ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

CFD modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru

Autor: **Bc. Tomáš Klíma**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav URUBA, CSc.**

Odborný konzultant: **Ing. Michal DOSTÁL**

Akademický rok 2016/2017

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: …… . . . . . .

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc., za odborné vedení a věcné připomínky během konzultací. Také bych velmi rád poděkoval za ochotu, trpělivost, velmi cenné rady a pomoc při zpracování této práce panu Ing. Michalu Dostálovi z firmy Škoda JS a.s.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Klíma	**Jméno** Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Prof. Ing. Uruba, CSc.	**Jméno** Václav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KKE		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	CFD modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně reaktoru		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KKE	**ROK ODEVZD.**	2017

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	101		**TEXTOVÁ ČÁST**	61	**GRAFICKÁ ČÁST**	40

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Následující práce se zabývá popisem jaderného reaktoru jako celku a jeho hlavních částí. Dále se zabývá také problematikou proudění tekutin a CFD modelování. Následně se práce zaměřuje na jednu konkrétní část palivového souboru – mísící mřížku. Hlavní částí práce je vytvoření CFD modelu pro řešení proudění vody přes dva typy mísících mřížek a sledování proudového pole za nimi. Byla provedena validace výpočetního modelu dle výsledků zjištěných pomocí experimentální metody PIV. S těmito daty jsou také v závěru výsledky CFD výpočtů porovnány, konkrétně rozložení rychlostního pole a porovnání jednotlivých složek rychlostí.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	CFD, Ansys, Fluent, simulace, proudění, mísící mřížka, palivový soubor, TVSA-T, experiment, PIV

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** Klíma	**Name** Tomáš	
FIELD OF STUDY	2302T041 „Design of nuclear power equipment“		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Prof. Ing. Uruba, CSc.	**Name** Václav	
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	~~**BACHELOR**~~	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	CFD modeling of the flow in a fuel assembly in the nuclear reactor core		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Power System Engineering		**SUBMITTED IN**	2017

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	101		**TEXT PART**	61		**GRAPHICAL PART**	40

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	The following text is focused on the description of a nuclear reactor as a whole and its main components. It also deals with flowing fluids and CFD modeling. Subsequently, the work focuses on one particular part of the fuel assembly – the mixing grid. The main part of the thesis is to create a CFD model for a solution of flowing water through two types of mixing grids and to find out the flow field behind them. Validation of a computational model was done using the experimentally obtained results of PIV method. With these data, the results of CFD calculations are also compared, specifically the distribution of the velocity field and individual velocity components.
KEY WORDS	CFD, Ansys, Fluent, simulation, flowing, mixing grid, fuel assembly, TVSA-T, experiment, PIV

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů 10
1 Úvod 11
2 Jaderný reaktor typu VVER1000 12
2.1 Štěpná řetězová reakce pro získání energie 13
2.2 Odvod tepla v jaderném reaktoru 15
2.3 Konstrukce 17
2.3.1 Tlaková nádoba reaktoru a vnitřní části 17
2.3.2 Kompenzátor objemu 18
2.3.3 Parogenerátor 19
2.3.4 Hlavní cirkulační čerpadlo 20
2.4 Palivové soubory v JE Temelín 21
2.4.1 Palivové soubory VVANTAGE-6 22
2.4.2 Palivový soubor TVSA-T mod. 1 22
2.4.3 Palivový soubor TVSA-T mod. 2 25
2.4.4 Mísící mřížky 26
3 CFD modelování 27
3.1 Příprava CFD modelu 29
3.1.1 Příprava geometrie 29
3.1.2 Tvorba výpočetní sítě 31
3.1.3 Nastavení řešiče 36
3.1.4 Validace CFD modelu 37
3.2 Výsledky výpočtu 38
3.2.1 Výsledky CFD výpočtu – mřížka mod. 1 39
3.2.2 Výsledky CFD výpočtu – mřížka mod. 2 43
4 Porovnání výsledků s experimentem 47
4.1 Porovnání výsledků – mřížka mod. 1 48
4.1.1 Vzdálenost za mřížkou z=5 mm 50
4.1.2 Vzdálenost za mřížkou z=10 mm 53
4.1.3 Vzdálenost za mřížkou z=20 mm 56
4.1.4 Vzdálenost za mřížkou z=30 mm 59
4.1.5 Vzdálenost za mřížkou z=50 mm 62
4.1.6 Vzdálenost za mřížkou z=100 mm 65
4.1.7 Vzdálenost za mřížkou z=200 mm 68
4.1.8 Vzdálenost za mřížkou z=300 mm 70
4.2 Porovnání výsledků – mřížka mod. 2 72

4.2.1 Vzdálenost za mřížkou z=5 mm 74
4.2.2 Vzdálenost za mřížkou z=10 mm 77
4.2.3 Vzdálenost za mřížkou z=20 mm 80
4.2.4 Vzdálenost za mřížkou z=30 mm 83
4.2.5 Vzdálenost za mřížkou z=50 mm 86
4.2.6 Vzdálenost za mřížkou z=100 mm 89
4.2.7 Vzdálenost za mřížkou z=200 mm 92
4.2.8 Vzdálenost za mřížkou z=300 mm 94
5 Závěr 96
Seznam použitých zdrojů 97

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
AZ	Aktivní zóna
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
KO	Kompenzátor objemu
PG	Parogenerátor
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
JE	Jaderná elektrárna
HCČ	Hlavní cirkulační čerpadlo
I.O.	Primární okruh
PWR	Pressurized Water Reactor
VVER	Vodou chlazený – vodou moderovaný energetický reaktor
CFD	Computational Fluid of Dynamics
PIV	Participle Image Velocimetry
N-S	Navier-Stokes
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations

Symbol	Rozměr	Význam
n	[-]	Počet neutronů
k	[-]	Koeficient násobení
ε	[-]	Koeficient násobení rychlými neutrony
f	[-]	Koeficient využití tepelných neutronů
η	[-]	Regenerační faktor
p	[-]	Pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu
P	[-]	Pravděpodobnost úniku neutronu ze soustavy
ρ	[-]	Reaktivita
q	[W/m^2]	Hustota tepelného toku
ΔT	[°C]	Teplotní rozdíl
T	[°C]	Teplota

1 Úvod

Vzhledem k tomu, že v České republice je v této době provozováno šest jaderných bloků typu VVER o celkovém instalovaném elektrickém výkonu přibližně 4 150 MW a je uvažováno o budoucí dostavbě dalších jaderných bloků na našem území, je jaderná energetika stále aktuálním tématem.

Jaderná energetika se řadí mezi velmi komplexní obor. Veškeré činnosti týkající se jaderné energetiky podléhají mnoha předpisům. Tyto předpisy jsou vytvořeny za účelem zajištění bezpečného provozování jaderného zařízení s cílem vyloučit vznik nehody či havárie, případně zamezit úniku životu nebezpečných materiálů do životního prostředí.

Oblast proudění tekutin je velmi důležitou částí jaderné energetiky. Tepelnou energii vzniklou štěpnou reakcí v aktivní zóně reaktoru je zapotřebí odvádět dostatečným průtokem vody do parogenerátoru, kde dojde k předání tepla na sekundární stranu, následně se ochlazená voda vrací zpět do aktivní zóny a opět dochází k ohřátí vody. Dostatečné množství vody zajistí odvedení tepelné energie a nedovolí vzniknutí nepřípustných nebo nebezpečných podmínek v reaktoru. Jaderný reaktor se skládá z mnoha částí a z hlediska dostatečného odvodu tepla z aktivní zóny je zapotřebí znát problematiku proudění chladiva reaktorem velmi dobře. Jednou z možností, jak studovat proudění reaktorem nebo jeho částmi, je zkoumání pomocí experimentu. To však s sebou nese nejen obrovské finanční a časové nároky, ale také je to ve většině případů nerealizovatelné. Proto se dnes, tak jako téměř ve všech technických oborech, používají numerické simulace.

Jednou z částí jaderného reaktoru je v aktivní zóně umístěný palivový soubor, který se mimo jiné skládá z mnoha palivových proutků, distančních a mísících mřížek, hlavice a patice. Následující text se zabývá právě jednou z částí palivového souboru a tou je tzv. „mísící mřížka“ (*angl. mixing grid*), která napomáhá právě dobré distribuci proudu chladiva palivovým souborem, tím zlepšuje přestup tepla z palivových proutků do chladiva.

Cílem této práce je návrh CFD modelu proudění média přes dva typy mísících mřížek, které jsou umístěny v kanálu. Návrh se skládá z přípravy geometrie, vytvoření výpočetní sítě, nastavení řešení v programu *Ansys Fluent* a následné vyhodnocení výsledků numerické simulace. Mezi další cíle patří verifikace matematického modelu a také validace numerického výpočtu pomocí výsledků shodné úlohy, avšak měřené pomocí metody PIV na experimentálním zařízení. Výsledky a popis experimentálního zařízení jsou dostupné v odkazované literatuře [**1**]. V závěru je naším úkolem srovnat výsledky naladěného CFD modelu s výsledky experimentu.

2 Jaderný reaktor typu VVER1000

V České republice jsou v provozu pouze energetické reaktory „ruského“ typu VVER (zkratka ruského *Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)*, který patří do typu tlakovodních reaktorů PWR (*Pressurized Water Reactor*). Konkrétně jsou v ČR provozovány čtyři bloky jaderného reaktoru VVER 440 v lokalitě Dukovany a dva bloky typ VVER 1000 v Temelíně. Lehká voda (H_2O) je pracovním médiem tlakovodního reaktoru a plní dvě následující základní funkce.

- Funkci chladícího média, které má za úkol odvést tepelnou energii vzniklou štěpením v aktivní zóně reaktoru a následně ji přenést v parogenerátoru do sekundárního okruhu.
- Funkci moderátoru, který slouží ke zpomalení rychlých neutronů do nižších energií. Tento proces je u tlakovodních reaktorů nutný, jelikož tepelná energie se získává štěpením jader Uranu 235 pomalými neutrony.

Tato práce se zabývá vybranou částí palivového souboru TVSA-T umístěného v jaderném reaktoru JE Temelín, a proto se tedy práce zaměřuje především na reaktor typu VVER 1000/ V320. Základními komponenty každého primárního okruhu tlakovodního reaktoru jsou: kompenzátor objemu (KO), parogenerátor (PG), hlavní cirkulační čerpadlo (HCČ) a tlaková nádoba reaktoru (TNR), ve které jsou umístěny veškeré vnitřní části včetně palivových souborů. Celý primární okruh je umístěn v ochranné, hermetické obálce (kontejnmentu), jež plní prvotně funkci ochrany jaderného zařízení proti vnějším přírodním vlivům či vnějšímu útoku, ale také chrání životní prostředí proti případnému úniku nebezpečných materiálů ze zařízení primárního okruhu.

Tepelná energie vzniklá štěpnou reakcí v aktivní zóně je odvedena průtokem chladiva do parogenerátoru, kde předá teplo vodě sekundárního okruhu. Ochlazená voda je vedena hlavními cirkulačními čerpadly zpět do aktivní zóny. Následující tabulka ukazuje základní technické údaje a parametry zařízení primárního okruhu ETE.

*Tabulka 1 – Základní technické údaje zařízení jaderného reaktoru VVER 1000 [**2**], [**3**]*

Jaderný reaktor VVER 1000/V320		
Technický údaj	Hodnota	Jednotka
Nominální tepelný výkon	3 000	MWt
Počet chladících smyček	4	-
Pracovní tlak I.O.	15,7	MPa
Teplota chladiva na vstupu do AZ	290	°C
Teplota chladiva na výstupu z AZ	320	°C
Průtok chladiva reaktorem	84 600	m^3/hod
Výška TNR	10,9	m
Vnější/vnitřní průměr TNR	4,5/4,1	m
Celková výška TNR s horním blokem	19,1	m
Počet palivových souborů	163	-
Počet palivových proutků v palivovém souboru	312	-
Počet řídících a regulačních svazků	61	-
Počet absorpčních orgánů regulačního svazku	18	-
Vsázka paliva	92	t

Typ HCČ	Odstředivé, jednostupňové	
Příkon HCČ se studenou/horkou vodou	6,8/5,1	MW
Provozní výkon HCČ	21 200	m^3/hod
Otáčky HCČ	1 000	ot/min
Pracovní tlak KO	15,7	MPa
Pracovní teplota KO	346	°C
Objem páry/vody (nominální režim) v KO	24/55	m^3
Elektrický výkon elektroohříváků	2,25	MW

2.1 Štěpná řetězová reakce pro získání energie

Základem štěpné řetězové reakce je rozpad nestabilního jádra, v tomto případě izotopu Uranu 235, vlivem štěpného záchytu cizí částice (neutronu). Rozpadem vzniknou dva dceřiné štěpné produkty, dva až tři nově vzniknuté rychlé neutrony a velké množství energie. Rychlý neutron vzniklý při štěpení má malou pravděpodobnost, že se zúčastní dalšího štěpení, proto je zapotřebí tento neutron zpomalit do oblasti tepelných (pomalých) neutronů. Zpomalení je dosaženo moderátorem, konkrétně pružnými srážkami jader moderátoru s rychlými neutrony. Moderátorem a zároveň i chladivem je v tlakovodním reaktoru lehká voda. Schopnost jaderného reaktoru udržet štěpnou řetězovou reakci udává multiplikační koeficient nebo také koeficient násobení. Vychází se z multiplikačního koeficientu nekonečné soustavy, kterému se také říká koeficient čtyř součinitelů.

$$k_\infty = \frac{n_i}{n_{i-1}} = \varepsilon \cdot \eta \cdot f \cdot p$$

kde:

n_i … je počet neutronů i-té generace,

n_{i-1} … je počet neutronů přecházející generace,

ε … je koeficient násobení rychlými neutrony, zohledňuje schopnost rychlých neutronů rozštěpit jádra izotopu Uranu 238 a tím navýšit celkový počet neutronů,

η … je regenerační faktor udává střední počet vzniklých rychlých neutronů při štěpném zachycení jednoho tepelného neutronu,

f … je koeficient využití tepelných neutronů udává poměr počtu neutronů zachycených v palivu a celkový počet zachycených neutronů v soustavě,

p … udává pravděpodobnost, že tepelný neutron bude štěpně zachycen, tedy pravděpodobnost, že neutron při jeho zpomalování unikne rezonančnímu záchytu.

Reaktor však není nekonečný systém, a proto je také zaváděn efektivní koeficient násobení neutronů, který navíc uvažuje geometrii aktivní zóny a pravděpodobnost, že může neutron ze soustavy uniknout.

$$k_{ef} = k_\infty \cdot P$$

kde:

k_∞ … multiplikační koeficient nekonečné soustavy

P … udává pravděpodobnost, že neutron neunikne ze soustavy

Z určité hodnoty pro efektivní multiplikační koeficient lze určit tři základní stavy reaktoru, respektive štěpné řetězové reakce. Reaktor je:

- $k_{ef} = 1$, je stav, kdy je reaktor kritický, štěpná reakce se samovolně udržuje a počet neutronů je stabilní
- $k_{ef} < 1$, je stav, kdy je reaktor podkritický, počet neutronů klesá a štěpná reakce se nemůže sama udržet
- $k_{ef} > 1$, je stav nadkritického reaktoru, počet neutronů stoupá a výkon reaktoru roste

Reaktor je regulovaný systém a řídí se pomocí zpožděných neutronů, vznikajících rozpadem nestabilních štěpných produktů. Reaktor nikdy nesmí být kritický na okamžitých neutronech, jelikož by to vedlo k havárii. Reaktor musí tedy být vždy podkritický na okamžitých neutronech.

Vlastní regulace probíhá pomocí vnášení kladné či záporné reaktivity. Reaktivita je provázaná s multiplikačním koeficientem přes následující vztah:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$$

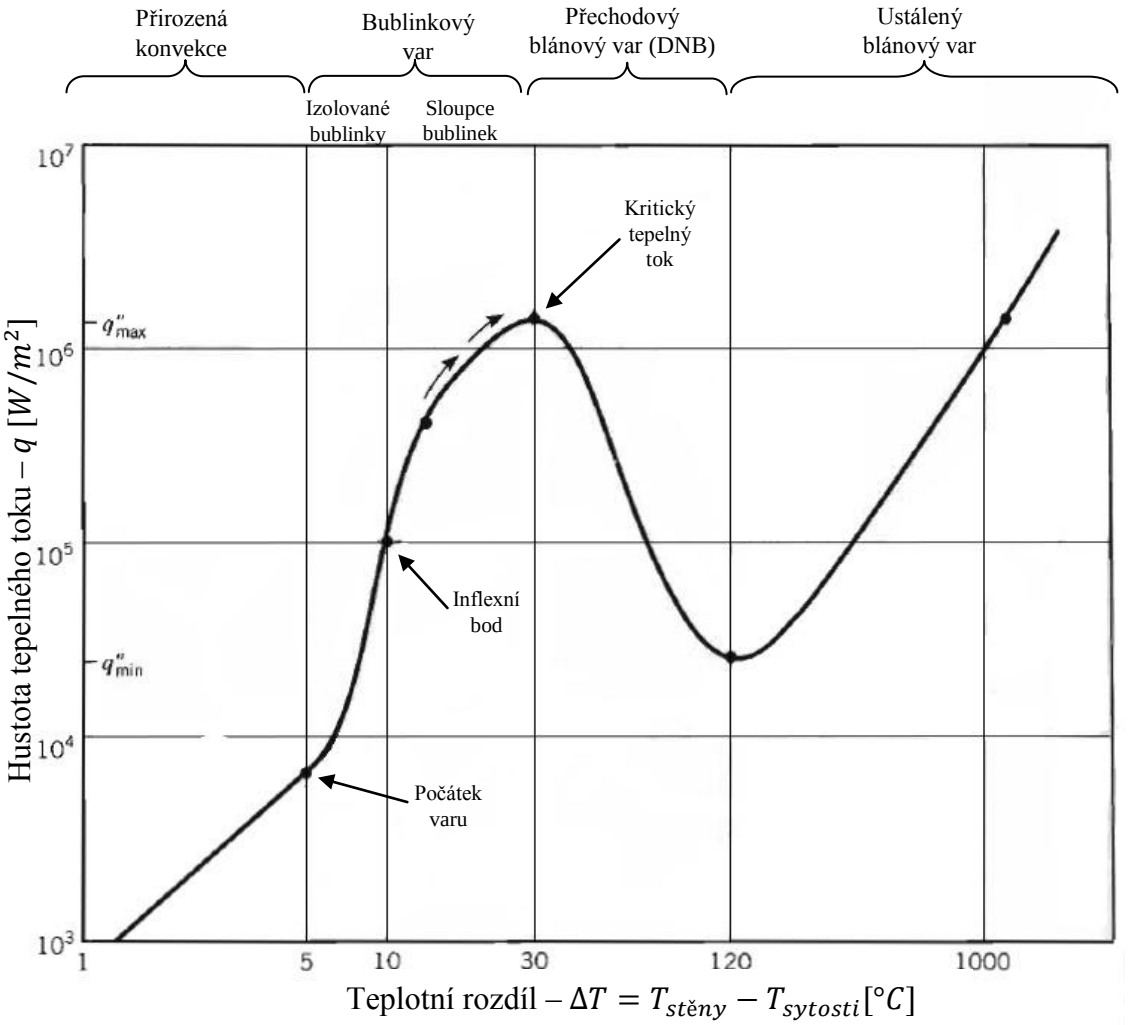
a tedy pokud:

- $\rho = 0$, nevnášená žádná reaktivita, reaktor je kritický, neutronový tok je stabilní,
- $\rho < 0$, vnesená záporná reaktivita vede ke snižování neutronového toku,
- $\rho > 0$, vnesená kladná reaktivita vede ke zvyšování neutronového toku.

Vnášení reaktivity je zprostředkováno buďto pohybem regulačních orgánů, změnou koncentrace kyseliny borité rozpuštěné v chladivu, nebo také kompenzací přebytečné reaktivity v průběhu palivové kampaně pomocí vyhořívajících absorbátorů (podrobněji viz odkazovaná literatura [**4**]).

2.2 Odvod tepla v jaderném reaktoru

Velikost výkonu reaktoru, jednotlivých palivových souborů či palivových proutků, ale také aktuální parametry chladiva ovlivňují charakteristiku odvodu tepla. S ohledem na výše uvedené parametry lze rozlišovat následující základní stavy odvodu tepla.



*Obrázek 1 – Závislost teplotního rozdílu na hustotě přestupujícího tepelného toku [**8**]*

1. V případě, že je teplota povrchu palivových proutků nižší než teplota varu chladícího média při aktuálním tlaku, je odvod tepla způsoben konvekcí z palivových proutků do jednofázového proudu chladícího média. [**9**]

2. Pokud je již teplota pokrytí palivových proutků vyšší než teplota varu, chladící médium se začíná v povrchové vrstvě přehřívat a vřít. Tento stav (režim) varu, se nazývá povrchový var a vzniká při relativně nízkých tepelných tocích, přičemž se z povrchu palivových proutků odtrhávají bublinky páry, které se následně pohybují do neohřátého proudu chladícího média (teplota chladiva ≠ teplotě varu), kde kondenzují a předávají své skupenské teplo. Povrchový bublinkový var způsobuje velkou turbulizaci proudu chladiva, dochází tím ke zlepšení a zvýšení odvodu tepla z povrchu palivových proutků. [**9**]

3. Zvýšením tepelného toku se dále zvyšuje počet a velikost bublinek páry uvolňujících se z povrchu palivových proutků, také se zvětšuje plocha, ze které se bublinky uvolňují. Pokud nastane stav, že teplota chladícího média bude v celém objemu proudu rovna teplotě varu, není to již povrchový, ale objemový var, přičemž vzniklé bublinky na povrchu palivových proutků nekondenzují v proudu chladiva, ale šíří se dále. [**9**]

4. Určitou kombinací tepelného toku, průtoku chladiva a obsahu páry v chladivu může přejít bublinkový var v blánový var. Tento typ varu se vyznačuje tím, že teplosměnná plocha (pokrytí palivového proutku) je celá pokrytá parní fází. Problémem je, že odvod tepla z palivových proutků je omezen a snížen izolačními vlastnostmi parní blány na povrchu proutků. Teplota povrchu pokrytí prudce stoupá, což může vyvolat oxidaci pokrytí palivových proutků, či dokonce natavení paliva. Tento typ odvodu tepla je také nazýván krizí přestupu tepla a je při provozování jaderného reaktoru nepřípustný. [**9**]

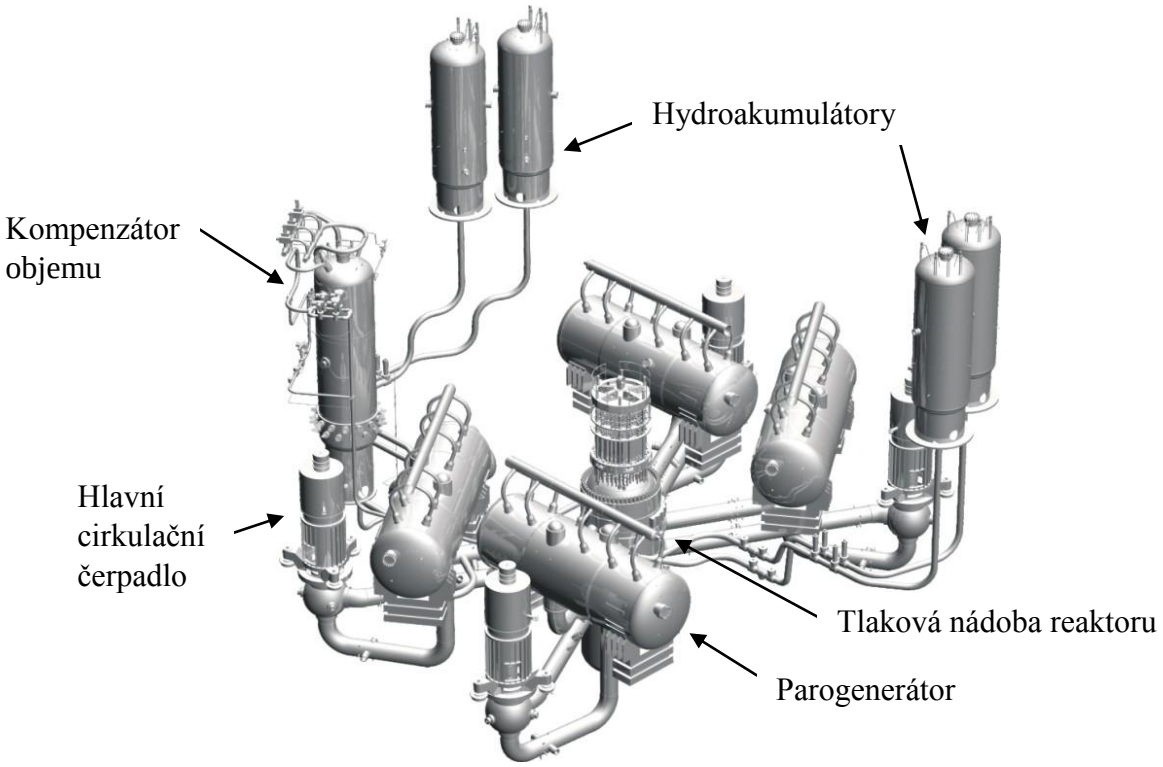
Krize varu prvního druhu, označována také jako *DNB* (*Departure from Nucleate Boiling*), je v jaderné energetice definována jako bod, ve kterém rapidně klesne přestup tepla mezi ohřátým povrchem (pokrytím palivových proutků) a proudícím chladivem z důvodu izolačních vlastností parní blány vytvořené na povrchu palivových proutků, přičemž teplota povrchu dále stoupá. DNB je také označováno jako nestabilní blánový var nebo přechodový blánový var. [**8**], [**10**]

DNBR (*Departure from Nucleate Boiling Ratio*) udává poměr hustoty tepelného toku potřebného k dosažení kritického odvodu tepla (*DNB*) a aktuální lokální hustoty tepelného toku palivového proutku. Tento poměr také udává aktuální rezervu tepelného toku pro dosažení kritického tepelného toku. [**8**], [**11**]

$$DNBR = \frac{tepelný\ tok\ pro\ dosažení\ DNB}{aktuální\ lokální\ tepelný\ tok\ palivového\ proutku}$$

2.3 Konstrukce

Konstrukce celého primárního okruhu je velmi složitá a její popis není cílem této práce. Pro správné pochopení činnosti a funkce jednotlivých zařízení primárního okruhu je však zapotřebí zmínit se o jaderném zařízení jako celku. Konstrukce primárního zařízení se skládá především z hlavních komponent a zařízení: TNR a jeho vnitřních částí, PG, KO, HCČ a z dalších pomocných komponent a systémů, které jsou zapotřebí k správnému a bezpečnému provozu celého jaderného zařízení. V následujícím textu jsou zmíněna hlavní zařízení, poté jsou podkapitoly věnovány především palivovému souboru, jednotlivým částem palivového souboru a konstrukčním rozdílům mezi palivovými soubory TVSA-T mod. 1 a TVSA-T mod. 2, jež jsou umístěné na JE Temelín.

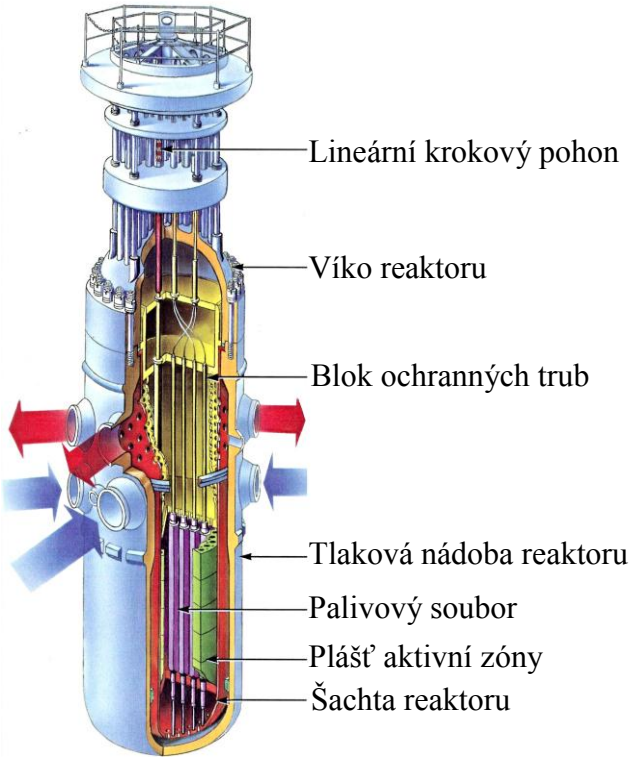


*Obrázek 2 – Zařízení primárního okruhu reaktoru VVER 1000 [**4**]*

2.3.1 Tlaková nádoba reaktoru a vnitřní části

Tlaková nádoba reaktoru (TNR) je silnostěnná válcová nádoba, ve které probíhá štěpná reakce a ve které jsou umístěny veškeré vnitřní části reaktoru. Tlaková nádoba je vyrobena jako svařenec z několika kovaných prstenců, dosahuje výšky téměř 11 metrů a vnějšího průměru 4,5 metru. Proudění chladiva z/do tlakové nádoby je možné přes dvě řady hrdlových prstenců. Tyto prstence slouží k odvedení horké vody do parogenerátoru a také přivedení ochlazené vody vedené pomocí HCČ z parogenerátoru zpět do reaktoru. Na tlakovou nádobu je poté umístěno víko, které má na kulové ploše vyvrtané otvory pro umístění nátrubků. Na víko následuje horní blok, obsahující mimo jiné například lineární krokové pohony a vývody pro vnitro-reaktorová měření. Celková hmotnost tlakové nádoby včetně víka a horního bloku je přibližně 800 tun. TNR je vyrobena z uhlíkaté oceli, avšak uvnitř je opatřena nerezovým návarem. Do reaktorové nádoby je zavěšena šachta reaktoru, která slouží především k usměrnění a rozdělení teplého média odcházejícího horními hrdly a studeného média přicházejícího z HCČ spodními, studenými hrdly. Do šachty jsou poté

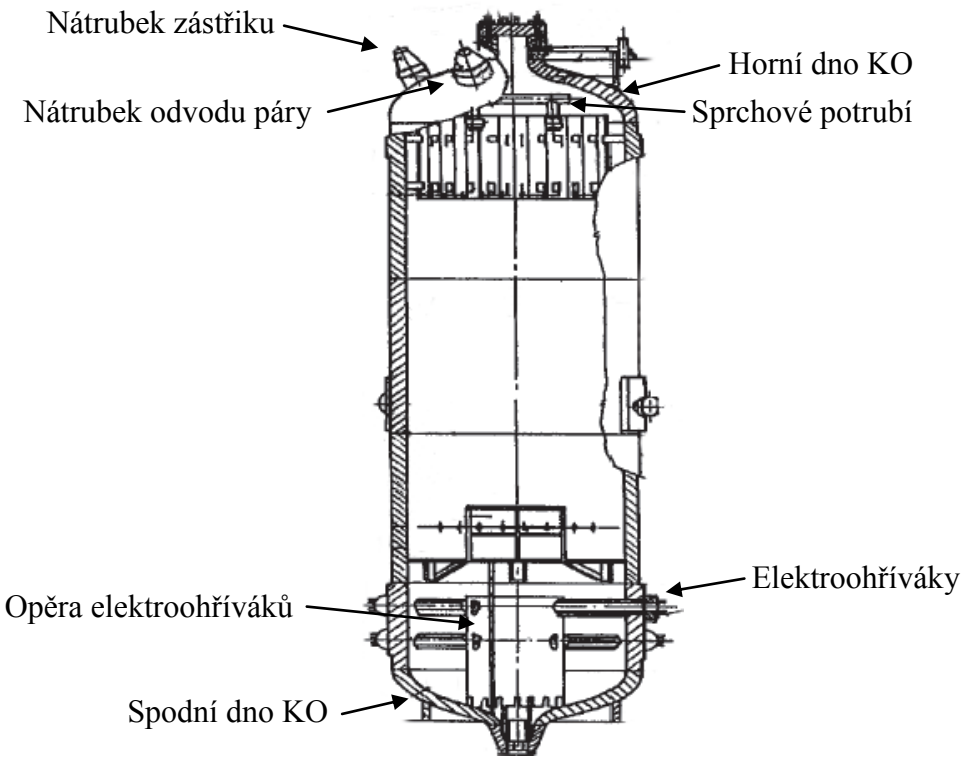
umístěny další vnitřní části: plášť aktivní zóny s palivovými soubory, na které je poté usazen blok ochranných trub. [**3**]



*Obrázek 3 – Jaderný reaktor VVER 1000 [**2**]*

2.3.2 Kompenzátor objemu

Během provozování jaderného bloku dochází k objemovým a tlakovým změnám chladícího média primárního okruhu. Kompenzátor objemu slouží především k udržování tlaku primárního okruhu. KO je neoddělitelně spojený s primárním okruhem s horkou větví jedné ze čtyř cirkulačních smyček. V nominálním režimu je kompenzátor objemu naplněn ze dvou třetin chladivem I.O. a z jedné třetiny parou. V případě, že dojde ke zvýšení tlaku I.O. nad určitou mez, respektive dojde k zvýšení objemu páry v KO, uvede se do provozu sprchový systém umístěný v parní části KO, jenž způsobí snížení objemu páry v KO ochlazením a kondenzací páry a následně dojde k snížení tlaku I.O. Naopak při situaci, kdy dojde k snížení tlaku v I.O., tedy zvýšení hladiny vody v KO nad určitou mez, se uvedou do provozu elektroohříváky umístěné ve spodní části nádoby, které způsobí ohřátí média a jeho var, přičemž se opět zvýší objem páry a zvýší se i tlak I.O. na stanovenou úroveň. Při menších tlakových změnách se neuvádějí do provozu elektroohříváky či sprchový systém, nýbrž se uplatní samoregulační vlastnost. Zvýšením tlaku se zvýší i teplota sytosti média a teplota vody je nižší než teplota sytosti, čímž dojde ke kondenzaci části parního objemu a sníží se tlak média, taktéž je tomu i v opačném případě. Pokud nedojde k zafungování sprchového systému, nebo sprchový systém nestačí k potlačení tlaku primárního okruhu, jsou na KO umístěné odlehčovací a také pojistné ventily, které odpouští parní objem do barbotážní nádrže.

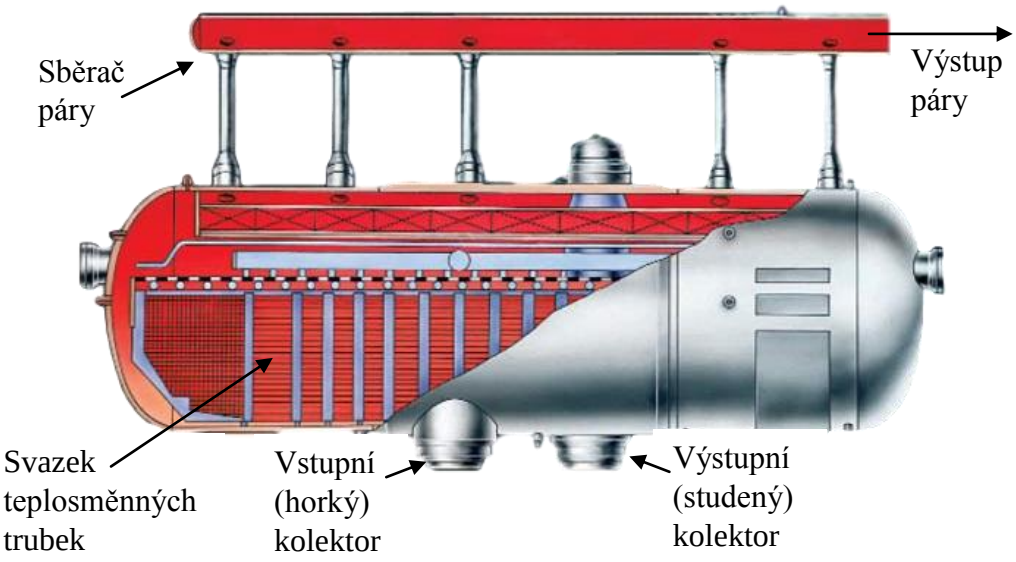


Obrázek 4 – Schéma a popis kompenzátoru objemu [2]

Obrázek 5 – Skutečné provedení kompenzátoru objemu [2]

2.3.3 Parogenerátor

Parogenerátor v provedení ruského typu tlakovodního reaktoru VVER je horizontální výměník, který slouží k výměně tepla přes teplosměnné trubky mezi chladivem primárního okruhu a vodou sekundárního okruhu. Jelikož je to styčný bod okruhů, je důležité dbát na těsnost a oddělenost obou okruhů. Chladící médium primárního okruhu vstupuje do parogenerátoru vstupním, nebo také horkým, kolektorem následně proudí skrze trubkový svazek parogenerátoru k výstupnímu (studenému) kolektoru PG. Z vnější strany trubek je prostor zaplněn vodou sekundárního okruhu, která se odpařuje, vzniklá pára pro pohon turbogenerátoru je pomocí sběrače páry vedena dále do sekundárního okruhu. Jelikož chladivo primárního okruhu proudí uvnitř svazku teplosměnných trubek, je nádoba parogenerátoru namáhána vnitřním přetlakem sekundárního okruhu (cca 4,8 MPa), avšak teplosměnné trubky jsou namáhány tlakem I.O. (cca 15,7 MPa).

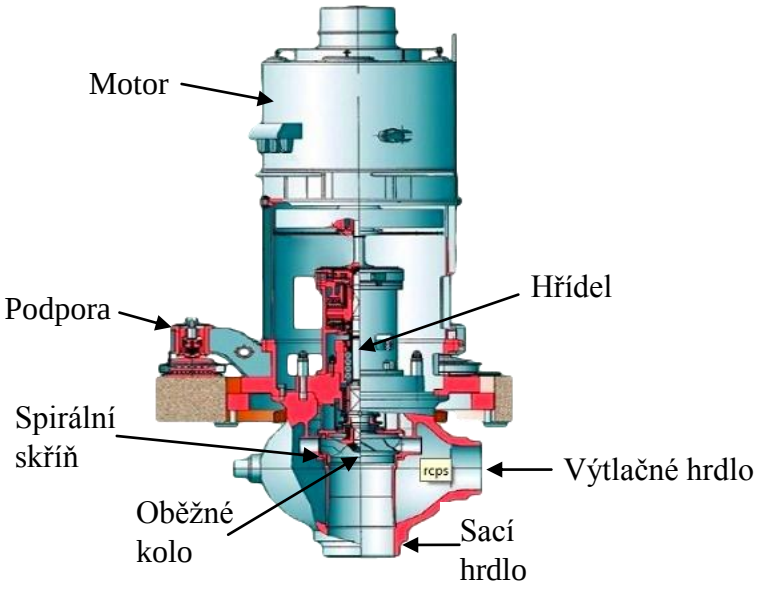


*Obrázek 6 – Schéma horizontálního parogenerátoru použitého na VVER 1000 [**5**]*

*Obrázek 7 – Skutečné provedení parogenerátoru pro JE Temelín [**2**]*

2.3.4 Hlavní cirkulační čerpadlo

Hlavní cirkulační čerpadlo je bezpochyby jedno z nejdůležitějších zařízení celého primárního okruhu. Jeho hlavní funkcí je zajistit odvedení tepelné energie, vzniklé štěpnou reakcí, z aktivní zóny do parogenerátoru dostatečným průtokem chladícího média. Cirkulaci chladiva primárního okruhu reaktoru VVER 1000 zajišťují čtyři hlavní cirkulační čerpadla, která jsou vždy umístěna na studené větvi za PG a před TNR každé z cirkulačních smyček. Jedná se o jednostupňová, vertikální, odstředivá čerpadla. Každé z čerpadel má nominální průtok 21 200 m^3/hod při 1 000 ot/min. Příkon čerpadla se liší v důsledku změny měrného objemu chladícího média se změnou jeho teploty. Čerpáním studeného chladiva se potřebný příkon čerpadla rovná cca 6,8 MW, naopak při čerpání horkého média s nižším měrným objemem je příkon o cca 1,7 MW nižší. Hlavní cirkulační čerpadla jsou také využívána pro náhřev primárního okruhu, kdy se využívá ohřevu pomocí jejich čerpací práce.



Obrázek 8 – Hlavní cirkulační čerpadlo pro VVER 1000 [2]

2.4 Palivové soubory v JE Temelín

Na začátku provozu ETE 1,2 pracovaly oba bloky s palivovými soubory vyvinuté společností Westinghouse, jež nesly označení VVANTAGE-6. Z počátku provozování byly s tímto typem palivových souborů problémy. Především se to týkalo konstrukčního provedení celých souborů a použitých materiálů. Nedostatečná tuhost souborů vedla například k tomu, že regulační orgány (klastry) nedopadly při bezpečnostních zkouškách až do svých koncových poloh, jelikož vodící trubky pro klastry byly v palivových souborech mírně ohnuty. Další problémy se týkaly netěsností jednotlivých palivových proutků. Během provozování bloků s tímto typem paliva probíhaly různé konstrukční a jiné úpravy palivových souborů, nicméně provozovatele ETE se rozhodly ke kroku, vyměnit dosavadní palivové soubory VVANTAGE-6 společnosti Westinghouse za palivové soubory TVSA-T ruské společnosti TVEL. Zpočátku měly být oba typy palivových souborů provozovány v aktivní zóně společně. Nakonec byly veškeré palivové soubory VVANTAGE-6 vyvezeny z aktivní zóny a nahrazeny novým ruským palivem TVSA-T. Tato výměna proběhla na prvním bloku ETE v roce 2010 a na druhém bloku o rok později. V nynější době se uvažuje o provozování bloků s modernizovaným jaderným palivem TVSA-T mod. 2, vyvinuté opět ruskou společností TVEL. Všechny tři typy palivových souborů budou popsány v následujících podkapitolách.

2.4.1 Palivové soubory VVANTAGE-6

Tento soubor byl prvním používaným typem paliva na obou blocích JE Temelín. Palivový soubor VVANTAGE-6 obsahuje následující části. [**2**]

- Horní koncovku (hlavici)
- 312 palivových proutků
- 18 vodících trubek pro klastry
- 4 druhy distančních mřížek
  - 1 horní distanční mřížka
  - 6 distančních mřížek s míchacími deflektory (lopatkami)
  - 1 distanční mřížka bez míchacích deflektorů (lopatek)
  - 1 dolní distanční mřížka
- Dolní koncovku (patici)

Obrázek 9 – Palivový soubor VVANTAGE-6 [2]

2.4.2 Palivový soubor TVSA-T mod. 1

Jak již bylo výše zmíněno, palivový soubor TVSA-T (T=Temelín) vyvinutý ruskou společností TVEL nahradil do té doby používaný palivový soubor VVANTAGE-6 firmy Westinghouse. Nový typ palivových souborů však musel splňovat charakteristiky a vlastnosti pro aktivní zónu temelínských bloků. Schválení nového typu paliva předcházelo velké množství průkazných testů a výpočtů. [**2**]

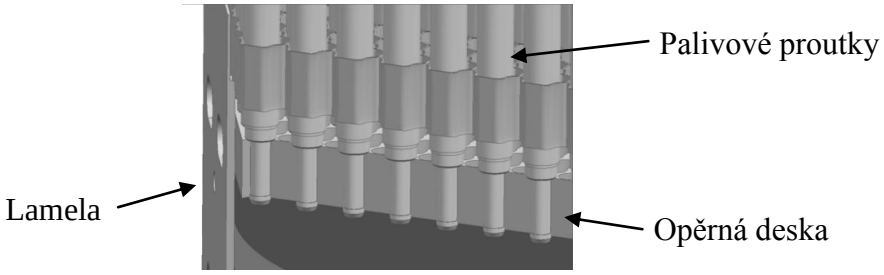
Palivo TVSA-T mod. 1 (obrázek 10 a obrázek 14) se na první pohled liší od předchozího typu paliva především konstrukcí. Celá konstrukce palivového souboru je v rozích vyztužena pomocí úhelníků. Tyto úhelníky jsou po celé výšce palivového souboru pevně spojeny svarovými spoji s jednotlivými distančními mřížkami a také se spodním opěrným uzlem. Tímto konstrukčním provedením je zajištěna trvalá tuhost konstrukce palivového souboru za provozu. Během provozování palivového souboru v aktivní zóně reaktoru (pět let) dojde k minimálnímu prohnutí, tím je také zajištěna bezchybná funkce řídících tyčí (klastrů). Nedochází tedy k tzv. „banánovému“ efektu a klastry mohou dopadnout až do svých koncových poloh. Mezi nevýhody výztužných úhelníků může patřit fakt, že vytváří překážku a omezují tak příčné toky mezi palivovými soubory v aktivní zóně. [**2**]

Obrázek 10 – Palivový soubor TVSA-T mod.1 [2]

Počet palivových proutků v palivovém souboru se nezměnil (312), taktéž je tomu u počtu vodících trubek pro klastry (18). Konstrukční provedení všech částí palivové souboru se však u nového typu změnilo, týkalo se to především použitých materiálů, provedení horní (hlavice) a dolní koncovky (patice), konstrukce a počtu distančních mřížek, uchycení klastrů, a také tvaru a velikosti palivové peletky (jaderné palivo ve formě UO_2).[**2**]

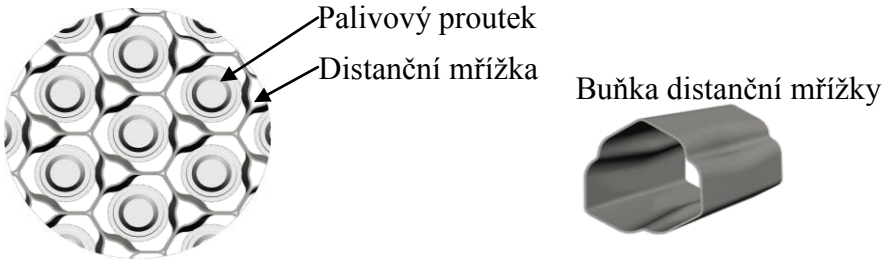
Patice palivového souboru obsahuje debris filtr, jenž zabraňuje případným pevným částem o velikosti větší než 2 mm vniknout do palivového souboru mezi palivové proutky. Spodní koncovka je spojena pomocí šroubů s úhelníky, které jsou svařeny se spodním opěrným uzlem, který se skládá z tlumící mřížky, zabraňující vibračnímu namáhání palivových proutků ve spodní části palivového souboru, opěrné desky, ve které jsou pevně upevněny

palivové proutky a zamezují tak axiálnímu posuvu (viz obrázek 11) a šesti lamel spojující tlumící mřížku a opěrnou desku. [**2**]



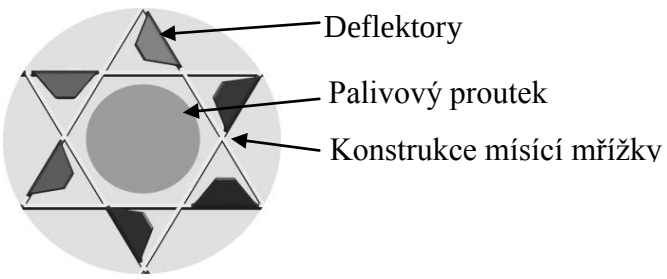
*Obrázek 11 – Uchycení palivových proutků v palivovém souboru TVSA-T mod.1 [**2**]*

V palivovém souboru TVSA-T je osm distančních mřížek třech typů. Všechny distanční mřížky však mají stejnou funkci – udržovat palivové proutky ve svých pozicích. Konstrukce buňky distanční mřížky (obrázek 12) je navržena tak, aby umožnila růst palivových proutků v průběhu provozu palivového souboru v aktivní zóně. Počet distančních mřížek, jejich umístění a konstrukce by měla vyloučit možnost zkřivení palivových proutků v úseku mezi distančními mřížkami a nemělo by docházet k opotřebování pokrytí v místech dotyku konstrukce distanční mřížky a pokrytí palivových proutků způsobené vibračním třením. [**2**]

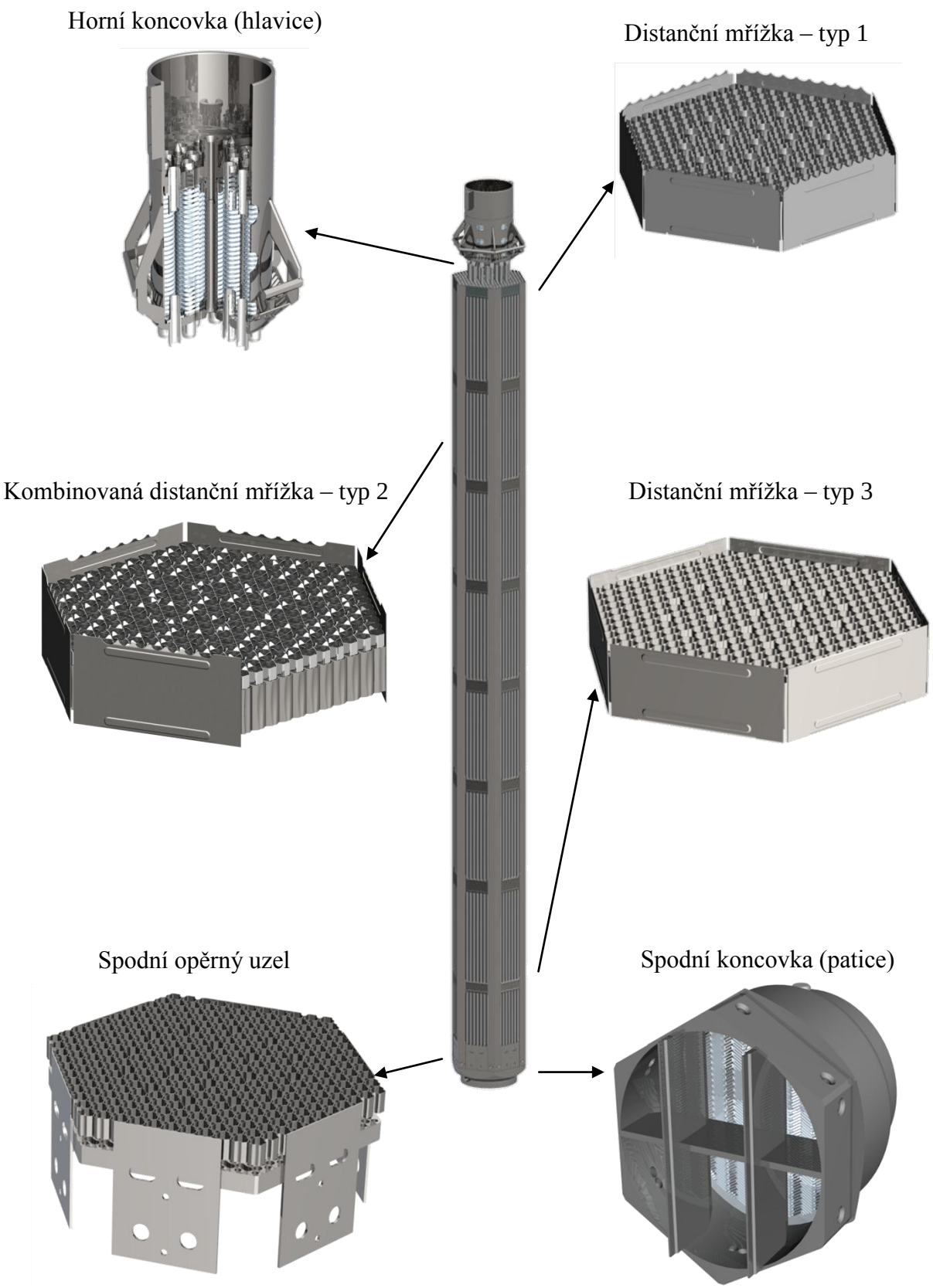


*Obrázek 12 – Distanční mřížka a buňka distanční mřížky palivového souboru [**2**]*

Po výšce palivového souboru je umístěno celkem šest kombinovaných distančních mřížek (typ 2). Kombinovanou mřížkou je myšleno spojení dvou mřížek – distanční a mísící mřížky. Mísící mřížka se již nedotýká s palivovým proutkem, nýbrž slouží k turbulizaci proudu chladícího média. Zvyšuje se promíchávání chladiva pomocí jednotlivých lopatek (deflektorů), ohnutých od hlavního směru proudění pod určitým úhlem. Při použití těchto mřížek se zvyšuje hodnota kritického tepelného toku a také se zvyšuje spolehlivost odvodu tepelné energie z aktivní zóny reaktoru. V palivovém souboru TVSA-T mod. 1 je použit typ mísící mřížky, jenž má ohnuté deflektory tak, že roztočí proud chladícího média kolem obtékaného palivového proutku – typ *„swirling“* (viz obrázek 13). [**2**]



*Obrázek 13 – Schéma mísící mřížky - typ „swirling" [**2**]*

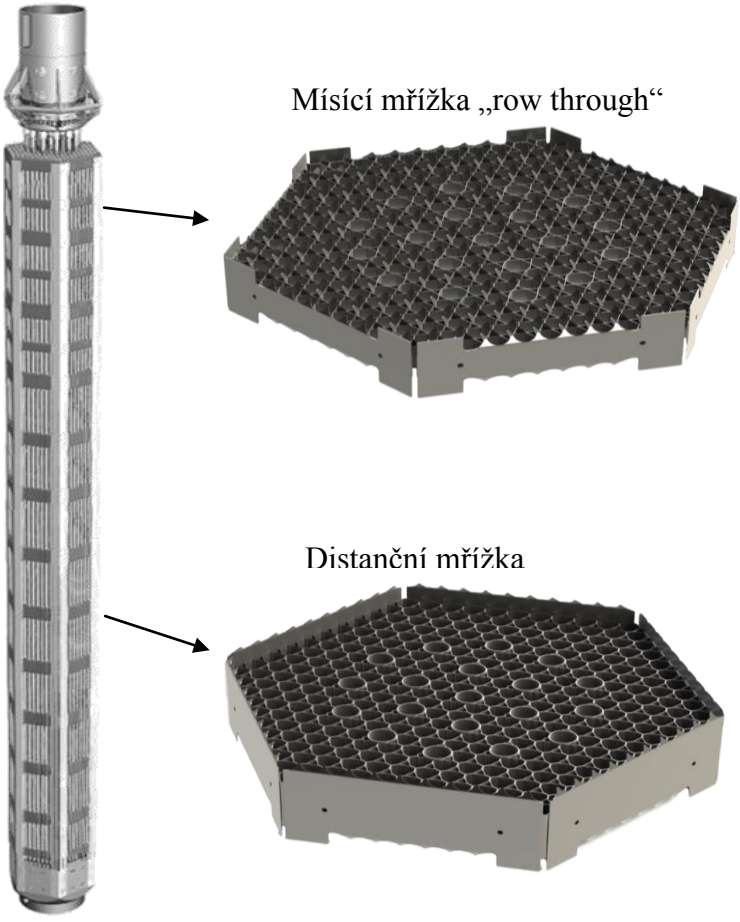


Obrázek 14 – Palivový soubor TVSA-T mod. 1 a jednotlivé konstrukční části ***[2]***

2.4.3 Palivový soubor TVSA-T mod. 2

Nový typ palivového souboru pro Jadernou elektrárnu Temelín vyvinutý ruskou firmou TVEL s označením TVSA-T mod. 2 by měl v budoucnu nahradit dosavadní typ palivového souboru TVSA-T mod. 1.

Základními rysy a hlavními odlišnostmi nového palivového souboru od stávajícího (TVSA-T mod. 1) je počet distančních mřížek, konstrukce distančních mřížek a konstrukce mísících mřížek. Změnami prošla i palivová peletka a pokrytí palivových proutků. Tak jako předchozí typ paliva má i tento typ spodní koncovku s debris filtrem, opěrný uzel, ve kterém jsou pevně usazeny palivové proutky, vyztužený skelet pomocí úhelníkům a horní koncovku. Palivový soubor TVSA-T mod. 2 postrádá kombinované distanční mřížky, avšak obsahuje dvanáct distančních mřížek a pouze tři mísící mřížky, které však již nejsou spojeny s distanční mřížkou, nýbrž jsou uloženy samostatně v horní části palivového souboru mezi distančními mřížkami (viz obrázek 14). [**6**], [**7**]

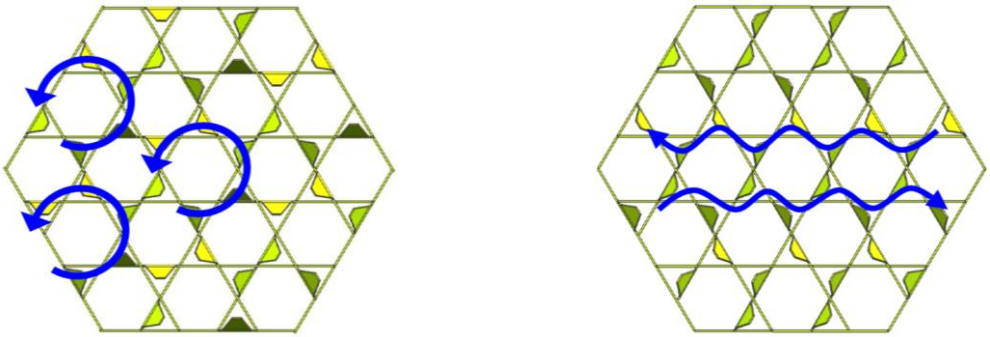


*Obrázek 15 – Palivový soubor TVSA-T mod. 2 a použité distanční a míchací mřížky [**2**]*

Hlavní změnou je změna konstrukce mísící mřížky. Předchozí typ turbulizoval proud chladícího média a roztáčel jej kolem obtékaného palivového proutku. Konstrukce nového typu mísící mřížky má jinak ohnuté lopatky, které proudící chladící médium přesouvá z jednotlivých subkanálů palivových proutků zleva doprava a naopak po řadách. Tento typ mísící mřížky je označován jako *„row- through“*. [**2**], [**6**], [**7**]

2.4.4 Mísící mřížky

Tato práce je zaměřena na sledování a ověření očekávaného proudění skrze dva typy mísících mřížek. První typ mísící mřížky je použit v palivovém souboru TVSA-T mod. 1 a způsobuje roztáčení proudící chladiva kolem palivových proutků, druhý typ odklání proud chladiva do sousedních subkanálů a je použitý v palivovém souboru TVSA-T mod. 2. Na obrázku níže lze spatřit oba typy mísících mřížek použitých v palivových souborech a očekávané struktury proudícího média za jednotlivými konstrukčními provedeními mřížek.

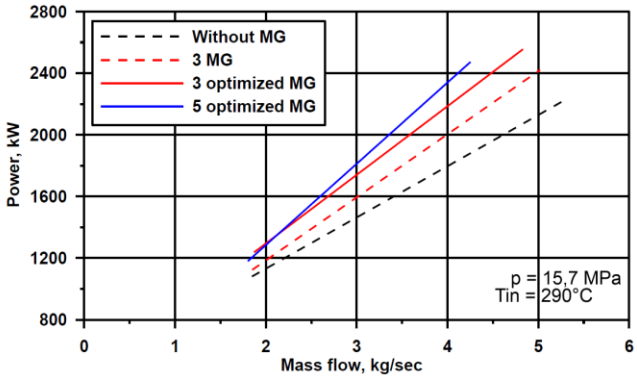


*Obrázek 16 – Mísící mřížky v TVSA-T mod. 1(vlevo) a TVSA-T mod. 2 (vpravo) [**6**]*

Zkušenosti a nové poznatky firmy TVEL vedly k vývoji nové konstrukce mísící mřížky použité v TVSA-T mod. 2. Nová mísící mřížka má optimalizované velikosti, náklon a umístění jednotlivých mísících lopatek (deflektorů). [**6**]

Obě mísící mřížky mají všechny lopatky ohnuty pod definovaným úhlem do takového směru, aby vytvářely žádoucí mísení a turbulizování proudu. Mřížka je vytvořena z tenkých plechů, lopatky se ohnou podle definovaného úhlu a následně se plechy vloží do sebe a pevně spojí pomocí svarových spojů. [**2**]

Použitím palivového souboru s novým optimalizovaným typem mísící mřížky výrobce udává důležitá zlepšení tedmohydraulických charakteristik. Zlepšení účinnosti mísení chladícího média mezi jednotlivými proutky, tedy přesun chladícího média z více tepelně zatížených palivových proutků do méně zatížených, snížení teplotní nevyváženosti napříč palivovým souborem. Aplikací mísících mřížek *„row-through“* lze o 10–15 % zvýšit maximální přípustný výkon palivových souborů, jelikož kritický tepelný tok by se zvýšil o 30–40 %. Obrázek 17 uvádí výsledky z experimentů provedené firmou TVEL, na kterém je možné vidět průběh závislosti kritického výkonu na hmotnostním průtoku. Jednotlivé křivky popisují počet a typ použitých míchacích mřížek [**6**], [**7**]



*Obrázek 17 – Kritický výkon závislý na průtoku – výsledky firmy TVEL [**6**]*

3 CFD modelování

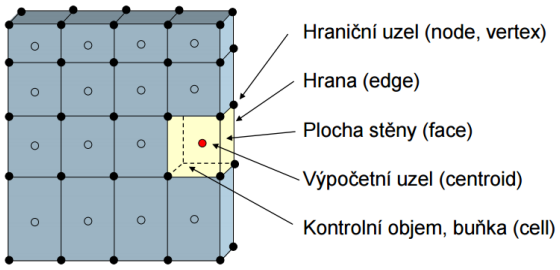
Pojem CFD je zkratkou anglických slov *Computational Fluid Dynamics*, což lze volně přeložit jako proudění v dynamice tekutin. Jedná se o numerické počítačové simulace procesů v mechanice tekutin, které využívají základní zákony a rovnice mechaniky tekutin. Tyto simulace umožňují komplexní řešení úloh proudění a přestupu tepla. Existuje velká řada dostupných CFD softwarů. Velmi často jsou numerické simulace používány pro prvotní návrhy nových zařízení, a to především z důvodu úspory času a finančních prostředků. Rovněž jsou simulace používané pro úpravu stávajících zařízení, nebo pouze k ověření a analýze chování proudícího média uvnitř stávajícího zařízení. Výsledky výpočtů dávají představu o chování média uvnitř zařízení, rozložení tlakových, rychlostních či teplotních polí, tlakové ztrátě komponent apod. V dnešní době je použití CFD výpočtů velmi rozšířeným nástrojem a téměř neexistuje průmyslové odvětví, ve kterém by neměly numerické simulace své využití. Základními rovnicemi, ze kterých veškeré CFD výpočetní programy vycházejí a které popisují základní fyzikální principy, jsou:

- zákon zachování hmoty – rovnice kontinuity;
- zákon zachování hybnosti – pohybová rovnice;
- rovnice zákona zachování energie – energetická rovnice.

Proces CFD výpočtu je možné rozdělit do tří základních částí.

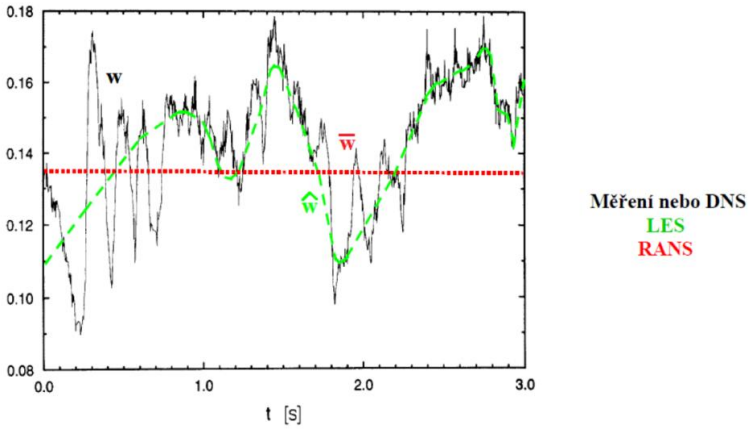
- Preprocessing
  - Tvorba geometrie
  - Tvorba výpočetní sítě
- Processing
  - Nastavení parametrů materiálů
  - Volba matematického modelu
  - Volba numerické metody
  - Nastavení okrajových podmínek
- Postprocessing
  - Vyhodnocení výsledků
  - Porovnání různých variant

Pro řešení parciálních diferenciálních rovnic se v CFD programech využívá metoda konečných objemů. Základní myšlenkou této metody je rozdělení řešené oblasti na konečný počet nepřekrývajících se objemů pomocí výpočetní sítě. Základní rovnice, které popisují spojité prostředí pomocí parciálních diferenciálních rovnic, jsou nahrazeny (diskretizovány) soustavou algebraických rovnic pro každý objem s připojením okrajových podmínek. [**12**]



*Obrázek 18 – Metoda konečných objemů [**12**]*

Důležitá je v CFD i volba turbulentního modelu. Turbulentní proudění je takové proudění, jehož veličiny (proměnné) vykazují náhodné změny jak v prostoru, tak i v čase. Obecně se turbulentní proudění skládá z velkých prostorových struktur – turbulentních vírů. Velké víry disponují určitou energií a postupně se rozpadají na menší a menší struktury, přičemž je následně proces rozpadání ukončen disipací energie nejmenších vírů na tepelnou energii. [**13**]



*Obrázek 19 – Metody modelování turbulence [**14**]*

Základní rovnice turbulentního proudění je možné řešit přímou numerickou simulací (*Direct Numerical Simulation – DNS*). Tato metoda ale má obrovské výpočetní nároky. Ve většině případů není zapotřebí řešit všechny velikosti fluktuací veličin. Existují jiné další metody, které snižují výpočetní nároky a například řeší pouze velké víry, které dokáže výpočetní síť zachytit (*Large Eddy Simulation – LES*). Nejpoužívanější metodou a jedním z nejčastějších nástrojů pro řešení inženýrských aplikací je metoda časového středování (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*). [**14**], [**15**]

V této práci bylo uvažováno použití dvou turbulentních modelů patřících do tzv. dvourovnicových turbulentních modelů řešené metodou *RANS* (*k-ε Realizable* a *k-ω SST*) Oba tyto modely vycházejí z Boussinesquovy hypotézy, která je založena na podobnosti mezi laminárním prouděním, konkrétně na Newtonově vztahu popisující vztah mezi viskozitou a smykovým napětím. Předpokladem hypotézy je, že tenzor napětí, který se objevuje ve středovaných N-S rovnicích lze nahradit jedním vztahem – turbulentní viskozitou. Dvourovnicové turbulentní modely určují turbulentní viskozitu z dvou dalších dodatečných rovnic. [**14**], [**15**]

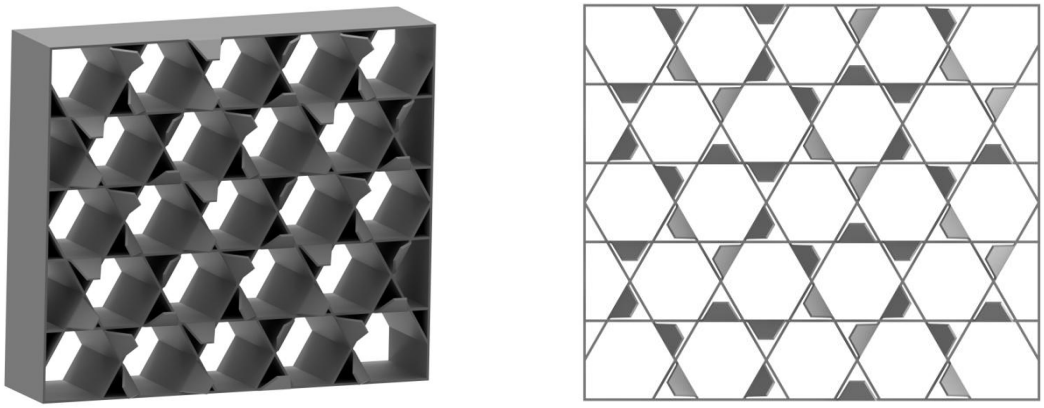
k-ε Realizable vznikl modifikací standardního modelu *k-ε*. Určuje turbulentní viskozitu pomocí dvou dodatečných rovnic pro *k* – turbulentní kinetickou energii a *ε* – rychlost disipace kinetické energie. Obě tyto rovnice jsou odvozeny z N-S rovnic. Tento model je velmi využívaný v praktických úlohách. Dobré výsledky dosahuje při řešení úlohy zahrnující otáčení, mezní vrstvy s nepříznivým gradientem tlaku, recirkulace, apod. [**15**]

k-ω SST je modifikací základní modelu *k-ω*. Tento model byl vyvinut za účelem propojení dobré přesnosti standardního modelu *k-ω* u stěny a dobré přesnosti ve volném proudu modelu *k-ε*. Propojení obou modelů je získáno použitím váhové funkce, přičemž funkce se rovná jedné u stěny (aktivace modelu *k-ω*), ve volném proudu je rovna nule (aktivace modelu *k-ε*). [**14**], [**15**]

3.1 Příprava CFD modelu

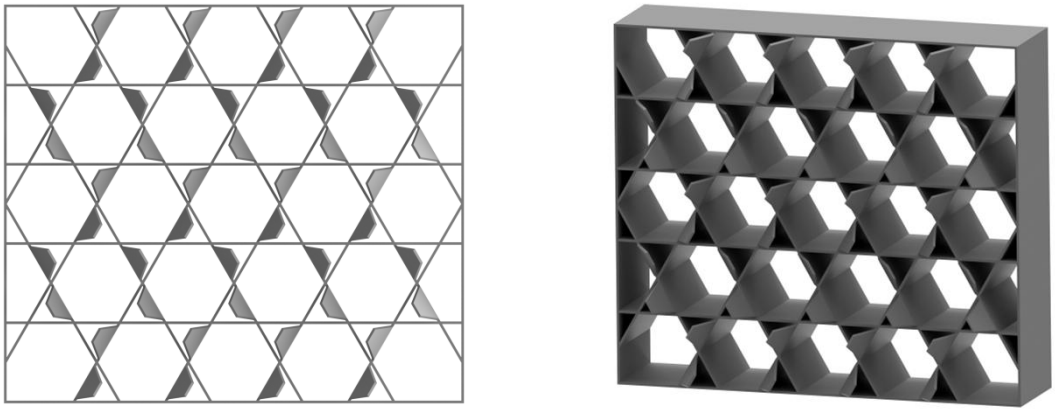
3.1.1 Příprava geometrie

Konstrukční provedení mísících mřížek je velmi složité a odpovídá provedení použitému při souběžně prováděném experimentu. Mřížka je vyrobena z tenkých plechů, její křidélka (lopatky) jsou ohnuta pod přesně definovaným úhlem, aby náležitě plnila svou funkci. Nejprve byl vytvořen 3D model obou mísících mřížek, které byly následně vloženy do kanálu šestihranného průřezu. Dále bylo předpokládáno, že v jednotlivých subkanálech mísící mřížky bude také umístěno 19 proutků imitujících palivové proutky palivové souboru.



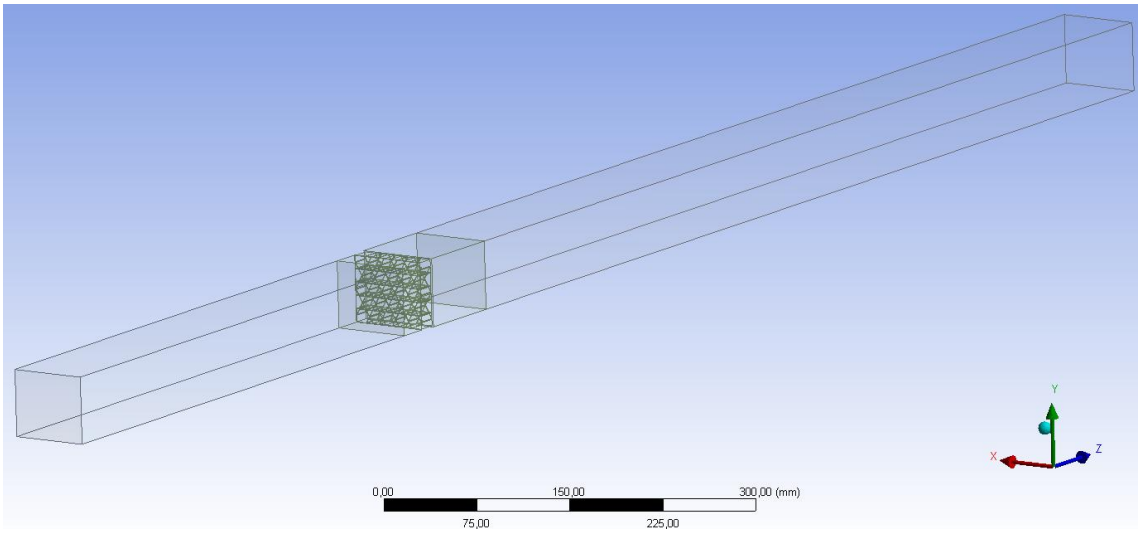
Obrázek 20 – Vizualizace finálního 3D modelu mřížky mod. 1

Především z důvodu konstrukčních a výrobních problémů a kvůli problémům plynoucím z experimentální metody, se kterou se výsledky následně porovnávaly, musela být přijata určitá omezení a konstrukční úpravy. Hlavní omezení se týkalo imitátorů palivových proutků, které nebyly v mísící mřížce umístěny, jelikož bylo nemožné měřící metodou sledovat proudové pole mezi nimi, popřípadě sledovat změny charakteru proudícího média se zvětšující se vzdáleností za mřížkou. Značné potíže představovalo udržení imitátorů palivových proutků v přesně definované pozici a zajištění tuhosti celého svazku, aby nedocházelo k ovlivnění vstupního i výstupního proudu za mísící mřížkou. Šestistěnný, několik metrů dlouhý měřící kanál, obsahující transparentní část, na které lze metodou PIV měřit, je velmi složité, ne-li nemožné vyrobit za přijatelné finanční prostředky a s velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností. Proto byla upravena geometrie mísících mřížek tak, aby ji bylo možné vložit do kanálu obdélníkového průřezu. Konstrukční řešení měřícího kanálu představoval nerezový kanál, na jehož konci byla vložena jedna z mísících mřížek, za kterou bylo právě měřeno. Nerezový kanál byl poté vložen do transparentního plexisklového kanálu. Podrobné konstrukční provedení a řešení jednotlivých částí experimentálního zařízení je popsáno v odkazované literatuře [**1**].



Obrázek 21 – Vizualizace finálního 3D modelu mřížky mod. 2

S ohledem na patřičná zjednodušení a úpravy byl vytvořen finální 3D model obou mísících mřížek v programu *Autodesk Inventor 2017*. Každá z nich byla poté exportována (ve formátu *step*) do programu *Ansys DesignModeler*, ve kterém následně proběhly finální přípravy geometrie výpočetní oblasti. Nejprve bylo zapotřebí vytvořit inverzní objem, tedy vytvořit oblast kanálu proudícího média skrze mísící mřížku. Po vytvoření inverzního objemu bylo těleso rozděleno na tři tělesa z důvodu tvorby výpočetní sítě, jež bude popsána déle. Dále byly vytvořeny a pojmenovány plochy, které jsou potřebné a usnadňují pozdější nastavení výpočetní sítě a především nastavení řešiče. Těmito plochami jsou vstupní plocha do výpočetní oblasti (*Inlet*), výstupní plocha (*Outlet*) a okrajové plochy výpočetní oblasti (*Wall*).

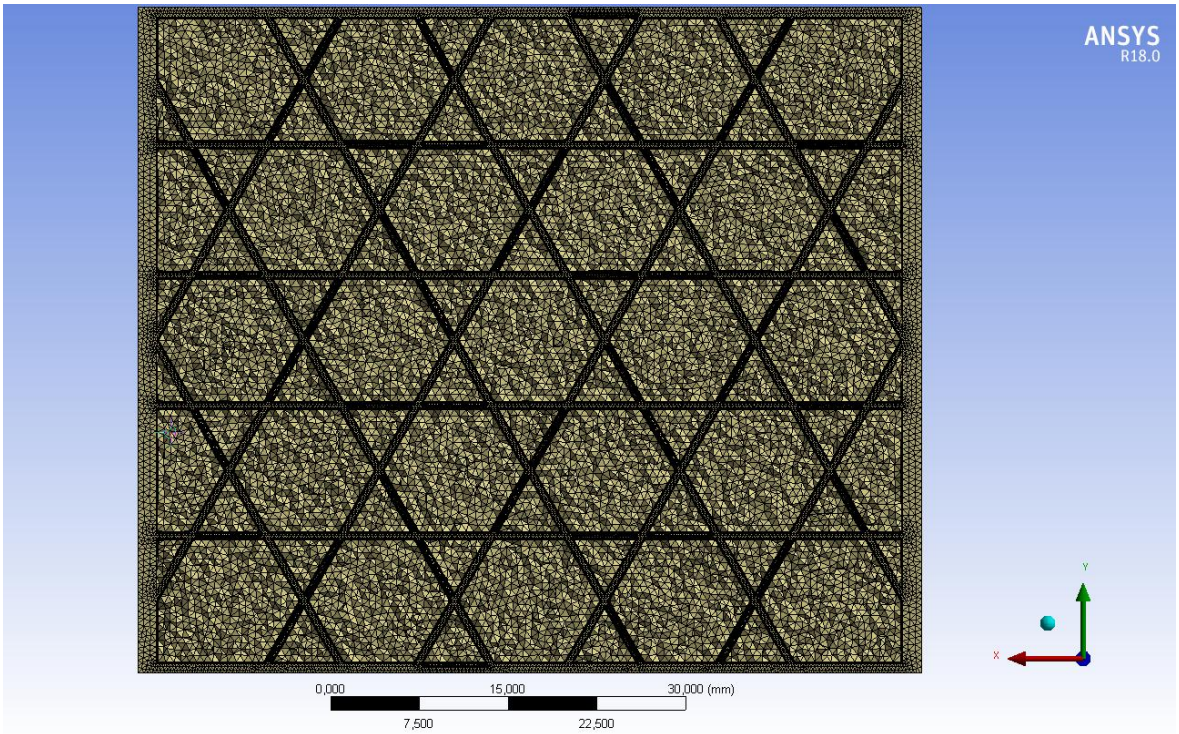


Obrázek 22 – Pohled na geometrii mřížky mod. 1 – Ansys DesignModeler

3.1.2 Tvorba výpočetní sítě

Geometrie výpočetní oblasti byla připravena a exportována do programu *Ansys Meshing*, kde proběhla tvorba výpočetní sítě. Zde musela být zvolena určitá nastavení výpočetní sítě, aby byla síť dostatečně přesná, zajišťovala dobrou konvergenci, měla přípustnou velikost a požadovanou kvalitu. Při přípravě geometrie již bylo těleso rozdělené do tří částí, vstupní část kanálu, kanál s mísící mřížkou a výstupní část kanálu. Kanál obsahující mísící mřížku se složitými mísícími křidélky, byl síťován pomocí tetrahedrálních prvků. Výstupní a vstupní část kanálu byly vytvořeny metodou *Sweep* z hexahedrálních prvků, které také zajišťují dostatečnou přesnost řešení. Bylo samozřejmě možné výpočetní síť vytvořit pouze z tetrahedrálních prvků, avšak celkový počet konečných objemů by byl mnohem větší.

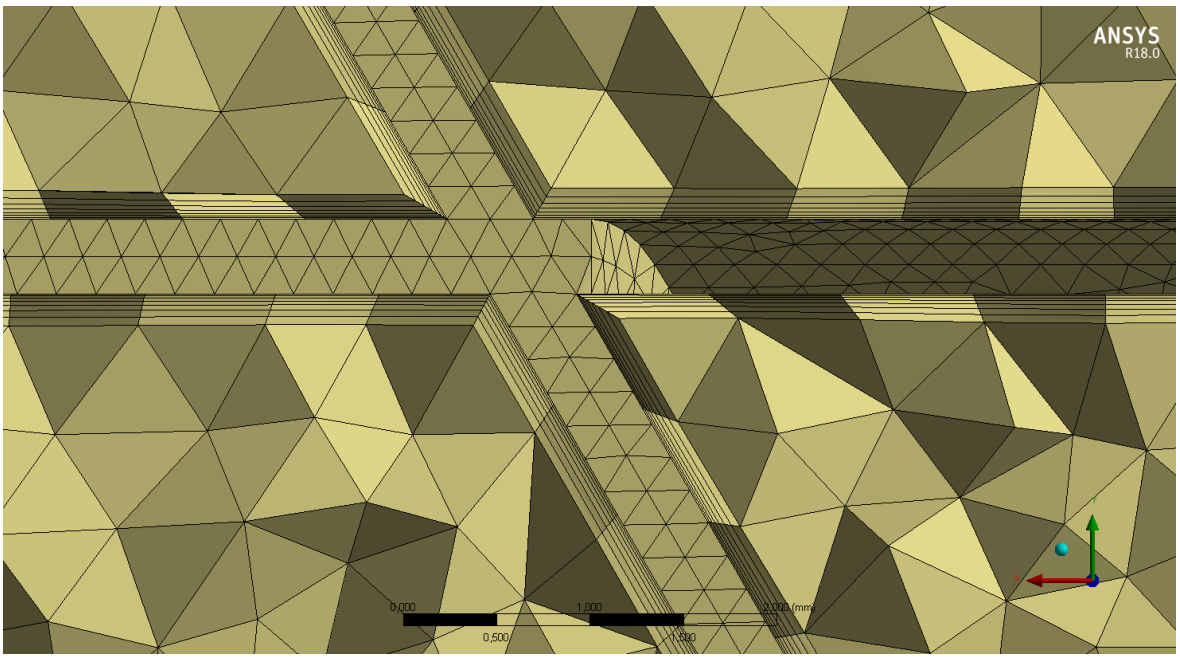
Bylo předpokládáno, že pro výpočet bude použit turbulentní model *k-ω SST*, popřípadě *k-ε Realizable*. Tyto modely také používají stěnovou funkci *Enhanced Wall Treatment*, jejíž hlavní předností je ta, že může být použita výpočetní síť disponující téměř jakoukoliv hodnotou bezrozměrné velikosti y+. Správná hodnota y+ je obecně důležitá pro korektní zachycení velkých rychlostních nebo teplotních gradientů u stěny výpočetní oblasti. Jak již bylo výše zmíněno, turbulentní model *k-ω SST*, popřípadě *k-ε Realizable*, lze použít téměř pro jakýkoliv případ hodnoty y+ (s využitím stěnové funkce *Enhanced Wall Treatment*), avšak manuálem *Ansys Fluent* je doporučeno, dodržet hodnotu y+ u stěny menší než jedna. S ohledem na tuto skutečnost byla výpočetní síť tvořena. Byly provedeny kontrolní výpočty pro určení výšky první buňky v mezní vrstvě, aby byla zajištěna hodnota y+<1 u stěny celé výpočetní oblasti. Potřebná hodnota y+ byla zajištěna při výšce první buňky mezní vrstvy 0,01mm, v oblasti tetrahedrální sítě a 0,02 mm v oblasti vstupní a výstupní části kanálu.



Obrázek 23 – Pohled na tetrahedrální výpočetní síť v oblasti mřížky

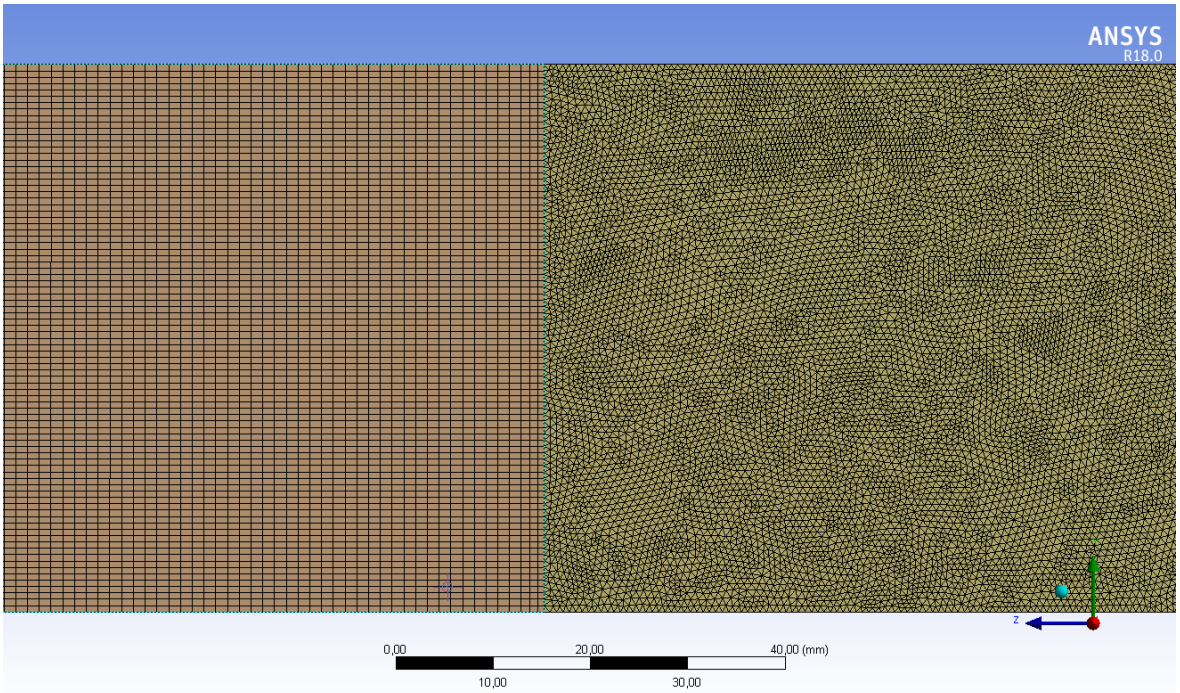
V průběhu tvorby výpočetní sítě byla také provedena citlivostní analýza výpočetní sítě, při které byl především měněn počet buněk v mezní vrstvě. Tento počet se u kontrolních

výpočtů pohyboval od tří až do deseti buněk u stěny. Z výsledků bylo patrné, že větší počet než sedm buněk v mezní vrstvě, nezpůsobí žádný rozdíl, naopak pouze zvyšuje celkový počet konečných objemů sítě a prodlužuje tak výpočet.



Obrázek 24 – Detailní pohled na mezní vrstvu v oblasti mřížky

Problémem tvorby sítě byly ostré přechody mezi volným proudem (vstupní kanál a výstupní kanál) a konstrukcí mřížky. V těchto místech se automaticky špatně tvořila síť a především mezní vrstva. Proto zde byla použita funkce *Proximity* a dále nastavení *Num Cells Across Gap*, jež zvolí počet buněk ve velmi úzkých místech sítě.



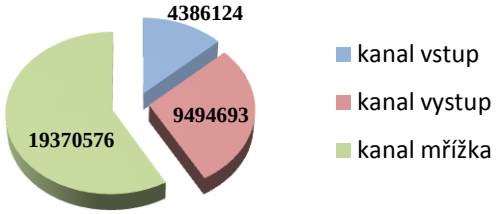
Obrázek 25 – Konformní přechod mezi tetrahedrální a hexahedrální sítí

S ohledem na výše zmíněné důležité parametry (velikost sítě, hodnota y+, počet buněk v mezní vrstvě), ale také s ohledem na požadovanou kvalitu výpočetní sítě, která povede ke konvergentnímu řešení úlohy, byly provedeny nastavení výpočetní sítě v programu *Ansys Workbench Meshing* (viz tabulka 2) Nastavení sítě je zde uvedeno pro výslednou geometrii. Některé rozměry konstrukce mřížek byly totiž v průběhu vypracovávání práce měněny (viz kapitola 3.1.4).

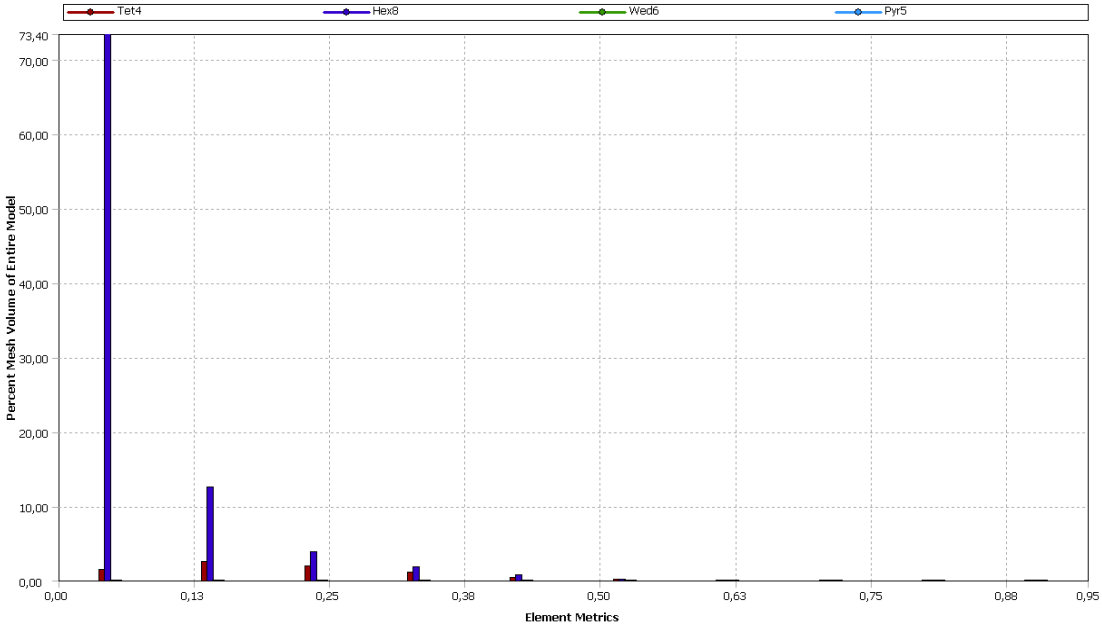
Tabulka 2 – Nastavení diskretizace výpočetní oblasti

Ansys Workbench Meshing		
	Mod. 1	Mod. 2
Sweep Method	Kanal-in	Kanal-in
Sweep Method	Kanal-out	Kanal-out
Inflation – kanal-in	First Layer Height 0,02 mm Growth Rate 1,3	First Layer Height 0,02 mm Growth Rate 1,3
Inflation – kanal-out	First Layer Height - 0,02 mm Growth Rate - 1,3	First Layer Height - 0,02 mm Growth Rate - 1,3
Inflation – kanal-grid	First Layer Height - 0,01 mm Growth Rate - 1,3	First Layer Height - 0,01 mm Growth Rate - 1,3
Min Size	0,02 mm	0,02 mm
Max Face Size	1 mm	1 mm
Max Size	1 mm	1 mm
Advanced Options	Stair Stepping	Stair Stepping
Num Cells Across Gap	3	3
Body Sizing – kanal grid	0,65 mm	0,65 mm
Number of Cells	33 251 393	32 702 296
Number of Nodes	18 572 672	18 027 355

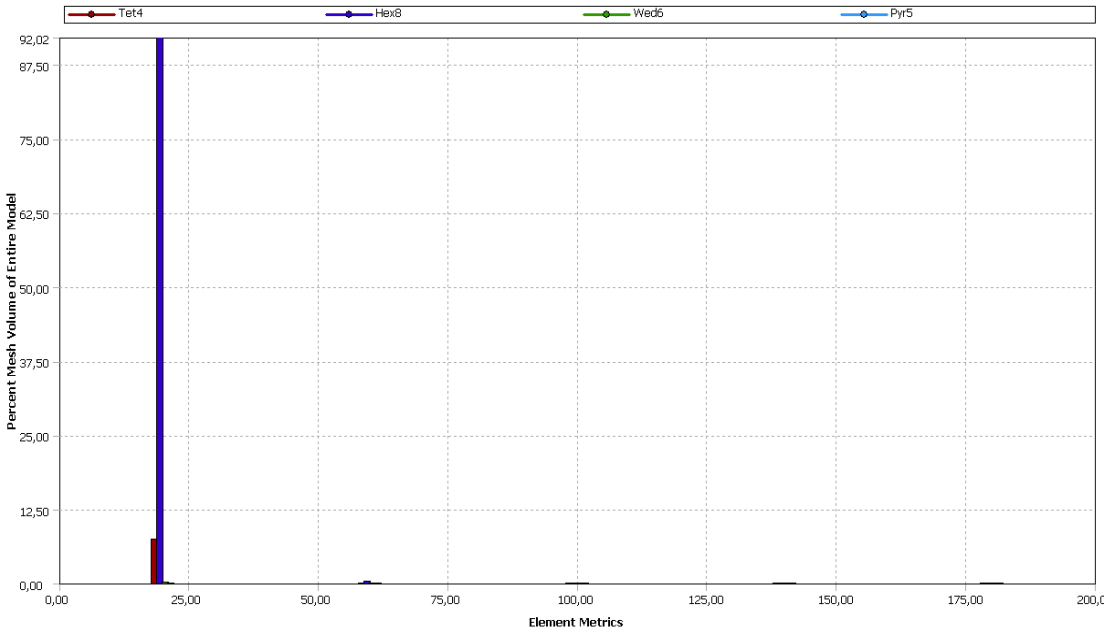
Vytvořená výpočetní konformní síť se skládala u obou mřížek z přibližně 33 milionů konečných objemů. Kvalita výpočetní sítě je jedno ze základních hledisek pro správný výsledek a dostatečnou konvergenci výpočtu. Kvalita byla posuzována z hlediska *skewness* a *aspect ratio*. Následující grafy a obrázky představují rozdělení celkového počtu konečných objemů do jednotlivých částí výpočetní oblasti (kanál vstup, kanál výstup, kanál mřížka) a výsledky posouzení kvality sítě. U obou výpočetních sítí dosahovalo více než 98 % buněk hodnoty *skewness* menší než 0,5. Nejvyšší hodnota *skewness* se pohybovala kolem hodnoty 0,95. V rozsahu 0,9–0,95 hodnoty *skewness* obsahovala výpočetní síť pouze ojedinělé buňky, které však kvalitu či správnou konvergenci výpočtu neovlivnily. Více než 99 % buněk výpočetní sítě dosahovalo hodnot *aspect ratio* menších než 25 (posouzení kvality sítě z hlediska poměru stran buněk).



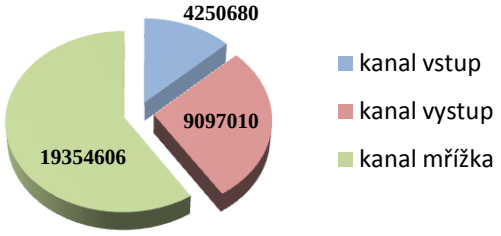
Obrázek 26 – Počet buněk sítě – mod. 1



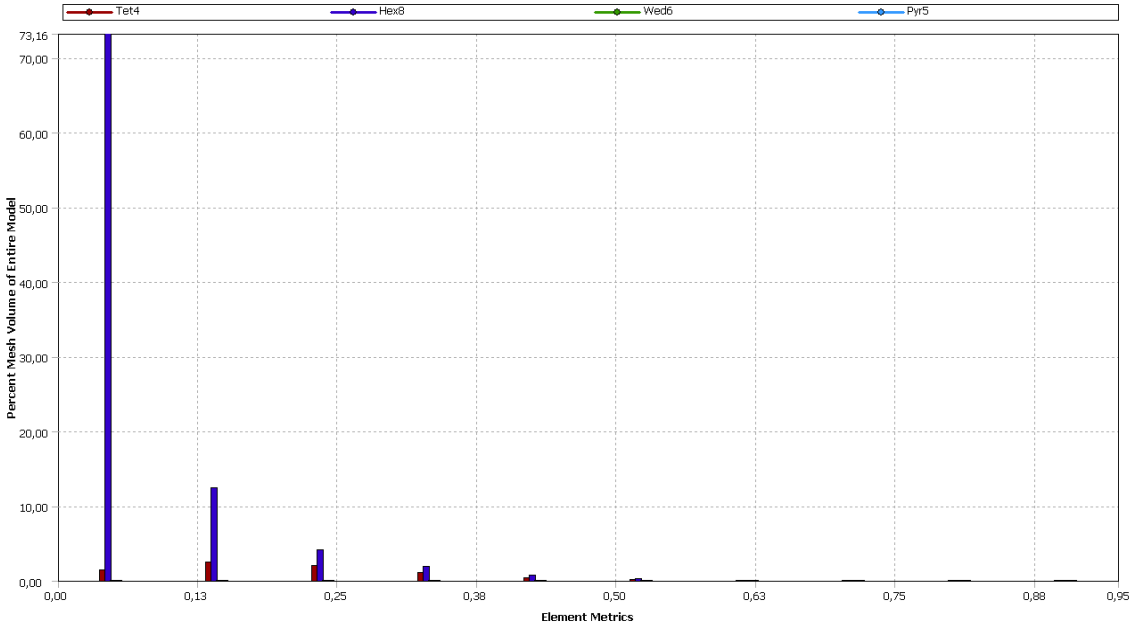
Obrázek 27 – Posouzení kvality sítě – Skewness – mod. 1



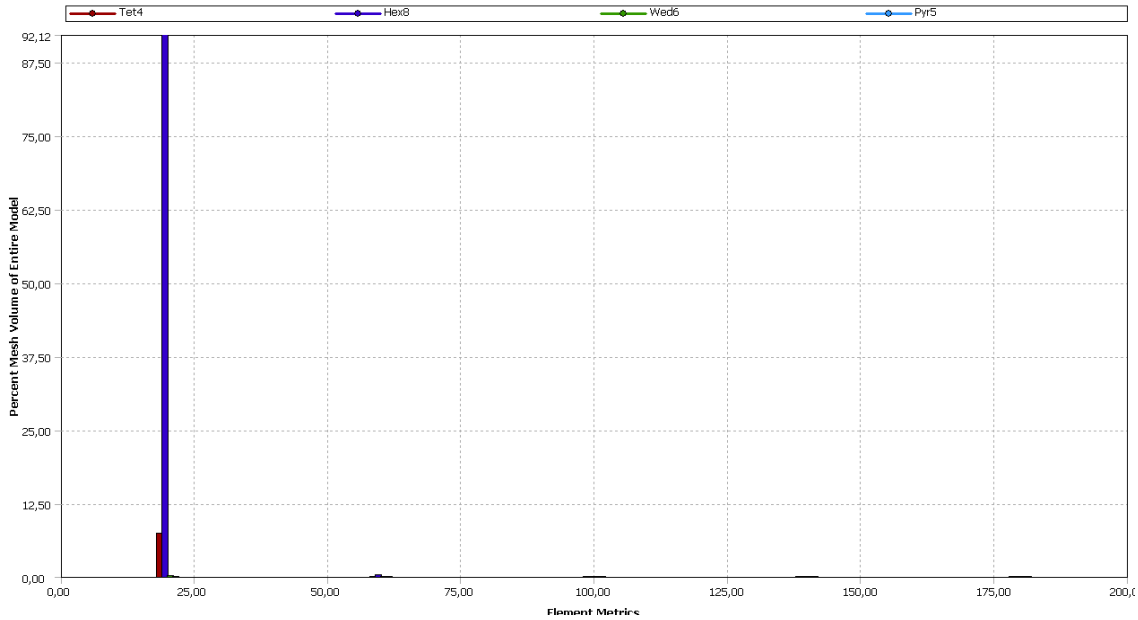
Obrázek 28 – Posouzení kvality sítě – Aspect Ratio – mod. 1



Obrázek 29 – Počet buněk sítě – mod. 2



Obrázek 30 – Posouzení kvality sítě – Skewness – mod. 2



Obrázek 31 – Posouzení kvality sítě – Aspect Ratio – mod. 2

3.1.3 Nastavení řešiče

Pro řešení úlohy řešení proudění média skrze mísící mřížky v kanále obdélníkového průřezu byl použit řešič *Ansys Fluent 18.0*. Vytvořené výpočetní sítě byly exportovány do řešiče, kde proběhlo nastavení úlohy. Použitými turbulentními modely byly *k-ω SST* a *k-ε Realizable*. Proudícím médiem byla voda o definované hustotě a dynamické viskozitě. Byla zvolena okrajová podmínka konstantní rychlosti na vstupu do výpočetní oblasti a výstupní okrajová podmínka referenční hodnoty tlaku (viz tabulka 4). Okrajové podmínky odpovídaly variantám provedeného experimentu. Nastavení řešiče *Ansys Fluent* je podrobně uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 3 – Nastavení řešiče pro výpočet programem Ansys Fluent

Ansys Fluent			
Solver		Pressure Based Steady	
Material		Fluid - Water	
Models	Viscous Model Wall Function	k-ω SST -	k-ε Realizable Enhanced Wall Treatment
	Energy	Off	
Solution Methods	Scheme	Coupled	
	Gradient	Last Square Cell Based	
	Pressure	Second Order	
	Momentum	Second Order Upwind	
	Turbul. Kinetic Energy	Second Order Upwind	
	Spec. Dissipation Rate	Second Order Upwind	-
	Turbul. Dissipation Rate	-	Second Order Upwind
Monitors	Residuals	1E-3	
	Surface – static pressure Surface – mass flow	Inlet Outlet	
Initialization		Hybrid Initialization	

Tabulka 4 – Zvolené okrajové podmínky

Boundary condition	
Velocity - Inlet	Velocity magnitude Turbulent intensity Hydraulic diameter
Pressure - Outlet	Gauge pressure Turbulent intensity Hydraulic diameter
Wall - Wall	No slip

3.1.4 Validace CFD modelu

Za účelem získání nejlepší shody experimentu a numerického výpočtu, bylo zapotřebí sledovat důležité parametry a veličiny během experimentu. Před každým měřením byla sledována a zaznamenávána teplota proudícího média a objemový průtok média v kanále. Jelikož měření na experimentálním zařízení PIV v laboratoři Katedry energetických strojů a zařízení probíhalo ve více dnech, bylo zapotřebí teplotu proudícího média pečlivě měřit, jelikož se vlastnosti vody s teplotou mění. Dále k těmto hodnotám byly přiřazeny skutečné rozměry kanálu experimentálního zařízení. Z výše uvedených parametrů bylo možné určit okrajové podmínky pro CFD výpočet. Teplota proudícího média pomohla určit vlastností vody, konkrétně její hustotu a dynamickou viskozitu. Ze zjištěného průtoku skutečným kanálem na experimentálním zařízení a z vlastností vody bylo dále možné určit vstupní okrajovou podmínku rychlosti. Pro každý typ mřížky byly provedeny výpočty pro tři velikosti rychlosti, přibližně od 0,6 do 1 m/s. Dle rozměrů vstupního a výstupního kanálu byly vypočteny hydraulické průměry, které jsou zapotřebí jako okrajová podmínka turbulentní veličiny na vstupu a výstupu. V tabulce 5 jsou uvedeny přesné okrajové podmínky pro jednotlivé varianty numerického výpočtu.

Nejprve bylo provedeno šest výpočtů pro model mřížky mod. 1 a šest výpočtů pro mřížku mod. 2, každý typ mřížky byl počítán pomocí modelů *k-ω SST* a *k-ε Realizable*. Během porovnávání s výsledky experimentů bylo zjištěno, že se značně liší maximální rychlosti za mřížkou. Tento rozdíl byl vyšší než 15 % z maximální rychlosti, přičemž objemový i hmotností průtok se mezi experimentem a výpočtem nelišil. Hlavní příčinou takto velkého rozdílu maximálních rychlostí byla nejspíše nepřesnost výroby konstrukce mísících mřížek. Mřížky byly navrženy a do výroby zadány z nerezového plechu o 0,1 mm slabšího, než bylo ve skutečnosti vyrobeno. Zjištěná skutečnost vedla k úpravě dosavadních rozměrů obou mřížek a následné úpravě výpočetní sítě. Okrajové podmínky se však již neměnily.

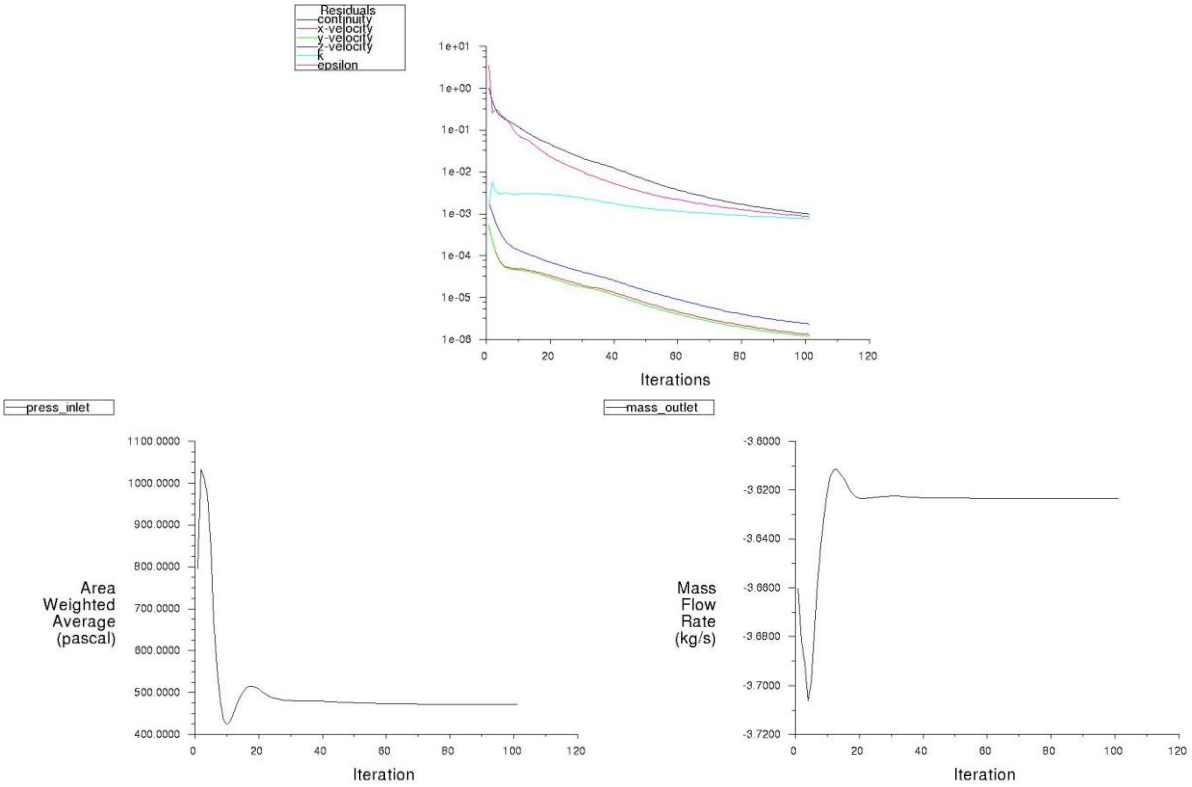
Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1.3, pro výpočet byly použity dva turbulentní modely. Při prvotním porovnání obou turbulentních modelů byly znatelné rozdíly v charakteru proudění za mřížkou. Základní struktury (vektory rychlostí) proudu byly obdobné, ale rozložení, především třetí složky rychlosti ve směru proudu, bylo odlišné. Při dalším porovnání výsledků s výsledky experimentální metody PIV bylo zjištěno, že použití turbulentního modelu *k-ε Realizable* poskytuje bližší výsledky reálnému proudění, než výsledky modelu *k-ω SST*. Z těchto důvodů budou ve vyhodnocení a v porovnání výsledků s experimentální metodou uváděny pouze výsledky turbulentních modelu *k-ε Realizable*.

Tabulka 5 – Definované okrajové podmínky pro jednotlivé varianty výpočtu

		Mřížka mod.1			**Mřížka mod.2**			
Material	Fluid	Water						
	Temperature	24,33	23,70	24,52	25,22	24,26	24,89	$°C$
	Density	997,217	997,373	997,170	996,993	997,237	997,077	$\frac{kg}{m^3}$
	Dyn. viscosity	0,0009038	0,0009171	0,0008998	0,0008857	0,0009054	0,0008923	$Pa \cdot s$
Inlet	Velocity	1,03002	0,79721	0,60203	0,99765	0,80086	0,60203	$\frac{m}{s}$
	Hydr. diameter	0,05924	0,05924	0,05924	0,05924	0,05924	0,05924	m
	Turb. intensity	5	5	5	5	5	5	%
Outlet	Gauge Pressure	0	0	0	0	0	0	Pa
	Hydr. diameter	0,06079	0,06079	0,06079	0,06079	0,06079	0,06079	m
	Turb. intensity	5	5	5	5	5	5	%

3.2 Výsledky výpočtu

Výpočet všech variant úloh pro obě mřížky byl proveden v programu *Ansys Fluent.* Příprava CFD modelu a vyhodnocení výsledků proběhlo v *Ansys Workbench* a *Ansys CFD Post.* Během výpočtu byl sledován průběh residuí, a také byl monitorován tlak na vstupu a hmotnostní tok na výstupu z výpočetní oblasti. Výpočet byl ustálen na hodnotu residuí $1 \cdot 10^{-3}$ po přibližně 100–150 iteracích.



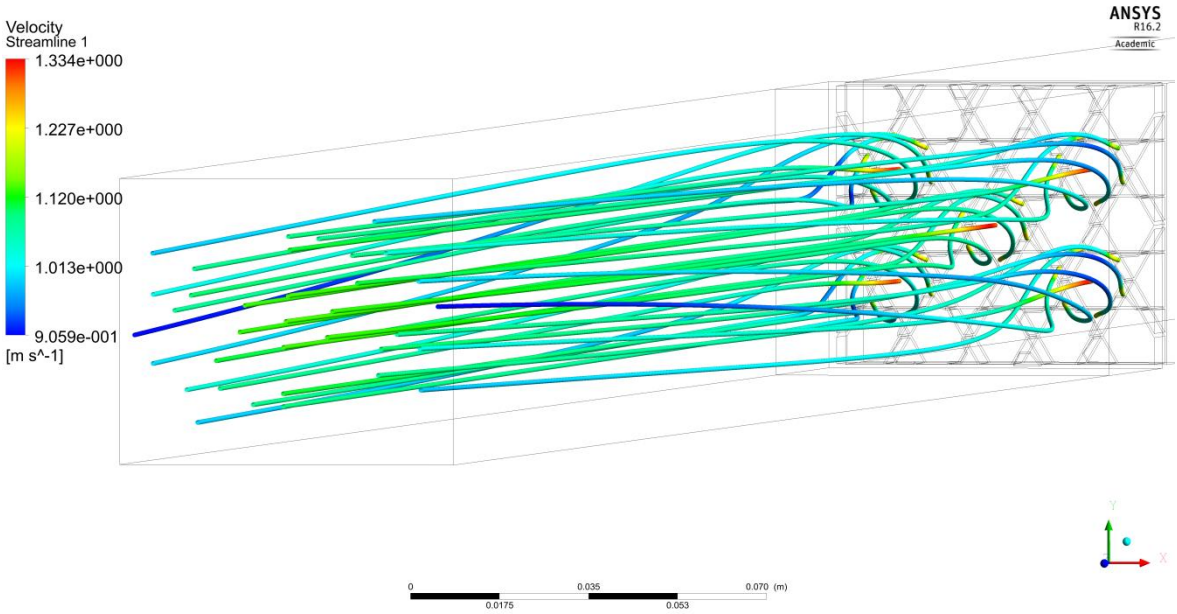
Obrázek 32 – Ukázka průběhu residuí, tlaku a hmotnostního toku během výpočtu

V následujících podkapitolách CFD výsledků jsou uvedeny výsledné struktury proudění za mřížkou. Jsou zde znázorněné tzv. *streamlines*, které slouží pro získání představy o chování proudícího média za geometrií jednotlivých mřížek. Dále je zde uvedeno rozložení rychlostí a vektorů složek rychlostí v rovině kolmé k hlavnímu proudu pouze v několika řezech. Hodnota osy *Z* odpovídá vzdálenosti vyšetřované roviny od výstupu z konstrukce mísící mřížky. Podrobné vyhodnocení všech složek rychlostí zobrazené pomocí grafů v několika řezech kanálem bude uvedeno v kapitole 4, kde budou výsledky podrobně porovnávány s naměřenými daty na experimentálním zařízení.

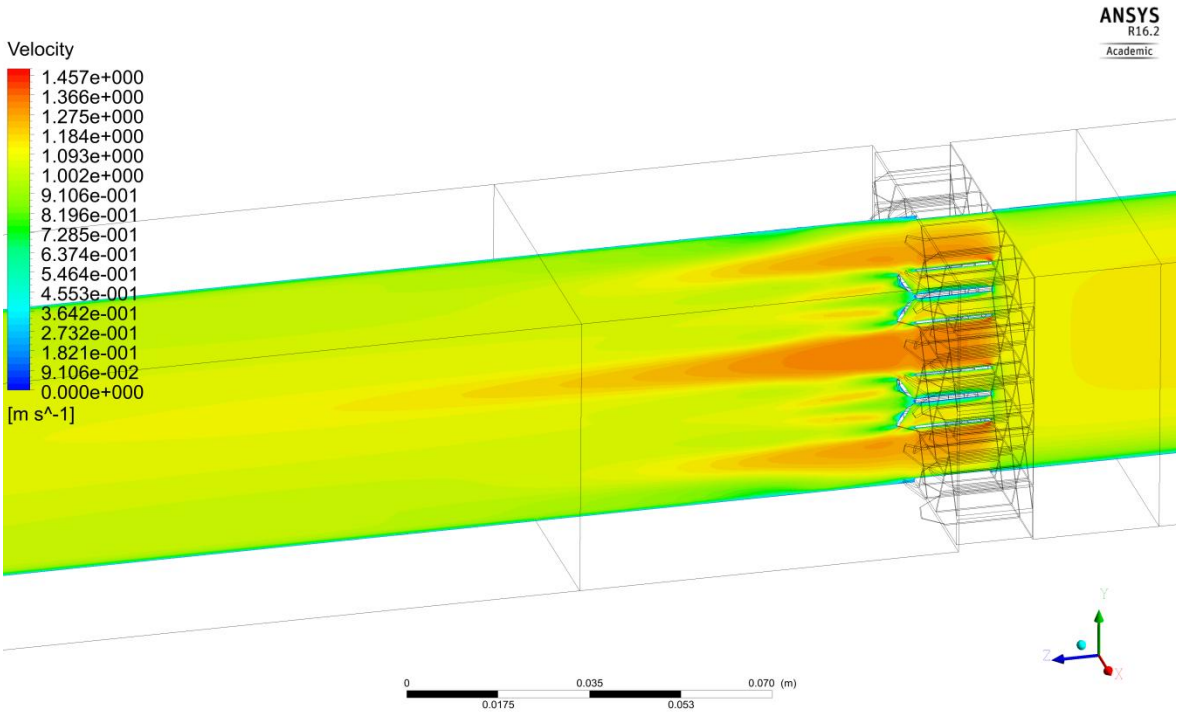
Přesně určená geometrie mřížky a ohnutí jednotlivých lopatek do stanoveného směru pod definovaným úhlem způsobila očekávaná proudění za mřížkami. V blízkých vzdálenostech za mřížkou lze pozorovat relativně velké rychlosti příčných složek rychlostí kolmých na směr hlavního proudu. Právě tyto složky rychlostí proudu jsou velmi důležité a žádané. Vytvořené struktury proudu za mísící mřížkou (rotace kolem palivového proutku či přesouvání proudícího média po řadách) slouží v palivovém souboru k zlepšení vlastností odvodu tepla z jednotlivých palivových proutků, dále také k přesouvání chladiva z více tepelně zatížených do méně tepelně zatížených částí palivového souboru, což také vede k snížení teplotní nerovnoměrnosti napříč palivovým souborem.

3.2.1 Výsledky CFD výpočtu – mřížka mod. 1

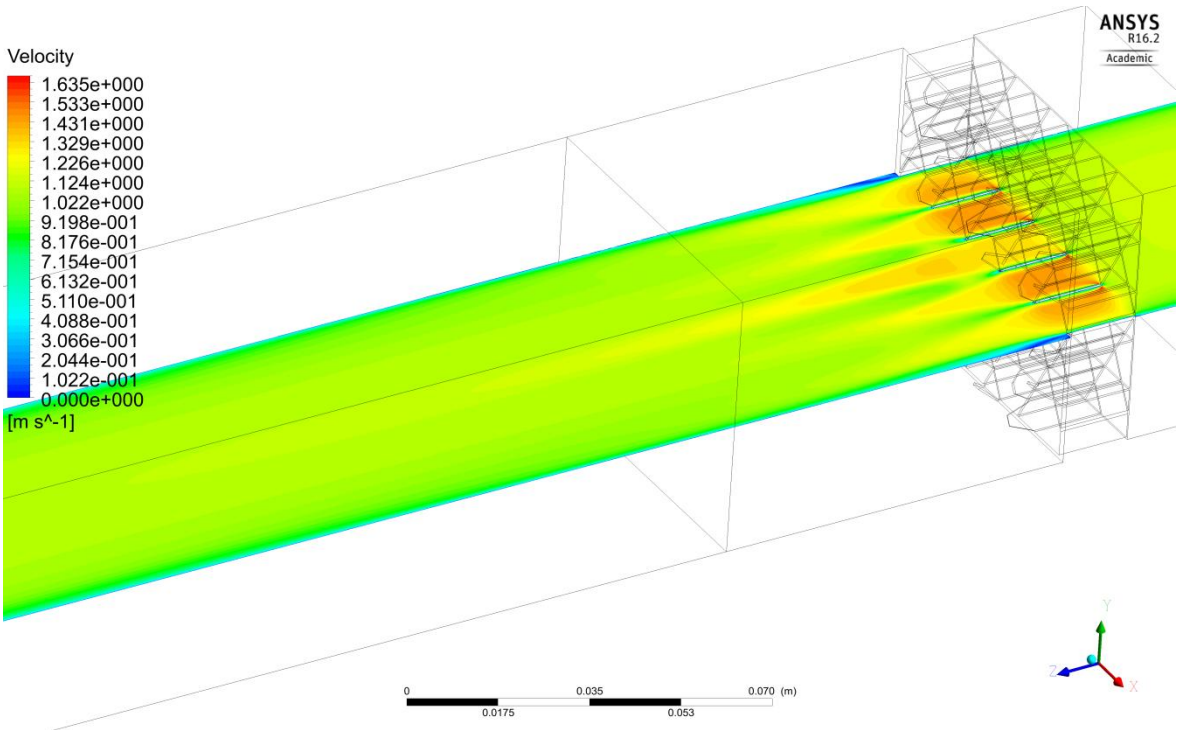
Výsledky numerického výpočtu s využitím programu *Ansys Fluent* jsou zde zobrazeny pro mřížku mod. 1. Byly použity jen výsledky pro vstupní hodnotu rychlosti 1 m/s. Struktury proudícího média se u zbývajících výsledků výpočtů (vstupní rychlosti 0,8 m/s a 0,6 m/s) nikterak neliší, rozdílná jsou pouze maxima jednotlivých složek rychlostí, což je způsobeno nižší vstupní rychlostí. Z výsledků výpočtů mřížky mod. 1 je patrné, že byl správně předpokládán charakter proudění, tedy roztáčení proudu způsobené geometrií lopatek tohoto typu mísící mřížky. V těsné vzdálenosti za lopatkami jsou velké rychlosti složek rychlostí ve směru osy *X* a osy *Y*. Velikost rotace proudu klesá se vzdáleností od mísící mřížky a následně dochází k ustálení proudu média v kanále.



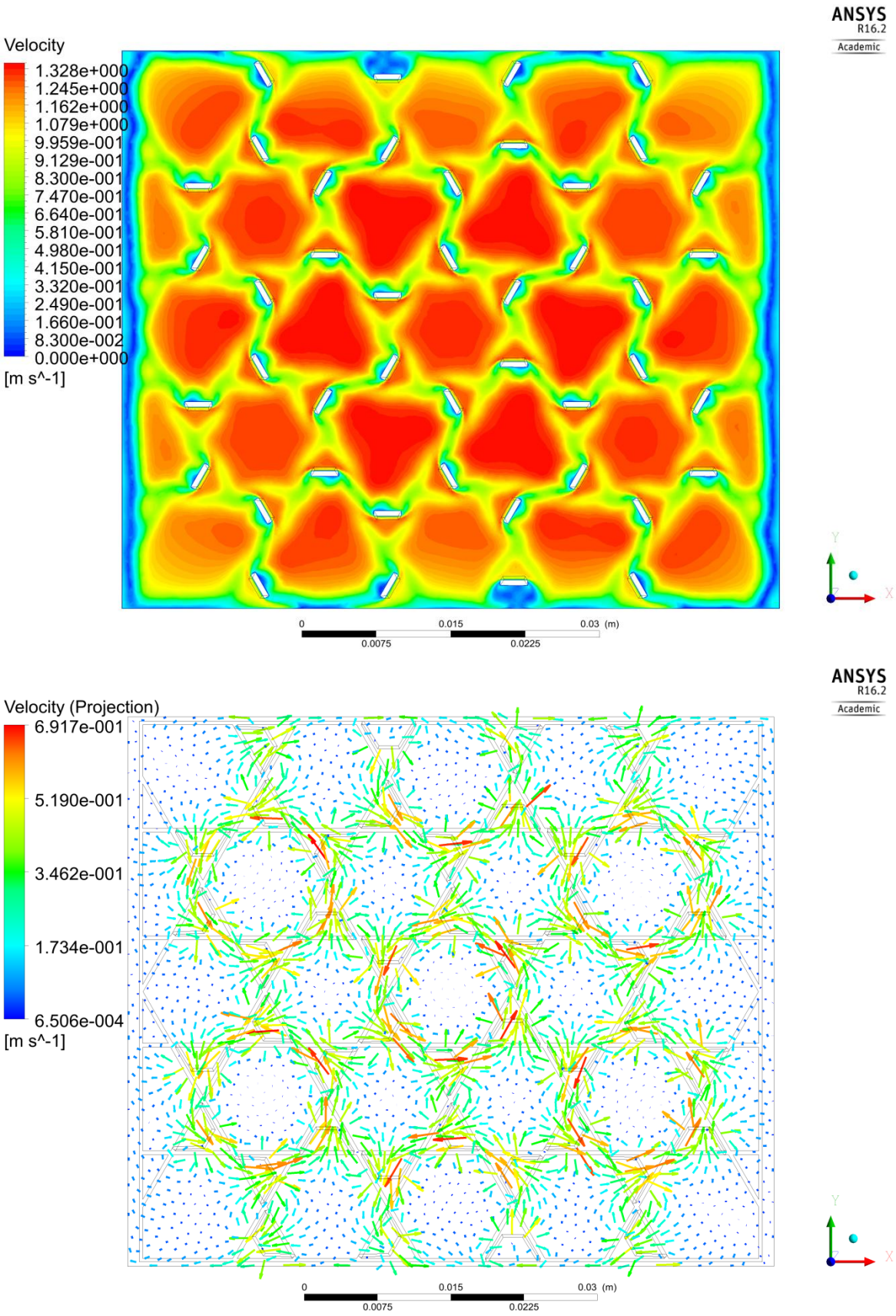
Obrázek 33 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – streamlines



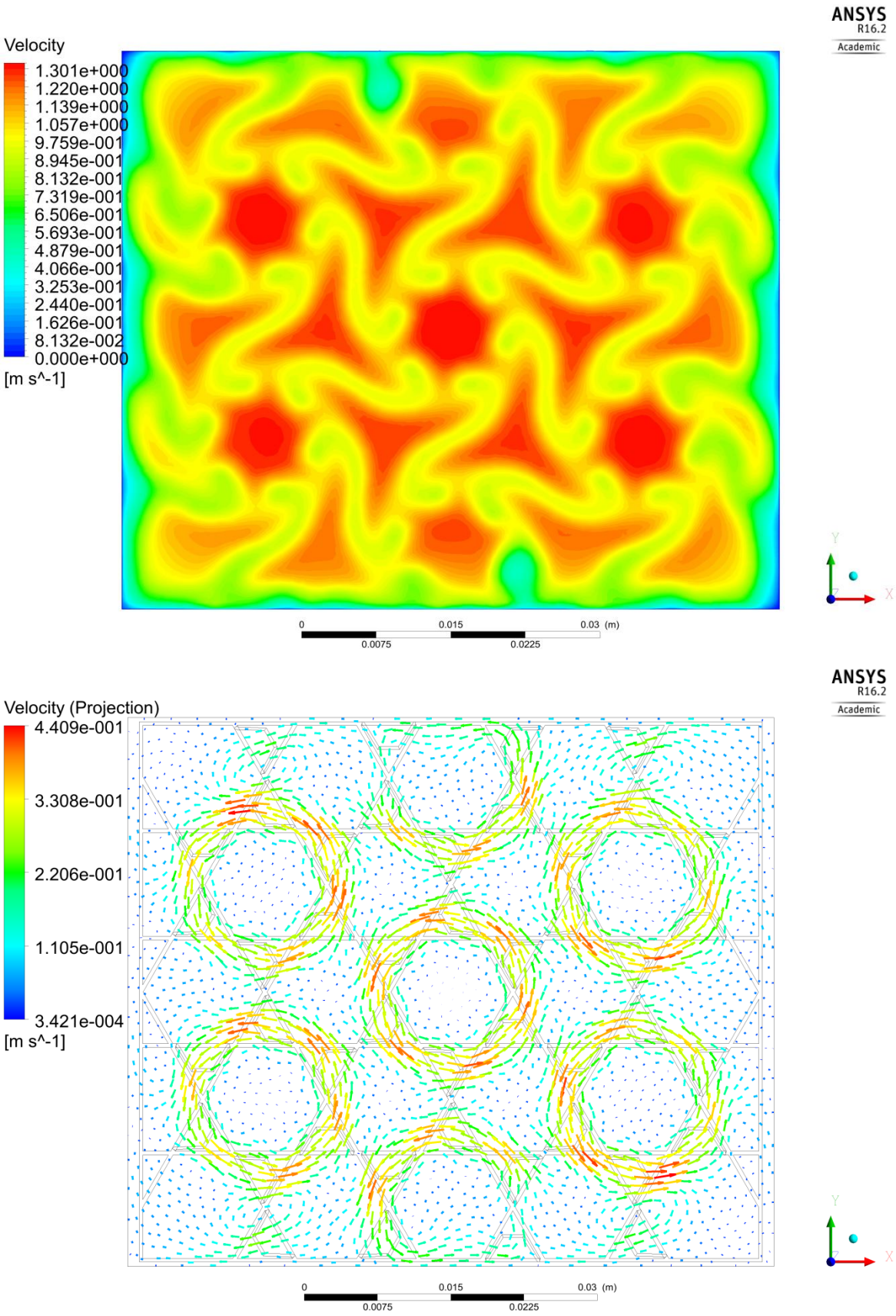
Obrázek 34 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour, rovina yz



Obrázek 35 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour, rovina xz



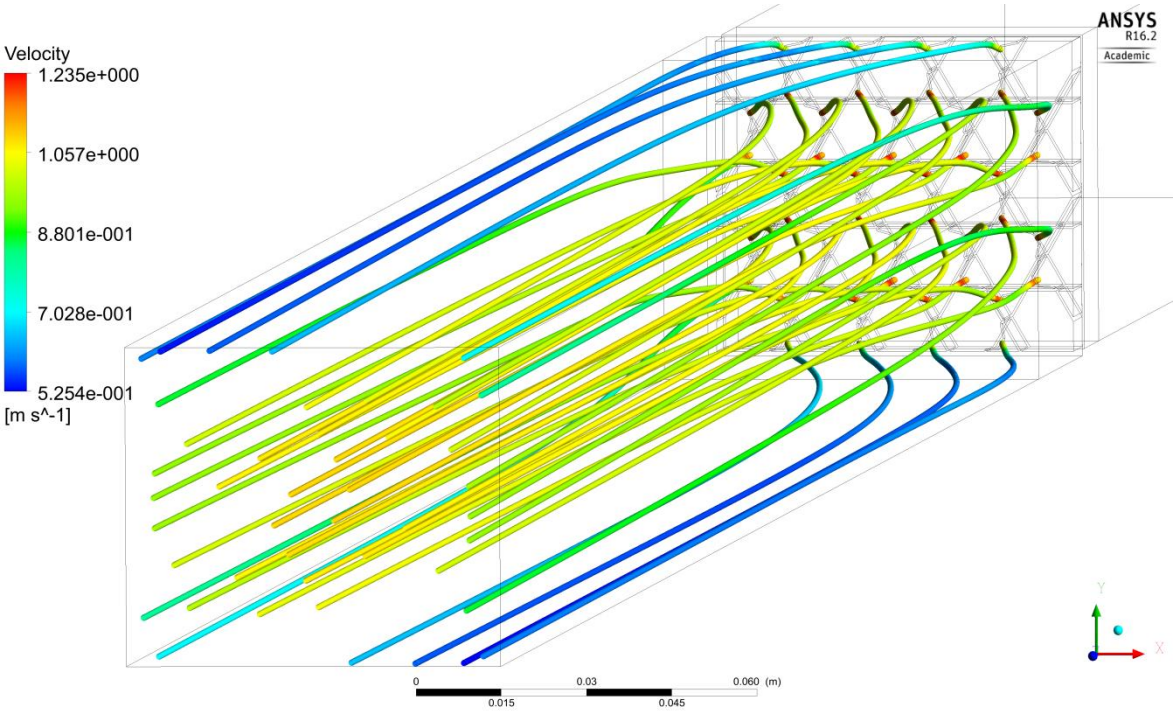
Obrázek 36 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour,vectors , z=3 mm



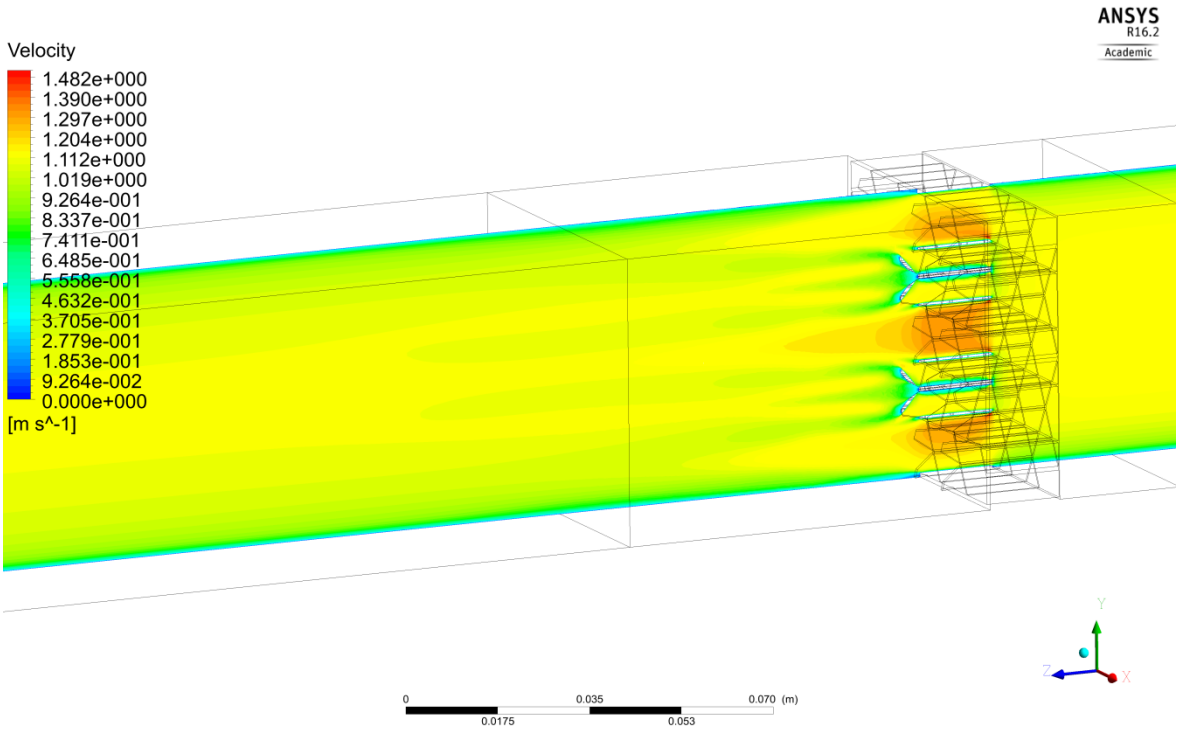
Obrázek 37 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour, vectors , z=15 mm

3.2.2 Výsledky CFD výpočtu – mřížka mod. 2

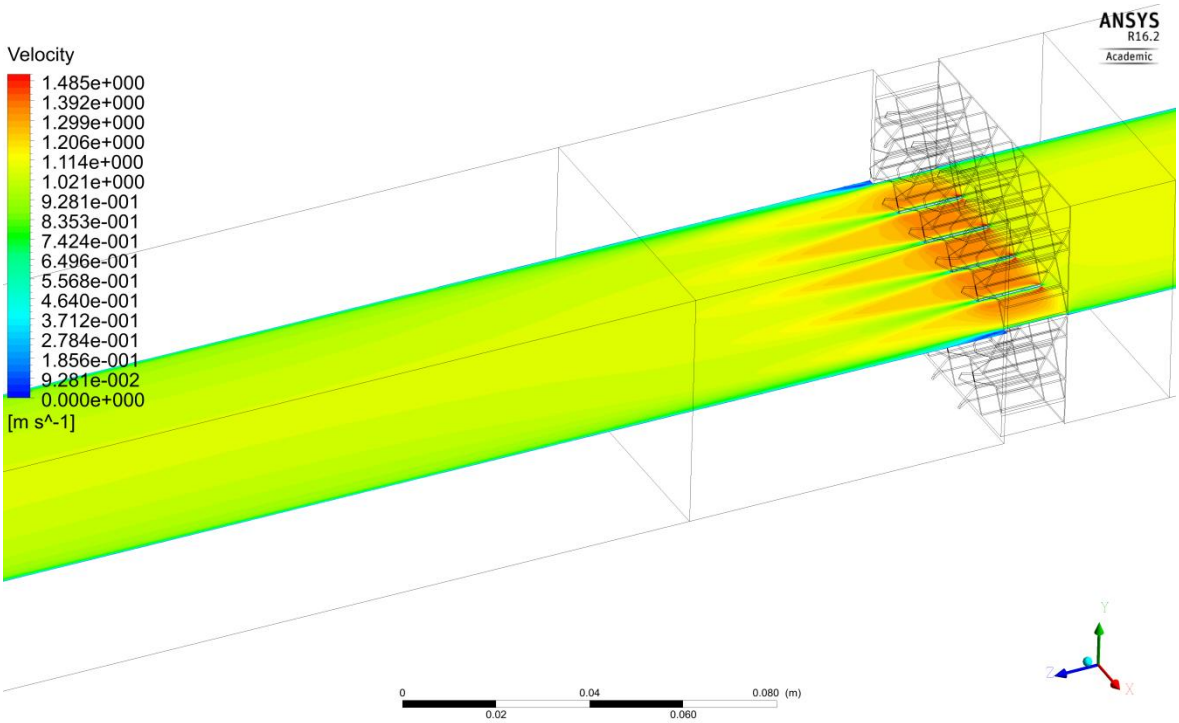
Mřížka mod. 2 je novým konstrukčním provedením mísící mřížky, která je použita v palivovém souboru TVSA-T mod. 2. Jak je vidět z vizualizace proudění za touto mřížkou, geometrie tohoto typu mísící mřížky způsobuje přesouvání proudícího média do stran po řadách. V tomto případě je především důležitá příčná složka rychlosti proudění ve směru osy *Y*. Tato složka rychlosti se poté podílí na přesouvání proudícího média po řadách zleva doprava a naopak. Výsledné vektory příčných rychlostí v rovině kolmé na hlavní směr proudění ukazují, že v blízké vzdálenosti za mřížkou (*Z*=5mm) dosahují maximální příčné rychlosti hodnot větších než 0,5 m/s. Charakter proudění se udrží přibližně do vzdálenosti 50–70 mm za mřížkou. Následně dojde k potlačení příčných rychlostí a dominuje podélná složka rychlosti.



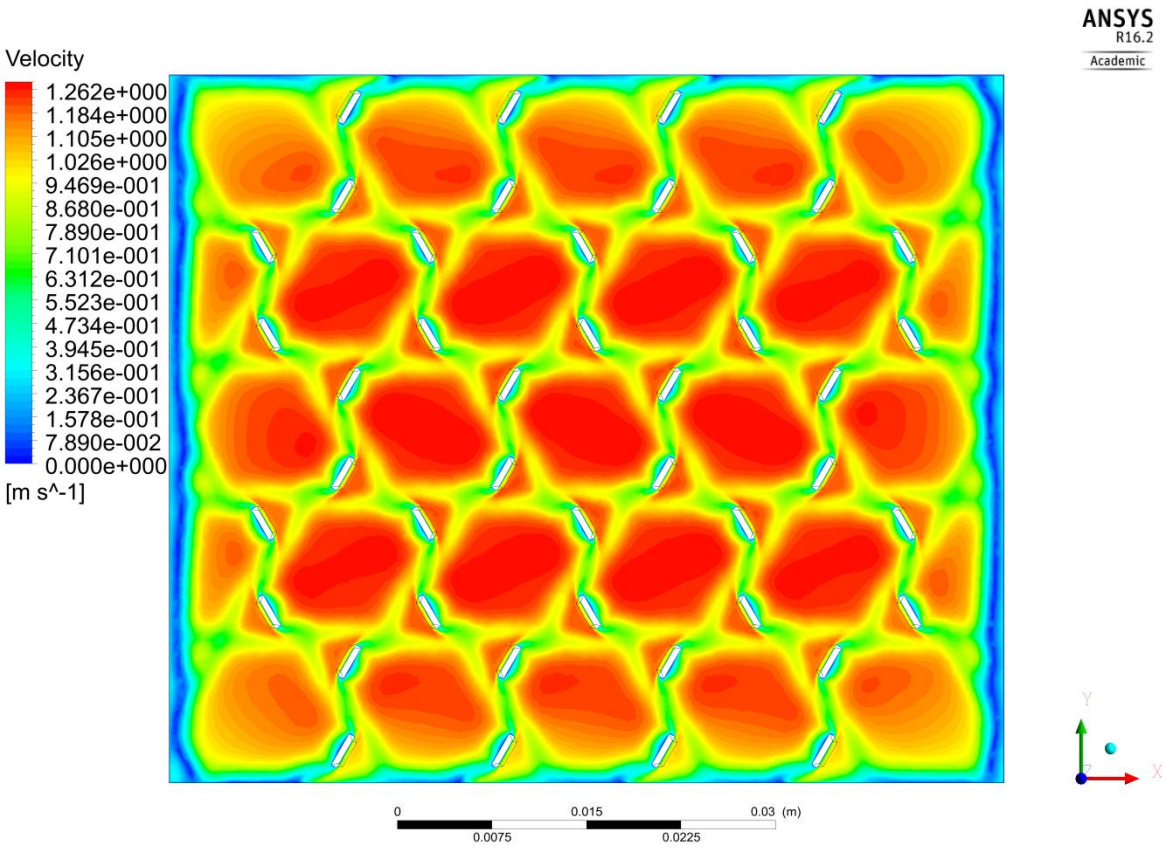
Obrázek 38 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – streamlines

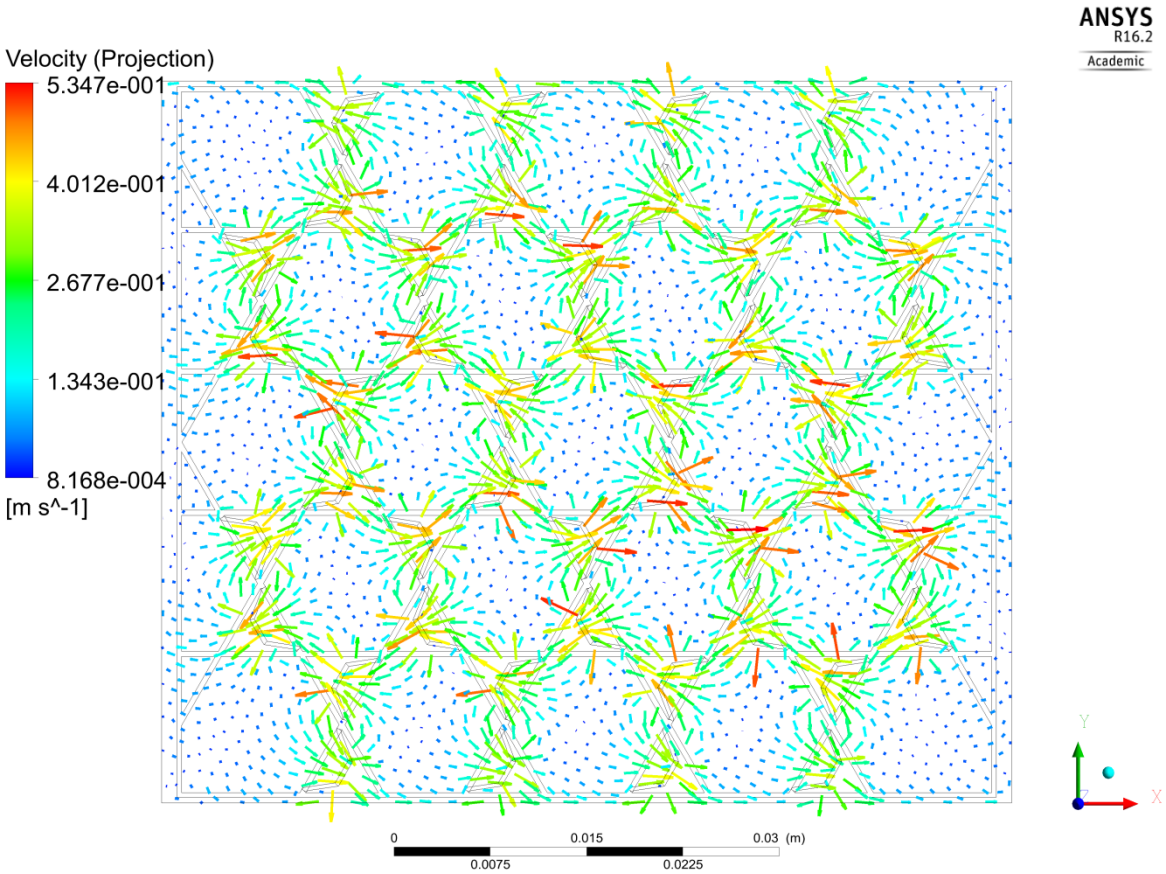


Obrázek 39 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour, rovina yz

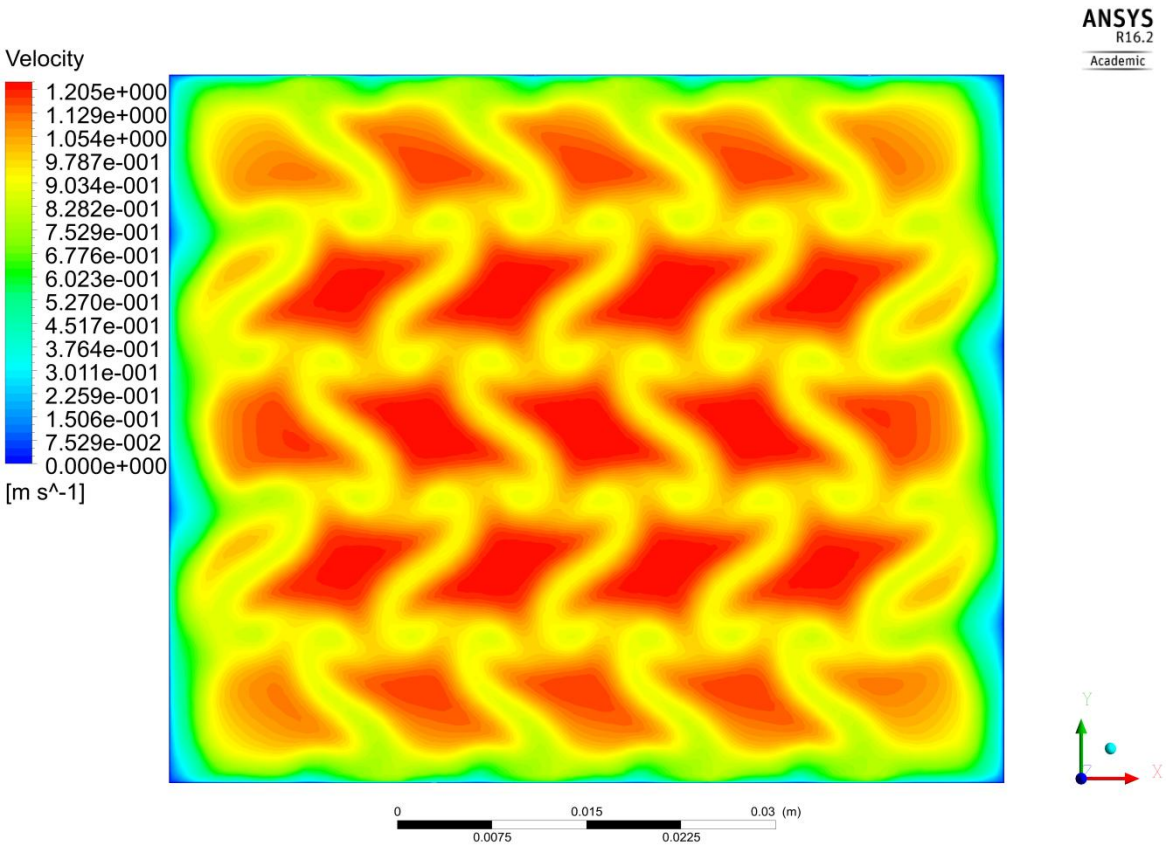


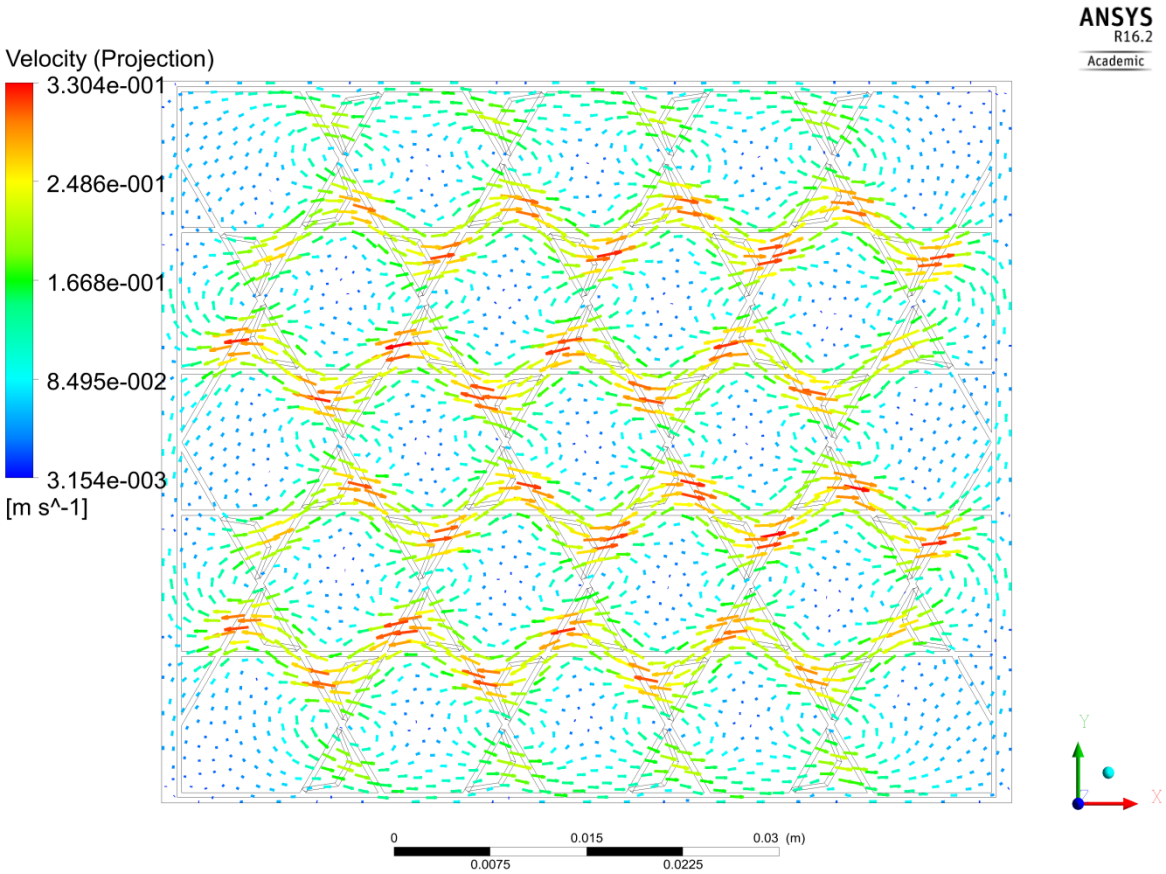
Obrázek 40 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour, rovina xz





Obrázek 41 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour,vectors , z=3 mm





Obrázek 42 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour,vectors , z=15 mm

4 Porovnání výsledků s experimentem

V této kapitole jsou porovnávány výsledky CFD výpočtu dvou typů mísících mřížek spolu s výsledky shodné úlohy, avšak měřené na experimentálním zařízení pomocí metody PIV. Popis měření, experimentálního zařízení a výsledky získané metodou PIV jsou k dispozici v odkazované literatuře [**1**].

Výpočet i experiment byl proveden pro oba dva typy mísících mřížek vždy pro tři varianty velikosti vstupních rychlostí. Výsledné struktury proudění a grafy porovnání jednotlivých složek rychlostí ve vyšetřovaných řezech a úsečkách jsou v této části práce uvedeny pouze pro vstupní rychlost proudění 1 m/s. Výsledné struktury a rychlosti zbývajících variant výpočtu a experimentu se nikterak neliší, tudíž není podstatné tyto výsledky v práci porovnávat a jsou uvedeny pouze na přiloženém CD.

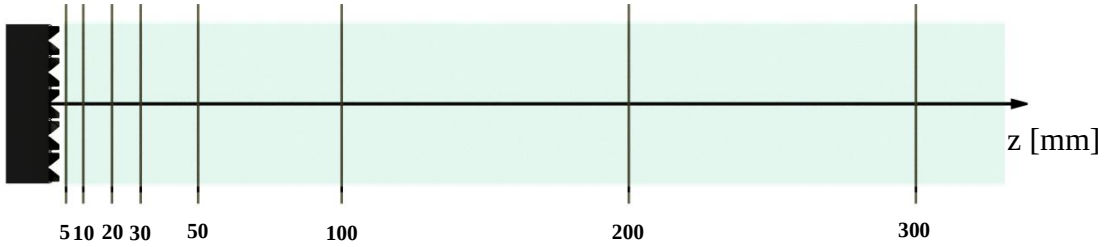
Výsledné rychlosti jsou porovnány pomocí vektorů rychlostí v rovině kolmé na hlavní směr proudění a třetí složka rychlosti ve směru hlavního proudu (rychlost *W*) je zobrazena pomocí barevné škály. Dále jsou porovnávány jednotlivé složky rychlostí (*U, V, W*) v každém řezu kanálu (rovinu *XY*) pro dvě zvolené úsečky. Jednotlivé složky jsou porovnávány pomocí grafů závislosti velikosti rychlosti na hodnotě vzdálenosti osy *X* v kanále.

Tabulka 6 – Použitá označení pro jednotlivé složky rychlostí

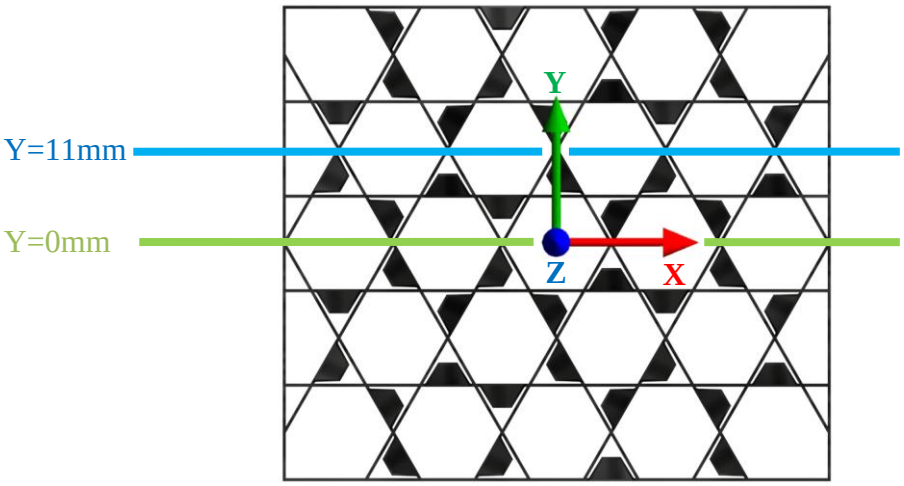
Označení	Význam
U	rychlost ve směru osy *X*
V	rychlost ve směru osy *Y*
W	rychlost ve směru osy *Z*

4.1 Porovnání výsledků – mřížka mod. 1

Pro porovnání výsledků bylo zvoleno osm vyšetřovaných rovin (viz obrázek 43). V každé z vyšetřovacích rovin jsou následně zjištěny jednotlivé složky rychlostí ve dvou úsečkách (viz obrázek 44). Dvě vyšetřované úsečky byly zvoleny tak, aby byla především sledována složka rychlosti ve směru osy *Y*, tedy složka rychlosti *V*. Tato rychlost určuje roztáčení proudu kolem hlavního, podélného proudění. Složka rychlosti ve směru osy *X* (rychlost *U*) není však důležitou složkou v těchto vyšetřovaných úsečkách a nepodílí se na roztáčení proudu.



Obrázek 43 – Vyšetřované vzdálenosti za mřížkou mod. 1



Obrázek 44 – Vyšetřované úsečky a souřadnicový systém – mřížka mod. 1

Jak z porovnání struktur a rozložení rychlostí, tak z porovnání jednotlivých složek rychlostí je patrné, že výsledky jsou velmi podobné a matematický CFD model byl správně připraven a nastaven. Je zapotřebí uvést, že numerická simulace byla vytvořena na modelu mřížky a kanálu, který má dokonalou geometrickou přesnost. Skutečné rozměry a úhly ohnutí lopatek jsou však vyrobeny s přesností odpovídající dané technologii výroby. I přes tuto skutečnost je však shoda výsledků CFD výpočtu a experimentu velmi dobrá. Charakter proudění a především velikosti jednotlivých složek rychlostí se výrazně mění s každou desetinou milimetru vzdálenosti za mřížkou, proto byla velká snaha o správné nastavení a odečtení přesné vzdálenosti vyšetřované roviny za mřížkou.

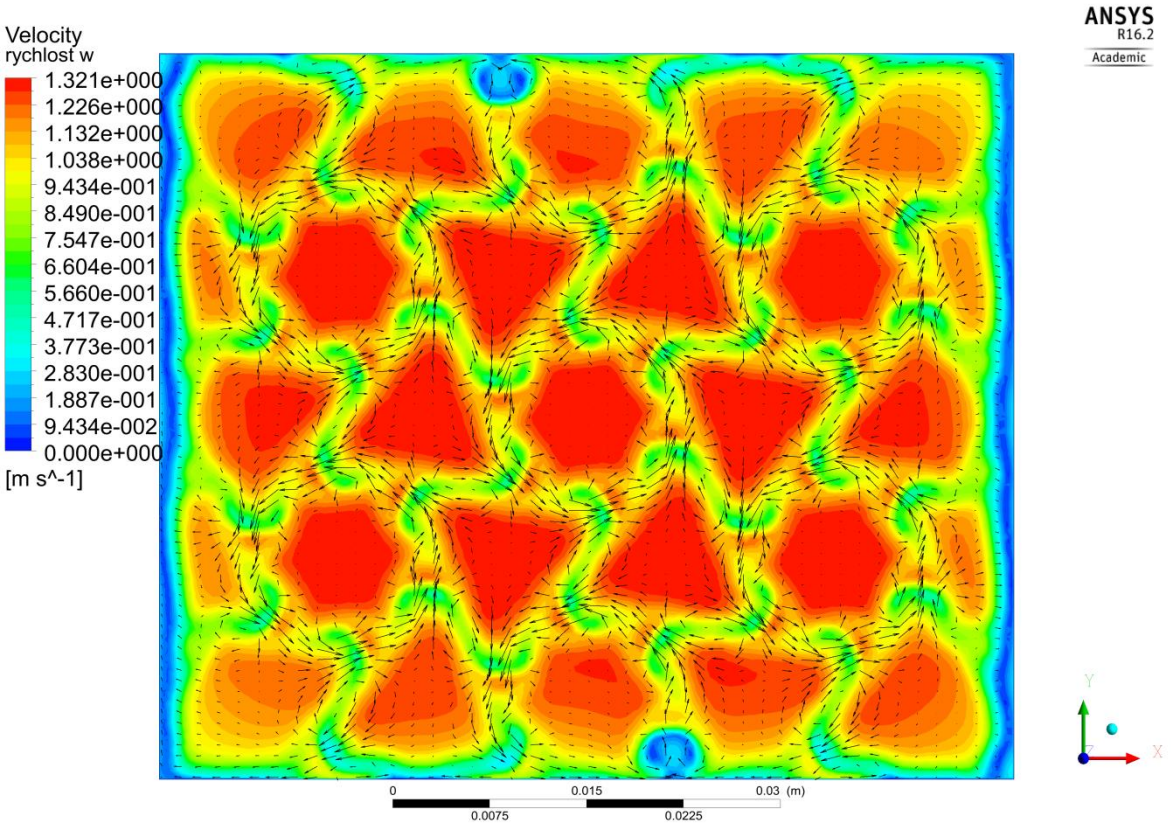
Složka rychlosti ve směru osy *X* (rychlost *U*) nejdříve vykazuje dobrou shodu s CFD výpočtem. Se zvětšující se vzdáleností vyšetřované roviny se však objevují odchylky. U ostatních složek rychlostí však tyto výrazné odlišnosti nejsou patrné. Příčina velkých odchylek by mohla plynout ze skutečnosti, že mřížka by nemusela být přesně vlepena do nerezového kanálu, ve kterém proudí voda a mohla by v něm být mírně horizontálně nakloněna. Toto naklonění by poté pravděpodobně způsobilo vznik vyšších příčných

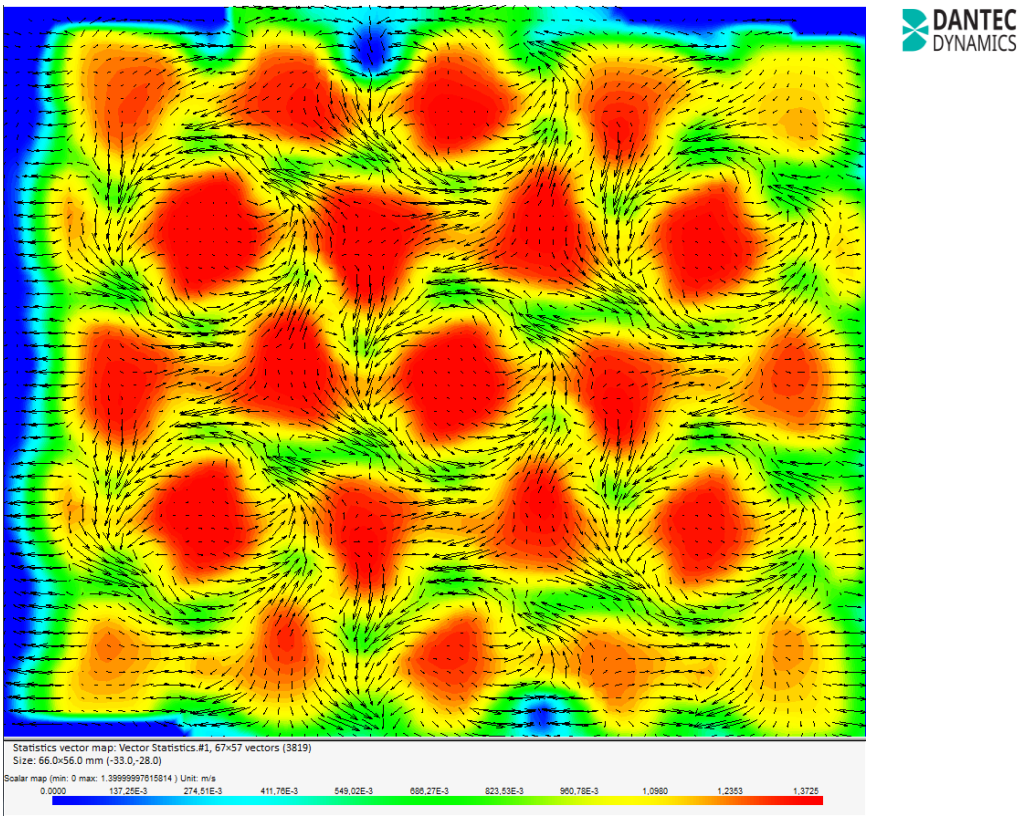
rychlostí (především rychlost *U*), které se však u CFD neobjevují, nebo jsou dokonce téměř nulové. Ostatní složky rychlostí by mírné naklonění příliš nemuselo ovlivnit.

Jednotlivé porovnané složky rychlostí mezi CFD výpočtem a experimentem malou odlišnost v maximálních rychlostech. Jak již bylo uvedeno výše v kapitole 3.1.4, během validace byly zjištěny jiné skutečné rozměry mřížky, než byly do výroby zadány, což ovlivňovalo maximální hodnoty jednotlivých složek rychlostí. Po úpravě CFD modelu se výsledky a tím i maximální hodnoty rychlostí výrazně zlepšily, avšak stále jsou zde nějaké odchylky (přibližně 5–7 % z dané rychlosti), které mohou být způsobeny mnoha faktory. Vstupní rychlostní okrajová podmínka byla do výpočtu zadána jako vypočtená hodnota z geometrických parametrů, vlastností vody pro zjištěnou teplotu a také ze změřeného objemového průtoku vody měřícím kanálem. Měřící kanál je několik metrů dlouhý a jeho výroba se samozřejmě neobejde bez případných geometrických a rozměrových nepřesností, které následně mohou maximální rychlosti v kanále ovlivnit. Vzniklé odlišnosti mohou být také způsobeny metodou zjišťování objemového průtoku. Příčinou odchylek by mohlo být také určení vlastností vody pro výpočet, jež se určovaly z průměrné teploty vody ze všech měření pro danou mřížku a vstupní rychlost.

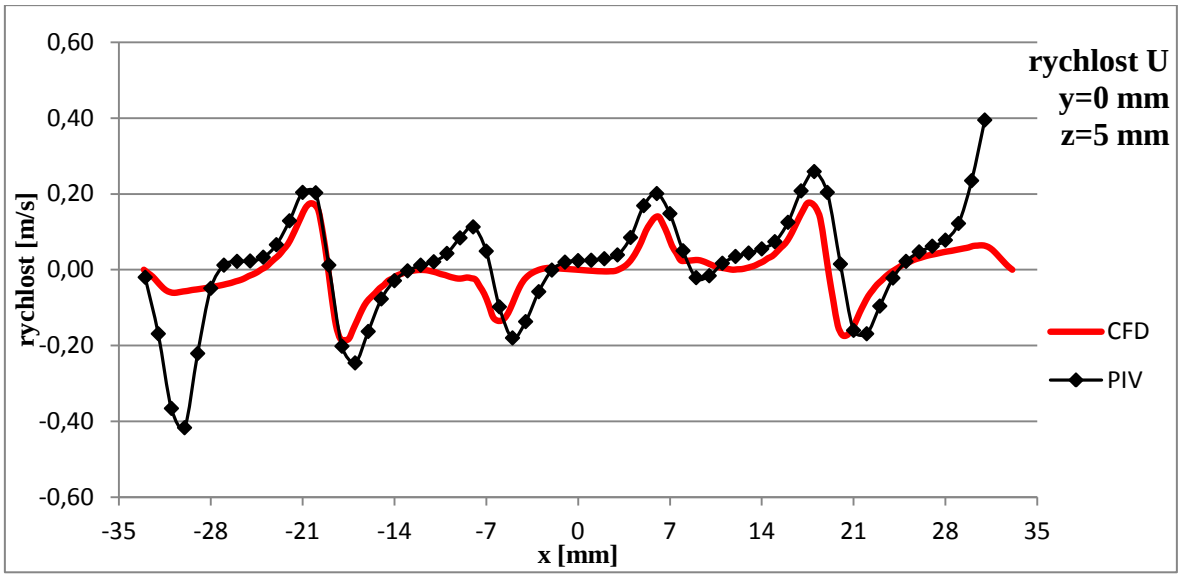
Nicméně je z porovnání výsledků patrná výborná shoda průběhu jednotlivých rychlostí po vyšetřovaných úsečkách v příslušných rovinách pro složky rychlostí *V* a *W*. Od vzdálenosti 100 mm za mřížkou dochází k potlačování příčných rychlostí a začíná se prosazovat hlavní proud, a proto také již od této vzdálenosti není uvažována příčná rychlost *U*. V dalších rovinách (200 a 300 mm za mřížkou) již není porovnávána ani jedna z příčných rychlostí, jelikož jsou obě téměř nulové a nikterak hlavní proud neovlivňují. V posledních dvou vyšetřovaných rovinách jsou pak porovnávány pouze rychlosti hlavního směru proudu (rychlost *W*), jejichž průběhy jsou opět téměř totožné.

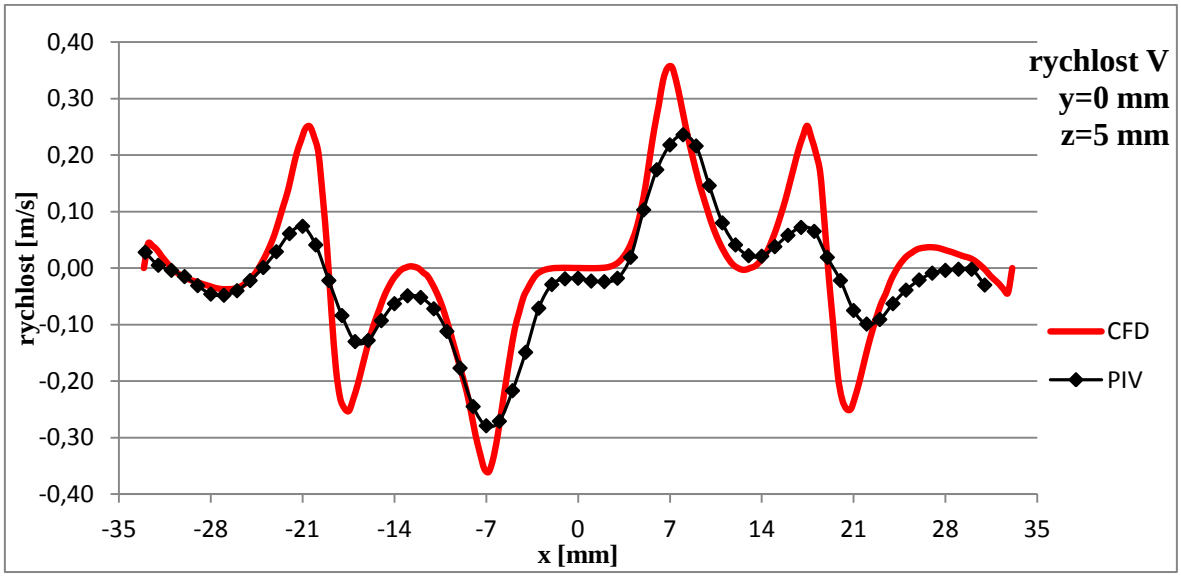
4.1.1 Vzdálenost za mřížkou z=5 mm

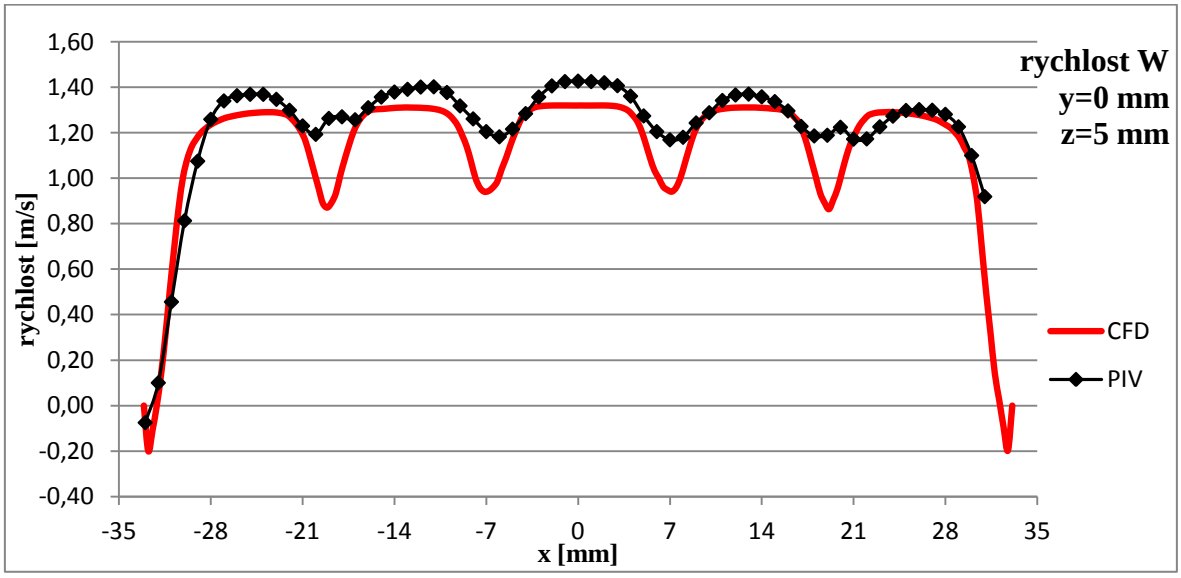




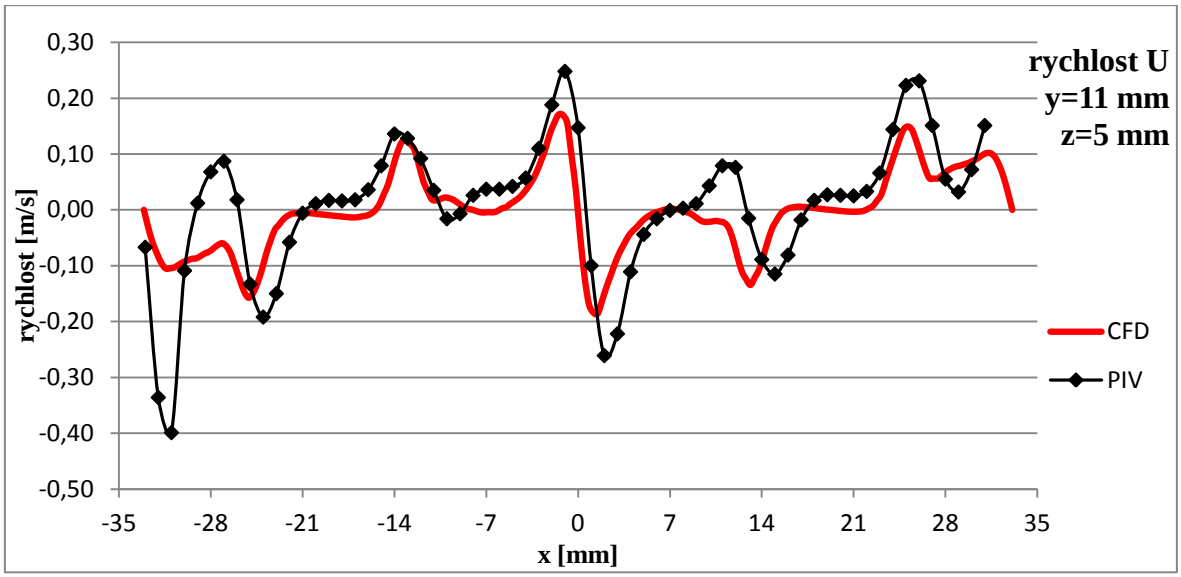
Obrázek 45 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=5 mm

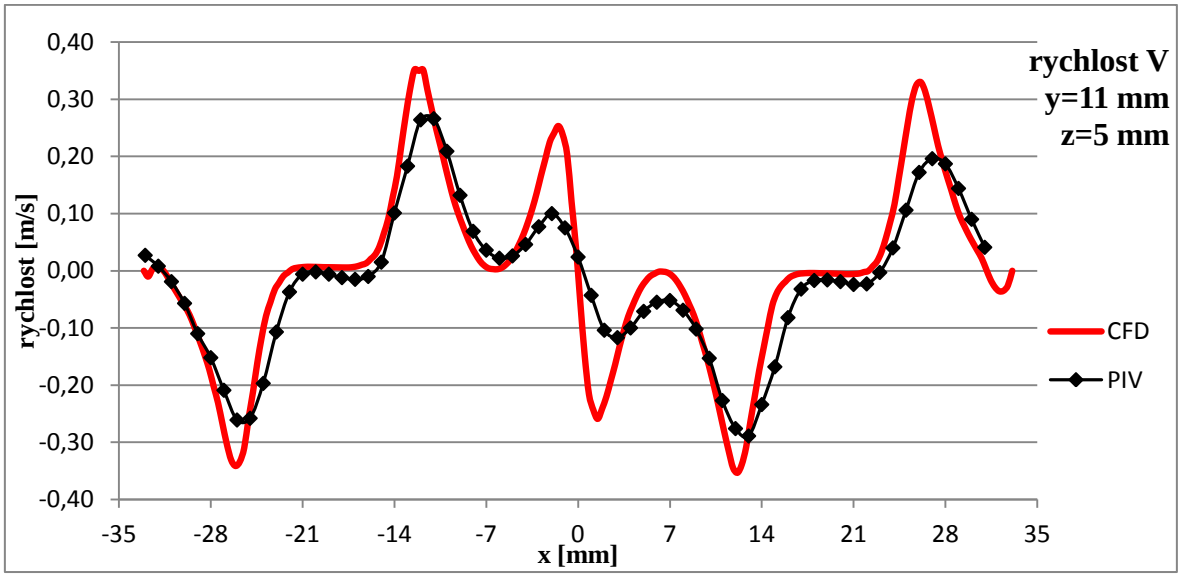


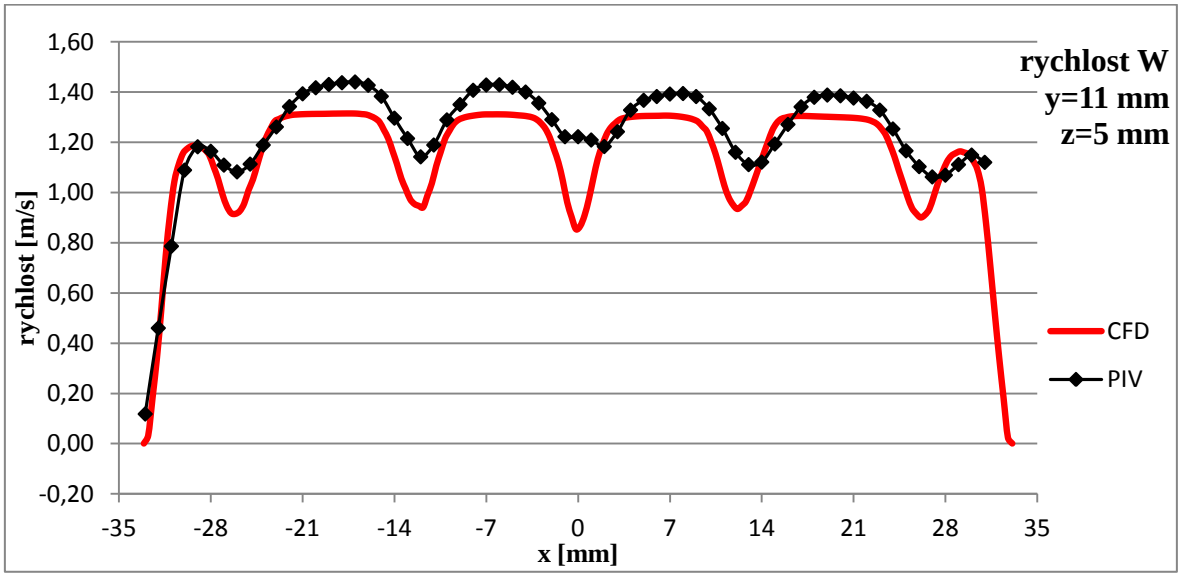




Obrázek 46 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=5 mm

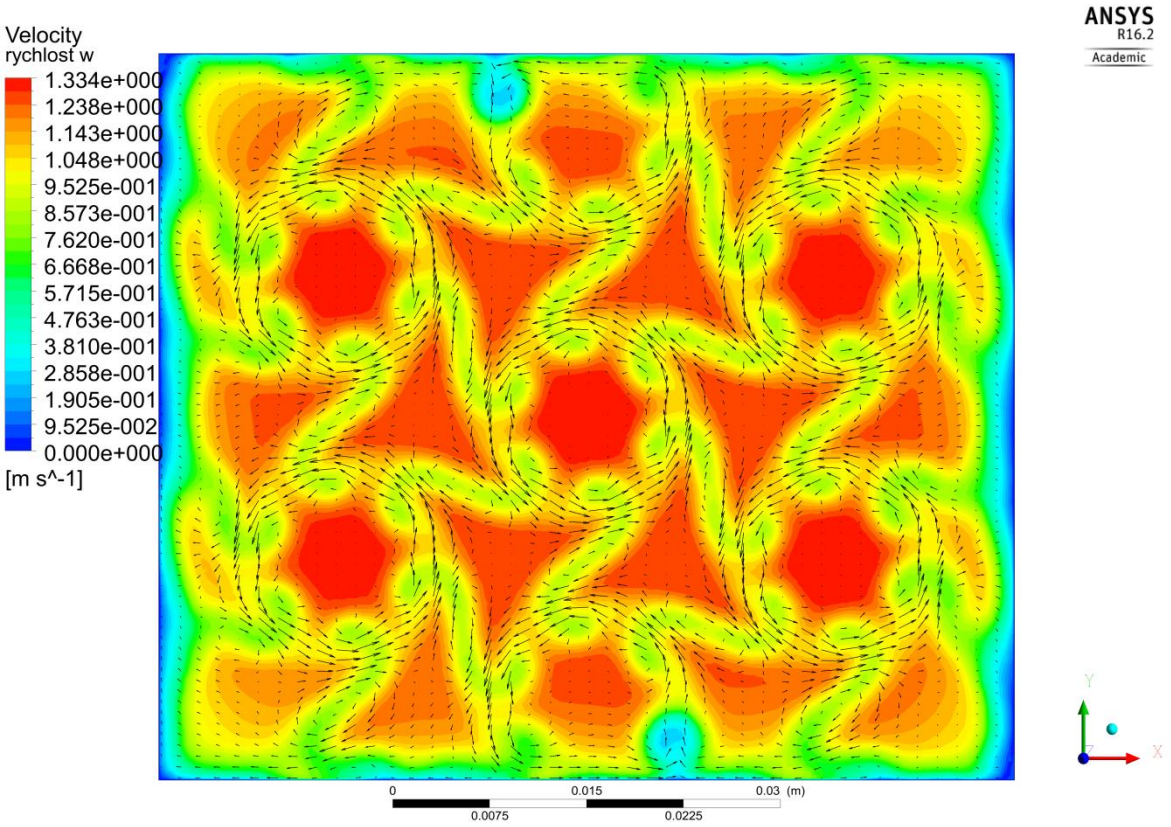


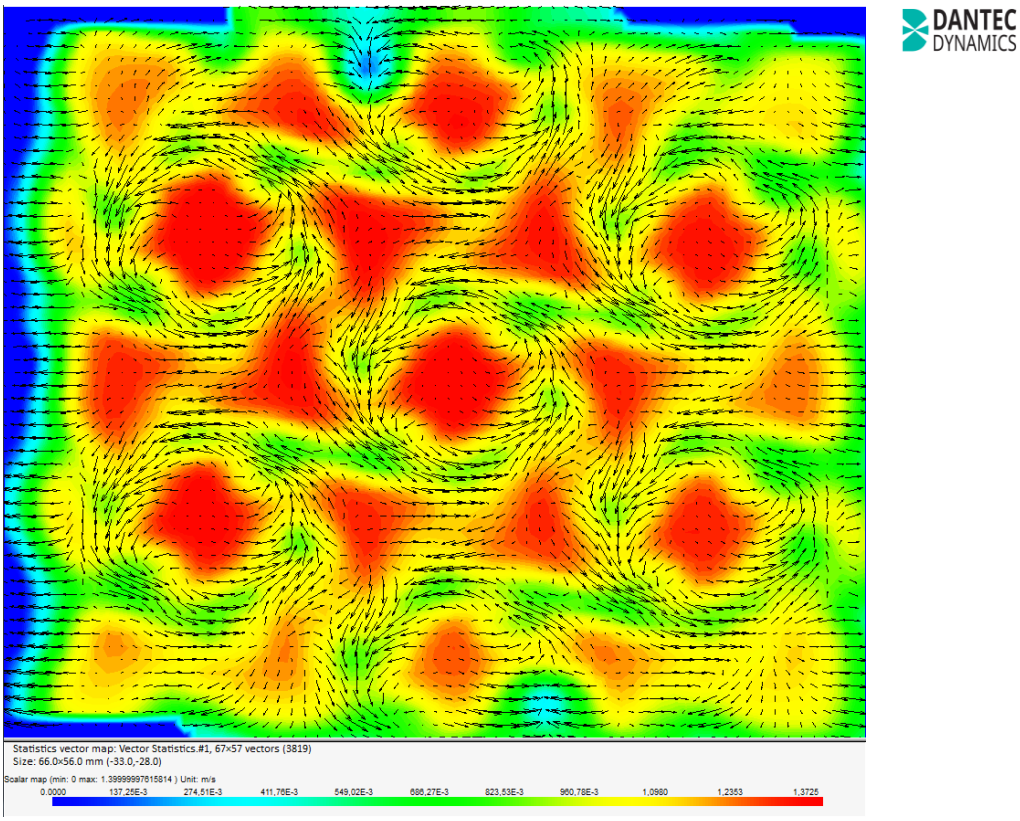




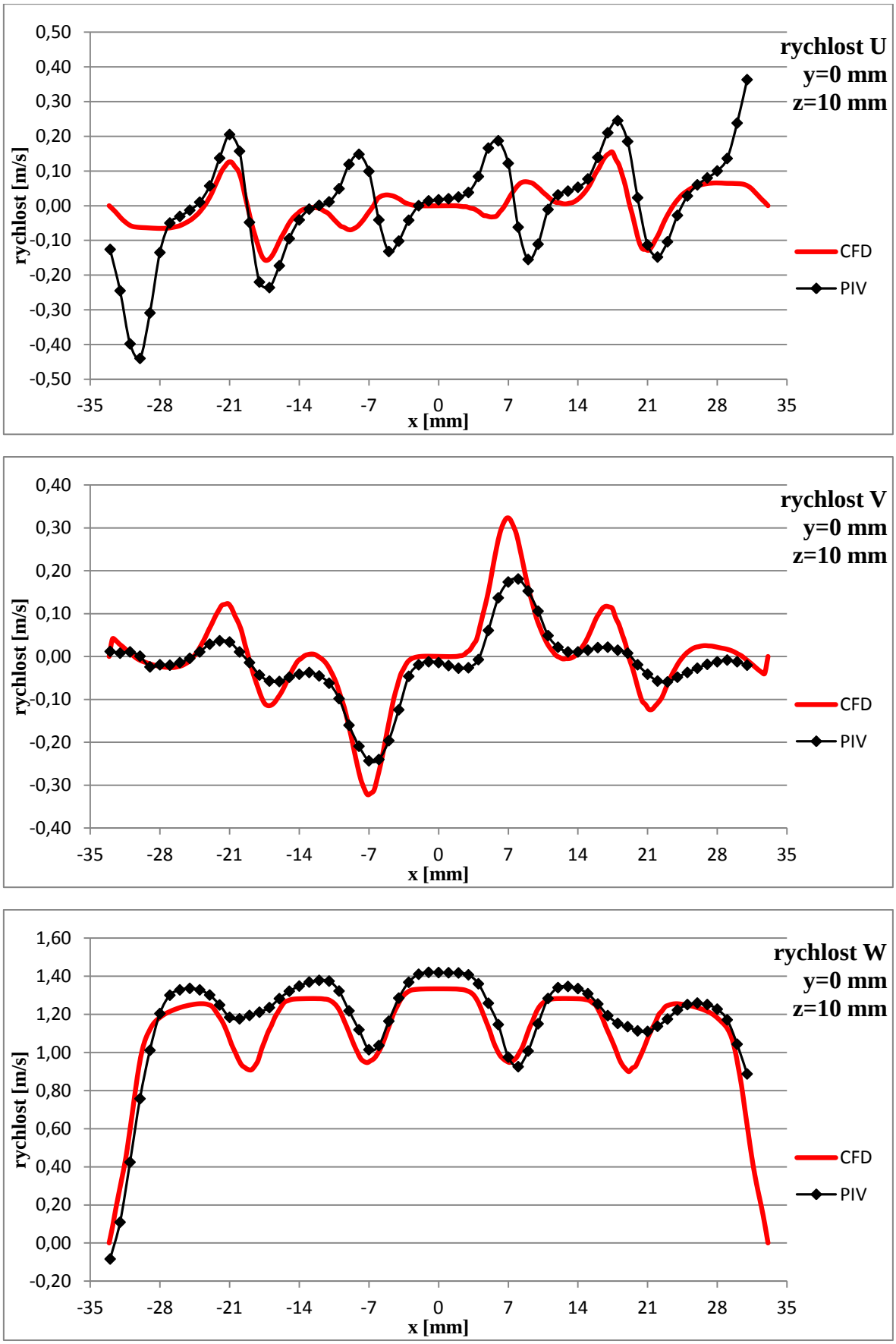
Obrázek 47 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=5 mm

4.1.2 Vzdálenost za mřížkou z=10 mm

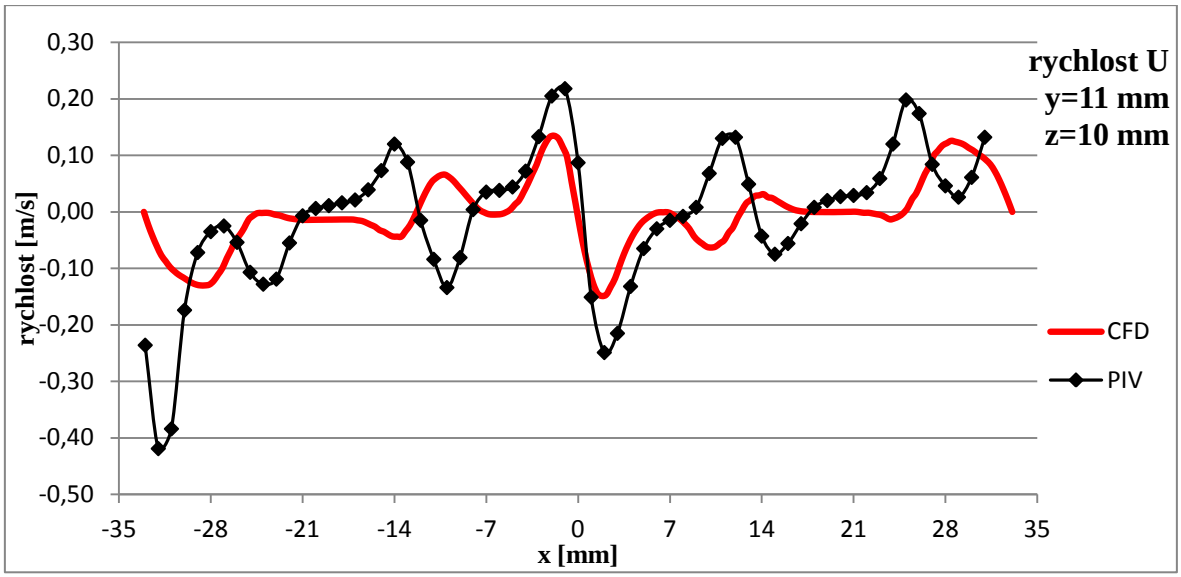


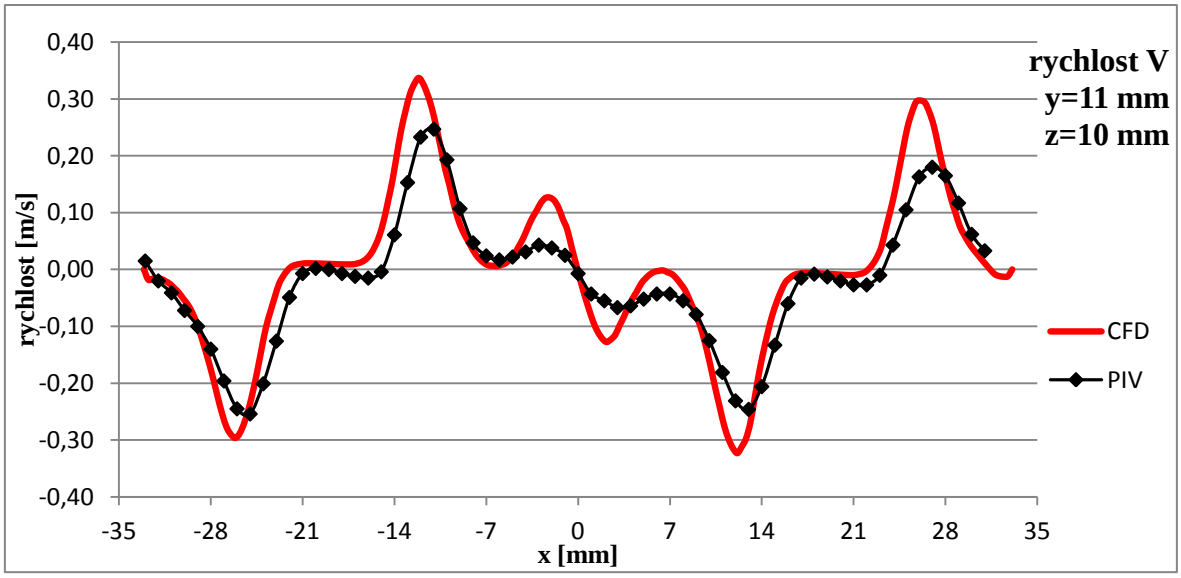


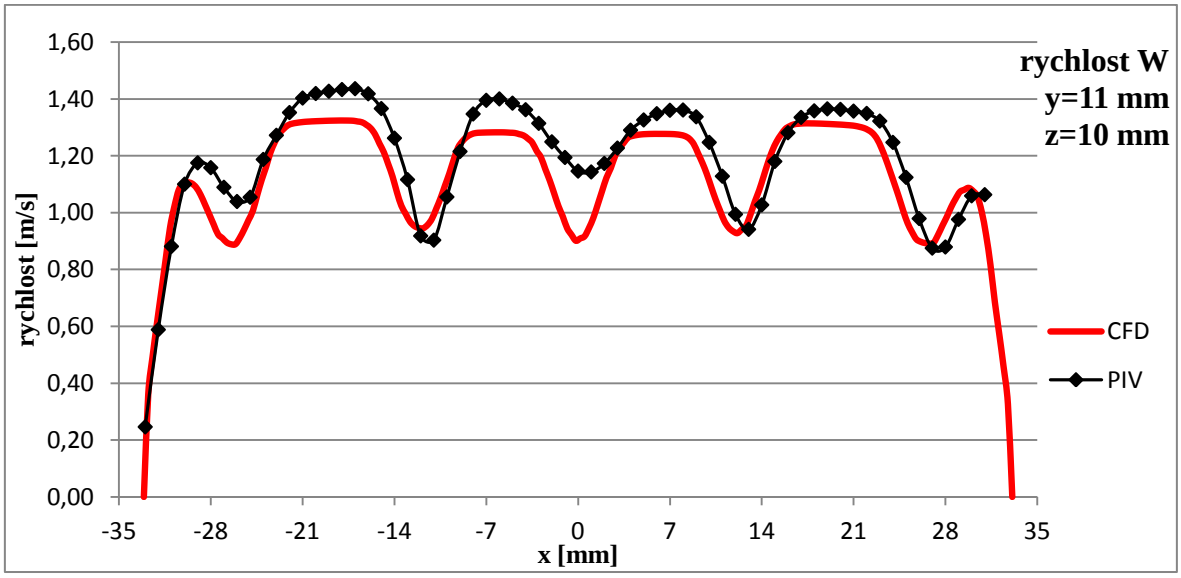
Obrázek 48 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=10 mm



Obrázek 49 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=10 mm

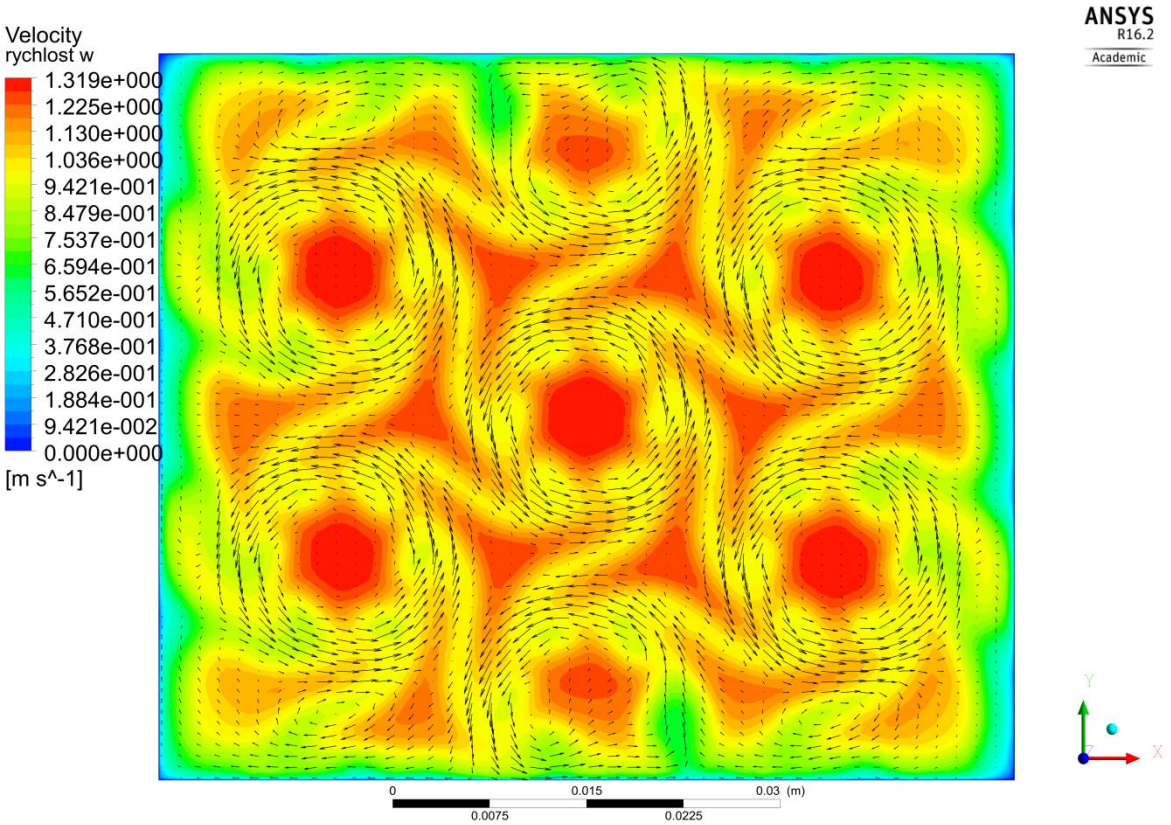


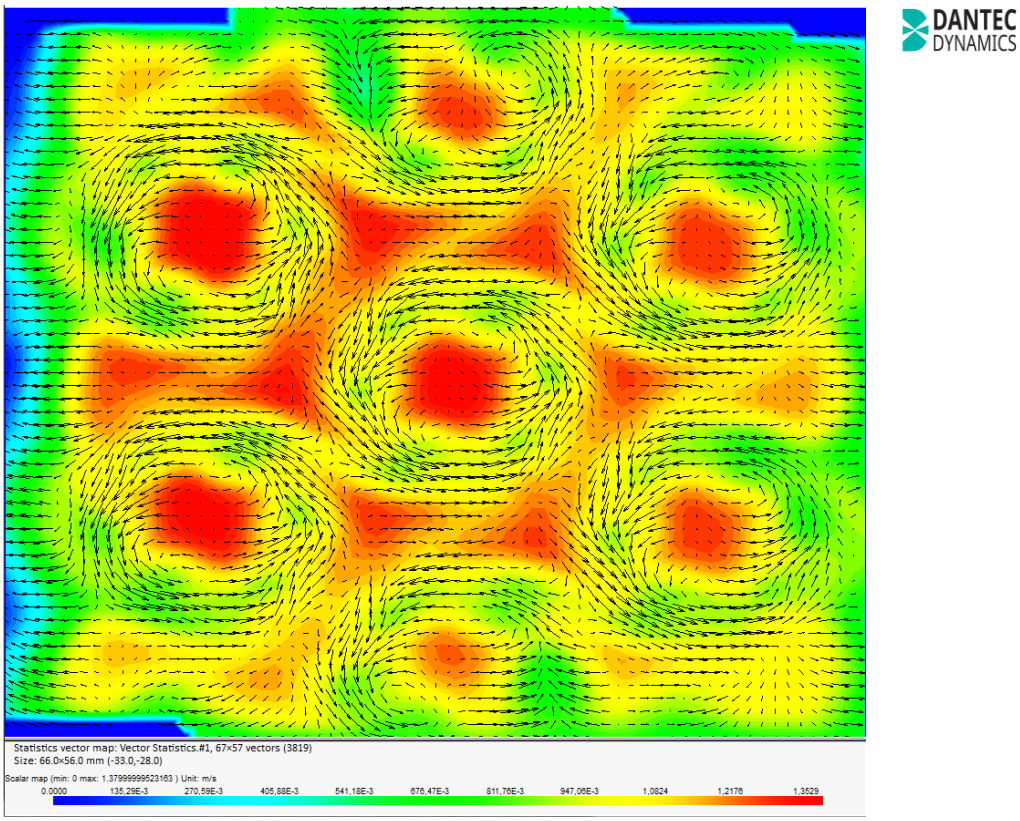




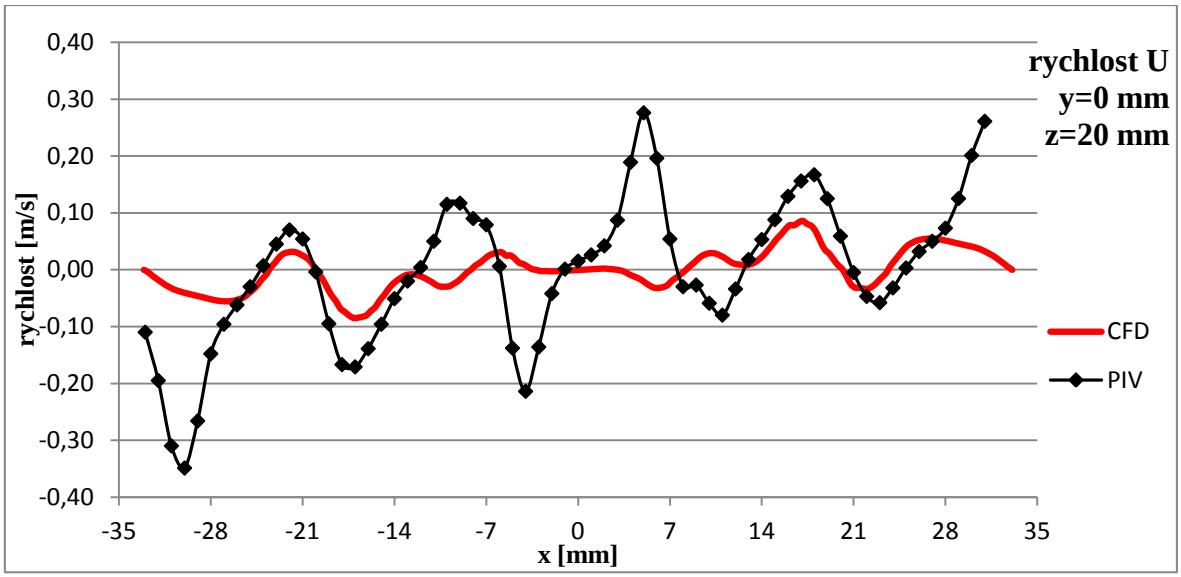
Obrázek 50 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=10 mm

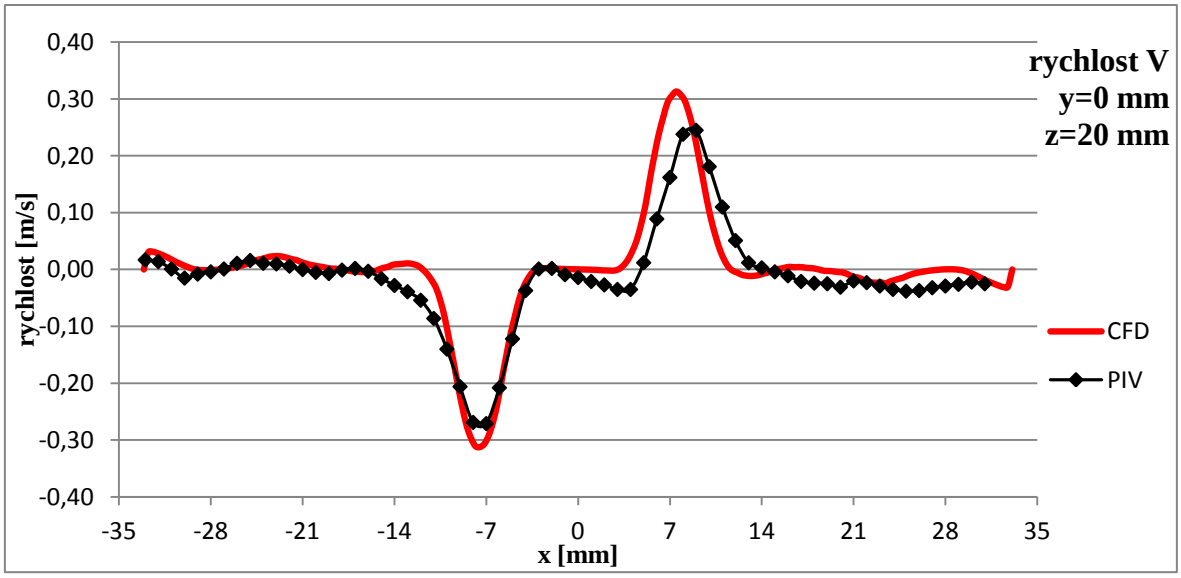
4.1.3 Vzdálenost za mřížkou z=20 mm

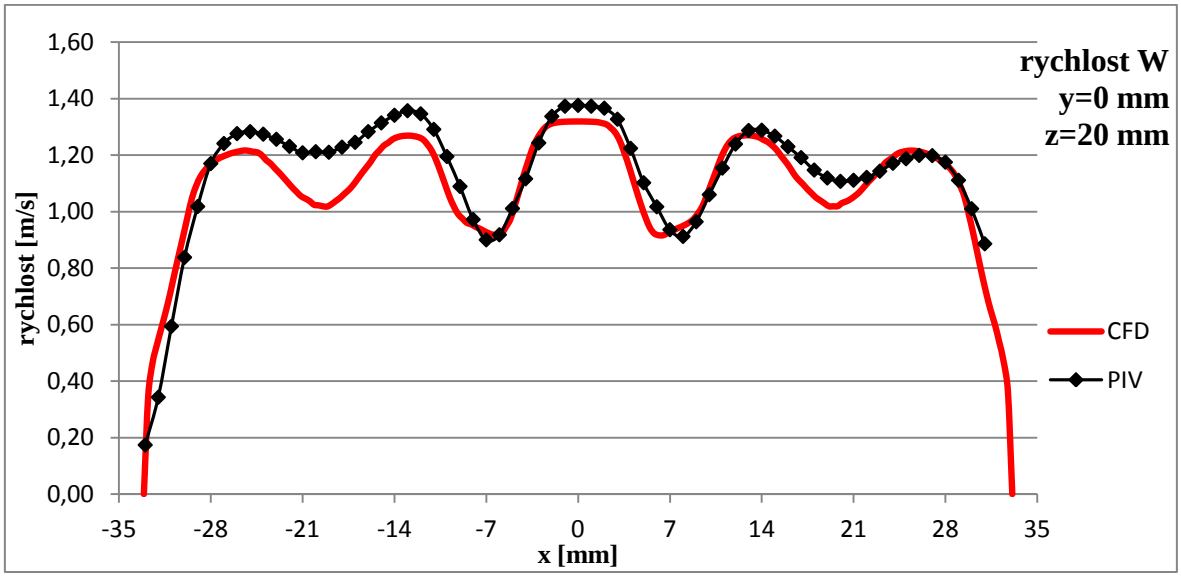




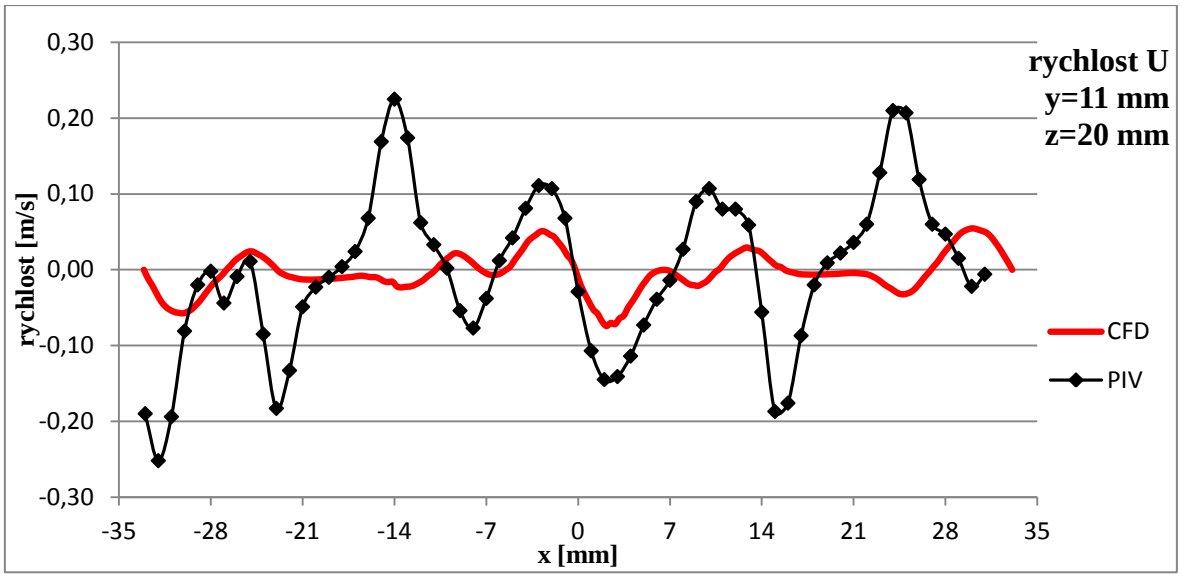
Obrázek 51 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=20 mm

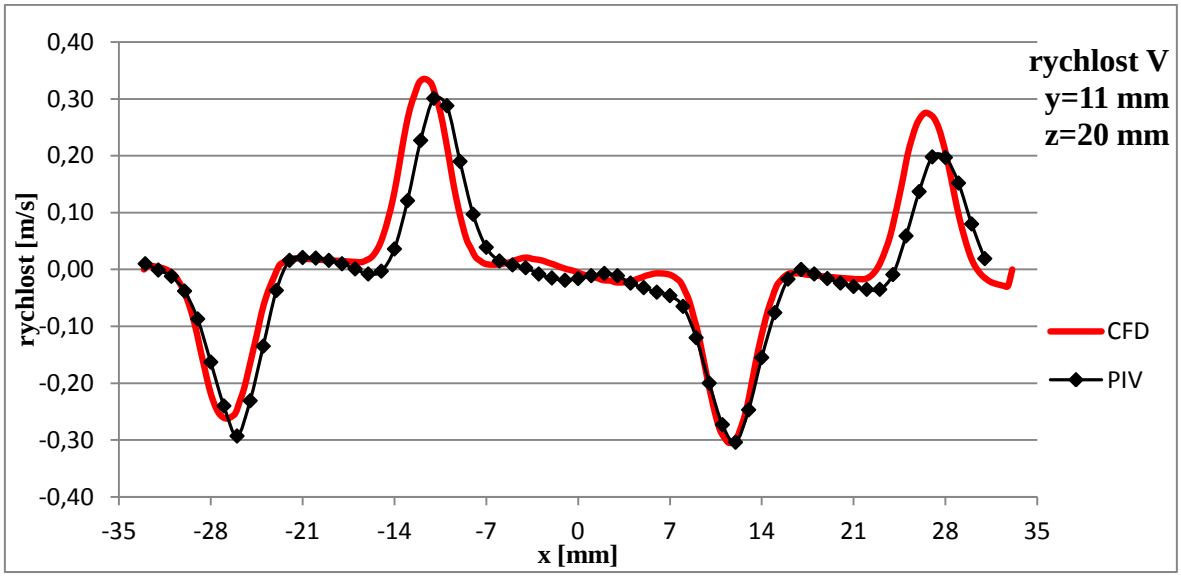


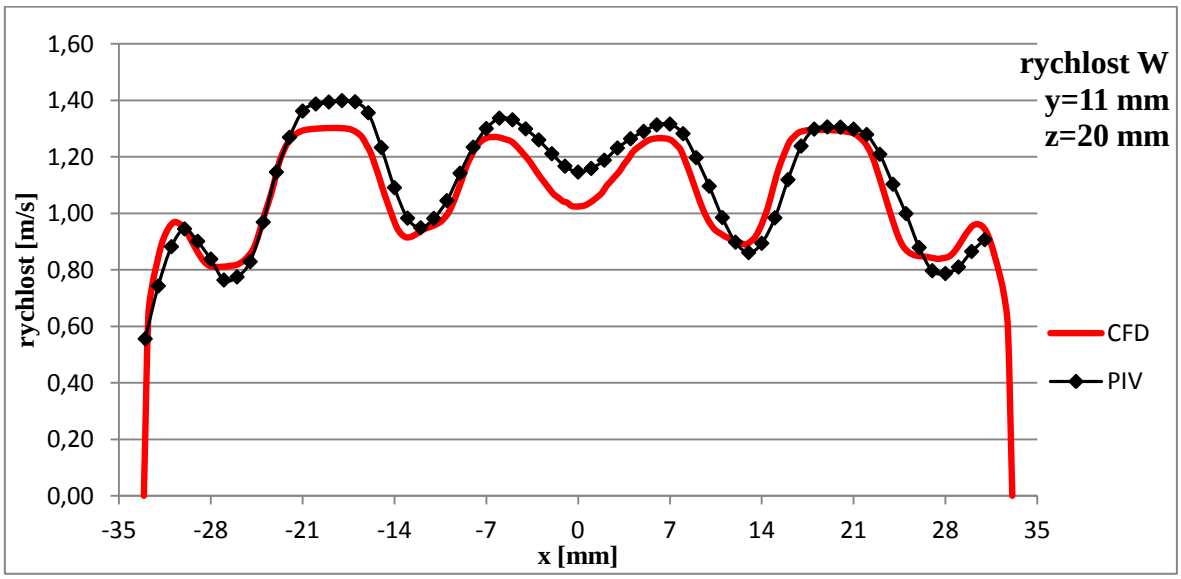




Obrázek 52 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=20 mm

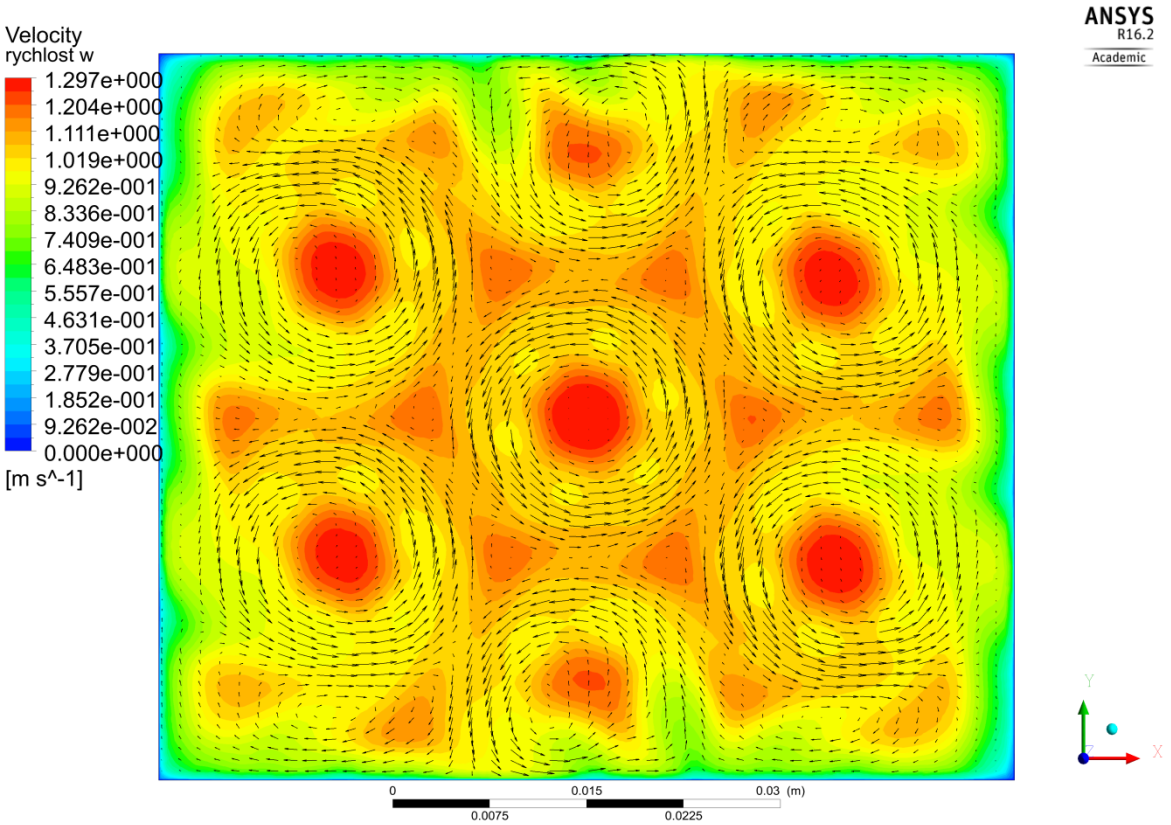


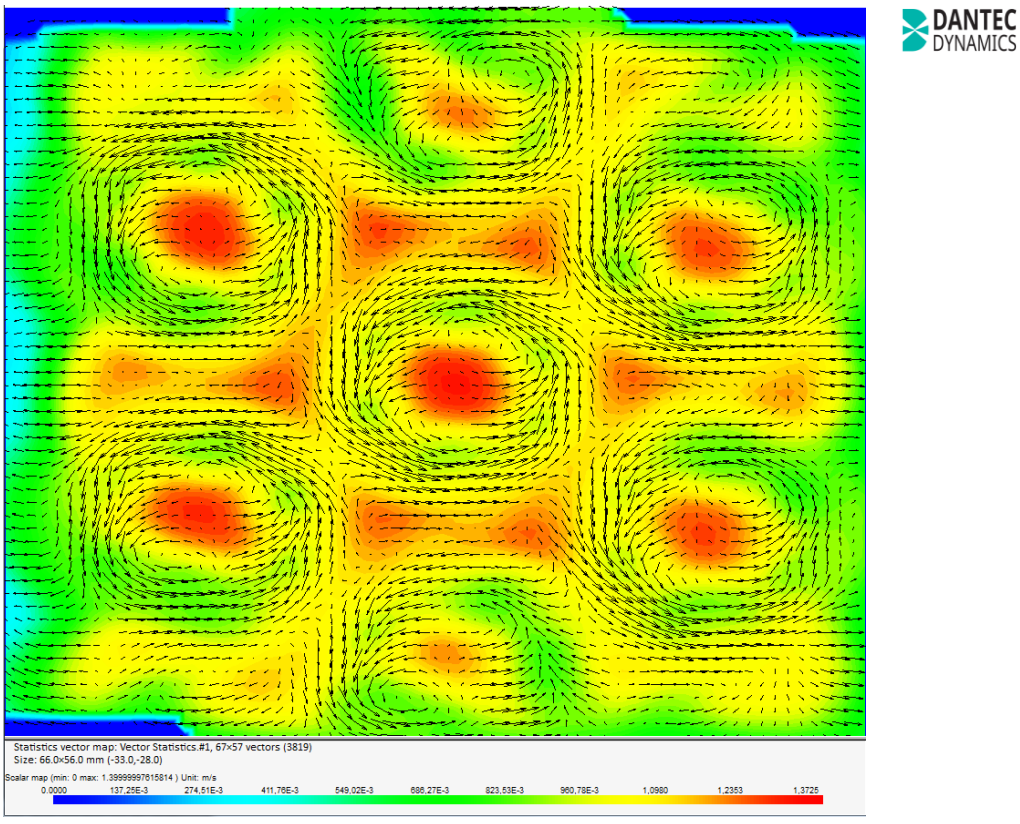




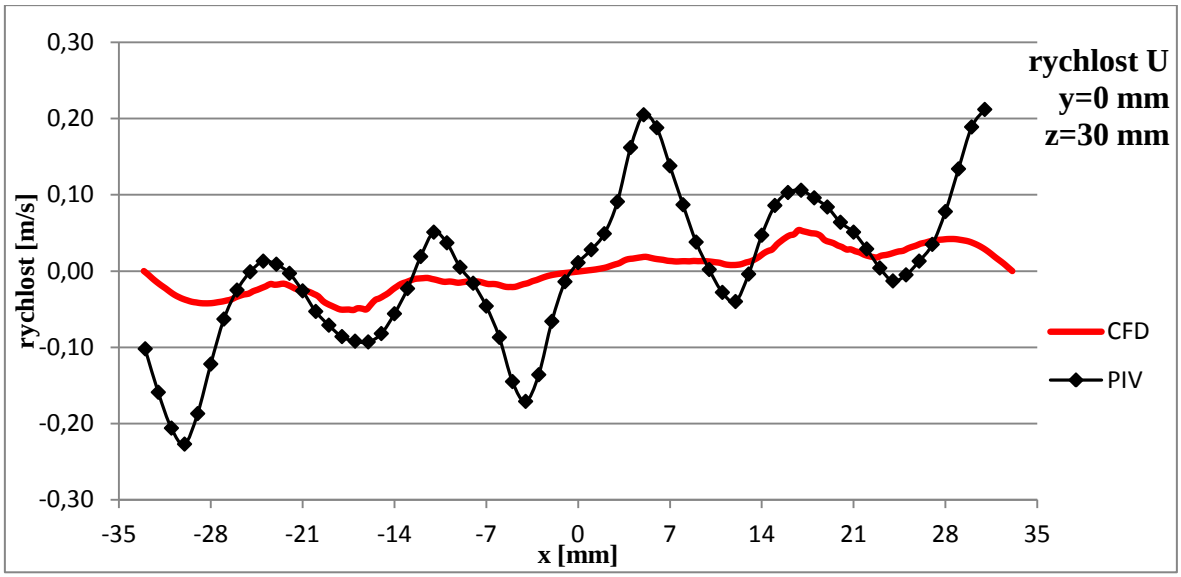
Obrázek 53 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=20 mm

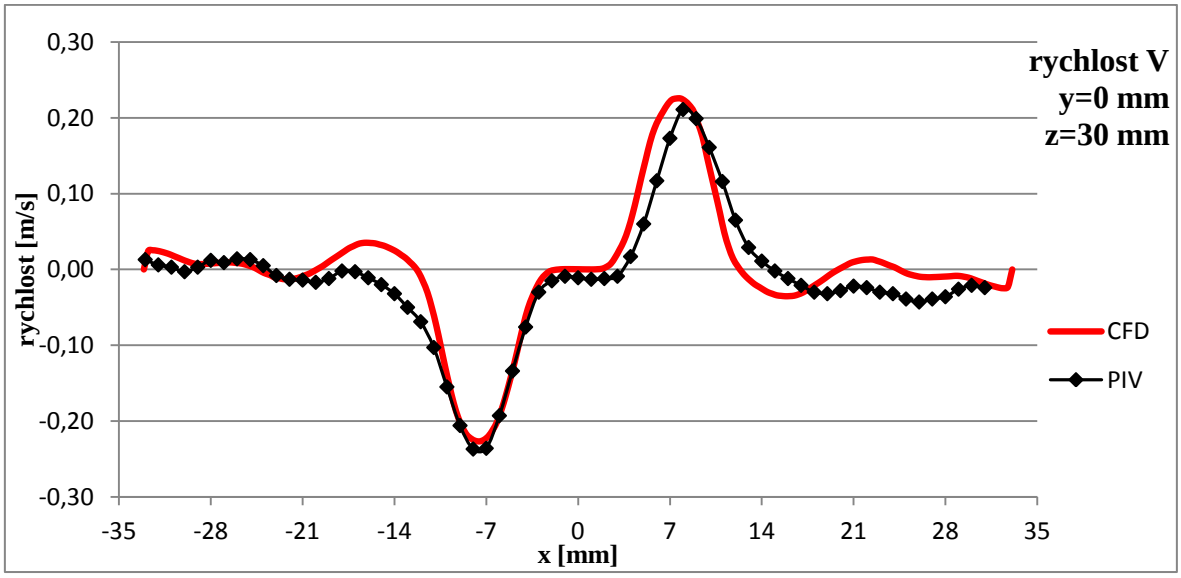
4.1.4 Vzdálenost za mřížkou z=30 mm

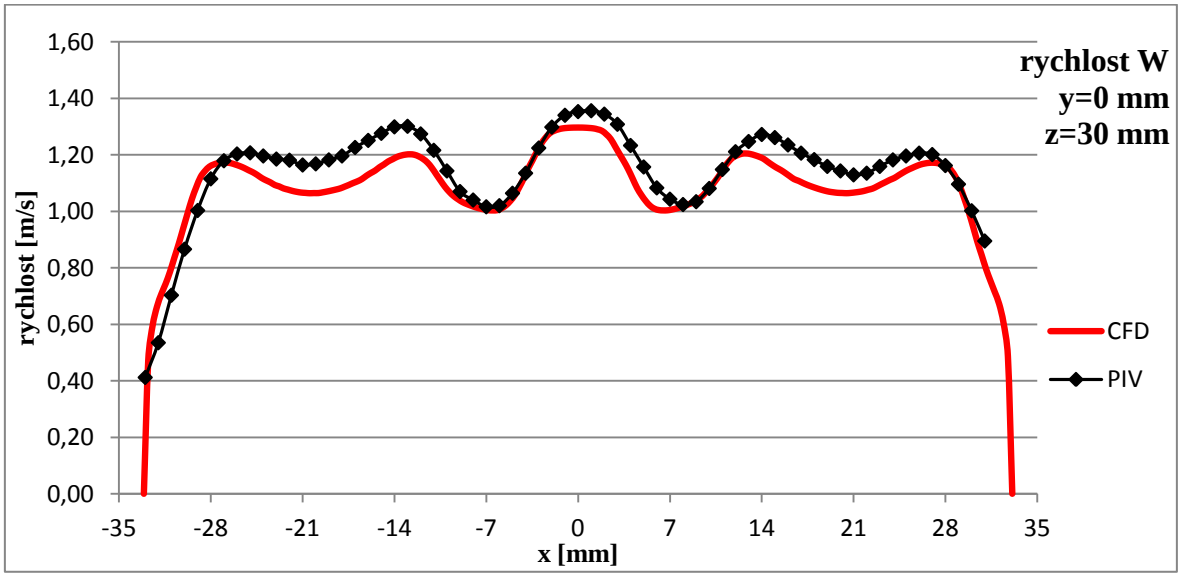




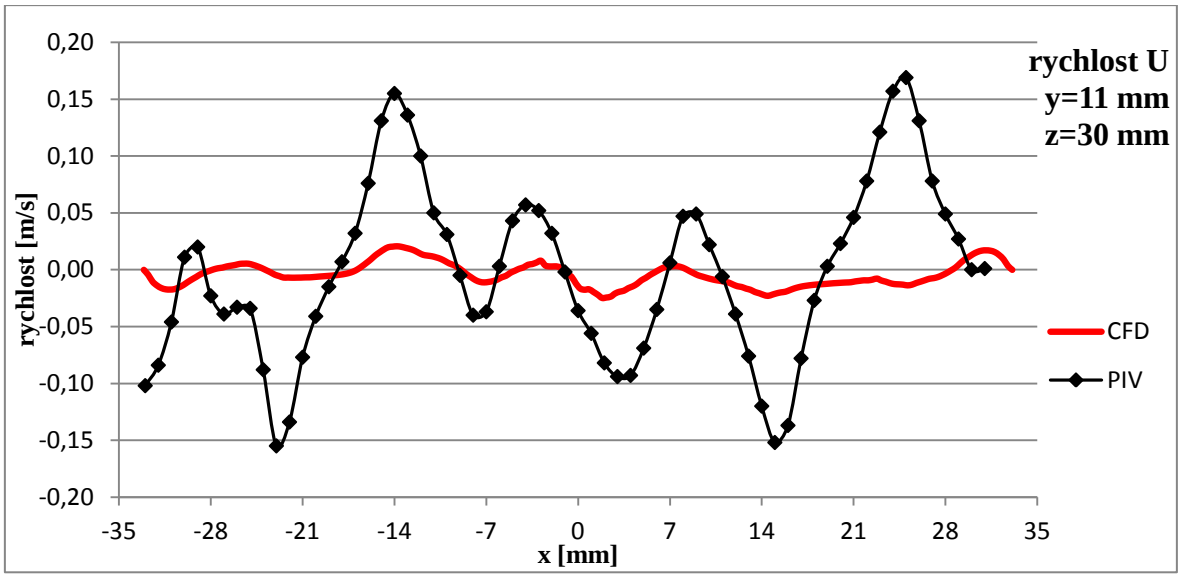
Obrázek 54 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=30 mm

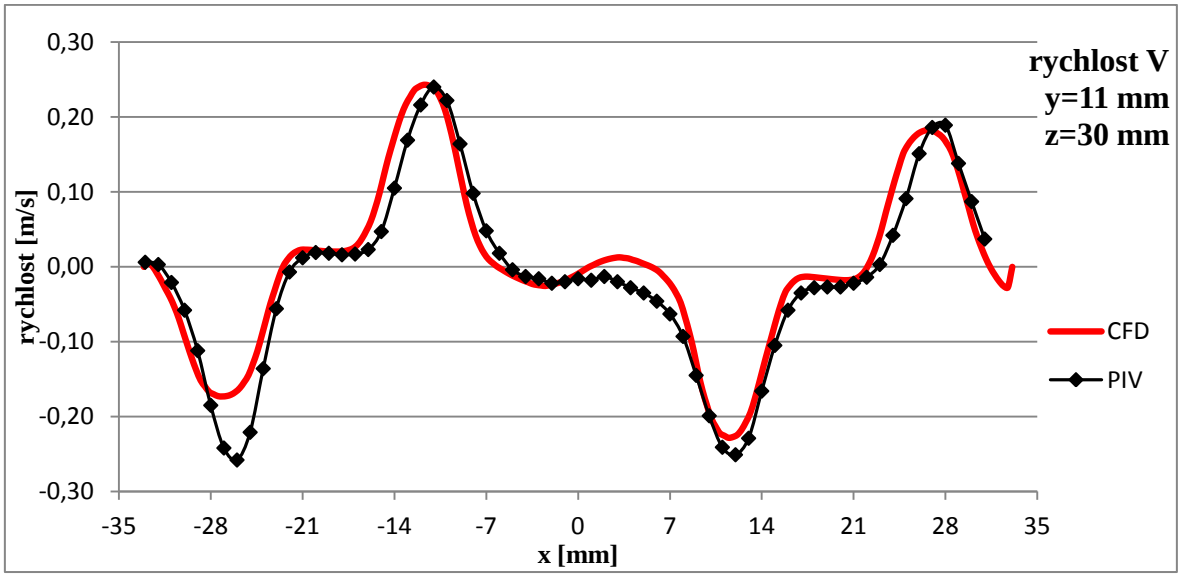


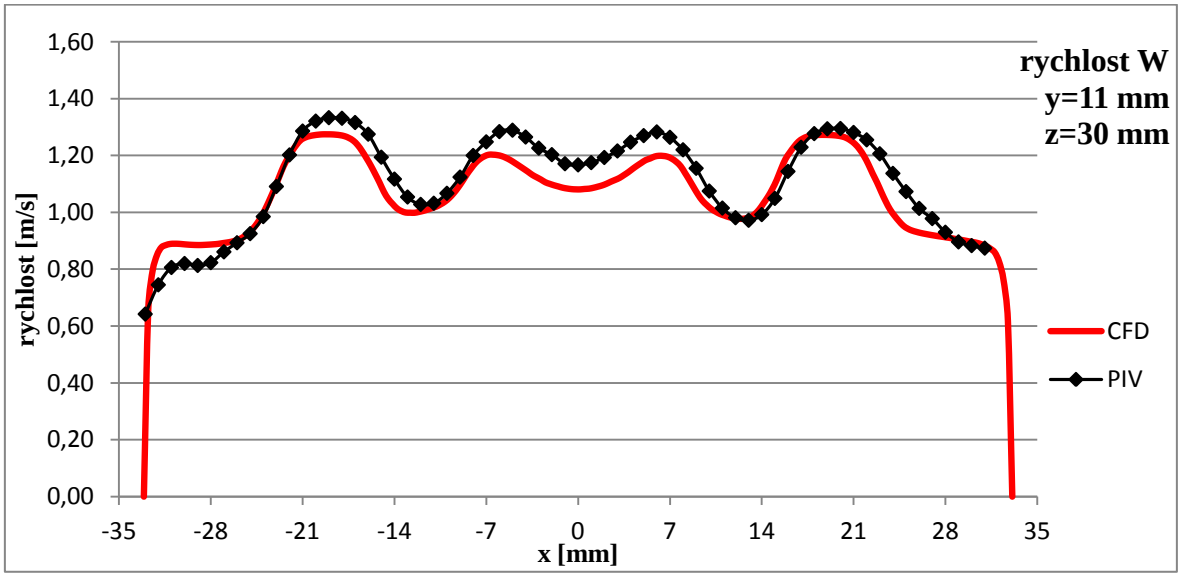




Obrázek 55 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=30 mm

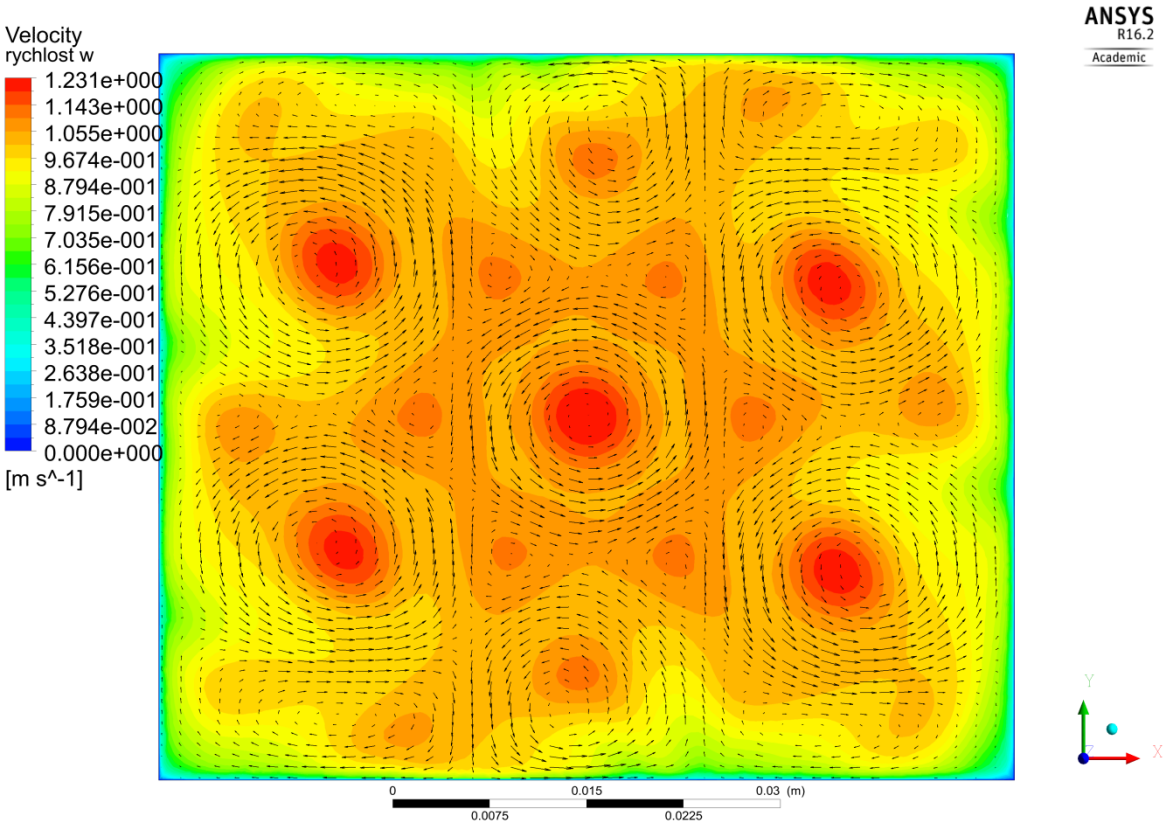


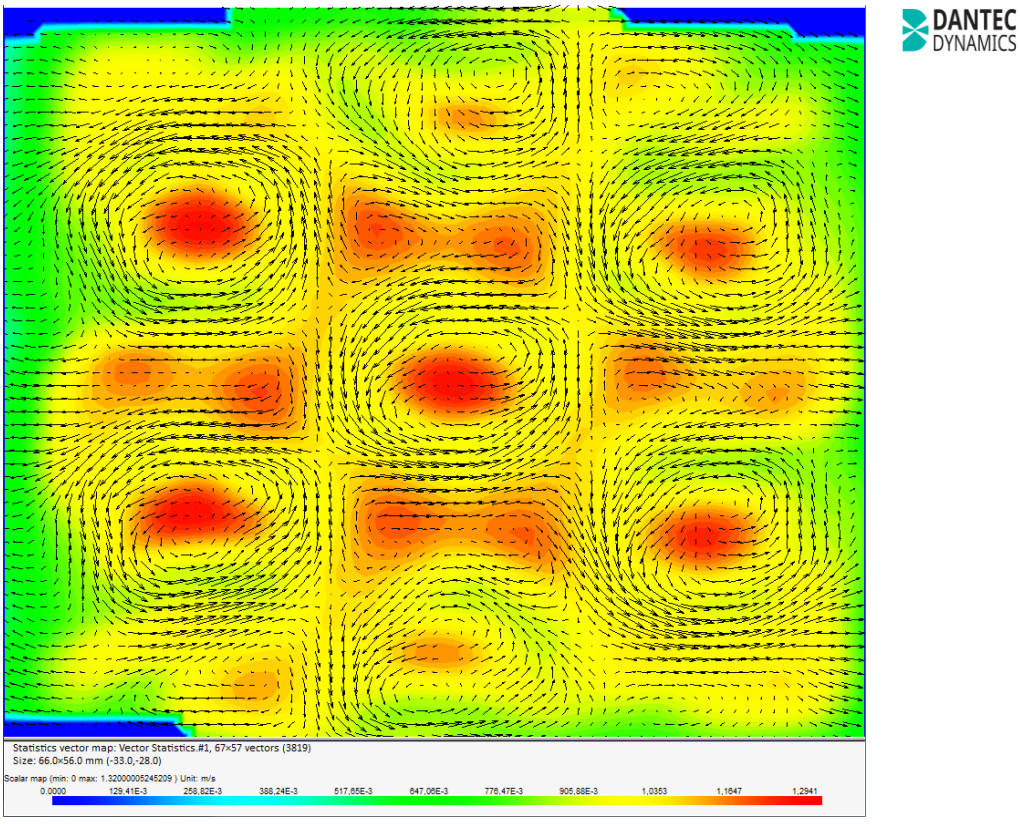




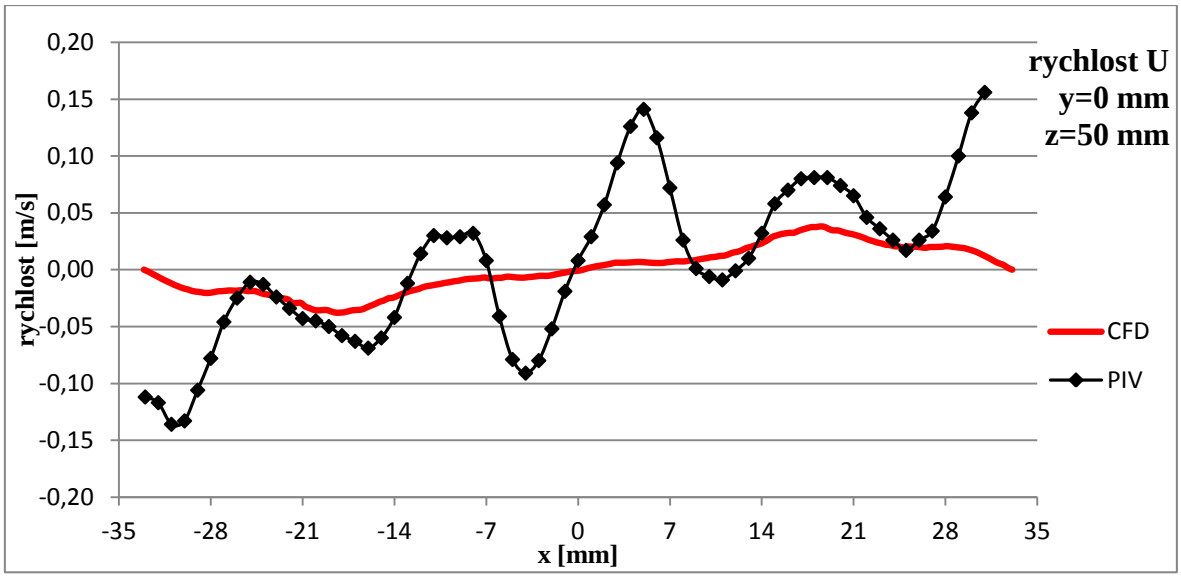
Obrázek 56 – Porovnání výsledků, mod .1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=30 mm

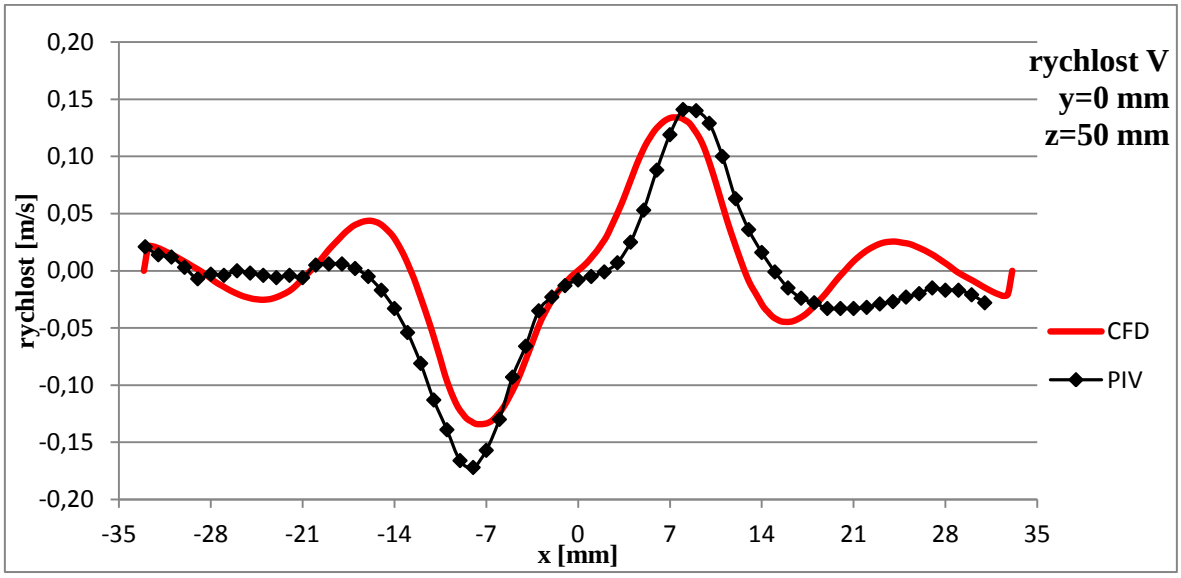
4.1.5 Vzdálenost za mřížkou z=50 mm

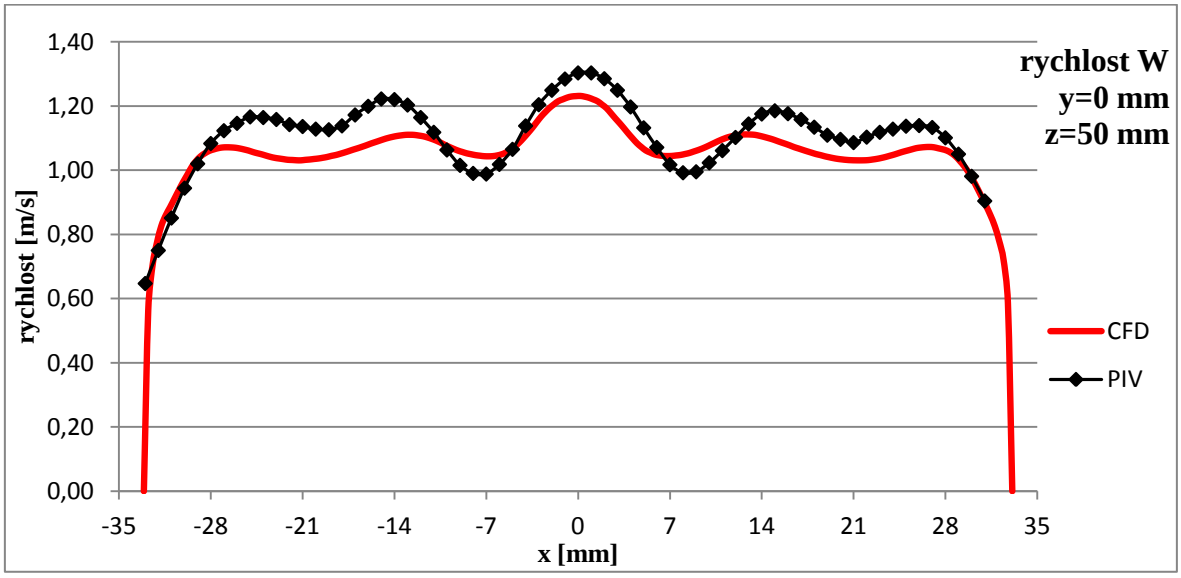




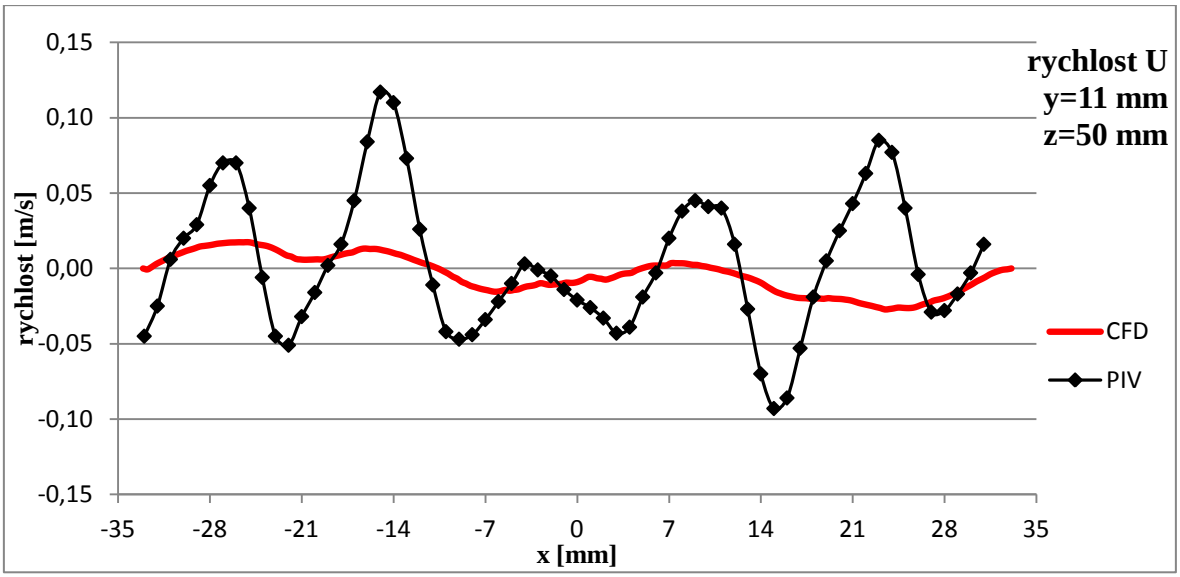
Obrázek 57 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=50 mm

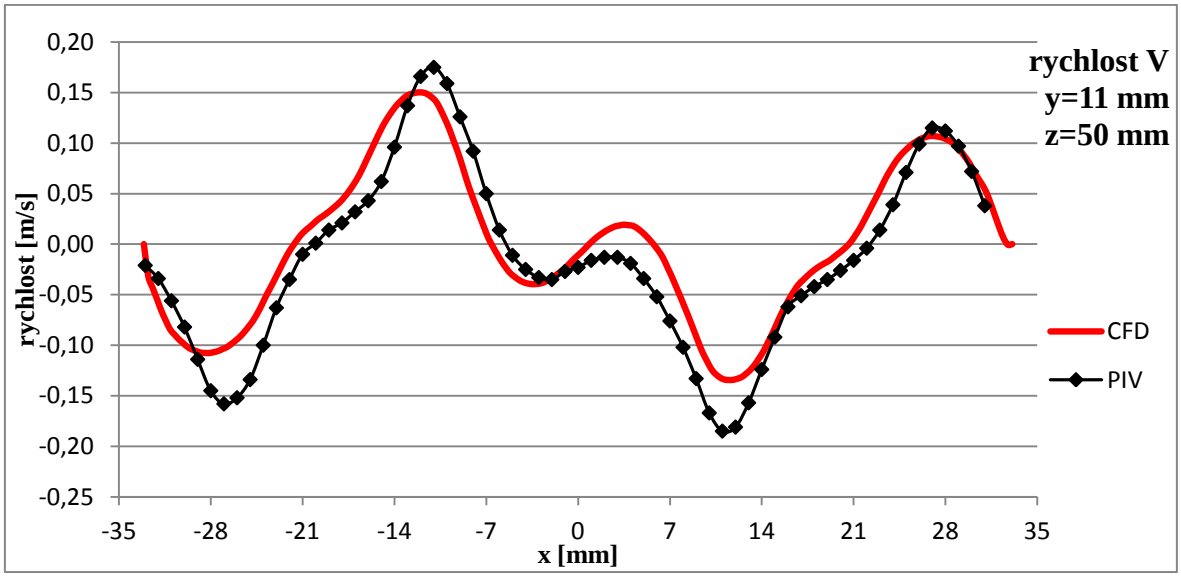


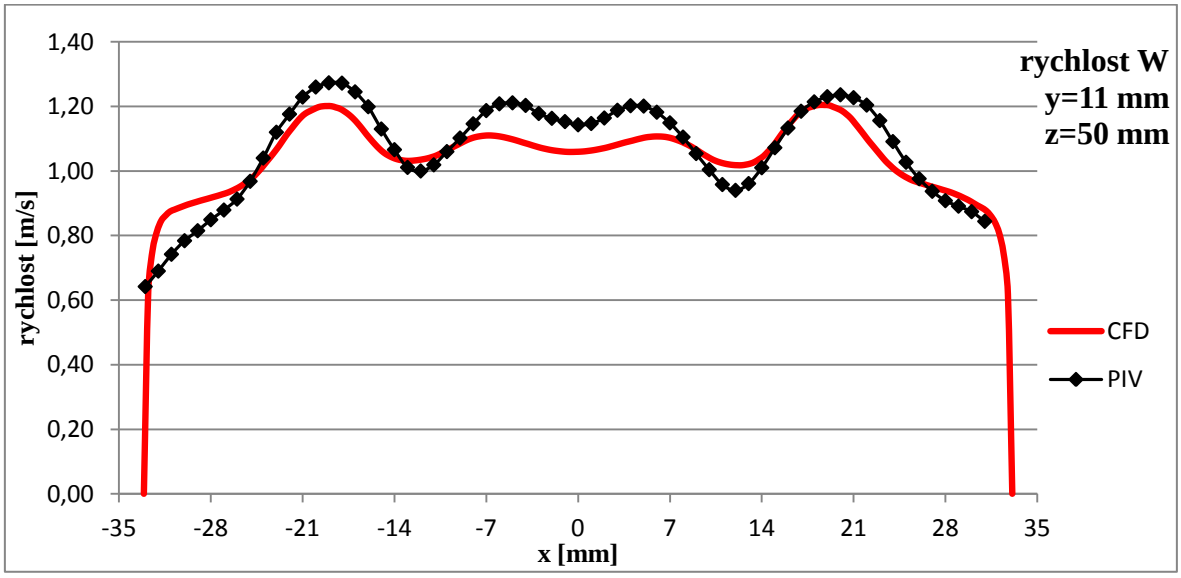




Obrázek 58 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=50 mm

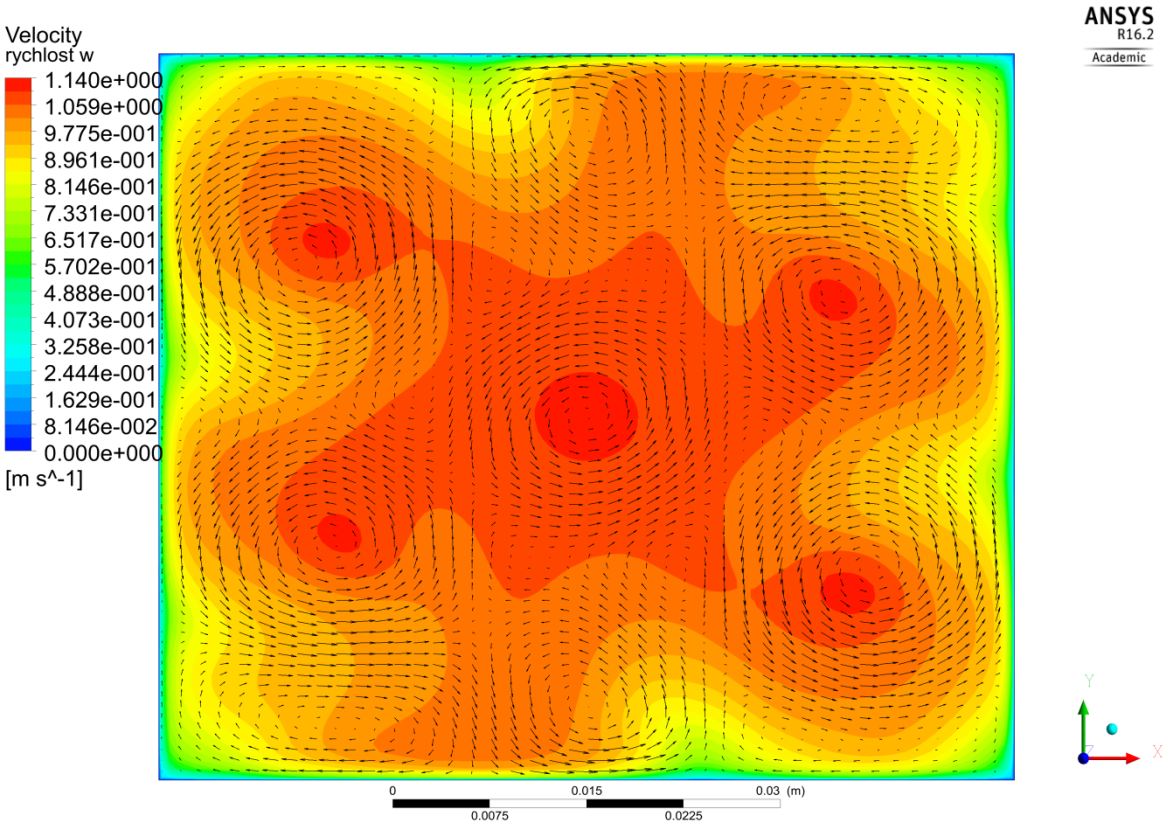


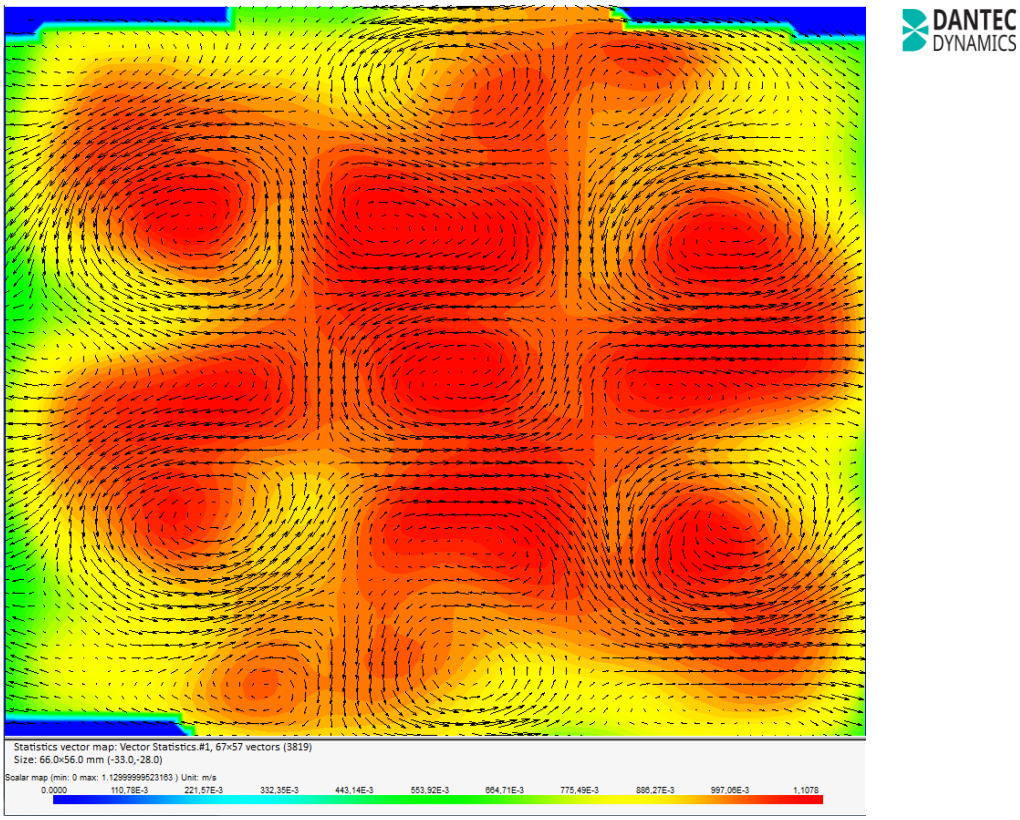




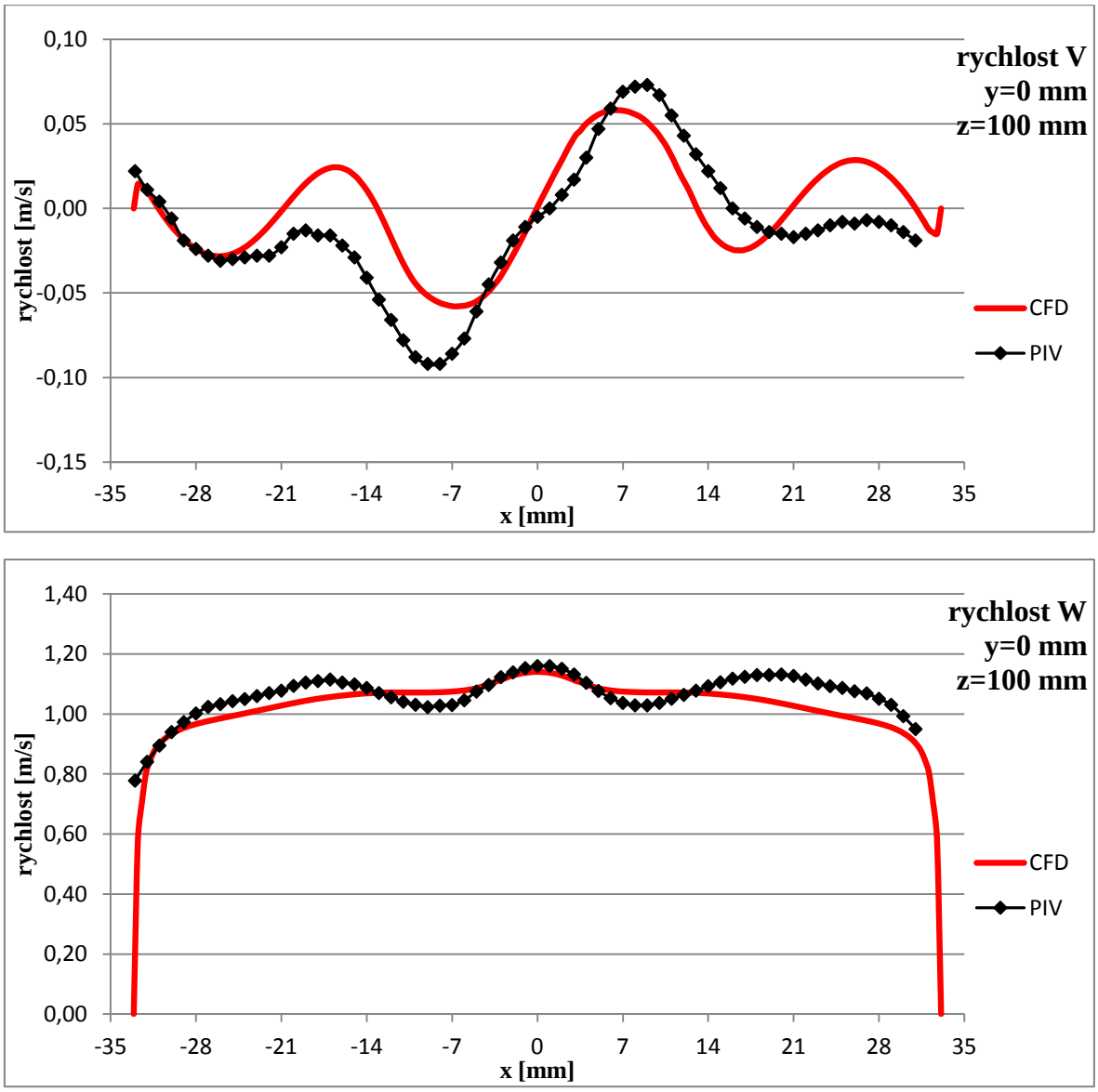
Obrázek 59 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=50 mm

4.1.6 Vzdálenost za mřížkou z=100 mm

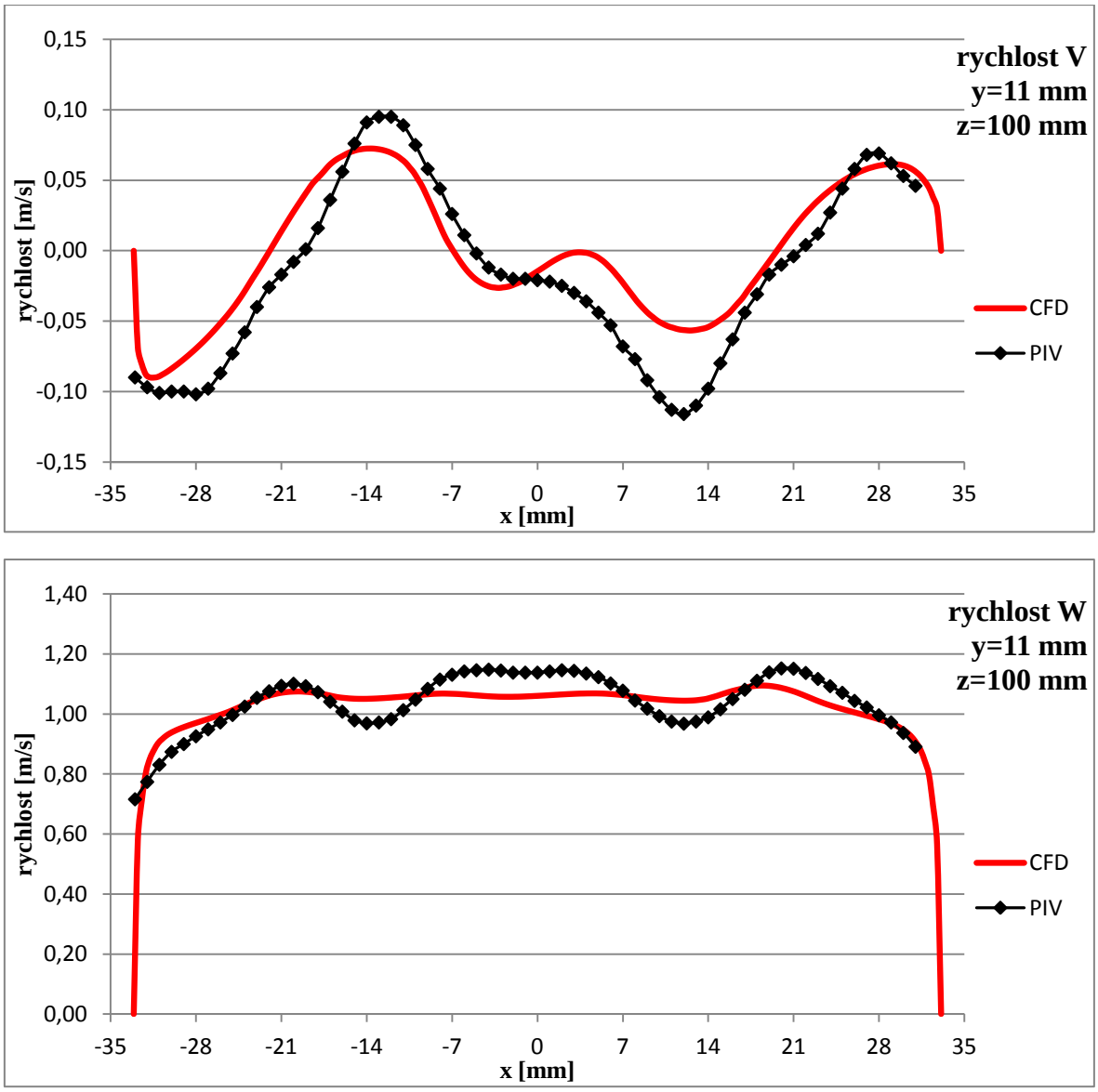




Obrázek 60 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=100 mm

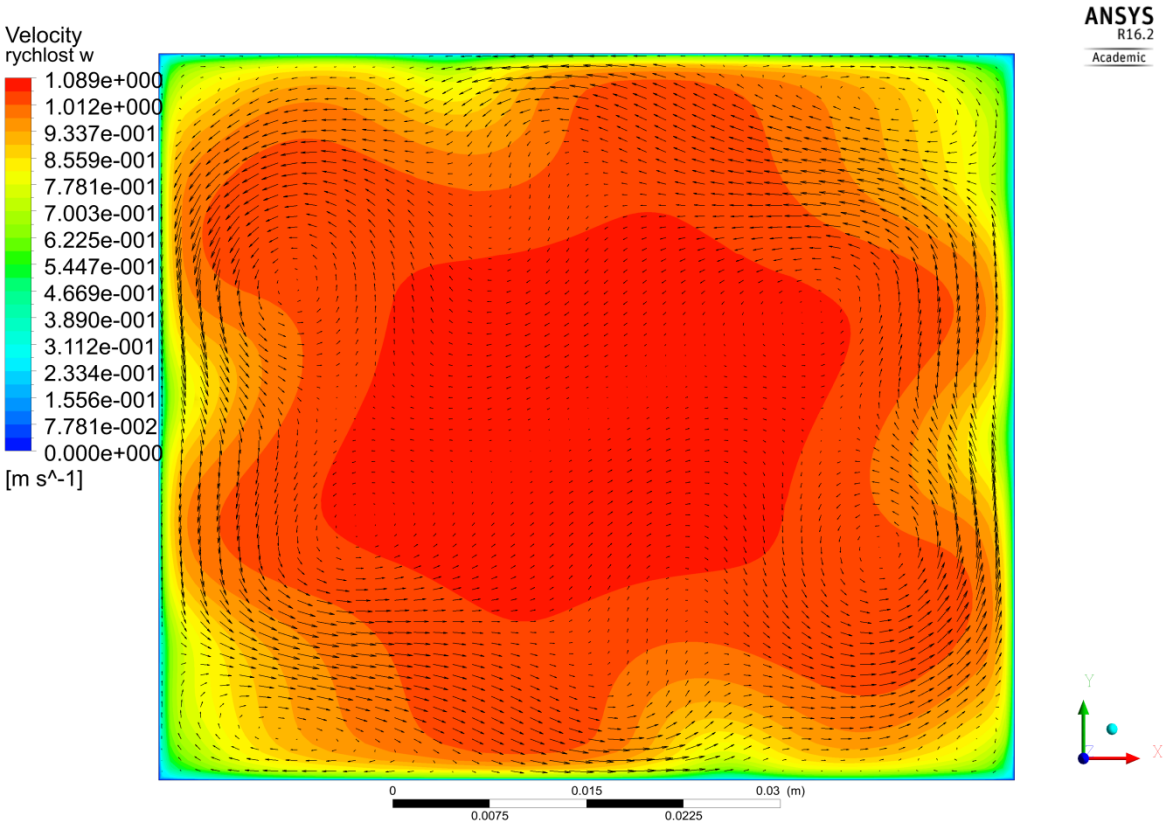


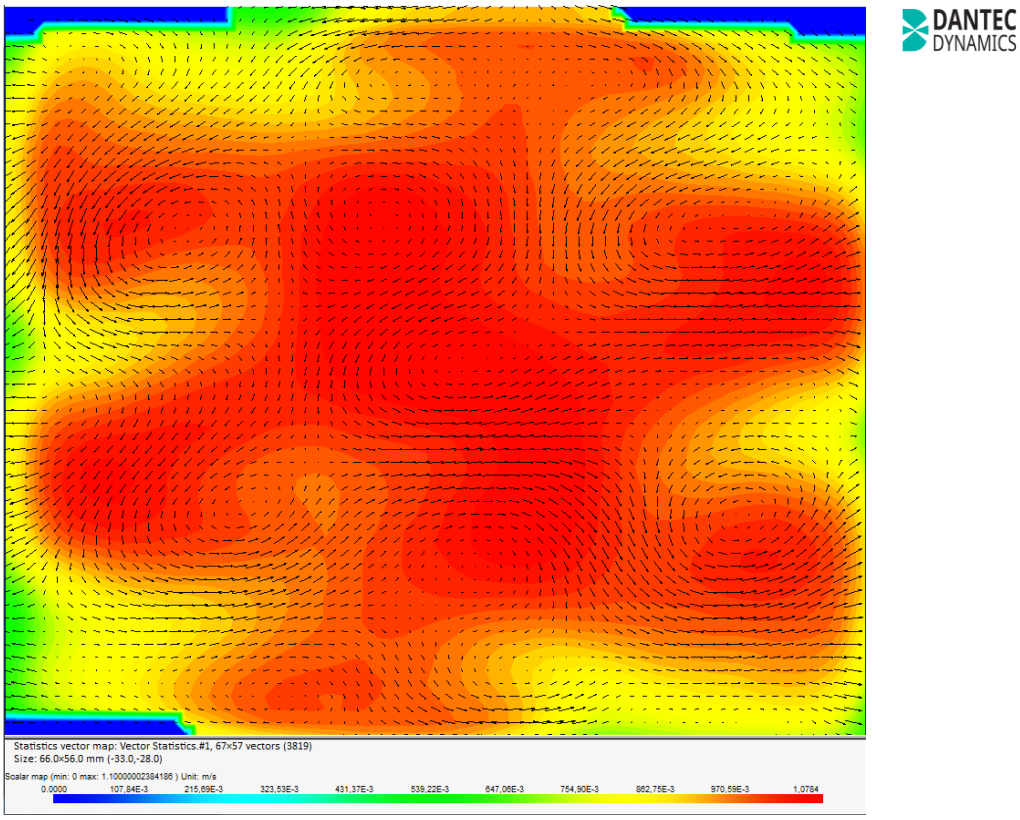
Obrázek 61 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=100 mm



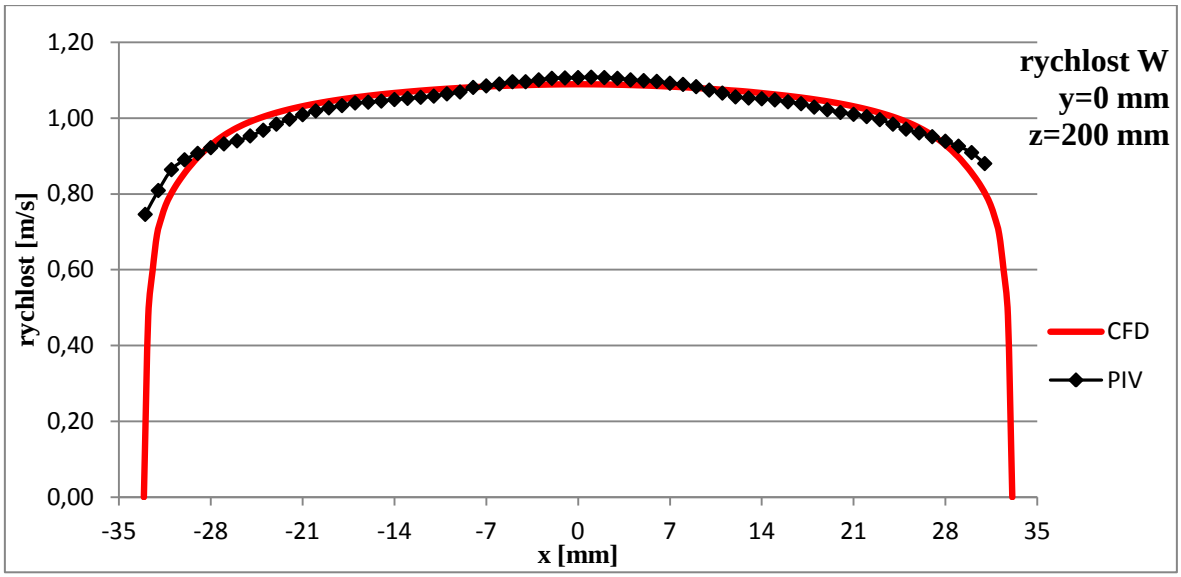
Obrázek 62 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=100 mm

4.1.7 Vzdálenost za mřížkou z=200 mm

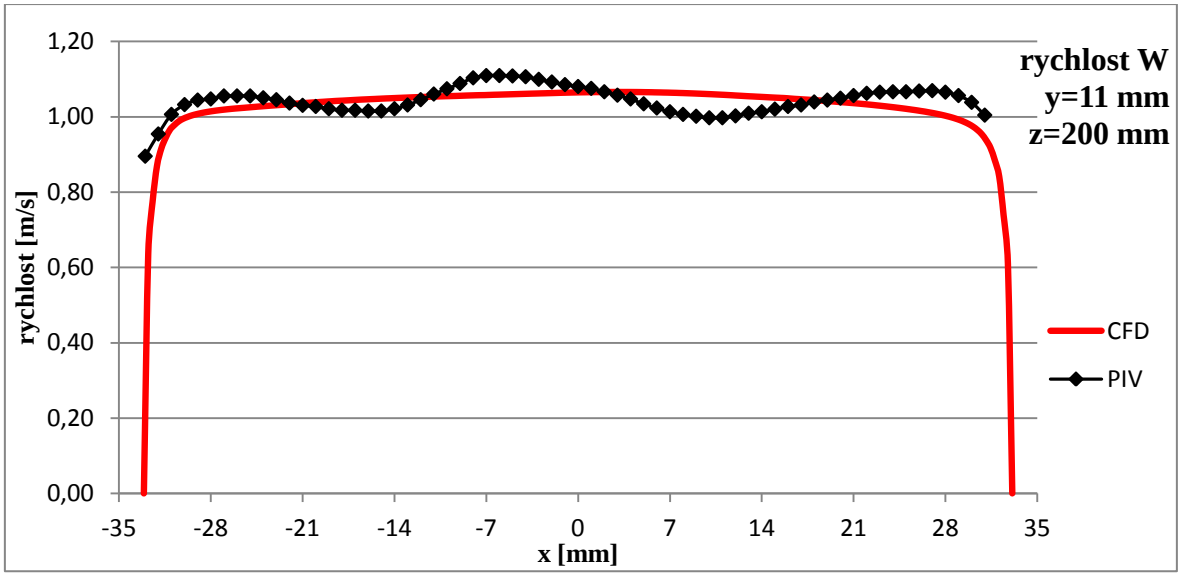




Obrázek 63 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=200 mm

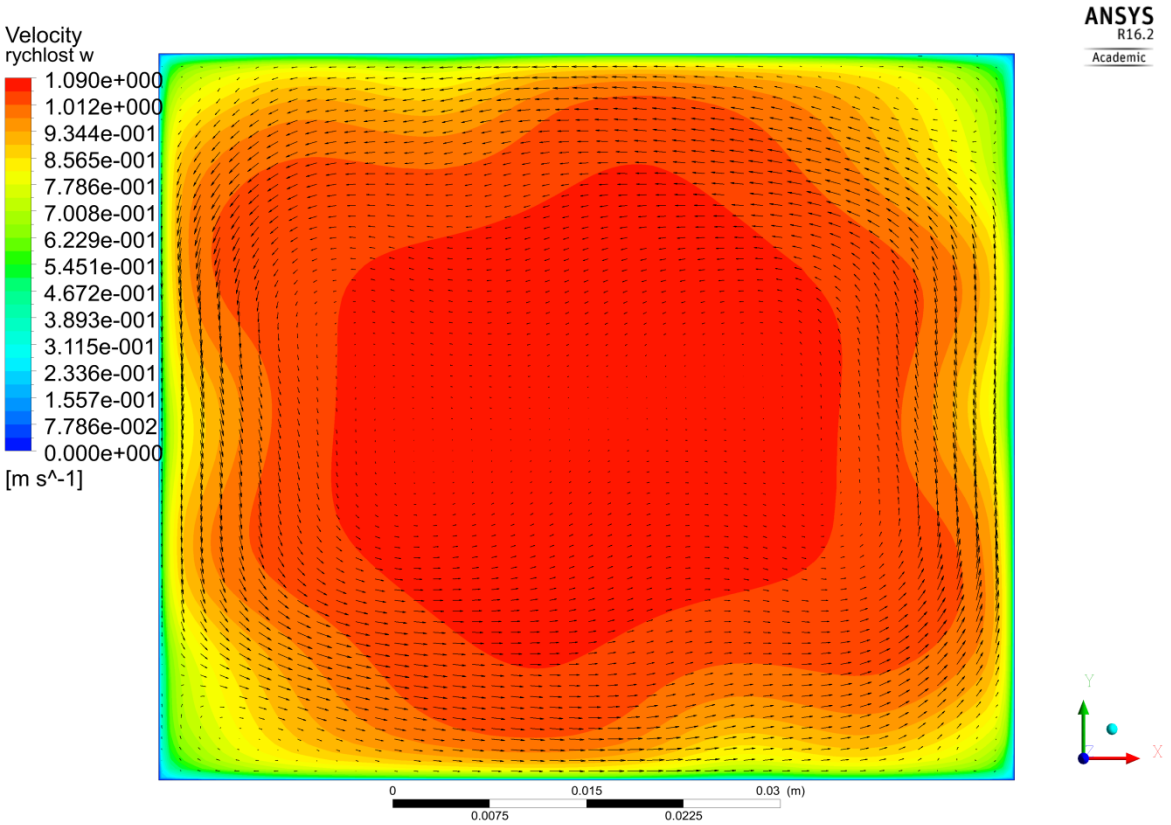


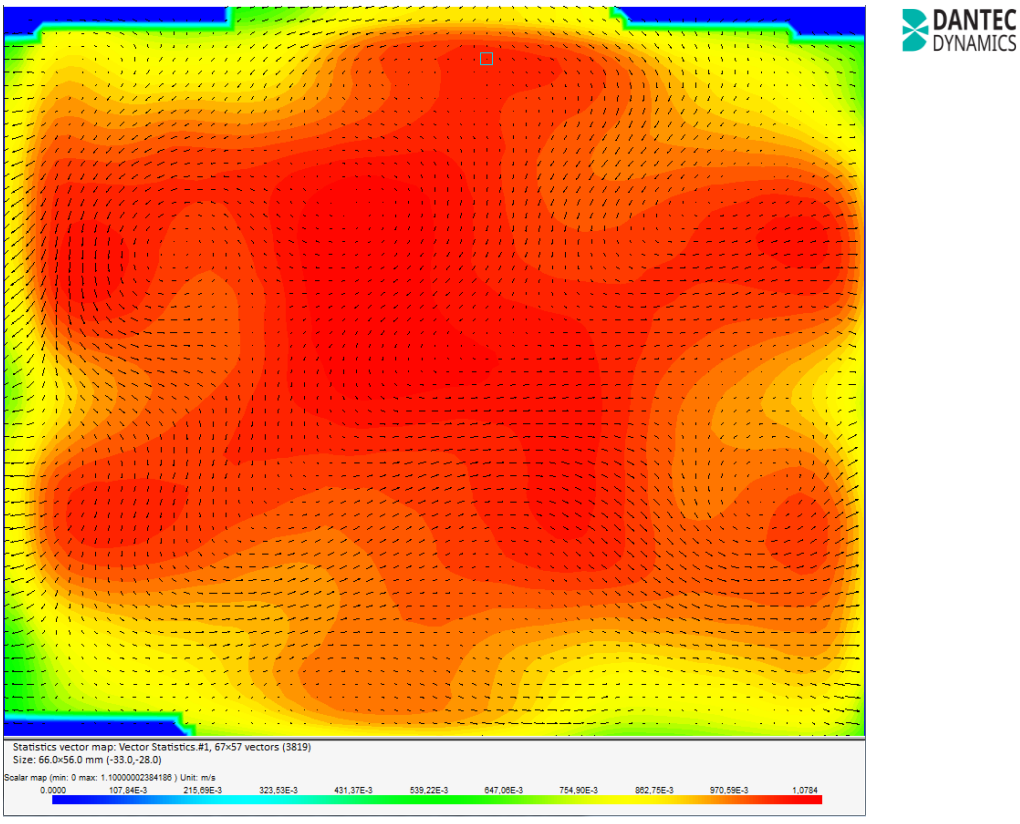
Obrázek 64 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=200 mm



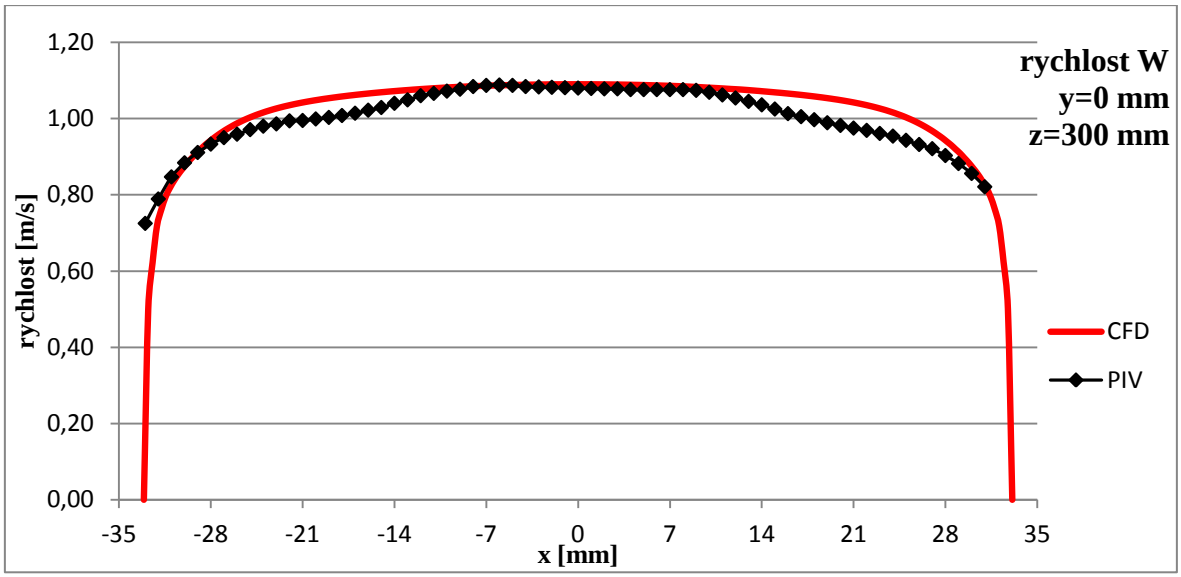
Obrázek 65 – Porovnání výsledků, mod.1, 1m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=200 mm

4.1.8 Vzdálenost za mřížkou z=300 mm

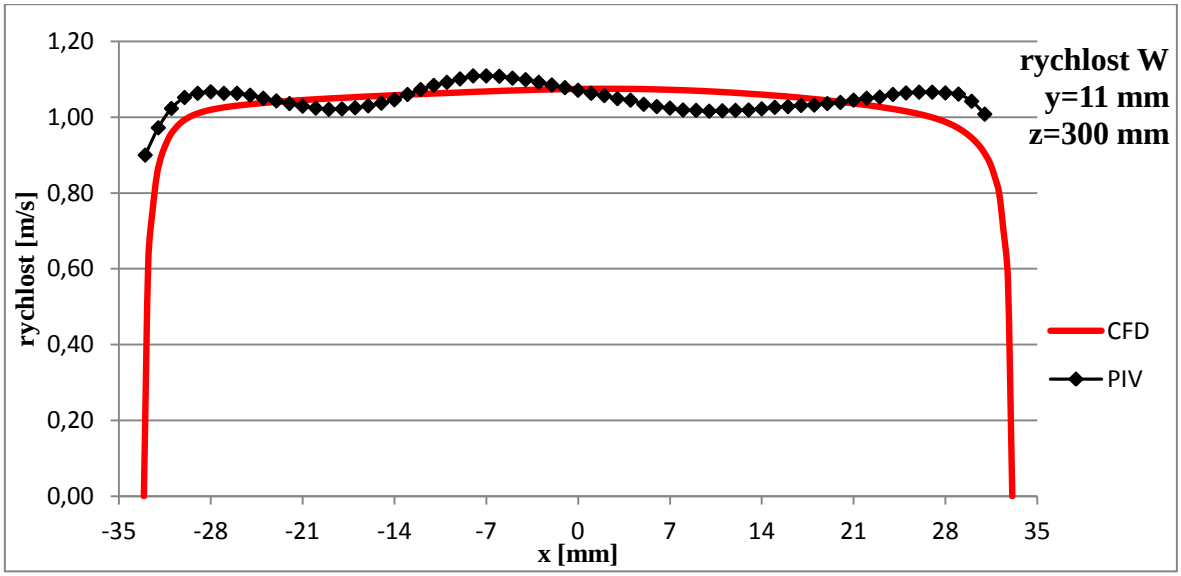




Obrázek 66 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=300 mm



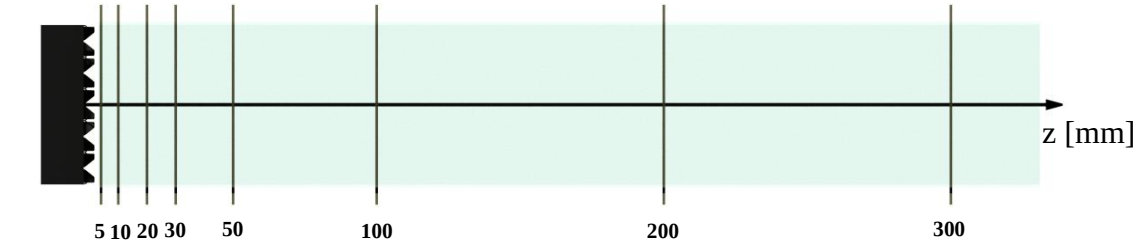
Obrázek 67 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=0 mm, z=300 mm



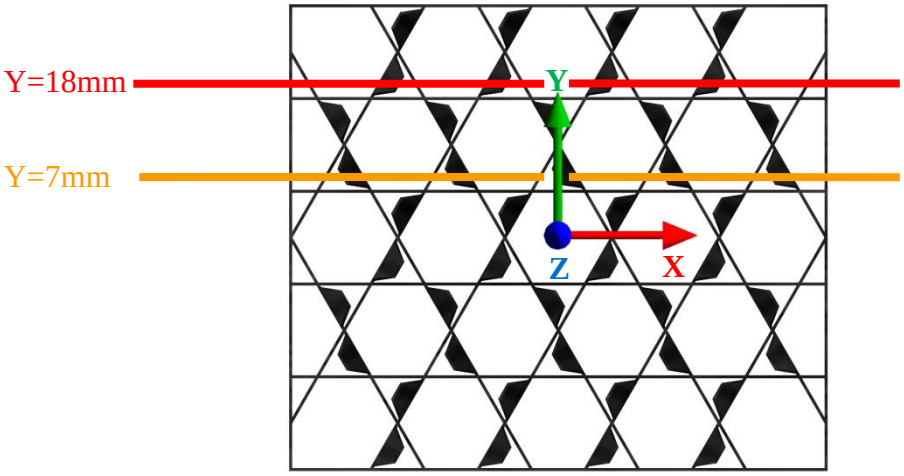
Obrázek 68 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí, y=11 mm, z=300 mm

4.2 Porovnání výsledků – mřížka mod. 2

Výsledky výpočtu a experimentu mísící mřížky mod. 2 jsou porovnávány v osmi rovinách (viz obrázek 69). V každé z nich jsou porovnávány struktury vektorů příčných rychlostí (rychlost *U* a rychlost *V*) a třetí složka rychlosti (rychlost *W*) je zde opět zobrazena pomocí barevné škály. V každé vyšetřované rovině jsou poté kvantitativně porovnávány jednotlivé složky rychlostí ve dvou vybraných úsečkách. Tyto úsečky byly vybrány tak, aby bylo možné co nejlépe sledovat především příčnou rychlost ve směru osy *X*, která se nejvíce podílí na přesouvání proudícího média. Proto úsečky vedou v místech, ve kterých jsou umístěny ohnuté mísící lopatky (viz obrázek 70).



Obrázek 69 – Vyšetřované vzdálenosti za mřížkou mod. 2



Obrázek 70 – Vyšetřované úsečky a souřadnicový systém – mřížka mod. 2

Důležitou složkou rychlosti je v tomto případě rychlost *U*. Z výsledků je patrné, že příčné proudění ve směru osy *X* dosahuje rychlostí převyšující 0,4 m/s, avšak se zvyšující se vzdáleností za mřížkou se tato složka rychlosti již potlačuje a ve vzdálenosti 30 mm již v maximech dosahuje pouze poloviny rychlostí, než byly v těsné blízkosti za mřížkou.

Volba úseček pro vyšetřování velikosti rychlostí pro tento typ mísící mřížky je opět velmi citlivá na průběh a velikosti rychlostí. Posun, byť jen o několik setin milimetru, s *Y* souřadnicí vyšetřované úsečky velmi ovlivní charakter i velikosti jednotlivých složek rychlostí.

Tak jako u porovnání mřížky mod. 1, tak i zde jsou také vidět mírné odchylky maximálních rychlostí. I zde to může být ovlivněno mnoha faktory, například geometrickou a rozměrovou nepřesností, metodou zjišťování objemového průtoku na experimentu, určení vlastností proudícího média pro CFD výpočet. Je však zřetelné, že průběhy všech složek rychlostí se ve výsledcích numerické simulace relativně rychleji vyrovnávají. Příčinou by mohla být výše zmíněná odchylka ve zvolení vyšetřované úsečky,

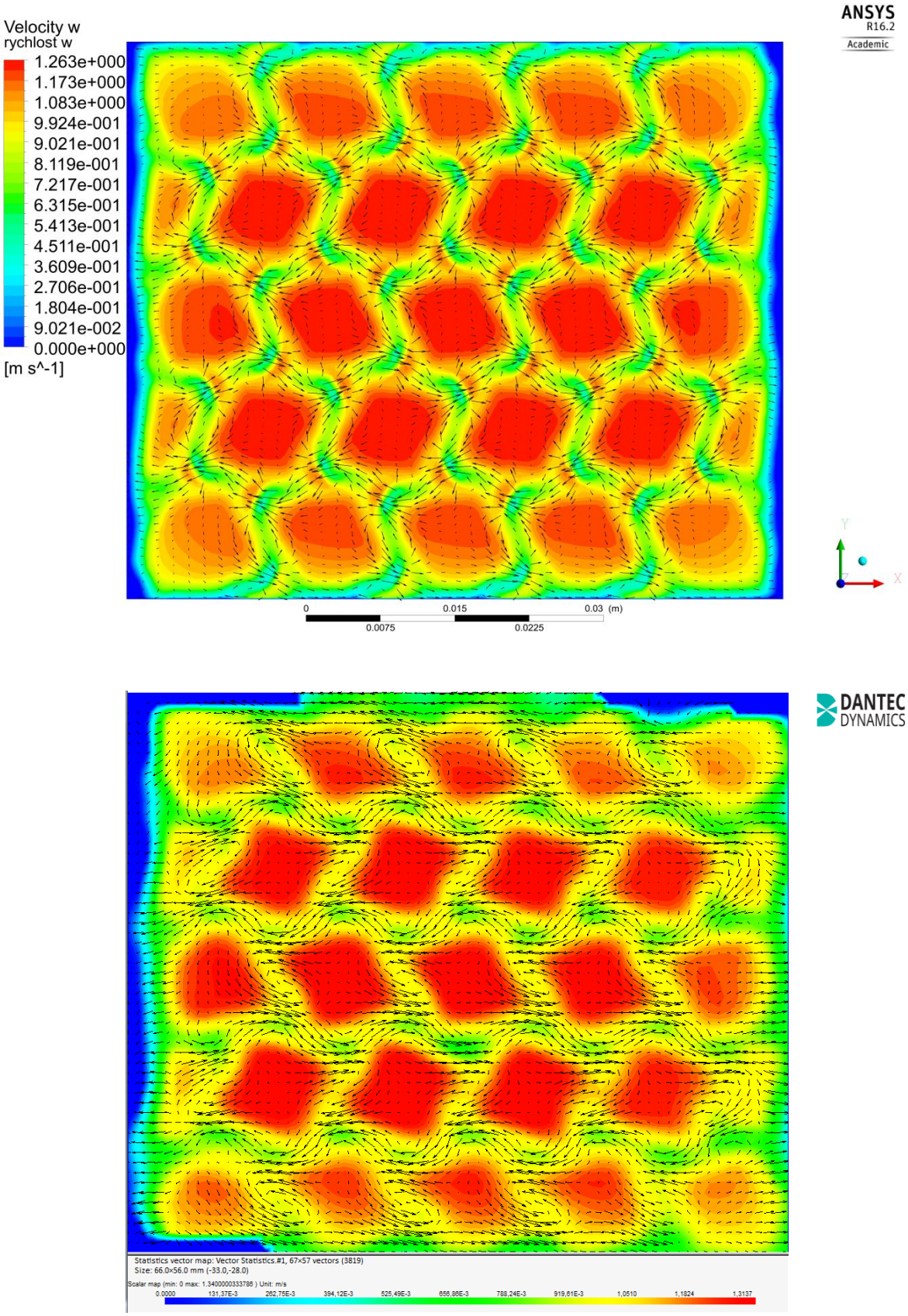
nebo fakt, že připravený CFD model a použitý turbulentní model pro popsání proudění za touto mísící mřížkou je více disipativní, než je proudění ve skutečnosti.

I přes všechny možné faktory ovlivňující výsledky výpočtu a experimentu dosahuje porovnání velmi uspokojivých výsledků a je vidět, že jak CFD model, tak experimentální zařízení bylo velmi dobře připraveno.

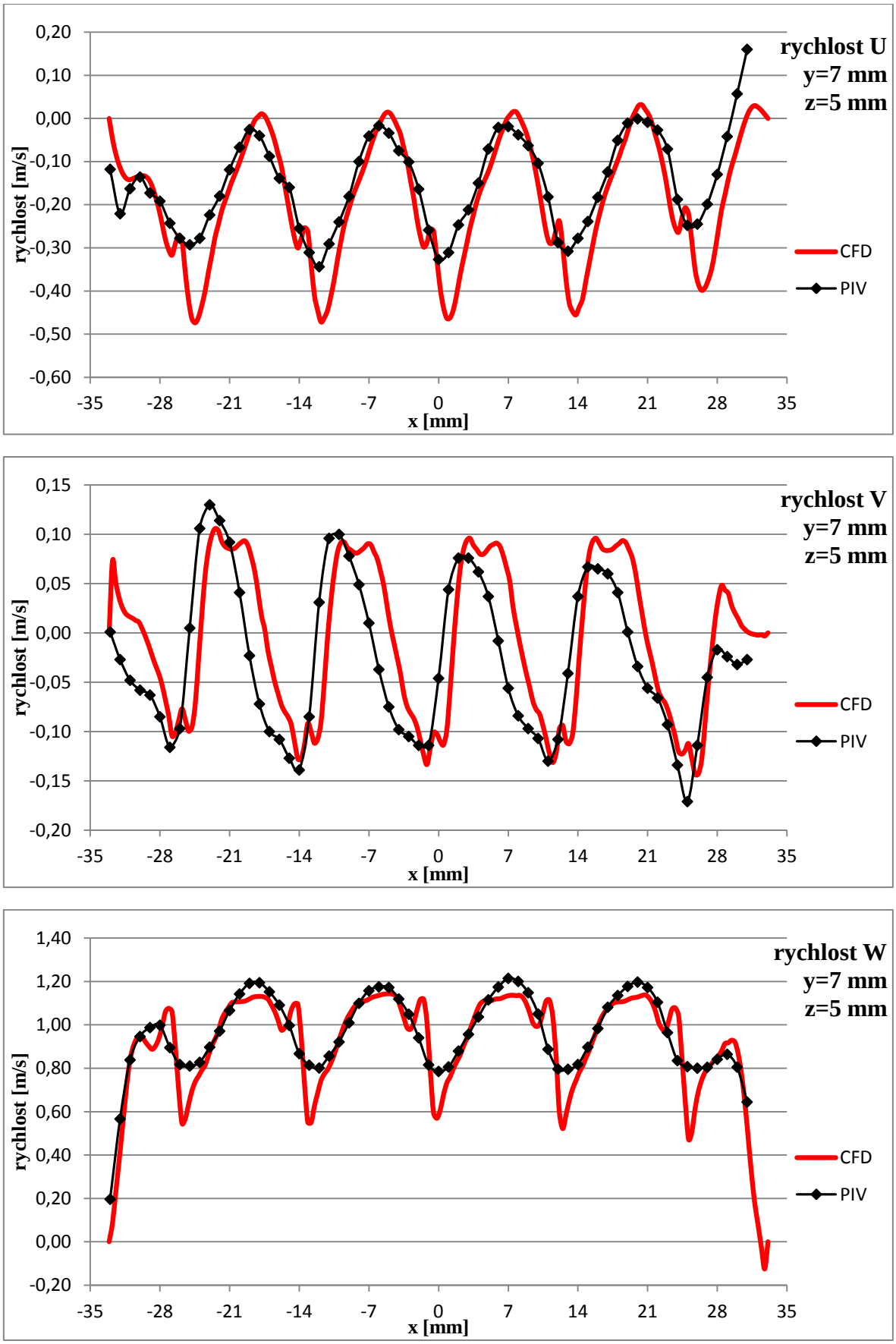
Ve vzdálenosti 100 mm za mřížkou již dosahuje příčná maximální rychlost ve směru osy *Y* (rychlost *V*) hodnot menších než 0,05 m/s, a proto z důvodu velmi nízkých rychlostí již není do dalšího porovnání uvažována. K potlačení příčné rychlosti *U* dochází až později, přibližně od vzdálenosti 200 mm za mřížkou, kde je již opět bezdůvodné tyto, téměř nulové, rychlosti porovnávat. Ve vzdálenosti 200 a 300 mm za mísící mřížkou je již porovnávána pouze podélná rychlost *W*.

V rovinách, kde se již začíná proud ustalovat a dochází k vývinu podélného proudění, jsou patrné nepatrně zdeformované rychlostní profily (rychlost *W*). Experiment a výpočet se i zde velmi dobře shoduje a tato deformace (nesouměrnost) rychlostního profilu je nejspíše způsobena stále zachovanou, byť velmi malou, rotací proudu u stěn.

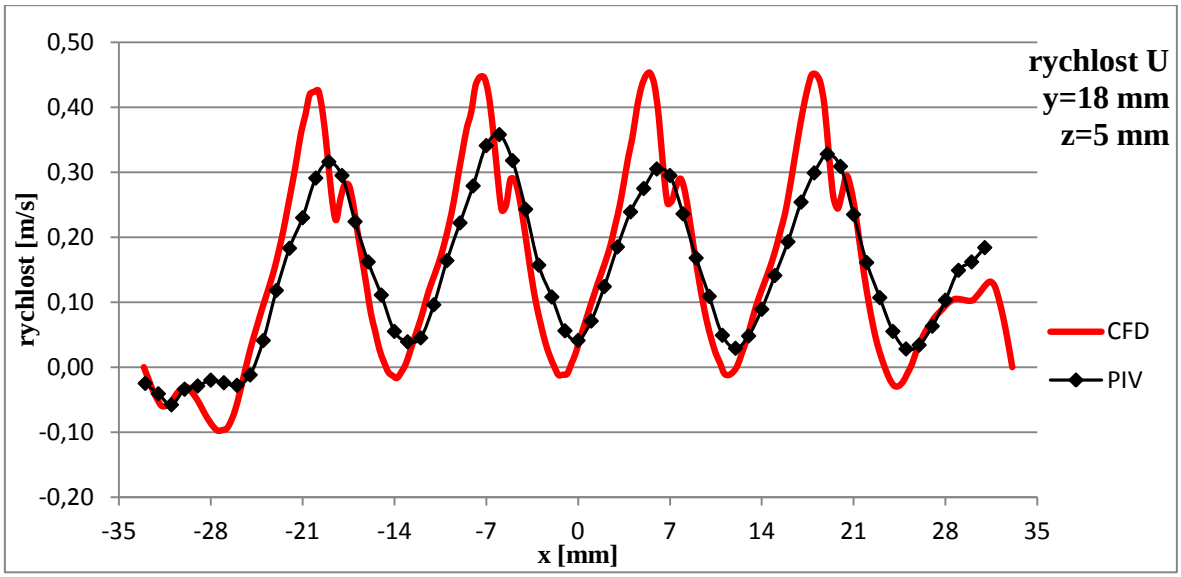
4.2.1 Vzdálenost za mřížkou z=5 mm

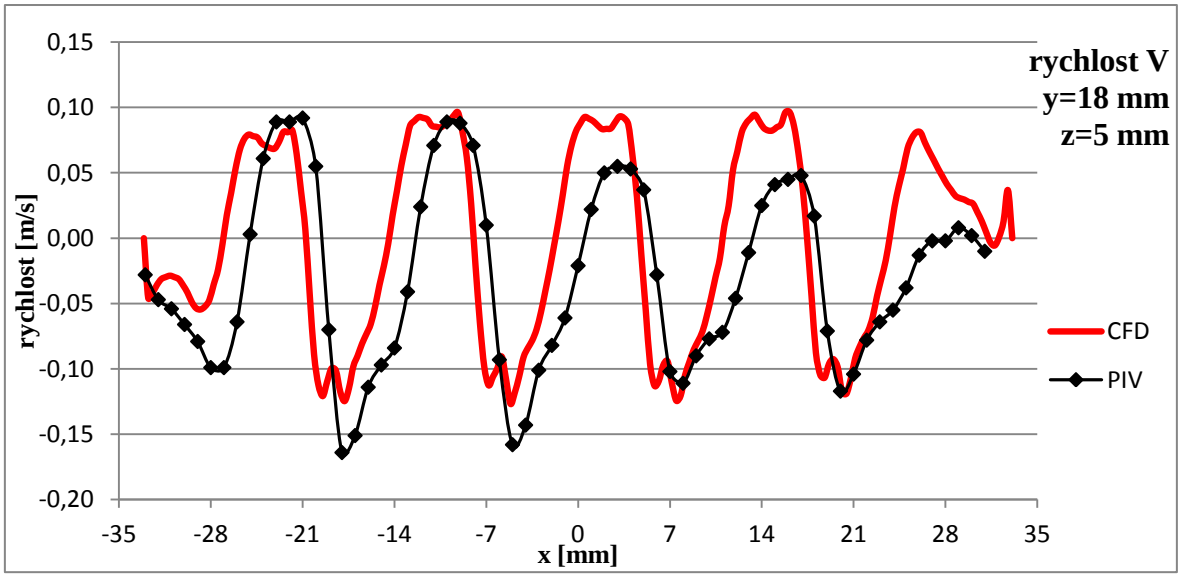


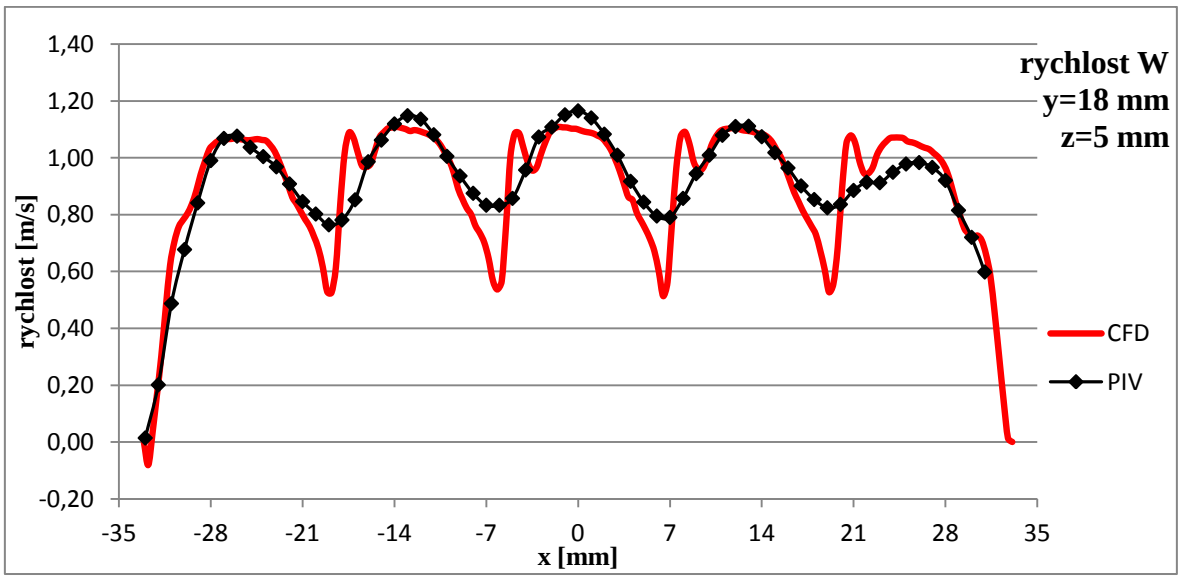
Obrázek 71 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=5 mm



Obrázek 72 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=5mm

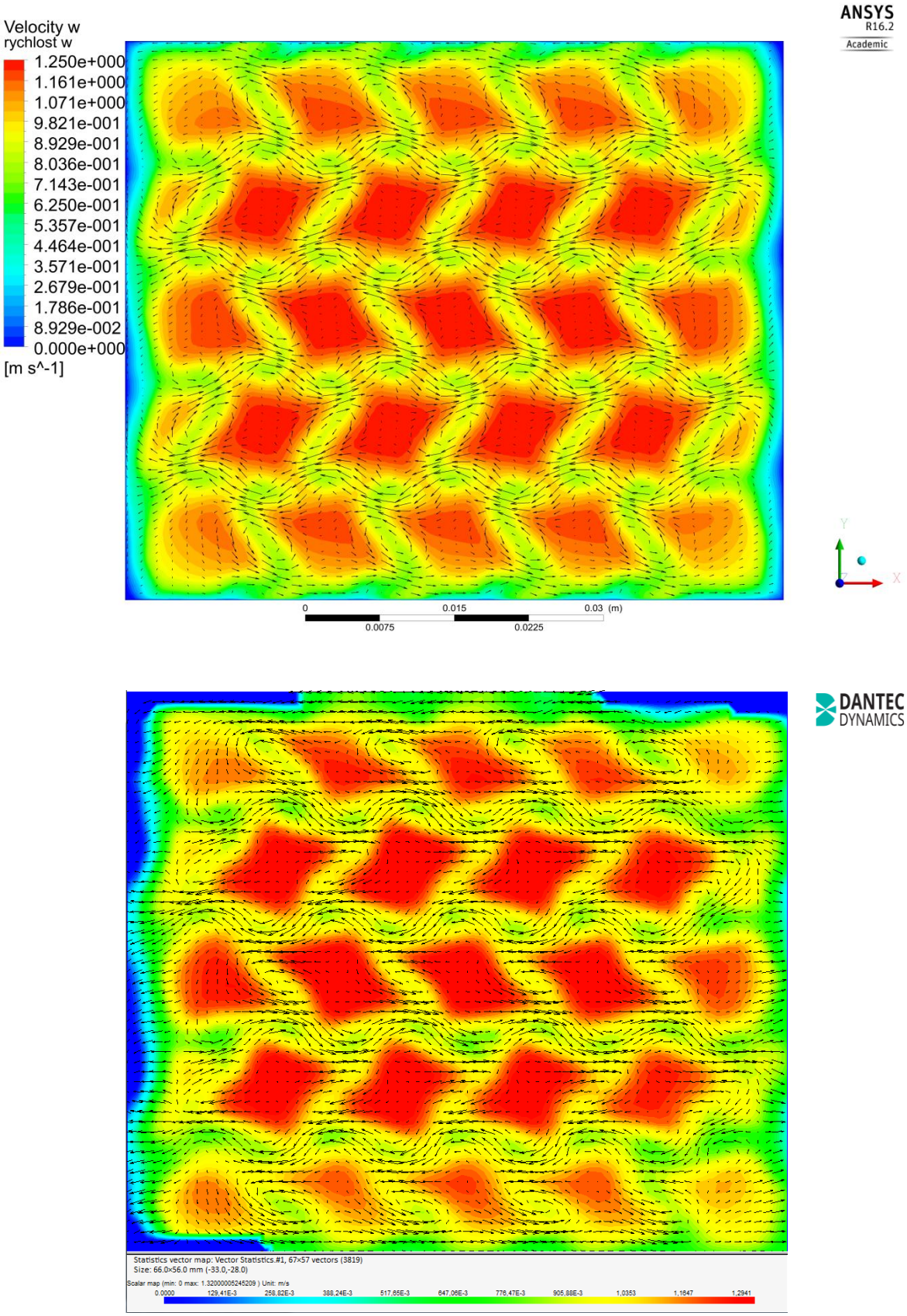




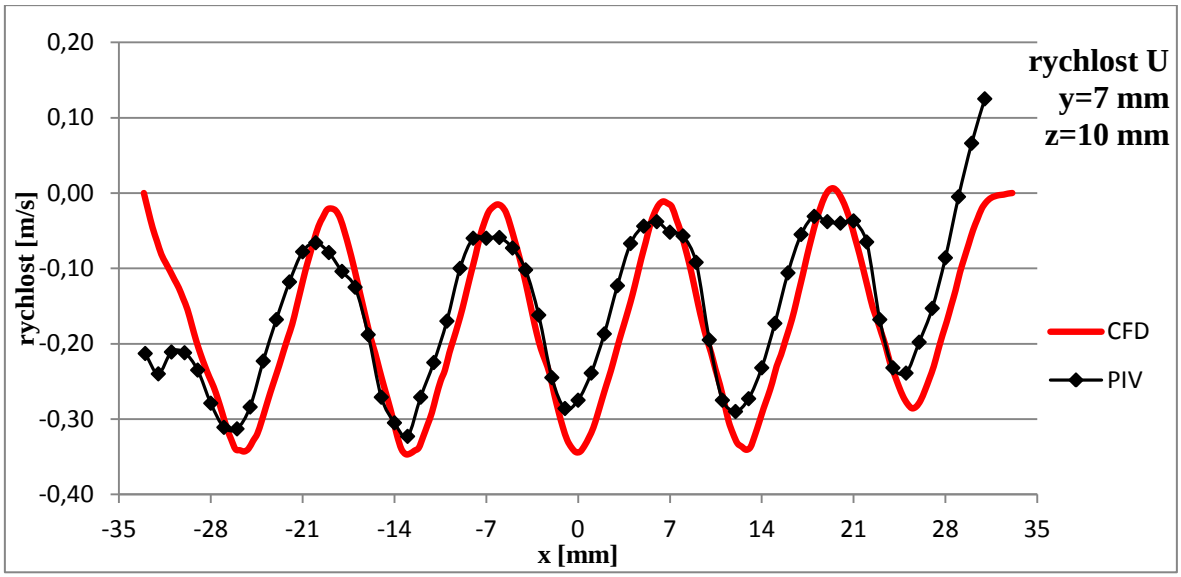


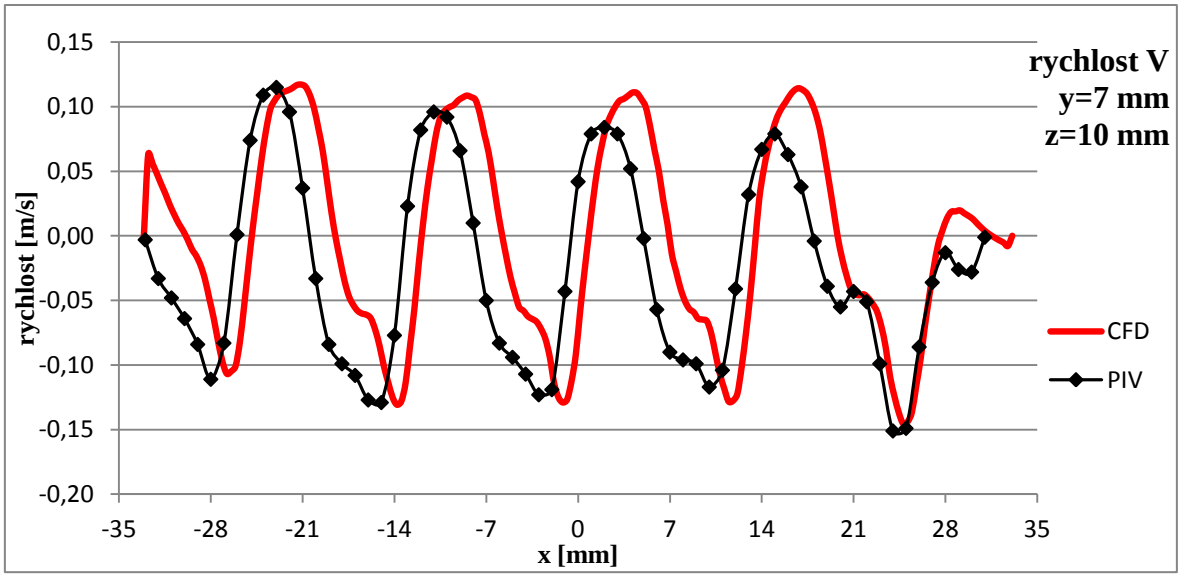
Obrázek 73 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=5 mm

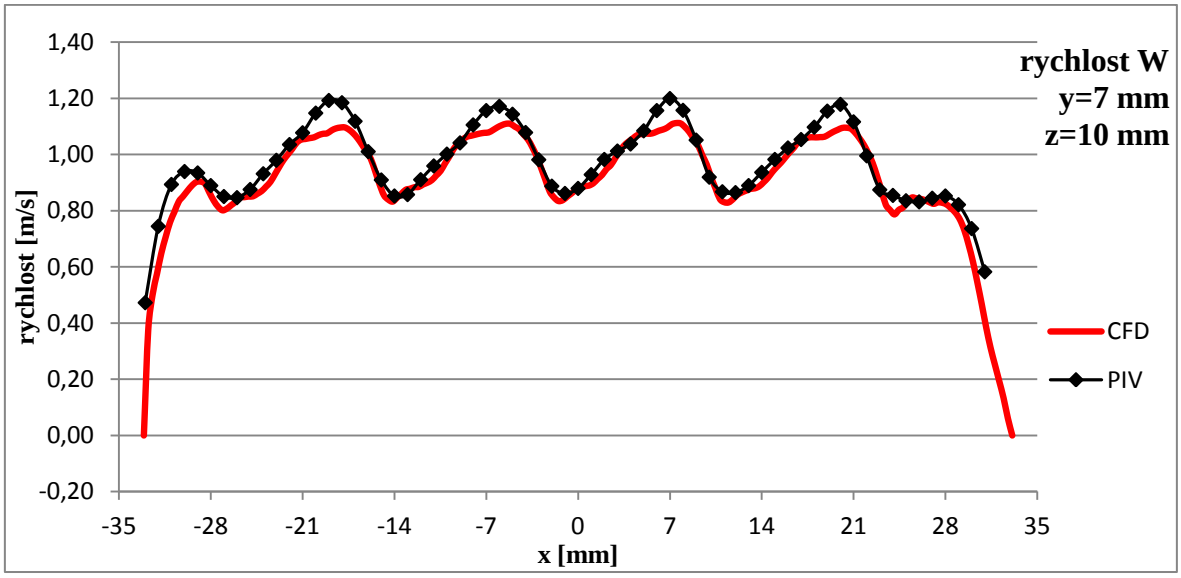
4.2.2 Vzdálenost za mřížkou z=10 mm



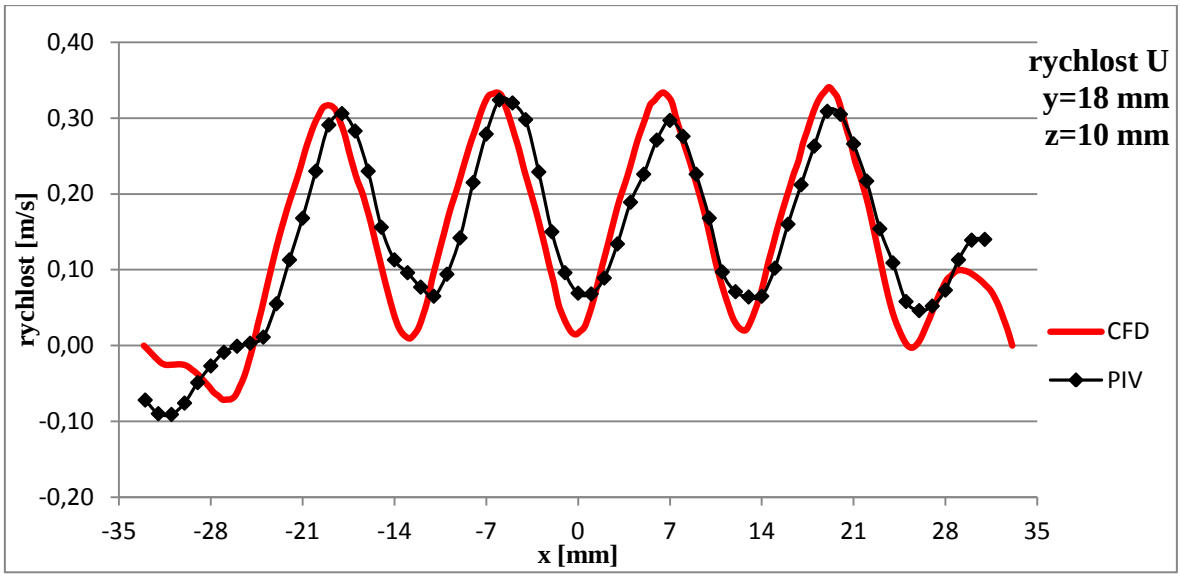
Obrázek 74 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=10 mm

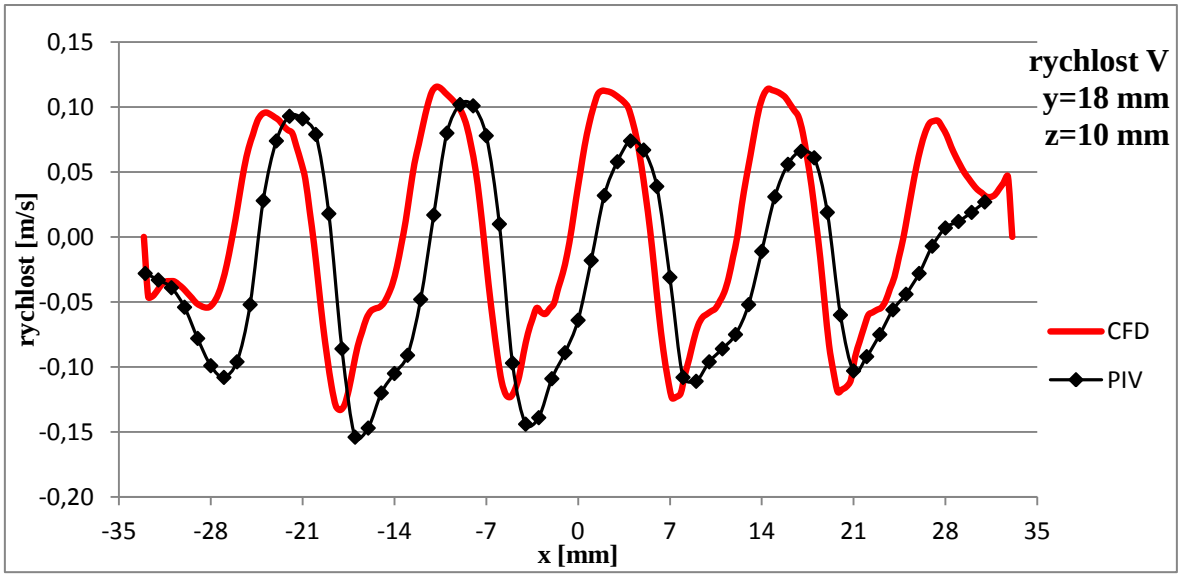


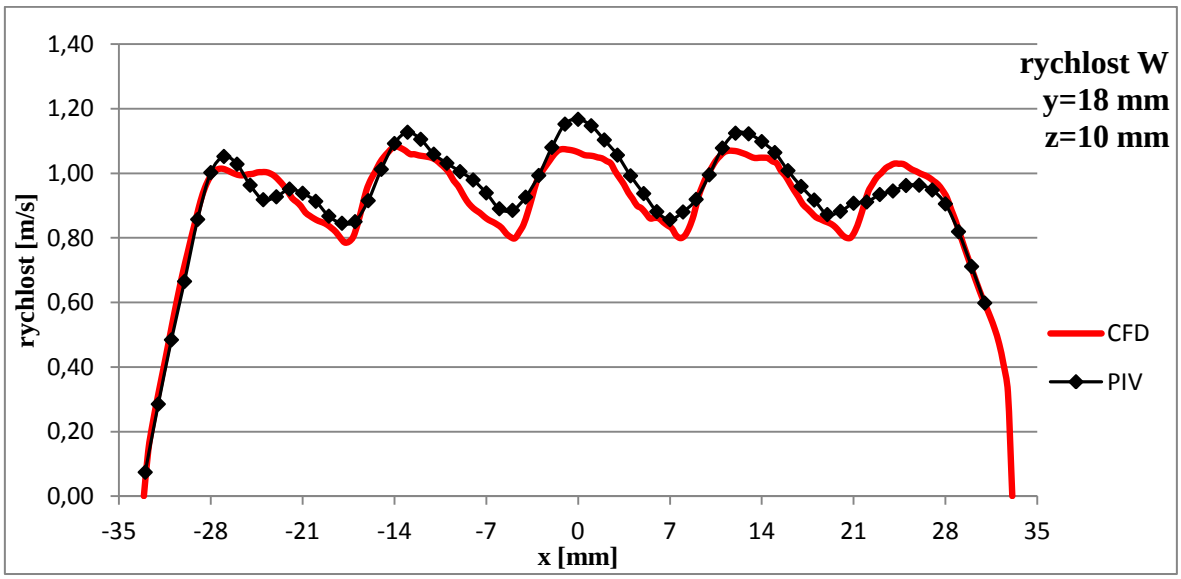




Obrázek 75 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=10 mm

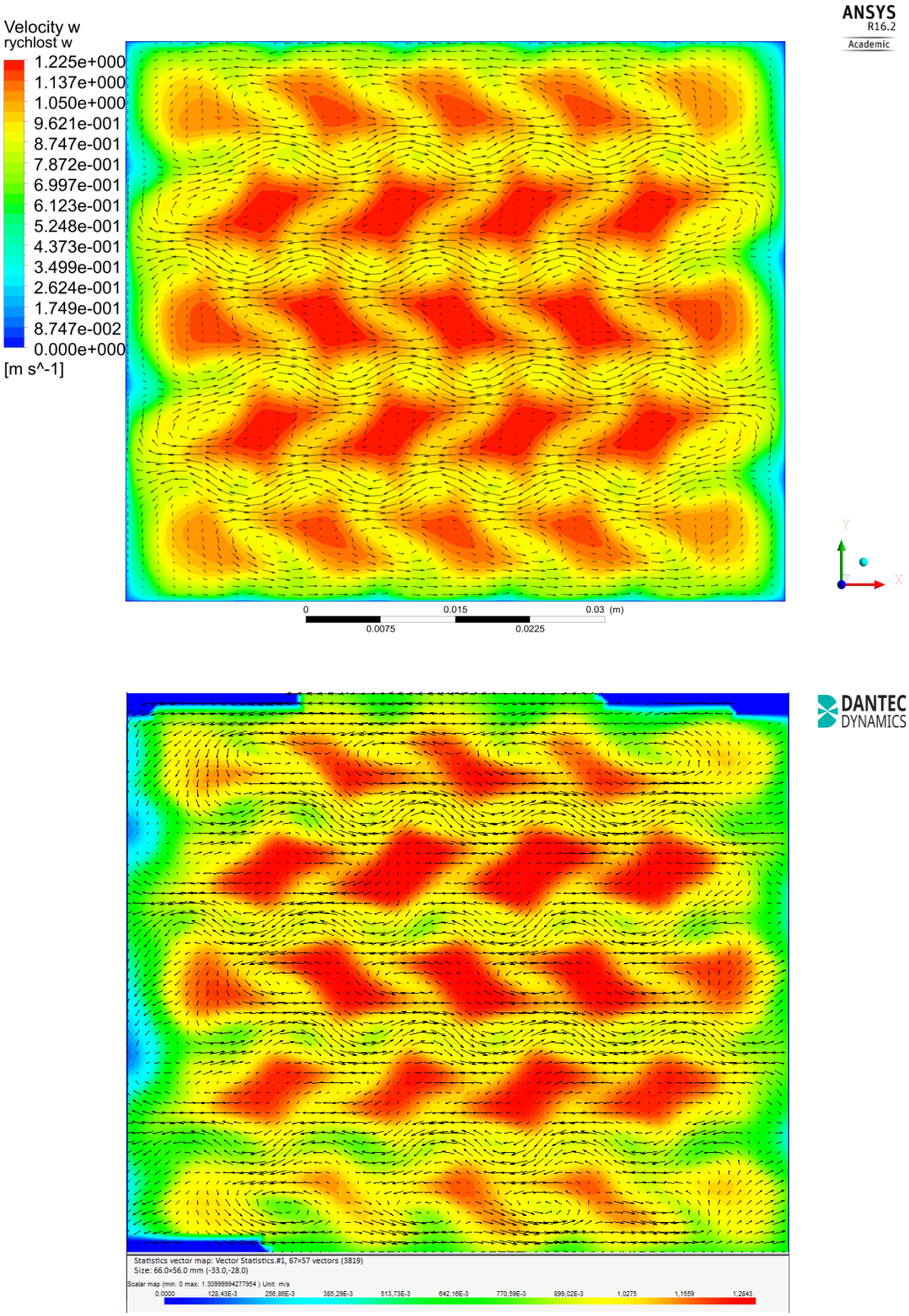




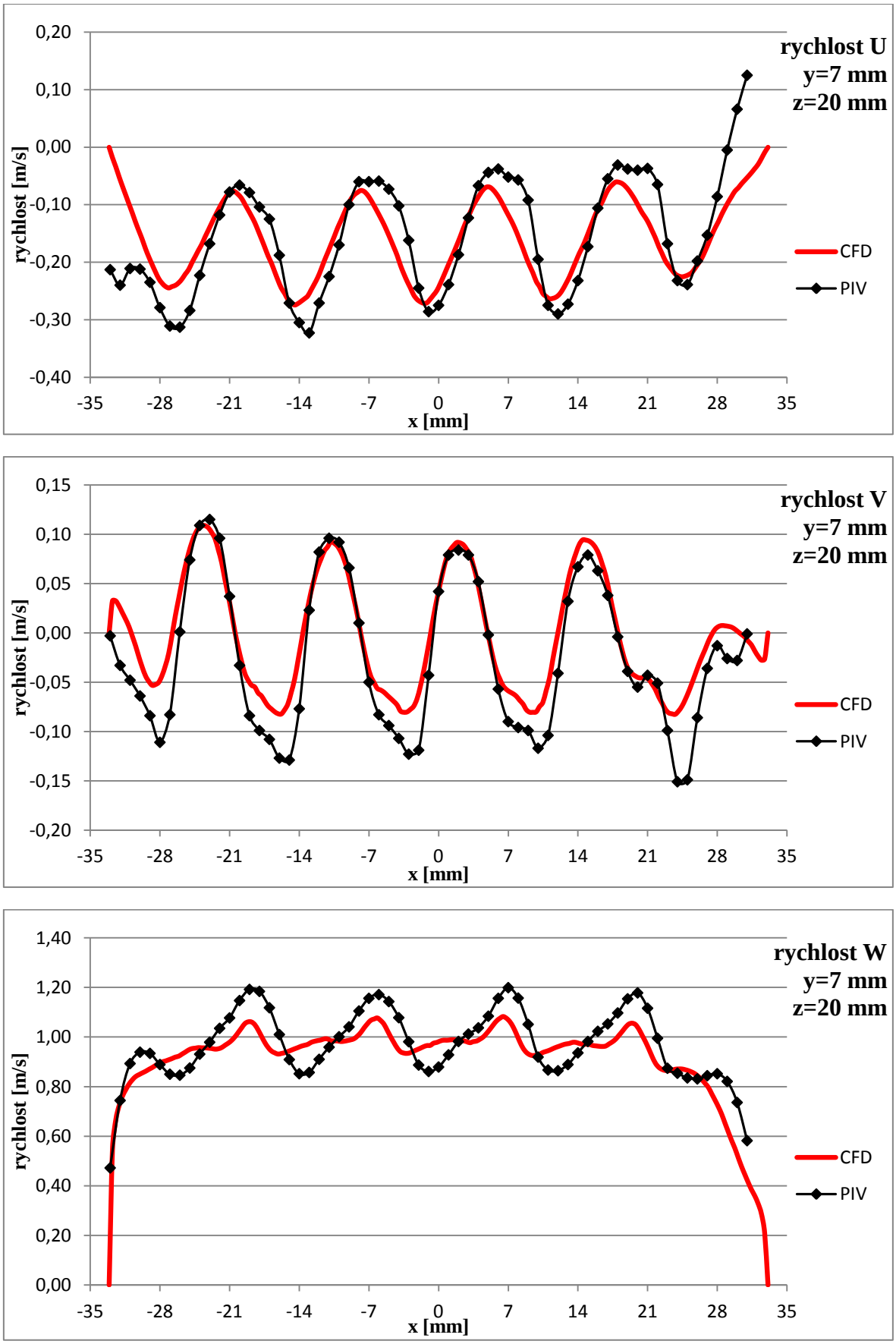


Obrázek 76 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=10 mm

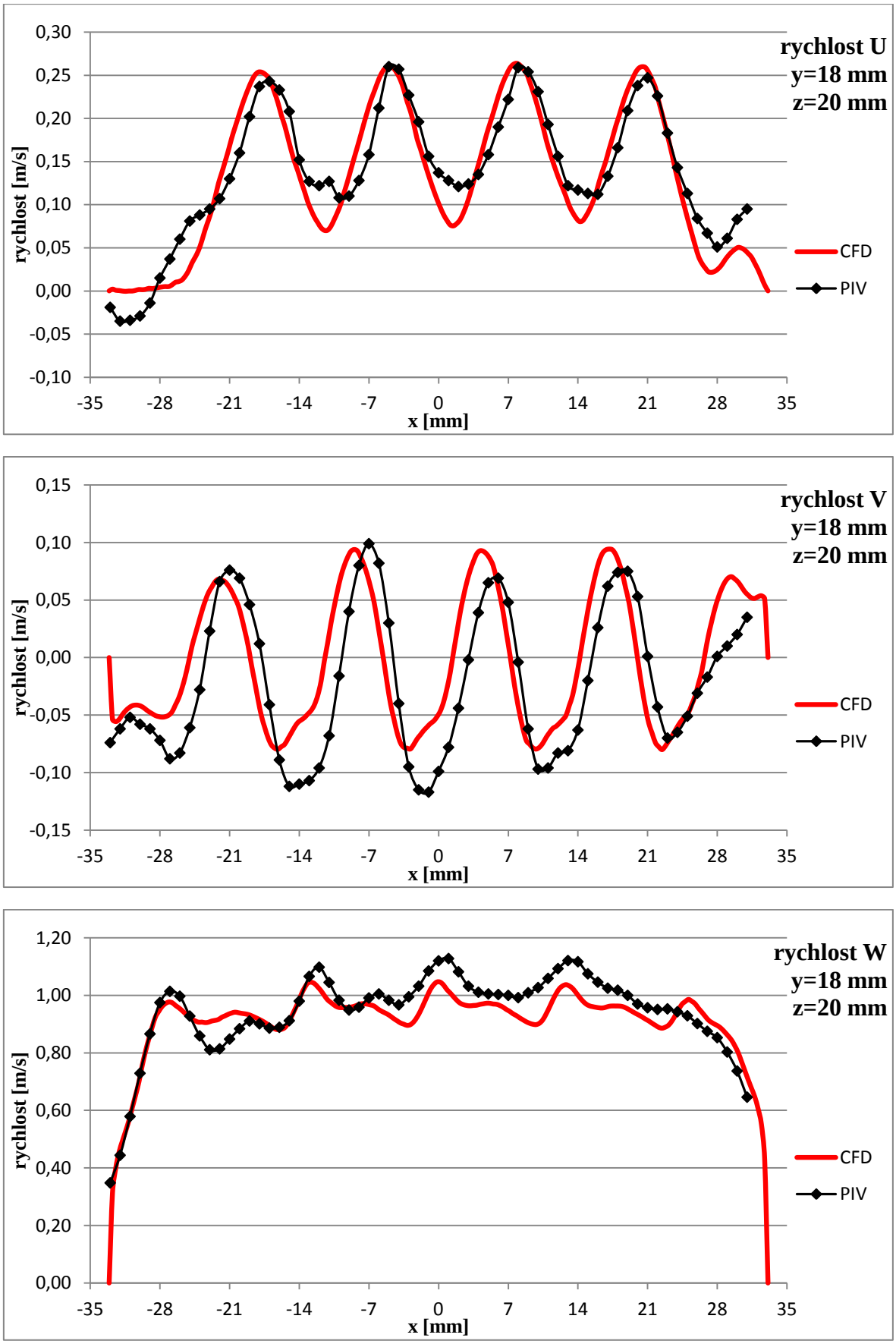
4.2.3 Vzdálenost za mřížkou z=20 mm



Obrázek 77 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=20 mm

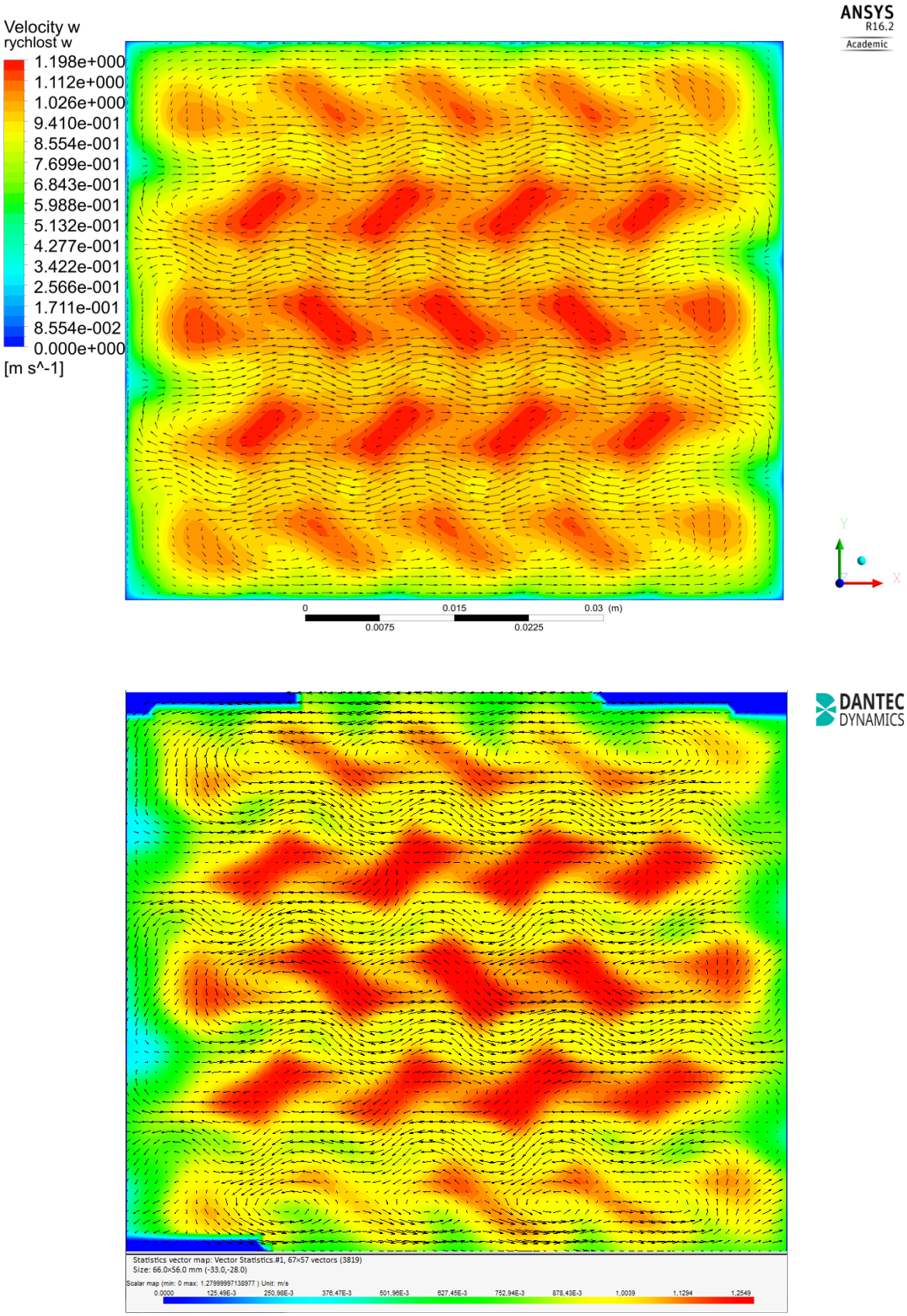


Obrázek 78 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=20 mm

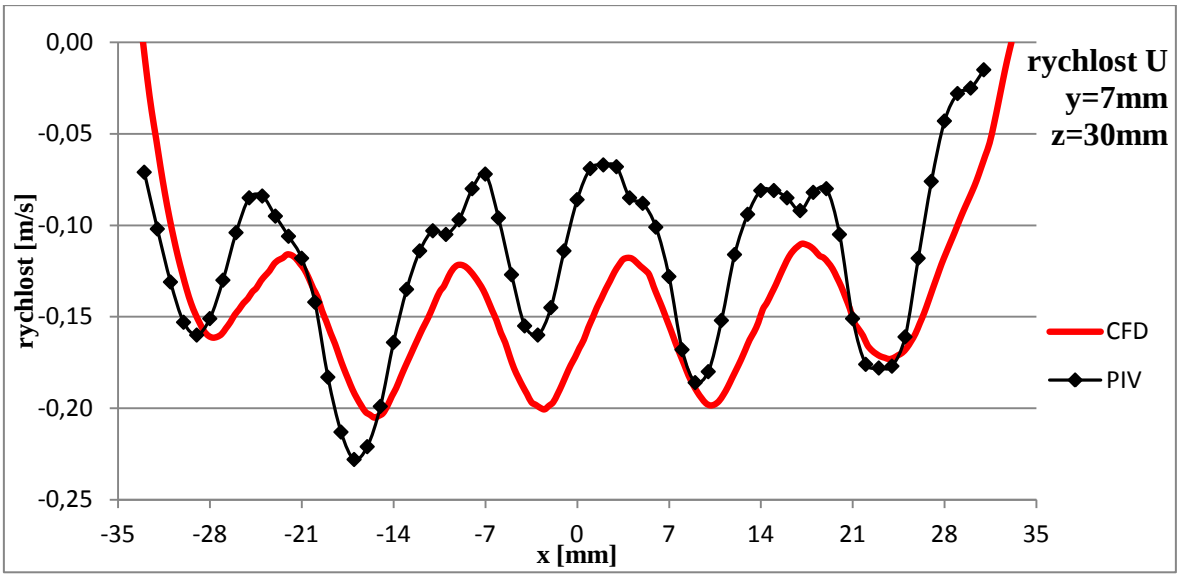


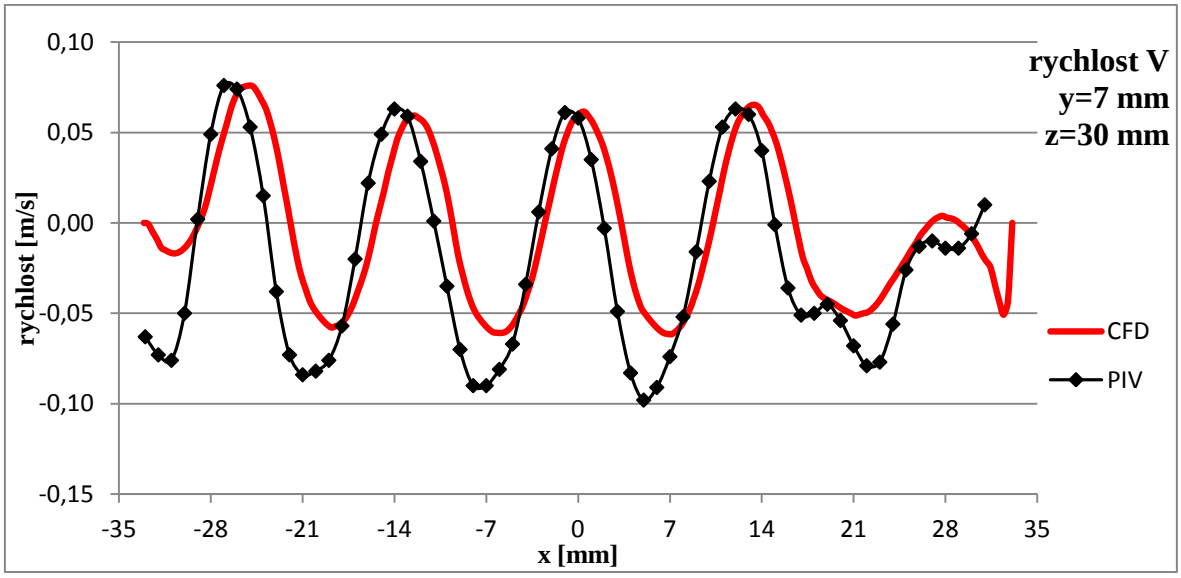
Obrázek 79 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=20 mm

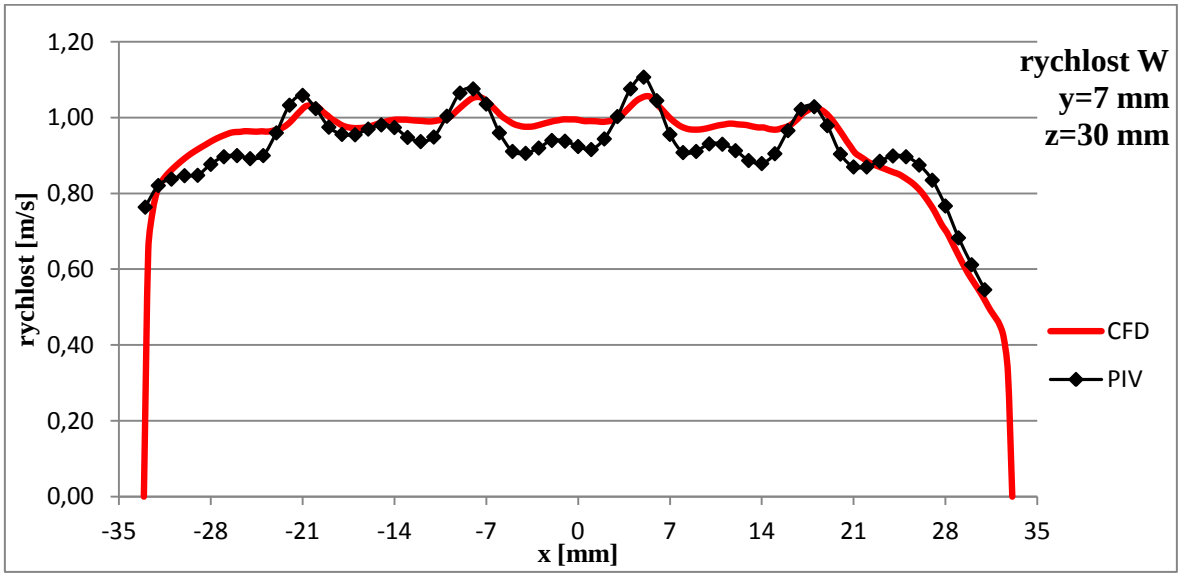
4.2.4 Vzdálenost za mřížkou z=30 mm



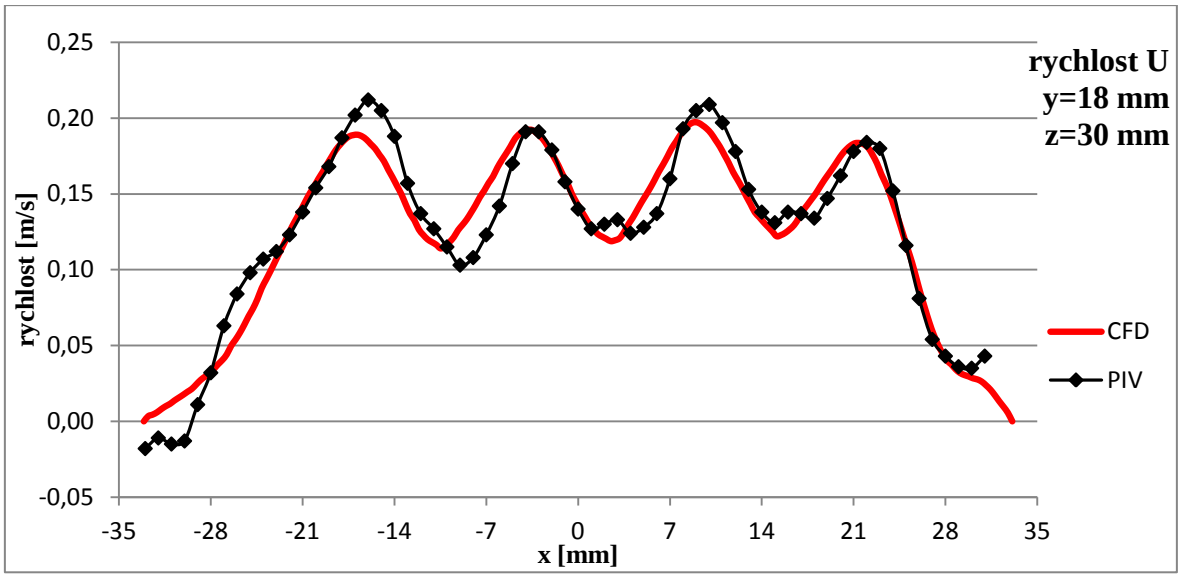
Obrázek 80 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=30 mm

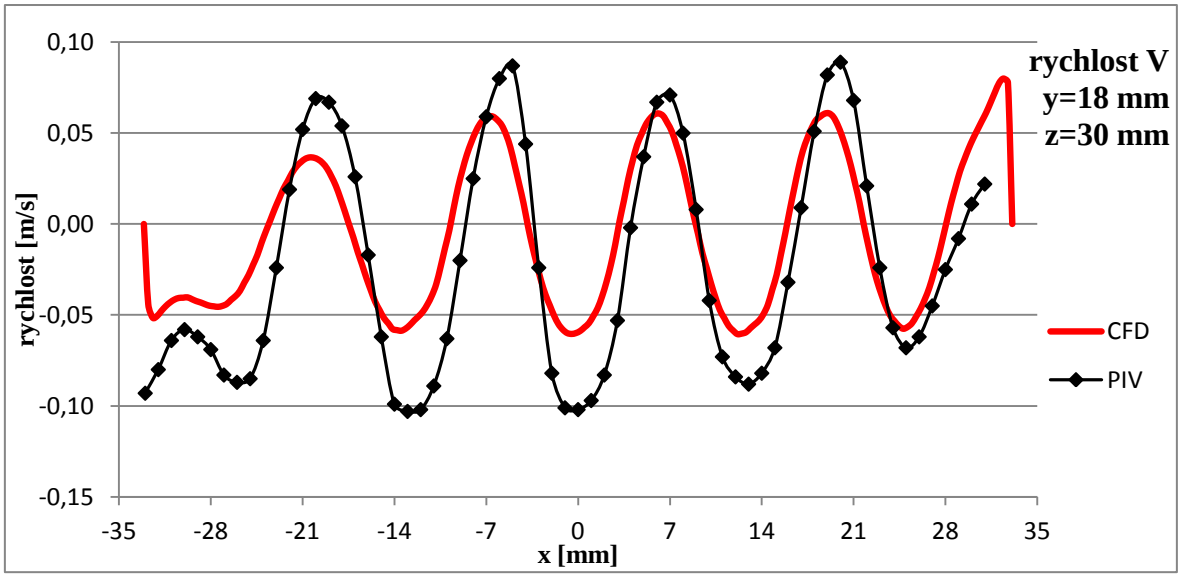


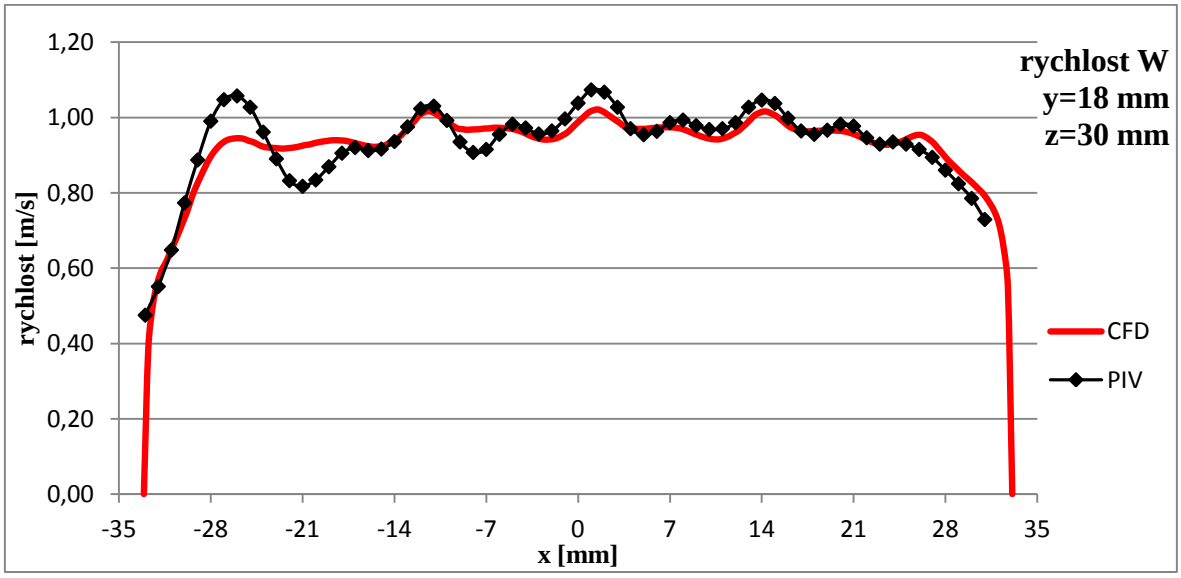




Obrázek 81 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=30 mm

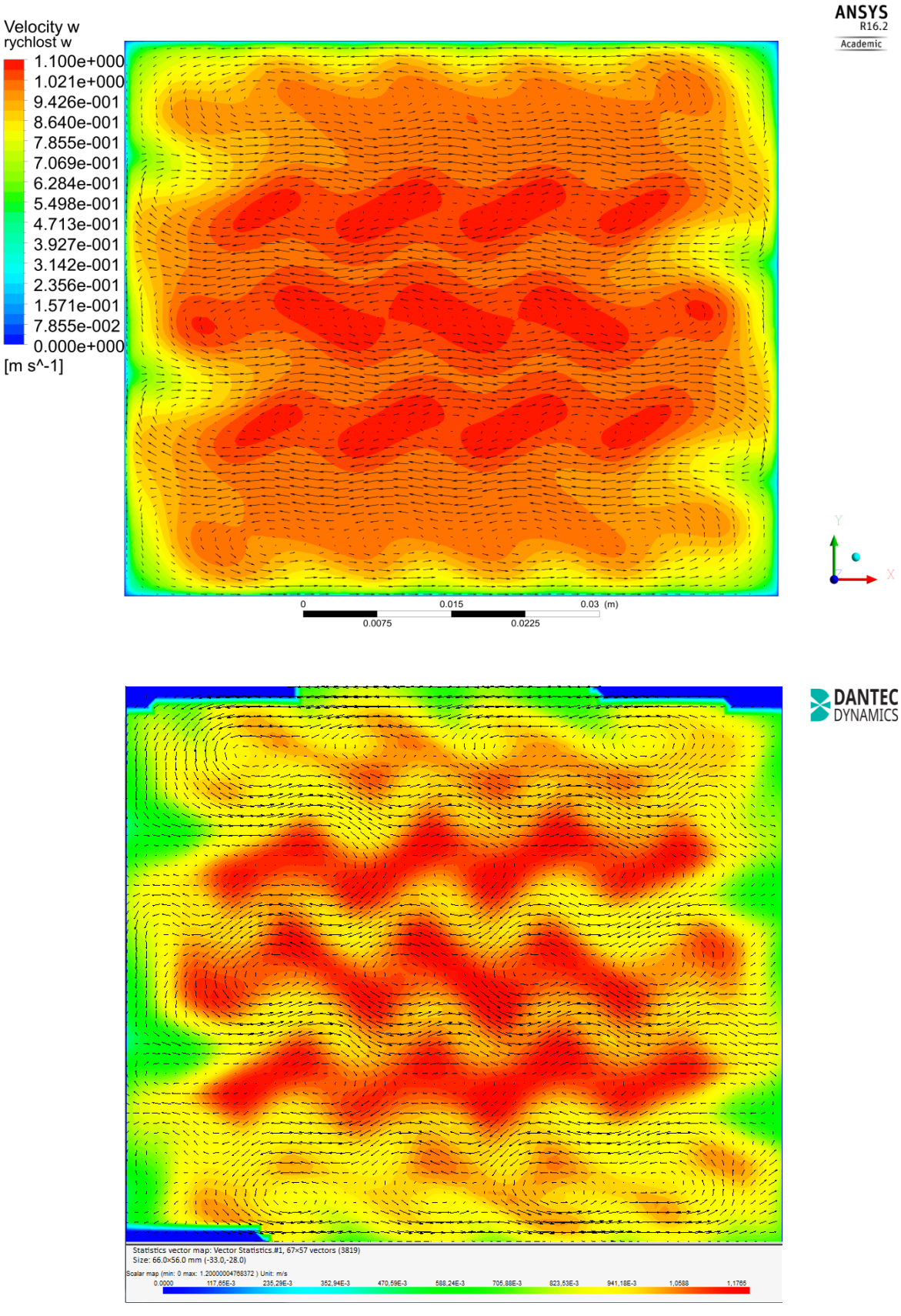




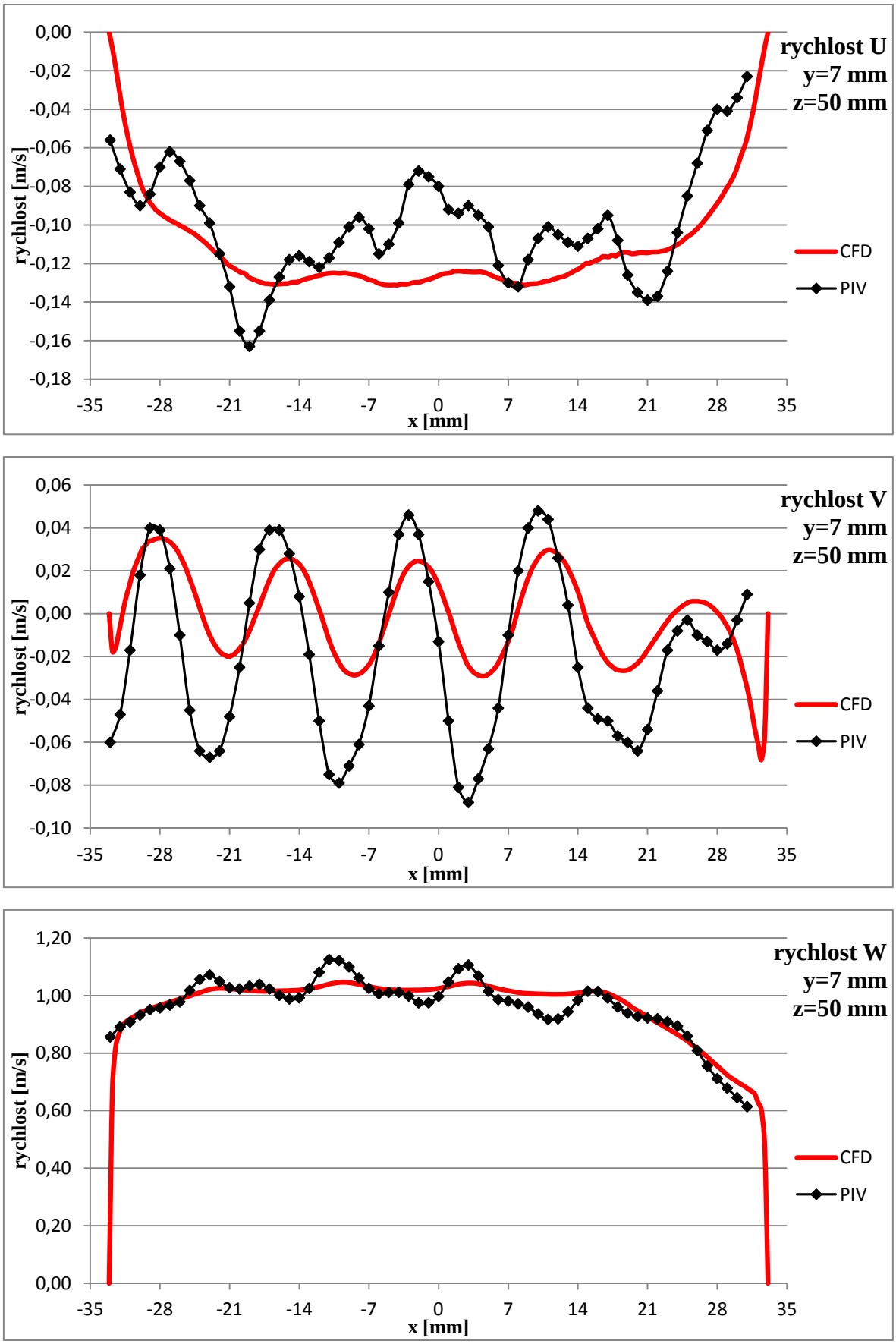


Obrázek 82 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=30 mm

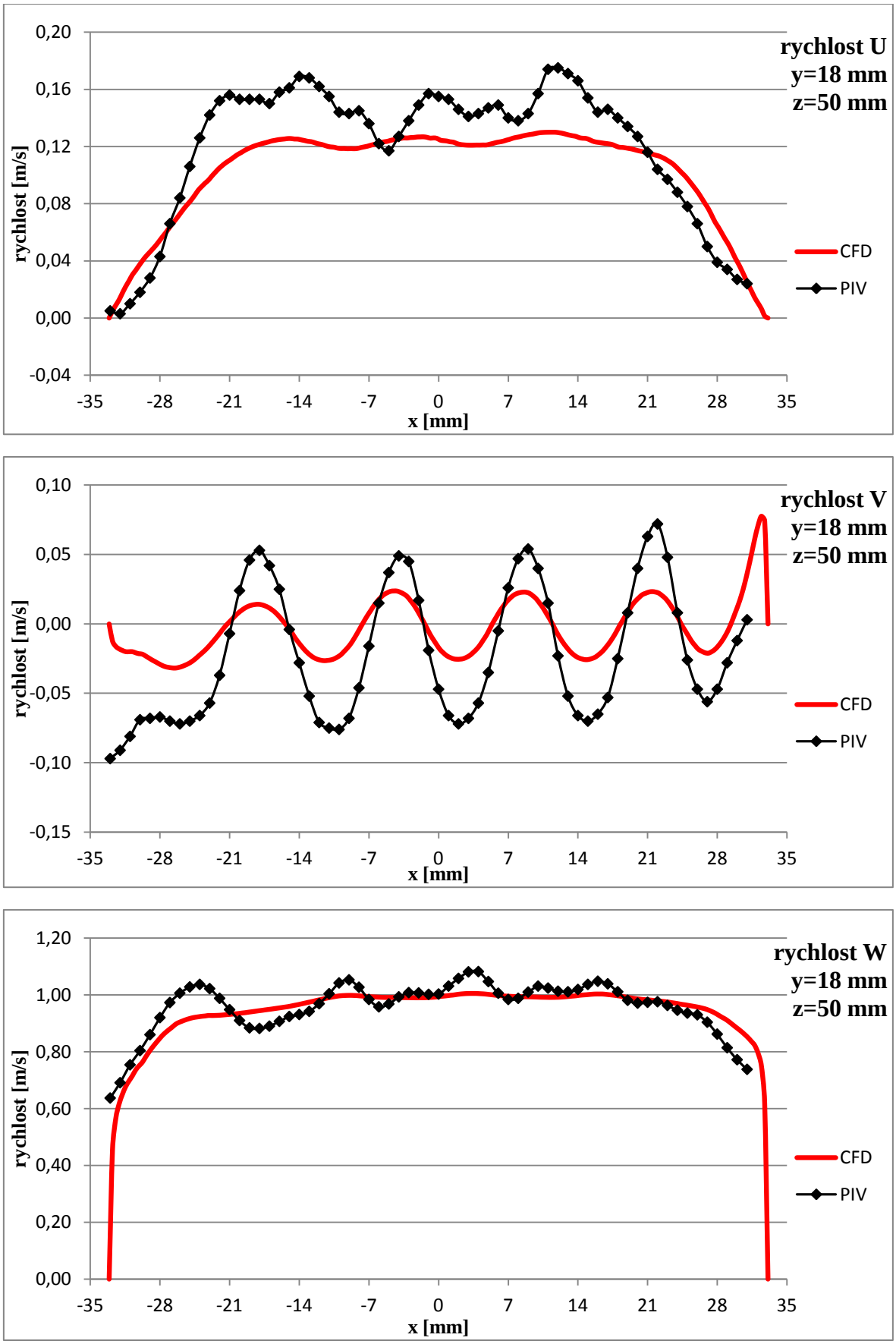
4.2.5 Vzdálenost za mřížkou z=50 mm



Obrázek 83 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z= 50mm

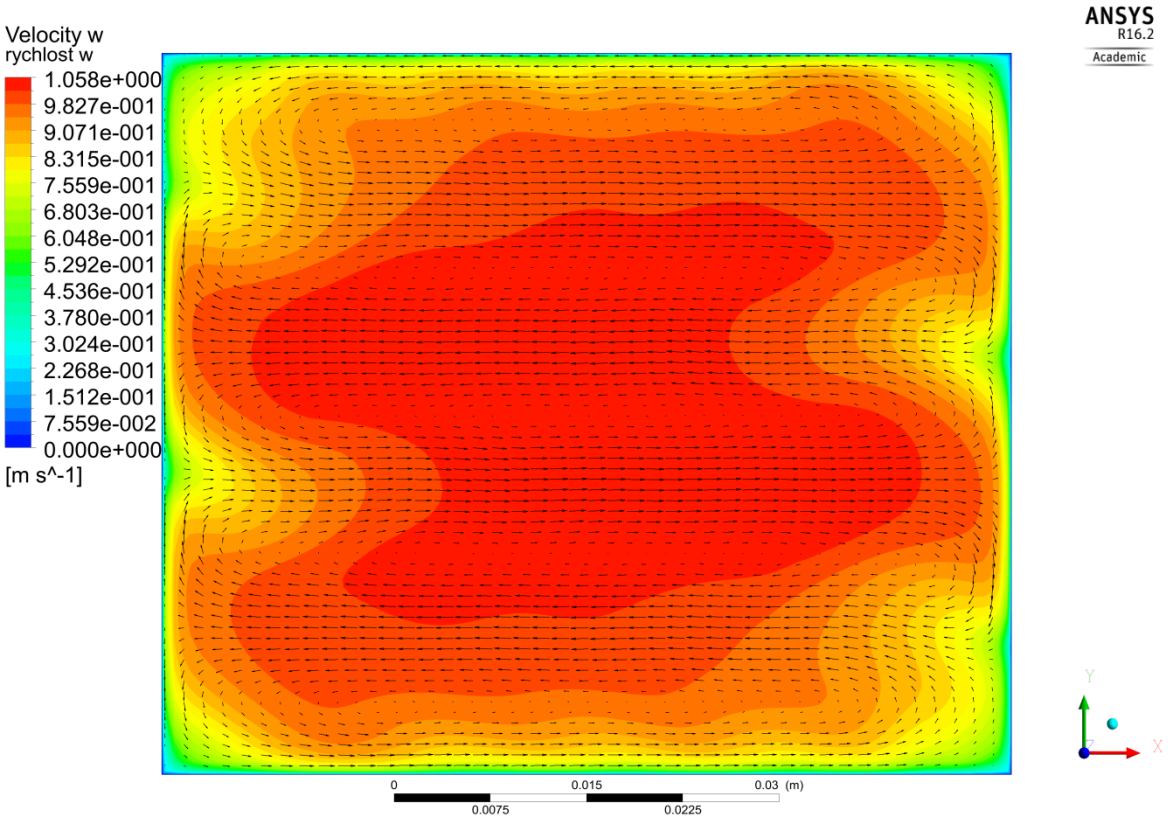


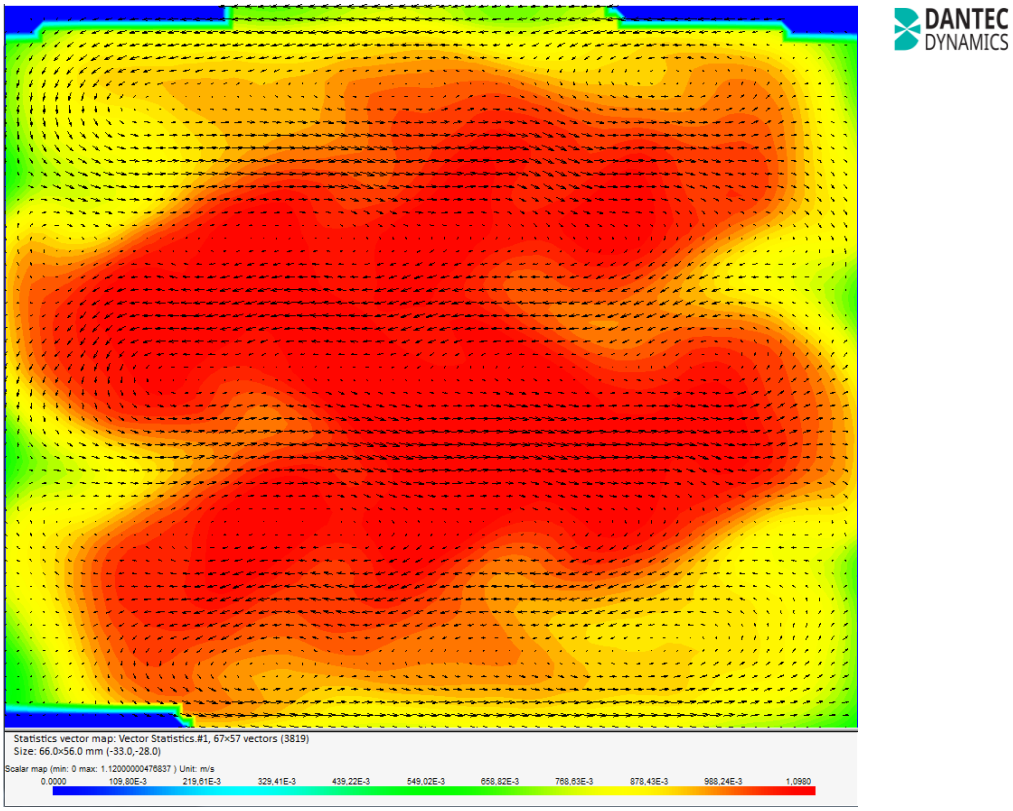
Obrázek 84 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=50 mm



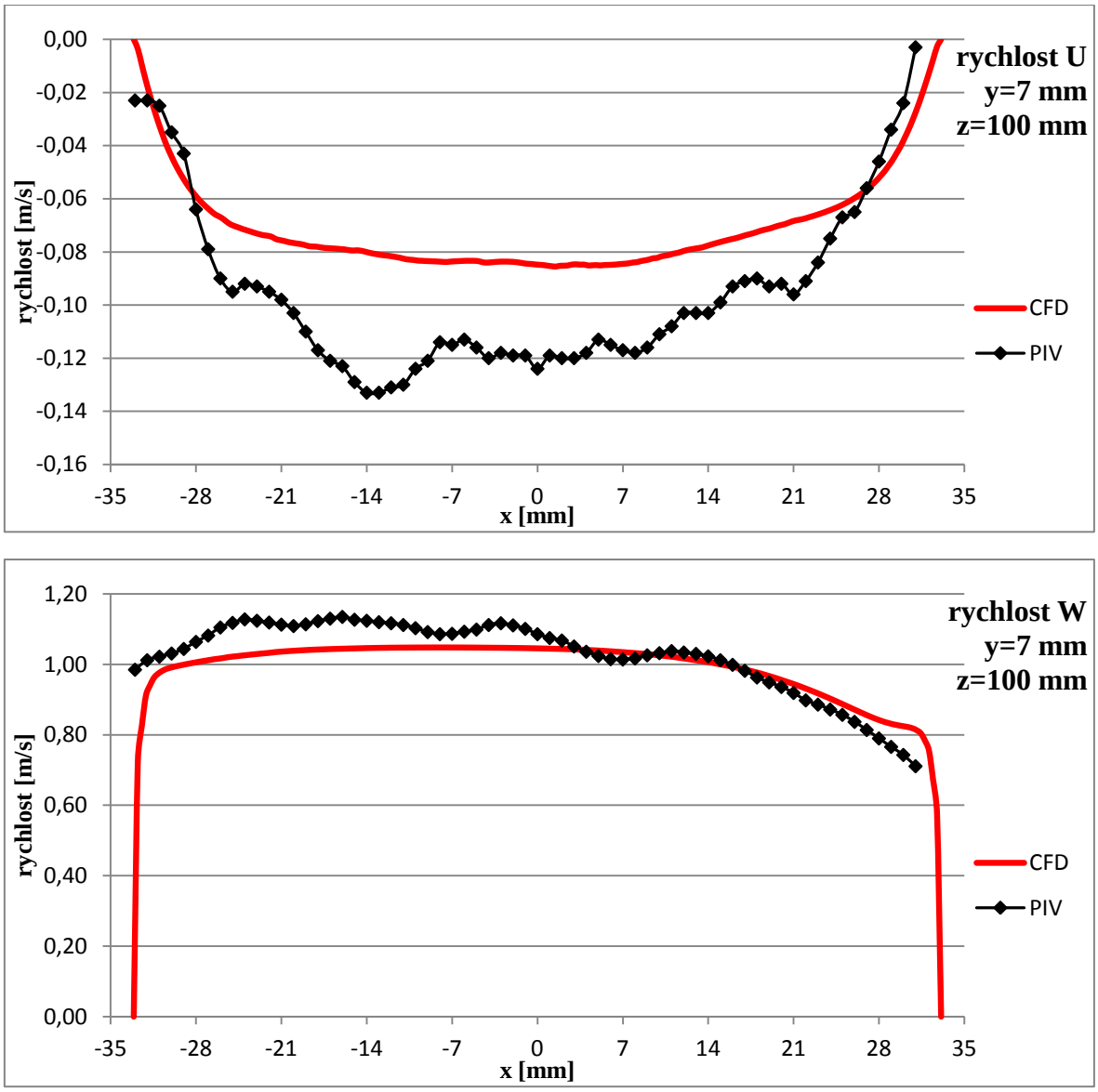
Obrázek 85 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=50 mm

4.2.6 Vzdálenost za mřížkou z=100 mm

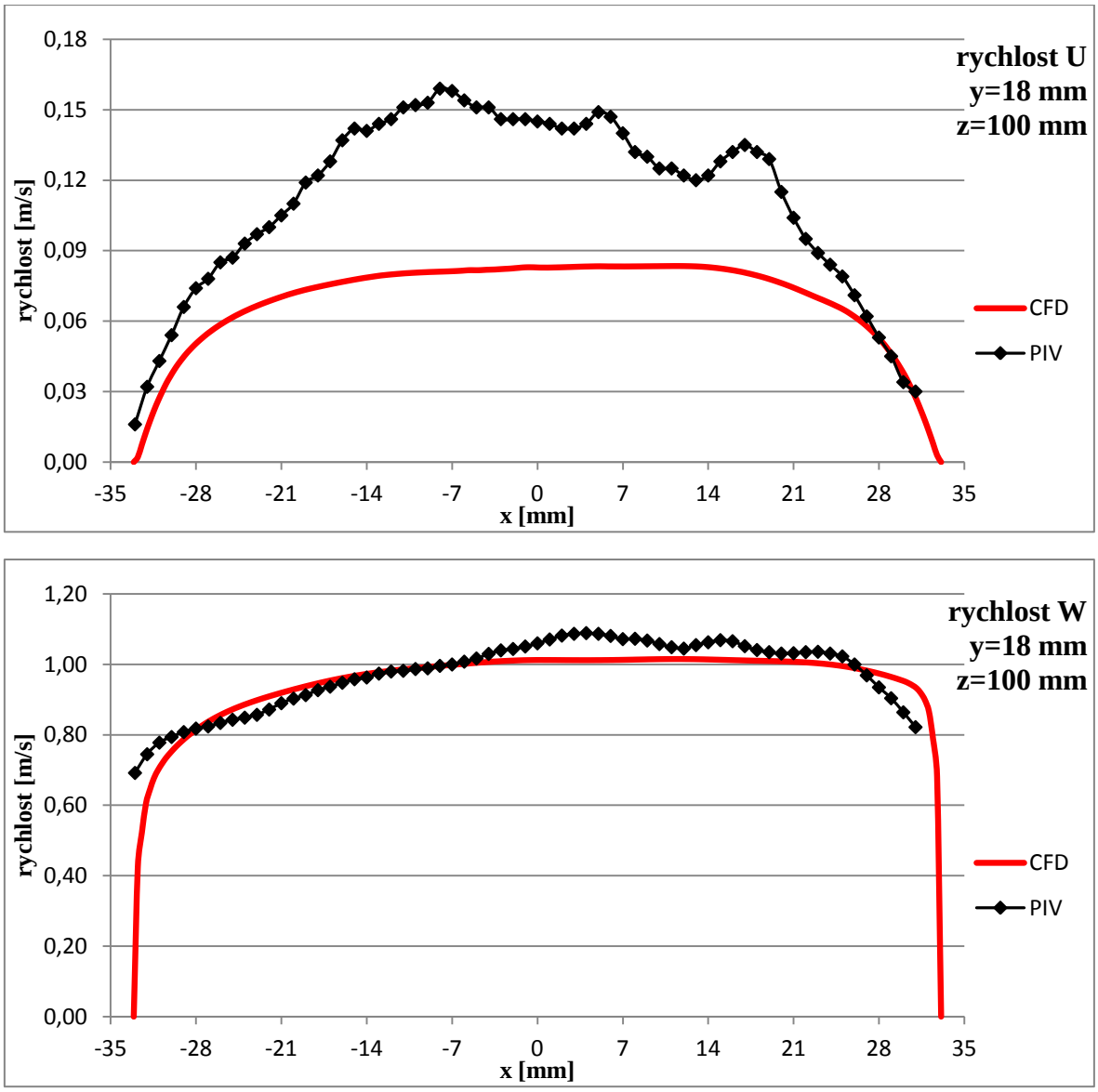




Obrázek 86 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=100 mm

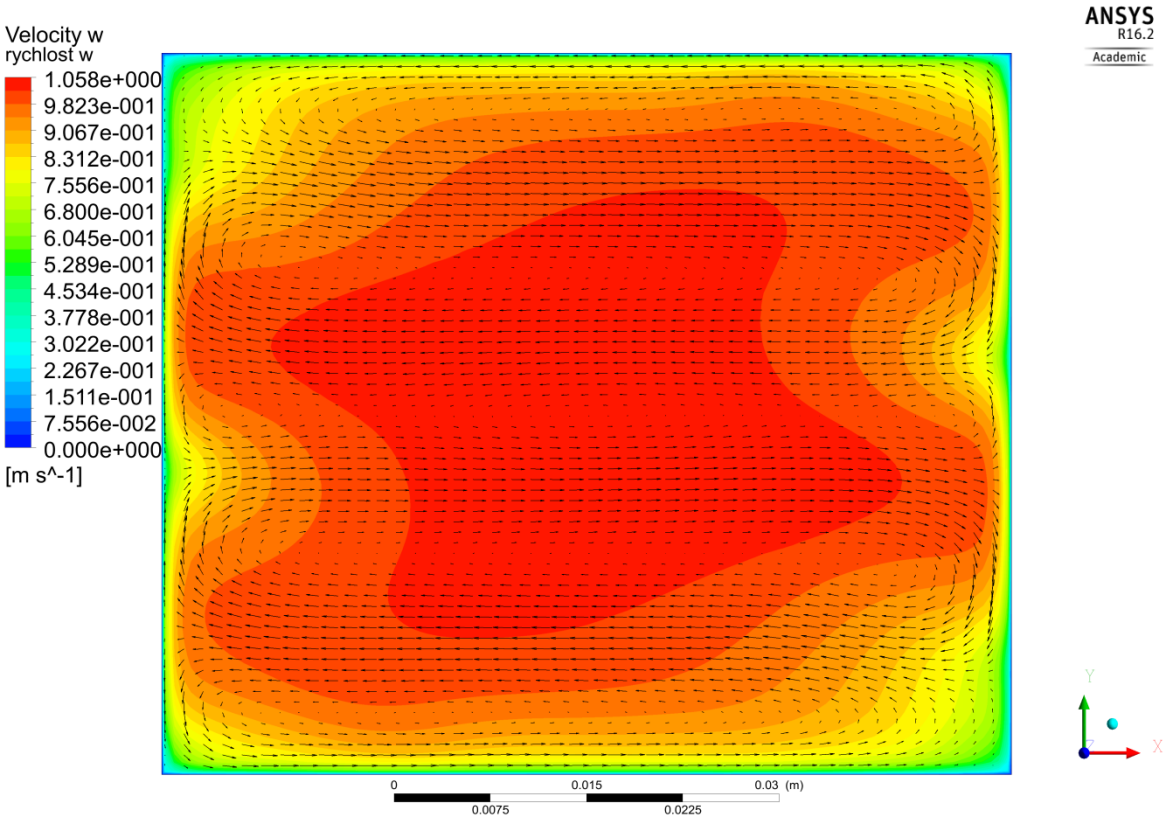


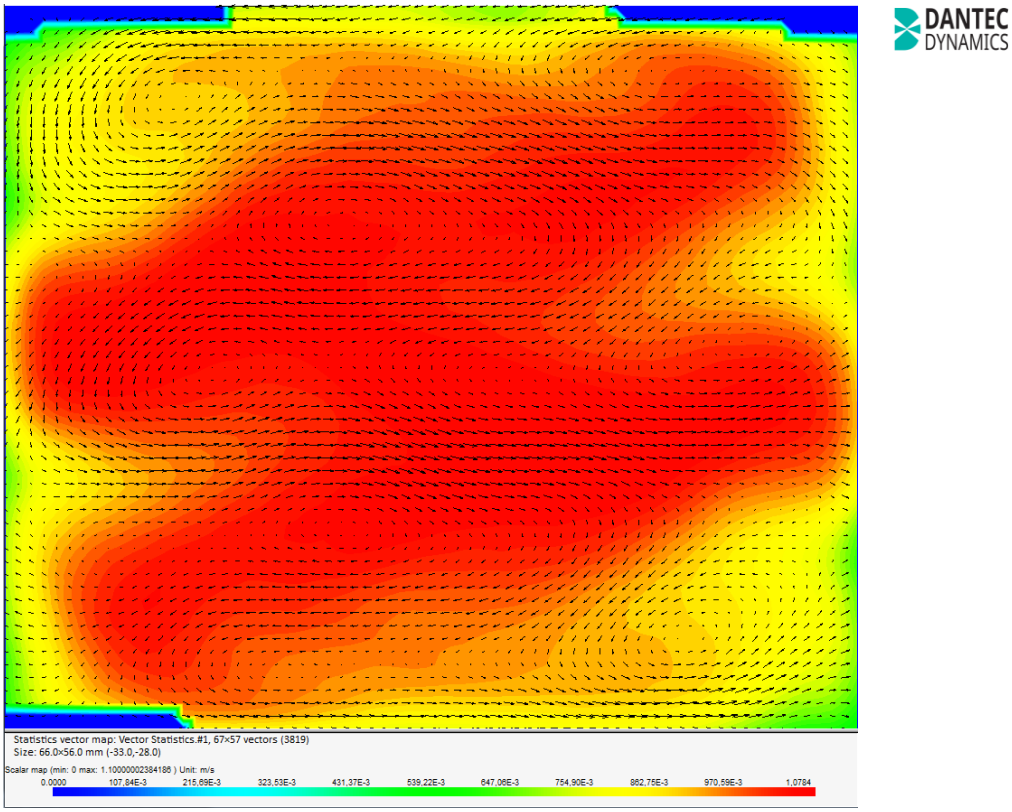
Obrázek 87 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=100 mm



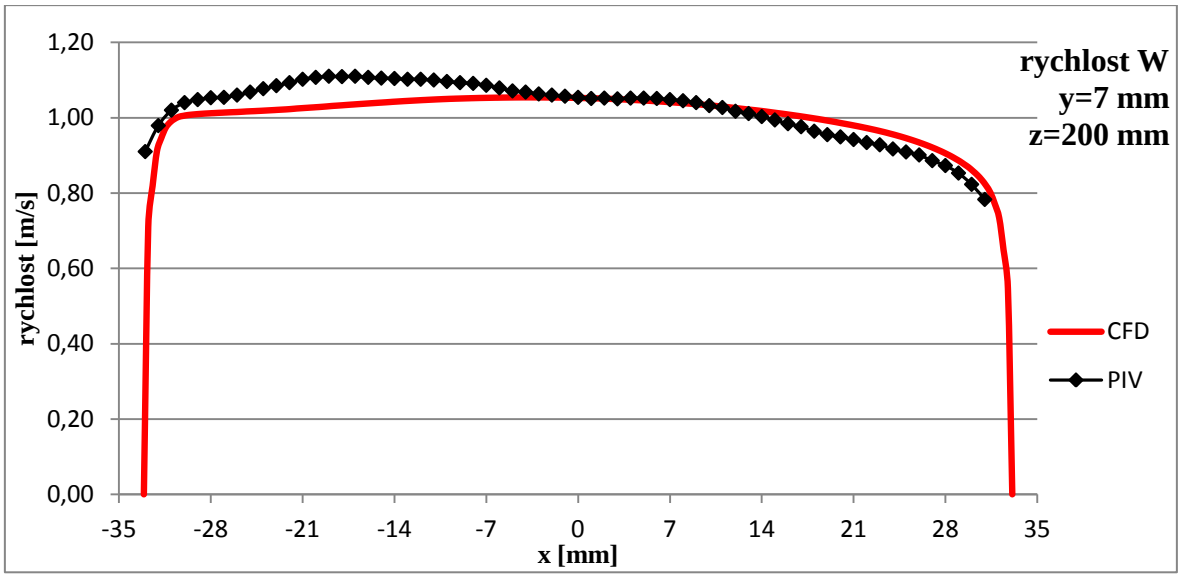
Obrázek 88 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=100 mm

4.2.7 Vzdálenost za mřížkou z=200 mm

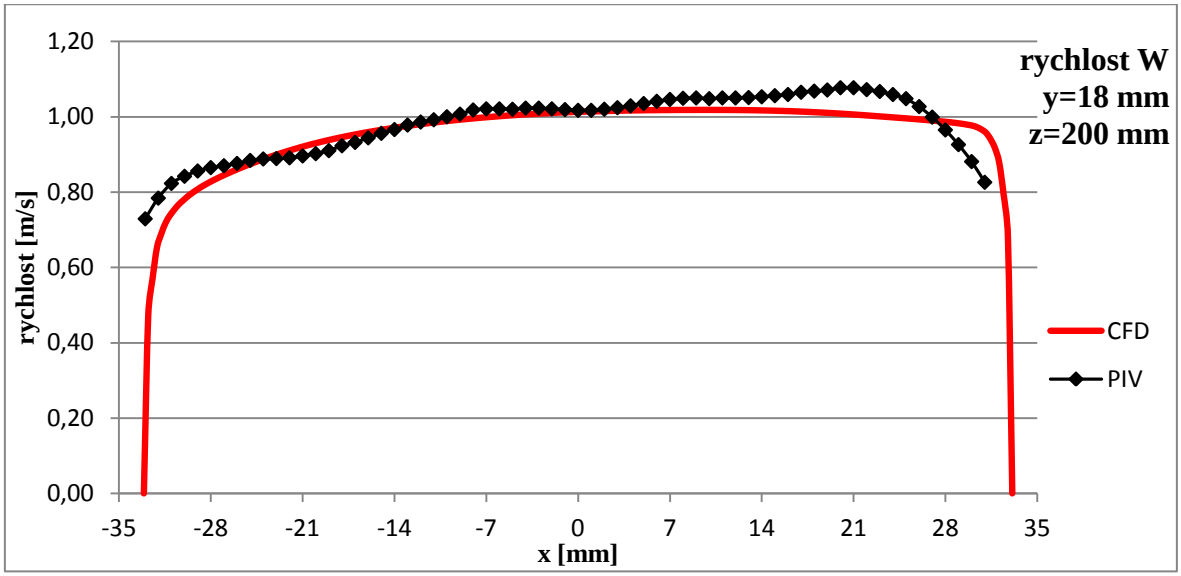




Obrázek 89 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=200 mm

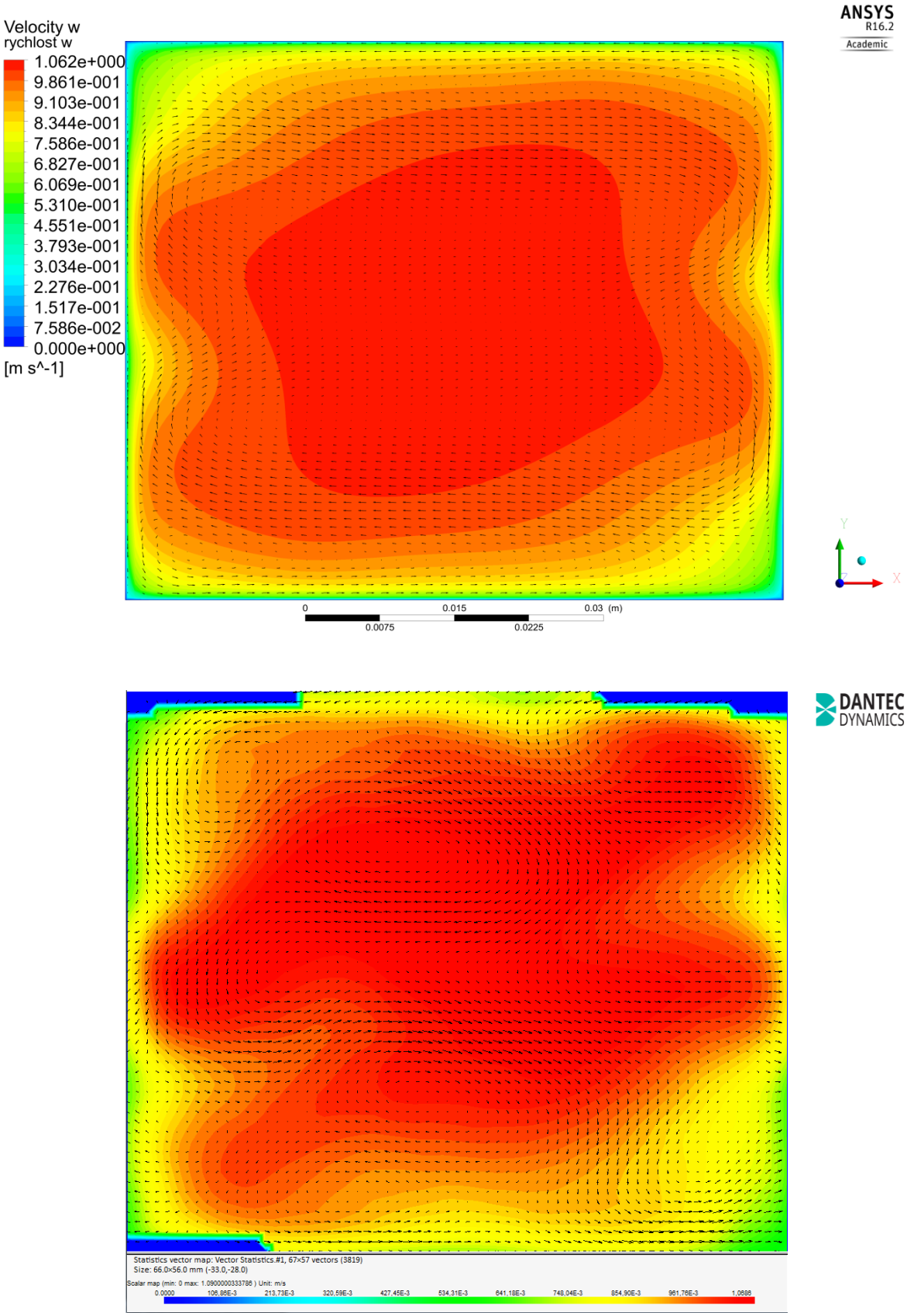


Obrázek 90 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=200 mm

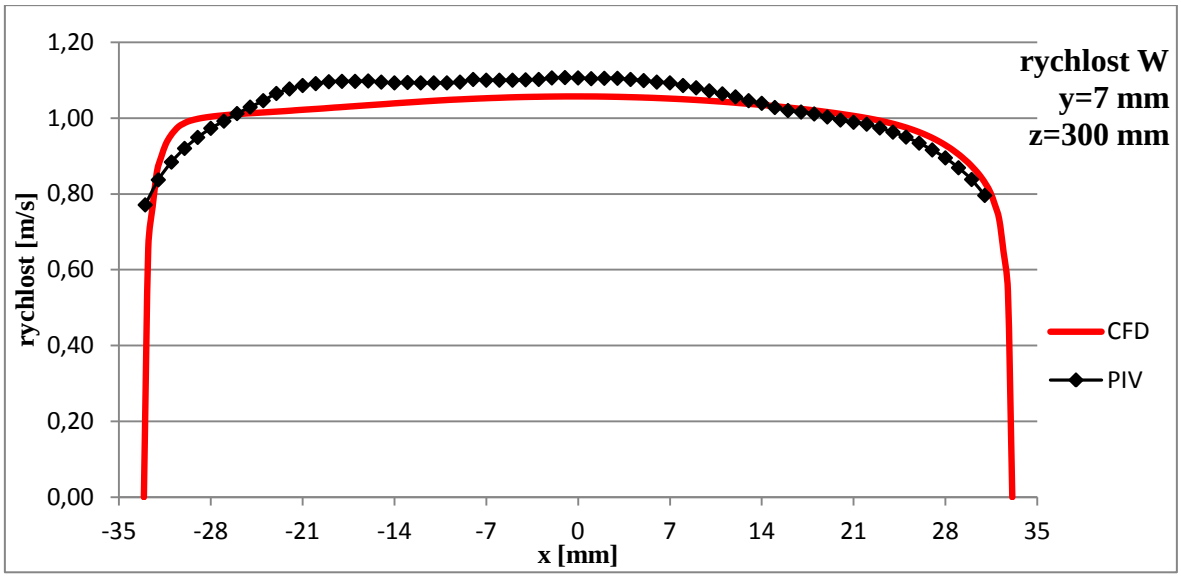


Obrázek 91 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=200 mm

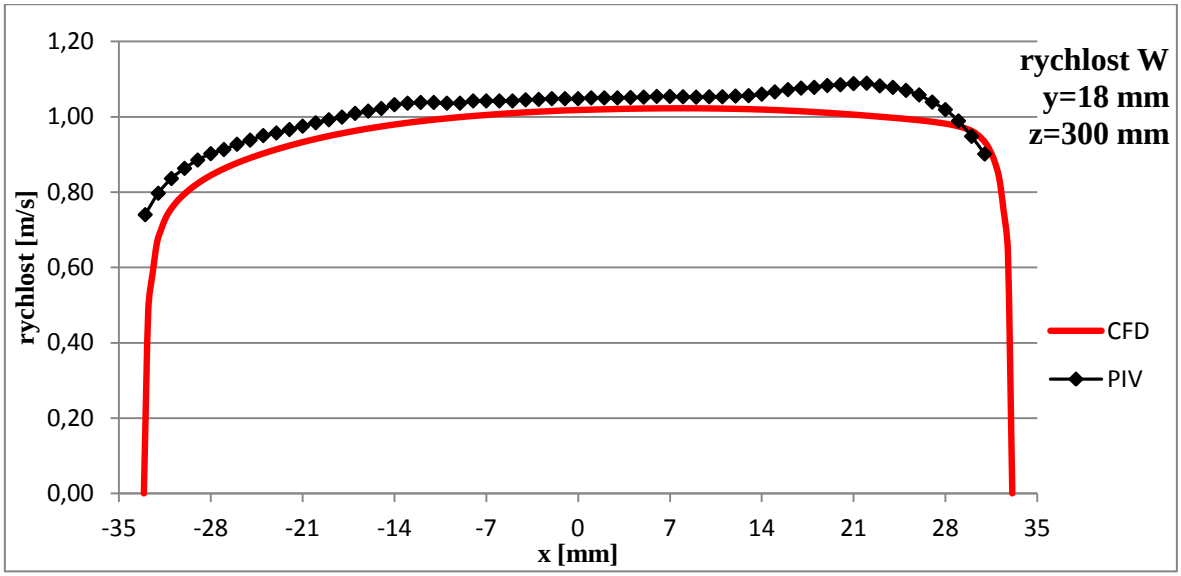
4.2.8 Vzdálenost za mřížkou z=300 mm



Obrázek 92 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=300 mm



Obrázek 93 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=7 mm, z=300 mm



Obrázek 94 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí, y=18 mm, z=300 mm

5 Závěr

Cílem práce bylo řešení proudění vody přes dva typy mísících mřížek pomocí numerické simulace s využitím softwaru *Ansys Fluent*. Bylo tedy zapotřebí zaprvé vytvořit geometrii obou mřížek, za kterými bylo proudové pole sledováno. Geometrie mřížky a kanálu, do kterého byla mřížka umístěna, byly přizpůsobovány a dimenzovány dle provedeného experimentu metodou PIV. [**1**]

Následující důležitou etapou přípravy CFD modelu byla diskretizace výpočetní oblasti. Vytvořená výpočetní síť se u obou mřížek skládala z přibližně 33 milionů konečných objemů a byla připravena pro numerický výpočet s využitím dvou turbulentních modelů (*k ω SST, k-ε Realizable*). Pro zajištění dobrých výsledků musela být provedena citlivostní analýza výpočetní sítě, při které se sledovaly rozdíly výsledků pro různé velikosti sítě.

V kapitole 3.1.3 je uvedeno podrobné nastavení úlohy v softwaru *Ansys Fluent 18.0*, ve kterém probíhal výpočet. Důležitou částí celé práce byla validace výpočtu pomocí experimentu. Tato fáze se týkala především ladění a správného nastavení použitých okrajových podmínek numerického výpočtu tak, aby výsledky dosahovaly požadované shody. Během validace byly také zjištěny odchylky skutečných rozměrů, tudíž musel být opakován proces přípravy geometrie, tvorby výpočetní sítě a výpočtu.

Bylo provedeno dvanáct numerických výpočtů (tři varianty vstupních rychlostí, dva typy mřížek, dva turbulentní modely), které byly následně porovnávány s výsledky shodné úlohy měřené na experimentálním zařízení. Prvotní porovnání ukázalo, že použití modelu *k-ω SST* není vhodné pro tuto úlohu a struktury i velikosti jednotlivých rychlosti neodpovídaly provedenému experimentu. Lepší výsledky a dobré shody s experimentem poskytovaly CFD výpočty s použitím turbulentního modelu *k-ε Realizable*, a proto byly ve výsledcích a v porovnání výsledků uvedeny pouze výsledky tohoto turbulentního *RANS* modelu.

Při porovnání výsledků CFD výpočtu a experimentu obou typů mřížky byly zjištěny některé mírné odchylky. Je zde mnoho příčin, které tyto odchylky mohou způsobovat. Pro numerický výpočet mřížek se používaly jejich ideální rozměry, úhly, zkosení, rádie apod. Proto nejpravděpodobnější příčinou mírných odchýlení výsledků mezi experimentem a CFD výpočtem mohou být právě geometrické a rozměrové výrobní nepřesnosti. Dále sem mohou vstupovat další faktory, jako jsou například odchylky způsobené metodou stanovení objemového průtoku, nebo nepřesné stanovení vlastností proudící vody. Správnost výsledků je velmi citlivá na korektním zvolení vyšetřované roviny a vyšetřovaných úseček v této rovině. Každá desetina, setina milimetru velmi ovlivňuje velikosti i průběhy jednotlivých složek rychlostí.

I přes veškeré výše zmínění možné příčiny a zdroje nepřesností či odchylek ukázalo porovnání velmi dobrou připravenost a aplikovatelnost CFD modelu na tento řešený případ. Porovnání výsledků taktéž ukázalo velmi precizní návrh, výrobu, přípravu, sestavení a provedení experimentu, se kterým se výsledky této práce srovnávaly.

Při zpracování této práce bylo mimo jiné zjištěno, že provedení korektního experimentu je mnohem více ekonomicky a časově náročné, než výpočet téže úlohy pomocí CFD programu. Avšak experiment je v některých případech nenahraditelný a slouží, jako v tomto případě, především k ověření (validaci) numerických výpočtu.

Seznam použitých zdrojů

1. KLAVÍK, P. *Fyzikální modelování proudění v palivovém souboru v aktivní zóně jaderného reaktoru*. Plzeň: 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení.

2. ZDEBOR, J. *Podpůrné materiály pro studium předmětu JEP/ KKE*. Plzeň: 2016.

3. SKUPINA ČEZ. *Hlaví technické údaje- Jaderná energetika* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/2.html

4. HEZOUČKÝ, F. a S. ŠTĚCH. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními …*. Plzeň: ZČU FST, 2015. ISBN 978-80-261-0548-0.

5. Wikipedia. *Nucleate boiling - Wikipedia* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nucleate_boiling

6. NRC: Glossary. *Departure from nuclear boiling (DNB)* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/departure-from-nucleate-boiling-dnb.html

7. NRC: Glossary. *Departure from nucleate boiling ratio (DNBR)* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/departure-from-nucleate-boiling-ratio-dnbr.html

8. Gidropress Podolsk. *РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА С ВВЭР-1000 (В-392)* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: http://www.gidropress.podolsk.ru/ru/projects/wwer1000.php

9. JSC Machine-Building Plant ZiO-Podolsk. *Steam generator for NPP with water-water power reactors* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: http://www.rusenergomash.ru/eng/production/ob-atom/1/1/

10. SAMOILOV, O. et al. IAEA - International Atomic Energy Agency. In: *TVSA-12 Fuel Assembly.Thermohydraulic Characteristics of the TVSA-12 with Mixing Grids* [online]. [cit. 2017-Duben-18]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=reportnumber:%22INIS-BG--1427%22

11. SAMOILOV, O. et al. IAEA - International Atomic Energy Agency. In: *TVSA-T fuel asssembly for "Temelin" NPP. Main results of design and safety analyses. Trends of …* [online]. [cit. 2017-Duben-18].

12. JAHODA, M. Ústav chemického inženýrství. In: *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [cit. 2017-duben-20]. Dostupné z: http://www.uchi.vscht.cz/uploads/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf

13. KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin, Fluent, CFX*.. Ostrava: VŠB - Technická univerzita ostrava, 2008.

14. BLEJCHAŘ, T. *Turbulence - Modelování proudění - CFX*.. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010.

15. ANSYS. *Turbulence modeling - lecture 6*. 2010. Přednáška. Ansys, Inc. Proprietry.

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Závislost teplotního rozdílu na hustotě přestupujícího tepelného toku [**8**]..... 15
Obrázek 2 – Zařízení primárního okruhu reaktoru VVER 1000 [**4**] 17
Obrázek 3 – Jaderný reaktor VVER 1000 [**2**] 18
Obrázek 4 – Schéma a popis kompenzátoru objemu [**2**] 19
Obrázek 5 – Skutečné provedení kompenzátoru objemu [**2**] 19
Obrázek 6 – Schéma horizontálního parogenerátoru použitého na VVER 1000 [**5**] 20
Obrázek 7 – Skutečné provedení parogenerátoru pro JE Temelín [**2**] 20
Obrázek 8 – Hlavní cirkulační čerpadlo pro VVER 1000 [**2**] 21
Obrázek 9 – Palivový soubor VVANTAGE-6 [**2**] 22
Obrázek 10 – Palivový soubor TVSA-T mod.1 [**2**]..... 22
Obrázek 11 – Uchycení palivových proutků v palivovém souboru TVSA-T mod.1 [**2**] 23
Obrázek 12 – Distanční mřížka a buňka distanční mřížky palivového souboru [**2**] 23
Obrázek 13 – Schéma mísící mřížky - typ „swirling" [**2**] 23
Obrázek 14 – Palivový soubor TVSA-T mod. 1 a jednotlivé konstrukční části [**2**]..... 24
Obrázek 15 – Palivový soubor TVSA-T mod. 2 a použité distanční a míchací mřížky [**2**] 25
Obrázek 16 – Mísící mřížky v TVSA-T mod. 1(vlevo) a TVSA-T mod. 2 (vpravo) [**6**].... 26
Obrázek 17 – Kritický výkon závislý na průtoku – výsledky firmy TVEL [**6**]..... 26
Obrázek 18 – Metoda konečných objemů [**12**] 27
Obrázek 19 – Metody modelování turbulence [**14**]..... 28
Obrázek 20 – Vizualizace finálního 3D modelu mřížky mod. 1 29
Obrázek 21 – Vizualizace finálního 3D modelu mřížky mod. 2 30
Obrázek 22 – Pohled na geometrii mřížky mod. 1 – Ansys DesignModeler 30
Obrázek 23 – Pohled na tetrahedrální výpočetní síť v oblasti mřížky 31
Obrázek 24 – Detailní pohled na mezní vrstvu v oblasti mřížky 32
Obrázek 25 – Konformní přechod mezi tetrahedrální a hexahedrální sítí..... 32
Obrázek 26 – Počet buněk sítě – mod. 1 34
Obrázek 27 – Posouzení kvality sítě – Skewness – mod. 1..... 34
Obrázek 28 – Posouzení kvality sítě – Aspect Ratio – mod. 1..... 34
Obrázek 29 – Počet buněk sítě – mod. 2 35
Obrázek 30 – Posouzení kvality sítě – Skewness – mod. 2..... 35
Obrázek 31 – Posouzení kvality sítě – Aspect Ratio – mod. 2..... 35
Obrázek 32 – Ukázka průběhu residuí, tlaku a hmotnostního toku během výpočtu 38
Obrázek 33 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – streamlines 39
Obrázek 34 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour, rovina yz 40
Obrázek 35 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour, rovina xz 40
Obrázek 36 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour,vectors , z=3 mm 41
Obrázek 37 – Výsledky CFD – mřížka mod. 1, rychlosti – contour, vectors , z=15 mm ... 42
Obrázek 38 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – streamlines 43
Obrázek 39 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour, rovina yz 44
Obrázek 40 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour, rovina xz 44
Obrázek 41 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour,vectors , z=3 mm 45
Obrázek 42 – Výsledky CFD – mřížka mod. 2, rychlosti – contour,vectors , z=15 mm 46
Obrázek 43 – Vyšetřované vzdálenosti za mřížkou mod. 1 48
Obrázek 44 – Vyšetřované úsečky a souřadnicový systém – mřížka mod. 1..... 48
Obrázek 45 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=5 mm 50
Obrázek 46 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=5 mm..... 51
Obrázek 47 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=5 mm..... 52

Obrázek 48 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=10 mm 53
Obrázek 49 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=10 mm..... 54
Obrázek 50 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=10 mm... 55
Obrázek 51 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=20 mm 56
Obrázek 52 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=20 mm..... 57
Obrázek 53 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=20 mm... 58
Obrázek 54 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=30 mm 59
Obrázek 55 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=30 mm..... 60
Obrázek 56 – Porovnání výsledků, mod .1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=30 mm... 61
Obrázek 57 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=50 mm 62
Obrázek 58 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=50 mm..... 63
Obrázek 59 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=50 mm... 64
Obrázek 60 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=100 mm 65
Obrázek 61 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=100 mm... 66
Obrázek 62 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=100 mm. 67
Obrázek 63 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=200 mm 68
Obrázek 64 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=200 mm... 69
Obrázek 65 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=200 mm.. 69
Obrázek 66 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, vektory, z=300 mm 70
Obrázek 67 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=0 mm,z=300 mm... 71
Obrázek 68 – Porovnání výsledků, mod. 1, 1 m/s, složky rychlostí,y=11 mm,z=300 mm. 71
Obrázek 69 – Vyšetřované vzdálenosti za mřížkou mod. 2 72
Obrázek 70 – Vyšetřované úsečky a souřadnicový systém – mřížka mod. 2..... 72
Obrázek 71 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=5 mm 74
Obrázek 72 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=5mm..... 75
Obrázek 73 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=5 mm..... 76
Obrázek 74 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=10 mm 77
Obrázek 75 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=10 mm..... 78
Obrázek 76 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=10 mm... 79
Obrázek 77 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=20 mm 80
Obrázek 78 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=20 mm..... 81
Obrázek 79 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=20 mm... 82
Obrázek 80 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=30 mm 83
Obrázek 81 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=30 mm..... 84
Obrázek 82 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=30 mm... 85
Obrázek 83 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z= 50mm 86
Obrázek 84 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=50 mm..... 87
Obrázek 85 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=50 mm... 88
Obrázek 86 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=100 mm 89
Obrázek 87 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=100 mm... 90
Obrázek 88 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=100 mm. 91
Obrázek 89 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=200 mm 92
Obrázek 90 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=200 mm... 93
Obrázek 91 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=200 mm. 93
Obrázek 92 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, vektory, z=300 mm 94
Obrázek 93 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=7 mm,z=300 mm... 95
Obrázek 94 – Porovnání výsledků, mod. 2, 1 m/s, složky rychlostí,y=18 mm,z=300 mm. 95

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní technické údaje zařízení jaderného reaktoru VVER 1000 [**2**], [**3**] ... 12
Tabulka 2 – Nastavení diskretizace výpočetní oblasti ... 33
Tabulka 3 – Nastavení řešiče pro výpočet programem Ansys Fluent ... 36
Tabulka 4 – Zvolené okrajové podmínky ... 36
Tabulka 5 – Definované okrajové podmínky pro jednotlivé varianty výpočtu ... 37
Tabulka 6 – Použitá označení pro jednotlivé složky rychlostí ... 47