

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **N 2301 Strojní inženýrství**

Studijní zaměření: **Stavba energetických strojů a zařízení**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stanovení optimálního výpočetního postupu pro ověření návrhu instalace chilleru v palubní kuchyni dopravního letounu

Autor: **Bc. Lenka Náprstková**

Vedoucí práce: **Ing. Michal Volf**

Akademický rok: 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	Bc. Lenka Náprstková
Osobní číslo:	S16N0084P
Studijní program:	B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba energetických strojů a zařízení
Název tématu:	Stanovení optimálního výpočetního postupu pro ověření návrhu instalace chilleru v palubní kuchyni dopravního letounu
Zadávací katedra:	Katedra energetických strojů a zařízení

Zásady pro vypracování:

1. Představení společnosti a seznámení s variantami produktů
2. Výběr optimálního produktu pro stanovení výpočetního postupu
3. Stanovení optimálního postupu CFD analýzy
4. Realizace numerických simulací
5. Odezva systému na změny vstupních dat
6. Ekonomické zhodnocení a aplikovatelnost studie
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50 – 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná / elektronická**
Seznam odborné literatury:

- BLAŽEK, J.: Computational fluid dynamics: principles and applications, ELSEVIER SCIENCE Ltd, 2001, ISBN 0080430090
- WHITE, Frank M.: *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Education, 2015, ISBN 978- 0073398273
- Jiyuan Tu, Guan Yeoh, Chaoqun Liu: Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, ISBN- 13: 978- 0080982434
- ANSYS, *ANSYS CFX-Solver Theory Guide [online]*, dostupné z: www.ansys.com
- KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin Fluent, CFX [online]*, VŠB-TU Ostrava, 2008, 154 s., dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Volf**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant diplomové práce: **Ing. et Bc. Michal Batko**
Zodiac Galleys Europe s.r.o.
(v budoucnu součást skupiny Safran)

Datum zadání diplomové práce: **30. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**

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 vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Náprstková	Jméno Lenka	
STUDIJNÍ OBOR	N 2301 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Volf	Jméno Michal	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Stanovení optimálního výpočetního postupu pro ověření návrhu instalace chilleru v palubní kuchyni dopravního letounu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	62	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tato práce analyzuje proudění v chlazeném prostoru kuchyňky dopravního letounu. K posouzení problému jsou využity CFD výpočty, které jsou validovány porovnáním výsledků s experimentem. Práce také obsahuje představení společnosti Safran Cabin CZ a jejího produktu, pro který je toto téma zpracováno.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	<p>CFD simulace, turbulentní proudění, Ansys, Fluent, kuchyňka dopravního letounu, letecké inženýrství</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Náprstková	Name Lenka	
FIELD OF STUDY	N 2301 Strojní inženýrství		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Volf	Name Michal	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Determination of the Optimal Computational Process for the Verification of the Aircraft Galley Chiller Installation Design.		

FAKULTA	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and equivalents A4)

TOTALY	62	TEXT PART	62	GRAPHICAL PART	0
---------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis analyses air flow in chilled compartment of the aircraft galley. CFD calculations were used to perform the analysis. These calculations were further validated by comparison with performed experiment. Thesis also contains a brief introduction of the Safran Cabin CZ company and product on which this thesis is centered.
KEY WORDS	CFD Simulation, Turbulent Airflow, Ansys, Fluent, Aircraft Galley, Aerospace Industry

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Volfovi za jeho rady, ochotu a věnovaný čas.

Taktéž mé poděkování patří konzultantovi panu Ing. et Bc. Michalu Batkovi a dalším zaměstnancům společnosti Safran Cabin CZ s.r.o., kteří mi byli nápomocni.

Velké díky chci vyslovit celé rodině a lidem mně blízkým za ohleduplnost a psychickou podporu nejen během tvorby závěrečné práce, ale i po celou dobu studia.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	1
Seznam tabulek	1
Seznam obrázků	1
Úvod.....	4
1 Safran Cabin CZ s.r.o.	5
1.1 Produkty.....	6
2 Volba a charakteristika optimálního produktu pro stanovení výpočetního postupu.....	8
2.1 Charakteristika chlazené G2a	8
3 Popis modelu, tvorba geometrie a její modifikace	10
3.1 Tvorba geometrie.....	11
3.2 Modifikace geometrie.....	13
4 Teorie proudění	15
4.1 Úlohy mechaniky tekutin.....	15
4.1.1 Stavová rovnice	15
4.1.2 Rovnice kontinuity	15
4.1.3 Zákon zachování hybnosti = Navier - Stokesova rovnice.....	16
4.1.4 Energetická rovnice	17
4.2 Typy proudění.....	19
4.2.1 Dle stlačitelnosti proudění.....	19
4.2.2 Dle závislosti na čase	19
4.2.3 Dle vazkosti.....	19
4.2.4 Dle prostorového uspořádání	19
4.2.5 Dle druhu částic proudící tekutiny	19
4.3 Matematické modely proudění	19
5 Tvorba sítě.....	21
5.1 Mesh study.....	21
5.1.1 Síť 1 - 2,8 milionů elementů	21
5.1.2 Síť 2 – 5,6 milionů elementů.....	23
5.1.3 Síť 3 – 11,3 milionů elementů.....	23
5.1.4 Analýza y^+	24
5.2 Zhodnocení, výběr nejvhodnější varianty	25

6	Nastavení výpočtu	26
6.1	Obecné nastavení výpočtu	26
6.2	Okrajové podmínky	26
7	Validace numerické simulace.....	27
8	Odezva systému na změny vstupních dat.....	30
8.1	Přehled řezů modelem	31
8.2	Proudnice	33
8.3	Kontury rychlosti	35
8.4	Vektory rychlosti	47
9	Ekonomické zhodnocení	59
	Závěr.....	61
	Seznam použitých zdrojů	62

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
ρ	hustota	kg/m^3
p	tlak	Pa
w	rychlost	m/s
T	teplota	K
r	specifická plynová konstanta	$J/(kg \cdot K)$
V	objem	m^3
S	povrch	m^2
t	čas	s
k	sčítací index	–
l	sčítací index	–
i	index vektoru	–
m	hmotnost	kg
a	zrychlení	m/s^2
F	síla	N
R	setrvačné zrychlení	m/s^2
ν	kinematická molekulární vazkost	m^2/s
e	energie	J/kg
u	vnitřní energie	J/kg
τ	smykové napětí	N/m^2
h	entalpie	J/kg
q_k	tepelný tok	W/m^2
q_v	vnitřní zdroj tepla	W/m^3
Q	množství tepla	J
L	absolutní práce	J
Re	Reynoldsovo číslo	–
μ	dynamická molekulární vazkost	$kg/(m \cdot s)$

Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání vytvořených variant sítě	25
Tab. 2: Hodnoty rychlosti naměřené a vypočítané v místě na konci vstupního kanálu	28
Tab. 3: Hodnoty rychlosti naměřené a vypočítané v místě outletu	29

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma historického vývoje společnosti Safran Cabin CZ s.r.o.	5
Obr. 2: Ilustrace pozice I v letadle.....[3]	6
Obr. 3: Rozmístění kuchyňských modulů v trupu letadla	7
Obr. 4: Full-size trolley (vlevo) a half-size trolley v porovnání s full-size (vpravo).....[5,6]	8
Obr. 5: Princip chladicího okruhu	9
Obr. 6: Popis hlavních částí geometrie 1	10
Obr. 7: Popis hlavních částí geometrie 2.....	11

Obr. 8: Úpravy geometrie 1 (vpravo původní geometrie s panty, dveřmi, vodní instalací, vlevo zjednodušená) .	12
Obr. 9: Úpravy geometrie 2 (vpravo na horní stěně původní geometrie jsou zřejmé pevnostní prvky a mřížky, které byly v rámci zjednodušení odebrány)	12
Obr. 10: Úpravy geometrie 3 (vpravo zřejmé panty a dvířka v bočním panelu pro přístup k chilleru - pro účely simulace nežádoucí, vlevo zjednodušená geometrie)	12
Obr. 11: Finální podoba geometrie, čelní pohled	13
Obr. 12: Regulační prvky	14
Obr. 13: Schéma matematických modelů proudění[12]	20
Obr. 14: Síť o 2,8 mil buněk vytvořená v programu Ansys Fluent	22
Obr. 15: Detail sítě 1 na outletu, vytvořené v programu Ansys Fluent	22
Obr. 16: Detail sítě 2 na outletu, vytvořené v programu Ansys Fluent	23
Obr. 17: Detail sítě 3 na outletu, vytvořené v programu Ansys Fluent	23
Obr. 18: Rychlostní profil v turbulentní mezní vrstvě[ZDROJ]	24
Obr. 19: Drátový model geometrie - varianty I , se zvýrazněním měřených ploch	27
Obr. 20: Rozmístění měřicích bodů v rovině na konci vstupního kanálu	28
Obr. 21: Rozmístění měřicích bodů v rovině outletu	29
Obr. 22: Pozice vodorovných a svislých řezů modelem	31
Obr. 23: Pozice bočních řezů modelem	32
Obr. 24: Proudnice - varianta 1, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	33
Obr. 25: Proudnice - varianta 2, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	33
Obr. 26: Proudnice - varianta 3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	34
Obr. 27: Proudnice - varianta 1, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	34
Obr. 28: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	35
Obr. 29: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	35
Obr. 30: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	36
Obr. 31: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	36
Obr. 32: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	37
Obr. 33: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	37
Obr. 34: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	38
Obr. 35: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	38
Obr. 36: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2 ..	39
Obr. 37: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2 ..	39
Obr. 38: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2 ..	40
Obr. 39: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2 ..	40
Obr. 40: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	41
Obr. 41: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	41
Obr. 42: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	42
Obr. 43: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	42
Obr. 44: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	43
Obr. 45: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2	43

<i>Obr. 46: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2</i>	44
<i>Obr. 47: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2</i>	44
<i>Obr. 48: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2</i>	45
<i>Obr. 49: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2</i>	45
<i>Obr. 50: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2</i>	46
<i>Obr. 51: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2</i>	46
<i>Obr. 52: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	47
<i>Obr. 53: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	47
<i>Obr. 54: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	48
<i>Obr. 55: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	48
<i>Obr. 56: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	49
<i>Obr. 57: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	49
<i>Obr. 58: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	50
<i>Obr. 59: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	50
<i>Obr. 60: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	51
<i>Obr. 61: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	51
<i>Obr. 62: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	52
<i>Obr. 63: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	52
<i>Obr. 64: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	53
<i>Obr. 65: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	53
<i>Obr. 66: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	54
<i>Obr. 67: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	54
<i>Obr. 68: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	55
<i>Obr. 69: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	55
<i>Obr. 70: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	56
<i>Obr. 71: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	56
<i>Obr. 72: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	57
<i>Obr. 73: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	57
<i>Obr. 74: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	58
<i>Obr. 75: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2.....</i>	58

Úvod

Diplomová práce se zabývá stanovením optimálního výpočetního postupu pro ověření návrhu instalace chladicího zařízení v kuchyňském modulu letadla z rodiny Airbus A320 Family. Kuchyňský modul je vyvíjen společností Safran Cabin CZ s.r.o. Práce se dále zabývá analýzou odezvy systému na změnu vstupních dat. Jedná se o úlohu turbulentního proudění vzduchu v uzavřeném objemu, které bude simulováno výpočetním programem Ansys.

Na úvod do problematiky bude stručně představena společnost Safran Cabin CZ s.r.o. a popsány produkty firmou vyráběné. Následovat bude volba produktu, který se bude jevit jako nejvhodnější pro analýzu prováděnou v této diplomové práci. Zvolený produkt bude popsán z hlediska funkce, budou nadefinovány prvky zde označované jako regulační a vytvořeny varianty geometrie, které se od sebe budou lišit právě obsaženými regulačními prvky.

Ve druhé části práce bude popsána tvorba výpočetní domény, tj. její zjednodušení z výchozího stavu pro potřeby numerické simulace. Dále bude diskutován proces diskretizace a tvorby výpočetní sítě spolu s vlastním nastavením výpočtu. V neposlední řadě bude diskutován i průběh a konvergence vlastních simulací včetně vyhodnocení výsledků. Pro úplnost je vhodné dodat, že numerické simulace jsou provedeny v komerčním softwaru ANSYS a jeho částí.

Na závěr bude provedeno ekonomické zhodnocení studie z hlediska budoucího využití ve společnosti. Zde bude proveden rozbor hodinového rozpočtu této práce a za předpokladu možných zjednodušení bude odhadnuta doba pro simulaci prováděnou v budoucnu na podobném projektu, jako zde diskutovaný, za předpokladu využití poznatků z této diplomové práce.

1 Safran Cabin CZ s.r.o.

Společnost nacházející se v Plzni - Borských polích je součástí francouzské skupiny Safran, která je aktuálně 3. největší společností světa dodávající komponenty do letadel. Místní pobočka je zaměřena na výrobu kuchyňských modulů, šatních skříněk a spacích modulů a to převážně do letadel výrobce Airbus.

Výrobní hala v Plzni stojí od roku 2001, kdy byla vybudována pro holandskou společnost Driessen. V té době již existovalo několik poboček nejen v domácím Nizozemsku, ale také například v Thajsku, USA nebo Mexiku. Produkty této společnosti založené roku 1938 nejprve nebyly určeny pro letectví, k tomu vedl postupný, skoro padesátiletý vývoj od původní instalatérské činnosti. [1]

V roce 2008 se tato mezinárodní společnost stala součástí francouzské skupiny Zodiac Aerospace, v níž se desetitisíce zaměstnanců po celém světě zabývají výhradně letectvím – od systémů, nábytku, servisních služeb až po leteckou bezpečnost. Plzeňská pobočka nesla název Zodiac Galleys Europe s.r.o. [2]

K dalšímu zlomu v existenci firmy došlo v únoru roku 2018, kdy bylo rozhodnuto o fúzi společností Zodiac Aerospace a Safran, kde bylo stanoveno, že veškeré aktivity skupiny Zodiac Aerospace přejdou pod skupinu Safran. Safran působí na trhu od roku 2005 s produkty, které se týkají nejen leteckých interiérů, ale také řídicích a navigačních systémů a hlavně leteckých motorů (proudových, raketových i vrtulníkových). K oficiální integraci Zodiacu pod Safran došlo v březnu 2019. [2]

Safran Cabin CZ s.r.o. je jednou z dílčích společností nacházejících se pod skupinou Safran. Díky spolupráci více než tisíce zaměstnanců jsou v plzeňské hale vyráběny stovky monumentů ročně putujících do Airbusu a dále do aerolinek celého světa. Kuchyňské moduly a šatní skříňky jsou dodávány do nejrozšířenějších jednonulčkových letounů na trhu – A318, A319, A320, A321 a po inovaci těchto letounů na generaci NEO firma vyvíjí a produkuje tyto monumenty také do těchto letounů. Kromě kuchyňek a skříněk se v Plzni také vyrábí modulové spací místnosti pro personál velkých letounů A330. [1]



Obr. 1: Schéma historického vývoje společnosti Safran Cabin CZ s.r.o.

1.1 Produkty

Z důvodu širokého spektra výrobků společnosti, jak již bylo zmíněno výše, se v této kapitole zaměříme pouze na představení produktů typu Galley, neboli kuchyňských modulů, jelikož právě těmto produktům se předkládaná diplomová práce věnuje.

V současné době je vyráběno 5 základních druhů kuchyňek společnosti Safran Cabin CZ s.r.o. Zmíněné druhy se rozlišují dle pozice, na které se v letounu umísťují, protože každý z nich je rozdílných rozměrů. Právě pozice v letadle rozhoduje o tvaru kuchyňky. Příčný průřez letadla se po jeho délce mění, proto modul vyrobený pro jednu konkrétní pozici nespĺňuje požadavky pro jiná umístění. Klíčové je rovněž provedení kontury, která kopíruje tvar trupu letadla. To je podstatné, aby byly zakryty všechny kabely, vzduchové a vodní systémy tak, aby nenarušovaly estetický dojem v letadle. Obecně tedy rozlišujeme pozici I, II, III, IV a V.

Pozice I a II se nacházejí v přední části letadla, přičemž **pozice I** znamená, že kuchyňka je na pravé straně (stojíme-li v letadle čelem po směru letu). Při obsluze této kuchyně stojí personál ve směru letu. Kuchyně je umístěna před předními dveřmi. **Pozice II** je umístění taktéž vpravo, obsluhující personál této kuchyně stojí proti směru letu. Kuchyně je umístěna za předními dveřmi. Mezi těmito moduly se tedy nachází úniková ulička.

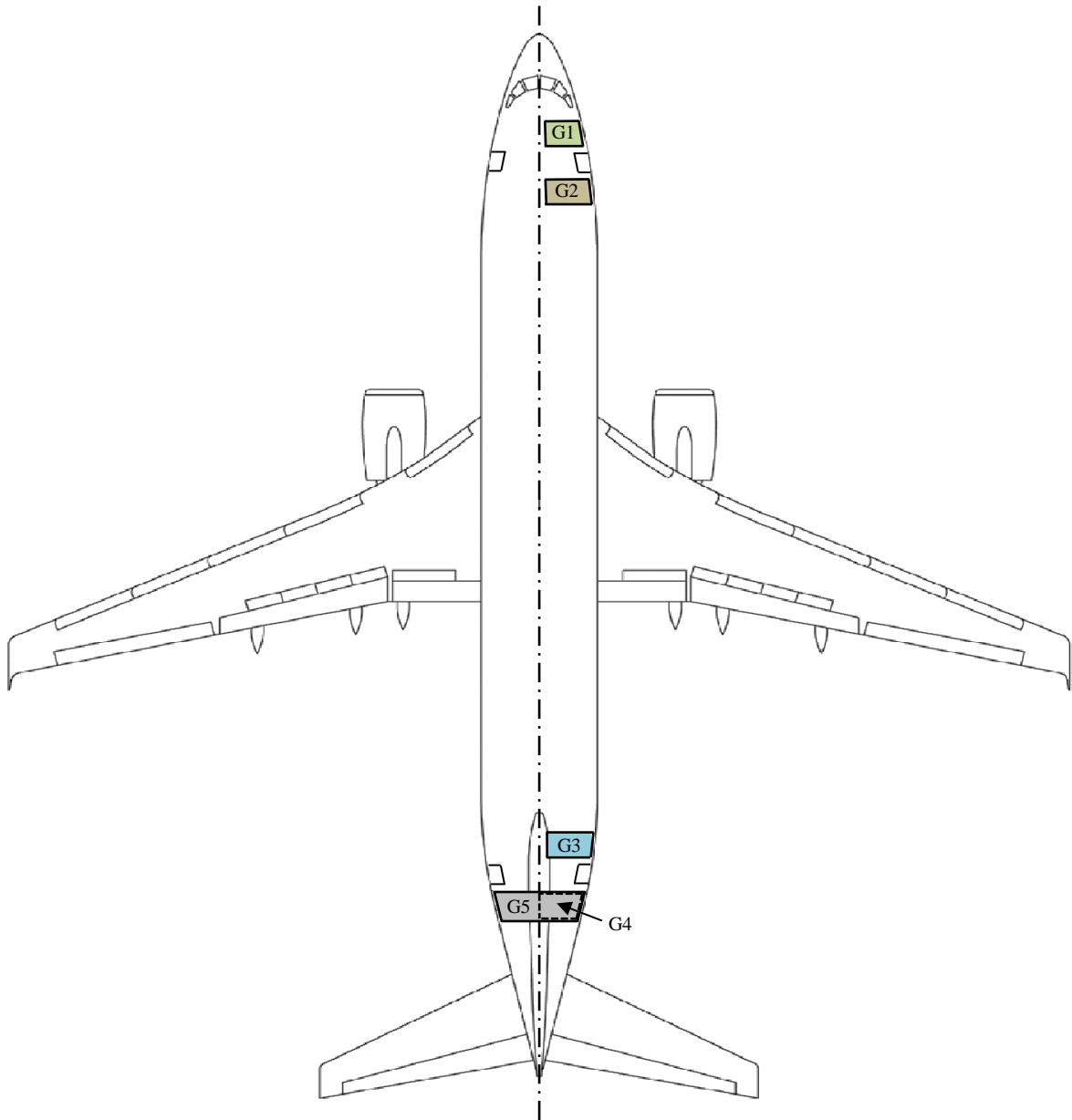


Obr. 2: Ilustrace pozice I v letadle.....[3]

Pozice III, IV a V se nacházejí v zadní části letadla. **Pozici III** nalezneme napravo ve směru letu. Obsluhující personál této kuchyně stojí ve směru letu. Kuchyně je umístěna před zadními dveřmi. **Pozice IV** je umístěna napravo ve směru letu, za zadními dveřmi. Obsluhující personál této kuchyně stojí proti směru letu. Pokud kuchyně stojí na pozici za zadními dveřmi, ale zabírá celý profil trupu, hovoříme o **pozici V**.

Dle pozice na kterou se umísťuje, nese kuchyňka neboli galley (G) svoje označení G1 – G5, kdy dle hloubky monumentu se některé typy rozlišují na poloviční (HS = half-size) a plné velikosti (FS = full-size). Dále existují speciální typy kuchyní, které se nacházejí na výše zmíněných pozicích, ale nesou ještě další označení písmenem, např. G3b, G4b. Tyto kuchyně se odlišují svým prostorovým uspořádáním.

Rozmístění kuchyňských modulů v trupu letadla je pro názornost zobrazeno na obrázku 3.



Obr. 3: Rozmístění kuchyňských modulů v trupu letadla

2 Volba a charakteristika optimálního produktu pro stanovení výpočetního postupu

Tato práce bude zkoumat instalaci chladicího zařízení a podobu uzavřeného chlazeného objemu. Pro volbu galley pro stanovení výpočetního postupu tedy přicházejí v úvahu pouze chlazené kuchyňky, do kterých je instalován tzv. chiller, jehož úkolem je cirkulovat spodní částí modulu chladný vzduch a udržovat tak potraviny a nápoje tam uchovávané na optimální teplotě, typicky 7°C. Spodní část každé kuchyňky je totiž navržena tak, aby zde bylo možné primárně parkovat jídelní vozíky, ze kterých palubní personál nabízí cestujícím občerstvení. Záleží ale na zákazníkovi (provozovateli letadla), zda chce tento prostor takto využívat, nebo jej ponechá jen jako nechlazený úložný prostor.

Jako chlazené jsou v současné době nabízeny produkty G1, G3b, G4, G4a, G4b a G5 a pracuje se na vývoji nového chlazeného produktu s označením G2a. Právě tento nový typ kuchyně byl zvolen jako nejvhodnější pro využití simulace proudění pro ověření současného modelu a navržení postupu pro budoucí využití ve vývoji nebo optimalizaci chlazených kuchyní. Důvodem volby je skutečnost, že G1, G4b a G5, což jsou velmi žádané modely, již nějakou dobu „létají“, tedy jsou dlouhodobě odzkoušené, schválené a funkční. Vyhovují všem požadavkům na produkt a momentálně není důvod k jejich modifikaci, tudíž ani dalšímu testování. Každá vyvíjená galley je podrobována testování, proto je za účelem validace výsledků zvolena pro tuto diplomovou práci právě vyvíjená G2a.

Nový vývoj vyžaduje zkoumání návrhu, zjišťování jeho nedostatků a provedení nutných úprav. To vše samozřejmě v co nejkratší době a nejvyšší kvalitě. Doposud se veškeré produkty zkoušely a ověřovaly pouze praktickými testy. Praktické testování závisí na době výroby prototypů, které se testují a pokud je test vyhodnocen jako neúspěšný, následují modifikace designu. Navržené úpravy nemusí být proveditelné na již existujícím prototypu a musí se tak zadávat do výroby postupně další a další kusy, dokud některý z nich v testech neobstojí. Takové postupy jsou fungující a vypovídající, avšak mohou být velice zdlouhavé a nákladné. Zavedením CFD analýzy do procesu vývoje by se tak dosáhlo úspory materiálu, provozního času i hodin lidské práce, což se v konečném důsledku projeví na výrazné ekonomické úspoře.

2.1 Charakteristika chlazené G2a

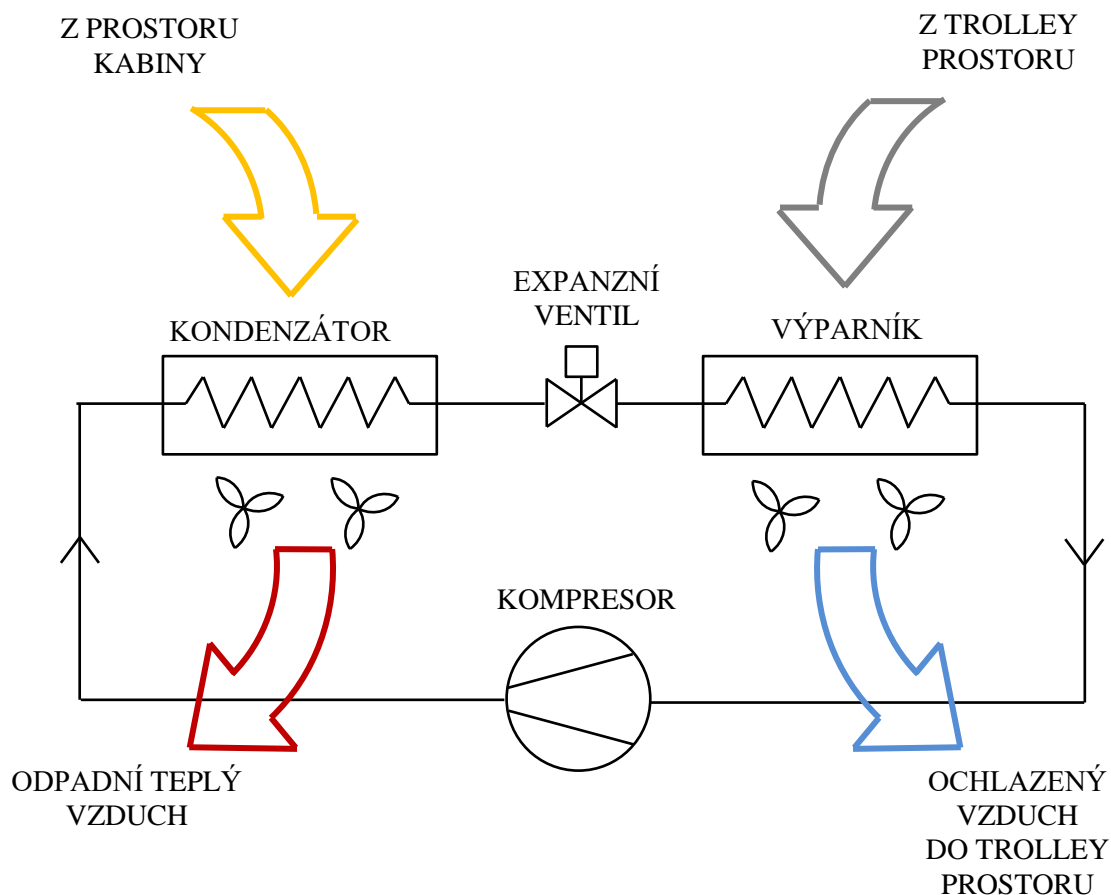
Chlazený monument G2a je jedním z nově vyvíjených produktů, který bude v budoucnu zařazen do katalogu běžně nabízených kuchyní. Na stejnou pozici, kde se na palubě letounu bude nacházet, se dnes dodává galley G2a nechlazená. Rozdílem v provedení těchto kuchyní je hlavně skutečnost, že spodní část bude mít nově možnost chlazení vozíků s potravinami, které palubní personál nabízí cestujícím v průběhu letu. Do jedné kuchyňky je možno uložit 4 vozíky plné velikosti, nebo až 8 vozíků poloviční hloubky tzv. half-size trolley (obr. 4).



Obr. 4: Full-size trolley (vlevo) a half-size trolley v porovnání s full-size (vpravo).....[4,5]

Vozíky se zaparkují do přesné pozice v monumentu, zabezpečí dvířky a po celou dobu letu může být chillerem zajištěna požadovaná teplota, která je potřebná pro úschovu potravin.

Chiller jakožto chladicí zařízení využívá principu tradičního chladicího okruhu (obr. 5). Na rozdíl od využití principů tohoto okruhu v aplikacích rezidenčního bydlení, chiller obsahuje veškeré esenciální prvky okruhu v jednom kompaktním produktu. Samotný objekt chilleru tedy obsahuje oba výměníky, oba ventilátory i kompresor.



Obr. 5: Princip chladicího okruhu

Cirkulující chladivo vstupuje do kompresoru. Komprese má za následek zvýšení tlaku i teploty. Stlačené médium je vedeno trubkami kondenzátoru, kde kondenzuje díky odevzdání tepla vzduchu proudícímu vně trubek, odvádějícímu tak teplo ze systému. Takto ochlazený nasycený kondenzát je dále veden přes termoexpanzní ventil, kde dochází k prudkému snížení tlaku. Snížení tlaku má za následek adiabatické odpařování části kapalného chladiva.

Směs kapalina-pára je pak vedena trubkami výparníku. Ventilátory nasávají vzduch přes trubky nesoucí kapalinu chladiva a směs par s nižším tlakem. Teplý vzduch odpařuje kapalnou část směsi chladiva. Výsledkem je, že cirkulující vzduch, jak prochází výparníkem, je ochlazen a tento ochlazený vzduch je vytlačován ven z chladiče do prostoru vozíků. Vzduchem ohřáté cirkulující chladivo pokračuje zpět do kompresoru.

3 Popis modelu, tvorba geometrie a její modifikace

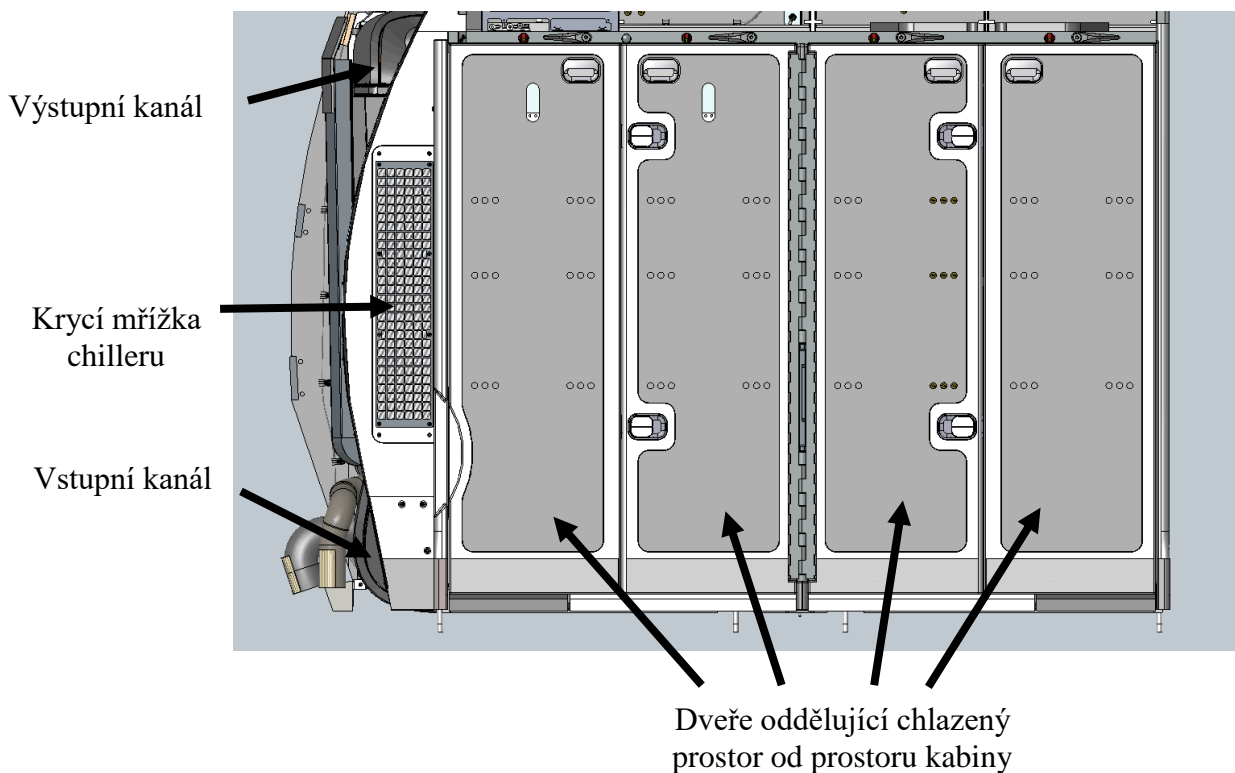
Model se skládá ze čtyř hlavních částí. Vstupní přívodní kanál vede proud vzduchu z výstupu chilleru do samotného chlazeného prostoru jídelních vozíků. Do tohoto vstupního kanálu jsou za účelem co nejlepšího rozložení hmotnostního toku v kanálu vloženy 2 lopatky, které tak rozdělují proud a zároveň ho usměrňují tak, aby do chlazeného trolley prostoru vstupoval rovnoměrně rozložen. Vstupní kanál ústí do chlazeného prostoru v jeho spodní části.

Chlazený trolley prostor je tvaru kvádrů, který je uprostřed rozdělen přepážkou, která se nazývá divider panel. Jejím úkolem je nést dveře, jimiž je chlazený prostor oddělen od prostoru kabiny letadla, slouží taktéž jako pevnostní výztuha monumentu a nese attachment point, což je jeden ze sedmi bodů, kde je kuchyňka přichycena do letadla v její spodní části. Do chlazeného prostoru jsou vkládány vozíky s nápoji a potravinami, které se tak během letu udržují vychlazené a čerstvé. Pozice vozíků jsou přesně určeny vymešovacími a vodícími prvky tak, aby mezera mezi sousedními vozíky a mezi vozíky a stěnami kuchyňky byla vždy přibližně stejná a tím bylo umožněno chladicímu vzduchu proudit rovnoměrně.

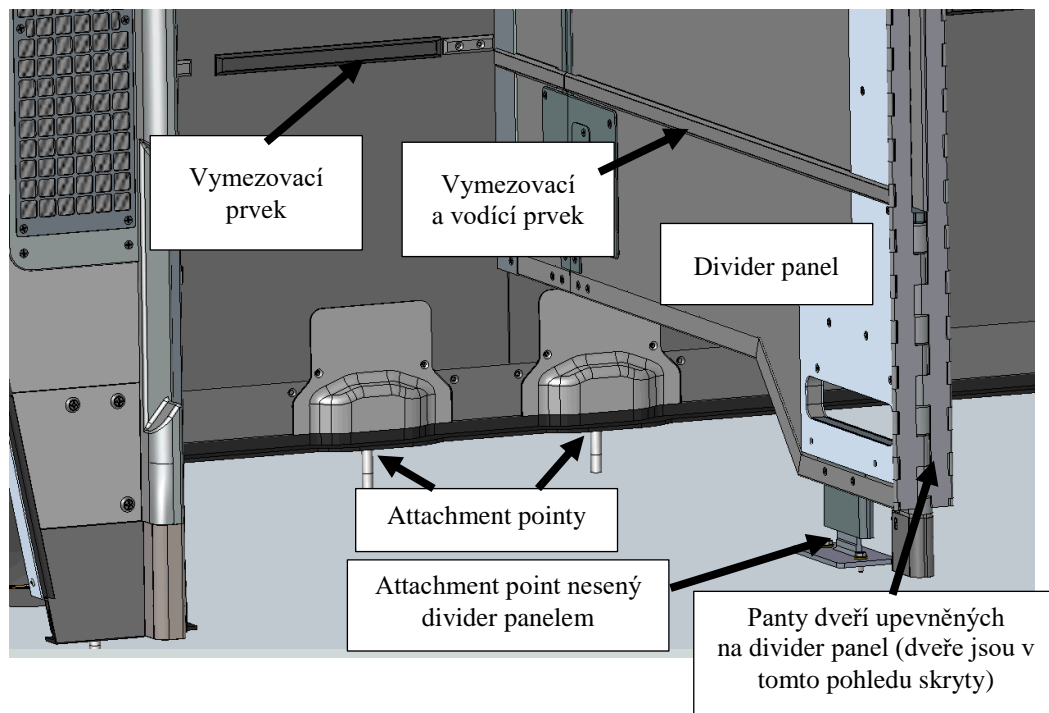
Třetí částí modelu je sběrný kanál, který propojuje trolley prostor s výstupním kanálem. Vzduch sem vtéká skrz pět otvorů ve vrchní stěně trolley prostoru a slučuje se v jeden proud.

Poslední částí geometrie je výstupní kanál, kterým je proud vzduchu veden zpět do chladicího zařízení v jeho horní části.

Nejkomplikovanější geometrií je právě přívodní a odvodní kanál, které z důvodu velmi omezeného využitelného prostoru není možno navrhnout jinak, aniž by se objevily ostré hrany a přechody, které jsou v případě potřeby dosažení rovnoměrného proudění bez zbytečných tlakových ztrát nežádoucí. Na obrázcích 6 a 7 je zachycena geometrie s popsány výše zmíněnými důležitými částmi.



Obr. 6: Popis hlavních částí geometrie 1



Obr. 7: Popis hlavních částí geometrie 2

3.1 Tvorba geometrie

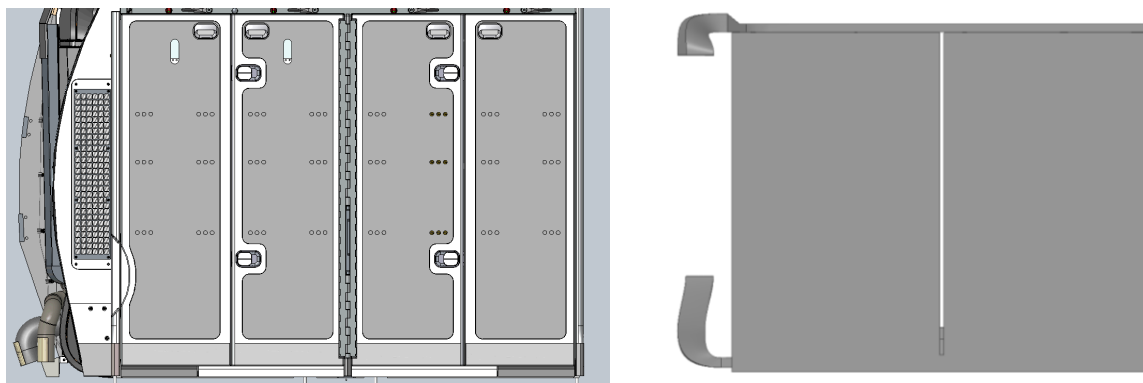
Detailní navrhovaná geometrie byla převzata od vývojových inženýrů společnosti Safran Cabin CZ s.r.o. Původní model byl kompletně vytvořen pro potřeby výroby a montáže, a tudíž obsahoval detailní vyobrazení spojů, vodní instalace, elektroinstalace, pevnostních prvků a všech dalších součástí, potřebných pro správnou montáž a funkci výrobku. Takto komplexní model je pro účely simulace značně nevhodný, a to hned z několika důvodů. Zásadním problémem je případná vysoká výpočetní náročnost simulací, pokud by model nebyl výrazněji zjednodušen. Ta je zapříčiněna velmi vysokým počtem prvků výpočetní sítě, který by byl nezbytný při případné diskretizaci zadané geometrie. Další problémy by souvisely např. se samotnou kvalitou výpočetní sítě, a tím i snížené přesnosti simulací. Zjednodušením geometrie, tedy odstraněním částí, které jsou z pohledu proudění irelevantní, lze snížit výpočetní náročnost, přispět k tvorbě kvalitnější výpočetní sítě, a tím i přesnějším výsledkům numerické simulace.

Je tedy zřejmé, že úprava výchozí geometrie je nedílnou a velmi významnou částí v procesu přípravy simulace. Prvotní úpravy byly prováděny v CAD systému SolidWorks, ale bylo vyhodnoceno, že jako vhodnější pro odstraňování nežádoucích prvků z modelu bude použit software SCDM (SpaceClaim Design Modeller) od společnosti Ansys. Tento 3D modelář je totiž speciálně uzpůsoben pro zjednodušování geometrie před síťováním. Lze tak jednoduše „na pár kliknutí“ hromadně odstraňovat stejné nebo podobné prvky jako jsou díry nebo šrouby, což by v SolidWorksu znamenalo zdlouhavou a náročnou úpravu do hloubky každé podsestavy finálního modelu.

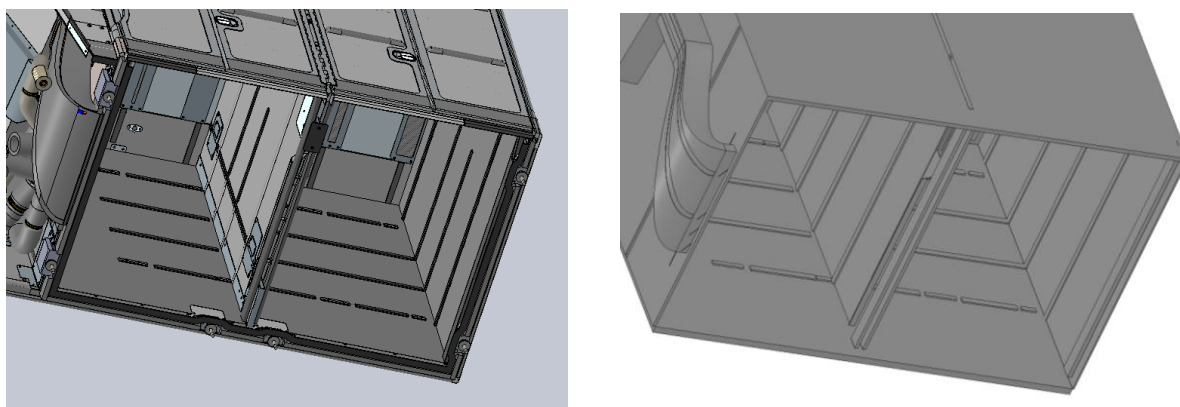
Z modelu byly nejprve odstraněny pro účel numerické simulace nepotřebné prvky, jako jsou šrouby nebo závitové vložky. Zjednodušeny byly i modely stěn, které jsou ve skutečnosti tvořeny několika vrstvami (izolace, kompozitní stěna a krycí materiál). K tomu bylo přistoupeno, jelikož v rámci prováděných simulací nebude zkoumán přestup tepla, a tedy není třeba rozlišovat materiál stěn. Z pohledu proudění postačí pouze předpoklad, že se jedná

o hydraulicky hladké stěny. Následovaly malé prvky, zajišťující krytí otvorů, pevnostní prvky, které slouží k vyztužení nejvíce zatěžovaných částí konstrukce a prvky mechanické jako jsou panty a zámečky na dveřích. Takové součásti by do modelu vnášely zbytečně komplikované tvary a přechody, které by navyšovaly počet buněk sítě a tím prodlužovaly a komplikovaly síťování i samotný výpočet. Stejnětak veškeré další funkční a ochranné prvky by byly pro další manipulaci nežádoucí. Navíc lze předpokládat, že všechny tyto prvky významným způsobem neovlivňují proudné pole ve zkoumané oblasti, a tedy jejich odstraněním se nezmění charakter úlohy.

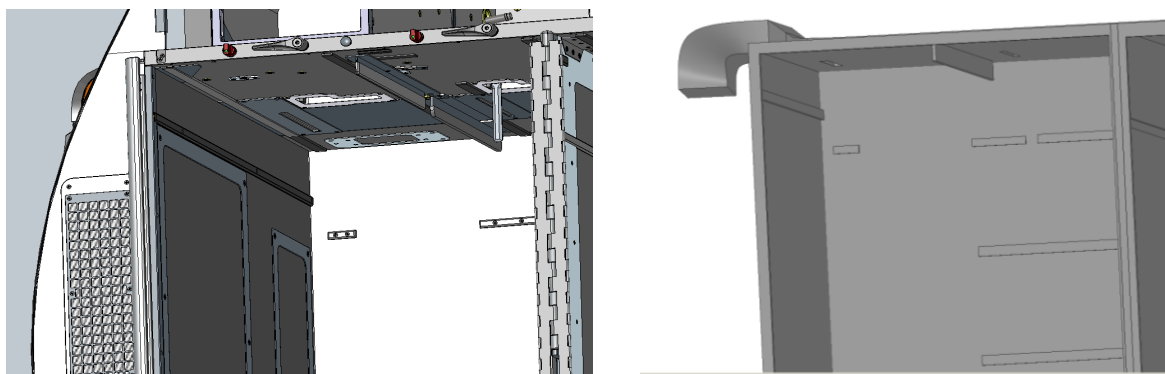
Následují obrázky pro porovnání geometrie před a po zjednodušení. (Obr. 8 – obr. 10)



Obr. 8: Úpravy geometrie 1 (vpravo původní geometrie s panty, dveřmi, vodní instalací, vlevo zjednodušená)



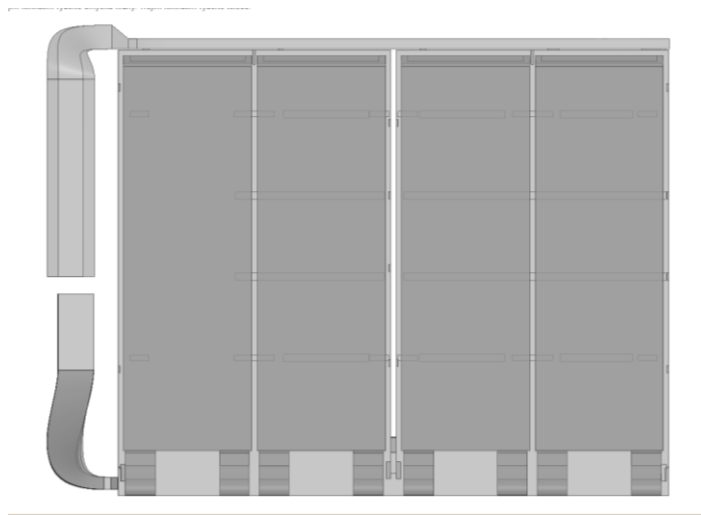
Obr. 9: Úpravy geometrie 2 (vpravo na horní stěně původní geometrie jsou zřejmé pevnostní prvky a mřížky, které byly v rámci zjednodušení odebrány)



Obr. 10: Úpravy geometrie 3 (vpravo zřejmé panty a dvířka v bočním panelu pro přístup k chilleru - pro účely simulace nežádoucí, vlevo zjednodušená geometrie)

Takto upravený model byl doplněn o osm „half-size“ potravinových vozíků (taktéž zjednodušené geometrie), které byly rozmístěny tak, jak tomu je ve skutečnosti. Takto upravená geometrie kuchyňky byla následně použita pro tvorbu geometrie inverzní, tedy pro tvorbu uzavřeného objemu proudícího vzduchu neboli výpočetní domény pro účely simulace proudění.

Posledním krokem úpravy geometrie bylo prodloužení vstupního a výstupního kanálu. (Obr. 11) Na reálném, nikoliv prodlouženém, vstupu a výstupu z kontrolního objemu je třeba vyhodnocovat stav významných veličin (rychlost, tlak) v průběhu simulace a po jejím skončení. Vzhledem k tvaru geometrie lze předpokládat, že na výstupu by vznikalo zpětné proudění, které by zhoršovalo průběh konvergence výpočtu, což se i na testovacích výpočtech projevilo. Abychom předešli těmto obtížím, je vhodné výstupní kanál prodloužit tak, aby se docílilo zrovnoměrnění proudu na výstupu z domény. Obdobně je třeba prodloužit i kanál na vstupu do domény, avšak v tomto případě je to z důvodu dosažení vyvinutého proudu na reálném vstupu do domény. Jelikož vstupní okrajová podmínka se zadává v podobě tlaku, předpokládá se implicitně rovnoměrný rychlostní profil, tedy profil bez mezní vrstvy. To je ovšem nefyzikální, a proto bude tedy prodloužením vstupu umožněna tvorba a vývin mezní vrstvy a na reálném vstupu do domény již bude fyzikální okrajová podmínka. Vstupní a výstupní kanál byl prodloužen o 1,5 průměru, resp. fiktivního hydraulického průměru. Pro úplnost je nutno dodat, že ovlivnění výpočtu prodloužením vstupního a výstupního kanálu je zanedbatelné.



Obr. 11: Finální podoba geometrie, čelní pohled

3.2 Modifikace geometrie

V diplomové práci je samostatná kapitola věnována odezvě systému na změnu vstupních dat, kdy změnou vstupních dat jsou myšleny právě modifikace geometrie. Při praktickém návrhu ve společnosti Safran Cabin CZ je vždy při vývoji chlazeného monumentu zásadním krokem porozumět modelu a vytvořit si představu o charakteru proudění uvnitř. Na základě toho lze odhadnout a jednotlivými testy potvrdit, či vyvrátit, která část geometrie slouží pro určitý model jako regulační prvek.

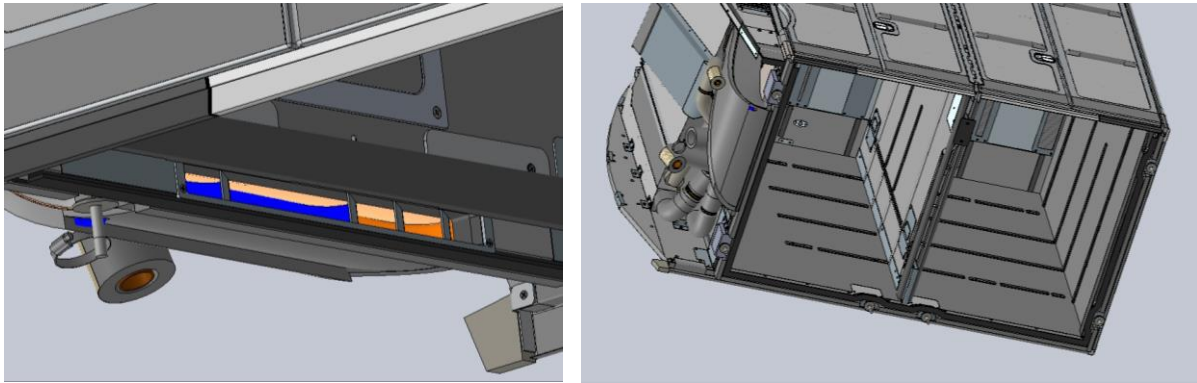
Pro lepší porozumění je uveden následující příklad. Cílem návrhu chlazených prostor pro trolley vozíky je vždy docílení rovnoměrného chlazení všech vozíků. V praxi to znamená, že je nutné se vyvarovat situaci, kdy v jednom vozíku bude teplota na bodu mrazu, zatímco v jiném nebude chlazení znatelné a teplota vyšplhá například nad 10°C. Právě v takovém případě lze totiž s jistotou říci, že zmiňovaný první vozík je chlazen velice intenzivně, až příliš pro potřeby zákazníka, zatímco u druhého vozíku dochází k absenci chlazení z důvodu

nedostatečného obtékání chladícím vzduchem. Je tedy potřeba optimalizovat zmíněné obtékání všech vozíků. Prvním krokem pro tuto optimalizaci je najít vhodný regulační prvek, jímž lze proudění ovlivnit, resp. usměrnit právě dle aktuální potřeby.

V případě geometrie popisované v této diplomové práci jsou vyhodnoceny dva prvky geometrie jako možné regulační prvky a cílem simulací je zjištění, jakým způsobem je jimi ovlivněno proudění.

Prvním prvkem jsou deflektory, které jsou vkládány do ústí vstupního kanálu do chlazeného prostoru (Obr. 12 vlevo). Účelem jejich přítomnosti je stočení proudu do přední části vozíkového prostoru, protože lze předpokládat, že samotný tvar vstupního kanálu směřuje proud spíše do části zadní.

Prvkem druhým jsou pásy gumového materiálu na stěnách (Obr. 12 vpravo), které tvoří překážku proudu tam, kde je předpokládáno nejintenzivnější obtékání, a s tím spojené velmi intenzivní (až nežádoucí) chlazení. Cílem jejich instalace je usměrnit proud do míst, kde se tyto překážky nenachází.



Obr. 12: Regulační prvky

Využitím uvedených modifikací byly určeny jednotlivé varianty geometrie pro simulaci proudění a pro analýzu odezvy systému na změnu vstupních dat:

- Varianta 1 - výchozí geometrie popsaná a znázorněná v kapitole 3.1, obsahující deflektory ve vstupním kanálu i gumové stripy na stěnách
- Varianta 2 – geometrie s deflektory, bez gumových pásů na stěnách
- Varianta 3 – geometrie bez deflektorů s pásy na stěnách
- Varianta 4 – geometrie s absencí obou uvažovaných regulačních prvků

4 Teorie proudění

4.1 Úlohy mechaniky tekutin

Mechanika tekutin a taktéž veškeré CFD výpočty jsou charakterizovány obecně čtyřmi základními veličinami, k jejichž řešení je třeba znát 4 nezávislé rovnice. Ostatní veličiny jsou na nich závislé a další známé rovnice jsou z těchto odvozené. Základní veličiny a rovnice tedy jsou [6, 7]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{HUSTOTA} \quad \dots \rho \\ \text{TLAK} \quad \dots p \\ \text{RYCHLOST} \quad \dots w \\ \text{TEPLOTA} \quad \dots T \end{array} \right\} \left[\begin{array}{l} \text{STAVOVÁ ROVNICE} \\ \text{RCE ZACHOVÁNÍ HMOTNOSTI} \equiv \text{ROVNICE KONTINUITY} \\ \text{RCE ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI} \equiv \text{NAVIER – STOKESOVA} \\ \text{ROVNICE ZACHOVÁNÍ ENERGIE} \end{array} \right.$$

4.1.1 Stavová rovnice

Stavová rovnice udává vazbu mezi tlakem, objemem a teplotou tekutiny v daném stavu. Pro vazkou a stlačitelnou tekutinu je dán obecný tvar rovnice

$$\frac{p}{\rho} = rT \cdot [1 + a_1(T) \cdot \rho + a_2(T) \cdot \rho^2 + a_3(T) \cdot \rho^3 + \dots], \quad (1)$$

$a_n(T)$ je součinitel, vyjadřující složitou funkci teploty. Tato rovnice je zjednodušena pro ideální plyn (nevazký stlačitelný) na podobu

$$\frac{p}{\rho} = rT. \quad (2)$$

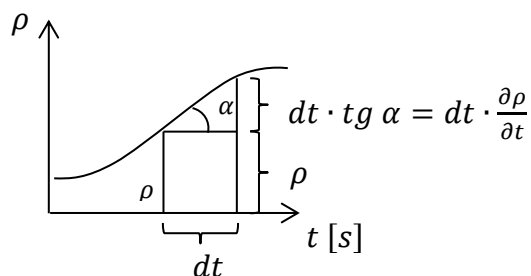
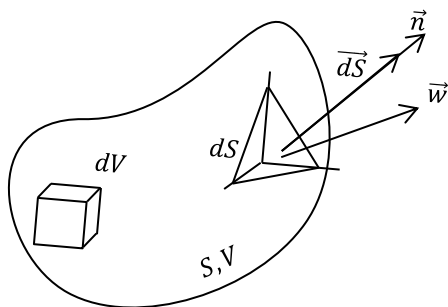
Pro nevazkou a nestlačitelnou tekutinu dosahuje úplného zjednodušení

$$\rho = \text{konst.} \quad (3)$$

4.1.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity neboli rovnice spojitosti toku je formulací zákona zachování hmotnosti. Vyjadřuje úbytek hmotnosti, ke kterému dojde ve vytyčeném objemu za jednotku času, kdy tento hmotnostní úbytek je roven toku hmotnosti přes povrch tohoto objemu.

Je-li v tekutině vytknut elementární objem, do kterého v jedné části vstupuje a z jiné vystupuje hmota (tekutina), je v jednom okamžiku hustota ρ , v dalším okamžiku je rovna $\frac{\partial \rho}{\partial t} dt$.



Nutno uvažovat, že hustota se mění nejen s časem ale i s polohou, proto průtočná hmotnost procházející povrchem se musí rovnat úbytku hmotnosti v objemu.

$$\int_S \rho \vec{dS} \vec{w} dt = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dt dV \quad (4)$$

$$\int_S \rho \vec{dS} \vec{w} = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (5)$$

V této chvíli je zřejmé, že každá strana rovnice je integrována přes jinou veličinu, tudíž dalším krokem úpravy je převod plošného integrálu na objemový, což je provedeno aplikací Gauss- Ostrogradského věty (následuje obecný tvar vztažený na vektor veličiny označené \vec{a}):

$$\int_S \vec{a} \vec{dS} = \int_V \text{div } \vec{a} dV . \quad (6)$$

Rovnice po převedení na objemové integrály:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_V \text{div} (\rho \vec{w}) dV = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \vec{w}) = 0 \quad (8)$$

Výsledná rovnice kontinuity tak vypadá následovně:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho w_k)}{\partial k} = 0 \quad (9)$$

Pro nestlačitelnou tekutinu se rovnice výše zjednoduší do tvaru:

$$\frac{\partial w_k}{\partial k} = 0 \quad (10)$$

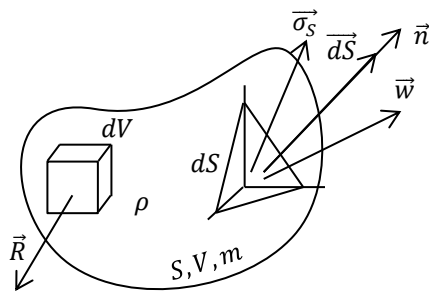
4.1.3 Zákon zachování hybnosti = Navier - Stokesova rovnice

Navier - Stokesova rovnice je vyjádřením rovnováhy sil na element proudící tekutiny o dané viskozitě, z čehož plyne, že je uvažován vliv třecích sil.

Při odvozování rovnice zachování hybnosti je uvažováno určité množství tekutiny o konstantní hmotnosti. Do této tekutiny nic nevstupuje, ani z ní nic nevystupuje. Vychází se z pohybové rovnice

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}_i , \quad (11)$$

příčemž v daném místě a okamžiku je stále stejná hustota a z působících sil je uvažován pouze vektor vnějších setrvačných sil \vec{R} a vektor sil od napětí na povrchu $\vec{\sigma}_S$.



Vytvořená výchozí rovnice má tak podobu:

$$\int_V \rho dV \frac{d\vec{w}}{dt} = \int_V \rho dV \vec{R} + \int_S \vec{\sigma}_S dS \quad (12)$$

Několidkerými úpravami se lze dopracovat k výsledné pohybové rovnici, známé jako Navier – Stokesova rovnice:

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + \frac{\partial w_i}{\partial k} w_k = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{\partial w_k}{\partial i} \right) \quad (13)$$

V takovéto podobě je rovnice ve tvaru zrychlení, kdy první člen na levé straně vyjadřuje místní zrychlení a druhý člen potencionální zrychlení. Napravo je první člen setrvačným zrychlením, druhý zrychlením od tlaku a třetí a čtvrtý vyjadřují zrychlení od tření.

Pro aplikaci na turbulentní proudění je potřeba rovnici dále ustředit v čase.

4.1.4 Energetická rovnice

Změna energie dané vytknuté tekutiny za elementární čas je vyjádřena jako

$$dE = \int_V de \cdot \rho \cdot dV \quad (14)$$

Kdy $e \left[\frac{J}{kg} \right]$ je souhrn všech energií, které může látka o hmotnosti 1 kg mít, je součtem energie kinetické a vnitřní:

$$e = u + \frac{w^2}{2} \quad (15)$$

Samotná změna energie této tekutiny v čase je způsobena vlivem:

- práce vnějších setrvačných sil \vec{R}

$$L_V = \int_V \rho dV \cdot \vec{R} \cdot \vec{w} dt \quad (16)$$

- práce povrchových sil

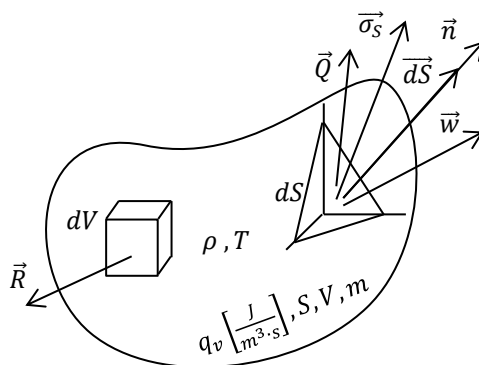
$$L_P = \int_S \vec{\sigma}_S dS \cdot \vec{w} dt \quad (17)$$

- úniku tepla z povrchu do okolí

$$-Q = - \int_S \vec{q} \, dS \cdot dt \quad (18)$$

- vnitřního zdroje tepla $q_v \left[\frac{J}{m^3 \cdot s} \right]$

$$Q_V = \int_V q_v \, dV \cdot dt \quad (19)$$



Po sestavení a dosazení má výchozí rovnice tvar

$$dE = L_V + L_P - Q + Q_V \quad (20)$$

$$\int_V de \cdot \rho \cdot dV = \int_V \rho \, dV \cdot \vec{R} \cdot \vec{w} \, dt + \int_S \vec{\sigma}_S \, dS \cdot \vec{w} \, dt - \int_S \vec{q} \, dS \cdot dt + \int_V q_v \, dV \cdot dt \quad (21)$$

Úpravami této základní rovnice je získána výsledná energetická rovnice, kde levá strana odpovídá změně celkové energie 1 kilogramu látky za 1 sekundu, a na pravé straně figurují příčiny této změny.

$$\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{\tau_{kl}}{\rho} \frac{\partial w_k}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_k}{\partial k} + \frac{q_v}{\rho} \quad (22)$$

Konkrétně první člen na pravé straně odpovídá disipaci kinetické energie na teplo, druhý člen difuzi tepla povrchem a člen třetí produkci tepla.

4.2 Typy proudění

Dle charakteru proudění lze uvažovat několik základních typů. Nahlíží se na proudění zpravidla podle pěti základních hledisek [8, 9]:

4.2.1 Dle stlačitelnosti proudění

- Stlačitelné – proudění kapalin za působení velmi vysokého tlaku nebo plynů při rychlostech blízkých rychlosti zvuku
- Nestlačitelné – proudění kapalin při běžných stlačeních nebo plynů při nízkých rychlostech

4.2.2 Dle závislosti na čase

- Nestacionární (neustálené) proudění – závislé na čase
- Stacionární (ustálené) proudění – na čase nezávislé

4.2.3 Dle vazkosti

- Vazké
- Nevazké – proudění vysokými rychlostmi

4.2.4 Dle prostorového uspořádání

- Jednorozměrné (1D) – proudění po křivce
- Dvourozměrné (2D) – proudění rovinné
- Třírozměrné (3D) – proudění prostorové

4.2.5 Dle druhu částic proudící tekutiny

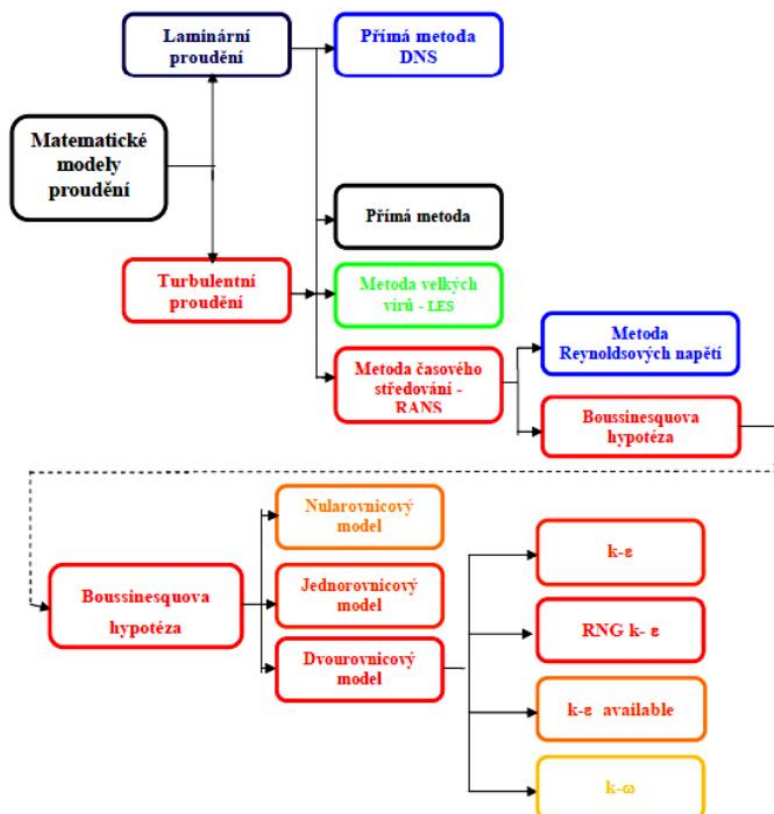
- Proudění modelových částic (ideální tekutiny)
 - Vířivé proudění – translační i rotační pohyb částic
 - Nevířivé proudění – pouze translační pohyb částic
- Proudění reálných částic (reálné tekutiny)
 - Turbulentní proudění - částice mají kromě postupné rychlosti také turbulentní (flukтуаční) rychlost, pomocí té se přemísťují po průřezu
 - Laminární proudění – pohyb částic je konán po vrstvách bez přítomnosti pohybu po průřezu

4.3 Matematické modely proudění

V této části je uveden stručný přehled využívaných modelů turbulentního proudění [8, 9].

- Direct Numerical Simulation (DNS) – Metoda přímé simulace turbulentního proudění s vysokou přesností. Pro využití DNS metody je nutná velice jemná síť (nejmenší element sítě by měl být stejný jako nejmenší velikost víru) a tudíž velmi vysoký výpočetní výkon.
- Large Eddy Simulation (LES) – Metoda velkých vírů, kdy malé víry (které se výrazně nepodílejí na disipaci energie) jsou eliminovány pomocí filtrace turbulentního pole.

- Reynolds Averaged Navier Stokes equations (RANS) – Metoda založená na časovém průměrování turbulentních hodnot a ustředování bilančních rovnic v čase. Tímto ustředěním vznikne tenzor Reynoldsových napětí, který ale představuje 6 nových neznámých (korelací flukтуаčních složek rychlostí), pro jejichž modelování je třeba sestavit nové, tzv. transportní rovnice. Tyto rovnice již ale nevycházejí ze základních fyzikálních principů, jelikož ty jsou již vyčerpány – viz rovnice v kapitole 4.1. Na základě způsobu modelování těchto napětí vznikla celá řada turbulentních modelů, jejich stručný přehled je níže a schéma na obrázku 13.
- **K-ε model** – vhodný pro proudění s izotropní turbulencí, ale nedostačující pro proudění s velkým zakřivením proudnic, vířením, odtržením proudu a nízkých Reynoldsových číslech. Vyhovuje lépe dále od stěny.
Pozn.: K značí kinetickou turbulentní energii, ε značí měrnou disipaci kinetické energie.
- **RNG K-ε model** – obohacený základní K-ε model, stále omezený na izotropní turbulenci, avšak vhodný i pro recirkulaci, rotaci, separaci proudění od stěny a velké tlakové gradienty.
- **K-ω model** – namísto měrné disipace zavádí specifickou míru disipace ω, o rozměru úhlové frekvence, je proto označován jako turbulentní frekvence. Jedná se o model využívající turbulentní viskozitu, vhodný pro nestlačitelná i stlačitelná proudění. Vyhovuje lépe při obtékané stěně a vykazuje lepší numerickou stabilitu a rychlejší konvergenci než K-ε model, avšak problémové zde jsou oblasti volných smykových proudů a rostoucí tlakový gradient v podélném směru stěny.
- **SST (Shear – Stress – Transport) K-ω model** – kombinuje K-ε (vyhovující více dále od stěny) a K-ω (vyhovující více při obtékané stěně). Dosahuje lepších výsledků při výskytu nepříznivého tlakového gradientu i odtrhávání proudu. V místech s velkým smykovým napětím omezuje růst turbulentní vazkosti.



Obr. 13: Schéma matematických modelů proudění[9]

5 Tvorba sítě

5.1 Mesh study

Pro účely této kapitoly byly pro model - variantu 1. vytvořeny 3 sítě o různé maximální velikosti elementů. Rozbor vlivu velikosti elementů sítě na výsledky analýzy je proveden na sítích o celkovém počtu objemových elementů 2,8 ; 5,6 a 11,3 milionů. Porovnáním změny výsledků v závislosti na hrubosti/jemnosti sítě je určena nejvýhodnější varianta pro následný rozbor všech variant modelu.

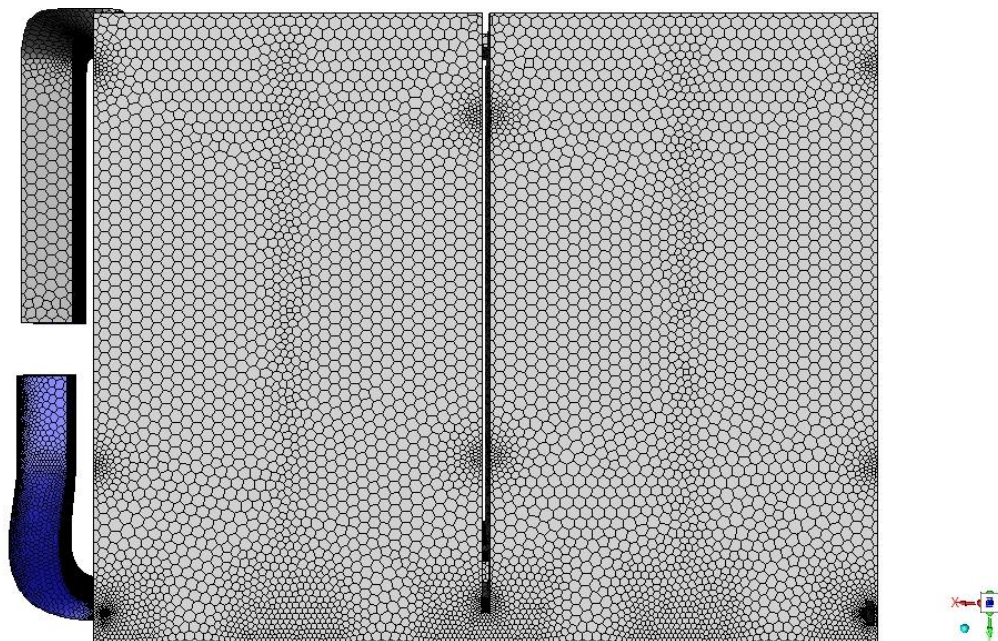
5.1.1 Sít' 1 - 2,8 milionů elementů

Jako nejhrubší možná varianta sítě byla zvolena ta, která při co nejnižším počtu buněk dosahuje dostatečné kvality pro bezproblémové uskutečnění a zkonvergování výpočtu. Konvergence výpočtu byla sledována jak z pohledu residuí, tak i z pohledu splnění zákonů zachování (tedy „imbalances“). Dále byly sledovány body zájmu, zejména ustálení tlakové ztráty. Po uskutečnění mnoha meshing procesů a spuštění výpočtů, kdy nekvalitní síť měla za následek nekonvergovatelný výpočet, bylo dosaženo základního povědomí o tom, jak u daného modelu dosáhnout zlepšení kvality sítě i následné konvergence a byla vytvořena finální vyhovující síť o 2,8 milionech buněk. Ačkoliv bylo na dané výpočetní síti dosaženo uspokojivé konvergence, není jisté, že výpočetní síť dává uspokojivé výsledky simulace. Aby byla ověřena nezávislost výsledků numerických simulací na výpočetní síti, je třeba provést studii výpočetní sítě.

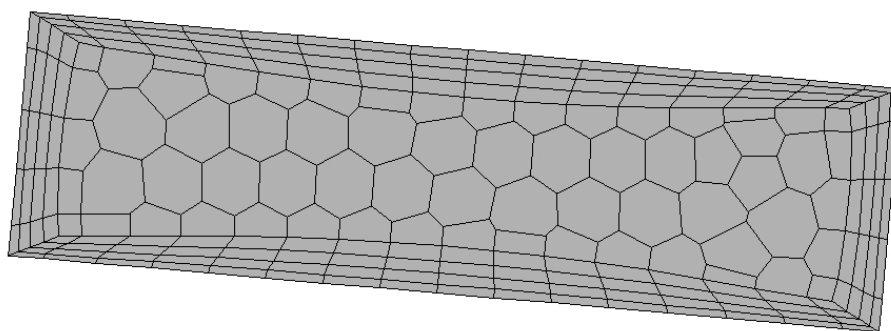
Byla vytvořena polyhedrální výpočetní síť, kde nejmenší rozměr buňky je 0,0005 mm a největší je 20 mm. Dále byla vytvořena prizmatická mezní vrstva s celkovým počtem vrstev 4 a tloušťkou první vrstvy 0,01 mm. Globální hodnota Y^+ nepřesahuje hodnotu 106, což je z pohledu proudění uspokojivé a není třeba cílit na nižší hodnotu, jelikož se nemodeluje přestup tepla.

Jako minimální velikost povrchového elementu byla zvolena hodnota 0,0005 mm, která odpovídá přibližně velikosti nejkratší hrany nacházející se v modelu. Tato nejkratší hrana ovšem neplní žádnou funkci z hlediska využití. Byla vnesena do geometrie v průběhu jejího upravování. Původní model obsahoval mnoho prostorově zaoblených hran a zjednodušováním došlo v určitých místech k jejich rozdělení a vložení právě takovýchto nepatrných přechodových hran. Při síťování modelu je ale potřeba tyto hrany uvažovat a jejich přibližnou velikost znát proto, aby bylo předcházeno zbytečně špatné kvalitě sítě, která je vyhodnocována jako poměr délek hran elementu neboli „Skewness“. Je to dáno tím, že minimální hodnota buněk přes mezeru je 1. Pokud by minimální velikost elementu byla nastavena na větší hodnotu, než je přibližná délka nejmenší hrany, došlo by k situaci, že jedna strana buňky (shodná s nejmenší hranou) by byla mnohem kratší než ostatní a hodnota maximální skewness by tak vzrostla vysoko nad únosnou hodnotu.

Na obr. 14 je zobrazena výsledná síť, kde je zřejmé zjemnění sítě v blízkosti krátkých hran například v oblasti vodících lišt vozíků, lopatek a deflektorů v přívodním kanálu nebo koleček vozíků. Obr. 15 je detailem outletu, tedy koncovou plochou výstupního kanálu.



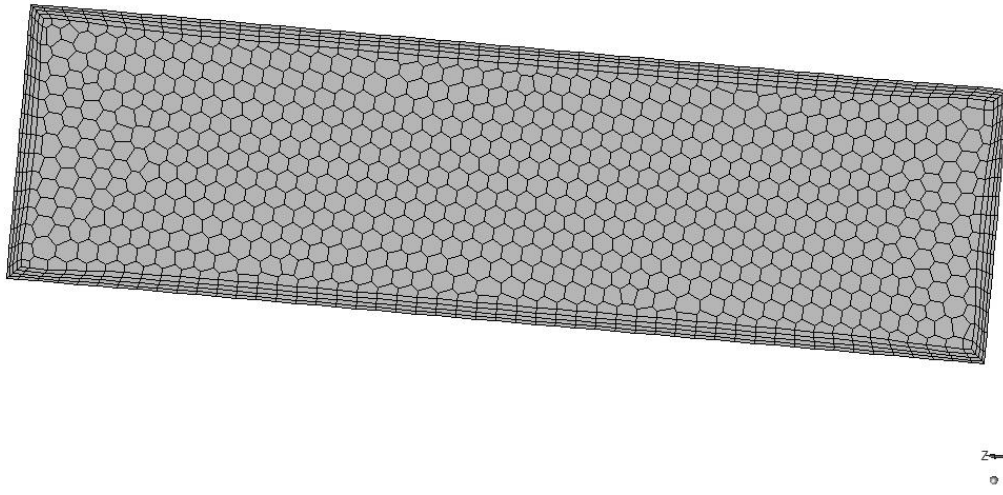
Obr. 14: Síť o 2,8 mil buněk vytvořená v programu Ansys Fluent



Obr. 15: Detail sítě 1 na outletu, vytvořené v programu Ansys Fluent

5.1.2 Sít' 2 – 5,6 milionů elementů

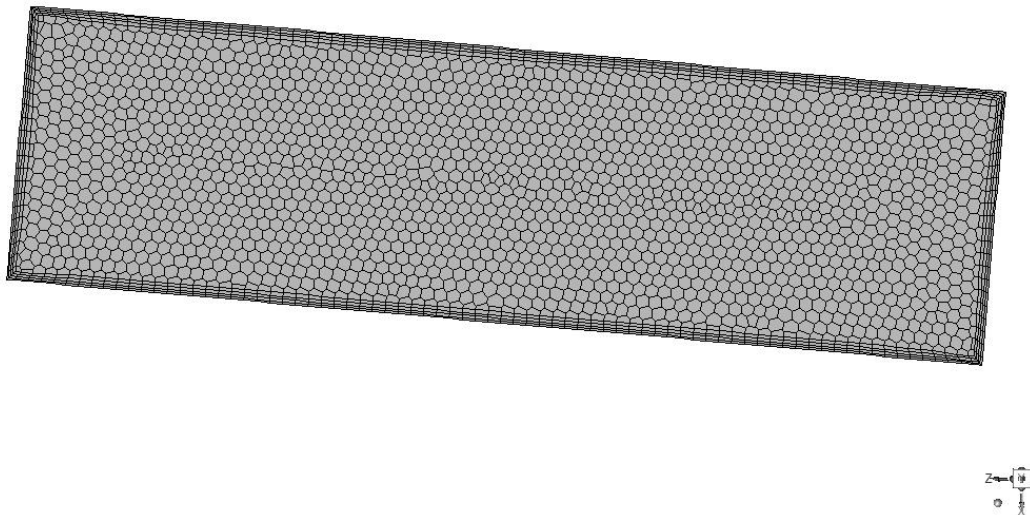
Při tvorbě jemnější sítě je využito stejné nastavení povrchové sítě jako v předchozím případě, pouze maximální velikost buňky byla snížena na hodnotu 6,2 mm. Tím při zachování stejného nastavení objemové sítě bylo dosaženo počtu buněk ve výsledné síti 5,6 milionů. Na obr. 16 pro názornost zobrazen outlet.



Obr. 16: Detail sítě 2 na outletu, vytvořené v programu Ansys Fluent

5.1.3 Sít' 3 – 11,3 milionů elementů

Pro variantu nejjemnější sítě byla nastavena maximální velikost elementu na 4 mm, přičemž ostatní hodnoty byly opět zachovány. Pro porovnání s předchozími verzemi obr. 17 ukazuje outlet.



Obr. 17: Detail sítě 3 na outletu, vytvořené v programu Ansys Fluent

5.1.4 Analýza y^+

Nezbytné pro následující výpočty je vytvořit síť, která bude přesně předpovídat gradient rychlosti přes mezní vrstvu. V případě turbulentních toků by v ideálním případě měl element mezní vrstvy ležet uvnitř velmi tenké viskózní podvrstvy. Toto kritérium ale nemůže být splněno pro komplexní toky ve složitých geometriích, protože to by vyžadovalo velmi jemné rozlišení sítě blízko stěny, což by značně prodloužilo čas potřebný pro vyřešení problému. Pro řešení tohoto požadavku je zavedena stěnová funkce, která umožňuje použití "relativně" větší sítě v blízkosti stěny. [10]

Jedním z hlavních parametrů funkce stěny je y^+ a vyjadřuje se pomocí vztahu

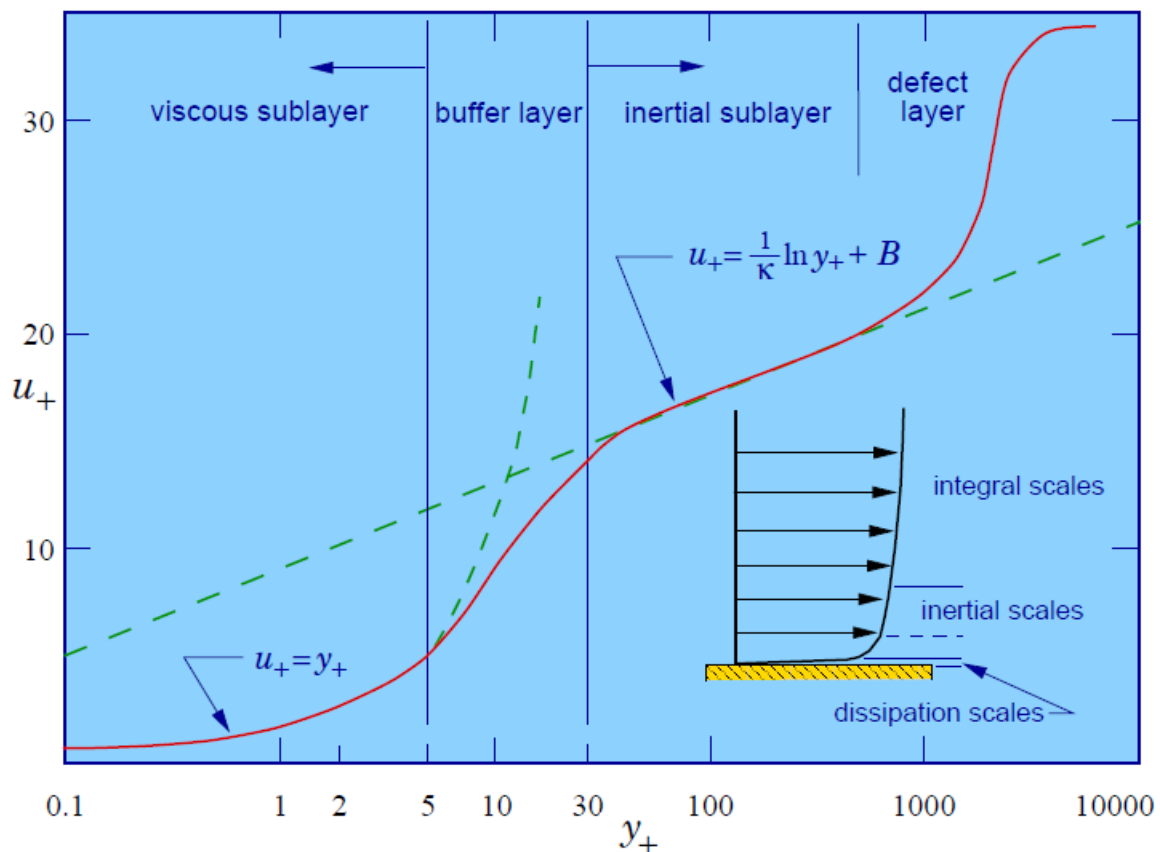
$$y^+ = \frac{y}{\mu} \cdot \sqrt{\rho \cdot \tau_w} ,$$

Kde y v čitateli udává vzdálenost středu elementu od hrany, μ značí dynamickou viskozitu, ρ vyjadřuje hustotu média a τ_w je smykové napětí na stěně elementu.

Z hlediska y^+ jsou definovány tři oblasti mezní vrstvy:

- laminární podvrstva ($y^+ < 5$),
- přechodová vrstva neboli „Buffer zone“ ($5 < y^+ < 30$),
- turbulentní vrstva neboli „Log-law zone“ ($y^+ > 30$).

Rychlost má ve viskózní podvrstvě lineární průběh, zatímco v turbulentní vrstvě vzrůstá logaritmicky (viz obr. 18). Jedním z důležitých skutečností je, že první buňka sítě by neměla ležet v „buffer zone“, tj. y^+ by neměla být mezi 5 a 30. [11]



Obr. 18: Rychlostní profil v turbulentní mezní vrstvě[11]

Jsou rozlišovány 3 stěnové funkce [10]:

- Standardní: Používána v případě, že první buňka nemůže být umístěna uvnitř viskózní podvrstvy a leží v oblasti turbulentní vrstvy. Poskytuje přiměřeně přesné výsledky pro většinu toků s vysokým Reynoldsovým číslem. Hodnota y^+ by měla být mezi 30 a 300.
- Nerovnovážná: Poskytuje lepší výsledky při silném gradientu tlaku a silných nerovnovážných tocích. Vzhledem ke schopnosti částečně zohlednit účinky tlakových gradientů a odchylky od rovnováhy je funkce nerovnovážné stěny doporučena pro použití v komplexních rychle se měnících tocích a tocích zahrnujících separaci a opětovné připojení. Hodnota y^+ by měla být mezi 30 a 300, stejně jako standardní stěnová funkce.
- Rozšířená: Je-li třeba viskózní dílčí vrstvu zachytit v případech jako je přechodný tok, separace, přenos tepla, predikce třecího odporu atd., musí být první buňka umístěna v rámci viskózní podvrstvy a hodnota y^+ by měla být menší než 1. Pro komplikované geometrie může y^+ jít až na hodnotu 5.

5.2 Zhodnocení, výběr nejvhodnější varianty

Studie výpočetní sítě je provedena na základě vyhodnocení průměrné rychlosti na reálném výstupu z chlazeného prostoru kuchyňky. Tato hodnota byla záměrně vybrána, jelikož je známa i z experimentálního měření a lze tedy nejen rozhodnout o závislosti výsledků na výpočetní síti, ale i o shodě simulace s provedeným měřením.

V této podkapitole je tedy porovnávána průměrná hodnota rychlosti v průřezu outletu pro vytvořené (výše popsané) tři varianty sítě. Pro získání výsledků pro účely mesh study byl nastaven výpočet stejně jako u samotné analýzy problému – nastavení výpočtu viz kapitola 7.

V tabulce 1 je porovnána hodnota průměrné rychlosti mezi jednotlivými variantami společně s výsledným koeficientem y^+ . Z tabulky lze vyčíst, že mezi hodnotou rychlosti získané výpočtem pro síť 2 a síť 3 není rozdíl větší než 8% a mezi hodnotou pro síť 1 a síť 2 je rozdíl 10%. Tyto hodnoty odchylek se výrazně neliší, proto by z hlediska značné úspory na výpočetním čase mohla být síť 2 považována za uspokojivou. Jelikož ale máme k dispozici výsledky měření, bylo rozhodnuto, že pro výpočty bude použita jemnější výpočetní síť, která vykazuje lepší shodu s experimentem. Podrobnější diskuze k validaci výsledků je předmětem kapitoly 7.

Pro porovnání je tedy v tabulce také uvedena hodnota rychlosti, zjištěná experimentálním měřením. Porovnáním hodnot je zřejmé, že s rostoucím počtem elementů sítě se hodnota průměrné rychlosti vybrané plochy blíží hodnotě naměřené tak, že při 11,3 milionech buněk vypočtená hodnota rychlosti víceméně odpovídá hodnotě naměřené.

Varianta	Síť 1 2.83 MIL buněk	Síť 2 5.6 MIL buněk	Síť 3 11.3 MIL buněk	Naměřená hodnota
Průměrná rychlost na outletu [m/s]	3,91	4,35	4,72	4,78
Procentuální rozdíl výsledků [%]	10,1		7,8	
Y+ maximální	105,9	84,3	60	

Tab. 1: Porovnání vytvořených variant sítě

6 Nastavení výpočtu

6.1 Obecné nastavení výpočtu

Numerické simulace byly provedeny jako stacionární, přičemž nebyl uvažován vliv gravitace, jelikož ten je s ohledem na malou hustotu vzduchu a relativně vysoké rychlosti proudění v doméně zanedbatelný. Dále nebyl uvažován vliv radiace a nebyl modelován přestup tepla. Výpočet byl ale proveden s uvažováním energetické rovnice.

S ohledem na předpokládané rychlosti ve výpočetní doméně lze proudění považovat za turbulentní (Re na vstupu je 61 650). Použitým turbulentním modelem je SST k-omega, který je v současné době považován za průmyslový standard CFD simulací. Pracovním médiem je ideální plyn a jako referenční tlak je uvažován tlak 101370 Pa.

Pro zvýšení přesnosti simulací, byť za cenu nárůstu výpočetního času, bylo zapnuto schéma druhého řádu přesnosti pro diskretizaci diferenciálních rovnic popisujících proudění, viz kapitola 4.

6.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou dány typem použitého chilleru.

Okrajovými podmínkami jsou celkový tlak na vstupu a statický tlak na výstupu z geometrie, které odpovídají reálným tlakům, které chiller vyvolává. Nastaveny byly relativní hodnoty tlaku vůči referenční hodnotě, viz kapitola výše. Na vstupu byl tedy definován přetlak 45 Pa a na výstupu podtlak 385 Pa. Na vstupu je implicitně předpokládán rovnoměrný rychlostní profil, tlak na výstupu je předpokládán jako průměrný po ploše. Na výstupu i na vstupu byla nastavena teplota 296,15 °C.

Kromě okrajových podmínek inletu a outletu je nutné definovat ještě podmínku na stěnách. Stěny jsou předpokládány jako hydraulicky hladké a je na nich aplikována podmínka nulové relativní rychlosti.

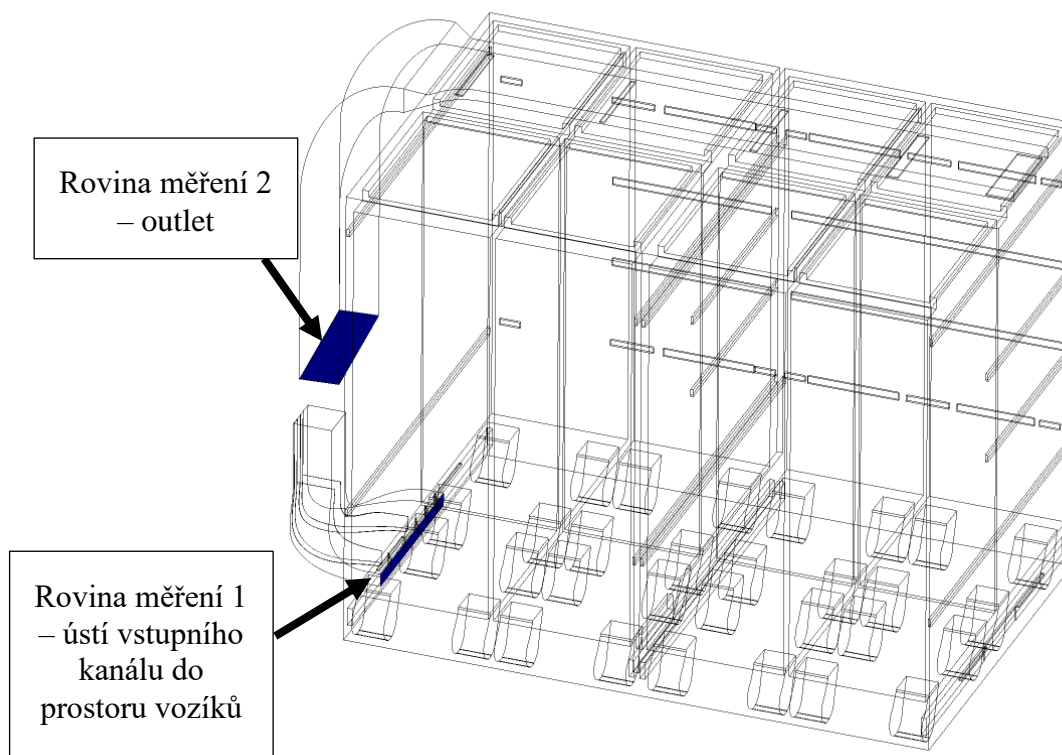
7 Validace numerické simulace

Byť každá numerická simulace vyžaduje validaci výsledků, tedy jejich srovnání s experimentálním měřením, ne vždy je toto možné. Důvodů je několik, avšak rozhodujícím faktorem bývá nákladné provedení experimentálního měření. Jelikož tato práce se zabývá simulací konstrukčního provedení kuchyňky, pro níž již společnost Safran provedla měření, můžeme tato měření použít pro validaci zde provedených simulací.

Měření ve společnosti Safran proběhlo na konstrukčním provedení kuchyňky odpovídající variantě 1 (viz kapitola 3.2) a za podmínek shodných s nastavením simulace (viz kapitola 6). Jak již bylo řečeno v kapitole 5, na této konstrukční variantě byla provedena i studie nezávislosti výsledků na výpočetní síti, kde bylo rozhodnuto o použití sítě s 11,3 mil elementů.

V rámci experimentálního měření byla měřena rychlost a hodnota statického tlaku na dvou místech prototypu kuchyňky. Po průřezu bylo naměřeno několik hodnot rychlosti, které byly následně zprůměrovány pro získání porovnávací hodnoty s numerickou simulací.

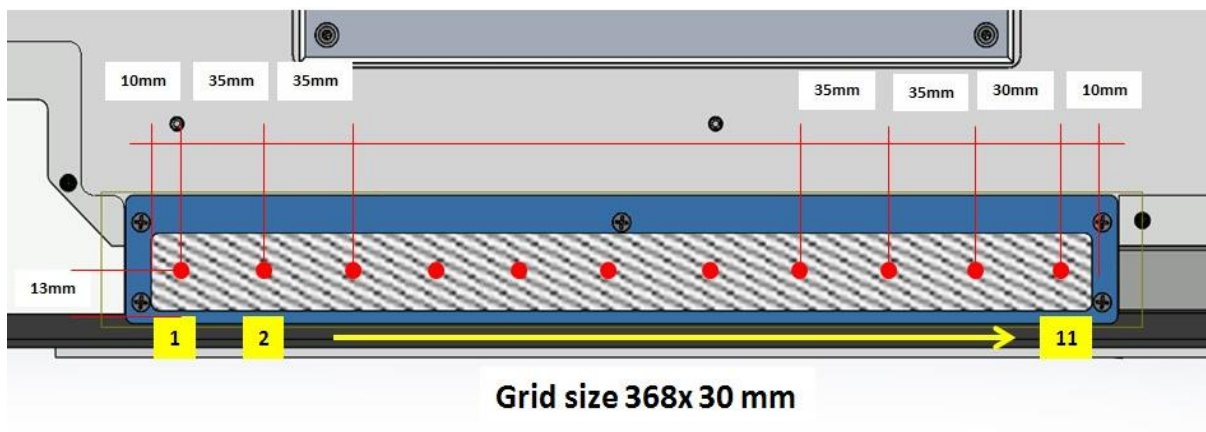
Prvním místem měření je plocha v ústí vstupního kanálu do samotného chlazeného prostoru vozíků. Toto místo je vhodné pro validaci, jelikož se nachází v dostatečné vzdálenosti od míst, kde jsou aplikovány okrajové podmínky. Dobrá shoda u výstupu může být totiž z části zapříčiněna právě tím, že to místo je velmi blízko okrajové podmínce. Druhým místem je outlet, tedy místo vstupu proudu vzduchu zpět do chilleru. Pro názornost jsou obě roviny zvýrazněny v drátovém modelu geometrie níže (obr. 19).



Obr. 19: Drátový model geometrie - varianty I, se zvýrazněním měřených ploch

Na konci vstupního kanálu byla rychlost měřena v jedenácti bodech rovnoměrně rozložených po délce obdélníkového průřezu. Přesná pozice měřicích bodů je zobrazena na obrázku 20.

Naměřené hodnoty rychlosti spolu se zprůměrovanou hodnotou jsou vepsány do tabulky 2, kde je taktéž uvedena průměrná rychlost vyhodnocená CFD analýzou. V posledním sloupci je uvedena odchylka hodnoty vypočítané od naměřené.



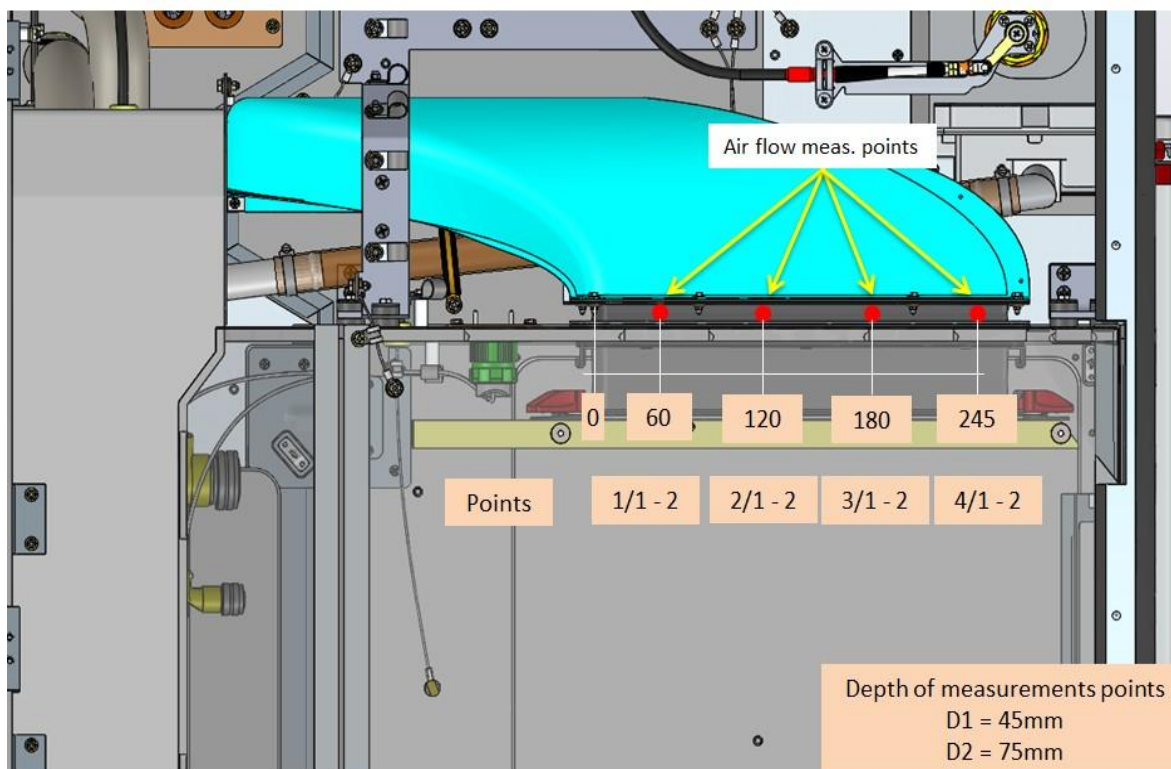
Obr. 20: Rozmístění měřicích bodů v rovině na konci vstupního kanálu

Měřicí body	Naměřená rychlost [m/s]	Průměrná rychlost dle experimentu [m/s]	Průměrná rychlost dle CFD [m/s]	Odchylka
1	10,95	11,94	10,98	8,0 %
2	12,37			
3	13,40			
4	10,95			
5	12,19			
6	12,27			
7	12,62			
8	12,89			
9	10,61			
10	11,72			
11	11,38			

Tab. 2: Hodnoty rychlosti naměřené a vypočítané v místě na konci vstupního kanálu

Z tabulky 2 je zřejmé, že v místě vstupu studeného vzduchu do trolley prostoru je rozdíl mezi experimentálně změřenou hodnotou rychlosti a její hodnotu zjištěnou numerickou simulací kolem 8%, což lze považovat za uspokojivé. Tato odchylka je dána celou řadou nejistot, o nichž je jisté jen to, že jsou vskutku nejisté. Jedná se o nejistoty samotného měření, které ale jen stěží hodnotit, jelikož není zřejmé, jakým způsobem a s jakými přístroji bylo měření provedeno. Nelze tedy hodnotit systematické, příp. nahodilé chyby měření. Svoji roli ale mohou hrát i nejistoty vlastní numerické simulace. Byla provedena studie nezávislosti na výpočetní síti, nicméně i přesto jsou výsledky ovlivněny např. zvoleným výpočetním modelem (viz kapitola 6).

Na outletu bylo provedeno měření v osmi bodech. Rozmístění a označení měřicích bodů je zřejmé z obrázku 21, zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3, stejnětak i hodnota průměrná naměřená a průměrná vypočtená a jejich odchylka.



Obr. 21: Rozmístění měřicích bodů v rovině outletu

Měřicí body	Naměřená rychlost [m/s]	Průměrná rychlost dle experimentu [m/s]	Průměrná rychlost dle CFD [m/s]	Odchylka
1-1	6,09	4,78	4,72	1,3 %
1-2	9,22			
2-1	5,54			
2-2	4,67			
3-1	3,64			
3-2	3,15			
4-1	2,77			
4-2	3,18			

Tab. 3: Hodnoty rychlosti naměřené a vypočtené v místě outletu

Odchylka rychlostí zjištěných na outletu je 1,3%. Tuto hodnotu lze považovat za velmi dobrý výsledek.

Na základě výše zmíněných tabulek lze považovat výpočet za validovaný.

8 Odezva systému na změny vstupních dat

Tato kapitola je rozbořem vlivu regulačních prvků na charakteristiku proudění mezi jednotlivými vozíky a jejich obtékáním. Cílem je zjistit, jak se mění obtékání v závislosti na přidávání/odebírání geometrických prvků, zde označovaných jako regulačních, které byly do geometrie zařazeny s předpokladem usměrnění proudu. Až dosud byla veškerá geometrie navrhována na základě zkušenosti konstruktérů a konkrétní dopad těchto návrhů byl ověřován experimentálně. Cílem této kapitoly je tedy zavedení numerického modelování proudění do samotného procesu návrhu geometrie s cílem získat optimální design bez nutnosti opakované výroby prototypů.

V praxi společnosti Safran Cabin CZ byl doposud vliv regulačních prvků ověřován pouze experimentálně tzv. metodou „pokus-omyl“. Protože účelem instalovaného chlazení v kuchyňce letadla je udržet teplotu jídelních vozíků na požadované hodnotě, experimentální měření je založeno na měření teploty na stěnách a uvnitř jednotlivých vozíků a stanovení, zda je měření a tedy i měřený systém vyhovující, či nikoliv. V momentě, kdy teploty ve všech místech odpovídají požadované hodnotě, je podoba geometrie, na které bylo měření prováděno označena automaticky za vhodnou a vyhovující a proudění se více nezkoumá. Pokud však teploty nevyhovují, hledá se řešení v podobě vkládání či odebírání prvků, za účelem rovnoměrného rozložení proudu chladicího vzduchu tak, aby více proudil do míst, kde teplota přesahovala povolenou mez nebo naopak, aby se omezilo obtékání stěn, kde hodnota teploty byla nižší, než požadovaná.

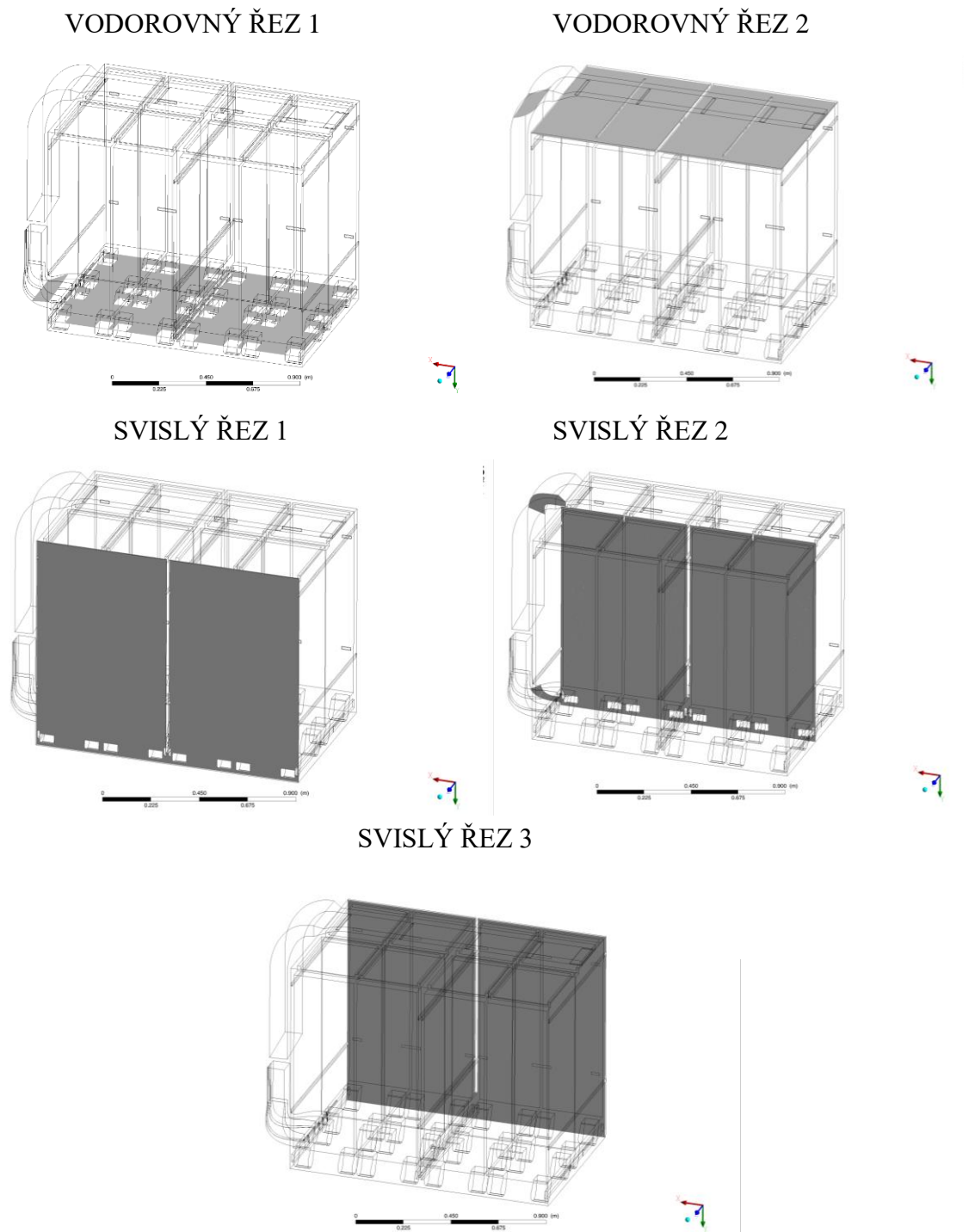
Jak je na první pohled zřejmé, v optimalizaci chlazeného systému se jedná hlavně o teploty, avšak tato práce se přenosem tepla nezaobírá. Důvodem je skutečnost, že pro analýzu teplotního pole by musel být problém řešen velice detailně a svým rozsahem by překračoval rozsah standardní diplomové práce. Výpočet by musel být velmi komplexní, pravděpodobně transientní. Hlavním problémem takového výpočtu by byla samotná definice zdrojů tepla, kterých by muselo být hned několik. Hlavním zdrojem by byl přestup tepla stěnami, což by vyžadovalo simulaci okolního prostředí kolem kuchyňky (tj. přestup tepla z okolí do stěny), dále vedení tepla stěnou a dále celý vnitřní prostor.

Takto komplexní řešení ale může být mnohdy zbytečné, zejména při návrhu nových typů, kdy je požadavek na rychlou odezvu simulací při změně geometrie. Jelikož k ochlazení / udržování teploty dochází vlivem proudění chladného vzduchu, lze výsledné teplotní pole a jeho rovnoměrnost hodnotit právě prostřednictvím rovnoměrnosti pole rychlostního. Podstata je totiž v samotném charakteru proudění. Pokud se do některých míst chladný proud vzduchu nedostane, tato místa tak nebudou ochlazená a teplota bude s vysokou pravděpodobností vyšší než dovolené hodnoty a naopak omývá-li veškerý hmotnostní tok chlazeného vzduchu pouze jeden nebo dva vozíky, může dojít k jejich přechlazení, kdy teplota klesne pod spodní povolenou mez.

V následujících podkapitolách je provedeno porovnání jednotlivých variant z hlediska rychlostních polí. Na obrázcích 24 – 75 jsou zachyceny proudnice, rychlostní pole a vektory rychlosti v důležitých řezech. Stav rychlosti v každém uvedeném řezu je vždy porovnán pro všechny 4 modifikace geometrie, aby bylo zřejmé, jak dané regulační prvky ovlivňují proud.

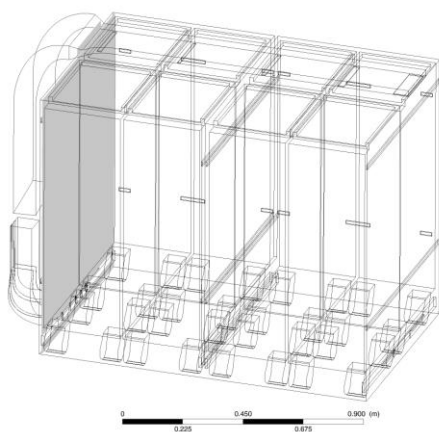
8.1 Přehled řezů modelem

Je vytvořeno jedenáct řezů modelem, ve kterých je provedeno porovnání variant. Řezy jsou provedeny ve dvou vodorovných rovinách (jedna rovina v oblasti koleček, jedna nad vozíky), třech svislých rovinách rovnoběžných s dvířky kuchyňky (před, mezi a za trolley vozíky) a v šesti rovinách na ně kolmých (vždy v mezeře mezi stěnou a trolley nebo mezi jednotlivými vozíky). Vzhledem k souřadnicovému systému modelu se jedná o dvě roviny XZ, tři roviny XY a šest rovin YZ.

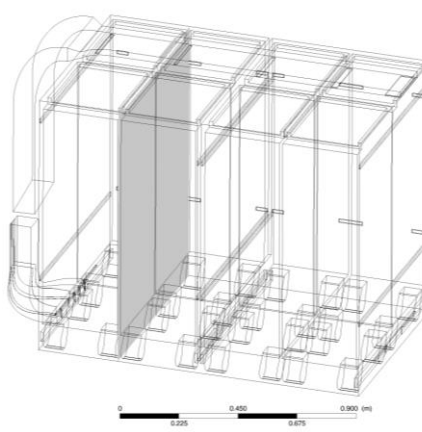


Obr. 22: Pozice vodorovných a svislých řezů modelem

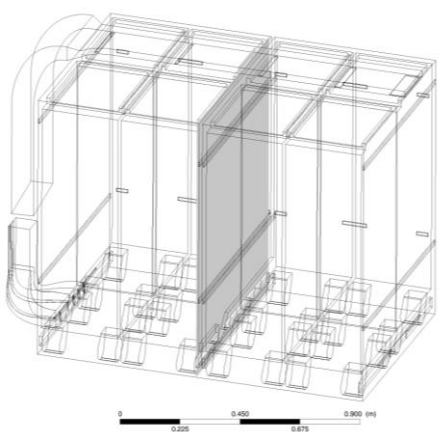
BOČNÍ ŘEZ 1



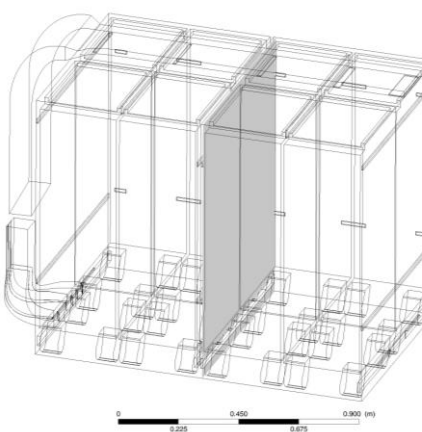
BOČNÍ ŘEZ 2



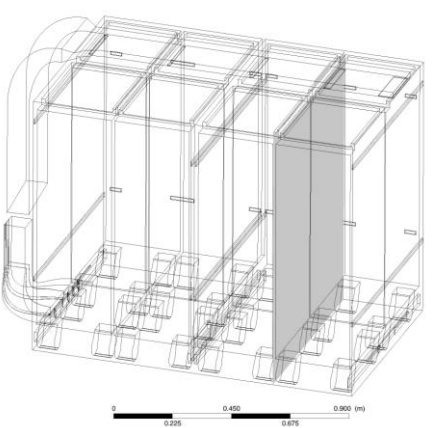
BOČNÍ ŘEZ 3



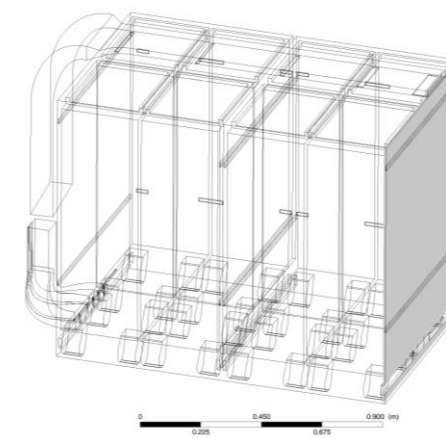
BOČNÍ ŘEZ 4



BOČNÍ ŘEZ 5



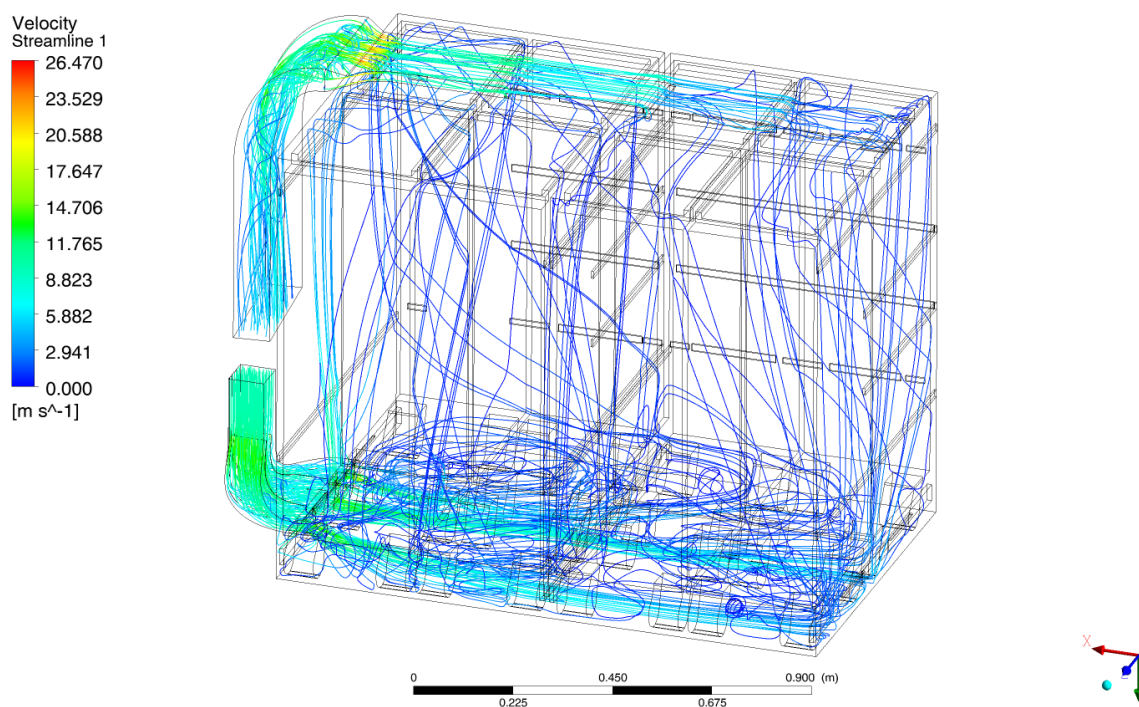
BOČNÍ ŘEZ 6



Obr. 23: Pozice bočních řezů modelem

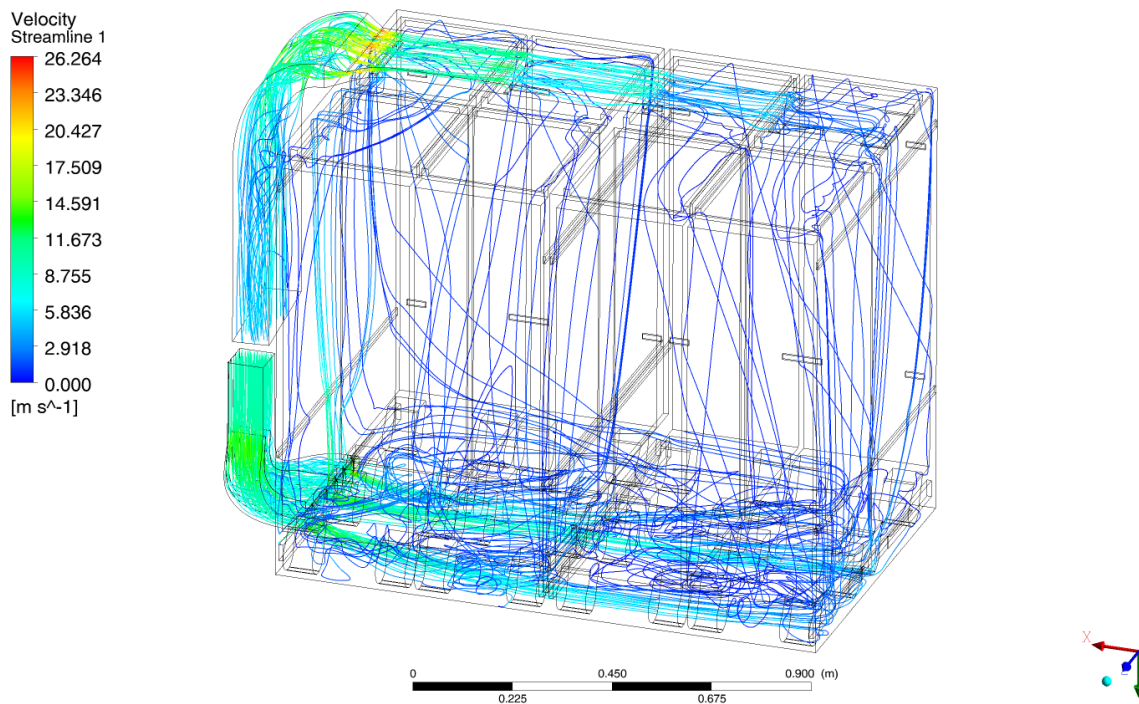
8.2 Proudnice

VARIANTA 1



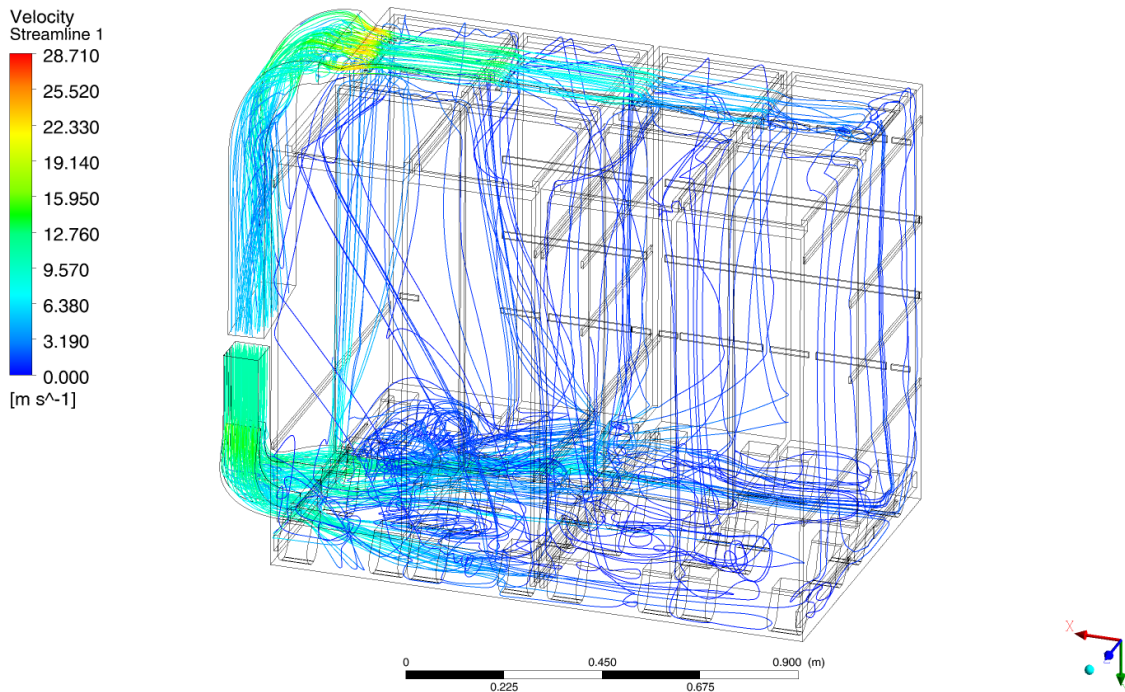
Obr. 24: Proudnice - varianta 1, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2



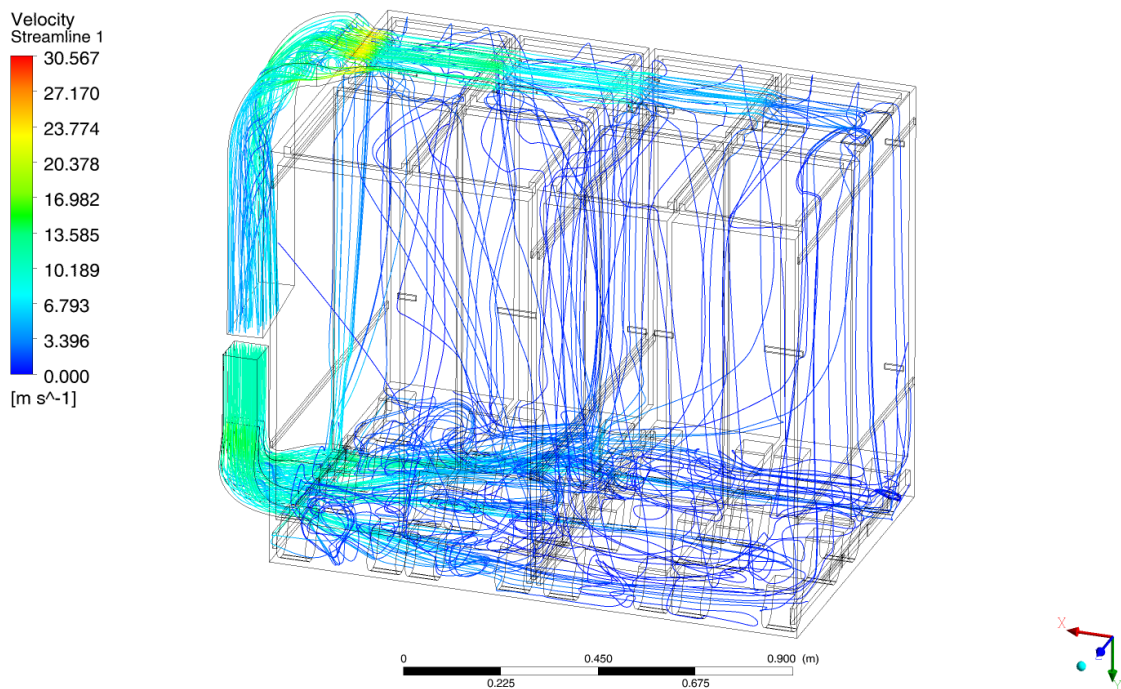
Obr. 25: Proudnice - varianta 2, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3



Obr. 26: Proudnice - varianta 3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4

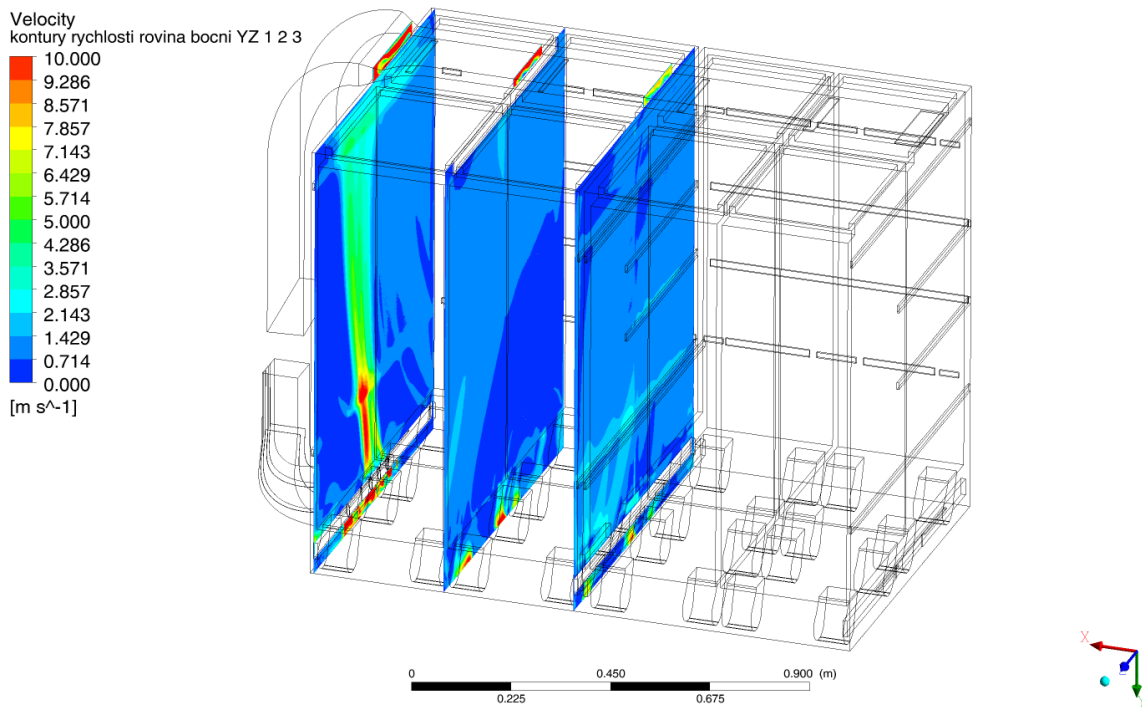


Obr. 27: Proudnice - varianta 1, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

Z proudnic vykreslených pro jednotlivé varianty je zřejmé, že neoptimálnější variantou je varianta 1. Proudění v modelu varianty 2 již není tak optimální, protože v zadním pravém rohu a celkově i v zadní části proudí vzduch méně než v ostatních částech modelu. Ve variantě 3 naopak nedostatečně proudí vzduch do pravé přední části a ve variantě 4 většina proudů prochází pouze částí před divider panelem.

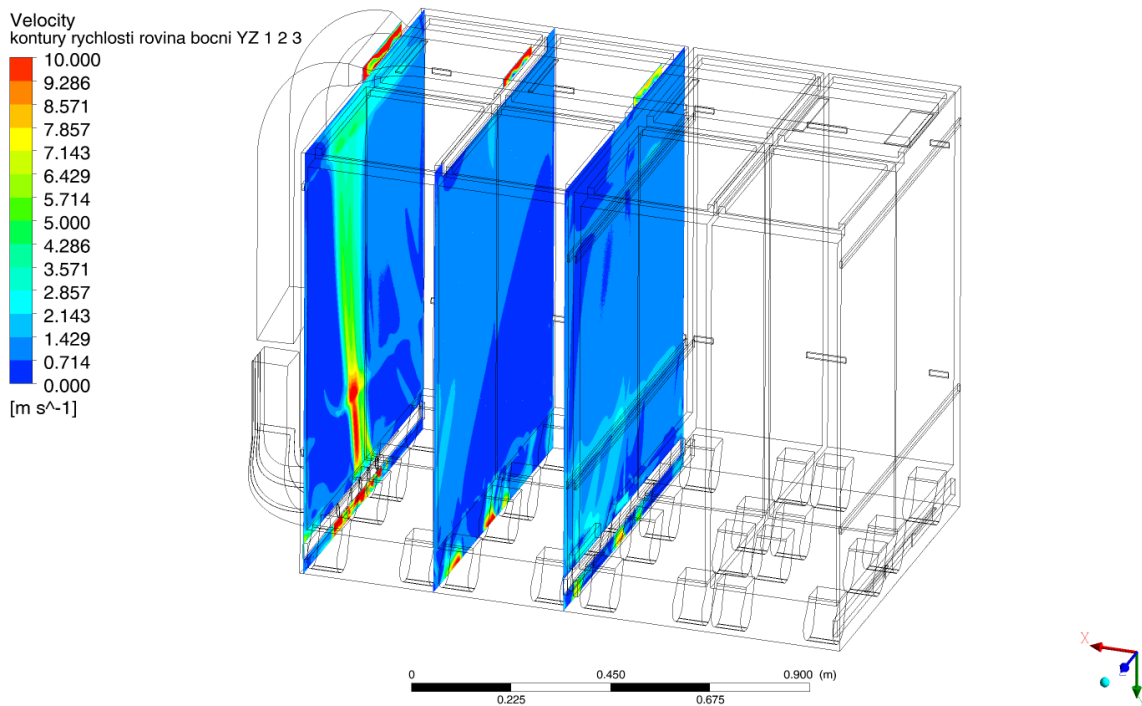
8.3 Kontury rychlosti

VARIANTA 1 - ŘEZ BOČNÍ 1-3



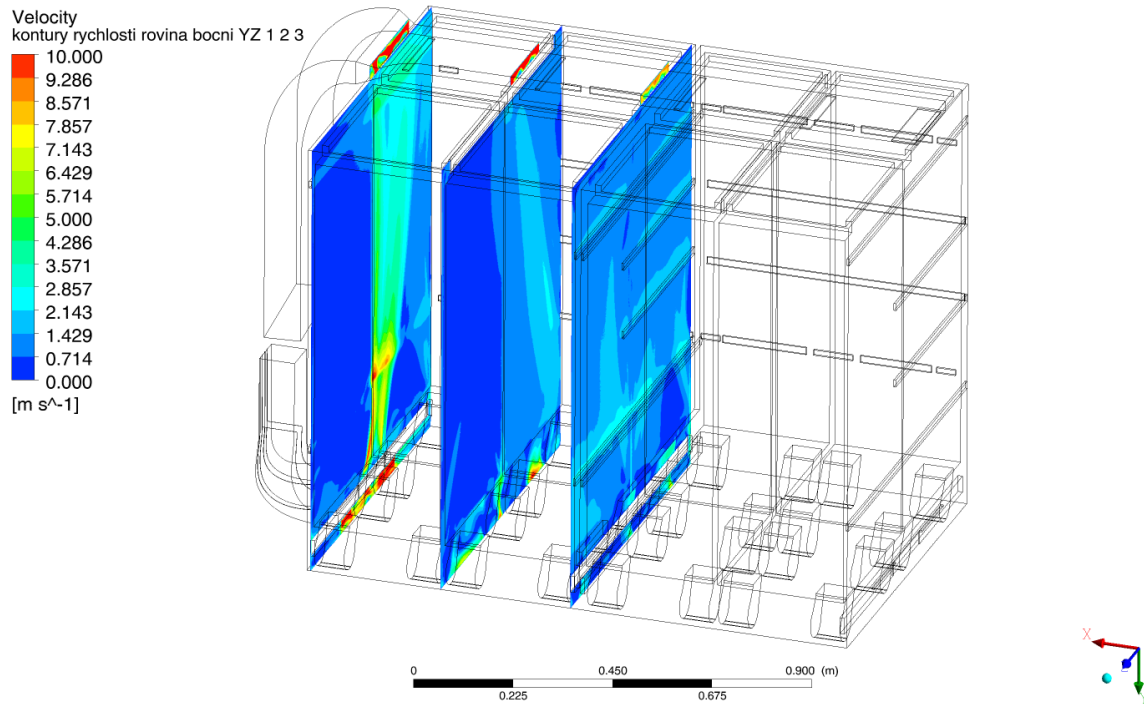
Obr. 28: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 - ŘEZ BOČNÍ 1-3



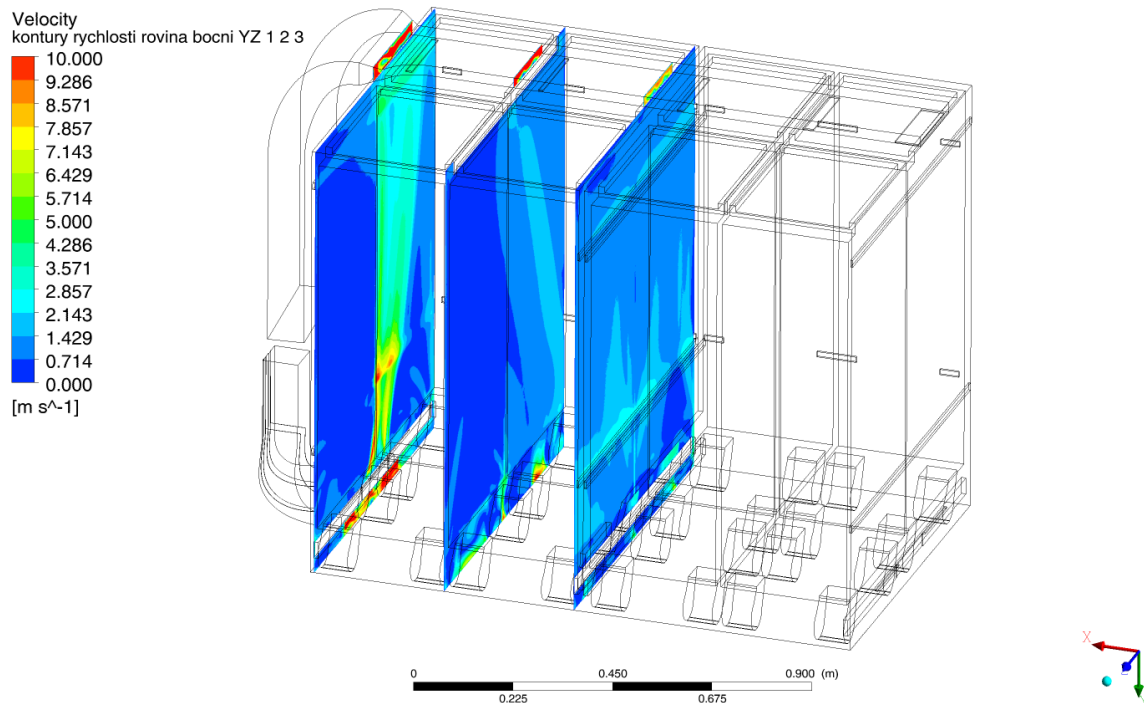
Obr. 29: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 - ŘEZ BOČNÍ 1-3



Obr. 30: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

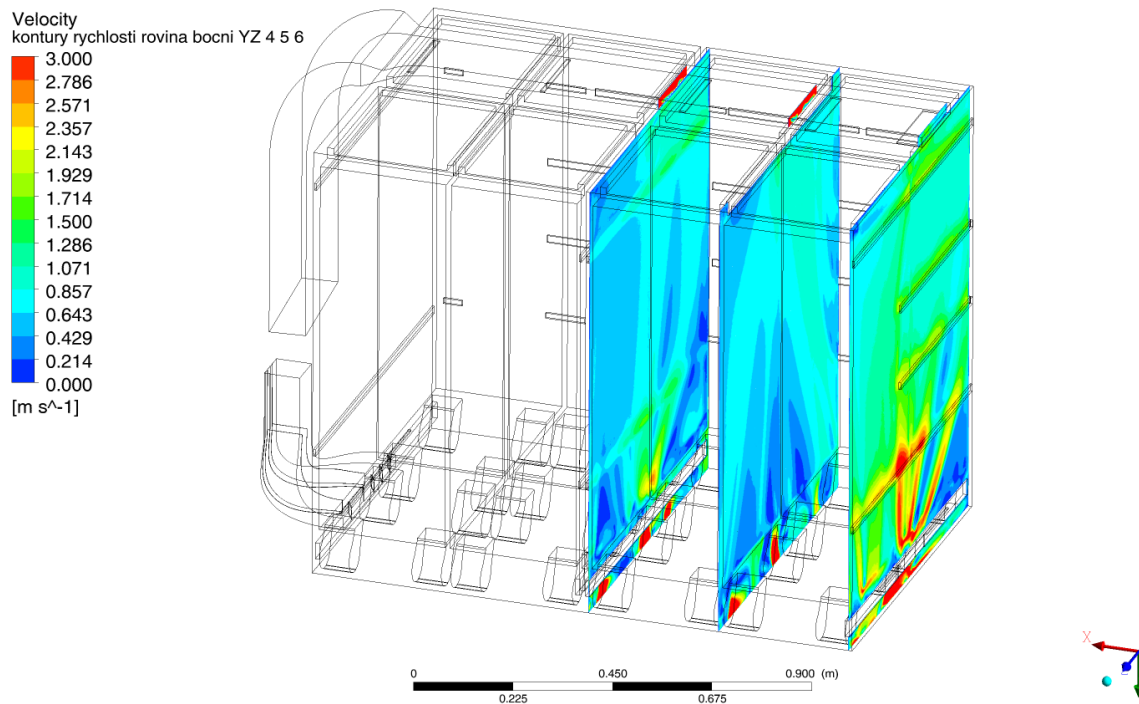
VARIANTA 4 - ŘEZ BOČNÍ 1-3



Obr. 31: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez boční 1-3, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

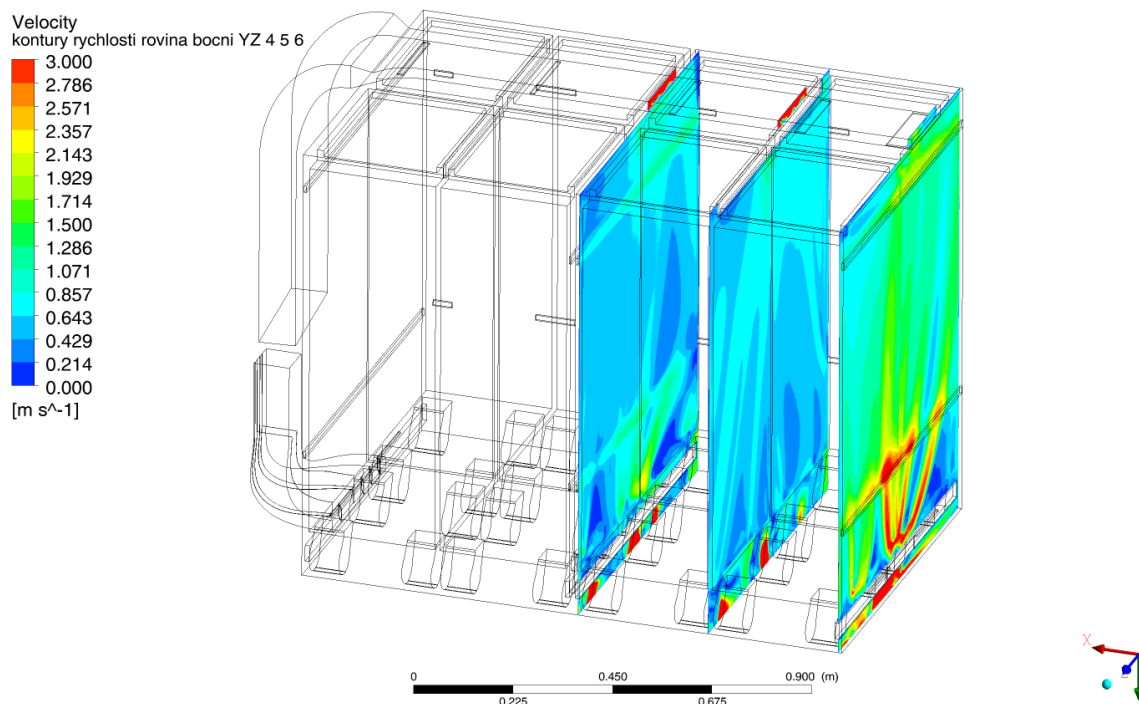
Z vykreslených kontur v řezech 1, 2 a 3 je zřejmý nejznatelnější vliv deflektorů, které jsou přítomny v modelech varianty 1 a 2. Deflektory stáčí proud do přední části prostoru a zajišťují tak chlazení vozíků i v přední řadě.

VARIANTA 1 - ŘEZ BOČNÍ 4-6



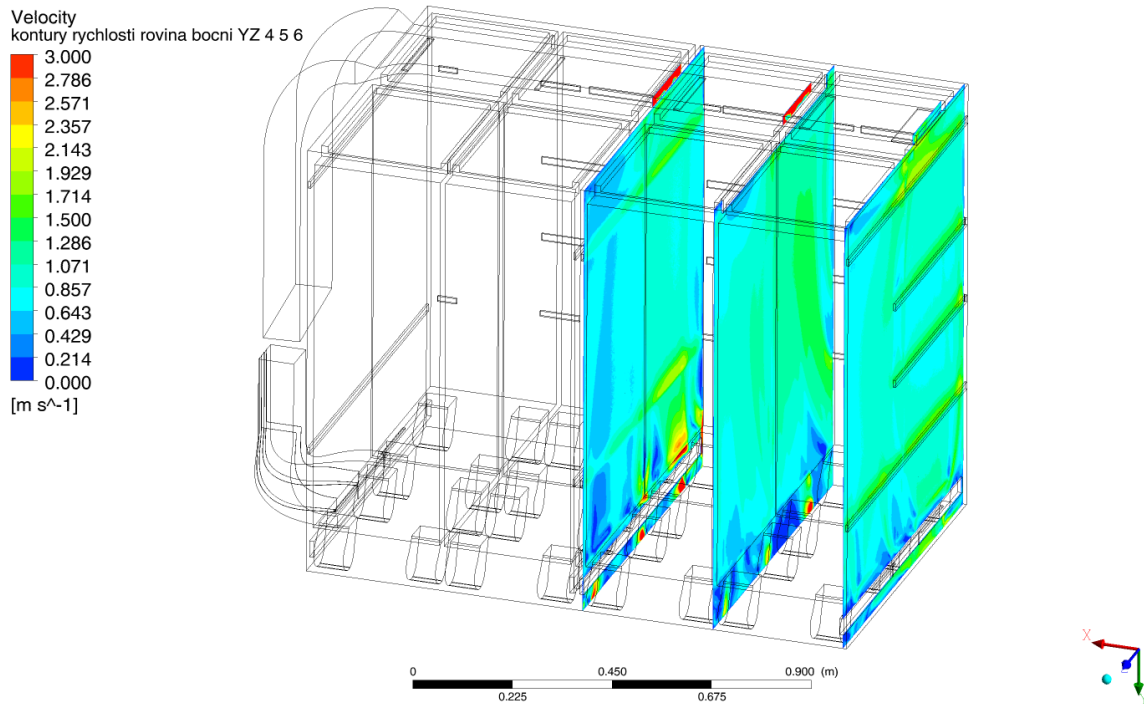
Obr. 32: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 - ŘEZ BOČNÍ 4-6



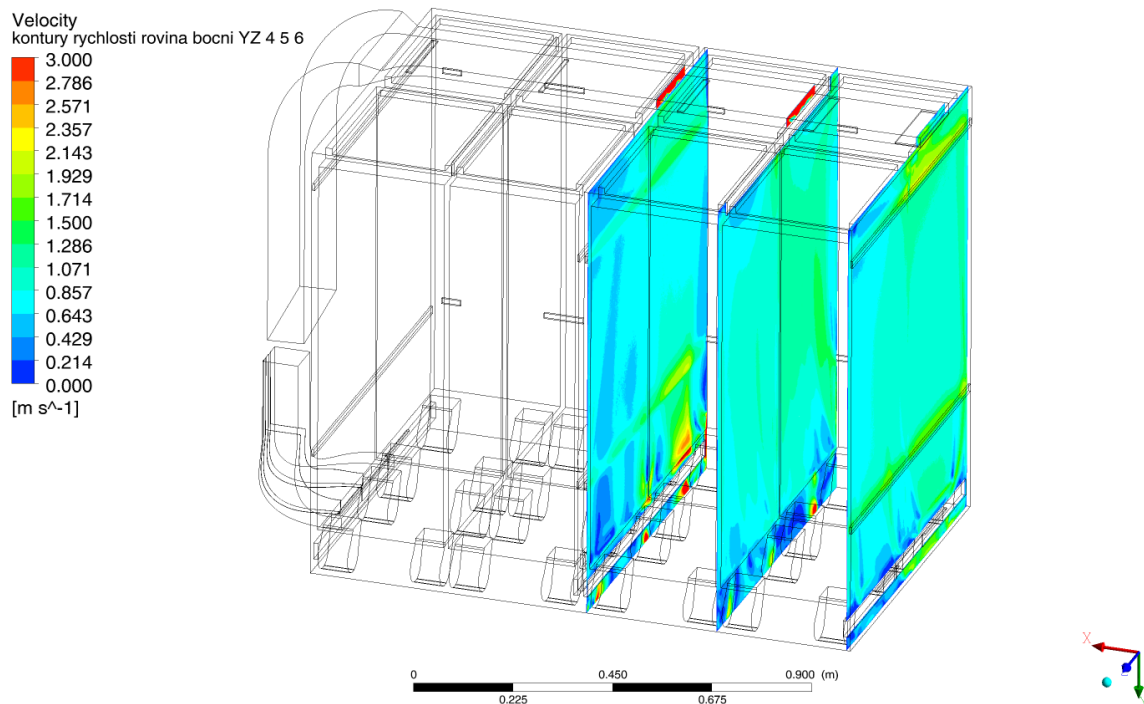
Obr. 33: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 - ŘEZ BOČNÍ 4-6



Obr. 34: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

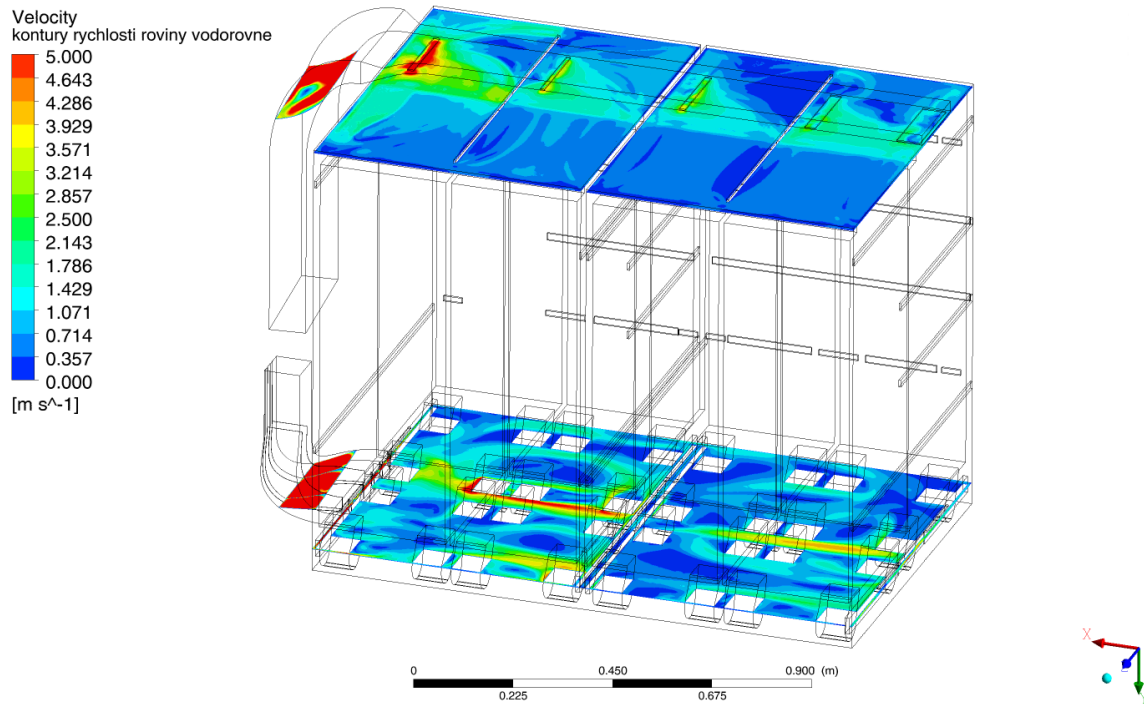
VARIANTA 4 - ŘEZ BOČNÍ 4-6



Obr. 35: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez boční 4-6, vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

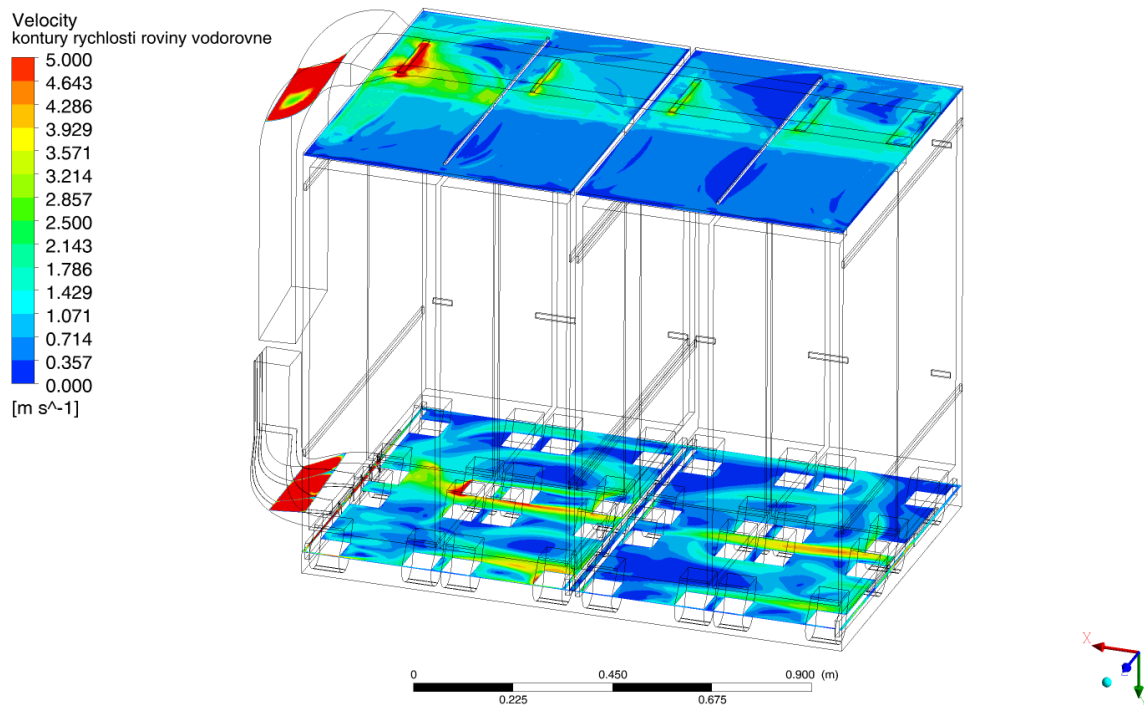
Z bočních řezu 4, 5 a 6 lze vyčíst vliv deflektorů, které zajišťují dostatečné proudění do prostoru za divider panelem ale i pásků na stěnách, které nutí proudit vzduch více do přední části.

VARIANTA 1 – ŘEZY VODOROVNÉ



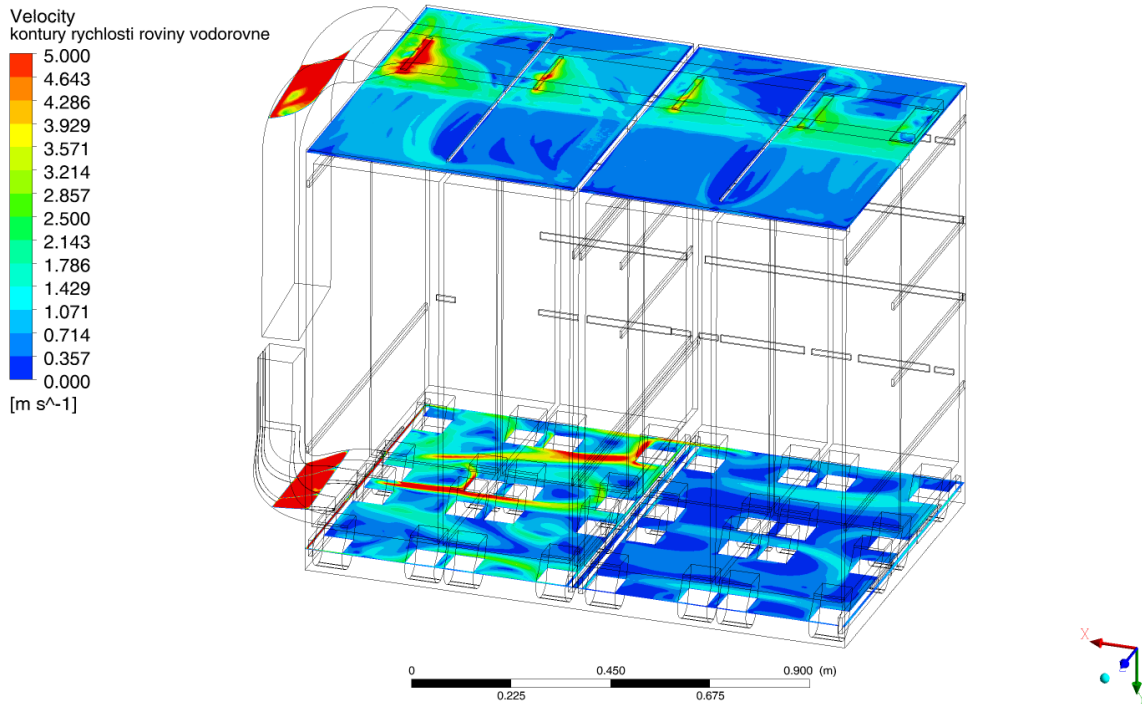
Obr. 36: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZY VODOROVNÉ



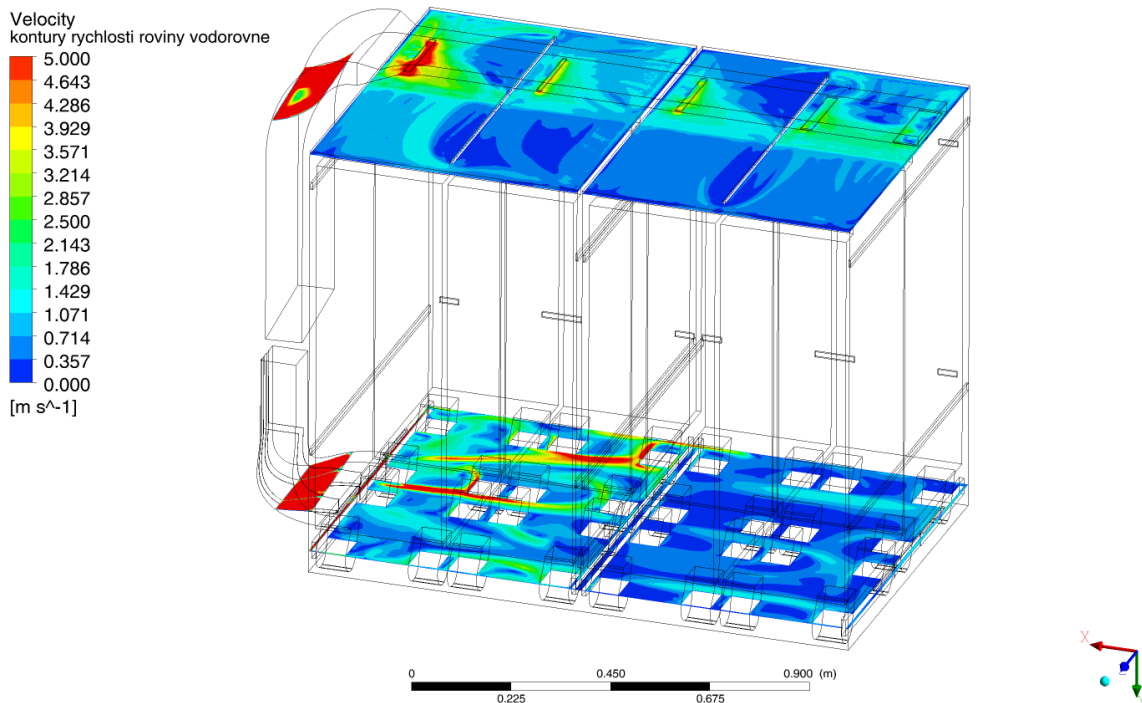
Obr. 37: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZY VODOROVNÉ



Obr. 38: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

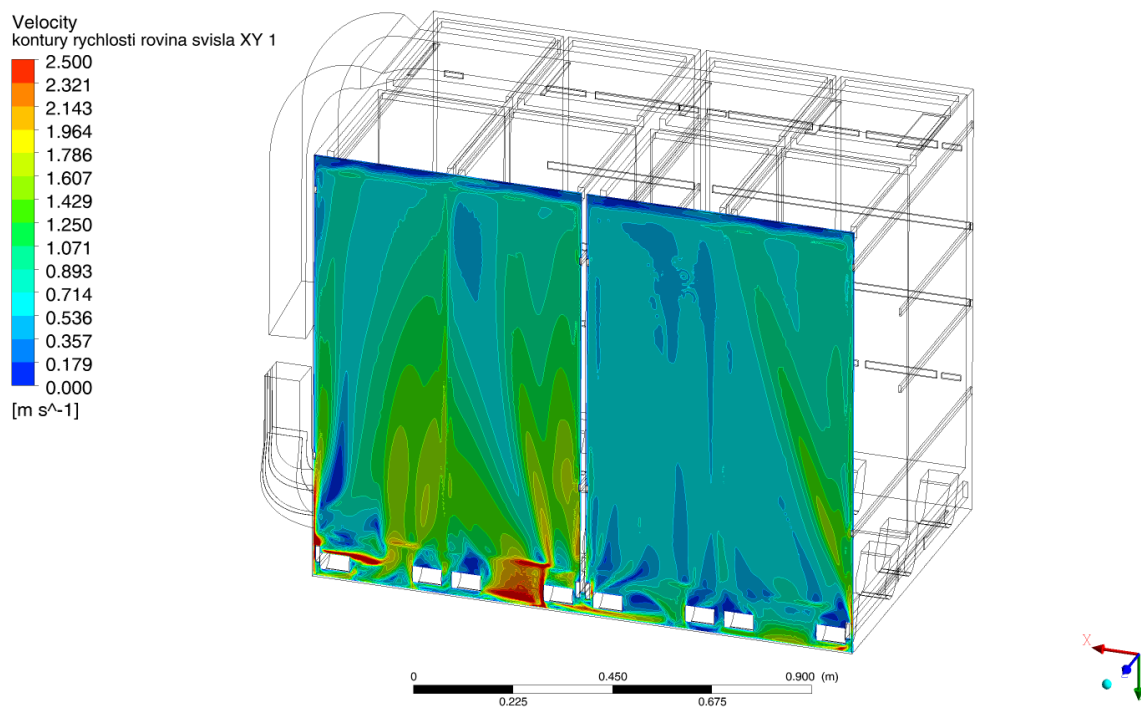
VARIANTA 4 – ŘEZY VODOROVNÉ



Obr. 39: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez vodorovný 1, 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

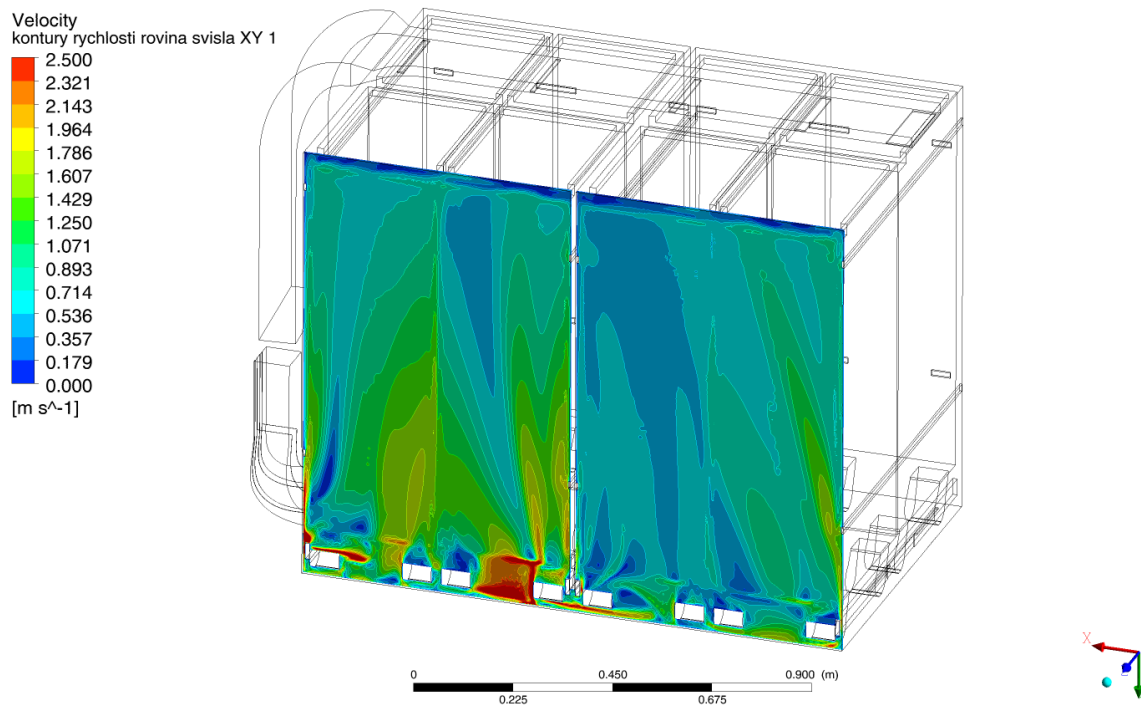
Vodorovné řezy potvrzují již zmíněný vliv deflektorů na proud, kdy deflektory způsobují takové zakřivení proudu, aby bylo umožněno vzduchu proudit i do prostoru za divider panelem.

VARIANTA 1 – ŘEZ SVISLÝ 1



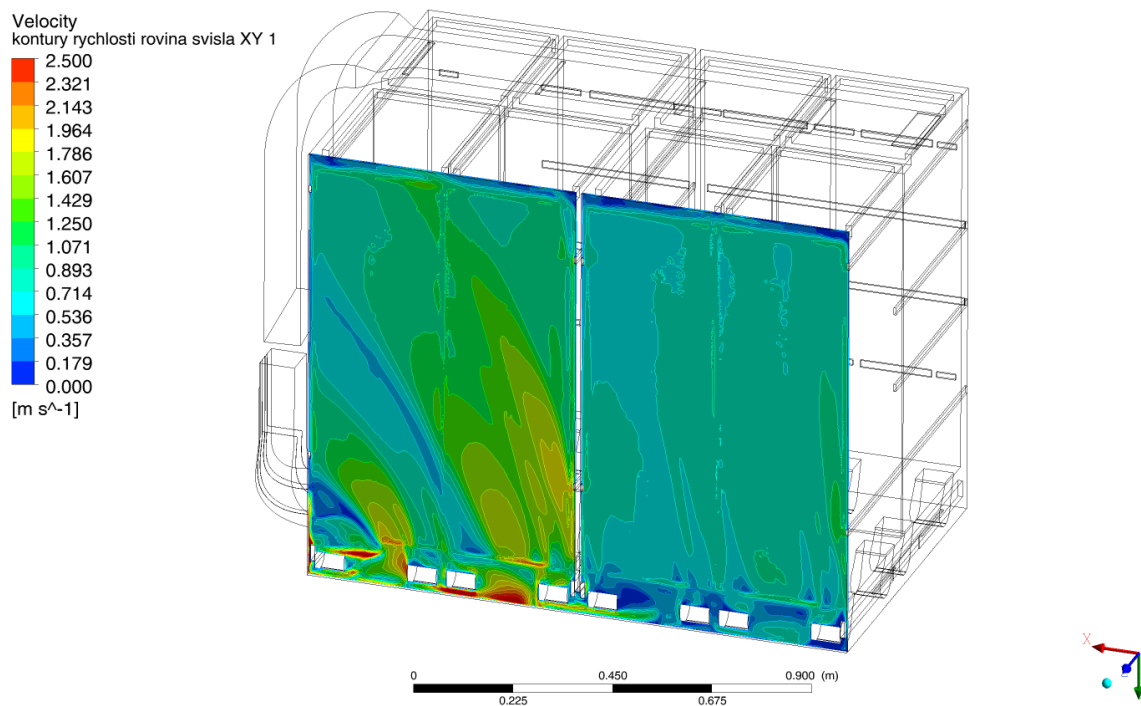
Obr. 40: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ SVISLÝ 1



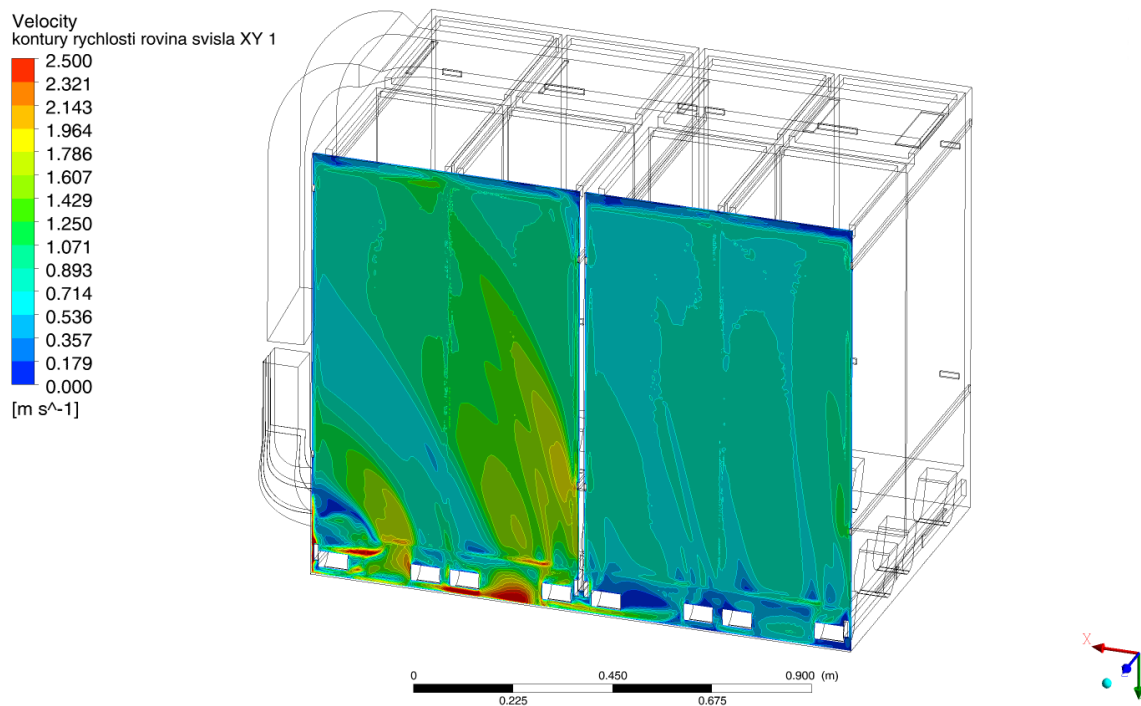
Obr. 41: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ SVISLÝ 1



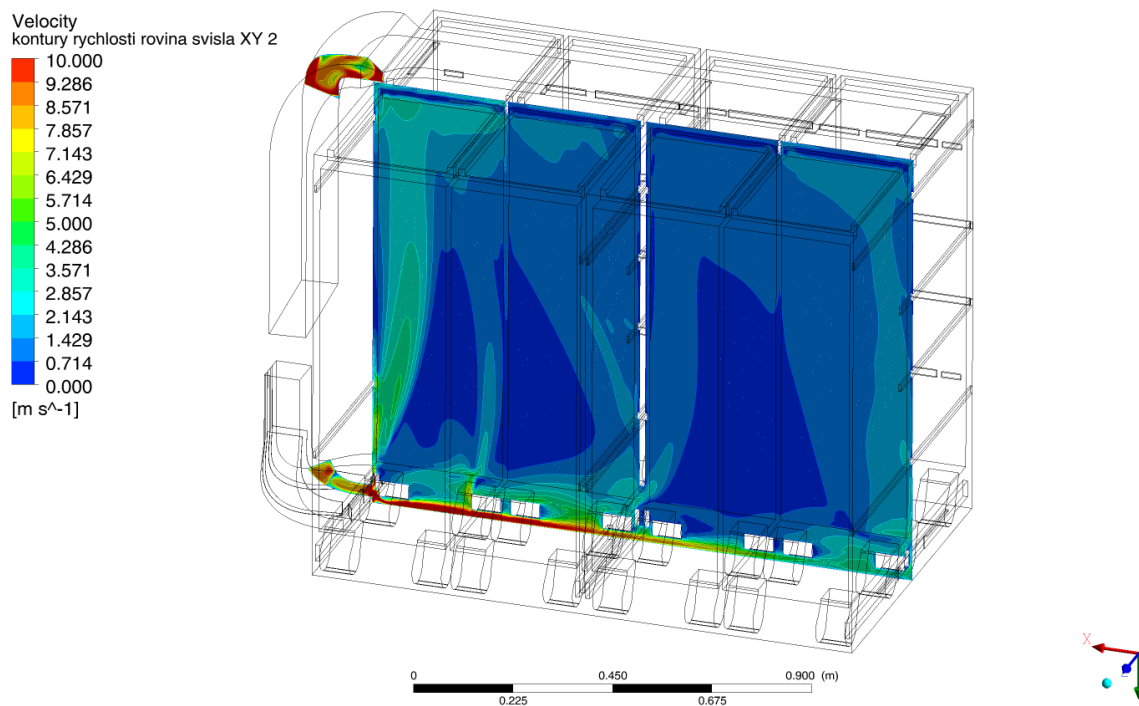
Obr. 42: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ SVISLÝ 1



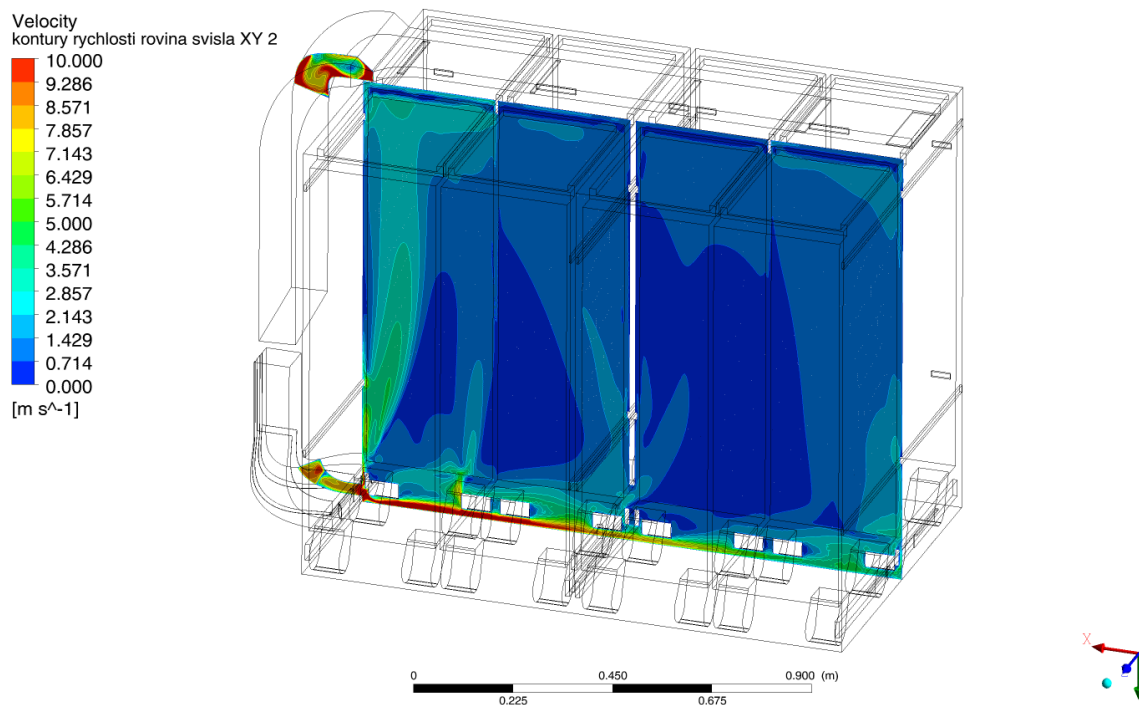
Obr. 43: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 1 – ŘEZ SVISLÝ 2



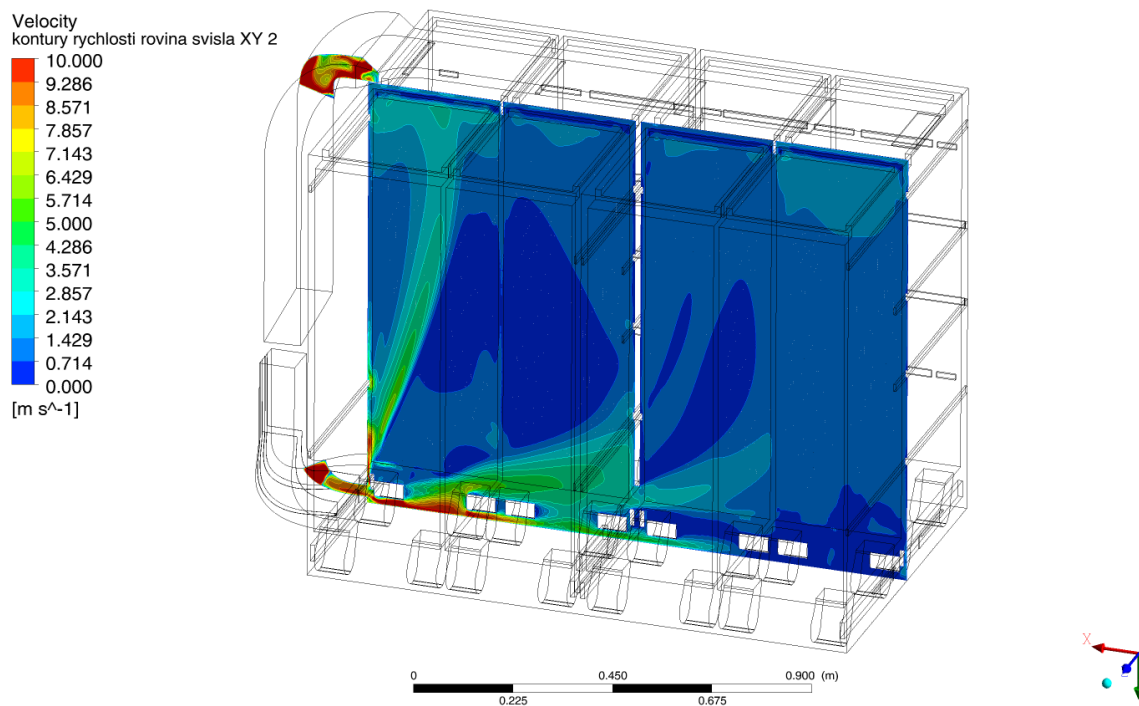
Obr. 44: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ SVISLÝ 2



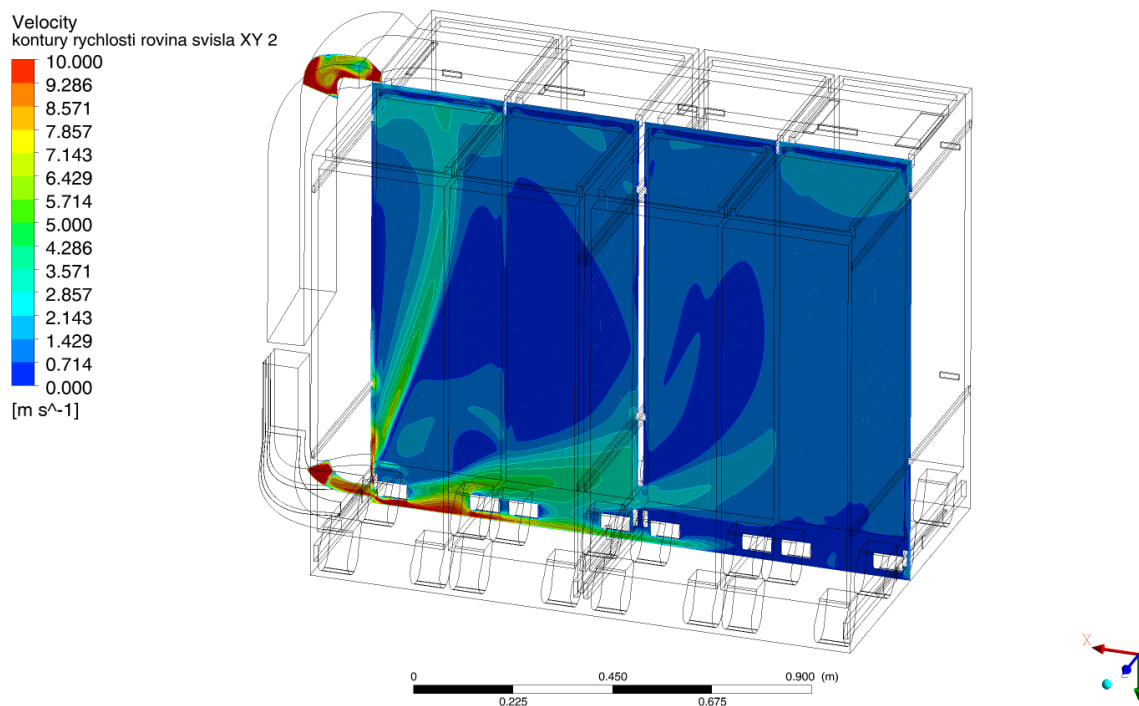
Obr. 45: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ SVISLÝ 2



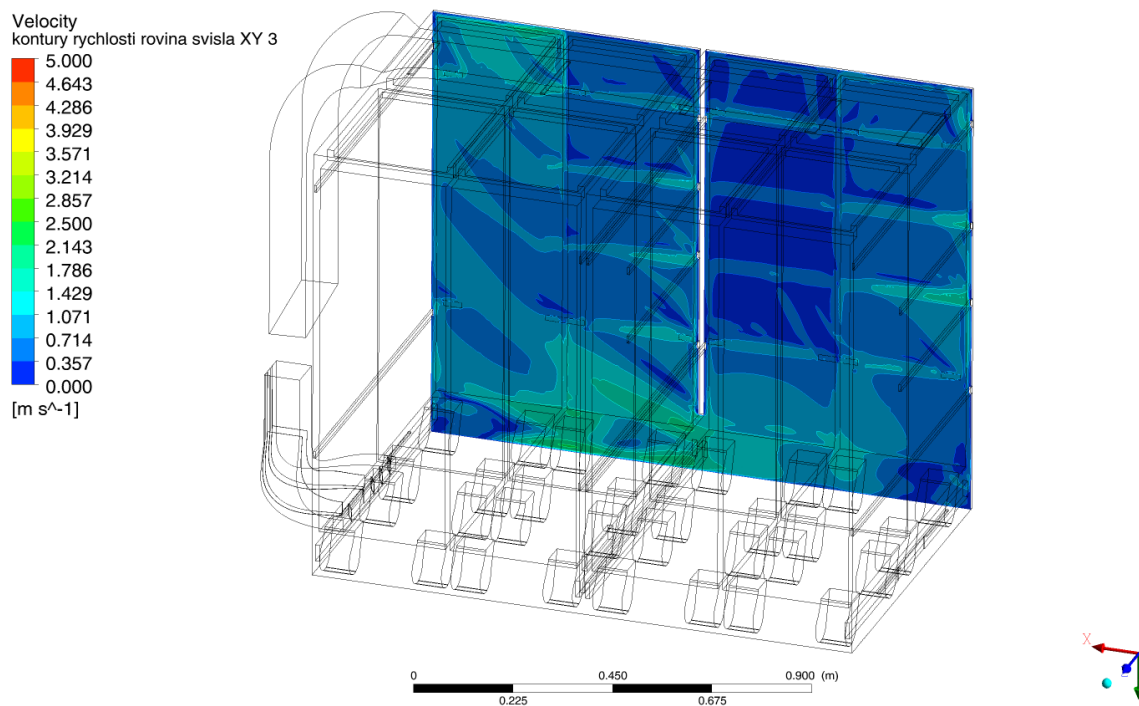
Obr. 46: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ SVISLÝ 2



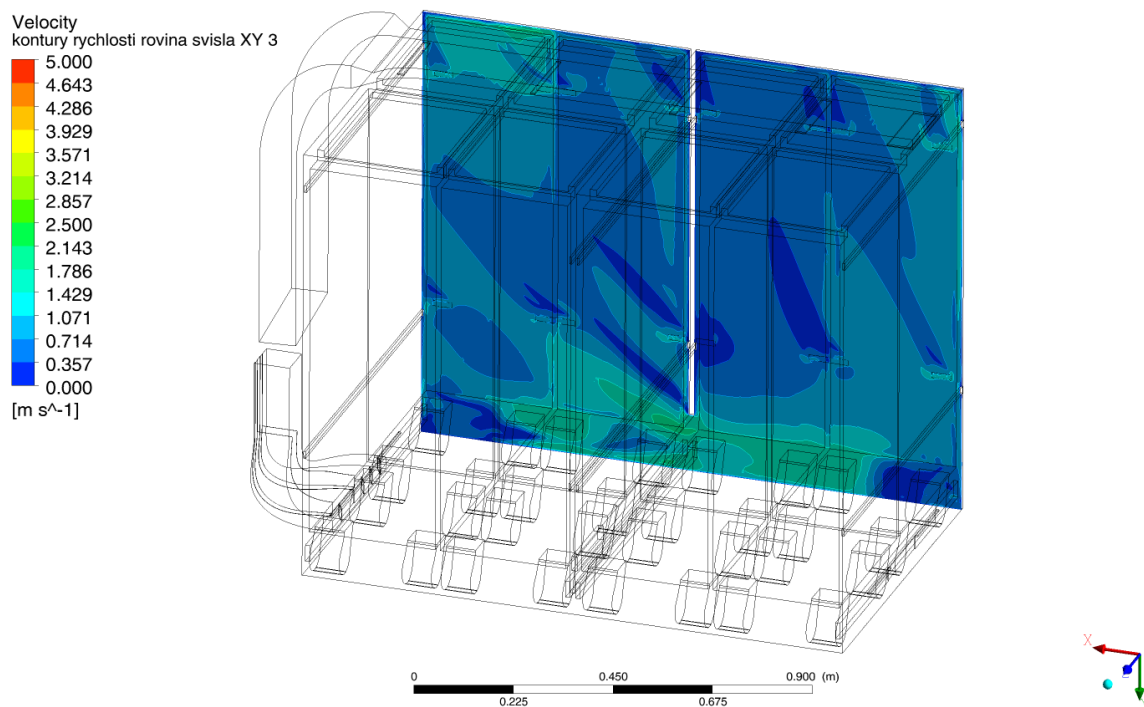
Obr. 47: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 1 – ŘEZ SVISLÝ 3



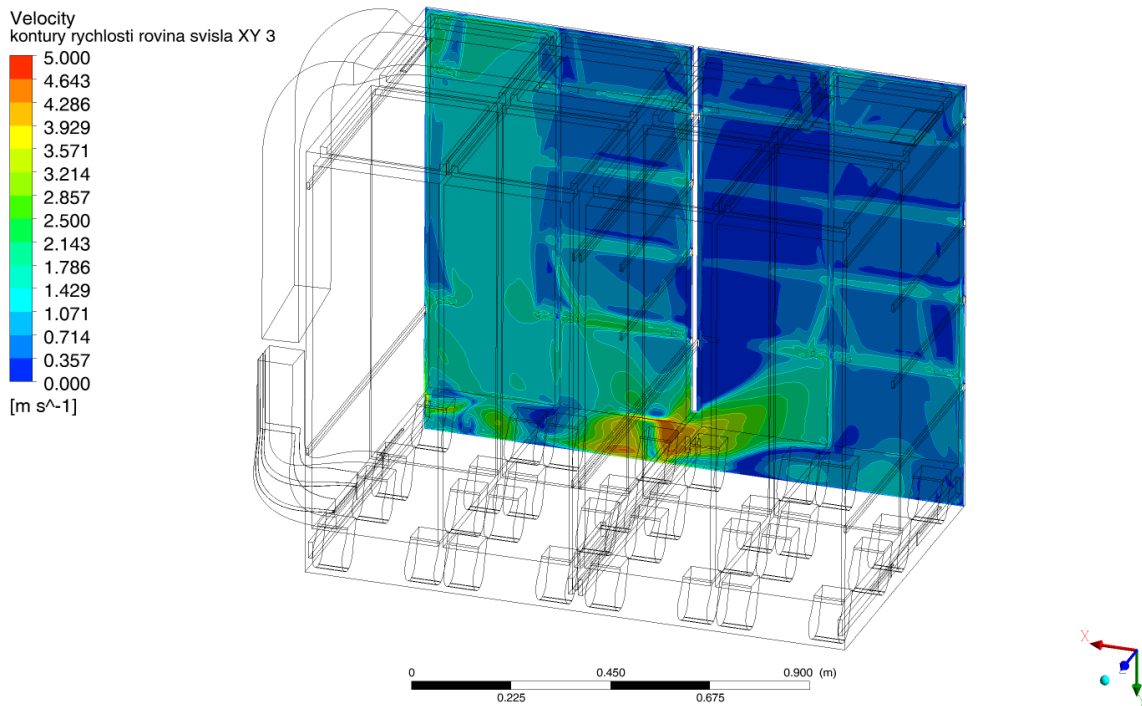
Obr. 48: Kontury rychlosti - varianta 1 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ SVISLÝ 3



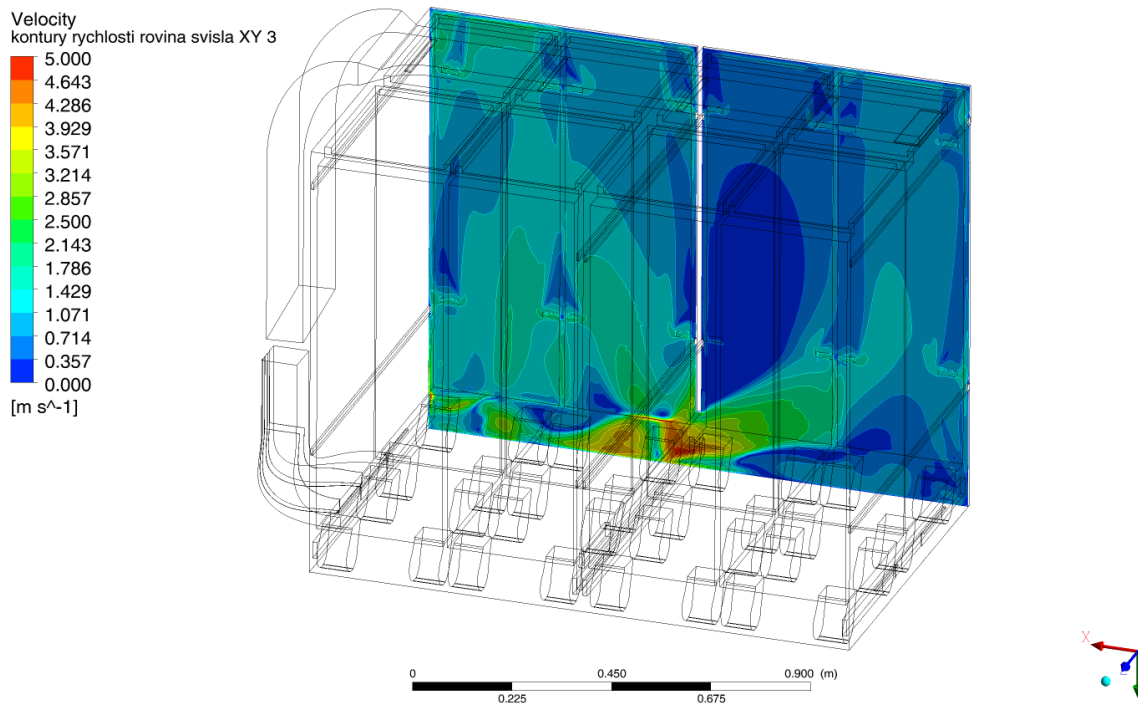
Obr. 49: Kontury rychlosti - varianta 2 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ SVISLÝ 3



Obr. 50: Kontury rychlosti - varianta 3 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ SVISLÝ 3

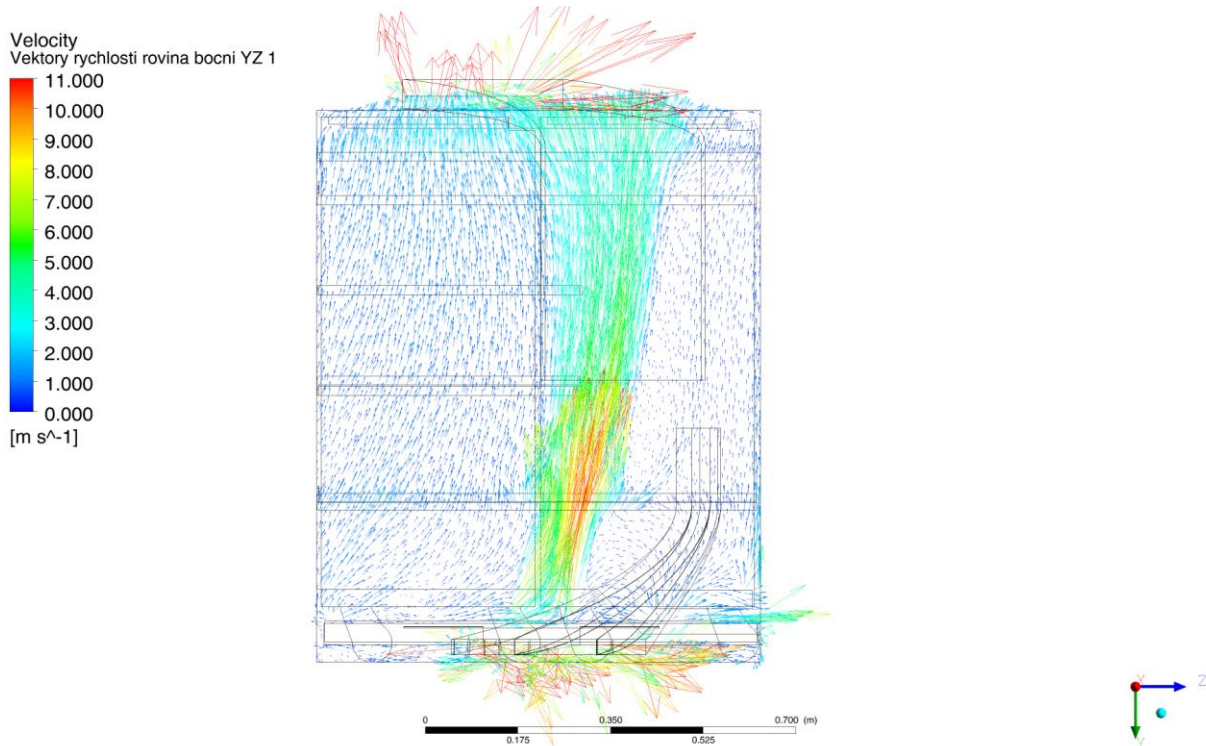


Obr. 51: Kontury rychlosti - varianta 4 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

Porovnání svislých řezů ukazuje, že přítomnost obou regulačních prvků způsobuje rovnoměrnější rozložení proudu ve svislých řezech a tím zabraňuje vzniku „hluchých míst“ bez proudu a zajišťuje tak obtékání všech vozíků.

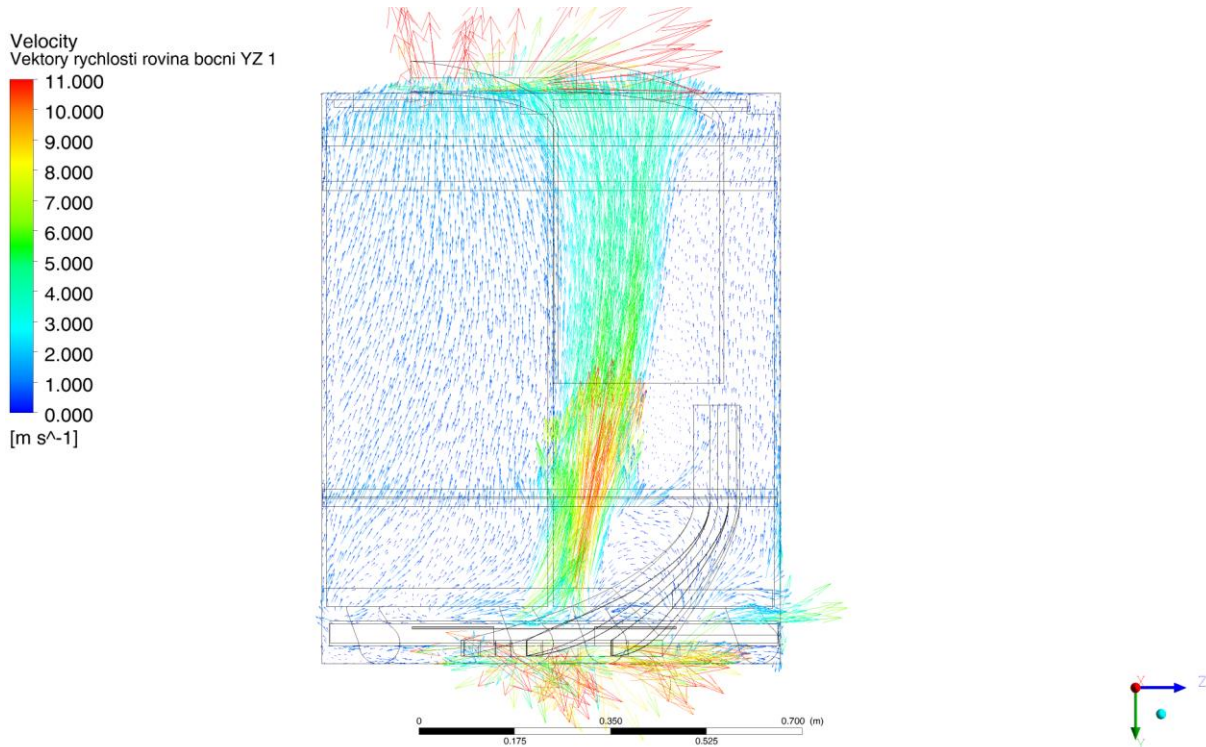
8.4 Vektory rychlosti

VARIANTA 1 – ŘEZ BOČNÍ 1



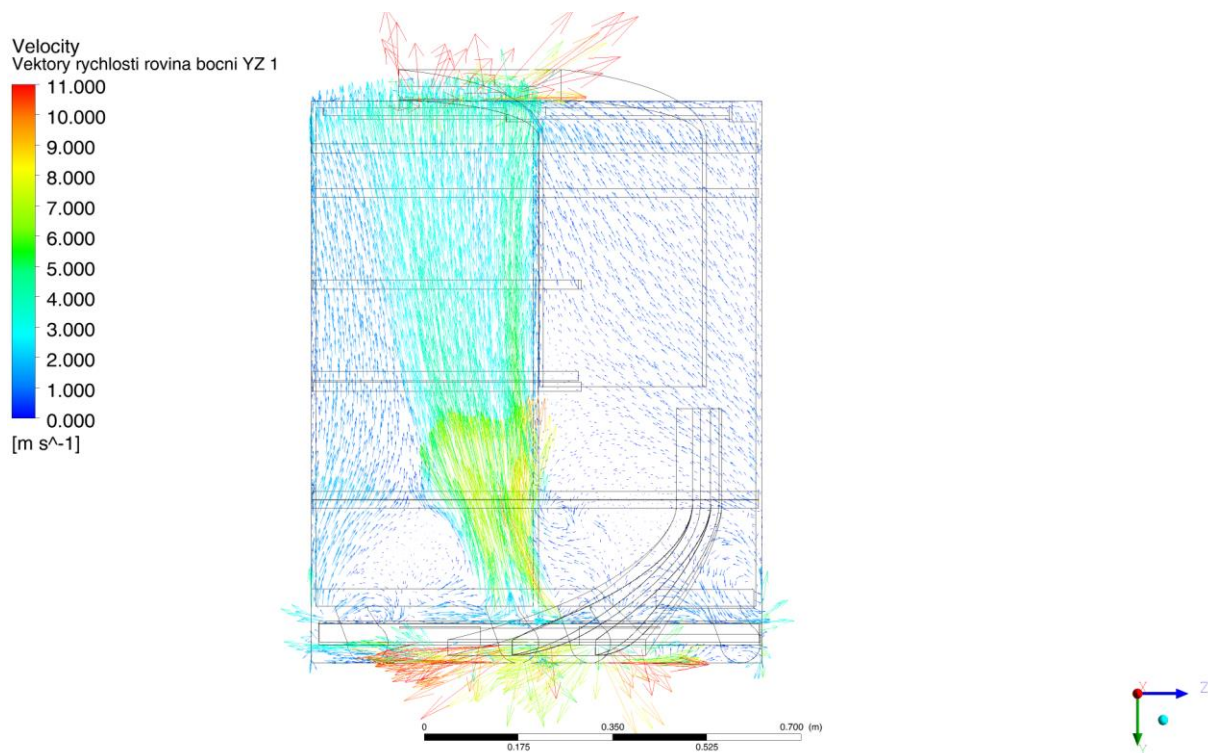
Obr. 52: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ BOČNÍ 1



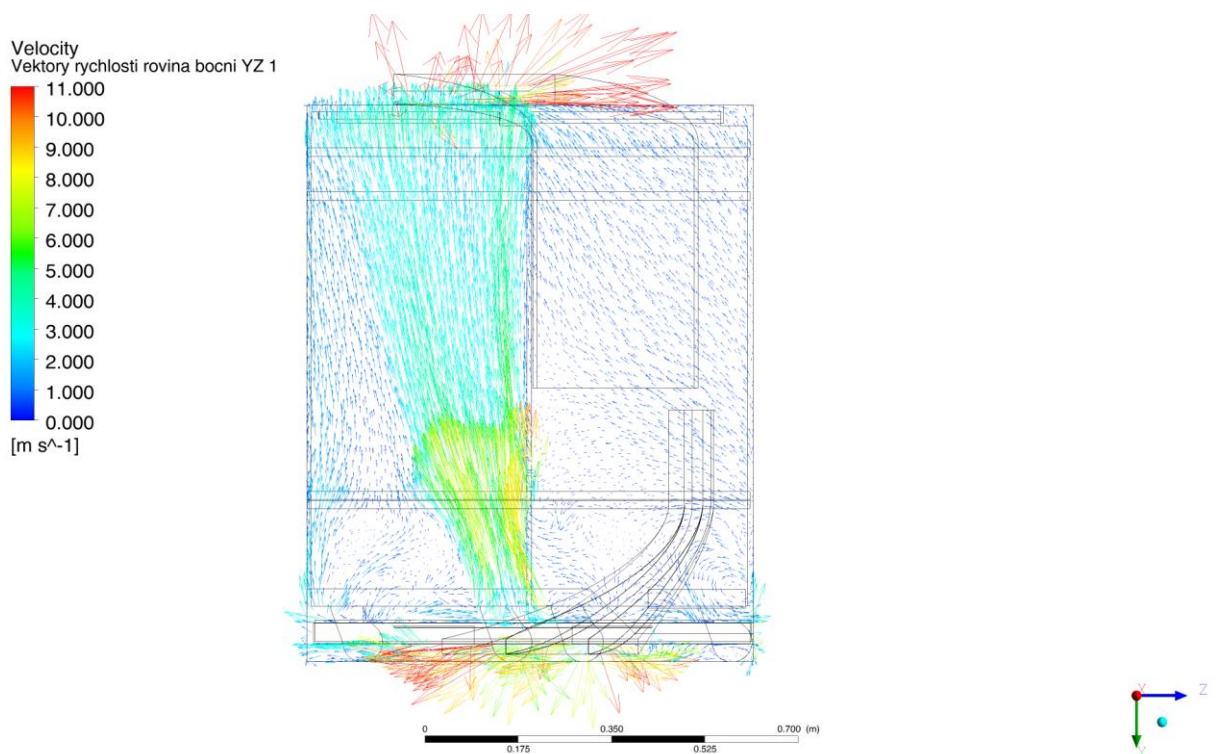
Obr. 53: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ BOČNÍ 1



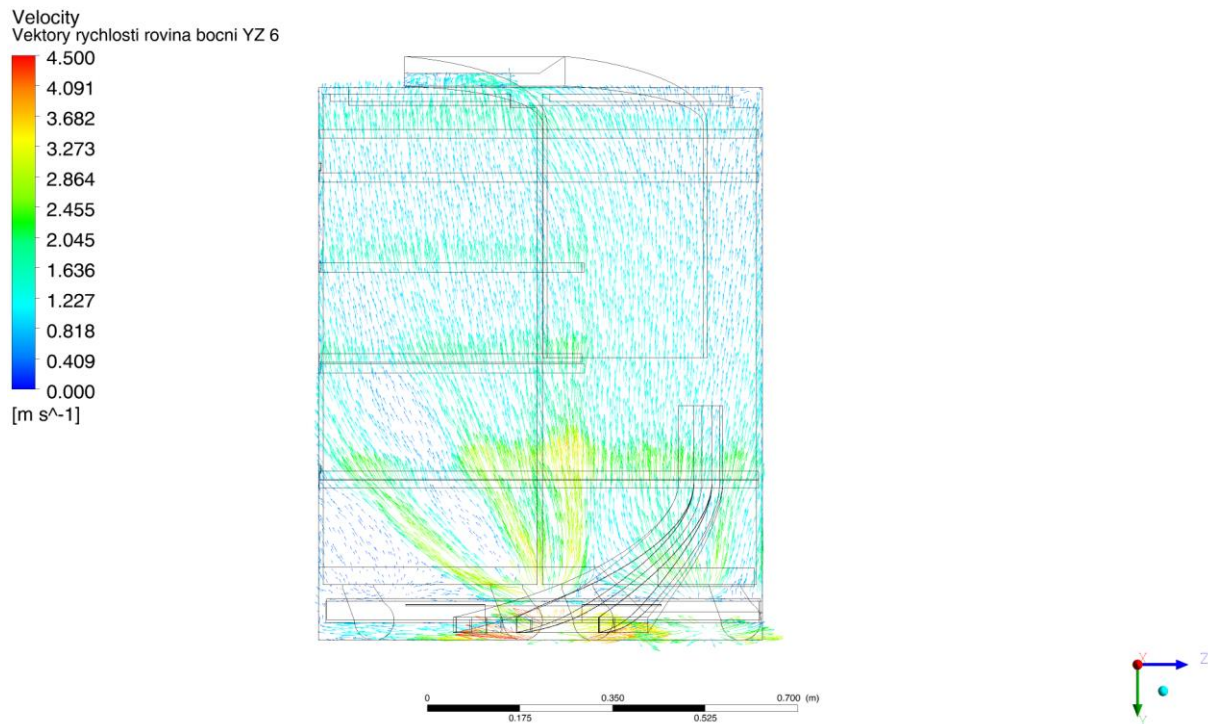
Obr. 54: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ BOČNÍ 1



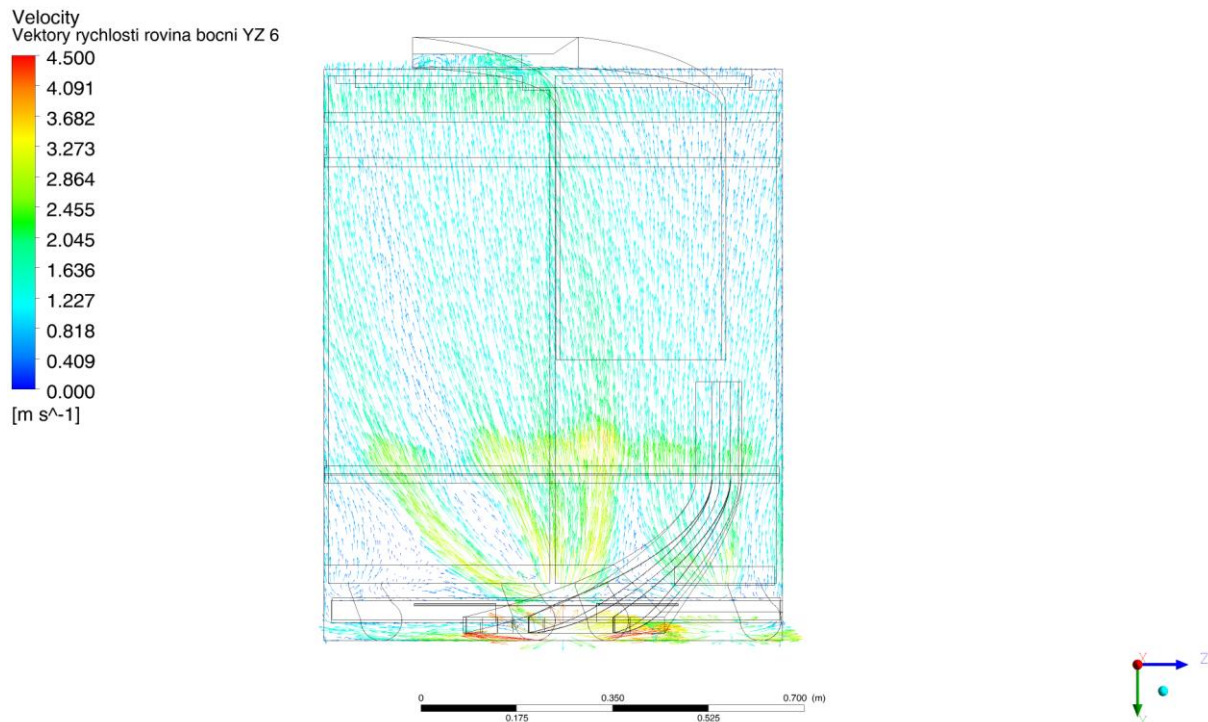
Obr. 55: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez boční 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 1 – ŘEZ BOČNÍ 6



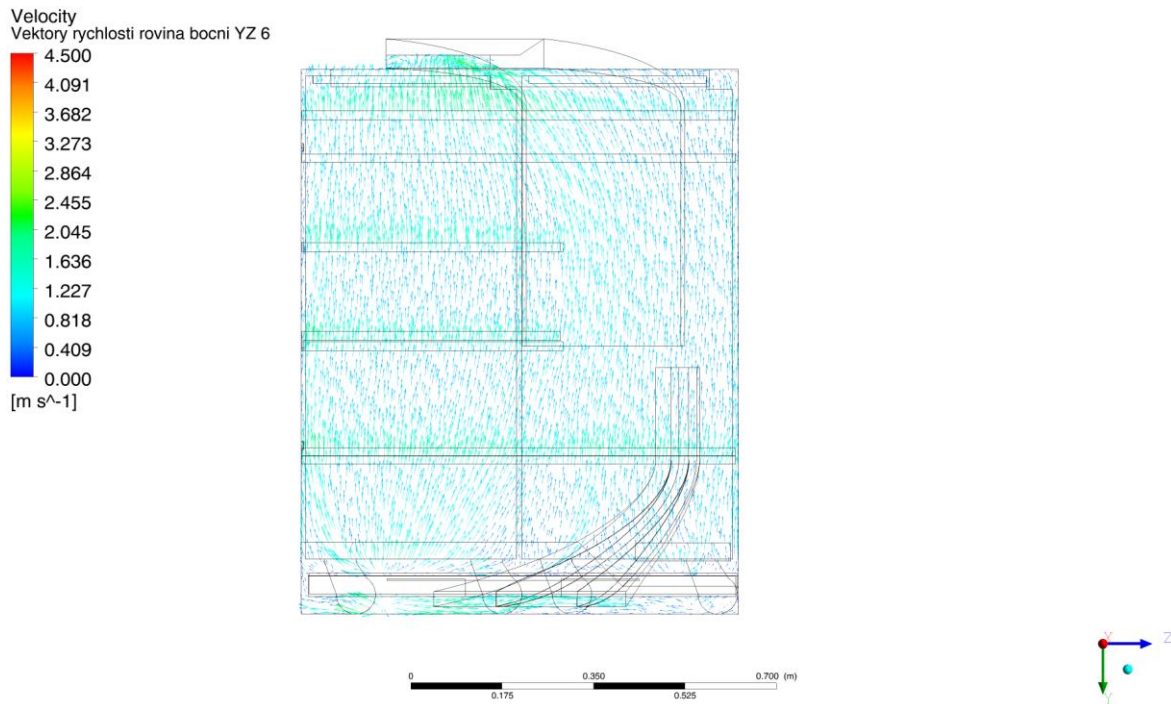
Obr. 56: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ BOČNÍ 6



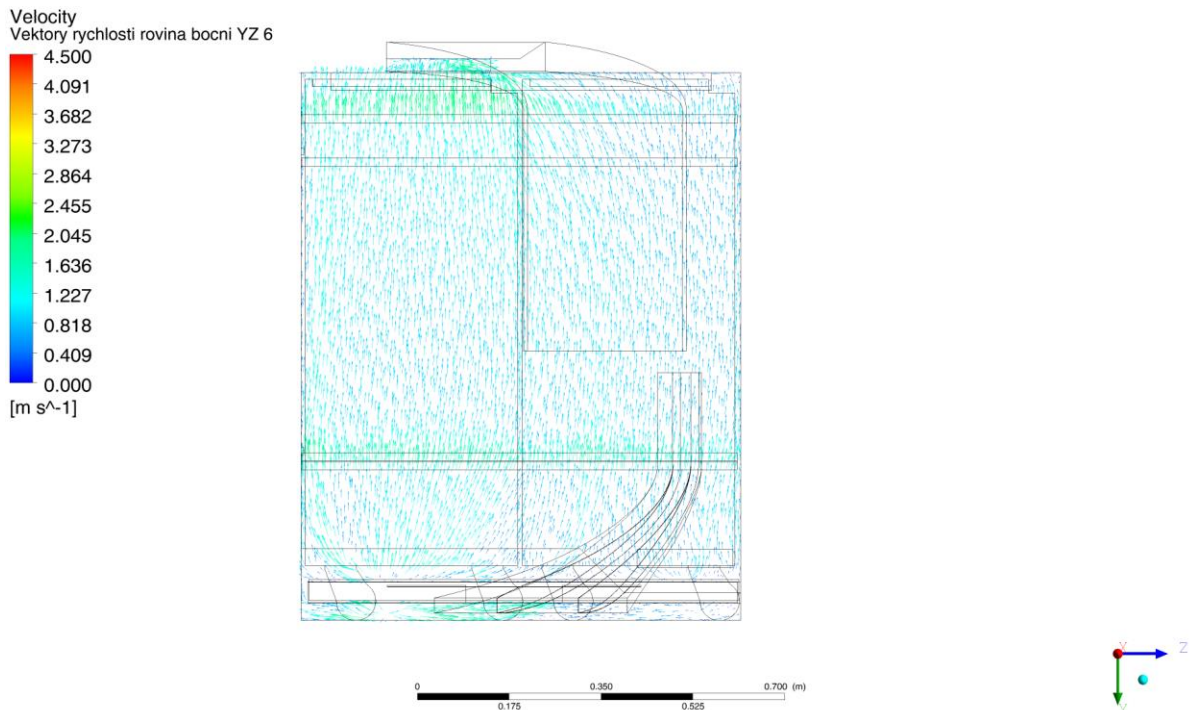
Obr. 57: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ BOČNÍ 6



Obr. 58: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

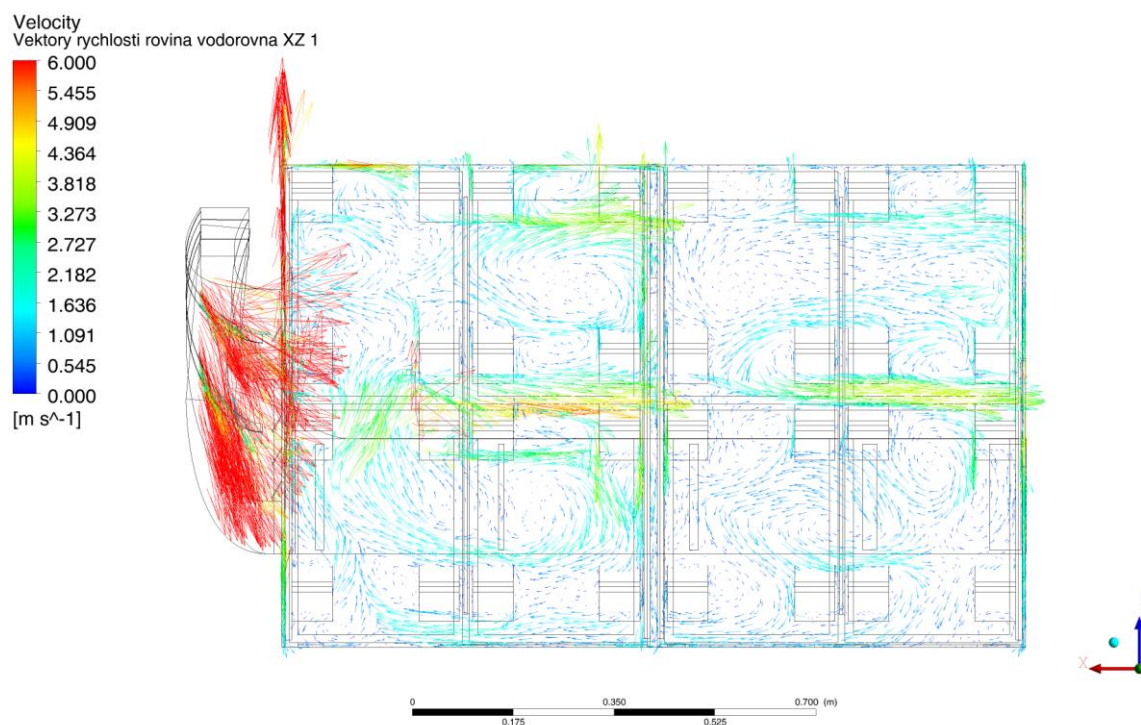
VARIANTA 4 – ŘEZ BOČNÍ 6



Obr. 59: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez boční 6; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

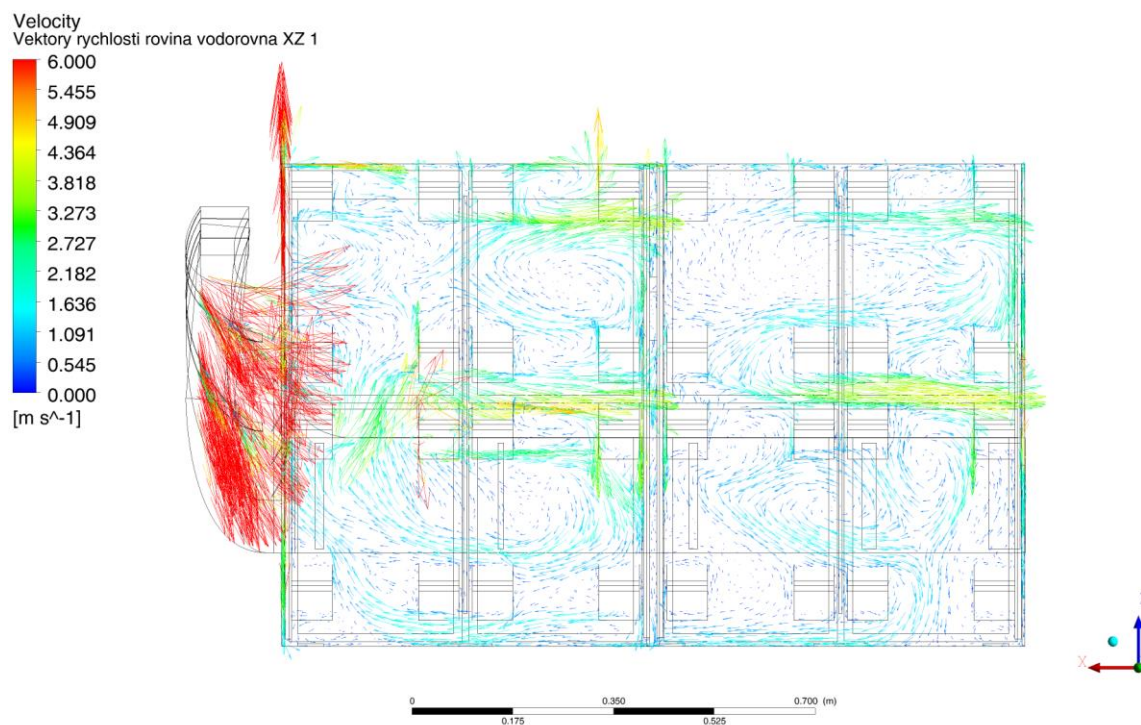
Vektory rychlosti odhalují místa vzniku vírů, která jsou zřejmá nejvíce v bočním řezu 1, které jsou způsobeny poměrně silným prouděním ve střední části tohoto řezu a překážkami v proudě v podobě stripů na boční stěně 1. V ostatních rovinách je proud víceméně usměrněn.

VARIANTA 1 – ŘEZ VODOROVNÝ 1



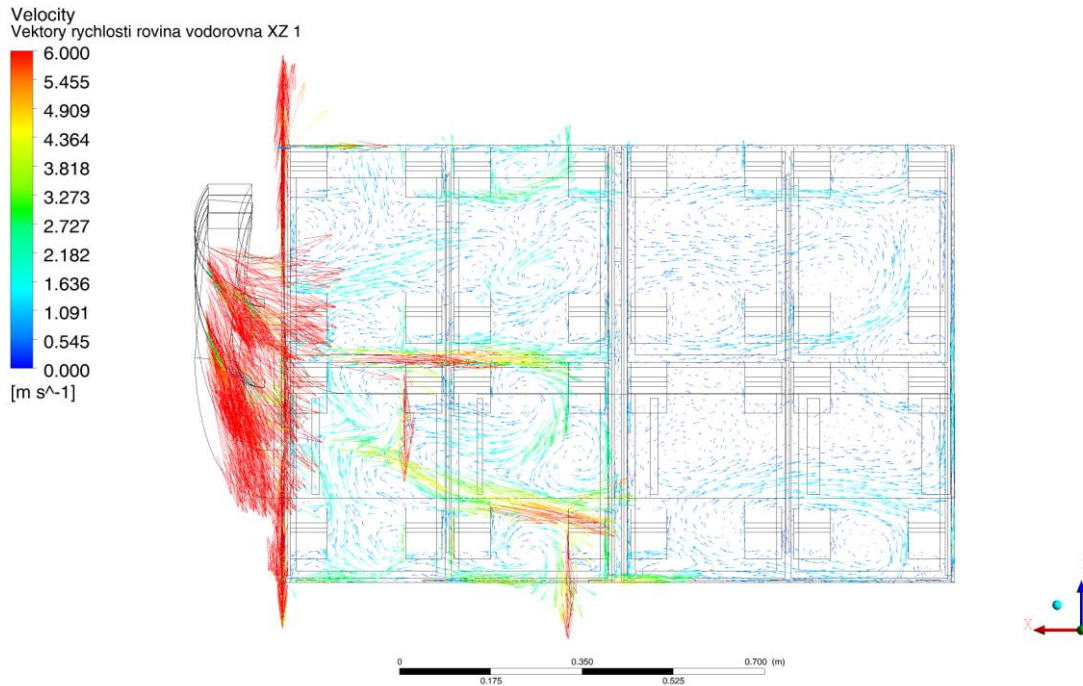
Obr. 60: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ VODOROVNÝ 1



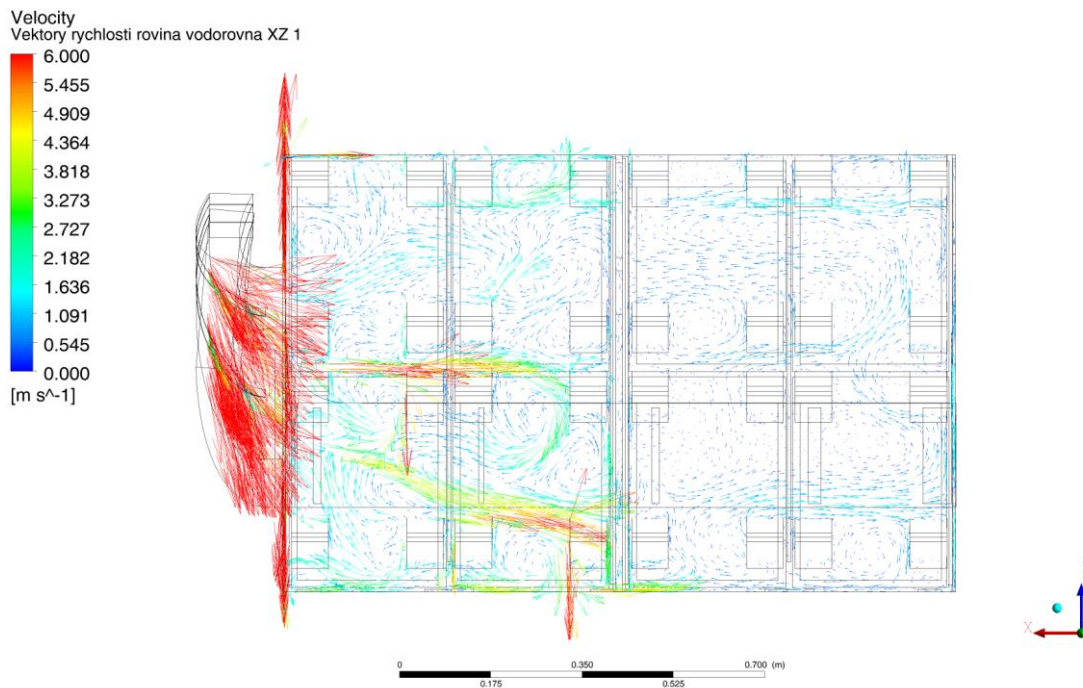
Obr. 61: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ VODOROVNÝ 1



Obr. 62: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

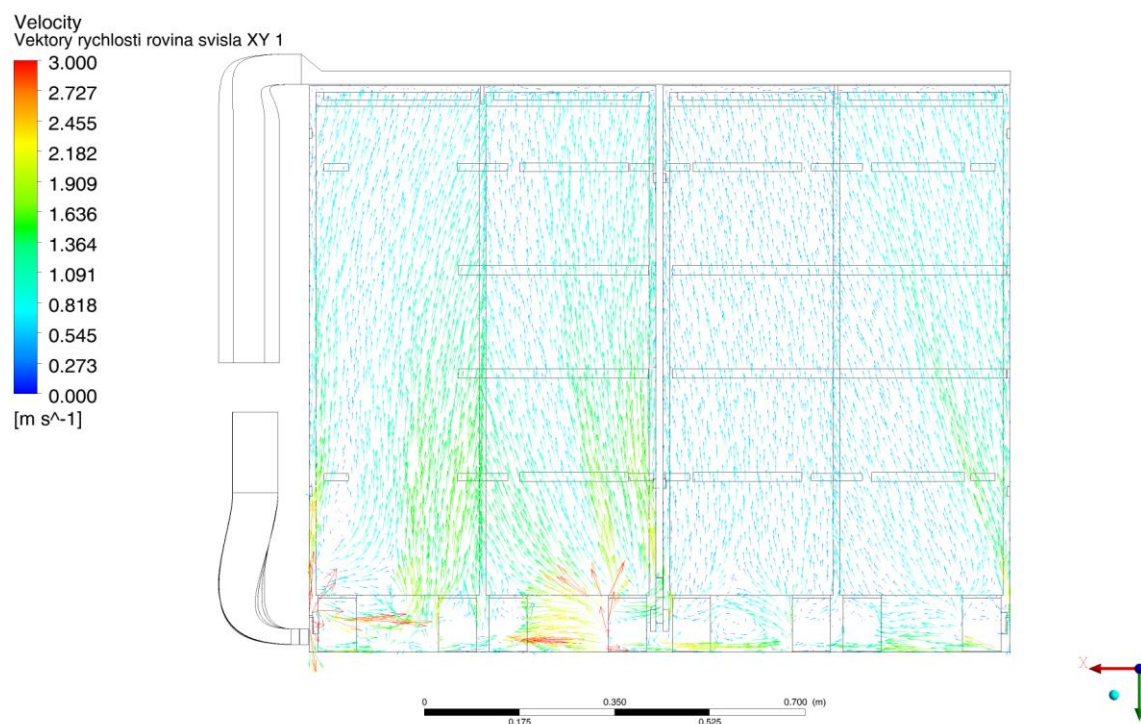
VARIANTA 4 – ŘEZ VODOROVNÝ 1



Obr. 63: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez vodorovný 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

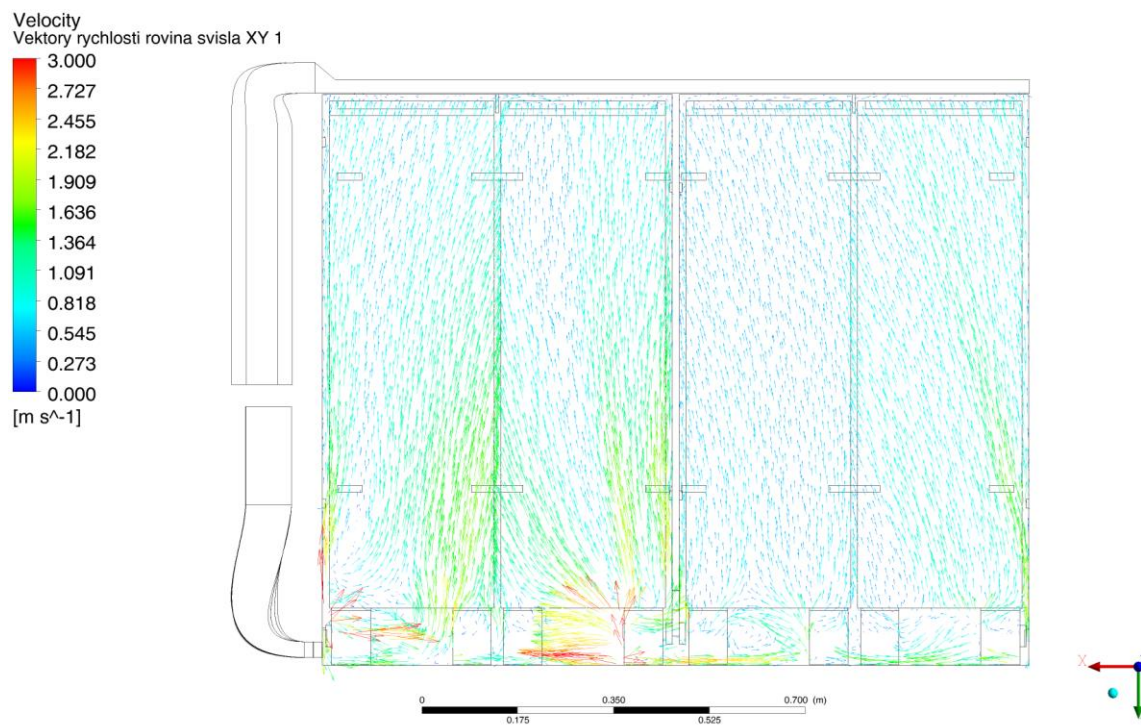
Vektory rychlosti znázorněné ve vodorovných řezech v oblasti koleček vozíků odhalují příčinu toho, proč při absenci deflektorů proudí vzduch do prostoru za divider panelem jen málo. Důvodem jsou víry vytvořené po nárazu proudu na kolečka trolley vozíků. Obě hlavní části proudu jsou tak těmito víry strhávány zpět do části před divider panelem.

VARIANTA 1 – ŘEZ SVISLÝ 1



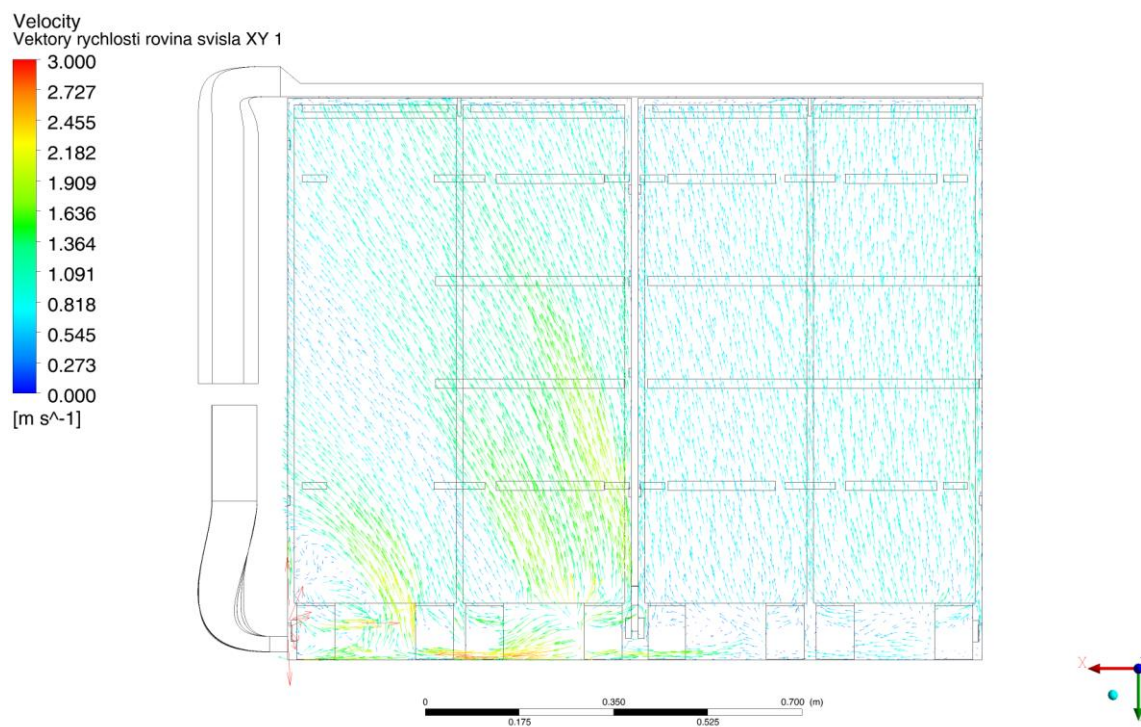
Obr. 64: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ SVISLÝ 1



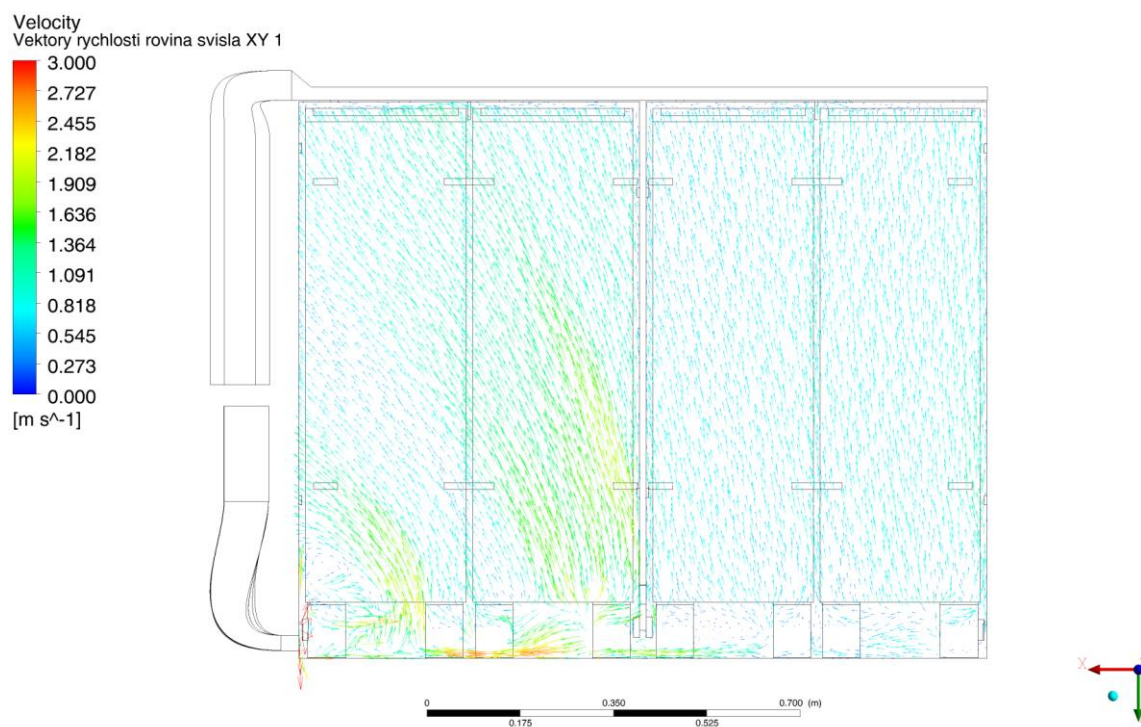
Obr. 65: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ SVISLÝ 1



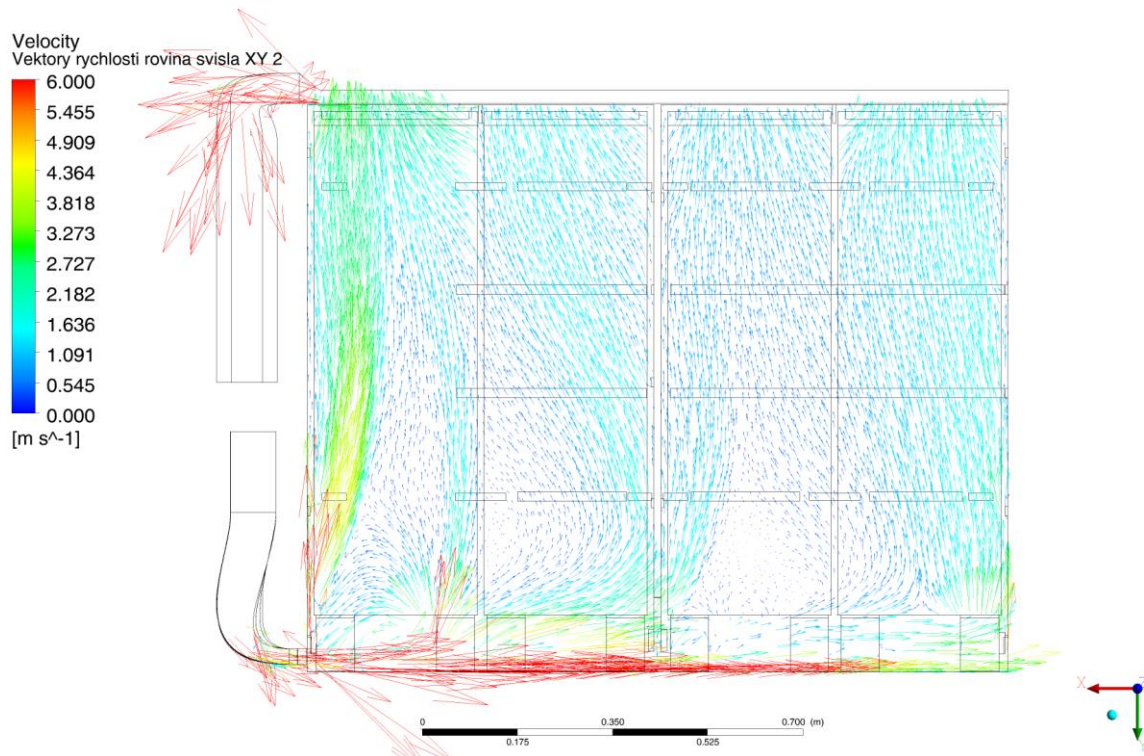
Obr. 66: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ SVISLÝ 1



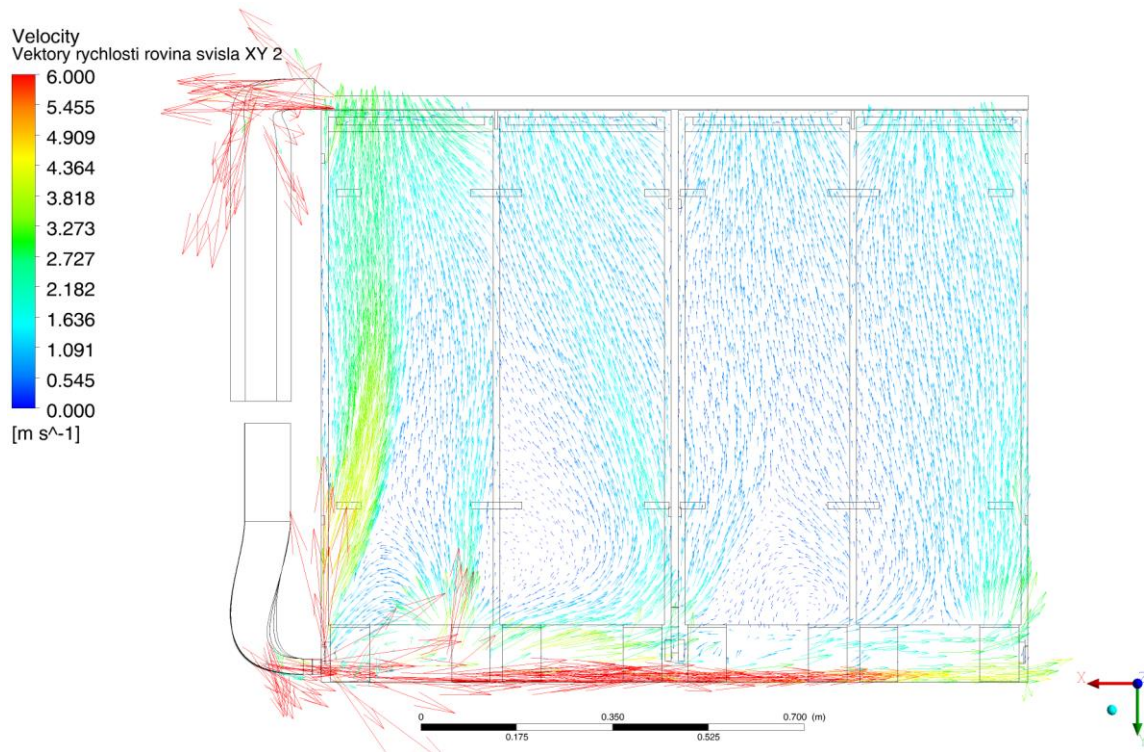
Obr. 67: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez svislý 1; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 1 – ŘEZ SVISLÝ 2



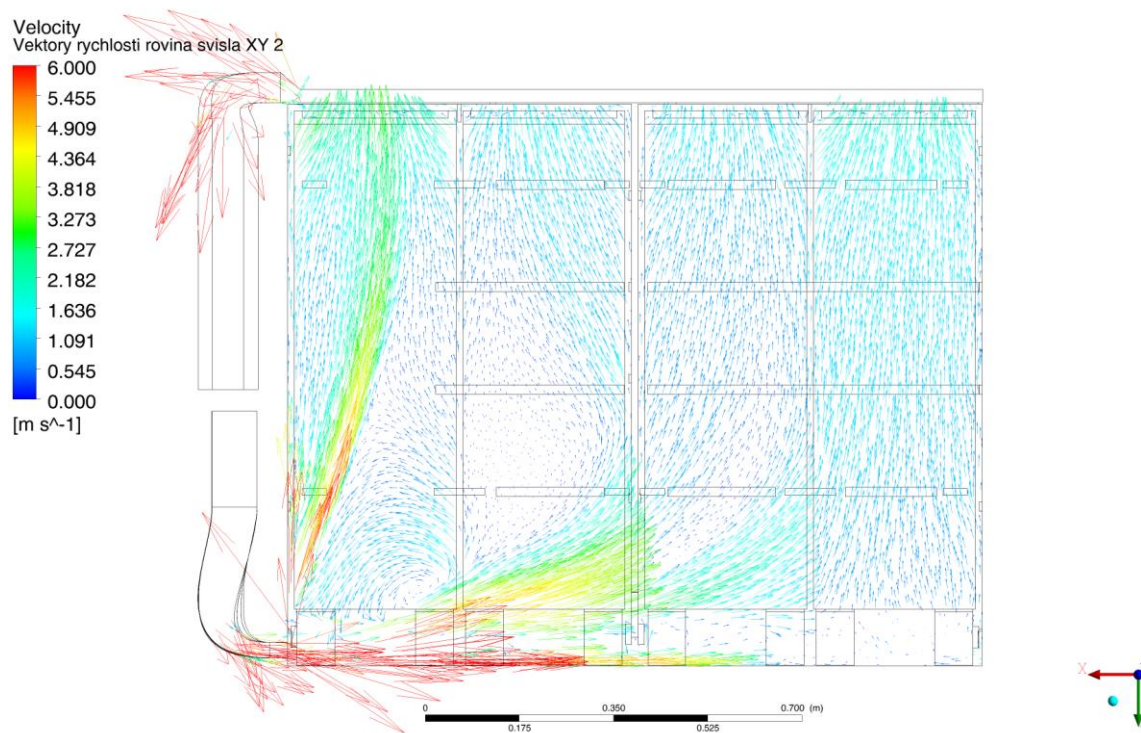
Obr. 68: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ SVISLÝ 2



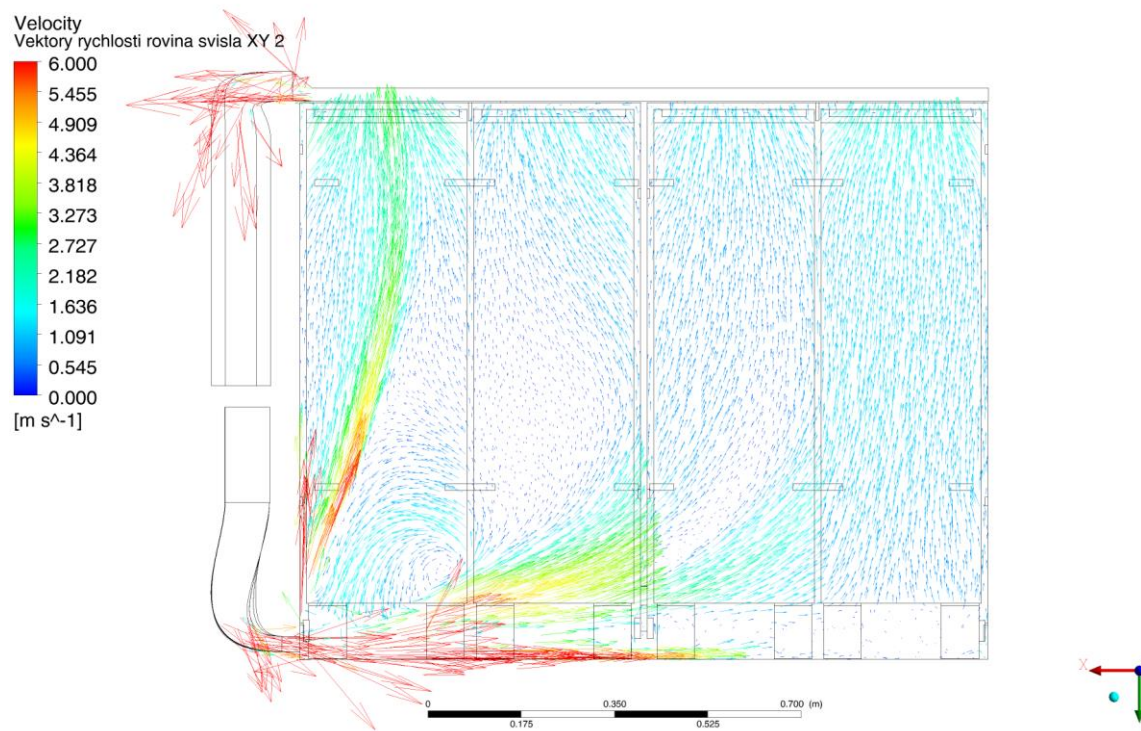
Obr. 69: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ SVISLÝ 2



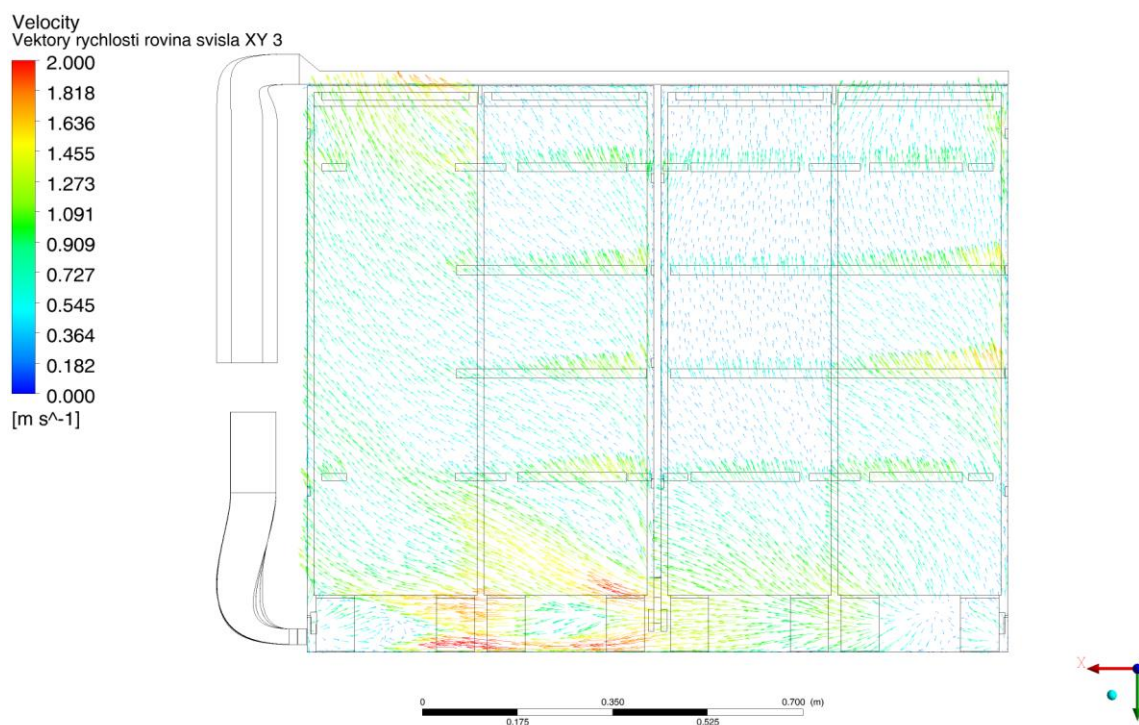
Obr. 70: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ SVISLÝ 2



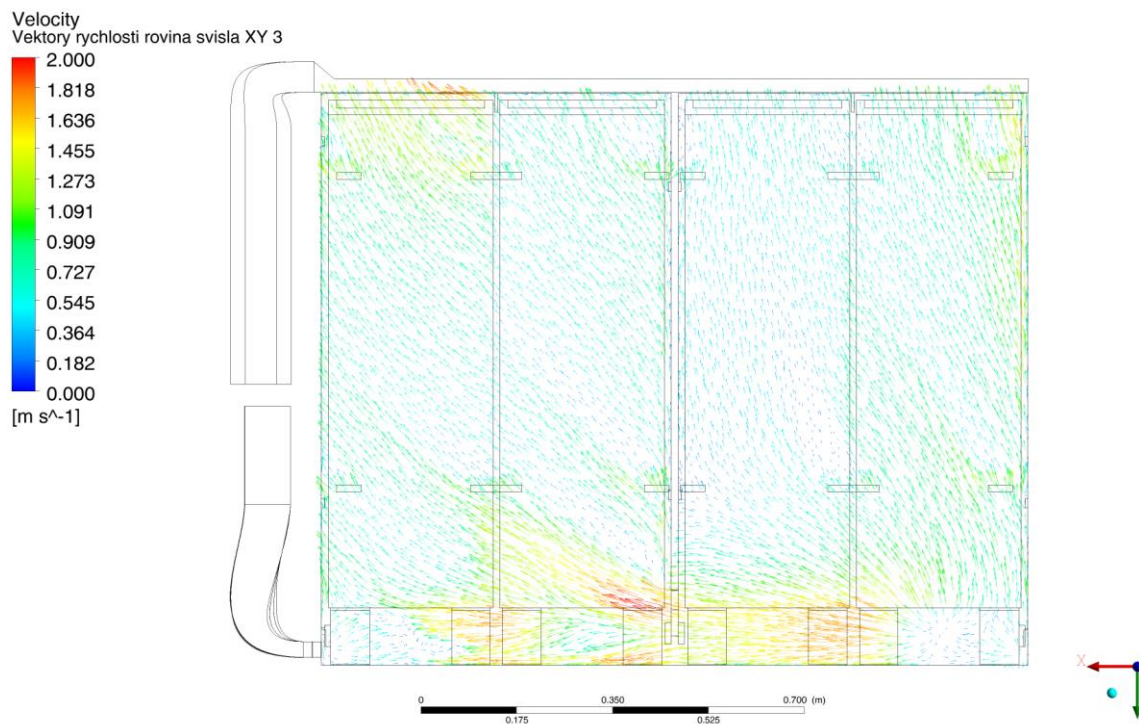
Obr. 71: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez svislý 2; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 1 – ŘEZ SVISLÝ 3



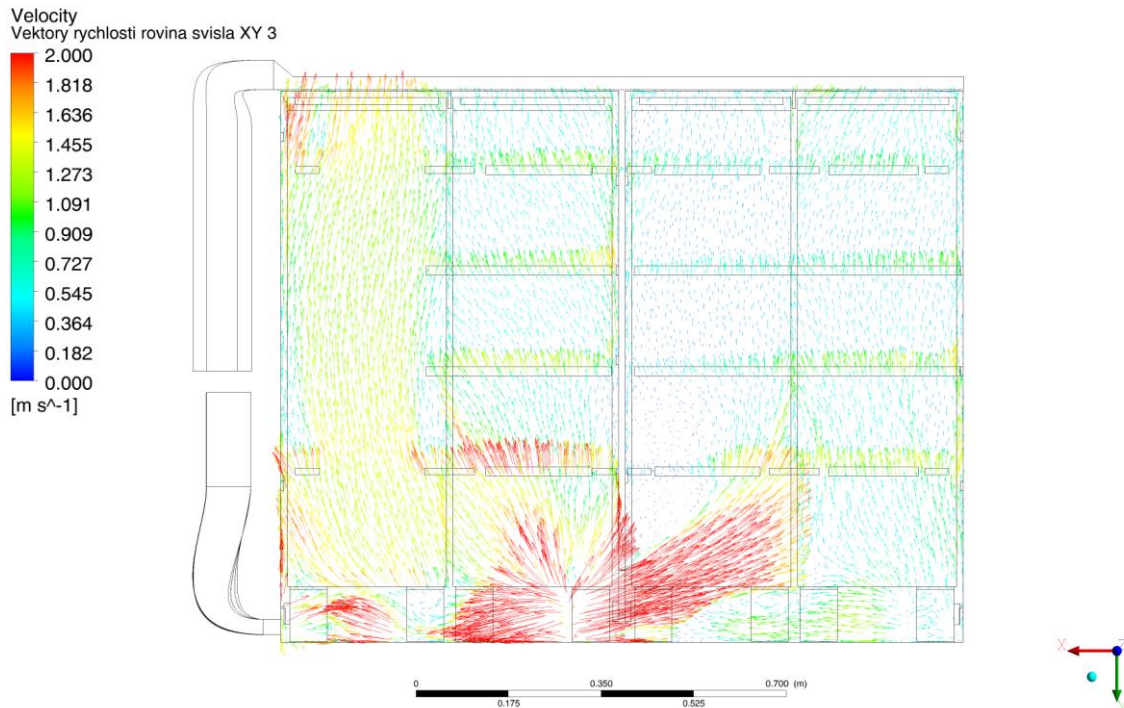
Obr. 72: Vektory rychlosti - varianta 1 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 2 – ŘEZ SVISLÝ 3



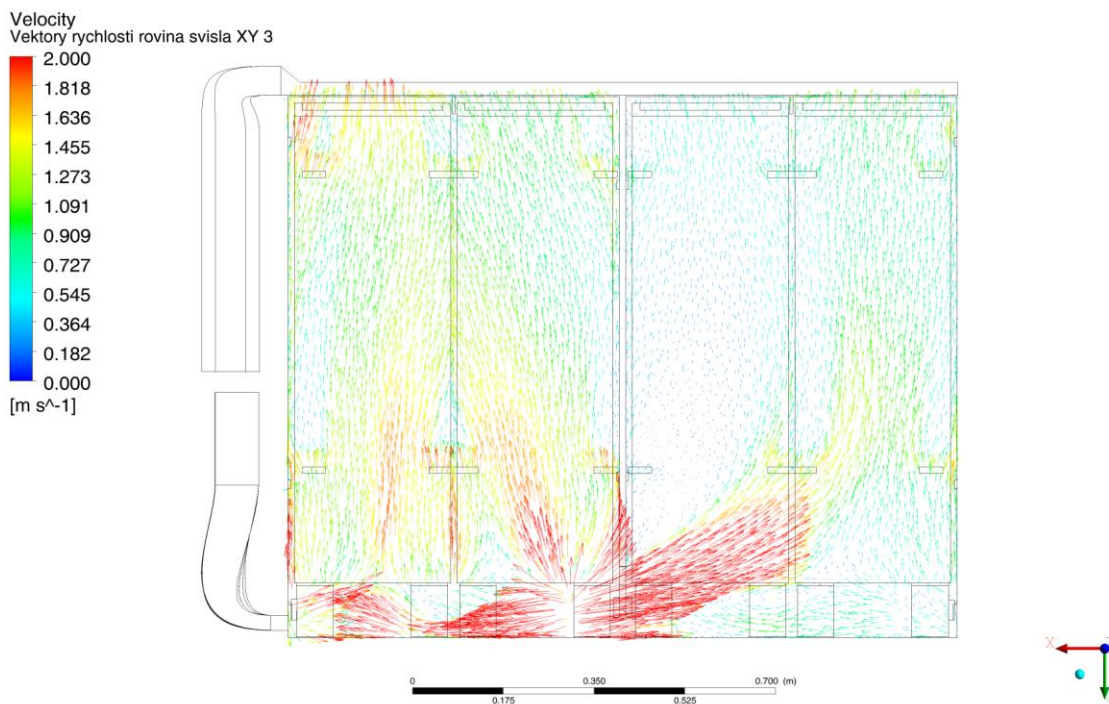
Obr. 73: Vektory rychlosti - varianta 2 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 3 – ŘEZ SVISLÝ 3



Obr. 74: Vektory rychlosti - varianta 3 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

VARIANTA 4 – ŘEZ SVISLÝ 3



Obr. 75: Vektory rychlosti - varianta 4 – řez svislý 3; vyhodnocení v softwaru Ansys CFD-Post 19.2

Svislými řezy jsou odhaleny víry a „hluchá místa“ hlavně ve svislém řezu 2 (mezi přední a zadní řadou vozíků). Nejvíce zřejmá je absence proudění ve variantě 3 a 4 mezi vozíky na druhé pozici zleva, naopak v řezu 3 u zadní stěny je proudění silné.

9 Ekonomické zhodnocení

Tato kapitola je zhodnocením zpracovávaného problému optimalizace proudění v kuchyňce s využitím CFD výpočtů z ekonomického hlediska. Na základě poznatků z této diplomové práce a uvažovaných možností zjednodušení a urychlení práce na podobném problému v budoucnu je proveden odhad časové úspory pro další potenciální projekty.

Bylo provedeno časové zhodnocení řešeného problému uvedením časového rozsahu práce pro jednotlivé kroky v rámci této diplomové práce. Následně byly vyhodnoceny možnosti pro zkrácení tohoto času pro uvažovanou analýzu podobného inženýrského problému v budoucnu, za předpokladu využití poznatků z této diplomové práce.

Níže je uveden výčet kroků, provedených během analýzy a přiřazeno jejich časové zhodnocení:

- Úprava geometrie - 110 h
 - Prvotní úprava geometrie v programu SolidWorks (15 h)
 - Úprava v modeláři SpaceClaim, tvorba výchozí varianty geometrie (80 h)
 - Modifikace výchozí varianty (5 h / každá další varianta)
- Tvorba sítě - 135 h
 - Návrh a tvorba prvotní sítě (10 h)
 - Analýza nedostatků sítě, tvorba kvalitní sítě (110 h)
 - Aplikace pro ostatní modifikace geometrie (5 h / každá další varianta)
- Výpočet – 50 h + 8h / každá další varianta
- Post-processing a zhodnocení – 5 h / 1 varianta

Položka „tvorba sítě“ zahrnuje veškeré úkony provedené pro zhodnocení a zlepšení kvality sítě, tedy i provedené prvotní výpočty, na základě kterých byla prvotní síť optimalizována. Položkou výpočet je označen čas pro zjištění a nastavení vhodných okrajových podmínek a definice postupu, ale zároveň i samotný výpočetní čas softwaru, který byl spuštěn na počítači s osmi procesory a operační pamětí 64 GB. Separátně časově ohodnoceny jsou úkony pro aplikaci poznatků z výchozí varianty (I) na její modifikace (II, III, IV). Popis modifikací viz kapitola 3.2.

Ekonomickým měřítkem pro určení rozpočtu na projekt je inženýrská hodina, která je z hlediska hospodářství firem univerzální a hlavně objektivní hodnotou. Právě čas tak hraje největší roli při hledání úspor. Pro výše zmíněné kroky se časové investice v budoucích projektech mohou zredukovat a tak dosáhnout zmíněné úspory hned několika způsoby:

- Využití výkonnější techniky – více paralelních procesů úměrně snižuje výpočetní dobu. Lze docílit úspory výpočetního času, avšak tento čas neodpovídá úspoře inženýrských hodin, protože během doby výpočtu netřeba do procesu nijak zasahovat.
- Využití modelu, upraveného pro účely této práce – rozměry leteckých kuchyní na konkrétní pozici nelze příliš měnit, rozměry trolley vozíků taktéž zůstávají stejné, proto tyto části geometrie lze do budoucna využít. Případné odlišnosti rozměrů a změny tvaru přívodního a odvodního kanálu lze v krátkém čase implementovat pomocí programu SpaceClaim, doba této činnosti je ale zanedbatelná v porovnání s rozsahem

prací pro zjednodušení plného modelu. Lze předpokládat úsporu až 60 inženýrských hodin.

- Tvorba sítě na základě poznatků ze zde provedené studie – velikost maximálního elementu sítě a charakteristika mezní vrstvy může být aplikovatelná i pro jiné projekty, důvodem je jistá, již zmíněná, podobnost produktů. Lze docílit úspory až 50 h.
- Aplikace stejného výpočetního modelu a nastavení výpočtu (vyjma okrajových podmínek) – model $k-\omega$ SST byl shledán vhodným pro takový typ úlohy, je doporučeno jej použít i v budoucnu. Úspora času potřebného k hledání a ověřování postupu může být i 30 hodin.
- Vyhodnocení výpočtů lze pro modifikace výchozí varianty povézt zrychleně přípravou vyhodnocovacích skriptů. Úspora času pro separátní vyhodnocování všech variant (5h / 1modifikace)

Na základě výše uvedených možností úspor je zřejmé, že pro analýzu podobného problému v budoucnu už nebude nutný tak detailní rozbor, jako tomu bylo v případě této práce. V tomto okamžiku je vytvořeno povědomí o úskalích, na která lze během úprav geometrie, a hlavně tvorby kvalitní sítě, narazit a taktéž je znám vliv regulačních prvků na chování proudění a charakteristiku obtékání.

Po odečtení hodin odpovídajících úsporám zmíněným výše je docíleno odhadu přibližné celkové časové spotřeby pro analýzu budoucího projektu. Odhadovaný počet spotřebovaných inženýrských hodin na budoucí úkol se tedy pohybuje kolem hodnoty 180.

V porovnání s časovou dotací na vývojovou činnost developmentu týkající se tak komplexního úkolu (celková časová dotace inženýrských hodin projektu této velikosti může přesáhnout až 20 000 hodin) se jeví hodnota odhadovaných 180 hodin velmi výhodně vzhledem k přínosu, jež by taková CFD analýza pro projekt měla, proto je zavedení CFD výpočtů k řešení podobných problémů doporučeno.

Do ekonomického zhodnocení účelně nejsou zahrnuty ostatní náklady, jako jsou jednorázové náklady v podobě např. pořízení licence CFD programu, protože tuto investici nelze promítnout do konkrétního projektu a jeho rozpočtu. Uvažovány jsou tedy pouze náklady, které jsou reprezentovány právě spotřebou inženýrských hodin, protože tato hodnota je univerzální a objektivní.

Závěr

V této diplomové práci byla provedena analýza problému proudění na reálném případě řešeném vývojovými inženýry společnosti Safran Cabin CZ s.r.o.

V úvodu práce byla představena společnost a její produkty a posléze byla odůvodněna volba projektu vhodného pro provedení analýzy a sestavení návrhu postupu pro projekty budoucí.

Cílem diplomové práce bylo tedy stanovení postupu CFD analýzy. Zjištěným vhodným postupem pro tento i podobný budoucí projekt je úprava geometrie v programu SolidWorks a následně v modeláři SpaceClaim dle kapitoly 3, následná analýza a tvorba sítě dle kapitoly 5, nastavení a provedení výpočtu dle kapitoly 6 a zhodnocení problému v podobě vytvoření řezů v důležitých místech modelu a monitorování veličin v těchto řezech stejně, jako je znázorněno v kapitole 8.

V kapitole 3 byly taktéž popsány regulační prvky soustavy, podle kterých byly vytvořeny čtyři varianty modelu pro prováděnou analýzu odezvy systému na jejich přítomnost či nepřítomnost. Varianty byly označeny jako 1, 2, 3 a 4

Pro ověření důvěryhodnosti výsledků CFD analýzy byla v kapitole 8 provedena validace výsledků na základě porovnání s výsledky empirického měření, které bylo provedeno na prototypu vyrobeném dle zde použitého modelu. Po zjištění odchylky výsledků pouze o 1,3% byl výpočet prohlášen za validovaný a zároveň tím byl legitimizován i současný empirický postup. Validace byla provedena pro variantu 1.

Samotné posouzení vlivu změn vstupních dat (přítomnost / nepřítomnost regulačních prvků) na proudění bylo provedeno v rámci vyhodnocení analýzy v kapitole 8. Bylo vytvořeno celkem 11 řezů modelem tak, aby tyto řezy co nejvíce zachycovaly chování proudu v chlazeném prostoru a byly porovnávány tyto řezy pro jednotlivé varianty z hlediska charakteristiky rychlostního pole.

Na závěr analýzy bylo provedeno ekonomické zhodnocení, ve kterém bylo posuzováno využití CFD analýzy při budoucích podobných vývojových projektech. Vytvořením této diplomové práce bylo získáno kvalitní povědomí o úskalích úpravy geometrie a tvorby sítě pro CFD analýzu a byl vytvořen doporučený postup. V rámci ekonomického zhodnocení proto mohl být proveden odhad inženýrských hodin, které budou na budoucím podobném projektu spotřebovány na vytvoření CFD analýzy za předpokladu použití poznatků z této práce. Časový odhad byl porovnán s příkladem celkové časové dotace na takto komplexní projekt a na základě toho bylo budoucí využívání CFD doporučeno.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Safran Cabin CZ s.r.o. [online]. [cit. 2019-03-20].
Dostupné z: <https://www.safran-cabin.com/>
- [2] Delamedoletadel.cz [online]. [cit. 2019-03-20].
Dostupné z: <https://www.delamedoletadel.cz/>
- [3] Seat 38A. *Air Asia Airbus A320 Front Galley* [online]. [2019-04-12].
Dostupné z: <https://seat38a.com/air-asia-fd-401-bangkok-to-penang/p1010845/>
- [4] D'source. *In-Flight Catering Delight* [online]. [2019-04-15].
Dostupné z: <http://www.dsource.in/oursource/flight-catering-delight>
- [5] Thesegoldwings.com [online]. [2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.drawboard.co.za/irshaadv/wp-content/uploads/2013/10/AerocatStocked.jpg>
- [6] BLAŽEK, J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*, ELSEVIER SCIENCE Ltd, 2001, ISBN 0080430090
- [7] LINHART, J. *Mechanika Tekutin I*, 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009
- [8] JŮZA, Zdeněk. *Numerická simulace v turbínovém stupni s nadbandážovou ucpávkou*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2008
- [9] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin Fluent, CFX* [online], VŠB-TU Ostrava, 2008, 154 s., dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>
- [10] Ansys Student Comunity. *Near wall treatment* [online]. [2019-05-10].
Dostupné z: <https://studentcommunity.ansys.com/thread/neat-wall-treatment/>
- [11] LearnCAX, *Basics of Y Plus, Boundary Layer and Wall Function in Turbulent Flows* [online]. [2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows>
- [12] WHITE, Frank M.: *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Education, 2015, ISBN 978- 0073398273
- [13] ANSYS, *ANSYS Fluent-Solver Theory Guide* [online]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- [14] JIYUAN Tu, GUAN Yeoh, CHAOQUN Liu: *Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, ISBN- 13: 978- 0080982434