  $90^\circ$ ) a 6.4 pro sklon hlavičky  $45^\circ$ .

Úhel [ $^\circ$ ]	St. k- $\epsilon$	SST k- $\omega$	Standard k- $\omega$	Sp.-Allmaras
$0^\circ$	34.31	29.69	62.94	24.25
$60^\circ$	29.86	30.99	39.75	31.59
$120^\circ$	28.8	37.41	28.33	24.41
$180^\circ$	28.65	28.19	21.24	30.56
$240^\circ$	27.8	22.89	21.79	32.78
$300^\circ$	20.09	19.61	11.37	26.03

Tabulka 6.3: Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavičky měřicího přístroje  $90^\circ$

Úhel [ $^\circ$ ]	St. k- $\epsilon$	SST k- $\omega$	Standard k- $\omega$	Sp.-Allmaras
$0^\circ$	14.98	15.57	39.63	21.84
$60^\circ$	39.23	42.2	38.34	30.86
$120^\circ$	29.94	30.35	23.34	130.65
$180^\circ$	32.28	27.3	23.06	36.93
$240^\circ$	50.36	44.51	48.19	50.44
$300^\circ$	35.9	31.4	22.8	37.6

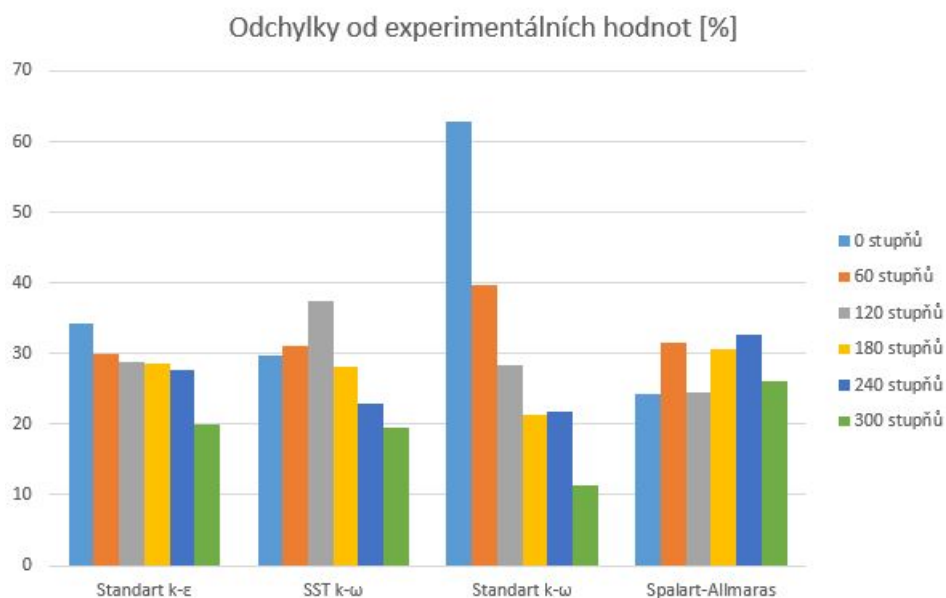
Tabulka 6.4: Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavičky měřicího přístroje  $45^\circ$

Grafická reprezentace hodnot uvedených v tabulkách je na obrázcích 6.6 a 6.7. Rychlostní pole v nádobě opatřené přepážkou je pak pro jednotlivé modely zobrazené na obrázku 6.8. Jak je z tohoto obrázku patrné, pomocí narážky se podařilo vytvořit klidovou zónu, která by měla sloužit k širšímu výběru rychlosti proudění pro chované ryby.

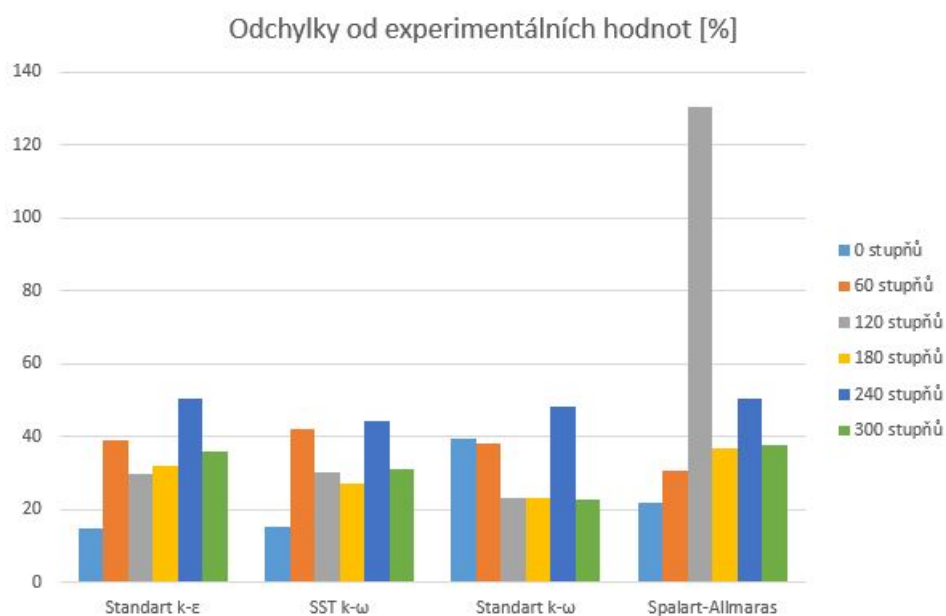
Souhrnné výsledky jsou pak následující:

- Standard. k- $\epsilon$  - 28.25% pro sklon hlavičky  $90^\circ$  a 33.77 % pro sklon hlavičky  $45^\circ$ .
- SST k- $\omega$  - 28.13 % pro sklon hlavičky  $90^\circ$  a 31.88 % pro sklon hlavičky  $45^\circ$ .
- Standard k- $\omega$  - 30.9 % pro sklon hlavičky  $90^\circ$  a 32.55 % pro sklon hlavičky  $45^\circ$ .
- Spalart-Allmaras - 28.26 % pro sklon hlavičky  $90^\circ$  a 51.78 % pro sklon hlavičky  $45^\circ$ .

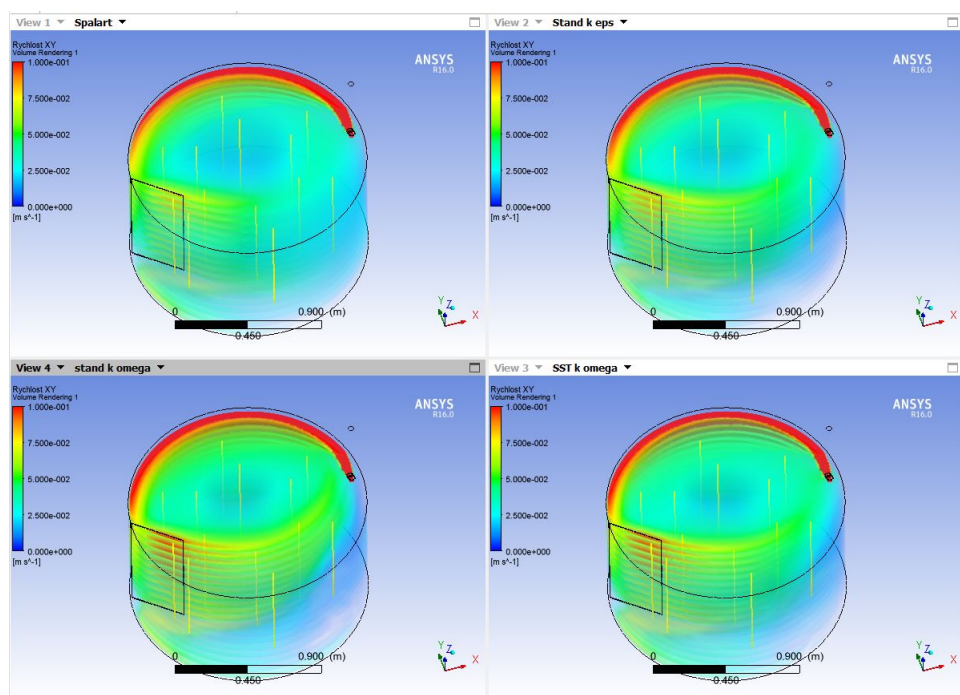
Kromě modelu Spalart-Allmaras podávají zbývající modely celkem vyrovnané výsledky. Jak je patrné z grafu na obrázku 6.6, modelu Standard k- $\omega$  činí problém věrohodně simulovat úplav za překážkou - měření pro pozici v úhlu  $0^\circ$  a  $60^\circ$  podávají špatnou shodu s naměřenými daty zaznamenanými měřicím přístrojem se sklonem hlavičky  $90^\circ$  (měřený kontrolní objem ležel při této pozici přístroje blíže vnitřní stěně nádoby, než při měření s orientací



Obrázek 6.6: Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 90°



Obrázek 6.7: Procentuální odchylky výsledků simulace od experimentálních výsledků - sklon hlavice měřicího přístroje 45°



Obrázek 6.8: Grafické znázornění rychlosti  $v_{XY}$  v objemu simulované nádoby s přepážkou

přístroje  $45^\circ$ ). Nicméně pro zbytek naměřených pozic tento model podává relativně dobré výsledky.

Model Standard k- $\epsilon$  pak podává vyrovnané výsledky. Proto bych jej i zde doporučil k další aplikaci.

# Kapitola 7

## Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověřit, že se dá CFD metoda úspěšně aplikovat při návrhu chovného RAS systému a který z modelů nabízených v programu Ansys Fluent je pro tento účel nejvhodnější. A zdokumentovat postup tohoto řešení.

Z tohoto důvodu jsem provedl experimentální měření na obou zkoumaných geometriích na reálném systému používaném ve výzkumném ústavu rybářském a hydrobiologickém (VÚRH) ve Vodňanech. Měření jsem použil pro validování výsledků simulací. Pro případné pokračování v mé diplomové práci jsem uvedl některá doporučení, která by měla usnadnit vyhodnocení experimentálních dat.

Po provedení předběžné simulace, která mi měla napovědět, který z výpočetních modelů dostupných v programu Ansys Fluent je pro zkoumanou aplikaci vhodný, jsem provedl analýzu vlivu počtu elementů sítě u nádoby bez přepážky na přesnost řešení. Jak se ukázalo porovnáním výsledků předběžné simulace a simulace provedené na síti, která z této analýzy vyšla jako nejvíce vhodná, tento krok má opravdu smysl. Nejlépe je to vidět na modelu Spalart-Allmaras, který při simulaci na hrubé síti podával dobře vypadající výsledky, nicméně, jak se ukázalo později, u simulace provedené na jemné síti jeho přesnost klesla.

Z výsledků simulací se mi jeví pro simulování RAS systému jako nejvhodnější model Standard  $k-\epsilon$ . Podává velmi dobrou shodu s experimentálními daty u nádoby bez přepážky (průměrná odchylka je 14,85%). U optimalizační úlohy už tak dobrý výsledek nepodává (průměrná odchylka od experimentálních dat je 31,01%), nicméně nedochází u tohoto modelu k nějakým větším odchylkám v určitých oblastech nádrže, jako tomu je například u modelu Standard  $k-\omega$ . Model Standard  $k-\epsilon$  se pro stanovení rychlostního pole dál od stěny také více hodí díky tomu, že je v této oblasti přesnější, narozdíl od modelů z rodiny  $k-\omega$ .

Posledním bodem mé diplomové práce bylo navrhnout případné doporučení pro optimalizaci provozních podmínek reálného zařízení. Jak jsem již napsal v kapitole 6, rozhodl jsem se pro poměrně jednoduché řešení, kdy se do prostoru kádě vložila zarážka, jejíž účel byl vytvořit v jejím uplavu zónu s nízkou rychlostí proudění. Díky tomu v nádrži vzniklo mnohem širší pásmo rychlostí. Díky tomu budou mít chované ryby možnost vybrat si pro ně optimální rychlost proudění, což by mělo napomoci jejich růstu a tím pádem větší produkci jejich masa. Realizace tohoto navrženého řešení je na obrázku 7.1.

Výsledky simulace takto optimalizovaného systému jsem pak porovnal s experimentálními daty získanými na nádrži, kde jsem toto vylepšení realizoval.

Pro případné další pokračování v mé práci se nabízejí následující možnosti:

- Experimentální ověření navrhované optimalizace pomocí přepážky na sledované skupině ryb.
- Provedení analýzy vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení u modelu nádrže s přepážkou za použití jiného modelu, než Spalart-Allmaras, který vykazoval velké odchylky od experimentálních dat. Toto může být důvod pro oscilaci konvergence.
- Velký potenciál skýtá simulace usazování částic v nádobě. Toto je další důležitý bod návrhu chovné nádrže. Je tomu tak proto, že chované ryby jsou krmeny granulovaným krmivem, a z ekonomického hlediska je výhodné, pokud se toto krmivo udrží po co nejdelší dobu v proudu a neklesne na dno. Díky tomu se totiž zvyšuje šance, že tato peleta bude sežrána některou z chovaných ryb a to znamená efektivnější využití krmiva a s tím spojenou finanční úsporu.



Obrázek 7.1: Instalace přepážky v nádobě



# Literatura

- [1] Dopplerův jev. 2001-.  
URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Dopplerův\\_jev](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dopplerův_jev)
- [2] Ryblov. 2013.  
URL <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=rybolov&site=spotreba>
- [3] GCI (Grid Convergence Index) - názornější postup výpočtu. 2015.  
URL <https://moodle.fs.cvut.cz/mod/page/view.php?id=3401>
- [4] Ryby a zdraví. 2015.  
URL <http://www.cz-ryby.cz/content/default/14>
- [5] ANSYS Inc: Lecture 7: Mesh Quality and Advanced Topics. 2014.  
URL [https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/7833/mod\\_resource/content/2/Mesh-Intro\\_15.0\\_L07\\_Mesh\\_Quality\\_and\\_Advanced\\_Topics.pdf](https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/7833/mod_resource/content/2/Mesh-Intro_15.0_L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf)
- [6] ANSYS Inc: Lecture 7: Turbulence Modeling. 2014.  
URL [https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/8018/mod\\_resource/content/2/Fluent-Intro\\_15.0\\_L07\\_Turbulence.pdf](https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/8018/mod_resource/content/2/Fluent-Intro_15.0_L07_Turbulence.pdf)
- [7] Arjan P. Palstra, Josep V. Planas : Fish under exercise. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2011.  
URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s10695-011-9505-0>
- [8] Blejchař, T.: Turbulence Modelování proudění - CFX. 2010, VŠB – Technická univerzita Ostrava.  
URL [http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence\\_ESF\\_v4.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf)
- [9] Bregnballe, J.: *A Guide to Recirculation Aquaculture*. Copenhagen: Eurofish, 2015, ISBN 978-92-5-108776-3.
- [10] Food and Agriculture Organization: *State of World Fisheries and Aquaculture 2014*. Rome: FAO, 2014, ISBN 978-925-1082-751.
- [11] Ismail Celik, U Ghia, Peter E. Raad, P. J. Roache: Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 2008.  
URL <http://FluidsEngineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434171>

- [12] Kantoush S., Schleiss A. J., Sumi T., Murasaki M : LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-environment Research*, 2011.  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570644311000736>
- [13] Klíma, T.: *Zmapování proudového pole kapaliny proudící v trubici pomocí CFD výpočtu*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2015.
- [14] Louis A. Helfrich, George Libey: FISH FARMING IN RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEMS (RAS). 2003.
- [15] Michael B. Timmons, James M. Ebeling: Culture Tank Design. 2006.  
URL [http://www.powershow.com/view/3aeae-Mjc2N/Culture\\_Tank\\_Design\\_powerpoint\\_ppt\\_presentation](http://www.powershow.com/view/3aeae-Mjc2N/Culture_Tank_Design_powerpoint_ppt_presentation)
- [16] Petr Cisar, Movchan Oleksandr, Jaroslav Hanak, Antonin Barta : Automating water flow estimation in fish tanks. 2016.
- [17] Rodrigo A. Labatut, James M. Ebeling, James M. Ebeling, Rajesh Bhaskaran: Hydrodynamics of a Large-scale Mixed-Cell Raceway (MCR): Experimental studies. 2007.  
URL [https://www.researchgate.net/figure/229303506\\_fig12\\_Plan-view-of-the-mixed-cell-raceway-configuration-sump-not-shown-here-Drawing-not-to](https://www.researchgate.net/figure/229303506_fig12_Plan-view-of-the-mixed-cell-raceway-configuration-sump-not-shown-here-Drawing-not-to)
- [18] SCHMIDT, J. (editor): *World Ocean Review*, kapitola A bright future for fish farming. Hamburg: Maribus gGmbH, 2015, ISBN 978-3-86648-201-2, s. 80–93.
- [19] SonTek/YSI Inc., 9940 Summers Ridge Road, San Diego, CA 92121-3091 USA: *FlowTracker® Handheld ADV® Technical Manual (Firmware Version 3.3, Software Version 2.20)*. 2007.  
URL <http://www.sontek.com>

## Příloha A

# Zdrojové kódy použitých programů

### A.1 Stanovení GCI

```
1 clc; clear all;
2 N = [ 361751 7.9162e5 1.9209e6 ]; %1920904
3 Phi = [233.67462 231.66542 229.81216]; %hodnoty z WB z Ansysu (pro dp)
4
5 [N, i] = sort(N, 'descend'); % sestupne poradí siti
6 Phi = Phi(i);
7
8 figure(1);
9 plot(N, Phi, 'r*', N, Phi, 'b');
10 grid on;
11
12 D = 3; %pro 3D geometrii, pro 2D by D=2
13
14 r21 = (N(1)/N(2))^(1/D)
15 r32 = (N(2)/N(3))^(1/D)
16 if ( r21 < 1.3 || r32 < 1.3 )
17     disp('Koefficienty r21 a r32 by mely byt vetsi nez 1.3');
18 end
19
20 fun = @(x,N) x(1)+x(2)*N.^(-x(3)/D);
21
22 feqs = @(x) [ ...
23     fun(x,N(1)) - Phi(1); ...
24     fun(x,N(2)) - Phi(2); ...
25     fun(x,N(3)) - Phi(3) ...
26 ];
27
28 b = fsolve(feqs, [ Phi(1), 1, 1 ])
29
30 Phi_ext = b(1);
31
32
33 p = abs(b(3))
34 eps = abs(Phi_ext - Phi(1))/Phi_ext*100
35
```

```
36
37 e21a = abs((Phi(1)-Phi(2))/Phi(1))*100
38 e21ext = abs((Phi_ext-Phi(1))/Phi_ext)*100
39 GCI21 = 1.25*e21a/(r21^p-1)
40
41 e23a = abs((Phi(2)-Phi(3))/Phi(2))*100
42 e32ext = abs((Phi_ext-Phi(2))/Phi_ext)*100
43 GCI23 = 1.25*e23a/(r32^p-1)
44
45 figure(2);
46 plot(N,Phi,'rs');
47 hold on;
48 n = linspace(0.9*N(3),2.4*N(1),30);
49 plot(n,Phi_ext*ones(1,length(n)),'r');
50 plot(n,fun(b,n),'b');
51 xlabel('N')
52 ylabel('\Delta p')
53 hold off;
54 grid on;
```

## A.2 Vyhodnocení výsledků předběžné simulace

```
1 % vyhodnoceni dat
2 clear all
3 close all
4 clc
5
6 %% Poradi modelu, kazdy ma 19 radku, a format je Z [mm], Velocity [m/s]
7
8
9 %Standard k_Epsilon
10 %RNG k_eps
11 %SST k_Omega
12 %Standard k_Omega
13 %realizable k_eps
14 %Spalart Almanas
15
16 %% nahrani preditim iportovanych dat
17 load('import_90.mat');
18 load('zmerene_rychlosti.mat'); %Z souradnice je na druhem radku. ne ve ...
    sloupci!
19
20 %% Roztrideni dat R1 a podle modelu
21 pom=1;
22 radek=1;
23
24 delka=length(R10);
25
26 for i=1:delka
27 R1_0(radek, pom)=R10(i,1);
28 R1_60(radek, pom)=R160(i,1);
29 R1_120(radek, pom)=R1120(i,1);
30 R1_180(radek, pom)=R1180(i,1);
31 R1_240(radek, pom)=R1240(i,1);
32 R1_300(radek, pom)=R1300(i,1);
33 pom2=pom+1;
34 R1_0(radek, pom2)=R10(i,2);
35 R1_60(radek, pom2)=R160(i,2);
36 R1_120(radek, pom2)=R1120(i,2);
37 R1_180(radek, pom2)=R1180(i,2);
38 R1_240(radek, pom2)=R1240(i,2);
39 R1_300(radek, pom2)=R1300(i,2);
40
41 if radek ==19
42     radek=1;
43     pom=pom+2;
44 else
45     radek=radek+1;
46 end
47 end
48
49 %% Roztrideni dat R2
50 pom=1;
51 radek=1;
```

```

52
53 delka=length(R20);
54
55 for i=1:delka
56 R2_0(radek, pom)=R20(i,1);
57 R2_60(radek, pom)=R260(i,1);
58 R2_120(radek, pom)=R2120(i,1);
59 R2_180(radek, pom)=R2180(i,1);
60 R2_240(radek, pom)=R2240(i,1);
61 R2_300(radek, pom)=R2300(i,1);
62 pom2=pom+1;
63 R2_0(radek, pom2)=R20(i,2);
64 R2_60(radek, pom2)=R260(i,2);
65 R2_120(radek, pom2)=R2120(i,2);
66 R2_180(radek, pom2)=R2180(i,2);
67 R2_240(radek, pom2)=R2240(i,2);
68 R2_300(radek, pom2)=R2300(i,2);
69
70 if radek ==19
71     radek=1;
72     pom=pom+2;
73 else
74     radek=radek+1;
75 end
76 end
77
78 %% Grafy
79 %R1 0
80 figure(1)
81 plot(imp_R1_0(2, :), imp_R1_0(1, :), '*', R1_0(:,1), R1_0(:,2),R1_0(:,3), ...
      R1_0(:,4),R1_0(:,5), R1_0(:,6),...
82     R1_0(:,7), R1_0(:,8), R1_0(:,9), R1_0(:,10), R1_0(:,11), R1_0(:,12))
83 xlabel('Z [mm]')
84 ylabel('Velocity [m/s]')
85 title('R1 0')
86 legend('measured data', 'Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon', 'SST k ...
      \Omega', 'Standard k \Omega', 'Realizable k \epsilon',...
87     'Spalart Almas')
88
89 %R2 0
90 figure(2)
91 plot(imp_R2_0(2, :), imp_R2_0(1, :), '*', R2_0(:,1), R2_0(:,2),R2_0(:,3), ...
      R2_0(:,4),R2_0(:,5), R2_0(:,6),...
92     R2_0(:,7), R2_0(:,8), R2_0(:,9), R2_0(:,10), R2_0(:,11), R2_0(:,12))
93 xlabel('Z [mm]')
94 ylabel('Velocity [m/s]')
95 title('R2 0')
96 legend('measured data', 'Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon', 'SST k ...
      \Omega', 'Standard k \Omega', 'Realizable k \epsilon',...
97     'Spalart Almas')
98
99 %R1 60
100 figure(3)
101 plot(imp_R1_60(2, :), imp_R1_60(1, :), '*', R1_60(:,1), ...
      R1_60(:,2),R1_60(:,3), R1_60(:,4),R1_60(:,5), R1_60(:,6),...

```

```

102     R1_60(:,7), R1_60(:,8), R1_60(:,9), R1_60(:,10), R1_60(:,11), ...
        R1_60(:,12))
103 xlabel('Z [mm]')
104 ylabel('Velocity [m/s]')
105 title('R1 60')
106 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
107
108
109 %R2 60
110 figure(4)
111 plot(imp_R2_60(2, :), imp_R2_60(1, :), '*', R2_60(:,1), ...
        R2_60(:,2),R2_60(:,3), R2_60(:,4),R2_60(:,5), R2_60(:,6),...
112     R2_60(:,7), R2_60(:,8), R2_60(:,9), R2_60(:,10), R2_60(:,11), ...
        R2_60(:,12))
113 xlabel('Z [mm]')
114 ylabel('Velocity [m/s]')
115 title('R2 60')
116 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
117
118
119 %R1 120
120 figure(5)
121 plot(imp_R1_120(2, :), imp_R1_120(1, :), '*', R1_120(:,1), ...
        R1_120(:,2),R1_120(:,3), R1_120(:,4),R1_120(:,5), R1_120(:,6),...
122     R1_120(:,7), R1_120(:,8), R1_120(:,9), R1_120(:,10), R1_120(:,11), ...
        R1_120(:,12))
123 xlabel('Z [mm]')
124 ylabel('Velocity [m/s]')
125 title('R1 120')
126 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
127
128
129 %R2 120
130 figure(6)
131 plot(imp_R2_120(2, :), imp_R2_120(1, :), '*', R2_120(:,1), ...
        R2_120(:,2),R2_120(:,3), R2_120(:,4),R2_120(:,5), R2_120(:,6),...
132     R2_120(:,7), R2_120(:,8), R2_120(:,9), R2_120(:,10), R2_120(:,11), ...
        R2_120(:,12))
133 xlabel('Z [mm]')
134 ylabel('Velocity [m/s]')
135 title('R2 120')
136 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
137
138
139 %R1 180
140 figure(7)
141 plot(imp_R1_180(2, :), imp_R1_180(1, :), '*', R1_180(:,1), ...
        R1_180(:,2),R1_180(:,3), R1_180(:,4),R1_180(:,5), R1_180(:,6),...
142     R1_180(:,7), R1_180(:,8), R1_180(:,9), R1_180(:,10), R1_180(:,11), ...
        R1_180(:,12))
143 xlabel('Z [mm]')
144 ylabel('Velocity [m/s]')

```

```

145 title('R1 180')
146 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
147
148
149 %R2 180
150 figure(8)
151 plot(imp_R2_180(2, :), imp_R2_180(1, :), '*', R2_180(:,1), ...
        R2_180(:,2),R2_180(:,3), R2_180(:,4),R2_180(:,5), R2_180(:,6),...
152     R2_180(:,7), R2_180(:,8), R2_180(:,9), R2_180(:,10), R2_180(:,11), ...
        R2_180(:,12))
153 xlabel('Z [mm]')
154 ylabel('Velocity [m/s]')
155 title('R2 180')
156 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
157
158
159 %R1 240
160 figure(9)
161 plot(imp_R1_240(2, :), imp_R1_240(1, :), '*', R1_240(:,1), ...
        R1_240(:,2),R1_240(:,3), R1_240(:,4),R1_240(:,5), R1_240(:,6),...
162     R1_240(:,7), R1_240(:,8), R1_240(:,9), R1_240(:,10), R1_240(:,11), ...
        R1_240(:,12))
163 xlabel('Z [mm]')
164 ylabel('Velocity [m/s]')
165 title('R1 240')
166 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
167
168
169 %R2 240
170 figure(10)
171 plot(imp_R2_240(2, :), imp_R2_240(1, :), '*', R2_240(:,1), ...
        R2_240(:,2),R2_240(:,3), R2_240(:,4),R2_240(:,5), R2_240(:,6),...
172     R2_240(:,7), R2_240(:,8), R2_240(:,9), R2_240(:,10), R2_240(:,11), ...
        R2_240(:,12))
173 xlabel('Z [mm]')
174 ylabel('Velocity [m/s]')
175 title('R2 240')
176 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
        'Spalart Almanas')
177
178
179 %R1 300
180 figure(11)
181 plot(imp_R1_300(2, :), imp_R1_300(1, :), '*', R1_300(:,1), ...
        R1_300(:,2),R1_300(:,3), R1_300(:,4),R1_300(:,5), R1_300(:,6),...
182     R1_300(:,7), R1_300(:,8), R1_300(:,9), R1_300(:,10), R1_300(:,11), ...
        R1_300(:,12))
183 xlabel('Z [mm]')
184 ylabel('Velocity [m/s]')
185 title('R1 300')
186 legend('measured data','Standard k \epsilon', 'RNG k \epsilon','SST k ...
        \Omega','Standard k \Omega','Realizable k \epsilon',...
187     'Spalart Almanas')

```



```

188
189 %R2 300
190 figure(12)
191 plot(imp_R2_300(2, :), imp_R2_300(1, :), '*', R2_300(:,1), ...
      R2_300(:,2), R2_300(:,3), R2_300(:,4), R2_300(:,5), R2_300(:,6), ...
192      R2_300(:,7), R2_300(:,8), R2_300(:,9), R2_300(:,10), R2_300(:,11), ...
      R2_300(:,12))
193 xlabel('Z [mm]')
194 ylabel('Velocity [m/s]')
195 title('R2 300')
196 legend('measured data', 'RNG k \epsilon', 'Realizable k \epsilon', ...
197        'SST k \Omega', 'Spalart Almanas', 'Standard k \epsilon', 'Standard k ...
        \Omega')
198
199 %% Save figure
200 % for i=1:12
201 % print(figure(i), '-djpeg')
202 % end
203
204 %% Porovnaní výsledku
205 load('Zmerene_Vxy.mat');
206
207 i=0;
208 j=0;
209
210 procento=Zmerene_Vxy./100;
211
212 %modely kporovnaní
213 S_k_Epsilon=[R1_0(1,2), (R1_0(9,2)+R1_0(10,2))/2, R1_0(19,2), R2_0(1,2), ...
              (R2_0(9,2)+R2_0(10,2))/2, R2_0(19,2)
214              R1_60(1,2), (R1_60(9,2)+R1_60(10,2))/2, R1_60(19,2), R2_60(1,2), ...
              (R2_60(9,2)+R2_60(10,2))/2, R2_60(19,2)
215              R1_120(1,2), (R1_120(9,2)+R1_120(10,2))/2, R1_120(19,2), R2_120(1,2), ...
              (R2_120(9,2)+R2_120(10,2))/2, R2_120(19,2)
216              R1_180(1,2), (R1_180(9,2)+R1_180(10,2))/2, R1_180(19,2), R2_180(1,2), ...
              (R2_180(9,2)+R2_180(10,2))/2, R2_180(19,2)
217              R1_240(1,2), (R1_240(9,2)+R1_240(10,2))/2, R1_240(19,2), R2_240(1,2), ...
              (R2_240(9,2)+R2_240(10,2))/2, R2_240(19,2)
218              R1_300(1,2), (R1_300(9,2)+R1_300(10,2))/2, R1_300(19,2), R2_300(1,2), ...
              (R2_300(9,2)+R2_300(10,2))/2, R2_300(19,2)];
219
220 RNG_k_Epsilon=[R1_0(1,4), (R1_0(9,4)+R1_0(10,4))/2, R1_0(19,4), ...
                 R2_0(1,4), (R2_0(9,4)+R2_0(10,4))/2, R2_0(19,4)
221                 R1_60(1,4), (R1_60(9,4)+R1_60(10,4))/2, R1_60(19,4), R2_60(1,4), ...
                 (R2_60(9,4)+R2_60(10,4))/2, R2_60(19,4)
222                 R1_120(1,4), (R1_120(9,4)+R1_120(10,4))/2, R1_120(19,4), R2_120(1,4), ...
                 (R2_120(9,4)+R2_120(10,4))/2, R2_120(19,4)
223                 R1_180(1,4), (R1_180(9,4)+R1_180(10,4))/2, R1_180(19,4), R2_180(1,4), ...
                 (R2_180(9,4)+R2_180(10,4))/2, R2_180(19,4)
224                 R1_240(1,4), (R1_240(9,4)+R1_240(10,4))/2, R1_240(19,4), R2_240(1,4), ...
                 (R2_240(9,4)+R2_240(10,4))/2, R2_240(19,4)
225                 R1_300(1,4), (R1_300(9,4)+R1_300(10,4))/2, R1_300(19,4), R2_300(1,4), ...
                 (R2_300(9,4)+R2_300(10,4))/2, R2_300(19,4)];
226
227 SST_k_Omega=[R1_0(1,6), (R1_0(9,6)+R1_0(10,6))/2, R1_0(19,6), R2_0(1,6), ...
               (R2_0(9,6)+R2_0(10,6))/2, R2_0(19,6)

```

```

228 R1_60(1,6), (R1_60(9,6)+R1_60(10,6))/2, R1_60(19,6), R2_60(1,6), ...
      (R2_60(9,6)+R2_60(10,6))/2, R2_60(19,6)
229 R1_120(1,6), (R1_120(9,6)+R1_120(10,6))/2, R1_120(19,6), R2_120(1,6), ...
      (R2_120(9,6)+R2_120(10,6))/2, R2_120(19,6)
230 R1_180(1,6), (R1_180(9,6)+R1_180(10,6))/2, R1_180(19,6), R2_180(1,6), ...
      (R2_180(9,6)+R2_180(10,6))/2, R2_180(19,6)
231 R1_240(1,6), (R1_240(9,6)+R1_240(10,6))/2, R1_240(19,6), R2_240(1,6), ...
      (R2_240(9,6)+R2_240(10,6))/2, R2_240(19,6)
232 R1_300(1,6), (R1_300(9,6)+R1_300(10,6))/2, R1_300(19,6), R2_300(1,6), ...
      (R2_300(9,6)+R2_300(10,6))/2, R2_300(19,6)];
233
234 Standard_k_Omega=[R1_0(1,8), (R1_0(9,8)+R1_0(10,8))/2, R1_0(19,8), ...
      R2_0(1,8), (R2_0(9,8)+R2_0(10,8))/2, R2_0(19,8)
235 R1_60(1,8), (R1_60(9,8)+R1_60(10,8))/2, R1_60(19,8), R2_60(1,8), ...
      (R2_60(9,8)+R2_60(10,8))/2, R2_60(19,8)
236 R1_120(1,8), (R1_120(9,8)+R1_120(10,8))/2, R1_120(19,8), R2_120(1,8), ...
      (R2_120(9,8)+R2_120(10,8))/2, R2_120(19,8)
237 R1_180(1,8), (R1_180(9,8)+R1_180(10,8))/2, R1_180(19,8), R2_180(1,8), ...
      (R2_180(9,8)+R2_180(10,8))/2, R2_180(19,8)
238 R1_240(1,8), (R1_240(9,8)+R1_240(10,8))/2, R1_240(19,8), R2_240(1,8), ...
      (R2_240(9,8)+R2_240(10,8))/2, R2_240(19,8)
239 R1_300(1,8), (R1_300(9,8)+R1_300(10,8))/2, R1_300(19,8), R2_300(1,8), ...
      (R2_300(9,8)+R2_300(10,8))/2, R2_300(19,8)];
240
241 Realizable_k_Epsilon=[R1_0(1,10), (R1_0(9,10)+R1_0(10,10))/2, ...
      R1_0(19,10), R2_0(1,10), (R2_0(9,10)+R2_0(10,10))/2, R2_0(19,10)
242 R1_60(1,10), (R1_60(9,10)+R1_60(10,10))/2, R1_60(19,10), R2_60(1,10), ...
      (R2_60(9,10)+R2_60(10,10))/2, R2_60(19,10)
243 R1_120(1,10), (R1_120(9,10)+R1_120(10,10))/2, R1_120(19,10), ...
      R2_120(1,10), (R2_120(9,10)+R2_120(10,10))/2, R2_120(19,10)
244 R1_180(1,10), (R1_180(9,10)+R1_180(10,10))/2, R1_180(19,10), ...
      R2_180(1,10), (R2_180(9,10)+R2_180(10,10))/2, R2_180(19,10)
245 R1_240(1,10), (R1_240(9,10)+R1_240(10,10))/2, R1_240(19,10), ...
      R2_240(1,10), (R2_240(9,10)+R2_240(10,10))/2, R2_240(19,10)
246 R1_300(1,10), (R1_300(9,10)+R1_300(10,10))/2, R1_300(19,10), ...
      R2_300(1,10), (R2_300(9,10)+R2_300(10,10))/2, R2_300(19,10)];
247
248 Spalart_Almanas=[R1_0(1,12), (R1_0(9,12)+R1_0(10,12))/2, R1_0(19,12), ...
      R2_0(1,12), (R2_0(9,12)+R2_0(10,12))/2, R2_0(19,12)
249 R1_60(1,12), (R1_60(9,12)+R1_60(10,12))/2, R1_60(19,12), R2_60(1,12), ...
      (R2_60(9,12)+R2_60(10,12))/2, R2_60(19,12)
250 R1_120(1,12), (R1_120(9,12)+R1_120(10,12))/2, R1_120(19,12), ...
      R2_120(1,12), (R2_120(9,12)+R2_120(10,12))/2, R2_120(19,12)
251 R1_180(1,12), (R1_180(9,12)+R1_180(10,12))/2, R1_180(19,12), ...
      R2_180(1,12), (R2_180(9,12)+R2_180(10,12))/2, R2_180(19,12)
252 R1_240(1,12), (R1_240(9,12)+R1_240(10,12))/2, R1_240(19,12), ...
      R2_240(1,12), (R2_240(9,12)+R2_240(10,12))/2, R2_240(19,12)
253 R1_300(1,12), (R1_300(9,12)+R1_300(10,12))/2, R1_300(19,12), ...
      R2_300(1,12), (R2_300(9,12)+R2_300(10,12))/2, R2_300(19,12)];
254
255 %samotne porovnaní
256 p_S_k_Epsilon=abs(S_k_Epsilon./procento-100);
257 p_RNG_k_Epsilon=abs(RNG_k_Epsilon./procento-100);
258 p_SST_k_Omega=abs(SST_k_Omega./procento-100);
259 p_Standard_k_Omega=abs(Standard_k_Omega./procento-100);
260 p_Realizable_k_Epsilon=abs(Realizable_k_Epsilon./procento-100);

```

```
261 p_Spalart_Almanas=abs(Spalart_Almanas./procento-100);
262
263 mean_s_k_eps=mean(p_S_k_Epsilon, 2)
264 mean_p_RNG_k_Epsilon=mean(p_RNG_k_Epsilon, 2)
265 mean_p_SST_k_Omega=mean(p_SST_k_Omega, 2)
266 mean_p_Standard_k_Omega=mean(p_Standard_k_Omega, 2)
267 mean_p_Realizable_k_Epsilon=mean(p_Realizable_k_Epsilon, 2)
268 mean_p_Spalart_Almanas=mean(p_Spalart_Almanas, 2)
269
270 %% Graficke vyhodnoceni
271 stupne_0=[mean_s_k_eps(1, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(1,:); ...
           mean_p_SST_k_Omega(1,:); mean_p_Standard_k_Omega(1,:);...
           mean_p_Realizable_k_Epsilon(1,:);mean_p_Spalart_Almanas(1, :)];
272
273 stupne_60=[mean_s_k_eps(2, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(2,:); ...
            mean_p_SST_k_Omega(2,:); mean_p_Standard_k_Omega(2,:);...
            mean_p_Realizable_k_Epsilon(2,:);mean_p_Spalart_Almanas(2, :)];
274
275 stupne_120=[mean_s_k_eps(3, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(3,:); ...
             mean_p_SST_k_Omega(3,:); mean_p_Standard_k_Omega(3,:);...
             mean_p_Realizable_k_Epsilon(3,:);mean_p_Spalart_Almanas(3, :)];
276
277 stupne_180=[mean_s_k_eps(4, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(4,:); ...
             mean_p_SST_k_Omega(4,:); mean_p_Standard_k_Omega(4,:);...
             mean_p_Realizable_k_Epsilon(4,:);mean_p_Spalart_Almanas(4, :)];
278
279 stupne_240=[mean_s_k_eps(5, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(5,:); ...
             mean_p_SST_k_Omega(5,:); mean_p_Standard_k_Omega(5,:);...
             mean_p_Realizable_k_Epsilon(5,:);mean_p_Spalart_Almanas(5, :)];
280
281 stupne_300=[mean_s_k_eps(6, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(6,:); ...
             mean_p_SST_k_Omega(6,:); mean_p_Standard_k_Omega(6,:);...
             mean_p_Realizable_k_Epsilon(6,:);mean_p_Spalart_Almanas(6, :)];
282
283
284 figure(13)
285 bar(stupne_0)
286 %legend(
287
288 figure(14)
289 bar(stupne_60)
290
291 figure(15)
292 bar(stupne_120)
293
294 figure(16)
295 bar(stupne_180)
296
297 figure(17)
298 bar(stupne_240)
299
300 figure(18)
301 bar(stupne_300)
```

### A.3 Vyhodnocení simulací s jemnou sítí

```
1 % vyhodnoceni dat
2 clear all
3 close all
4 clc
5
6 %% Poradi modelu, kazdy ma 44 radku, a format je Z [m], Velocity [m/s]
7 %Spalart Almanas
8 %Standard k_Epsilon
9 %Standard k_Omega
10 %SST k_Omega
11
12
13 %% nahrani predtim iportovanych dat
14 load('import_90_2.mat');
15 load('zmerene_rychlosti.mat'); %Z souradnice je na druhem radku. ne ve ...
    sloupci!
16
17
18
19 %% Roztrideni dat R1 a podle modelu
20 % *1000 kvuli prevodu na mm
21 pom=1;
22 radek=1;
23
24 delka=length(R10);
25
26 for i=1:delka
27 R1_0(radek, pom)=R10(i,1)*1000;
28 R1_60(radek, pom)=R160(i,1)*1000;
29 R1_120(radek, pom)=R1120(i,1)*1000;
30 R1_180(radek, pom)=R1180(i,1)*1000;
31 R1_240(radek, pom)=R1240(i,1)*1000;
32 R1_300(radek, pom)=R1300(i,1)*1000;
33 pom2=pom+1;
34 R1_0(radek, pom2)=R10(i,2);
35 R1_60(radek, pom2)=R160(i,2);
36 R1_120(radek, pom2)=R1120(i,2);
37 R1_180(radek, pom2)=R1180(i,2);
38 R1_240(radek, pom2)=R1240(i,2);
39 R1_300(radek, pom2)=R1300(i,2);
40
41 if radek ==44 %44 je pocet zaznamu na jeden model
42     radek=1;
43     pom=pom+2;
44 else
45     radek=radek+1;
46 end
47 end
48
49 %% Roztrideni dat R2
50 pom=1;
51 radek=1;
```

```

52
53 delka=length(R20);
54
55 for i=1:delka
56 R2_0(radek, pom)=R20(i,1)*1000;
57 R2_60(radek, pom)=R260(i,1)*1000;
58 R2_120(radek, pom)=R2120(i,1)*1000;
59 R2_180(radek, pom)=R2180(i,1)*1000;
60 R2_240(radek, pom)=R2240(i,1)*1000;
61 R2_300(radek, pom)=R2300(i,1)*1000;
62 pom2=pom+1;
63 R2_0(radek, pom2)=R20(i,2);
64 R2_60(radek, pom2)=R260(i,2);
65 R2_120(radek, pom2)=R2120(i,2);
66 R2_180(radek, pom2)=R2180(i,2);
67 R2_240(radek, pom2)=R2240(i,2);
68 R2_300(radek, pom2)=R2300(i,2);
69
70 if radek ==44
71     radek=1;
72     pom=pom+2;
73 else
74     radek=radek+1;
75 end
76 end
77
78 %% Grafy
79 %R1 0
80 figure(1)
81 plot(imp_R1_0(2, :), imp_R1_0(1, :), '*', R1_0(:,1), R1_0(:,2),R1_0(:,3), ...
      R1_0(:,4),R1_0(:,5), R1_0(:,6),...
82     R1_0(:,7), R1_0(:,8))
83 xlabel('Z [mm]')
84 ylabel('Velocity [m/s]')
85 title('R1 0')
86 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
87
88 %R2 0
89 figure(2)
90 plot(imp_R2_0(2, :), imp_R2_0(1, :), '*', R2_0(:,1), R2_0(:,2),R2_0(:,3), ...
      R2_0(:,4),R2_0(:,5), R2_0(:,6),...
91     R2_0(:,7), R2_0(:,8))
92 xlabel('Z [mm]')
93 ylabel('Velocity [m/s]')
94 title('R2 0')
95 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
96
97 %R1 60
98 figure(3)
99 plot(imp_R1_60(2, :), imp_R1_60(1, :), '*', R1_60(:,1), ...
      R1_60(:,2),R1_60(:,3), R1_60(:,4),R1_60(:,5), R1_60(:,6),...
100     R1_60(:,7), R1_60(:,8))
101 xlabel('Z [mm]')
102 ylabel('Velocity [m/s]')

```

```

103 title('R1 60')
104 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
105
106 %R2 60
107 figure(4)
108 plot(imp_R2_60(2, :), imp_R2_60(1, :), '*', R2_60(:,1), ...
      R2_60(:,2),R2_60(:,3), R2_60(:,4),R2_60(:,5), R2_60(:,6),...
      R2_60(:,7), R2_60(:,8))
109
110 xlabel('Z [mm]')
111 ylabel('Velocity [m/s]')
112 title('R2 60')
113 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
114
115 %R1 120
116 figure(5)
117 plot(imp_R1_120(2, :), imp_R1_120(1, :), '*', R1_120(:,1), ...
      R1_120(:,2),R1_120(:,3), R1_120(:,4),R1_120(:,5), R1_120(:,6),...
      R1_120(:,7), R1_120(:,8))
118
119 xlabel('Z [mm]')
120 ylabel('Velocity [m/s]')
121 title('R1 120')
122 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
123
124 %R2 120
125 figure(6)
126 plot(imp_R2_120(2, :), imp_R2_120(1, :), '*', R2_120(:,1), ...
      R2_120(:,2),R2_120(:,3), R2_120(:,4),R2_120(:,5), R2_120(:,6),...
      R2_120(:,7), R2_120(:,8))
127
128 xlabel('Z [mm]')
129 ylabel('Velocity [m/s]')
130 title('R2 120')
131 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
132
133 %R1 180
134 figure(7)
135 plot(imp_R1_180(2, :), imp_R1_180(1, :), '*', R1_180(:,1), ...
      R1_180(:,2),R1_180(:,3), R1_180(:,4),R1_180(:,5), R1_180(:,6),...
      R1_180(:,7), R1_180(:,8))
136
137 xlabel('Z [mm]')
138 ylabel('Velocity [m/s]')
139 title('R1 180')
140 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
141
142 %R2 180
143 figure(8)
144 plot(imp_R2_180(2, :), imp_R2_180(1, :), '*', R2_180(:,1), ...
      R2_180(:,2),R2_180(:,3), R2_180(:,4),R2_180(:,5), R2_180(:,6),...
      R2_180(:,7), R2_180(:,8))
145
146 xlabel('Z [mm]')
147 ylabel('Velocity [m/s]')
148 title('R2 180')

```

```

149 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
150
151 %R1 240
152 figure(9)
153 plot(imp_R1_240(2, :), imp_R1_240(1, :), '*', R1_240(:,1), ...
      R1_240(:,2),R1_240(:,3), R1_240(:,4),R1_240(:,5), R1_240(:,6),...
154      R1_240(:,7), R1_240(:,8))
155 xlabel('Z [mm]')
156 ylabel('Velocity [m/s]')
157 title('R1 240')
158 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
159
160 %R2 240
161 figure(10)
162 plot(imp_R2_240(2, :), imp_R2_240(1, :), '*', R2_240(:,1), ...
      R2_240(:,2),R2_240(:,3), R2_240(:,4),R2_240(:,5), R2_240(:,6),...
163      R2_240(:,7), R2_240(:,8))
164 xlabel('Z [mm]')
165 ylabel('Velocity [m/s]')
166 title('R2 240')
167 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
168
169 %R1 300
170 figure(11)
171 plot(imp_R1_300(2, :), imp_R1_300(1, :), '*', R1_300(:,1), ...
      R1_300(:,2),R1_300(:,3), R1_300(:,4),R1_300(:,5), R1_300(:,6),...
172      R1_300(:,7), R1_300(:,8))
173 xlabel('Z [mm]')
174 ylabel('Velocity [m/s]')
175 title('R1 300')
176 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
177
178 %R2 300
179 figure(12)
180 plot(imp_R2_300(2, :), imp_R2_300(1, :), '*', R2_300(:,1), ...
      R2_300(:,2),R2_300(:,3), R2_300(:,4),R2_300(:,5), R2_300(:,6),...
181      R2_300(:,7), R2_300(:,8))
182 xlabel('Z [mm]')
183 ylabel('Velocity [m/s]')
184 title('R2 300')
185 legend('measured data','Spalart Almanas','Standard k \epsilon', 'Standard ...
      k \Omega','SST k \Omega')
186
187 %% Save figure
188 % for i=1:12
189 % print(figure(i),'-djpeg')
190 % end
191
192 %% Porovnaní výsledku
193 load('Zmerene_Vxy.mat');
194
195 i=0;

```

```

196 j=0;
197
198 procento=Zmerene_Vxy./100;
199
200 %modely k porovnaní
201
202 Spalart_Almanas=[R1_0(1,2), (R1_0(21,2)+R1_0(22,2))/2, R1_0(44,2), ...
    R2_0(1,2), (R2_0(21,2)+R2_0(22,2))/2, R2_0(44,2)
203 R1_60(1,2), (R1_60(21,2)+R1_60(22,2))/2, R1_60(44,2), R2_60(1,2), ...
    (R2_60(21,2)+R2_60(22,2))/2, R2_60(44,2)
204 R1_120(1,2), (R1_120(21,2)+R1_120(22,2))/2, R1_120(44,2), ...
    R2_120(1,2), (R2_120(21,2)+R2_120(22,2))/2, R2_120(44,2)
205 R1_180(1,2), (R1_180(21,2)+R1_180(22,2))/2, R1_180(44,2), ...
    R2_180(1,2), (R2_180(21,2)+R2_180(22,2))/2, R2_180(44,2)
206 R1_240(1,2), (R1_240(21,2)+R1_240(22,2))/2, R1_240(44,2), ...
    R2_240(1,2), (R2_240(21,2)+R2_240(22,2))/2, R2_240(44,2)
207 R1_300(1,2), (R1_300(21,2)+R1_300(22,2))/2, R1_300(44,2), ...
    R2_300(1,2), (R2_300(21,2)+R2_300(22,2))/2, R2_300(44,2)];
208
209 S_k_Epsilon=[R1_0(1,4), (R1_0(21,4)+R1_0(22,4))/2, R1_0(44,4), R2_0(1,4), ...
    (R2_0(21,4)+R2_0(22,4))/2, R2_0(44,4)
210 R1_60(1,4), (R1_60(21,4)+R1_60(22,4))/2, R1_60(44,4), R2_60(1,4), ...
    (R2_60(21,4)+R2_60(22,4))/2, R2_60(44,4)
211 R1_120(1,4), (R1_120(21,4)+R1_120(22,4))/2, R1_120(44,4), ...
    R2_120(1,4), (R2_120(21,4)+R2_120(22,4))/2, R2_120(44,4)
212 R1_180(1,4), (R1_180(21,4)+R1_180(22,4))/2, R1_180(44,4), ...
    R2_180(1,4), (R2_180(21,4)+R2_180(22,4))/2, R2_180(44,4)
213 R1_240(1,4), (R1_240(21,4)+R1_240(22,4))/2, R1_240(44,4), ...
    R2_240(1,4), (R2_240(21,4)+R2_240(22,4))/2, R2_240(44,4)
214 R1_300(1,4), (R1_300(21,4)+R1_300(22,4))/2, R1_300(44,4), ...
    R2_300(1,4), (R2_300(21,4)+R2_300(22,4))/2, R2_300(44,4)];
215
216 Standard_k_Omega=[R1_0(1,6), (R1_0(21,6)+R1_0(22,6))/2, R1_0(44,6), ...
    R2_0(1,6), (R2_0(21,6)+R2_0(22,6))/2, R2_0(44,6)
217 R1_60(1,6), (R1_60(21,6)+R1_60(22,6))/2, R1_60(44,6), R2_60(1,6), ...
    (R2_60(21,6)+R2_60(22,6))/2, R2_60(44,6)
218 R1_120(1,6), (R1_120(21,6)+R1_120(22,6))/2, R1_120(44,6), ...
    R2_120(1,6), (R2_120(21,6)+R2_120(22,6))/2, R2_120(44,6)
219 R1_180(1,6), (R1_180(21,6)+R1_180(22,6))/2, R1_180(44,6), ...
    R2_180(1,6), (R2_180(21,6)+R2_180(22,6))/2, R2_180(44,6)
220 R1_240(1,6), (R1_240(21,6)+R1_240(22,6))/2, R1_240(44,6), ...
    R2_240(1,6), (R2_240(21,6)+R2_240(22,6))/2, R2_240(44,6)
221 R1_300(1,6), (R1_300(21,6)+R1_300(22,6))/2, R1_300(44,6), ...
    R2_300(1,6), (R2_300(21,6)+R2_300(22,6))/2, R2_300(44,6)];
222
223 SST_k_Omega=[R1_0(1,8), (R1_0(21,8)+R1_0(22,8))/2, R1_0(44,8), R2_0(1,8), ...
    (R2_0(21,8)+R2_0(22,8))/2, R2_0(44,8)
224 R1_60(1,8), (R1_60(21,8)+R1_60(22,8))/2, R1_60(44,8), R2_60(1,8), ...
    (R2_60(21,8)+R2_60(22,8))/2, R2_60(44,8)
225 R1_120(1,8), (R1_120(21,8)+R1_120(22,8))/2, R1_120(44,8), ...
    R2_120(1,8), (R2_120(21,8)+R2_120(22,8))/2, R2_120(44,8)
226 R1_180(1,8), (R1_180(21,8)+R1_180(22,8))/2, R1_180(44,8), ...
    R2_180(1,8), (R2_180(21,8)+R2_180(22,8))/2, R2_180(44,8)
227 R1_240(1,8), (R1_240(21,8)+R1_240(22,8))/2, R1_240(44,8), ...
    R2_240(1,8), (R2_240(21,8)+R2_240(22,8))/2, R2_240(44,8)

```



```

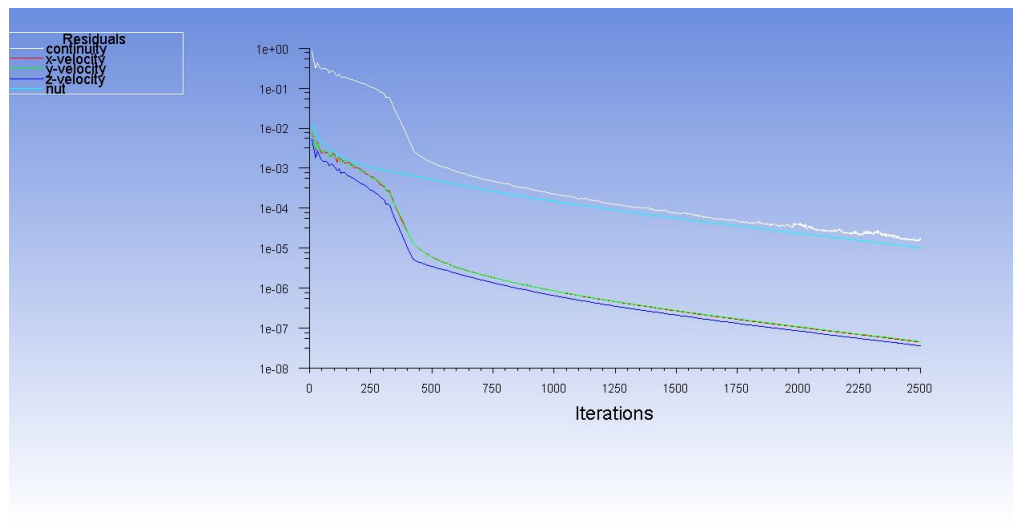
228     R1_300(1,8), (R1_300(21,8)+R1_300(22,8))/2, R1_300(44,8), ...
        R2_300(1,8), (R2_300(21,8)+R2_300(22,8))/2, R2_300(44,8)];
229
230
231 %samotne porovnaní
232 p_S_k_Epsilon=abs(S_k_Epsilon./procento-100);
233 p_SST_k_Omega=abs(SST_k_Omega./procento-100);
234 p_Standard_k_Omega=abs(Standard_k_Omega./procento-100);
235 p_Spalart_Almanas=abs(Spalart_Almanas./procento-100);
236
237 mean_s_k_eps=mean(p_S_k_Epsilon, 2)
238 xlswrite('graf.xlsx',mean_s_k_eps,'A1:A6')
239 mean_p_SST_k_Omega=mean(p_SST_k_Omega, 2)
240 xlswrite('graf.xlsx',mean_p_SST_k_Omega, 'B1:B6')
241 mean_p_Standard_k_Omega=mean(p_Standard_k_Omega, 2)
242 xlswrite('graf.xlsx',mean_p_Standard_k_Omega,'C1:C6')
243 mean_p_Spalart_Almanas=mean(p_Spalart_Almanas, 2)
244 xlswrite('graf.xlsx',mean_p_Spalart_Almanas,'D1:D6')
245
246
247 mean_f_s_k_eps=mean(mean_s_k_eps)
248 mean_f_SST_k_Omega=mean(mean_p_SST_k_Omega)
249 mean_f_Standard_k_Omega=mean(mean_p_Standard_k_Omega)
250 mean_f_Spalart_Almanas=mean(mean_p_Spalart_Almanas)
251 %% Grafické vyhodnocení
252 % stupne_0=[mean_s_k_eps(1, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(1,:); ...
        mean_p_SST_k_Omega(1,:); mean_p_Standard_k_Omega(1,:);...
253 %     mean_p_Realizable_k_Epsilon(1,:);mean_p_Spalart_Almanas(1, :)];
254 % stupne_60=[mean_s_k_eps(2, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(2,:); ...
        mean_p_SST_k_Omega(2,:); mean_p_Standard_k_Omega(2,:);...
255 %     mean_p_Realizable_k_Epsilon(2,:);mean_p_Spalart_Almanas(2, :)];
256 % stupne_120=[mean_s_k_eps(3, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(3,:); ...
        mean_p_SST_k_Omega(3,:); mean_p_Standard_k_Omega(3,:);...
257 %     mean_p_Realizable_k_Epsilon(3,:);mean_p_Spalart_Almanas(3, :)];
258 % stupne_180=[mean_s_k_eps(4, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(4,:); ...
        mean_p_SST_k_Omega(4,:); mean_p_Standard_k_Omega(4,:);...
259 %     mean_p_Realizable_k_Epsilon(4,:);mean_p_Spalart_Almanas(4, :)];
260 % stupne_240=[mean_s_k_eps(5, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(5,:); ...
        mean_p_SST_k_Omega(5,:); mean_p_Standard_k_Omega(5,:);...
261 %     mean_p_Realizable_k_Epsilon(5,:);mean_p_Spalart_Almanas(5, :)];
262 % stupne_300=[mean_s_k_eps(6, :); mean_p_RNG_k_Epsilon(6,:); ...
        mean_p_SST_k_Omega(6,:); mean_p_Standard_k_Omega(6,:);...
263 %     mean_p_Realizable_k_Epsilon(6,:);mean_p_Spalart_Almanas(6, :)];
264 %
265 % figure(13)
266 % bar(stupne_0)
267 % %legend(
268 %
269 % figure(14)
270 % bar(stupne_60)
271 %
272 % figure(15)
273 % bar(stupne_120)
274 %
275 % figure(16)
276 % bar(stupne_180)

```

```
277 %  
278 % figure(17)  
279 % bar(stupne_240)  
280 %  
281 % figure(18)  
282 % bar(stupne_300)
```

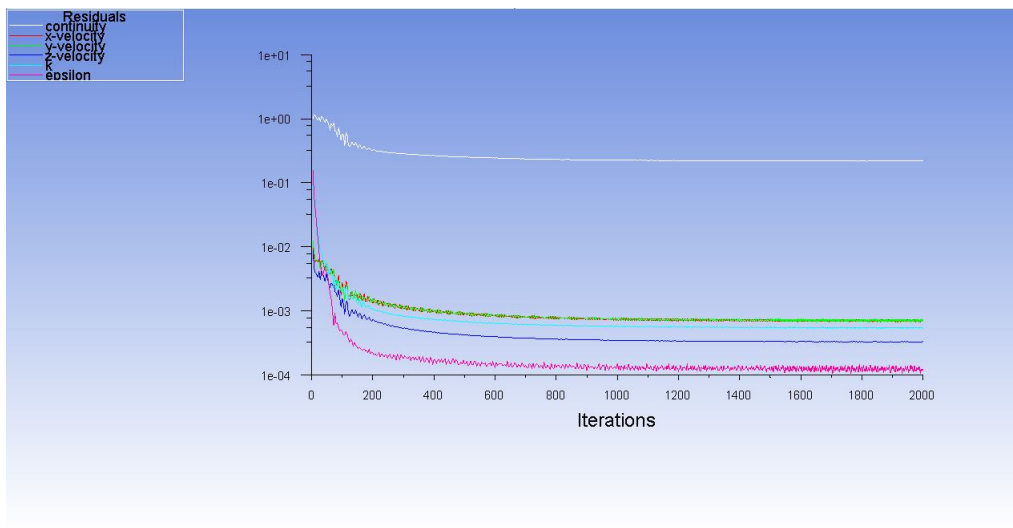
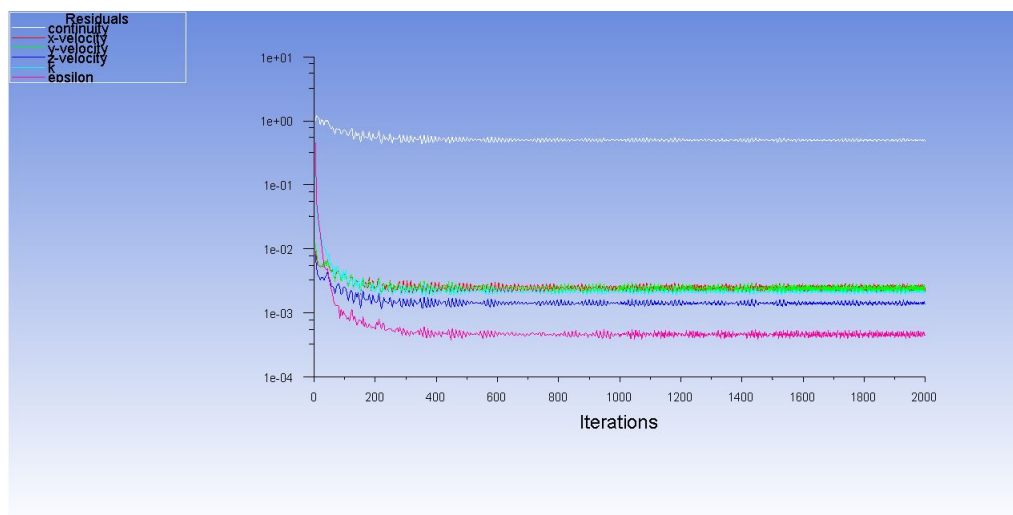
# Příloha B

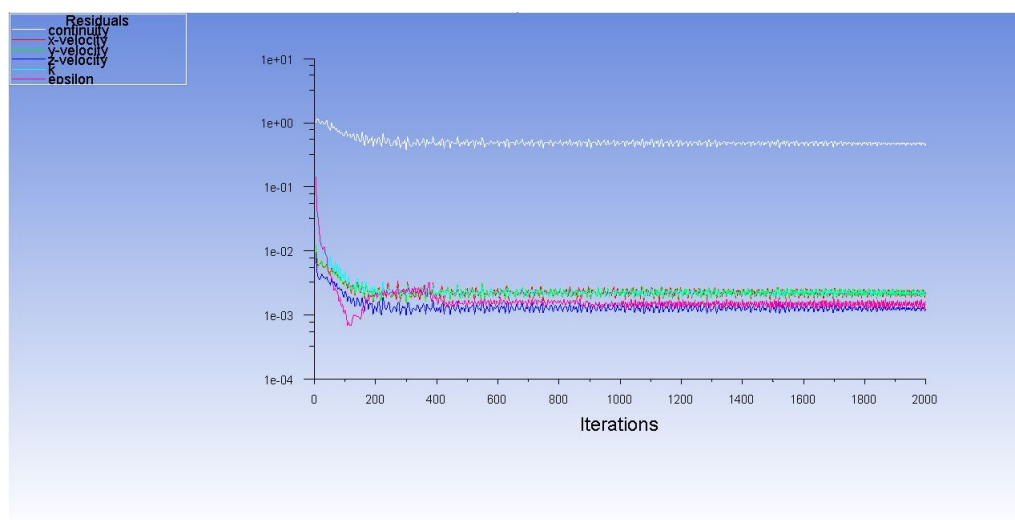
## Obrazová příloha



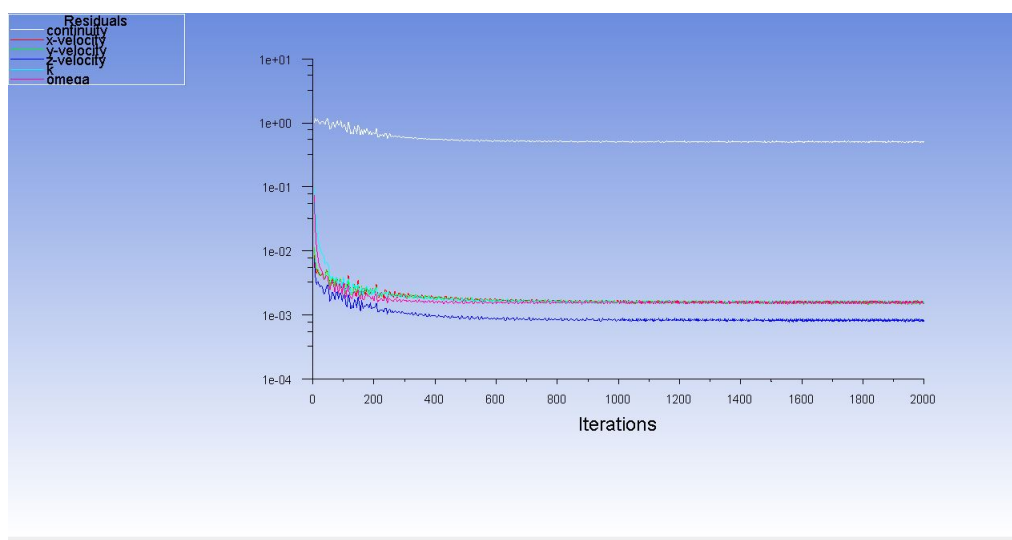
Obrázek B.1: Průběh konvergence výpočetního modelu Spalart-Allmaras, předběžná simulace

,

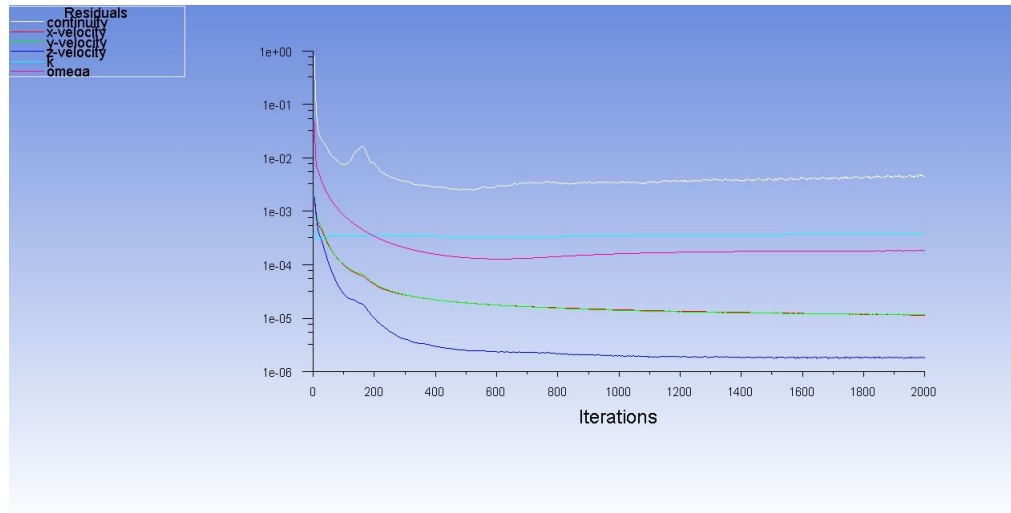
Obrázek B.2: Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\epsilon$ , předběžná simulaceObrázek B.3: Průběh konvergence výpočetního modelu Realizable k- $\epsilon$ , předběžná simulace



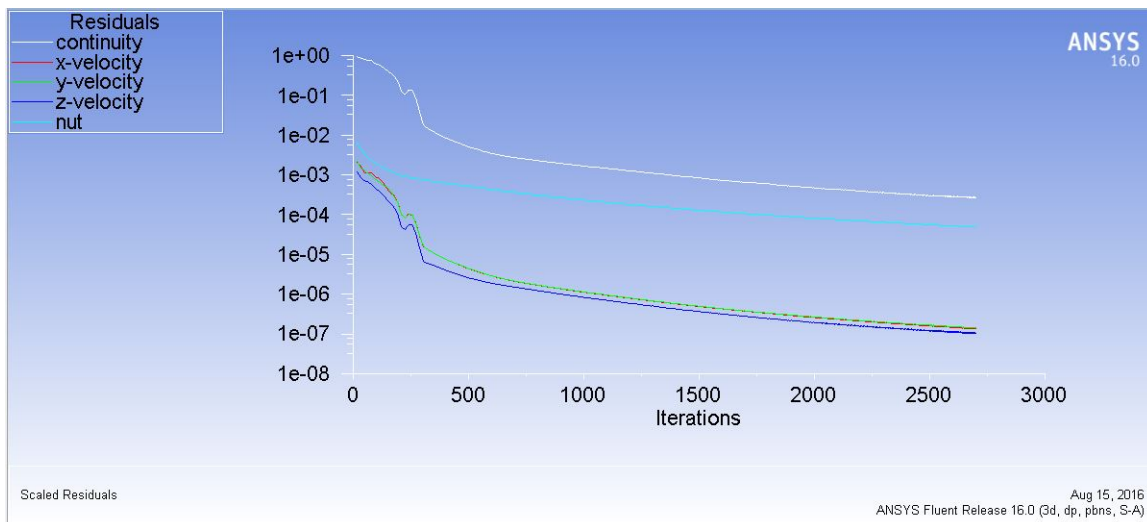
Obrázek B.4: Průběh konvergence výpočetního modelu RNG k- $\epsilon$ , předběžná simulace



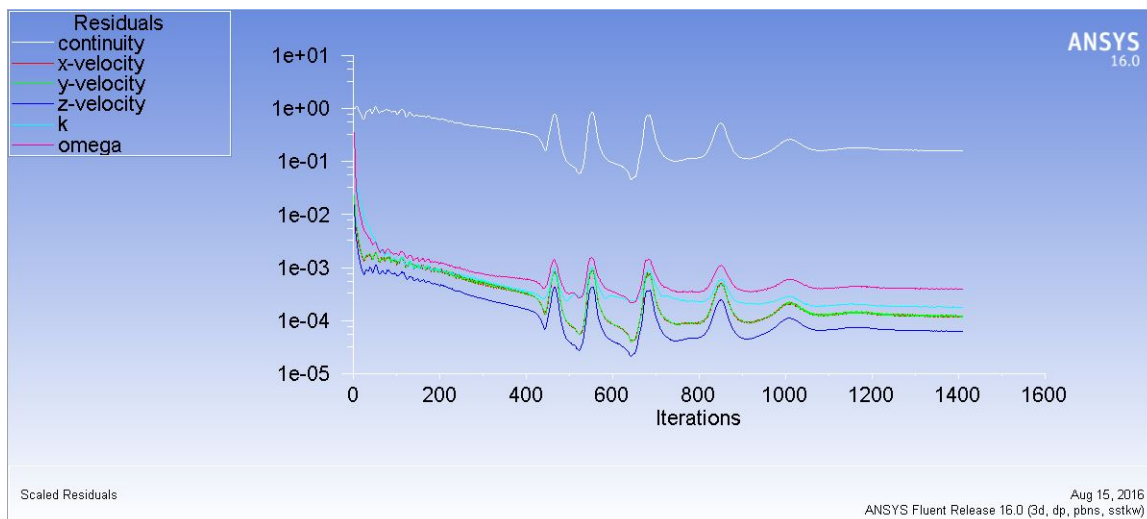
Obrázek B.5: Průběh konvergence výpočetního modelu Standard k- $\omega$ , předběžná simulace



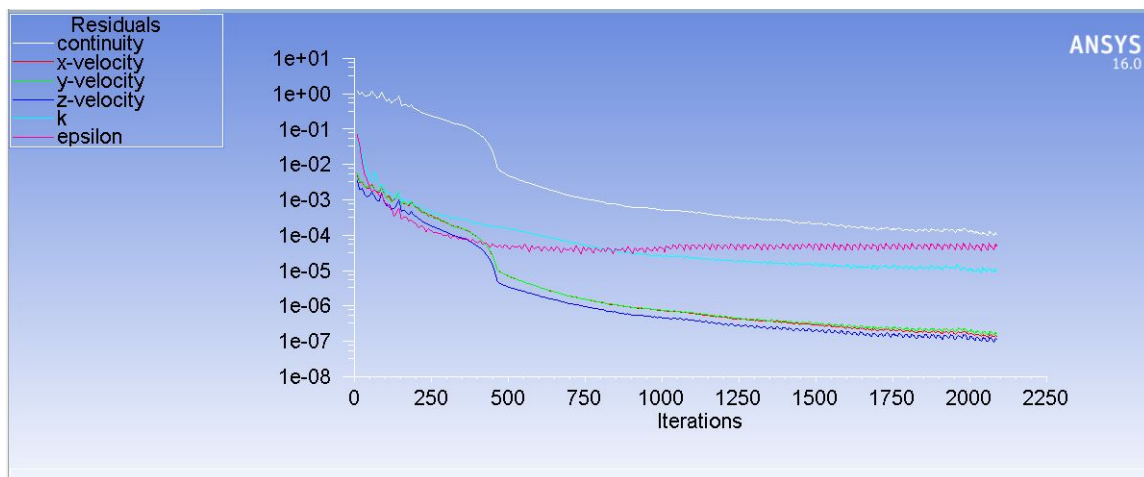
Obrázek B.6: Průběh konvergence výpočetního modelu SST  $k-\omega$ , předběžná simulace



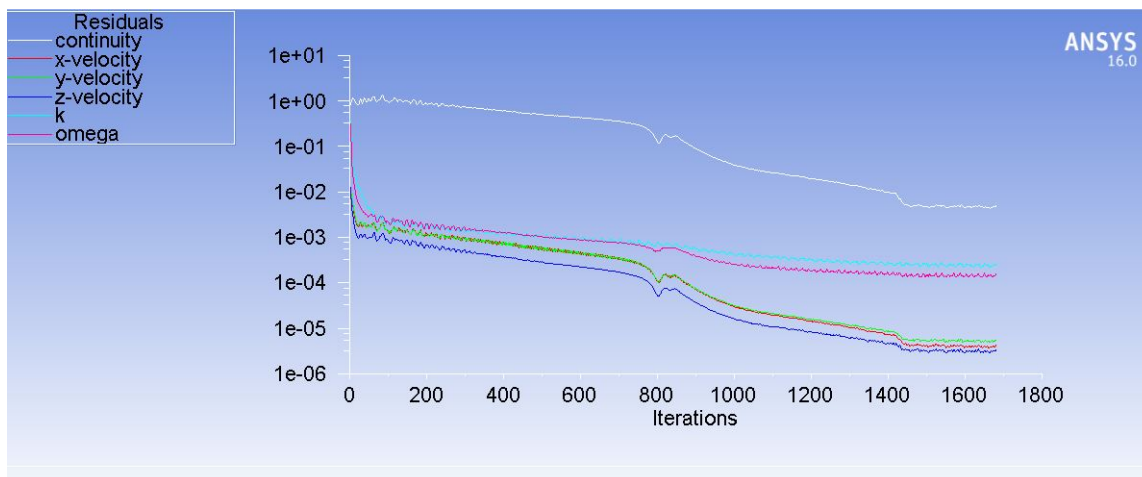
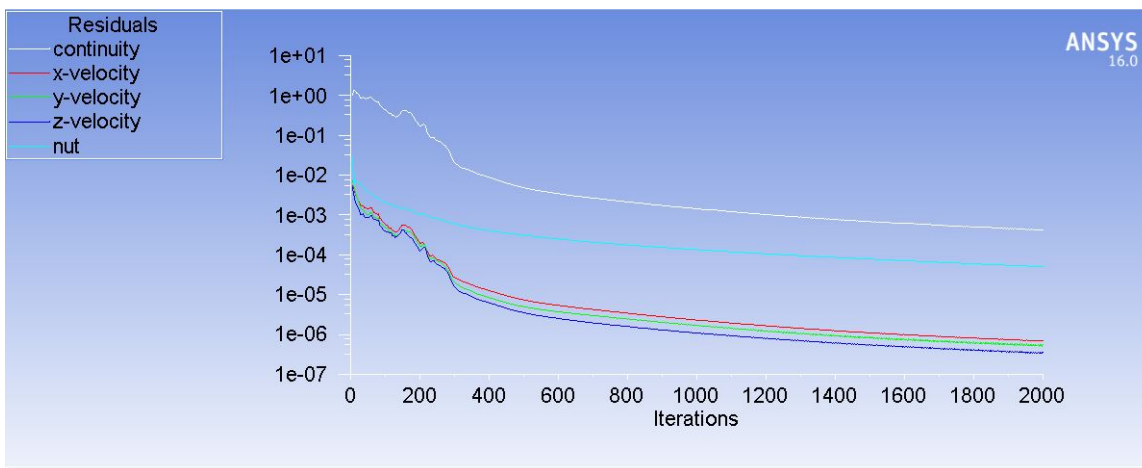
Obrázek B.7: Průběh konvergence výpočetního modelu Spalart-Allmaras u jemné sítě



Obrázek B.8: Průběh konvergence výpočetního modelu SST  $k-\omega$  u jemné sítě

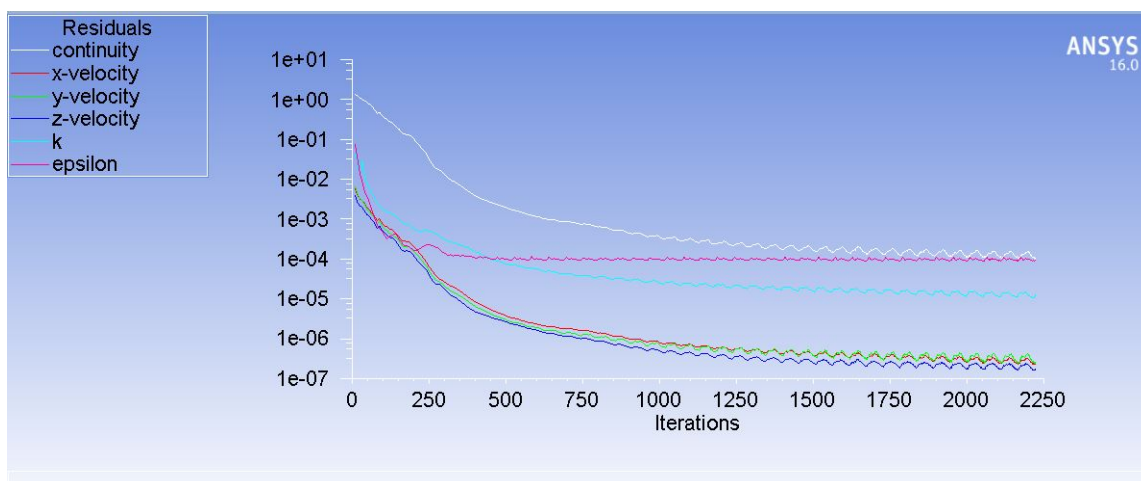


Obrázek B.9: Průběh konvergence výpočetního modelu Standard  $k-\epsilon$  u jemné sítě

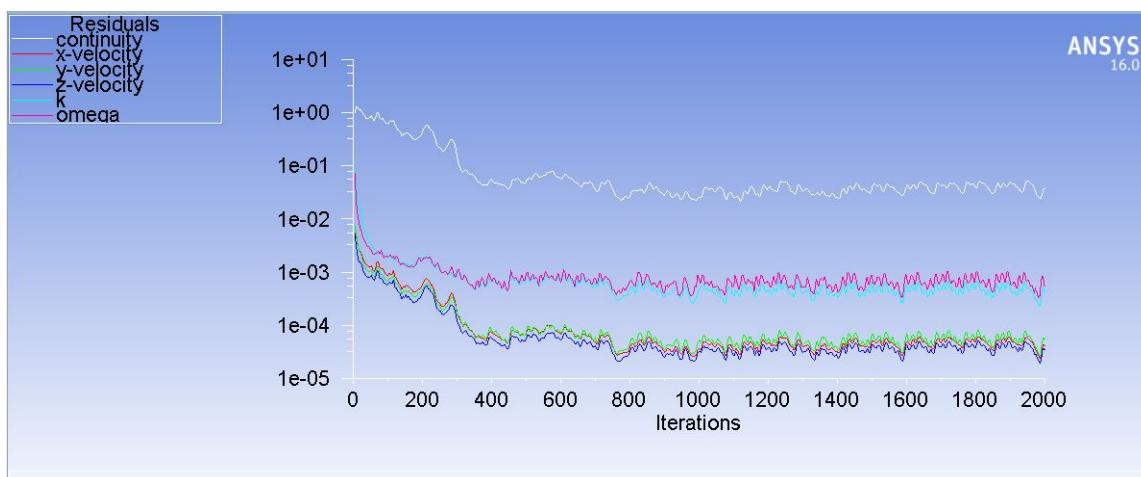
Obrázek B.10: Průběh konvergence výpočetního modelu Standard  $k-\omega$  u jemné sítě

Obrázek B.11: Průběh konvergence výpočetního modelu Spalart-Allmaras u nádoby s přepážkou

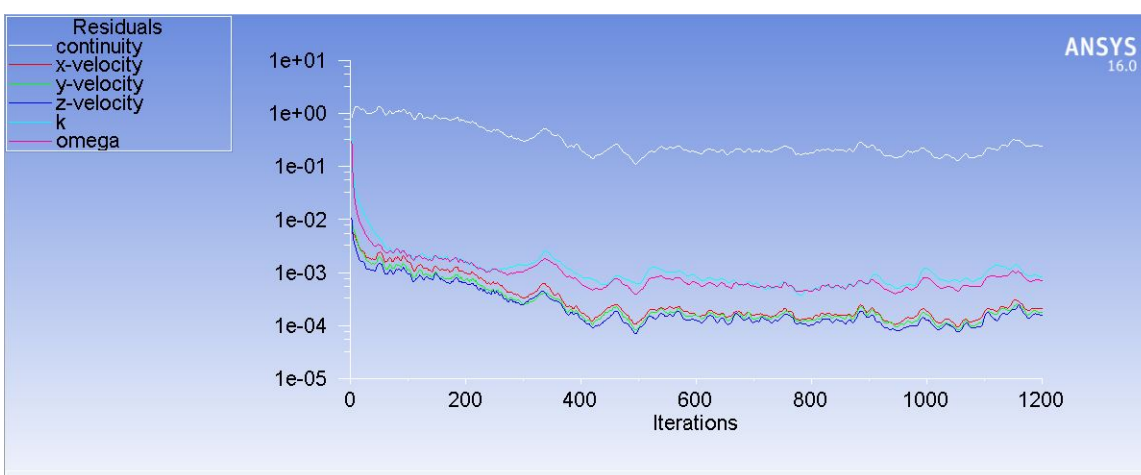




Obrázek B.12: Průběh konvergence výpočetního modelu Standard  $k$ - $\epsilon$  u nádoby s přepážkou



Obrázek B.13: Průběh konvergence výpočetního modelu SST  $k$ - $\omega$  u nádoby s přepážkou



Obrázek B.14: Průběh konvergence výpočetního modelu Standard  $k$ - $\omega$  u nádoby s přepážkou



# Příloha C

## Obsah příložených DVD

- DVD 1
  - Ansys - archivované simulace
    - \* 160 - soubory vytvořené ve verzi 16.0 + třetí část archivu se simulací nádoby opatřené přepážkou
    - \* 170 - soubory vytvořené ve verzi 17.0
  - Geometrie
    - \* Autocad - soubory vytvořené v programu Autodesk AutoCAD (pozice zářky atd.)
    - \* Inventor - soubory vytvořené v programu Autodesk Inventor (vizualizace nádrže)
  - Naměřené hodnoty - experimentálně získaná data
  - Vyhodnocení - vyhodnocení simulací + analýza vlivu počtu elementů sítě na přesnost řešení
    - \* Predbezne - vyhodnocení předběžné simulace
    - \* Vyhodnoceni jemna sit - vyhodnocení simulace provedené na jemné síti
    - \* Vyhodnoceni prepazka = vyhodnocení simulace s přepážkou
- DVD2 - první část archivu se simulací jemné sítě
- DVD3 - druhá část archivu se simulací jemné sítě
- DVD4 - třetí část archivu se simulací jemné sítě
- DVD5 - první část archivu se simulací nádoby opatřené přepážkou
- DVD6 - druhá část archivu se simulací nádoby opatřené přepážkou