

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství  
Studijní specializace: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

CFD výpočet difuzoru tunelové větrné turbíny

Autor: Luděk PAPEŽ  
Vedoucí práce: Doc. Ing. Petr ERET, Ph.D.

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Luděk PAPEŽ**  
Osobní číslo: **S21B0182P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Téma práce: **CFD výpočet difuzoru tunelové větrné turbíny**  
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

## Zásady pro vypracování

- 1) Shrnutí nejnovějšího vývoje, klady a zápory
- 2) Popis vhodného matematického modelu pro CFD
- 3) Axisymetrický výpočet pro různé tvary difuzoru
- 4) Analýza výsledků

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- 1) Grant, A., Johnstone, C., Kelly, Nick. Urban wind energy conversion: The potential of ducted turbines, Renewable Energy, Volume 33, Issue 6, June 2008, Pages 1157-1163
- 2) Aierken Dilimulati, Ted Stathopoulos, Marius Paraschivoiu, Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Volume 175, April 2018, Pages 179-192

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Petr Eret, Ph.D.**  
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2023**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2024**

LS.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Petr Eret, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Petru Eretovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a zdrojů, vstřícnost a čas věnovaný odbornému vedení při zpracování bakalářské práce.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Papež	Jméno Luděk	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. ERET, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	CFD výpočet difuzoru tunelové větrné turbíny		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2024
---------	---------	---------	-----	-------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	73	TEXTOVÁ ČÁST	73	GRAFICKÁ ČÁST	0
--------	----	--------------	----	---------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce se zabývá prouděním vzduchu kolem dvou tvarových koncepcí difuzorů a zkoumá vliv tvaru difuzoru na zvýšení rychlosti proudění vzduchu. Je proveden CFD výpočet simulace proudění u jednoho difuzoru bez příruby, tří difuzorů s rozdílnou výškou příruby a jednoho difuzoru s profilem ve tvaru křídla. Pro každý typ je řešen návrh geometrie difuzoru, tvorba výpočetní sítě, spuštění a vyhodnocení CFD simulací. Na závěr jsou vyhodnoceny výsledky simulací a uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých variant tvaru difuzorů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	tunelová větrná turbína, CFD simulace, proudění vzduchu, rychlost větru, zvýšení výkonu, kuželový difuzor zakončený přírubou, difuzor s profilem ve tvaru křídla, výpočetní síť

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Papež	Name Luděk
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. ERET, Ph.D.	Name Petr
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE	
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Delete when not applicable	
	CFD calculation of a tunnel wind turbine diffuser	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	73	<b>TEXT PART</b>	73	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor's thesis deals with air flow around two shape concepts of diffusers and examines the influence of the shape of the diffuser on the increase in air flow speed. A CFD calculation of the flow simulation is performed for one diffuser without a flange, for three diffusers with different flange heights and for one diffuser with a wing-shaped profile. For each type, the design of the diffuser geometry, the creation of a computer network, the launch and evaluation of CFD simulations are solved. At the end, the results of the simulations are evaluated and the advantages and disadvantages of individual variants of the shape of the diffusers are presented.
<b>KEY WORDS</b>	tunnel wind turbine, CFD simulation, airflow, wind speed, power boost, flanged conical diffuser, wing-shaped profile diffuser, computer network

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	11
Seznam obrázků .....	13
Seznam tabulek .....	14
Seznam grafů.....	14
1 Úvod.....	16
2 Tunelové větrné turbíny .....	17
2.1 Difuzor ve větrné turbíně.....	17
2.2 Výhody difuzorů ve větrných turbínách .....	18
2.3 Nevýhody difuzorů ve větrných turbínách .....	18
2.4 Vývoj tunelových větrných turbín .....	18
2.5 Závěry provedených studií na tvar difuzoru.....	20
2.5.1 Kuželový difuzor zakončený přírubou .....	20
2.5.2 Difuzor s profilem ve tvaru křídla.....	21
3 Podzvukové difuzory.....	22
3.1 Funkce difuzorů.....	22
3.2 Tvary difuzorů .....	22
3.3 Difuzor s kruhovým průtočným průřezem .....	22
3.4 Druhy proudění difuzorem .....	23
3.5 Základní aerodynamické vlastnosti difuzorů.....	25
4 Modelování proudění pomocí CFD.....	26
4.1 Základní rovnice popisující proudění tekutin.....	26
4.2 Možnosti matematického modelování proudění tekutin .....	26
4.3 Reynoldsovy rovnice .....	27
4.3.1 Aplikace středování na rovnici kontinuity a N–S rovnice .....	28
4.4 Modely turbulence pro stacionární proudění.....	28
4.4.1 Boussinesquova hypotéza .....	29
4.4.2 Metoda Reynoldsových napětí .....	30
5 Modely k popisu turbulence .....	31
6 Dílčí fáze k popisu proudění pomocí CFD.....	32
6.1 Geometrie .....	32
6.2 Výpočetní síť .....	32
6.2.1 Mezní vrstva.....	33
6.3 Okrajové podmínky .....	34
6.3.1 Vstupní okrajová podmínka .....	34



6.3.2	Výstupní okrajová podmínka .....	34
6.3.3	Stěnová okrajová podmínka .....	35
6.3.4	Symetrická okrajová podmínka.....	35
6.3.5	Periodická okrajová podmínka.....	35
7	Fáze numerické simulace a ověření správnosti řešení .....	36
8	CFD výpočet difuzoru tunelové větrné turbíny.....	37
9	Specifikování CFD úlohy pro kuželový difuzor zakončený přírubou .....	38
9.1	Návrh geometrie .....	38
9.1.1	Rozměry difuzoru.....	38
9.1.2	Rozměry zkoumané oblasti .....	39
9.1.3	Výsledná geometrie.....	39
9.2	Okrajové podmínky .....	39
9.2.1	INLET .....	39
9.2.2	OUTLET .....	40
9.2.3	SLIP.....	40
9.2.4	AXISYMMETRY .....	40
9.2.5	WALL .....	40
9.3	Počáteční podmínky .....	40
9.4	Síťování .....	40
10	CFD výpočet kuželového difuzoru zakončeného přírubou.....	43
10.1	Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0$ .....	43
10.2	Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0,125$ .....	44
10.3	Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0,25$ .....	46
10.4	Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0,5$ .....	47
10.5	Citlivostní analýza výpočetní sítě pro variantu $h/D = 0,5$ .....	49
10.6	Tloušťka mezní vrstvy – $Y^+$ .....	51
10.7	Validace získaných výsledků difuzorů zakončených přírubou.....	51
10.8	Shrnutí výsledků simulací kuželových difuzorů zakončených přírubou .....	53
11	Specifikování CFD úlohy pro difuzor s profilem ve tvaru křídla .....	55
11.1	Návrh geometrie.....	55
11.1.1	Rozměr difuzoru.....	55
11.1.2	Rozměry zkoumané oblasti .....	56
11.2	Počáteční a okrajové podmínky .....	56
11.3	Síťování.....	56
12	CFD výpočet difuzoru s profilem ve tvaru křídla .....	59

12.1	Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 5$ m/s.....	59
12.2	Citlivostní analýza výpočetní sítě .....	60
12.3	Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí pro $U_0 = 5$ m/s.....	61
12.4	Validace získaných výsledků difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 5$ m/s	62
12.5	Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s.....	64
12.6	Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s při dalším zjemnění výpočetní sítě .....	65
12.7	Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s při trojnásobném zvětšení difuzoru .....	66
12.8	Shrnutí výsledků simulací difuzorů s profilem ve tvaru křídla.....	67
13	Přehled počtu elementů a součinitelů $Y^+$ výpočetních sítí .....	68
14	Porovnání získaných výsledků přírubových difuzorů s výsledky difuzoru s profilem ve tvaru křídla .....	69
15	Závěr.....	70
	Seznam použitých zdrojů .....	71

## Přehled použitých zkratk a symbolů

### Zkratky

BEM	Blade element momentum
CFD	Computational fluid dynamics
DAWT	Diffuser augmented wind turbine
DNS	Direct numerical Simulation
FST	Fakulta strojní
KKE	Katedra energetických strojů a zařízení
LES	Large eddy simulation
N-S	Navier-Stokes
RANS	Reynolds averaged Navier-Stokes
SST	Shear stress transport
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

### Symbols

$P$	[W]	Výkon větrné turbíny
$c_p$	[-]	Součinitel výkonu, tlakový součinitel
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$u, v, w$	[m/s]	Složky rychlosti proudění tekutiny
$p_s$	[Pa]	Statický tlak na výstupu z difuzoru
$p_{s1}$	[Pa]	Střední statický tlak na vstupu do difuzoru
$p_{d1}$	[Pa]	Střední dynamický tlak na vstupu do difuzoru
$\zeta_c$	[-]	Celkový ztrátový součinitel
$p_{c1}$	[Pa]	Celkový tlak na vstupu do difuzoru
$p_{s2}$	[Pa]	Střední statický tlak na výstupu z difuzoru
$t$	[s]	Čas
$p$	[Pa]	Tlak
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematická viskozita
$f_{x, y, z}$	[N]	Složky vnější objemové síly
$T$	[s]	Časový úsek
$\tau$	[Pa]	Smykové napětí
$\eta$	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	Dynamická vazkost

$k$	$[\text{m}^2\text{s}^{-2}]$	Turbulentní kinetická energie
$\omega$	$[\text{s}^{-1}]$	Vířivost
$\varepsilon$	$[\text{m}^2\text{s}^{-3}]$	Rychlost disipace
$D$	$[\text{m}]$	Vstupní průměr přírubového difuzoru
$\varphi$	$[\text{°}]$	Úhel rozevření přírubového difuzoru
$h$	$[\text{m}]$	Výška příruby
$L$	$[\text{m}]$	Délka přírubového difuzoru
$t$	$[\text{m}]$	Tloušťka stěny přírubového difuzoru
$b$	$[\text{m}]$	Tloušťka příruby
$U_0$	$[\text{m/s}]$	Počáteční rychlost proudění vzduchu
$x$	$[\text{m}]$	Poloha podél osy symetrie difuzoru
$F_L$	$[\text{N}]$	Vztlková síla
$F_d$	$[\text{N}]$	Odporová síla
$c_d$	$[-]$	Součinitel odporu
$Y^+$	$[-]$	Kvalitativní součinitel výpočetní sítě
$U$	$[\text{m/s}]$	Rychlost proudění vzduchu podél osy symetrie difuzoru
$D_0$	$[\text{m}]$	Nejmenší průměr difuzoru s profilem ve tvaru křídla
$D_{in}$	$[\text{m}]$	Vstupní průměr difuzoru s profilem ve tvaru křídla
$D_{out}$	$[\text{m}]$	Výstupní průměr difuzoru s profilem ve tvaru křídla
$L^*$	$[\text{m}]$	Délka difuzoru s profilem ve tvaru křídla
$\gamma$	$[-]$	Velocity speed-up ratio
$\tau_t$		Turbulentní napětí
$\eta_t$		Turbulentní vazkost
$\nu_t$		Turbulentní kinematická vazkost
$\beta^*, \sigma^*, \alpha, \beta, \sigma$		Empirické konstanty
$\tau_{ij}$		Tensor Reynoldsových napětí
$\zeta, \bar{\zeta}, \zeta'$		Veličina, střední hodnota veličiny, fluktuace veličiny

## Seznam obrázků

Obr. 1: Tunelová větrná turbína – převzato z [9].....	17
Obr. 2: Kuželový difuzor zakončený přírubou - převzato z [2].....	20
Obr. 3: Schéma proudění kolem difuzoru s přírubou – převzato z [7].....	20
Obr. 4: Difuzor s profilem ve tvaru křídla - převzato z [2].....	21
Obr. 5: Tvary difuzorů - upraveno na základě [16].....	22
Obr. 6: a) Kuželový difuzor, b) Kornoutový difuzor – upraveno na základě [1].....	23
Obr. 7: Mechanismus odtržení mezní vrstvy v difuzoru – převzato z [1].....	23
Obr. 8: Průtok difuzorem bez odtržení mezní vrstvy – upraveno na základě [16] ..	24
Obr. 9: Průtok difuzorem s občasným odtržením mezní vrstvy – upraveno na základě [16] ..	24
Obr. 10: Průtok difuzorem s jednostranným odtržením mezní vrstvy – upraveno na základě [16] .....	24
Obr. 11: Průtok difuzorem s oboustranným odtržením mezní vrstvy – upraveno na základě [16] .....	25
Obr. 12: Metody řešení turbulentního proudění – převzato z [12].....	27
Obr. 13: Veličina, její střední hodnota a fluktuace – převzato z [12] ..	27
Obr. 14: Metody matematického modelování stacionárního proudění – převzato z [12].....	28
Obr. 15: Typy turbulentních modelů založených na Boussinesquově hypotéze v programu Ansys fluent – převzato z [12] ..	30
Obr. 16: Princip vzniku geometrie – převzato z [12].....	32
Obr. 17: Strukturovaná výpočetní síť – převzato z [12].....	33
Obr. 18: Nestrukturovaná výpočetní síť – převzato z [12].....	33
Obr. 19: Mezní vrstva – převzato z [12] ..	34
Obr. 20: Symetrická okrajová podmínka – převzato z [12] ..	35
Obr. 21: Periodická okrajová podmínka – převzato z [12] ..	35
Obr. 22: Délkové a úhlové rozměry kuželového difuzoru zakončeného přírubou – upraveno na základě [7].....	38
Obr. 23: Geometrie výpočtové oblasti s okrajovými podmínkami – upraveno na základě [7]	40
Obr. 24: Základní výpočetní síť ..	41
Obr. 25: Jemné vrstvy výpočetní sítě kolem stěn difuzoru ..	41
Obr. 26: Kruhová plocha výpočetní sítě.....	42
Obr. 27: Výsledná výpočetní síť ..	42
Obr. 28: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor $h/D = 0$ .....	43
Obr. 29: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor $h/D = 0$ ..	44
Obr. 30: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor $h/D = 0,125$ .....	45
Obr. 31: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor $h/D = 0,125$ ..	46

Obr. 32: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor $h/D = 0,25$ .....	46
Obr. 33: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor $h/D = 0,25$ .....	47
Obr. 34: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor $h/D = 0,5$ .....	48
Obr. 35: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor $h/D = 0,5$ .....	49
Obr. 36: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor $h/D = 0,5$ s modifikovanou výpočetní sítí .....	49
Obr. 37: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor $h/D = 0,5$ s modifikovanou výpočetní sítí .....	50
Obr. 38: Difuzor s profilem ve tvaru křídla .....	55
Obr. 39: Výsledná geometrie úlohy s okrajovými podmínkami .....	56
Obr. 40: Základní (hrubá) výpočetní síť .....	57
Obr. 41: Vrstvy jemné výpočetní sítě kolem stěn difuzoru.....	57
Obr. 42: Kruhová plocha jemné výpočetní sítě.....	57
Obr. 43: Výsledná výpočetní síť .....	58
Obr. 44: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor s profilem ve tvaru křídla .....	59
Obr. 45: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor s profilem ve tvaru křídla.....	60
Obr. 46: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí .....	61
Obr. 47: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí .....	62
Obr. 48: Grafické znázornění rychlosti proudění studie - převzato z [2].....	64

## Seznam tabulek

Tab. 1: Rozměry kuželového difuzoru zakončeného přírubou .....	39
Tab. 2: Počet elementů výpočetní sítě.....	42
Tab. 3: Hodnota součinitele $Y^+$ .....	51
Tab. 4: Rozměry difuzoru s profilem ve tvaru křídla.....	55
Tab. 5: Přehled počtu elementů a součinitelů $Y^+$ výpočetních sítí .....	68
Tab. 6: Porovnávané veličiny difuzorů .....	69

## Seznam grafů

Graf 1: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor $h/D = 0$ .....	44
Graf 2: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor $h/D = 0,125$ .....	45
Graf 3: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor $h/D = 0,25$ .....	47

Graf 4: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor $h/D = 0,5$ .....	48
Graf 5: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor $h/D = 0,5$ s modifikovanou výpočetní sítí .....	50
Graf 6: Výsledky experimentálního měření prováděné studie – převzato z [7].....	51
Graf 7: Výsledky CFD simulací prováděné studie – převzato z [7] .....	52
Graf 8: Výsledky CFD simulace přírubových difuzorů .....	53
Graf 9: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor s profilem ve tvaru křídla.....	60
Graf 10: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí .....	61
Graf 11: Výsledky CFD simulací prováděné studie – převzato z [2] .....	63
Graf 12: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 5$ m/s .....	63
Graf 13: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s .....	65
Graf 14: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s při dalším zjemnění výpočetní sítě .....	66
Graf 15: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s při trojnásobném zvětšení difuzoru .....	67

# 1 Úvod

Témata jako klimatická změna, globální oteplování, skleníkové plyny jsou v současné době velmi aktuální a často probíraná nejen mezi odborníky, ale i laickou veřejností. Ke změnám klimatu a rychlému oteplování planety přispívá zvyšování emisí oxidu uhličitého, za kterým stojí ve velké míře fosilní paliva, tedy energetika.

V souvislosti s klimatickou krizí a zhoršováním životního prostředí přijala Evropská unie evropský právní rámec pro klima - Zelenou dohodu pro Evropu, kde stanovila právně závazné cíle, a to snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030 alespoň o 55 % z úrovně roku 1990 a dosažení klimatické neutrality do roku 2050 a zároveň byl stanoven soubor návrhů, jež mají přispět ke splnění těchto cílů. [23]

Mezi opatřeními v oblasti klimatu, která mají přispět ke splnění cílů Zelené dohody pro Evropu a snížení emisí skleníkových plynů, je i zvýšení podílu energie získané z obnovitelných zdrojů, a také umožnit lidem výrobu vlastní čisté energie, tedy zajistit vhodné legislativní, technické či ekonomické podmínky pro realizaci projektů využívajících obnovitelné zdroje. [24]

Ke splnění klimaticko-energetických závazků v rámci Evropské unie byl v roce 2023 aktualizován Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu, ve kterém si Česká republika stanovila rámcový cíl dosažení podílu obnovitelných zdrojů energie na konečné spotřebě ve výši 30 % do konce roku 2030. Rozvoj fotovoltaických elektráren je v současnosti v České republice na vzestupu, ale v oblasti větrné energetiky je prostor pro větší rozvoj a využití potenciálu větru jako zdroje energie. Vnitrostátní plán má vymezit cestu k dekarbonizované energetice a do roku 2030 uvažuje s instalovaným výkonem 10,1 GW fotovoltaických elektráren a 1,5 GW větrných elektráren zapojených do sítě s tím, že tyto hodnoty jsou navrhovány jako minimální závazek a bude usilováno o dosažení vyššího podílu. [25]

Česká republika ve srovnání s ostatními zeměmi Evropské unie v rozvoji větrných elektráren výrazně zaostává. Větrná energetika nyní v Česku tvoří jedno procento spotřeby elektřiny, evropský průměr činí sedmáct procent. Do roku 2030 by se měl instalovaný výkon větrných turbín zpětinásobit. [26]

V sektoru větrné energetiky je rozvoj a výstavba nových větrných elektráren brzděn různými technickými, ekonomickými, ekologickými a sociálními omezeními, důsledkem čehož kleslo množství lokalit s výhodnými větrnými podmínkami pro instalaci větrných elektráren. Z tohoto důvodu byly zahájeny výzkumy, které se zaměřují na hledání nových technologií a umožnění provozu větrných elektráren i v lokalitách s horšími povětrnostními podmínkami. Řešení tohoto problému nabízí větrné elektrárny vybavené difuzorem, a proto se difuzorové větrné turbíny staly předmětem mnoha výzkumů. Tyto výzkumy se věnují malým větrným elektrárnám s maximálním výkonem několika kW a zabývají se návrhem vhodně tvarovaného difuzoru, který větrné elektrárně zajistí lepší výkon ve srovnání s klasickou bezdifuzorovou turbínou.



## 2 Tunelové větrné turbíny

Pojem tunelová větrná turbína je označení pro větrnou turbínu, která má okolo sebe plášť, plnící funkci difuzoru. Lze se také setkat s názvy jako zakrytovaná větrná turbína, opláštěná větrná turbína nebo také difuzorová větrná turbína. [2] Tunelová větrná turbína je zobrazena na obrázku 1. Ve výzkumných studiích, které na toto téma byly provedeny, je pro tunelové větrné turbíny často používané označení DAWT, které vychází z anglického označení Diffuser Augmented Wind Turbine. [4] Koncepční rozdíl mezi tunelovou větrnou turbínou a konvenční (bezdifuzorovou) turbínou tedy představuje tvarovaný plášť – difuzor, který je umístěn okolo větrné turbíny. [2] Tato koncepce je zkoumána pro vývoj malých větrných elektráren [7]. Výkon malých větrných elektráren je do 40 kW [8], přičemž tunelové větrné turbíny jsou zkoumány s nižšími hodnotami výkonu, řádově kolem 1,5 kW [2], [7].



Obr. 1: Tunelová větrná turbína – převzato z [9]

### 2.1 Difuzor ve větrné turbíně

Z poznatků o energii větru a větrných turbínách je známé, že výkon větrné elektrárny lze určit podle vztahu

$$P = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot S \cdot \rho \cdot u^3 [W]$$

kde  $c_p$  je součinitel výkonu [-],  $S$  je plocha opisovaná rotorem [ $m^2$ ],  $\rho$  je hustota vzduchu [ $kg/m^3$ ] a  $u$  je rychlost proudícího vzduchu [ $m/s$ ]. [5]

Z tohoto vztahu je patrné, že výkon větrné elektrárny stoupá se třetí mocninou rychlosti větru, to znamená, že i malé zvýšení rychlosti větru způsobí veliký nárůst výkonu. [5]

Se znalostí tohoto faktoru se přirozeně začala objevovat snaha o lokální zrychlení větru v místě větrné turbíny za účelem dosažení většího výkonu. Za tímto účelem začaly být vyvíjeny konstrukce typu difuzoru, které mají zajistit sbírání a urychlování větru v prostoru větrné turbíny, čímž má tato technologie přinést možnost efektivnějšího získávání energie z větru. [4]

## 2.2 Výhody difuzorů ve větrných turbínách

Hlavní výhodou při použití difuzoru je zvýšení rychlosti větru před turbínou [7]. Klasická větrná elektrárna započiná výrobu elektřiny při rychlosti větru kolem 3 až 4 m/s a s rostoucí rychlostí větru roste i její výkon až na hodnotu jmenovitého výkonu, který je dosahován při rychlostech větru mezi 10 až 15 m/s. Z tohoto plyne, že pro získání co nejvyššího výkonu je žádoucí rotor větrné elektrárny umístit do míst, kde je dosahována rychlost větru mezi 10 až 15 m/s. [5] Těchto podmínek ale nelze dosáhnout vždy, pak přichází v úvahu difuzor, který urychlí proud vzduchu před rotorem, a při nižších rychlostech větru tak difuzorová větrná turbína dosahuje vyššího výkonu. Vzhledem k nízkým nárokům na rychlost větru je tak možná instalace takovýchto větrných turbín v širokém spektru oblastí [4].

Další výhodou je výrazné snížení hluku emitovaného větrnou turbínou. Víry, které vznikají na konci lopatek turbíny, jsou potlačovány reakcí s mezní vrstvou v difuzoru, což má za následek výrazné snížení aerodynamického hluku [4].

Umístění rotoru do difuzoru také zvyšuje bezpečnost, jelikož při odlomení lopatky difuzor zabrání jejímu odlétnutí do okolí. [4] Z tohoto důvodu jsou difuzorové větrné turbíny vhodné i pro obydlené oblasti. [2]

## 2.3 Nevýhody difuzorů ve větrných turbínách

I přesto, že difuzory mohou přinášet značné výhody, existují i některé nevýhody, které brání komercializaci větrných turbín s difuzory. Potřeba difuzoru zvyšuje náklady na výrobu větrné elektrárny. [2] Difuzor při náporu větru zvyšuje odpor, zvyšuje tak silové namáhání nosné konstrukce a také zvyšuje hmotnost celého systému, proto je potřebná robustnější nosná konstrukce. Při realizaci návrhu difuzoru je rovněž zapotřebí náročný výzkum a vývoj. [10]

## 2.4 Vývoj tunelových větrných turbín

Myšlenkou využití difuzoru ve větrné energetice se v průběhu let zabývala řada výzkumů a studií, tyto studie jsou využívány jako podklady a zdroje pro další výzkum v této oblasti. Cílem provedených studií je optimalizace parametrů difuzoru pro získání co největší účinnosti.

Již v 50. letech 20. století Lilley a Rainbird vytvořili pomocí jednorozměrné teorie hybnosti první teoretické poznatky o využití difuzoru ve větrných turbínách. První experimentální výzkumy provedli Kogan, Igra, Gilbert a Foreman či Oman. Na základě jednorozměrné teorie hybnosti navrhli Igra a Foreman několik teoretických modelů, jejichž cílem bylo analyzovat získaná experimentální data a také prokázat schopnost difuzorových větrných turbín překročit Betzův limit. [2] Betzův limit stanovuje jaké maximální množství energie lze získat větrnou turbínou z větru, který se pohybuje danou rychlostí, bylo zjištěno, že v optimálním případě lze využít 59,3 % energie větru. [3]

Tyto modely následně modernizovali Khamlaj a Rumpfkeil, kteří navrhli semiempirické vzorce, které bylo možné využít při předběžném návrhu. Hlavním výsledkem jejich studií bylo výrazné snížení poměru délky difuzoru k jeho průměru. Začaly se využívat nové přístupy, jako nahrazení příměstěnných difuzorů prstencovými profily či výměna výstupních klapků za výstupní příruby. Na základě těchto prvotních výzkumů došlo k popsání základních principů fungování difuzorových turbín. [2]

Další studie provedli Fletcher, Koras a Georgalas, kteří se zabývali především vlivem geometrických charakteristik profilu difuzoru ve tvaru křídla na výkon větrné turbíny. Koras a Georgalas zjistili, že výkon stoupá lineárně s délkou tětiny a úhlem náběhu. Model Blade Element Momentum (BEM), který později navrhl Phillips s využitím empiricky odvozeného

vzorce pro výpočet rozložení rychlosti v rovině rotoru, spolu s CFD simulacemi a pokusy v aerodynamickém tunelu využila společnost Vortec Energy Limited, první soukromá společnost, která se rozhodla koncepti difuzorových větrných turbín komercializovat. Ale tehdejší prototyp nevyhověl, zejména kvůli výraznému odtrhávání mezní vrstvy a potřebě masivní konstrukce, která by odolala očekávanému zatížení. Neúspěch společnosti Vortec Energy Limited spolu s vysokými náklady na difuzor způsobily útlum dalších výzkumů v této oblasti. [2]

V současné době opět narostl zájem o technologii tunelových větrných turbín, s čímž souvisí i obnovení výzkumů. Hansen a kolektiv vypracovali novou numerickou studii s cílem objasnit vliv umístění difuzoru kolem větrné turbíny. S využitím CFD simulací a teorie hybnosti zjistil, že platí úměra mezi navýšením výkonu a průtokem hmoty procházející turbínou. Van Bussel ve své studii zjistil, že navýšení výkonu je úměrné navýšení hmotnostního toku, dospěl tedy ke stejnému závěru jako Hansen. [2]

S využitím CFD simulace zkoumali Bet a Grassmann možnosti difuzoru s profilem křídla. Zjistili, že použitím difuzoru s takovýmto profilem by zvýšení výkonu mohlo dosáhnout 1,55 pro vysoké rychlosti větru a 2 pro nízké rychlosti větru. Mimo toho Wang přišel s myšlenkou využívat energii větru i v místech s nízkou rychlostí větru v obydlených oblastech. Později Aranake s využitím numerických metod zjistil, že je možné zvýšit výkon i při nízkých rychlostech větru. Tato studie tak vyzdvihla větrné turbíny s difuzorem jako udržitelné zdroje pro výrobu energie i v lokalitách s nízkými rychlostmi větru. [2]

Významná část studií byla věnována vývoji přírubových difuzorů, kde nejúspěšnější studie představili Abe a Ohya, Ohya a Karasudani, Kosasih a Tondelli. Mansour a Meskinkhoda, Toshimitsu, Takahashi ve svých studiích prezentovali, že vznik oblasti nízkého tlaku a silná tvorba vířů za přírubou, může zvýšit rychlost větru proudícího na turbínu. Abe a Ohya ve své studii popsali zatížení turbíny a úhel rozevření difuzoru jako parametry mající nejzásadnější vliv na celkový výkon. Hlavně poukazovali na skutečnost, že zlepšení výstupního výkonu lze docílit nízkým zatížením turbíny a eliminací masivního odtrhávání mezní vrstvy. [2]

Rio Vaz modifikoval klasickou teorii BEM a vyvinul model s nízkými výpočtovými náklady pro analýzu rotorů difuzorových turbín. Následně byl tento výpočtový model ověřen Leloudasem, také jej pro aerodynamickou optimalizaci využili Vaz a Wood. Dále bylo vyvíjeno i použito několik optimalizačních schémat pro vylepšení difuzorových turbín, které se zaměřují pouze na difuzor se zadanými hodnotami zatížení turbíny nebo zvažují nezátíženou konfiguraci. Také jsou zkoumány optimalizace systému rotor – difuzor. [2]

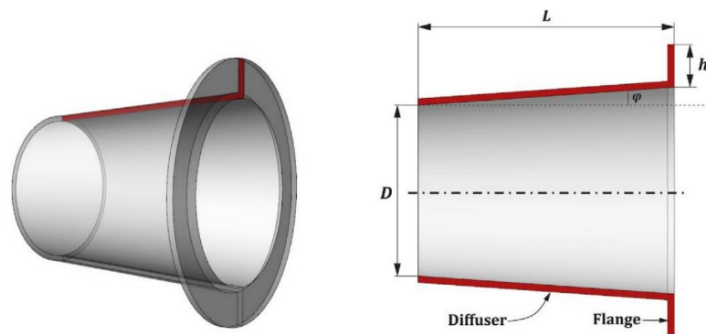
Významnému výzkumu difuzorových turbín se věnoval Venters, který zkoumal vliv koeficientu tahu, úhlu náběhu, mezeru mezi rotorem a difuzorem a axiální polohu rotoru na výstupní výkon. Přičemž součinitel tahu se ukázal jako parametr nejvíce ovlivňující výkon. Venters vyzdvihl, že vhodný úhel náběhu byl mnohem větší než separační úhel náběhu odpovídající křídlovému profilu ve volném proudu. Venters dále zdůraznil, že velké úhly náběhu nemusí způsobovat odtrhávání mezní vrstvy v difuzoru, protože víření indukované turbínou přispívá ke stabilizaci mezní vrstvy. Tato studie dokázala, že difuzorové větrné turbíny mohou překonat Betzův limit, i přesto, že koeficient výkonu je stanoven na základě výstupní plochy difuzoru. [2]

## 2.5 Závěry provedených studií na tvar difuzoru

Studie, které hledaly způsob, jak efektivně urychlit rychlost větru prostřednictvím difuzoru přišly se dvěma základními tvarovými provedeními. Jedná se o kuželový difuzor zakončený přírubou a difuzor s profilem ve tvaru křídla. [2]

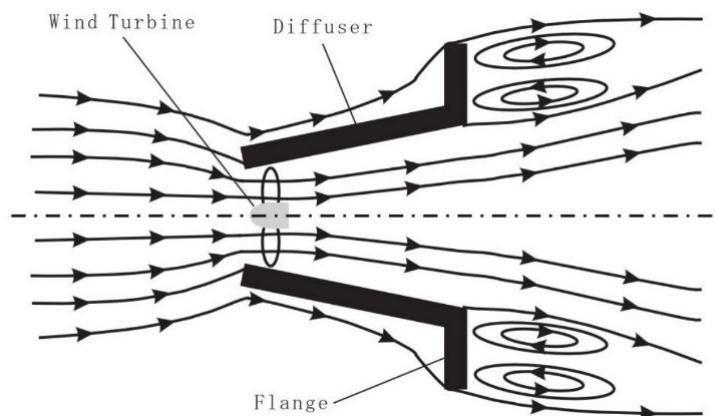
### 2.5.1 Kuželový difuzor zakončený přírubou

Tato koncepce používá kuželový difuzor, tedy difuzor s konstantním úhlem rozevření po jeho délce, který má na výstupní straně umístěnou přírubu. [2] Hlavními geometrickými parametry, které mají vliv na funkci, je vstupní průměr difuzoru  $D$ , úhel rozevření  $\varphi$ , délka difuzoru  $L$  a výška příruby  $h$ . [6] Tento difuzor je zobrazen na obrázku 2.



Obr. 2: Kuželový difuzor zakončený přírubou - převzato z [2]

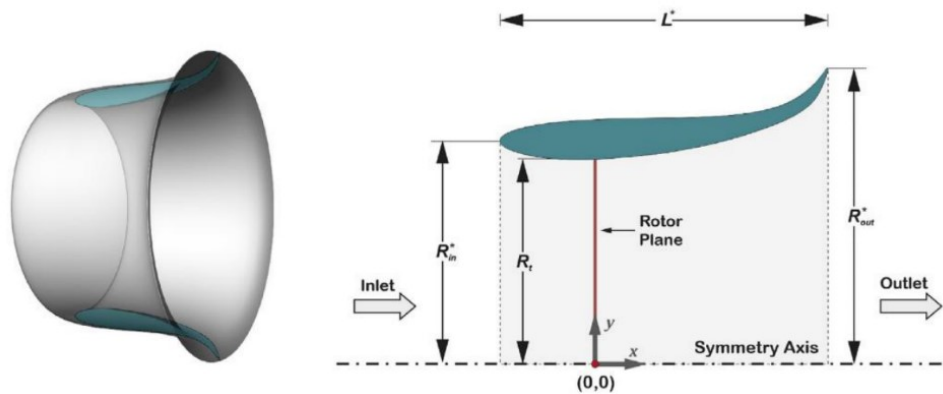
Ačkoli příruba představuje překážku proti plynulému proudění, bylo zjištěno, že za přírubou dochází k výraznému úplavu a vzniká zde oblast velmi nízkého tlaku. Tato oblast může způsobovat koncentrování a zrychlování proudu vzduchu přicházejícího do difuzoru. Maximální rychlost vzduch dosáhne v blízkosti vstupního konce difuzoru, a proto je účelné umístit turbínu do této oblasti. Schéma takovéto koncepce se znázorněným prouděním uvnitř a vně difuzoru je zobrazeno na obrázku 3. Ačkoli tato koncepce dosahuje dobrého výkonu, je potřebné další zkoumání proudových polí vevnitř a vně difuzoru. [7]



Obr. 3: Schéma proudění kolem difuzoru s přírubou – převzato z [7]

## 2.5.2 Difuzor s profilem ve tvaru křídla

Tento difuzor má aerodynamický profil ve tvaru křídla (leteckého profilu). Takovýto difuzor by měl mít vysoký koeficient vztlaku a měl by být vhodný i pro nízké rychlosti větru. Difuzor pak urychluje proudění na vstupní straně vlivem tlakové diference mezi vstupní a výstupní stranou. Tvar tohoto difuzoru je zobrazen na obrázku 4. [11]



Obr. 4: Difuzor s profilem ve tvaru křídla - převzato z [2]

### 3 Podzvukové difuzory

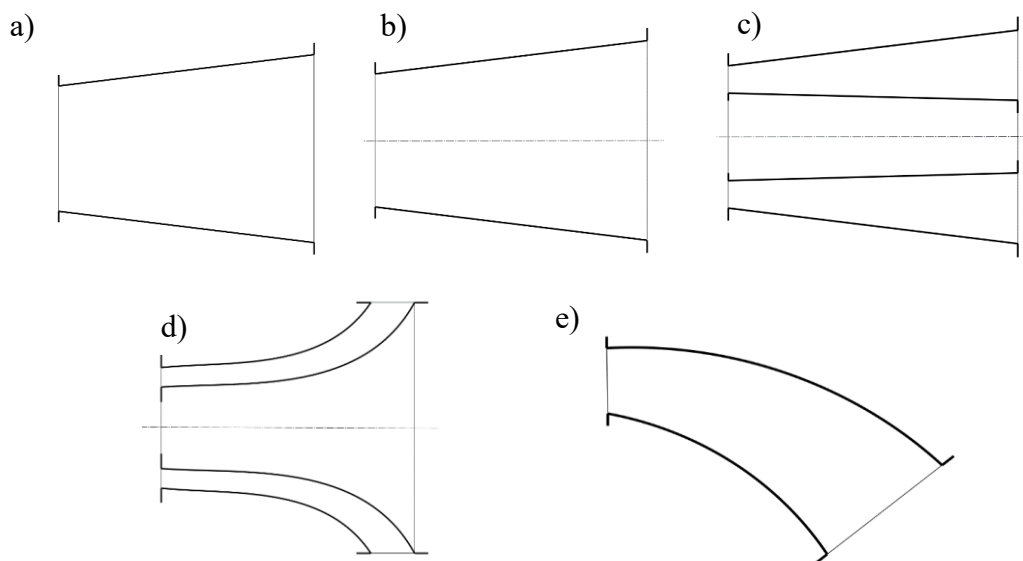
K pochopení problematiky tunelových větrných turbín je vhodné nejprve se zabývat vlastnostmi difuzorů jako takových. Rychlost větru dosahovaná ve větrné energetice je vždy nižší, než je rychlost zvuku ve vzduchu, a proto tyto difuzory spadají do kategorie podzvukových (subsonických) difuzorů.

#### 3.1 Funkce difuzorů

Funkcí difuzorů je přeměna části kinetické energie proudu vstupující tekutiny na tlakovou energii. Závislost přeměny energie souvisí pouze s tvarováním průtočného kanálu, a není tak zapotřebí jakýchkoliv pohyblivých součástí. S nárůstem tlaku během proudění klesá v mezní vrstvě schopnost tekutiny přiléhat ke stěně difuzoru. Nastanou-li podmínky takové, že dojde k destabilizaci mezní vrstvy a k jejímu odtržení, vznikne v difuzoru rozvířené zpětné proudění. Důsledkem takovýchto stavů jsou značné energetické ztráty, které dosahují mnohem větších hodnot než ztráty, ke kterým dochází třením v mezní vrstvě. [16]

#### 3.2 Tvary difuzorů

Dle tvaru průtočného průřezu difuzoru lze rozlišovat difuzory s kruhovým průřezem (případně mezikruhovým průřezem) a nekruhový (obdélníkový, čtvercový) průřezem. Tyto difuzory mohou být přímé, nebo se zakřivenou střednicí. Jednotlivé typy difuzorů jsou znázorněny na obrázku č. 5. [16]



Obr. 5: Tvary difuzorů - upraveno na základě [16]

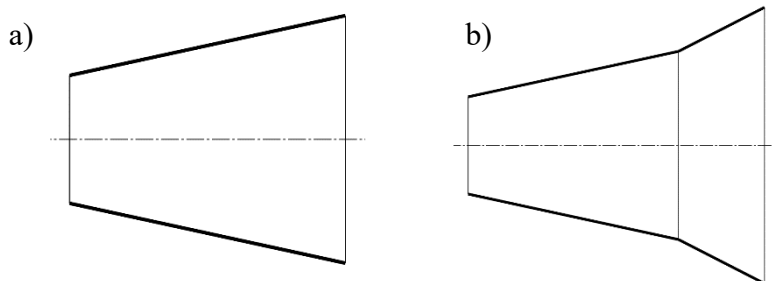
- a) difuzor s nekruhovým průtočným průřezem (přímý rovinný)
- b) difuzor s kruhovým průtočným průřezem (přímý kuželový)
- c) difuzor s mezikruhovým průtočným průřezem (přímý)
- d) difuzor s mezikruhovým průtočným průřezem (se zakřivenou střednicí)
- e) difuzor s nekruhovým průtočným průřezem (se zakřivenou střednicí)

#### 3.3 Difuzor s kruhovým průtočným průřezem

V problematice tunelových větrných turbín je větrná turbína umístěna uvnitř difuzoru a turbína při rotaci opisuje kruhovou plochu, proto pro tento účel využití jsou vhodné pouze

difuzory s kruhovým průtočným průřezem a následující text se bude zabývat pouze tímto typem difuzoru.

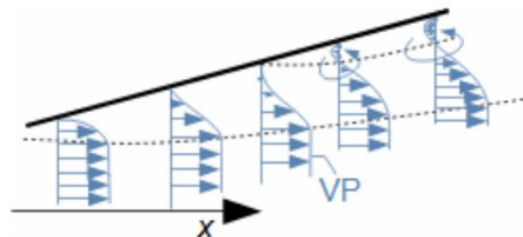
Pokud difuzor s kruhovým průtočným průřezem má po celé své délce konstantní úhel rozšíření, nazývá se kuželový difuzor, pokud se úhel rozšíření podél délky difuzoru mění, nazývá se kornoutový difuzor (viz. obr. 6). [1]



Obr. 6: a) Kuželový difuzor, b) Kornoutový difuzor – upraveno na základě [1]

### 3.4 Druhy proudění difuzorem

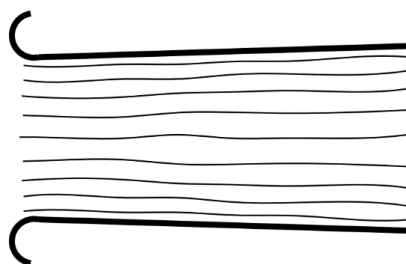
Vlastnosti difuzoru z hlediska aerodynamiky vychází z míry udržení mezní vrstvy přiléhat ke stěně. Při odtržení mezní vrstvy dochází v tekutině mezi stěnou a proudem v jádru ke vzniku zpětného proudění, a důsledkem toho klesá podíl přeměny kinetické energie proudu na energii tlakovou, čímž při proudění tekutiny difuzorem rostou energetické ztráty. [16] Mechanismus odtržení mezní vrstvy při proudění difuzorem je znázorněn na obrázku 7.



Obr. 7: Mechanismus odtržení mezní vrstvy v difuzoru – převzato z [1]

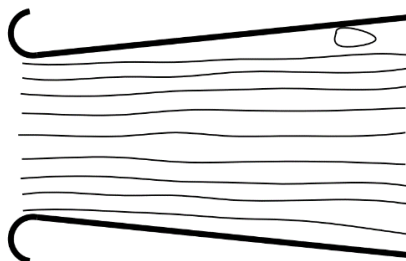
U kuželových difuzorů lze rozlišovat několik typů průtoků, které se od sebe liší podle míry a pozice odtržení mezní vrstvy. [16]

Prvním typem průtoku je tzv. zdravý průtok difuzorem, kde k odtržení mezní vrstvy vůbec nedojde, a tak veškeré ztráty při přeměně kinetické energie na tlakovou jsou pouze třecího původu. Docílení takového proudění je realizovatelné pouze při malém úhlu rozšíření difuzoru, které nepřekročí hodnotu zhruba  $3,5^\circ$ . Takovéto difuzory pak dosahují značných délek, a proto jsou v praxi používány jen zřídka. Popisovaný typ proudění, je zobrazen na obrázku 8. [16]



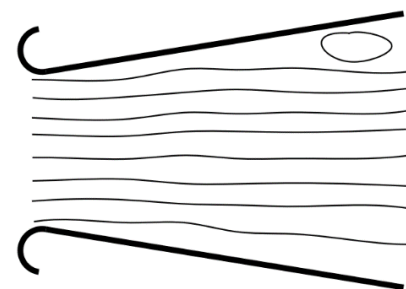
Obr. 8: Průtok difuzorem bez odtržení mezní vrstvy – upraveno na základě [16]

Druhým typem je přechodový typ průtoku, kde dochází k občasnému odtržení mezní vrstvy a vzniká tak malá oblast zavířeného proudění. Tento typ proudění je spojený s ne zcela ustáleným prouděním, kde v mezní vrstvě dochází ke střídání poměrů, a tak po odtržení mezní vrstvy po určitém čase mezní vrstva opět přilehne. V průběhu proudění dochází ke střídání zdravého a odtrženého průtoku. Difuzor s takto proměnlivým průtokem dosahuje z hlediska aerodynamiky dobrých vlastností. Jelikož mezní vrstva se nachází ve stavu blízkém odtržení, přiléhá ke stěně difuzoru jen omezeně, a tak tření mezi stěnou a mezní vrstvou je velmi malé. Toto proudění je zobrazeno na obrázku 9. [16]



Obr. 9: Průtok difuzorem s občasným odtržením mezní vrstvy – upraveno na základě [16]

Třetím typem je ustálený průtok difuzorem s úhlem rozevření od 8 do 12°, kde poloha odtržení mezní vrstvy je již stálá. Oblast zavíření vzniká buď v daném místě odtržení mezní vrstvy, nebo vlivem působení proudového pole dojde k posunutí místa odtržení směrem proti proudu, které může dosáhnout až polohy vstupního hrdla difuzoru. Tento typ průtoku je zobrazen na obrázku 10. Toto proudění nastává i v difuzorech s menšími úhly rozevření při neustáleném proudění. [16]

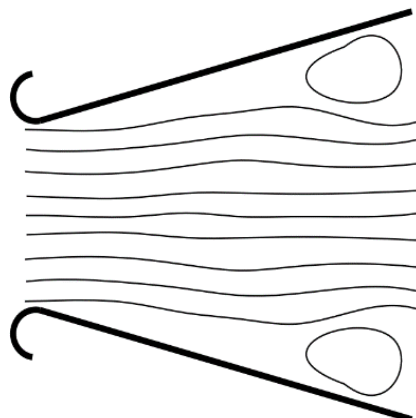


Obr. 10: Průtok difuzorem s jednostranným odtržením mezní vrstvy – upraveno na základě [16]

Čtvrtým typem je proudění s odtržením mezní vrstvy od obou stěn. Takové proudění při ideálních vstupních parametrech vzniká při úhlech rozevření větších než 15° (viz. obrázek 11). Z pohledu energetických ztrát je tento stav nejméně příznivý, a proto nejsou v technické praxi valně využívány, ale díky velkým úhlům rozevření dosahují tyto difuzory nižších délek a jsou



tak výhodnější z hlediska prostorových nároků. Nepříznivé důsledky těchto difuzorů lze do jisté míry snížit pasivními nebo aktivními zásahy. [16]



Obr. 11: Průtok difuzorem s oboustranným odtržením mezní vrstvy – upraveno na základě [16]

### 3.5 Základní aerodynamické vlastnosti difuzorů

Jelikož difuzory přeměňují kinetickou energii na tlakovou, tak primární veličina, která je charakterizuje, je tlakový součinitel  $c_p$ , který je definovaný dle vztahu

$$c_p = \frac{p_s - p_{s1}}{p_{d1}} [-]$$

kde  $p_s$  představuje statický tlak na výstupu z difuzoru,  $p_{s1}$  je střední statický tlak na vstupu do difuzoru,  $p_{d1}$  je střední dynamický tlak na vstupu do difuzoru. V ideálním případě je hodnota tlakového součinitele  $c_p = 1$ , což znamená, že veškerý dynamický tlak je přeměněn na tlakovou energii, ale přiblížení se této hodnotě by vyžadovalo difuzor s extrémní délkou. A proto reálné difuzory dosahují nižších hodnot tlakového součinitele, výborné hodnoty jsou přibližně  $c_p = 0,75$ , ale v nepříznivých podmínkách může být za dobré hodnoty považováno i  $c_p = 0,1$ . [16]

Dalším, pro difuzory důležitým parametrem, je ztrátový součinitel, který vyjadřuje energetickou ztrátu při proudění tekutiny kanálem. Difuzory jsou nejčastěji využívány dvojitým způsobem, buď jako součást potrubního systému, to neplatí pro difuzorové větrné turbíny. Nebo tekutina vytéká z difuzoru do velkého prostoru, kde dochází k maření vystupující kinetické energie, a právě tento způsob využití platí pro difuzorové větrné turbíny. Celkový ztrátový součinitel je potom definovaný vztahem

$$\zeta_c = \frac{p_{c1} - p_{s2}}{p_{d1}} [-]$$

kde  $p_{c1}$  představuje celkový tlak na vstupu do difuzoru,  $p_{s2}$  je střední statický tlak na výstupu z difuzoru,  $p_{d1}$  je střední dynamický tlak na vstupu do difuzoru. [16]

## 4 Modelování proudění pomocí CFD

K zjišťování proudových polí kolem obtékaných těles se v současné době čím dál více používají numerická řešení pomocí metody konečných objemů CFD. Tato metoda výrazně urychluje, zjednodušuje a zlevňuje návrh a konstrukci nových zařízení, jelikož odpadá řada experimentů na prototypch. [12]

### 4.1 Základní rovnice popisující proudění tekutin

Základní rovnice pro popis proudění, jsou Navier – Stokesovy (N–S) rovnice, které lze zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z\end{aligned}$$

kde  $u$ ,  $v$ ,  $w$  jsou složky rychlosti,  $p$  je tlak,  $\rho$  je hustota,  $\nu$  je kinematická viskozita a  $f_{x,y,z}$  jsou složky vnější objemové síly. První člen rovnice popisuje zrychlení tekutiny, následující tři členy popisují konvektivní zrychlení tekutiny, první člen na pravé straně rovnice představuje gradient tlaku, další člen popisuje smykové napětí tekutiny důsledkem vazkosti. [12]

Další rovnice používaná pro popisování proudění tekutiny je rovnice kontinuity, která představuje zákon zachování hmotnosti. To znamená, že hmotnost tekutiny protékající kontrolním objemem je konstantní. V kontrolním objemu může dojít ke dvěma změnám hmotnosti, a to k lokální změně (stlačení, rozpínání) a konvektivní změně hmotnosti, následkem difference vstupující a vystupující hmotnosti z kontrolního objemu. [13] Rovnice kontinuity pro konstantní průřez a proměnné parametry má tvar

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

kde,  $u$ ,  $v$  a  $w$  jsou složky rychlosti. [12]

### 4.2 Možnosti matematického modelování proudění tekutin

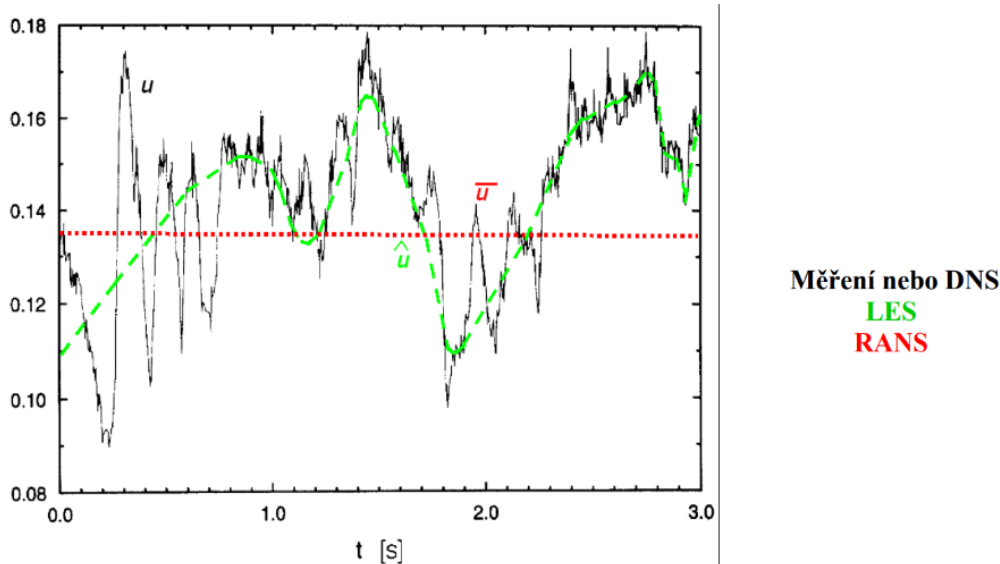
Úroveň matematického modelování turbulentního proudění je odvíjena od rozvoje matematiky a vývoje výpočetní techniky. Jelikož turbulentní proudění pro svou složitost není dosud zvládnutá problematika, je nutné v modelech používat zjednodušení. Všestranný model pro popis turbulence neexistuje, ale existují různé modely, které jsou vhodné pro různé aspekty úloh, přičemž tyto modely jsou důsledkem empirických poznatků. Pro numerické řešení proudění jsou používány tři odlišné přístupy, které jsou odvozené zjednodušením N–S rovnic. [12]

První je metoda přímé numerické simulace (DNS – Direct Numerical Simulation), která přímo řeší N–S rovnice bez jejich zjednodušení. Proto jsou u této metody vysoké nároky na kapacitu výpočetní techniky, která v současné době není dostačující. [12]

Další je metoda velkých vírů (LES – Large Eddy Simulation), která se zabývá velkými víry, které je možné popsat výpočetní sítí. Při správném nastavení je tato metoda řešitelná i se současnými počítači. [12]

Třetí je metoda středování N–S rovnic (RANS – Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations), která je typická pro řešení většiny inženýrských úloh. Jsou využívány statistické metody pro zjednodušení N–S rovnic. [12]

Rozdíl mezi řešením turbulentního proudění jednotlivými metodami je znázorněn na obrázku 12. [12]



Obr. 12: Metody řešení turbulentního proudění – převzato z [12]

### 4.3 Reinoldsovy rovnice

Při turbulentním proudění je jakákoliv fyzikální veličina náhodnou funkcí času, po aplikování statistických metod vzniká ale proudění stabilní. Je vytvářena průměrná hodnota v různých časech z různě dlouhé doby záznamu a vždy je výsledkem stejná hodnota. V každém okamžiku je kterákoliv veličina  $\zeta$  rozložena na střední hodnotu  $\bar{\zeta}$  a fluktuaci  $\zeta'$ . Tedy platí vztah

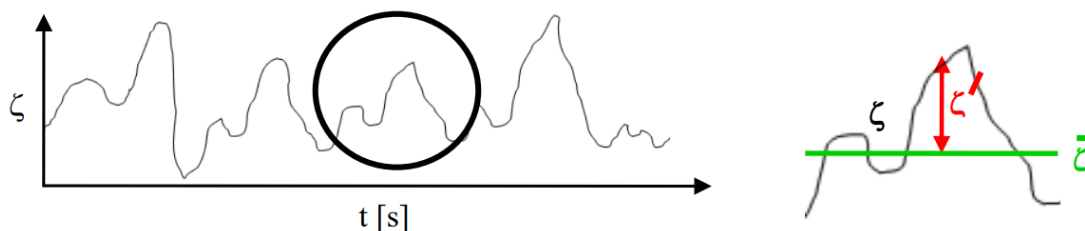
$$\zeta = \bar{\zeta} + \zeta'$$

Současně platí, že střední hodnota je aritmetickým průměrem v určitém časovém úseku  $T$  a střední hodnota fluktuací je nulová. Tedy platí vztahy

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{T} \int_0^T \zeta dt$$

$$\bar{\zeta'} = 0$$

Velichina, její střední hodnota a fluktuace jsou znázorněny na obrázku 13. [12]



Obr. 13: Velichina, její střední hodnota a fluktuace – převzato z [12]

#### 4.3.1 Aplikace středování na rovnici kontinuity a N–S rovnice

Aplikací středování na rovnici kontinuity vznikne středovaná rovnice kontinuity ve tvaru

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

Aplikací středování na N–S rovnice vzniknou středované N–S rovnice ve tvaru

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \cdot \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\overline{u'_i \cdot u'_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2(\bar{u}_i)}{\partial x_j^2} + \bar{f}_i$$

Středovaná rovnice kontinuity společně se středovanými N–S rovnicemi tvoří Reynoldsovy rovnice, které slouží k řešení turbulentního proudění. Vynásobením členu  $\overline{u'_i \cdot u'_j}$  hustotou vznikne tensor Reynoldsových napětí, který pro trojrozměrné úlohy má tvar

$$\tau_{ij} = \rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u' \cdot u'} & \overline{u' \cdot v'} & \overline{u' \cdot w'} \\ \overline{v' \cdot u'} & \overline{v' \cdot v'} & \overline{v' \cdot w'} \\ \overline{w' \cdot u'} & \overline{w' \cdot v'} & \overline{w' \cdot w'} \end{bmatrix}$$

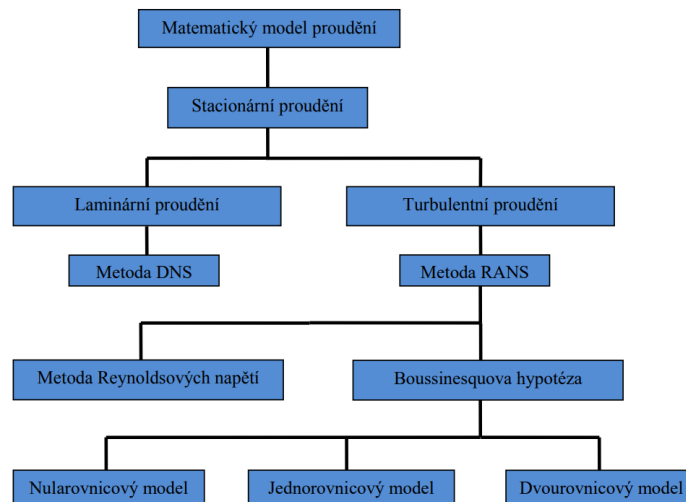
Jelikož platí, že

$$\begin{aligned} \overline{v' \cdot u'} &= \overline{u' \cdot v'} \\ \overline{w' \cdot u'} &= \overline{u' \cdot w'} \\ \overline{w' \cdot v'} &= \overline{v' \cdot w'} \end{aligned}$$

tak tensor je symetrický podle hlavní diagonály. [12]

#### 4.4 Modely turbulence pro stacionární proudění

Přítomnost Reynoldsova napětí ve středovaných N–S rovnicích je hlavním problémem při modelování turbulence. Systém matematických rovnic není, tak jako tomu je u laminárního proudění uzavřen, ale tvoří neuzavřený systém rovnic. Pohybové rovnice společně s přídatnými rovnicemi a empirickými vztahy tvoří model turbulence. Tyto modely lze rozdělit do několika kategorií viz. obrázek 14. [12]



Obr. 14: Metody matematického modelování stacionárního proudění – převzato z [12]

#### 4.4.1 Boussinesquova hypotéza

Řada turbulentních modelů je založena na Boussinesquově hypotéze, která uvažuje, že při dvourozměrném proudění platí Newtonův vztah

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

kde  $\tau$  je smykové napětí a  $\eta$  je dynamická viskozita. Hypotéza tedy tenzor smykových napětí nahrazuje Newtonovým vztahem. Potom dvě turbulentní napětí lze nahradit jednou veličinou – turbulentní viskozitou, která je dle vztahu

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' \cdot u_j'} = \tau_t = \eta_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

kde  $\tau_t$  je turbulentní napětí a  $\eta_t$  je turbulentní vazkost. Rovnici lze upravit do tvaru

$$= -\overline{\rho u_i' \cdot u_j'} = \eta_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_j' \cdot u_j'}$$

kde  $k$  je turbulentní kinetická energie. Aplikací této hypotézy na Reynoldsovy rovnice je možné je zjednodušit.

Boussinesquova hypotéza  $\frac{\partial(\overline{u_i' \cdot u_j'})}{\partial x_j} = \nu_t \frac{\partial^2(\bar{u}_i)}{\partial x_j^2}$

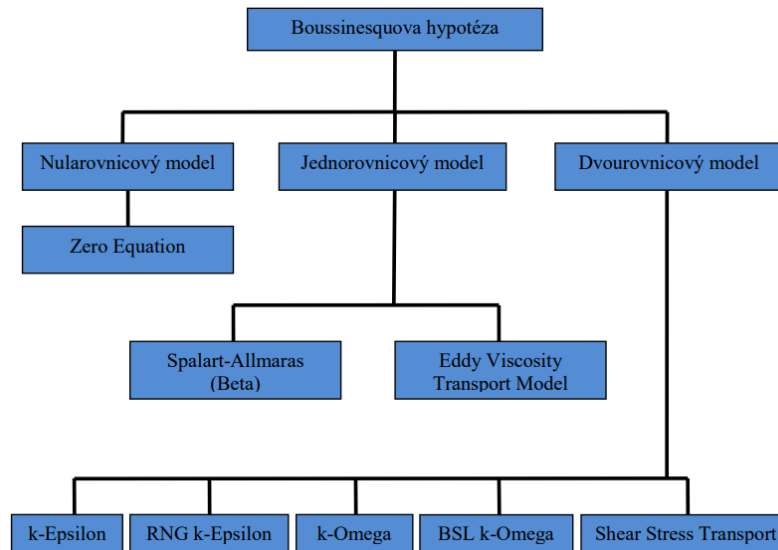
$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \cdot \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2(\bar{u}_i)}{\partial x_j^2} + \nu_t \frac{\partial^2(\bar{u}_i)}{\partial x_j^2} + \bar{f}_i$$

kde  $\nu_t$  je turbulentní kinematická viskozita. Touto úpravou je nahrazen tenzor Reynoldsových napětí a jedinou neznámou je turbulentní viskozita. Turbulentní viskozita není závislá na druhu tekutiny, ale je vlastností proudění. [12]

V závislosti na počtu diferenciálních rovnic, které definují turbulentní viskozitu rozeznává Boussinesquova hypotéza tři modely turbulence:

- Nularovnicový model – řeší turbulentní viskozitu pomocí jedné algebraické rovnice
- Jednorovnicový model – řeší turbulentní viskozitu pomocí jedné diferenciální rovnice
- Dvourovnicový model – řeší turbulentní viskozitu s využitím dvou diferenciálních rovnic [12]

Typy turbulentních modelů založených na Boussinesquově hypotéze v programu Ansys fluent jsou uvedené na obrázku 15. [12]



Obr. 15: Typy turbulentních modelů založených na Boussinesquově hypotéze v programu Ansys fluent – převzato z [12]

Nularovnicové a jednorovnicové modely nejsou v současné době moc používány, protože současná výpočetní technika zvládá řešit i dvourovnicové modely. [12] Z uvedených modelů na obrázku 15 mezi nejpoužívanější pro simulování turbulentního proudění patří modely k-epsilon a k-omega. [14]

#### 4.4.2 Metoda Reynoldsových napětí

Model založený na Reynoldsových napětí modeluje proudění tekutiny s nižším množstvím zjednodušení, oproti modelu založenému na turbulentní vazkosti, ale zato doba výpočtu je násobně delší. Tento model se tak využívá jen pro složité a komplexní úlohy. [12]

## 5 Modely k popisu turbulence

Jednou z firem, která nabízí software pro simulaci proudění tekutin, je společnost Ansys. Jejich produkty-Ansys computational fluid dynamics (CFD) jsou v inženýrské praxi hojně využívány, zejména pro jejich výpočetní výkon a přesnost výsledků. Výrobce disponuje softwary Ansys Fluent nebo Ansys CFX. [15]

V softwaru Ansys Fluent je na výběr z několika modelů pro modelování proudění, pro řešení obvyklých úloh je nejpoužívanější primárně model SST k-omega (Shear Stress Transport), případně model k-epsilon. [14]

Model SST k-omega je modifikovaný základní model k-omega. Základní model k-omega je dvourovnicový model, a řeší tedy turbulentní viskozitu prostřednictvím dvou diferenciálních rovnic. Rychlostní měřítko turbulence je zprostředkováno pomocí turbulentní kinetické energie  $k$ . Pro délkové měřítko je zavedena nová veličina určující rotaci kapaliny v daném bodě proudového pole – vířivost  $[\text{s}^{-1}]$ . Turbulentní kinetickou energii řeší rovnice

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma^* v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

vířivost je řešena pomocí diferenciální rovnice

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

kde  $\beta^*$ ,  $\sigma^*$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\sigma$  jsou empirické konstanty. Turbulentní viskozita je určena vztahem

$$v_t = \frac{k}{\omega}$$

Rychlost disipace se určí podle rovnice

$$\varepsilon = \beta^* \omega k$$

kde  $\varepsilon$  je rychlost disipace a  $\omega$  je vířivost. Takovýto model pro popis turbulence je vhodný pro proudění s malými Reynoldsovými čísly a pro přechodový typ proudění, kde turbulence není zcela vyvinutá. Výsledky modelu jsou přesné v blízkosti stěn, ale méně přesné ve volném proudu. [12]

Modifikovaný model SST k-omega obsahuje modifikovanou diferenciální rovnici pro vířivost. Rovnice má pak nový člen se složitými empirickými algebraickými vztahy. Tento model je vhodný pro aplikace, kde dochází ke značnému smykovému napětí v tekutině, kde je zapotřebí přesně určit místo odtržení a velikost zavířené oblasti. [12]

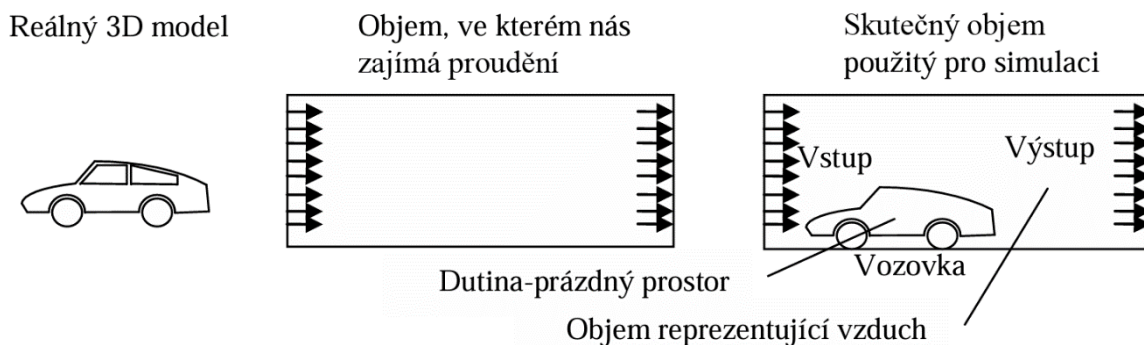
## 6 Dílčí fáze k popisu proudění pomocí CFD

K obdržení výsledků proudění z CFD softwaru je zapotřebí uskutečnit několik na sebe navazujících kroků (fází). Těmi jsou vytvoření geometrie (výpočtového modelu) pro CFD simulaci, vytvoření výpočetní sítě, nastavení parametrů samotné simulace a vyhodnocení CFD simulace. [17]

### 6.1 Geometrie

Pojem geometrie označuje výpočtový objem, kterým protéká zkoumaná tekutina. Takovýto objem je ohraničený stěnami (reálnými nebo zanedbatelně tenkými) a dále plochami pro vstup a výstup tekutiny. Nejedná se tedy o objem reálného modelu, kolem kterého je proudění zjišťováno, ale o objem tekutiny kolem reálného modelu. [12]

Princip vzniku geometrie je zobrazen na obrázku 16. Reálným modelem, kolem kterého je zjišťováno proudění, je model automobilu. Objem, ve kterém je zkoumáno proudění, je ohraničen stěnami (zdola a shora) a plochami pro vstup a výstup tekutiny (šipky symbolizují směr proudění), zkoumanou tekutinou je vzduch. Skutečný objem pro simulaci je potom zkoumaný objem, ve kterém je dutina (prázdný prostor) reprezentovaný obvodem konstrukčního modelu (stěnami konstrukčního modelu). [12]



Obr. 16: Princip vzniku geometrie – převzato z [12]

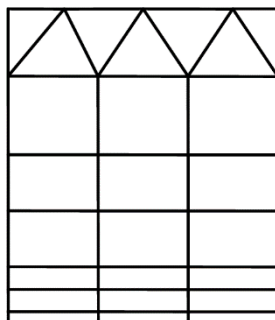
Reálný konstrukční model může obsahovat různé tvarové detaily, jako malá sražení hran, zaoblení nebo malá tělesa, které mají nevýznamný vliv na proudění. Proto je možné při tvorbě geometrie tyto tvarové detaily v modelu zanedbat. Míra zjednodušení geometrie ale negativně ovlivňuje přesnost simulace. [12]

### 6.2 Výpočetní síť

Při výpočtu je nutné řešit diferenciální rovnice na dané oblasti. Oblast je v tomto případě reprezentována objemem proudící tekutiny a povrch objemu tvoří plochy, které reprezentují vstup a výstup tekutiny. Oblast je spojitá a je tvořena body o nekonečném počtu, jelikož systém rovnic pro turbulentní proudění nelze řešit analyticky, je nutné použít numerickou matematiku. Principem metody CFD je rozdělit oblast na konečně velké objemy a numericky řešit diferenciální, algebraické či empirické rovnice ve středech těchto konečných objemů. Metoda dělení oblasti na konečně velké objemy se nazývá síťování. Výpočetní síť je možné tvořit z mnoha druhů elementů. Použití typu elementu se odvíjí od typu úlohy a složitosti geometrie. Kvalita vytvořené sítě je dána zkušeností a citem řešitele, nejedná se tak pouze o znalosti v této problematice. Rozlišují se dva základní druhy sítí, strukturovaná síť a nestrukturovaná síť. [12]

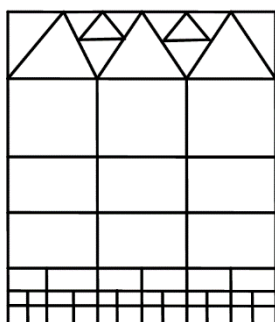


Ve strukturované síti musí hranice prvku (elementu) sousedit pouze s jednou hranicí jiného prvku. Z tohoto pravidla vyplývá, že míra zhuštění sítě je omezená. Příklad takovéto sítě je zobrazen na obrázku 17. [12]



Obr. 17: Strukturovaná výpočetní síť – převzato z [12]

V nestrukturované síti může hranice prvku sousedit s více hranicemi sousedních prvků. Je tak možné vytvořit hustší síť pouze v některých oblastech sítě. Je možné detailněji řešit pouze důležitá místa, a není tak potřeba velmi husté sítě v celé výpočetní oblasti, to má za následek snížení nároků na kapacitu výpočetní techniky. Příklad takovéto sítě je zobrazen na obrázku 18. [12]



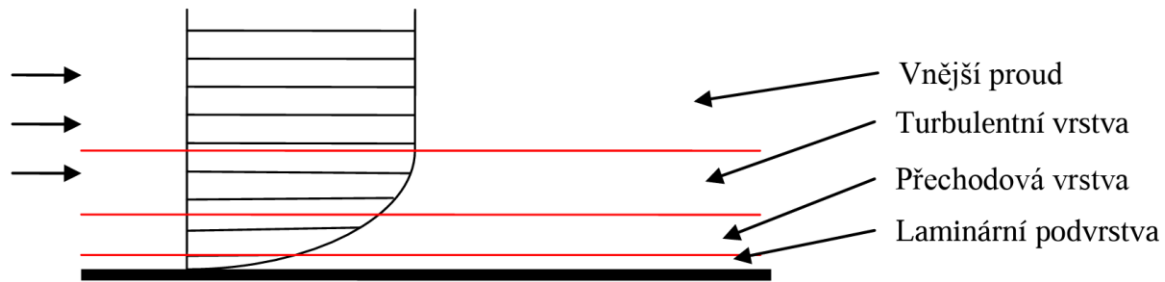
Obr. 18: Nestrukturovaná výpočetní síť – převzato z [12]

Podle rozsahu použitých elementů lze rozlišovat síť uniformní, která obsahuje jenom elementy téhož typu a hybridní, která obsahuje více typů elementů. [12]

### 6.2.1 Mezní vrstva

Při modelování proudění reálné tekutiny je nutné uvažovat mezní vrstvu, tedy oblast tekutiny v blízkosti pevné stěny, jejíž proudění je ovlivněno důsledkem vazkosti. Rychlost proudění tekutiny na stěně je nulová a s rostoucí vzdáleností od stěny rychlost proudění roste, při velké vzdálenosti od stěny je rychlost totožná s průměrnou rychlostí. V blízkém okolí stěny je veliký gradient rychlosti a ostatních skalárních veličin, proto je v této oblasti následkem smykových napětí produkována turbulentní kinetická energie. [12]

Mezní vrstva je složená ze tří vrstev. První vrstva, která přímo sousedí s pevnou stěnou, je označována jako viskózní (laminární) podvrstva, proudění v této vrstvě je laminární, hlavní vliv na proudění má molekulární vazkost. Vrstva nejvzdálenější od stěny je označována jako plně turbulentní. Mezi těmito vrstvami je přechodová (logaritmická) vrstva, ve které je rovnocenný podíl uplatnění viskozity a turbulence. Mezní vrstva s jednotlivými vrstvami je znázorněna na obrázku 19. Při simulování proudění je žádoucí zohlednit vliv mezní vrstvy na proudění, proto je nutné výpočetní síť v blízkosti stěny zahustit, to znamená zjemnit elementy. [12]



Obr. 19: Mezní vrstva – převzato z [12]

### 6.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky definují plochy, které ohraničují výpočtovou oblast. Je používáno pět typů okrajových podmínek, a to vstupní, výstupní, stěnová, symetrická a periodická okrajová podmínka. [12]

#### 6.3.1 Vstupní okrajová podmínka

Vstupní okrajová podmínka (INLET) označuje plochy, kterými do výpočtové oblasti vstupuje tekutina. Podle veličiny definované na vstupu je rozlišováno několik typů této podmínky.

- Rychlost kolmá k rovině vstupu
- Střední hodnota rychlosti a směrový vektor
- Tři složky rychlosti
- Hmotnostní tok se směrovým vektorem
- Dynamický tlak a směrový vektor proudění tekutiny
- Statický tlak a směrový vektor proudění tekutiny [12]

V případě turbulentního proudění je vždy nezbytné definovat turbulentní veličiny. Turbulenci proudění je možné definovat několika parametry.

- Intenzita turbulence [%]
- Intenzita turbulence a poměr turbulentní a molekulové vazkosti
- Hodnoty turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace
- Intenzita turbulence a délkové měřítko turbulence
- Nulový gradient [12]

#### 6.3.2 Výstupní okrajová podmínka

Výstupní okrajová podmínka (OUTLET) definuje plochy, kterými tekutina odchází z výpočtové oblasti. Podle veličiny definované na výstupu je rozlišováno několik typů této podmínky.

- Statický tlak
- Průměrný statický tlak
- Rychlost kolmá k rovině vstupu
- Střední hodnota rychlosti a směrový vektor
- Tři složky rychlosti
- Hmotnostní tok se směrovým vektorem

U výstupní okrajové podmínky nejsou definovány parametry turbulentního proudění. [12]

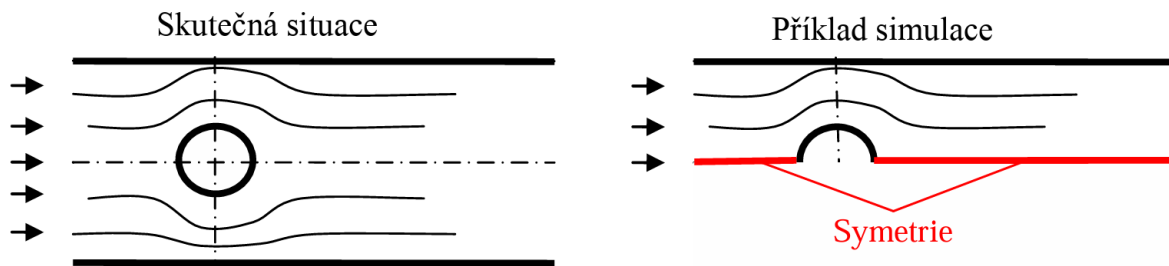
### 6.3.3 Stěnová okrajová podmínka

Stěnová okrajová podmínka (WALL) definuje plochy, přes které nemůže tekutina protékat a jsou tak dokonale nepropustné. Jsou dva druhy stěnové okrajové podmínky, a to tenká stěna, jejíž tloušťka se zanedbává, a tlustá stěna, která má reálné rozměry. Na stěně dochází k ulpívání tekutiny a rychlost proudění na stěně je tedy nulová. Lze definovat drsnost stěny, popřípadě smykové síly na stěně, lze tak rozlišit několik druhů pevné stěny.

- Ideálně hladká stěna
- Drsná stěna
- Stěna bez tření (tekutina na ní neulpívá) - SLIP
- Zadané smykové napětí [12]

### 6.3.4 Symetrická okrajová podmínka

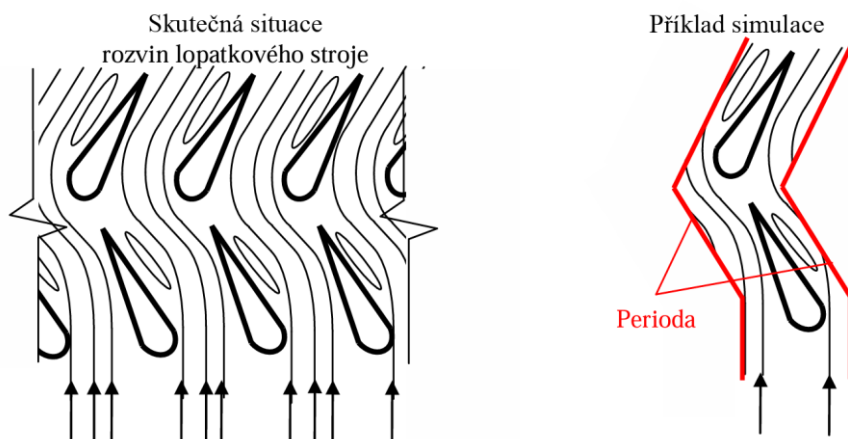
Symetrická okrajová podmínka (SYMMETRY) definuje stěnu, která představuje dělicí rovinu v případě, že úloha je symetrická podle nějaké roviny. Potom není nutné řešit celou oblast, ale jen polovinu (čtvrtinu). Při použití této podmínky jsou veškeré gradienty na stěně nulové a nelze na ní určovat žádné fyzikální veličiny. Použití takovéto okrajové podmínky je znázorněno na obrázku 20. [12]



Obr. 20: Symetrická okrajová podmínka – převzato z [12]

### 6.3.5 Periodická okrajová podmínka

Periodická okrajová podmínka (PERIODIC INTERFACE) se používá při řešení úloh, kde se proudové pole periodicky opakuje. Je tvořena totožnými plochami v páru a může být rotační nebo translační. Příklad takovéto okrajové podmínky je znázorněn na obrázku 21. [12]



Obr. 21: Periodická okrajová podmínka – převzato z [12]

## 7 Fáze numerické simulace a ověření správnosti řešení

Numerická simulace je složená ze tří fází, kterými jsou preprocessing, processing a postprocessing. [12] Po provedení simulace je žádoucí zařadit ověření správnosti řešení ve formě verifikace a validace. [18]

### Preprocessing

V této fázi je zhotovena geometrie, včetně její úpravy a zjednodušení. Tato fáze rovněž zahrnuje tvorbu výpočetní sítě. [12]

### Processing

V tomto kroku je simulace definována, jsou definovány okrajové podmínky a parametry simulace. Do této fáze patří také řešení samotné úlohy. [12]

### Postprocessing

Poslední fází numerické simulace je analýza řešení. V tomto kroku jsou tvořeny grafické výstupy a získávány hodnoty důležitých parametrů. [12]

### Verifikace

Verifikace je označení pro ověření správnosti řešení z hlediska matematiky. Jedná se o kontrolu správné programovací a výpočetní realizace konceptuálního modelu, ověření chyb výpočtového programování a vhodnost použitého matematického modelu. [18]

### Validace

Validace porovnává výsledky řešení simulace s fyzikální realitou. Také porovnává správnost modelů pomocí srovnání s výsledky experimentálního měření. Proto je vhodné výsledky CFD numerické simulace ověřit provedením experimentu nebo porovnáním výsledků simulace s již ověřenými výsledky. [18]

## 8 CFD výpočet difuzoru tunelové větrné turbíny

V praktické části bakalářské práce je prováděna simulace proudění kolem různých difuzorů pomocí metody CFD a následně jsou vyhodnoceny výsledky simulace a stanovuje se vhodnost daného difuzoru k použití do tunelové větrné turbíny. K ověření výsledků simulace z hlediska souladu s fyzikální realitou je nutné výsledky validovat. Jelikož součástí této práce není provedení experimentu, tak jsou k validaci použity výsledky ze studií, které se zabývaly experimentálním měřením proudění kolem difuzorů tunelové větrné turbíny.

Proudění je zkoumáno kolem dvou typů difuzorů. Prvním typem je kuželový difuzor zakončený přírubou, druhým typem je difuzor s profilem ve tvaru křídla.

Při simulaci jsou uvažována určitá zjednodušení, jako řešení dvourozměrné axisymetrické úlohy a řešení proudění kolem difuzoru bez turbíny. Reálný difuzor je trojrozměrné těleso a turbulentní proudění kolem takového difuzoru je rovněž prostorové. Simulace proudění prováděné v této práci jsou ale dvourozměrné. Ačkoliv výsledky dvourozměrné úlohy popisují proudění méně detailně v porovnání s úlohami trojrozměrnými, tak pro prvotní zkoumání proudění kolem difuzoru je dvourozměrná úloha dostačující. Zkoumané difuzory jsou součástí rotačního tvaru, úlohu tedy lze řešit jako symetrickou podle osy symetrie procházející osou difuzoru. Osově symetrická úloha se tak zabývá jen jednou polovinou nad nebo pod osou symetrie. Tím je docíleno zmenšení výpočtové oblasti, a jsou tak sníženy nároky na kapacitu výpočetní techniky a docílí se i zkrácení doby výpočtu. Proudění je zkoumáno uvnitř a vně prázdného difuzoru, to znamená, že v řešení není uvažován rotor (větrná turbína), ale pouze samotný difuzor.

Jelikož hlavní funkcí difuzoru v tunelové větrné turbíně je zvýšení rychlosti proudění na vstupní straně difuzoru, tak hlavním předmětem zkoumání je především rychlost proudění. Změna rychlosti proudění je spojena se změnou tlaku, proto další, ne tak detailně zkoumanou charakteristikou, je dynamický tlak. Posledními zkoumanými charakteristikami je odporová síla a součinitel odporu.

Veškeré CFD simulace prováděné v této práci jsou zhotovovány v programu ANSYS WORKBENCH. A z něj jsou otvírány všechny potřebné programy, kterými jsou DESIGN MODELER, ANSYS MESHING a ANSYS FLUENT. V programu DESIGN MODELER je vytvářena geometrie úlohy a jsou zde definovány okrajové podmínky. Program ANSYS MESHING slouží pro tvorbu výpočetní sítě. V programu ANSYS FLUENT jsou definovány počáteční podmínky a veškeré potřebné parametry pro spuštění simulace, v tomto programu probíhá také samotný výpočet simulace i vyhodnocení výsledků.

## 9 Specifikování CFD úlohy pro kuželový difuzor zakončený přírubou

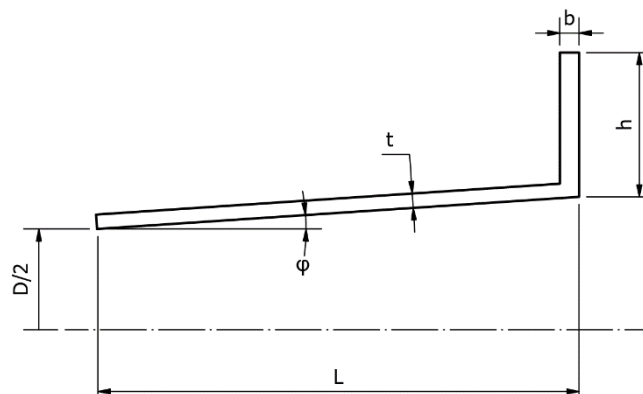
Před spuštěním simulace je zapotřebí navrhnout, případně určit všechny parametry, které jsou pro výpočet potřebné. Mezi tyto parametry patří geometrie, okrajové a počáteční podmínky a výpočetní síť.

### 9.1 Návrh geometrie

Je zapotřebí stanovit výpočtový objem, kterým proudí vzduch. Jelikož vzduch proudí uvnitř i vně difuzoru, tak je nutné určit nejen rozměry samotného difuzoru, ale také rozměry oblasti, ve které je proudění zkoumáno.

#### 9.1.1 Rozměry difuzoru

Pod pojmem rozměry difuzoru jsou myšlené délkové a úhlové rozměry reálného modelu difuzoru. Hlavními rozměry difuzoru, které mají vliv na funkci, jsou vstupní průměr difuzoru  $D$ , úhel rozevření difuzoru  $\varphi$ , délka difuzoru  $L$ , a výška příruby  $h$ . Další rozměry potřebné pro vymodelování difuzoru jsou tloušťka stěny difuzoru  $t$  a tloušťka příruby  $b$ . Difuzor s těmito rozměry je znázorněn na obrázku 22.



Obr. 22: Délkové a úhlové rozměry kuželového difuzoru zakončeného přírubou – upraveno na základě [7]

Číselné hodnoty pro  $D$ ,  $\varphi$ ,  $L$ ,  $h$  jsou voleny v souladu se studií ABE, Ken-ichi a OHYA, Yuji. *An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD* [7]. Číselné rozměry pro  $t$ ,  $b$  jsou voleny v souladu se studií MAFTOUNI, N. a TAGHADDOSI, M. *A CFD study of a flanged shrouded wind turbine: Effects of different flange surface types on output power* [19].

Jsou zkoumány čtyři varianty difuzoru, které se liší pouze ve výškách příruby. Všechny čtyři varianty mají vstupní průměr do difuzoru  $D = 200$  mm, úhel rozevření difuzoru  $\varphi = 4^\circ$ , délku difuzoru  $L = 300$  mm, tloušťku stěny difuzoru  $t = 2$  mm a tloušťku příruby  $b = 4$  mm. Výška příruby pro různé varianty difuzoru je vyjádřena v bezrozměrovém tvaru prostřednictvím vstupního průměru difuzoru  $D$  jako  $h/D$ . Tento parametr nabývá hodnot  $h/D = 0; 0,125; 0,25; 0,5$ . Číselné rozměry těchto čtyř variant difuzorů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Rozměry kuželového difuzoru zakončeného přírubou

Rozměr	Zkoumané varianty difuzoru			
	$h/D = 0$	$h/D = 0,125$	$h/D = 0,25$	$h/D = 0,5$
$h$ [mm]	0	25	50	100
$D$ [mm]	200			
$L$ [mm]	300			
$\varphi$ [°]	4			
$t$ [mm]	2			
$b$ [mm]	4			

### 9.1.2 Rozměry zkoumané oblasti

Rozměry zkoumané oblasti opět vychází ze studie ABE, Ken-ichi a OHYA, Yuji. *An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD* [7]. Rozměry zkoumané oblasti jsou zvoleny na základě aerodynamického tunelu, který byl použit při experimentálním měření. Tento tunel má šířku 3,6 metru, výšku 2 metry, délku 15 metrů a maximální rychlost proudění vzduchu je 30 m/s. Při experimentu byl model difuzoru zavěšen pomocí provázku do středu měřicí oblasti aerodynamického tunelu. [7]

### 9.1.3 Výsledná geometrie

Výsledná geometrie vznikne umístěním difuzoru do zkoumané oblasti. Je zapotřebí určit, kde ve zkoumané oblasti má být difuzor umístěn. I v tomto případě je vycházeno ze studie ABE, Ken-ichi a OHYA, Yuji. *An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD* [7]. Jelikož před difuzorem není proudění nijak ovlivňováno, lze difuzor umístit blíže k ploše, kudy do oblasti vstupuje tekutina. Naopak za difuzorem je proudění silně ovlivněno, a proto za difuzorem je žádoucí nechat větší prostor. Je důležité si uvědomit, že geometrie je označení pro výpočtový objem zkoumané tekutiny, tedy difuzor je v geometrii zastoupen dutinou (prázdným prostorem) ohraničenou stěnami difuzoru. Výsledná geometrie pro CFD simulaci je znázorněna na obrázku 23, rozměry geometrie jsou vyjádřeny pomocí vstupního průměru difuzoru  $D$ . Na obrázku 23 je rovněž znázorněn souřadnicový systém  $x, y$ . Počátek souřadnicového systému je umístěn do osy symetrie na úroveň vstupního průměru difuzoru. Kladný směr osy  $x$  je orientován ve směru proudění vzduchu, kladný směr osy  $y$  je orientován kolmo na osu symetrie směrem do výpočtové oblasti. Stejná geometrie je použita při řešení všech čtyř variant difuzoru.

## 9.2 Okrajové podmínky

Při určování okrajových podmínek jsou plochám, které ohraničují výpočtovou oblast definované vlastnosti. Použité okrajové podmínky jsou vyobrazeny na obrázku 23. Jedná se o podmínku INLET, OUTLET, SLIP, AXISYMMETRY a WALL.

### 9.2.1 INLET

Okrajová podmínka INLET je umístěna na levé vertikální ploše, kudy do oblasti vstupuje proudící vzduch. Směr proudění je znázorněn pomocí sloupce horizontálních šipek.

## 9.2.2 OUTLET

Okrajová podmínka OUTLET je umístěna na pravé vertikální ploše, kudy z oblasti vystupuje proudící vzduch. Směr výstupu vzduchu z oblasti je shodný se směrem vstupu vzduchu do oblasti.

## 9.2.3 SLIP

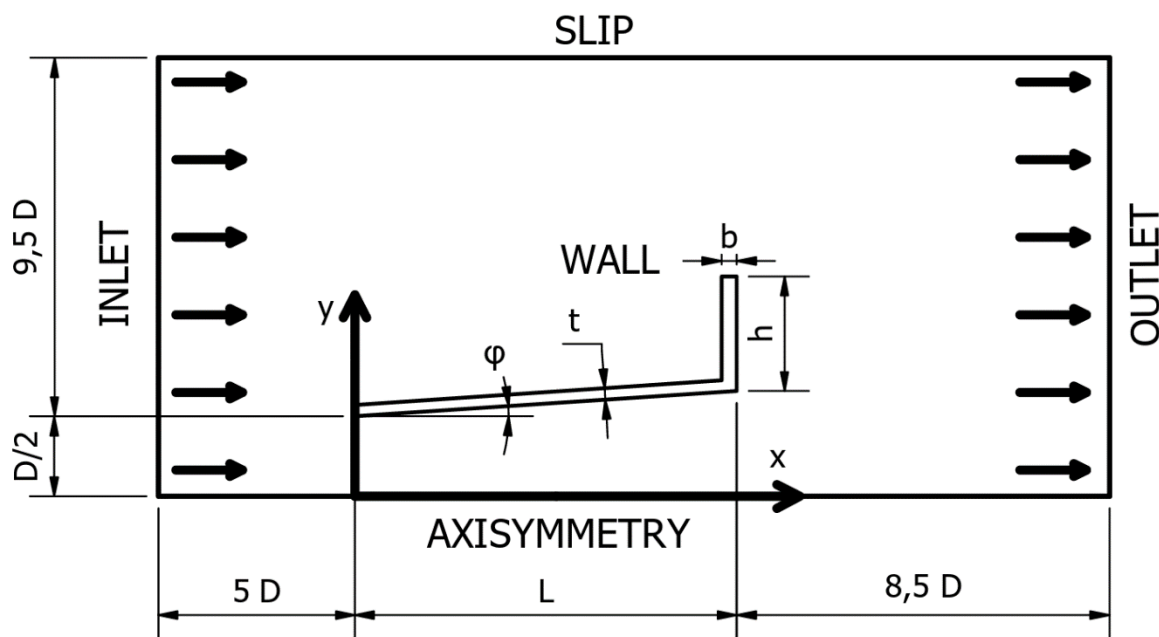
Okrajová podmínka SLIP je umístěna na horní horizontální ploše, která vymezuje výpočtovou oblast. Jedná se o stěnovou okrajovou podmínku, na které tekutina nemůže ulpívat. Nevzniká tedy mezní vrstva a proudění tak není ovlivněno přítomností této stěny.

## 9.2.4 AXISYMMETRY

Okrajová podmínka AXISYMMETRY je umístěna na dolní horizontální ploše, která reprezentuje osu symetrie oblasti. Nejedná se o stěnovou okrajovou podmínku a proudění tak není ovlivněno přítomností této stěny.

## 9.2.5 WALL

Okrajová podmínka WALL je umístěna na dutině, která je reprezentována stěnami difuzoru. Při aplikování této podmínky dochází k ulpívání tekutiny na stěně. Vzniká tedy mezní vrstva a proudění je tak ovlivněno přítomností této stěny.



Obr. 23: Geometrie výpočtové oblasti s okrajovými podmínkami – upraveno na základě [7]

## 9.3 Počáteční podmínky

Počáteční podmínka je definovaná pouze pro vstupující proud vzduchu. Jedná se o rychlost proudícího vzduchu  $U_0 = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , s počáteční turbulencí ve výši 3 %.

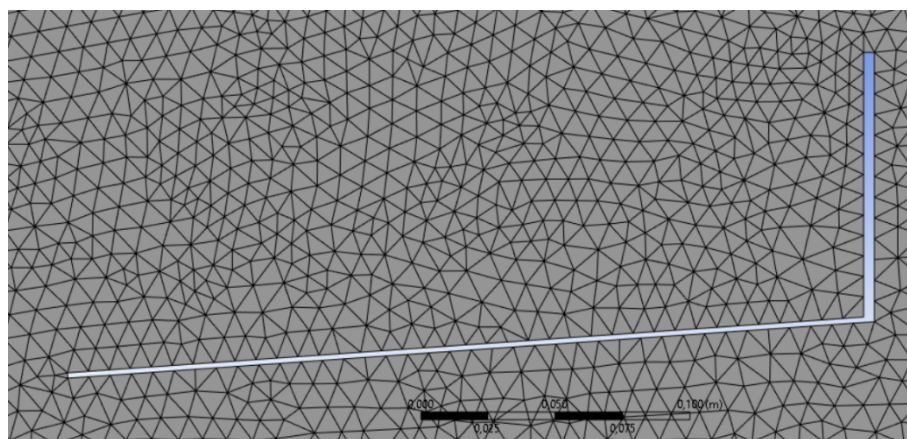
## 9.4 Síťování

Je zapotřebí navrhnout síť, na které probíhá výpočet. To zahrnuje volbu typu sítě, volbu tvaru elementu sítě a volbu velikosti elementů sítě. Síť musí být navržena tak, aby výsledky



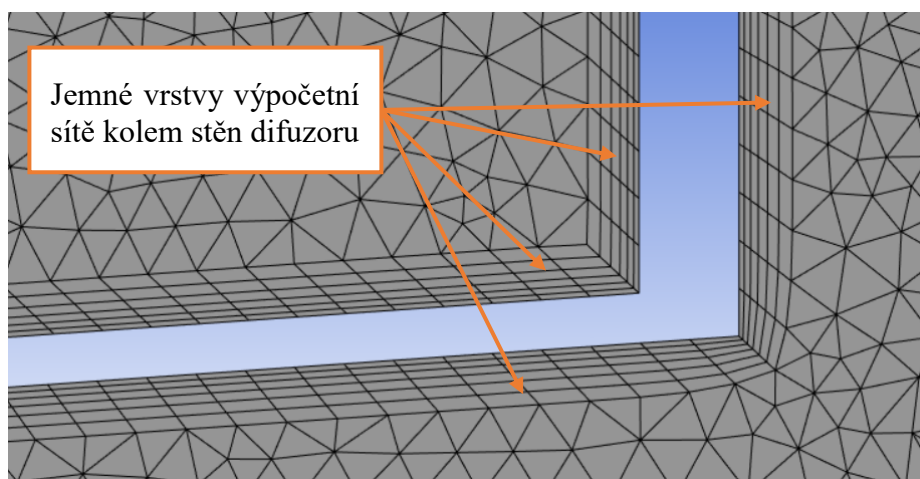
simulace byly co nejpřesnější, ale zároveň tak, aby výpočet nebyl příliš náročný pro výpočetní techniku. Proudění je nejvíce ovlivněno uvnitř difuzoru a kolem vnějších stěn difuzoru. S rostoucí vzdáleností od vnějších stěn difuzoru se dopad na proudění, způsobený difuzorem, snižuje. Proto je vhodné výpočetní síť uvnitř a okolo difuzoru vytvořit jemnější, a naopak ve větších vzdálenostech od difuzoru síť může být jemná méně. Tvorba sítě je rozdělena do tří kroků.

Prvním krokem je tvorba základní (hrubší) sítě, na tu je použita strukturovaná síť s trojúhelníkovými elementy o velikosti elementu 8 mm. Tato síť je zobrazena na obrázku 24.



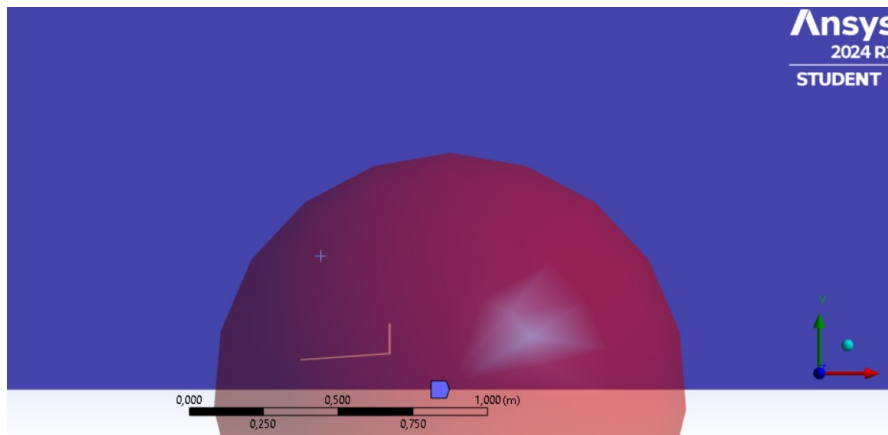
Obr. 24: Základní výpočetní síť

Druhým krokem je vytvoření několika souvislých vrstev sítě kolem stěn difuzoru. To vede k detailnějšímu modelování mezní vrstvy na stěnách difuzoru, a tedy i k přesnějším výsledkům simulace. Tyto vrstvy jemné sítě kolem stěn difuzoru jsou zobrazeny na obrázku 25, přičemž počet vrstev je nastaven na 6.



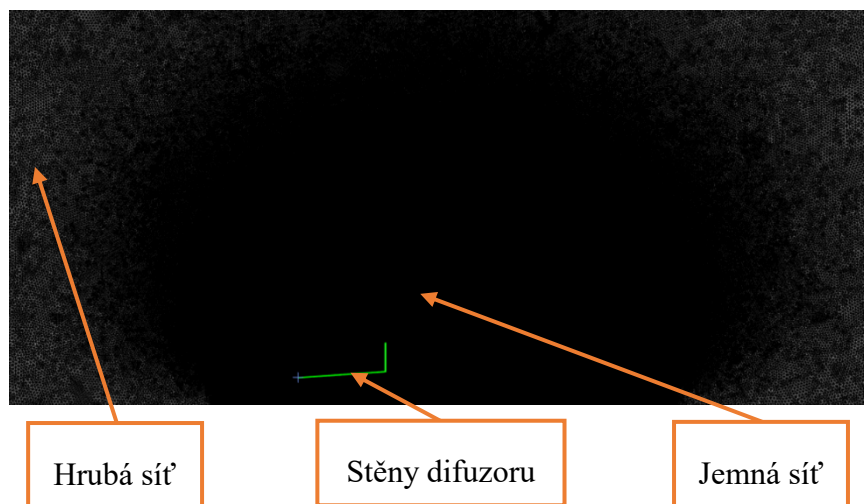
Obr. 25: Jemné vrstvy výpočetní sítě kolem stěn difuzoru

Třetím krokem je zjemnění sítě v okolí difuzoru. Kolem difuzoru je vytvořena jemnější síť ve tvaru kruhové plochy. Souřadnice  $y$  středu kruhové plochy je umístěna do osy symetrie úlohy, tedy vůči souřadnému systému úlohy je tato souřadnice nulová. Souřadnice  $x$  středu kruhové plochy je umístěna do vzdálenosti 500 mm vůči souřadnému systému úlohy. Poloměr kruhové plochy je nastaven na 800 mm. Tato kruhová plocha je zobrazena na obrázku 26. Velikost elementů v této kruhové ploše je nastavena na 2 mm.



Obr. 26: Kruhová plocha výpočetní sítě

Výsledná síť je zobrazena na obrázku 27, kde je možné pozorovat jemnou síť ve tvaru kruhové plochy umístěnou okolo difuzoru a pak hrubší základní síť, která tvoří zbytek výpočtové oblasti.



Obr. 27: Výsledná výpočetní síť

Jelikož každý difuzor má jinou výšku příruby, tak i každá výpočetní síť má jiný počet elementů. Počet elementů výpočetní sítě všech čtyř variant přírubového difuzoru je zobrazen v tabulce 2.

Tab. 2: Počet elementů výpočetní sítě

Varianta difuzoru	Počet elementů výpočetní sítě
$h/D = 0$	840420
$h/D = 0,125$	843315
$h/D = 0,25$	833197
$h/D = 0,5$	835715

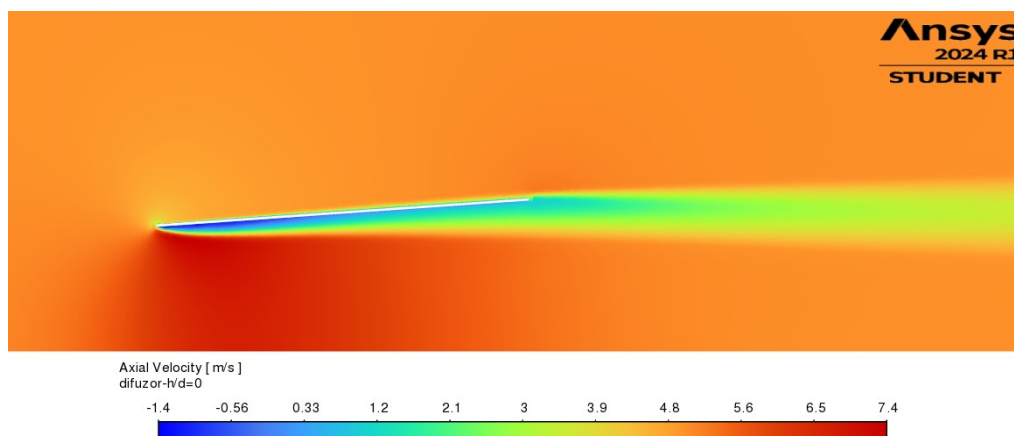
## 10 CFD výpočet kuželového difuzoru zakončeného přírubou

Tato kapitola se již zaměřuje na vyhodnocení CFD simulace proudění kolem kuželových difuzorů zakončených přírubou a také na validaci získaných výsledků. Celkem je simulováno proudění kolem čtyř variant kuželového difuzoru, jednoho difuzoru bez příruby a tří difuzorů s odlišnými výškami přírub.

### 10.1 Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0$

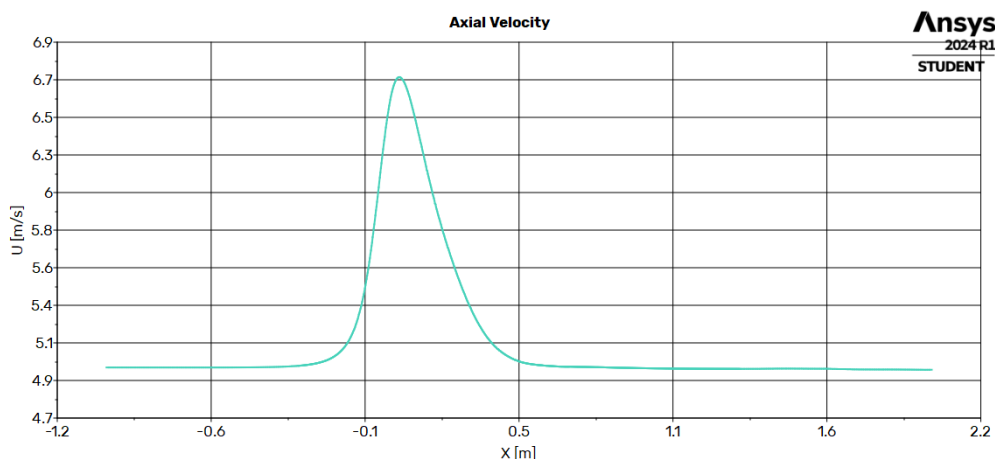
Simulace proudění kolem difuzoru s výškou příruby rovno nule, tedy difuzoru bez příruby, je prováděna proto, aby na základě těchto výsledků mohl být pozorován vliv přítomnosti příruby na rychlost proudění.

Grafické vyobrazení rychlosti proudění kolem tohoto difuzoru je zobrazeno na obrázku 28. Znázornění rychlosti je provedeno pomocí různých barev, přičemž ve spodní části obrázku je legenda, která danému odstínu barvy přiřazuje rychlost. Na tomto obrázku lze pozorovat vliv přítomnosti difuzoru na rychlost proudění. Je patrné, že na vstupní straně difuzoru dojde ke značnému zvýšení rychlosti proudění. Naopak na vnitřní straně difuzoru a za difuzorem dochází k výraznému snížení rychlosti proudění.



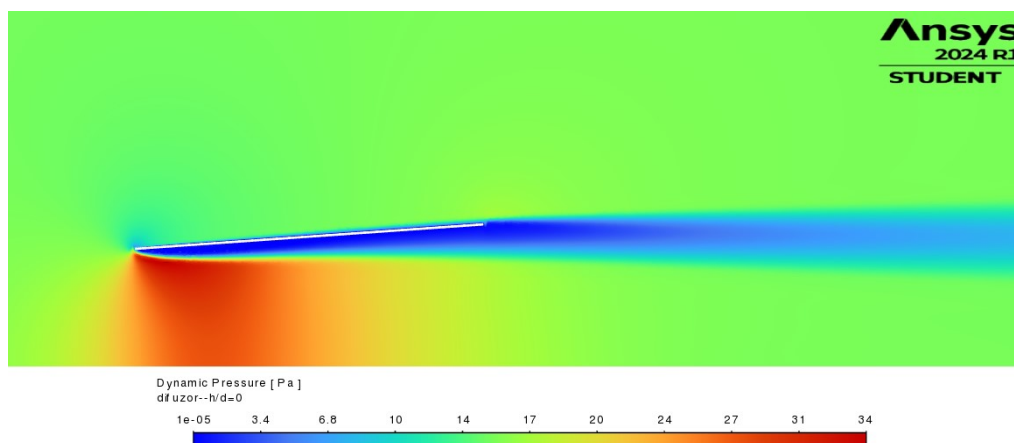
Obr. 28: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor  $h/D = 0$

Pro konkrétní číselné hodnoty rychlosti proudění je v grafu 1 vykreslena rychlost proudění v ose symetrie úlohy. Tento graf popisuje pouze rychlost proudění v ose symetrie úlohy. Maximální dosažená rychlost proudění je 6,72 m/s. Lze pozorovat výrazný nárůst rychlosti proudění v okolí vstupního průměru difuzoru, ale po dosažení maximální hodnoty rychlost opět rychle klesá až k hodnotám počáteční rychlosti proudění a dále udržuje přibližně konstantní hodnotu rychlosti.



Graf 1: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor  $h/D = 0$

Grafické znázornění dynamického tlaku ve výpočtové oblasti je znázorněno na obrázku 29, předmětem zájmu na tomto obrázku je oblast nízkého tlaku za difuzorem. V takové situaci se vzduch z oblasti vyššího tlaku začne přemísťovat do oblasti nižšího tlaku, a tím dojde k urychlení proudění uvnitř difuzoru. Obrázek 29 slouží jako porovnávací případ, aby mohl být zkoumán vliv příruby na změnu dynamického tlaku.



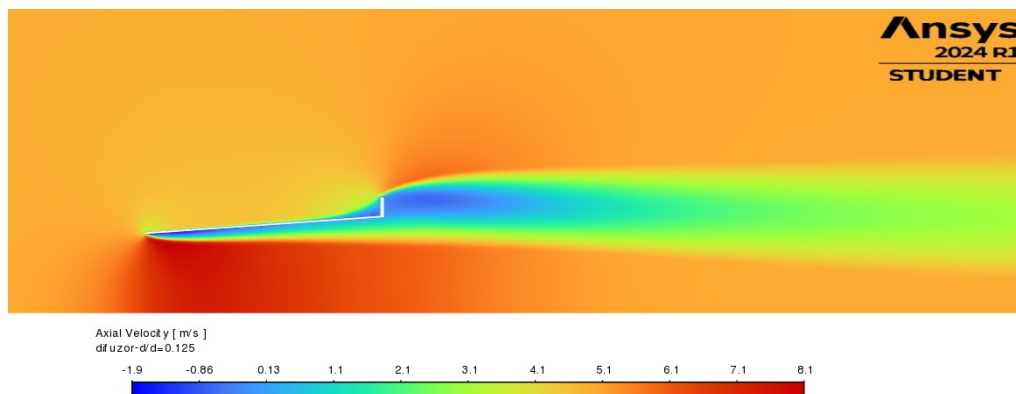
Obr. 29: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor  $h/D = 0$

Při proudění vzduchu kolem difuzoru dochází ke vzniku sil působících na difuzor. Jedná se o sílu vztakovou a sílu odporovou. Vztaková síla  $F_L$  působí kolmo na vstupní proud vzduchu (kolmo na osu difuzoru), ale jelikož je difuzor osově symetrické těleso, tak výsledná vztaková síla působící na difuzor je nulová. Podstatnou silou je síla odporová, která působí ve směru vstupujícího proudu vzduchu. Výsledná odporová síla  $F_d$  již nulová není, a proto je třeba se velikostí této síly zabývat, případně je možné vyjádřit odpor difuzoru ve formě bezrozměrového součinitele odporu  $c_d$ . K určení velikosti odporové síly a součinitele odporu je rovněž použita CFD simulace. Výsledná odporová síla je 0,21 N. Součinitel odporu je 0,34.

## 10.2 Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0,125$

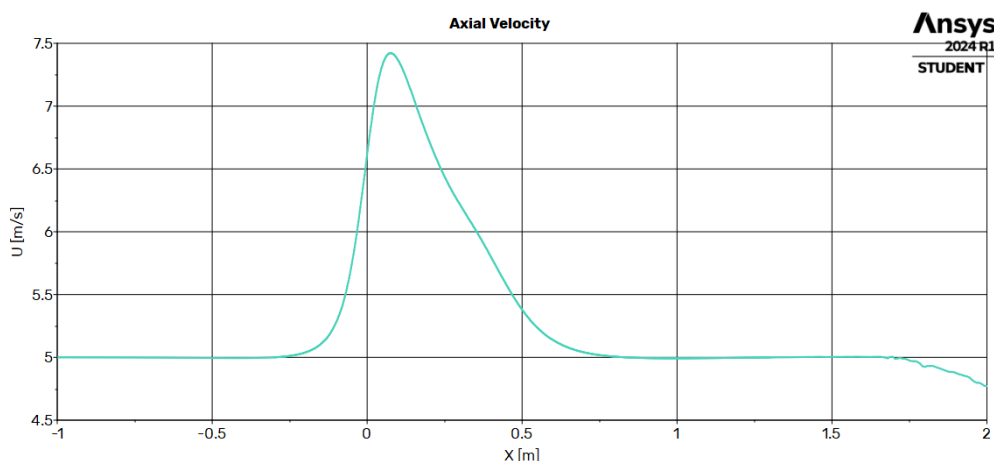
Tato varianta difuzoru již má na výstupní straně přírubu o výšce 25 mm, a je tak možné vyhodnocovat vliv příruby na rychlost proudění.

Grafické vyobrazení rychlosti proudění kolem tohoto difuzoru je zobrazeno na obrázku 30. Opět lze pozorovat zvýšení rychlosti proudění na vstupním průměru difuzoru. U tohoto difuzoru je ale mnohem větší oblast snížení rychlosti proudění za difuzorem v úrovni příruby. Příruba svojí orientací vůči směru proudění představuje překážku pro proudění, nedochází tak k jejímu obtékání, ale dochází k odtržení mezní vrstvy a vzniku úplavu.



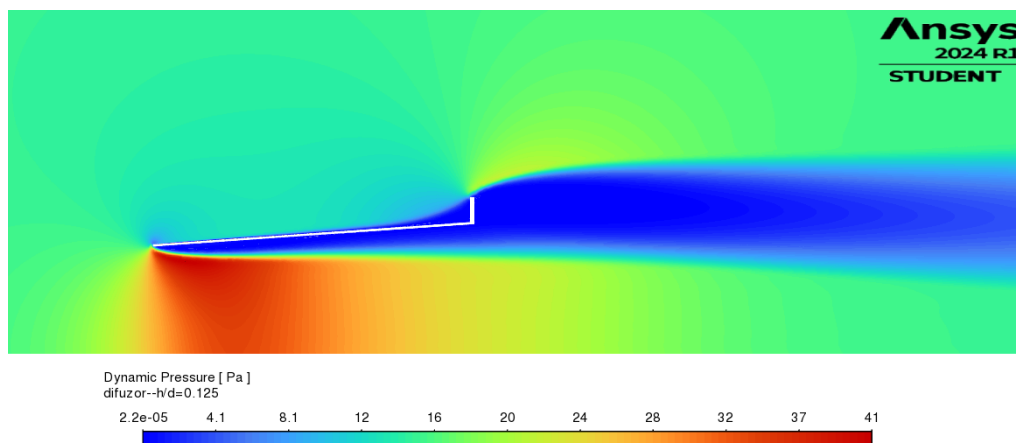
Obr. 30: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor  $h/D = 0,125$

Číselné hodnoty závislosti rychlosti proudění v ose symetrie na poloze jsou uvedeny v grafu 2. Maximální dosažená rychlost proudění je 7,42 m/s, což je o 0,7 m/s více než v případě difuzoru bez příruby, také lze pozorovat pozvolnější pokles rychlosti proudění po dosažení maximální hodnoty.



Graf 2: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor  $h/D = 0,125$

Grafické zobrazení dynamického tlaku ve výpočtové oblasti je zobrazeno na obrázku 31, kde je patrné jednak značné rozšíření oblasti nízkého tlaku, ale také dosažení nižších hodnot tlaku za difuzorem, konkrétně za přírubou difuzoru. Nižší tlak za difuzorem způsobí vyšší trend proudění vzduchu z oblastí o vyšším tlaku do této oblasti, čímž se zvýší rychlost proudění uvnitř difuzoru.



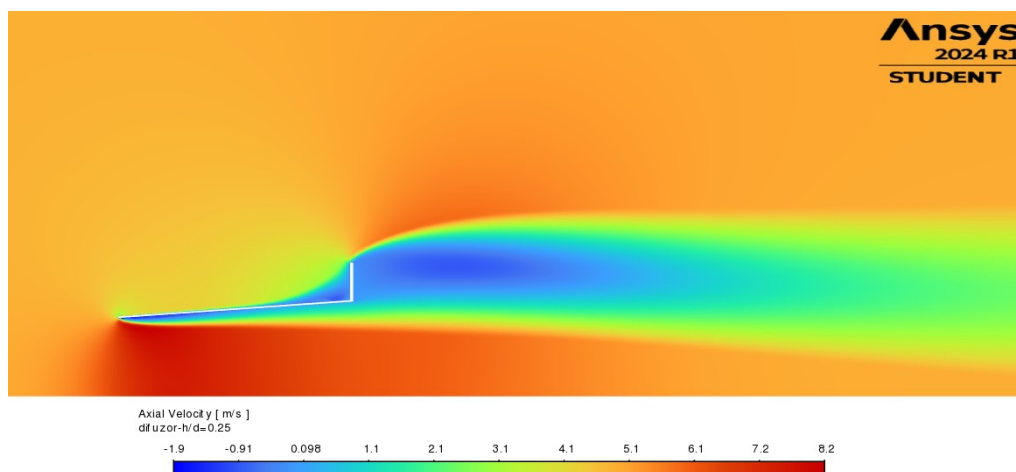
Obr. 31: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor  $h/D = 0,125$

Výsledná odporová síla difuzoru je 0,62 N a součinitel odporu je 1,02. Při porovnání s výsledky odporové síly a součinitele odporu s variantou difuzoru bez přírubby je patrné, že oba parametry výrazně narostly. Odporová síla se zvýšila o 0,41 N a součinitel odporu se zvýšil o 0,68. Příruba má vliv na velikost odporové síly, a tedy i na součinitele odporu v tom smyslu, že zvyšuje jejich hodnoty.

### 10.3 Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0,25$

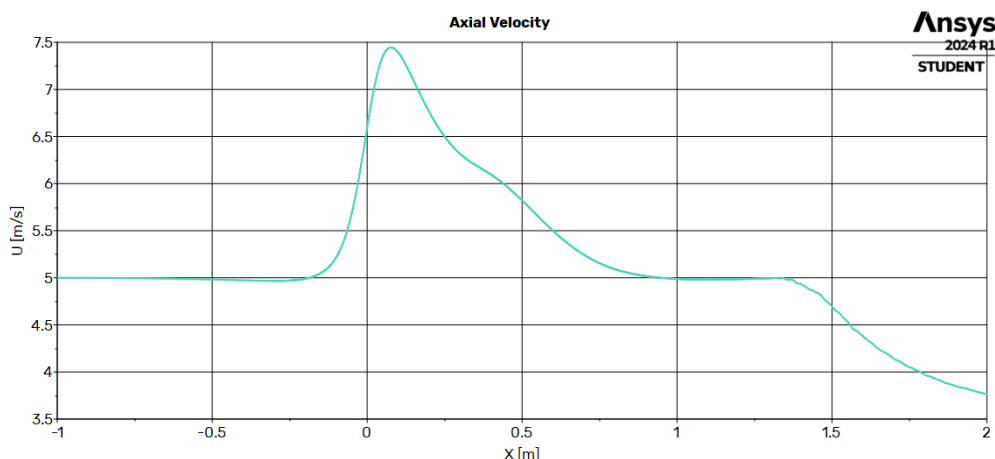
Zkoumaná varianta difuzoru má výšku přírubby 50 mm, tedy dvakrát vyšší než v případě předchozí varianty difuzoru, a je tedy možné vyhodnocovat vliv zvětšení výšky přírubby na vlastnosti proudění.

Grafické vyobrazení rychlosti proudění kolem tohoto difuzoru je zobrazeno na obrázku 32. Porovnání rychlosti proudění na vstupním průměru difuzoru z tohoto obrázku s předchozí variantou již není dobře patrné. Naopak dobře patrné je rozšíření oblasti za přírubou, kde dochází ke snížení rychlosti proudění, a dochází tak k masivnějšímu úplavu.



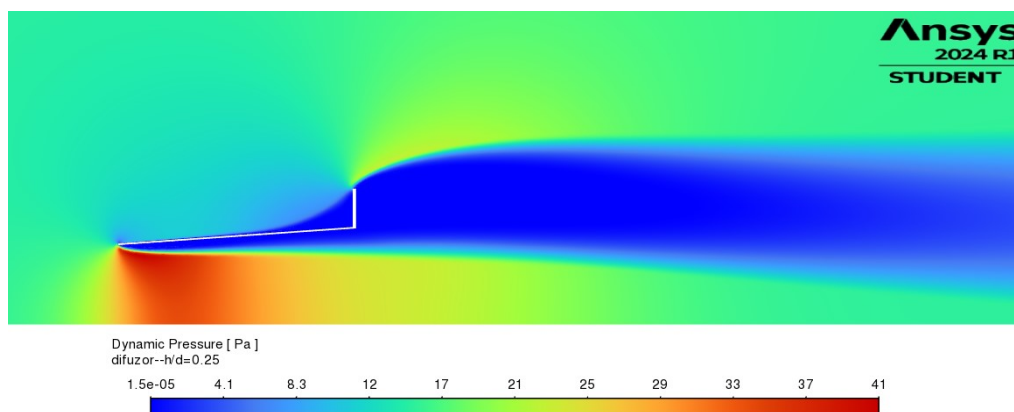
Obr. 32: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor  $h/D = 0,25$

Číselné hodnoty závislosti rychlosti proudění v ose symetrie na poloze jsou uvedeny v grafu 3. Maximální dosažená rychlost proudění je 7,44 m/s, to znamená nárůst rychlosti v ose difuzoru pouze o 0,02 m/s, což je zanedbatelné. Lze ale pozorovat dosažení pozvolnějšího poklesu rychlosti proudění po dosažení maximální hodnoty.



Graf 3: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor  $h/D = 0,25$

Grafické zobrazení dynamického tlaku ve výpočtové oblasti je zobrazeno na obrázku 33. Zvýšení výšky příruby opět způsobí rozšíření oblasti nízkého tlaku za difuzorem. To způsobí přesun vzduchu z oblasti vyššího tlaku do této oblasti, čímž dojde k urychlení proudění uvnitř difuzoru.



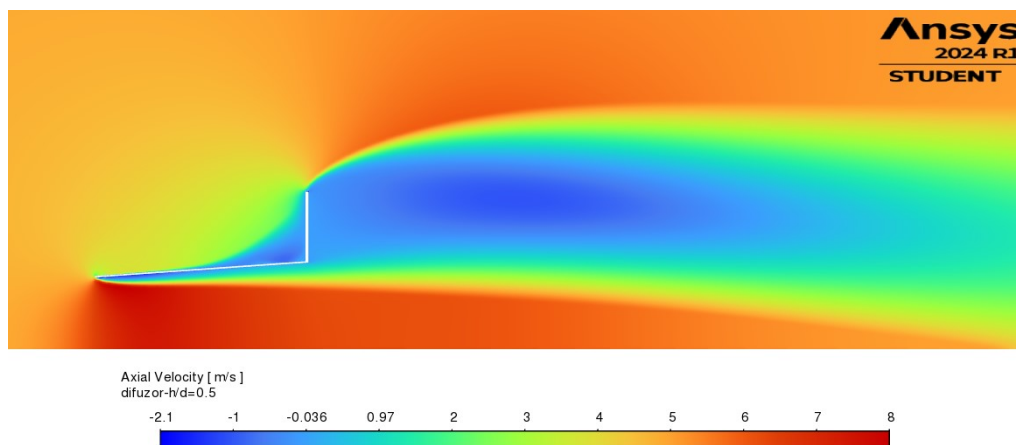
Obr. 33: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor  $h/D = 0,25$

Odporová síla působící na difuzor je 1,10 N a součinitel odporu je 1,80. Opět lze pozorovat zvýšení hodnot těchto parametrů, konkrétně odporová síla se zvýší o 0,48 N a součinitel odporu se zvýší o 0,78.

#### 10.4 Simulace proudění kolem difuzoru varianty $h/D = 0,5$

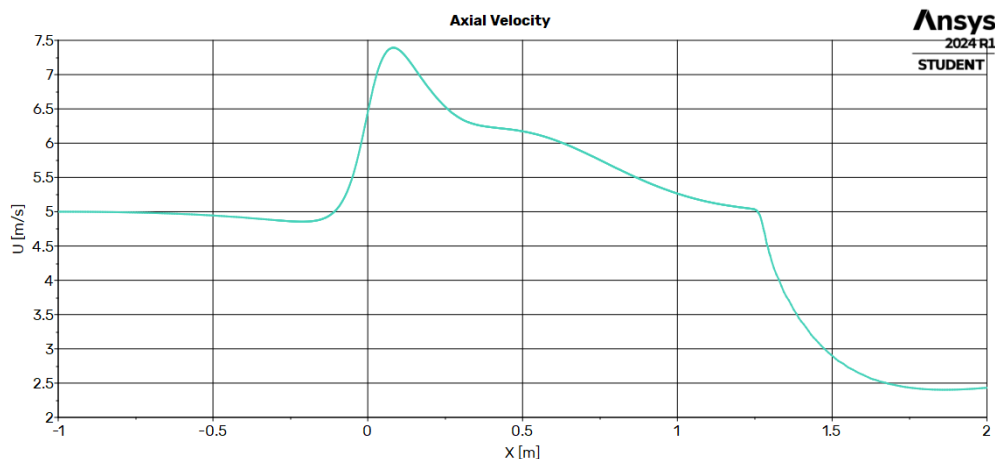
Poslední zkoumaná varianta přírubového difuzoru je difuzor s výškou příruby 100 mm, tedy opět dvakrát tak vysokou oproti předešlému případu.

Grafické vyobrazení rychlosti proudění kolem tohoto difuzoru je zobrazeno na obrázku 34. Srovnání rychlosti proudění u vstupního průměru difuzoru s předešlou variantou není dobře patrné, ale opět lze pozorovat rozšíření oblasti snížení rychlosti proudění za přírubou, což opět značí nárůst úplavu za difuzorem.



Obr. 34: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor  $h/D = 0,5$

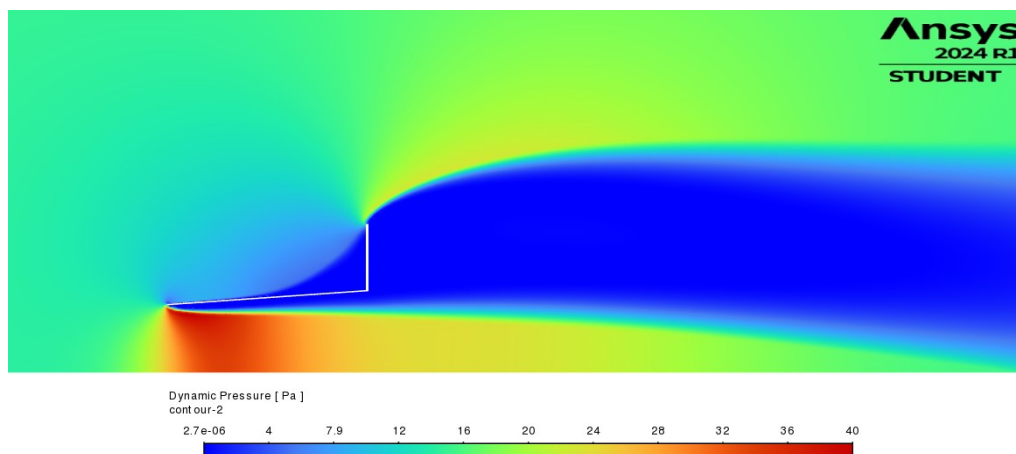
Číselné hodnoty závislosti rychlosti proudění v ose symetrie na poloze jsou uvedeny v grafu 4. Maximální dosažená rychlost proudění je 7,39 m/s. Došlo tedy ke snížení maximální dosažené rychlosti proudění, a to o 0,05 m/s oproti variantě s výškou příruby 50 mm a o 0,03 m/s oproti variantě s výškou příruby 25 mm, jedná se však o zanedbatelné hodnoty. Dochází ale k pozvolnějšímu klesání rychlosti po dosažení maximální hodnoty, než tomu bylo v předešlých variantách.



Graf 4: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor  $h/D = 0,5$

Grafické zobrazení dynamického tlaku ve výpočtové oblasti je zobrazeno na obrázku 35. Stejně jako tomu bylo v předešlých variantách, tak i v této variantě zvýšení výšky příruby zvýší oblast nízkého tlaku vznikajícího za přírubou, což má za následek zvýšení rychlosti proudění v difuzoru.





Obr. 35: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor  $h/D = 0,5$

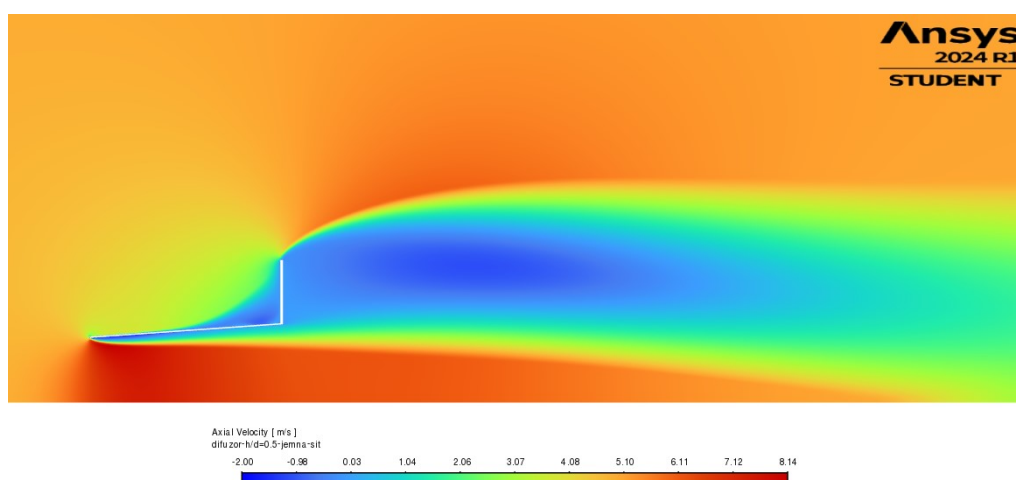
Odporová síla na difuzoru je 2,32 N a součinitel odporu je 3,79. Trend zvyšování těchto hodnot se zvyšující se výškou přírubby se potvrdil i u této varianty difuzoru. Odporová síla se zvýší o 1,22 N a součinitel odporu se zvýší o 1,99 oproti předchozí variantě.

### 10.5 Citlivostní analýza výpočetní sítě pro variantu $h/D = 0,5$

Návrh výpočetní sítě úlohy má významný vliv na výsledky simulace, proto se provádí citlivostní analýza této sítě, ve které se upraví parametry sítě a opět se provede výpočet. Poté lze porovnat výsledky úlohy s modifikovanou výpočetní sítí s výsledky úlohy s původní výpočetní sítí.

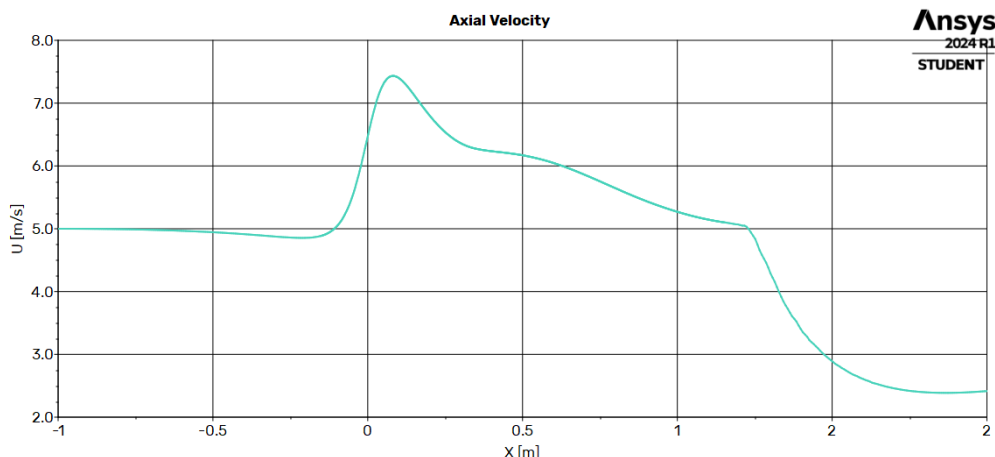
Citlivostní analýza výpočetní sítě se provádí pro variantu difuzoru  $h/D = 0,5$ . Nenavrhuje se nová síť, ale pozmění se parametry původní výpočetní sítě. Velikost elementu základní (hrubé) sítě se z 8 mm snížil na 7 mm. Poloměr kruhové plochy se z 800 mm snížil na 650 mm, ale jemnost sítě v této oblasti se zvýší o 25 %, tedy z původních 2 mm na 1,5 mm. Poloha středu kruhové plochy zůstává nezměněna, stejně tak počet jemných vrstev sítě kolem difuzoru zůstává nezměněn. Počet elementů modifikované výpočetní sítě je 1045619.

Grafické vyobrazení rychlosti proudění difuzoru s modifikovanou výpočetní sítí je zobrazeno na obrázku 36. Při porovnání obrázku 36 s obrázkem 34 není patrný žádný vizuální rozdíl.



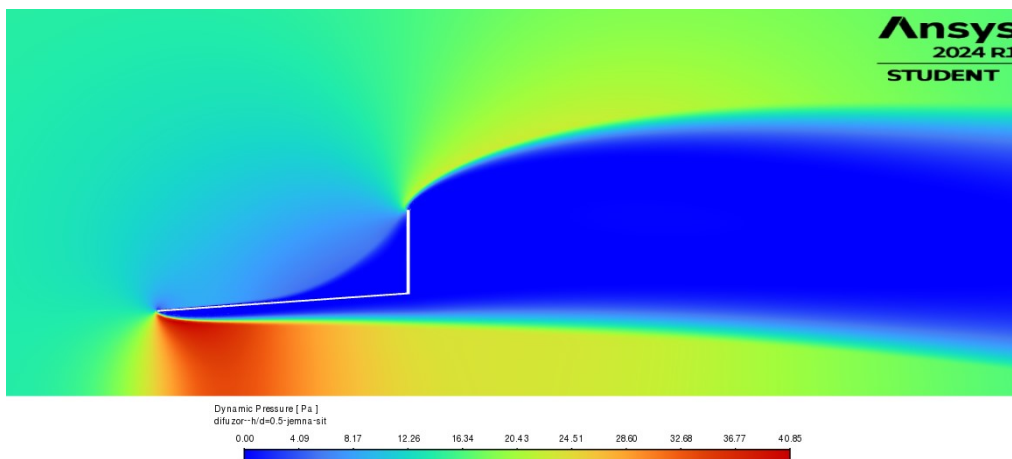
Obr. 36: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor  $h/D = 0,5$  s modifikovanou výpočetní sítí

Číselné hodnoty závislosti rychlosti proudění v ose symetrie na poloze jsou uvedeny v grafu 5. Maximální dosažená rychlost proudění je 7,43 m/s. Provedením výpočtu s modifikovanou výpočetní sítí se dosáhlo rozdílu 0,04 m/s, což je naprosto zanedbatelný rozdíl. Tvar křivky obou grafů je také totožný.



Graf 5: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor  $h/D = 0,5$  s modifikovanou výpočetní sítí

Grafické zobrazení dynamického tlaku ve výpočtové oblasti je zobrazeno na obrázku 37. Ani zde nelze pozorovat změny v porovnání s variantou s původní výpočetní sítí.



Obr. 37: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor  $h/D = 0,5$  s modifikovanou výpočetní sítí

Celková odporová síla působící na difuzoru je 2,32 N a součinitel odporu je 3,79. Při porovnání s úlohou s původní výpočetní sítí se odporová síla nijak nezmění a součinitelé odporu jsou rovněž totožní.

Po provedení citlivostní analýzy výpočetní sítě lze konstatovat, že mezi výsledky úlohy s modifikovanou výpočetní sítí a úlohy s původní výpočetní sítí nejsou žádné významné rozdíly. Použití původní výpočetní sítě je výhodnější, jelikož má menší počet elementů, a je tak méně náročná na výpočet, přičemž vyšší hrubost sítě nemá vliv na přesnost výsledku.

## 10.6 Tloušťka mezní vrstvy – $Y^+$

$Y^+$  reprezentuje vzdálenost od stěny ke středu prvního elementu výpočetní sítě. Jedná se o hodnotu v bezrozměrovém tvaru, která se používá k posuzování výpočetní sítě na hranicích se stěnami [20]. V případě turbulentního modelu SST  $k-\omega$  vychází hodnota  $Y^+$  přibližně 1, jsou ale přijatelné hodnoty až kolem 5 [21] nebo naopak i hodnoty menší než 1.

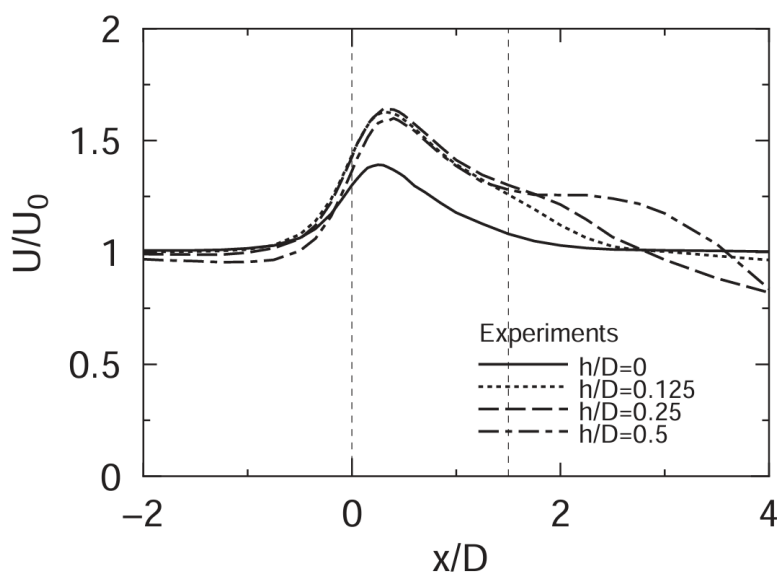
Zde prováděné simulace využívají turbulentní model SST  $k-\omega$ . Aby se ověřilo, zda hodnota  $Y^+$  pro prováděné úlohy leží v přípustném rozpětí hodnot, je třeba je vypočítat. V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty  $Y^+$  pro sítě všech řešených úloh, tyto hodnoty jsou vypočtené v CFD řešiči. Z hodnot v tabulce 3 je patrné, že rozpětí přípustných hodnot  $Y^+$  pro jednotlivé sítě je dodržen.

Tab. 3: Hodnota součinitele  $Y^+$

Výpočetní síť difuzoru	Hodnota $Y^+$
$h/D = 0$	1,61
$h/D = 0,125$	1,33
$h/D = 0,25$	1,15
$h/D = 0,5$	0,99
$h/D = 0,5$ s modifikovanou výpočetní sítí	0,87

## 10.7 Validace získaných výsledků difuzorů zakončených přírubou

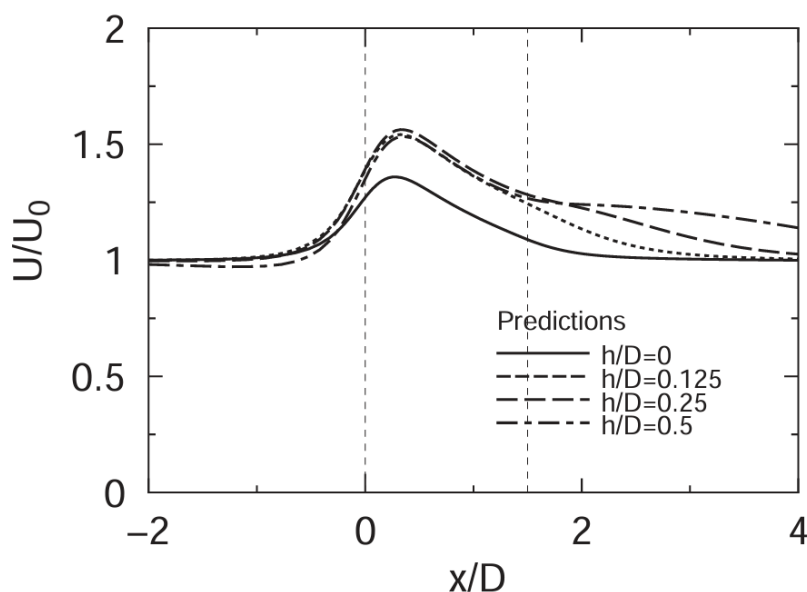
K validaci výsledků je použita studie: ABE, Ken-ichi a OHYA, Yuji. *An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD* [7]. Tato studie prováděla jednak experimentální měření na reálných modelech difuzorů a zároveň se také zabývala CFD výpočtem těchto difuzorů. Parametry použité ve studii, kterými jsou rozměry difuzoru, rozměry zkoumané oblasti proudění a parametry proudění, jsou totožné s parametry nastavenými v této práci. A proto lze výsledky této studie použít k validaci výsledků práce.



Graf 6: Výsledky experimentálního měření prováděné studie – převzato z [7]

Výsledky experimentálního měření rychlosti proudění kolem všech čtyř typů difuzorů jsou zobrazeny v grafu 6. Graf popisuje závislost dvou veličin v bezrozměrovém tvaru. To, že je veličina v bezrozměrovém tvaru, znamená, že skutečná hodnota této veličiny v daných jednotkách je podělena určitým parametrem v těch samých jednotkách. Jednotka veličiny v bezrozměrovém tvaru je tedy rovna jedné. Na vodorovné ose grafu 6 je vynesena poloha podél osy symetrie úlohy  $x$ , dělená průměrem difuzoru  $D$ . Na svislé ose grafu 6 je vynesena rychlost proudění podél osy symetrie úlohy  $U$ , dělená počáteční rychlostí proudění  $U_0$ . Jedná se tedy o závislost bezrozměrové rychlosti proudění v ose symetrie úlohy na bezrozměrové poloze.

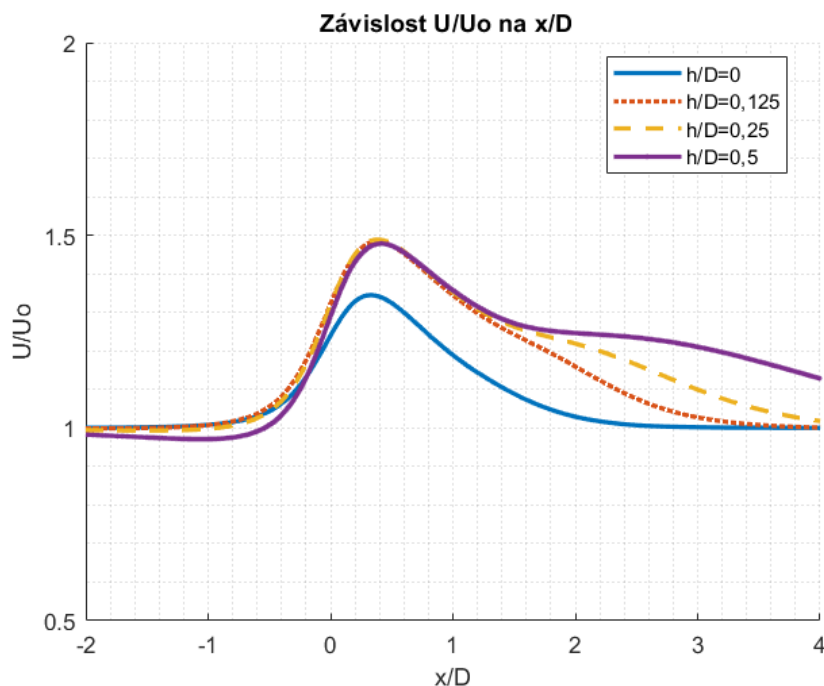
Výsledky CFD simulace prováděné studií jsou zobrazeny v grafu 7. Jedná se o stejnou závislost jako v případě grafu 6, tedy o závislost bezrozměrové rychlosti proudění v ose symetrie úlohy na bezrozměrové poloze.



Graf 7: Výsledky CFD simulací prováděné studie – převzato z [7]

Při porovnání experimentálních výsledků s výsledky CFD simulace studie je zřejmé, že výsledky se trochu liší. Odlišnost je především v dosažené maximální rychlosti proudění, která v případě experimentálního měření je přibližně 1,75. Kdežto v případě CFD výpočtu je maximální dosažená rychlost proudění nižší, přibližně 1,6. Také křivky se na konci grafů liší. I přesto jsou výsledky simulace prováděné studií hodnocené jako vyhovující.

Grafy 6 a 7 popisují závislost bezrozměrové rychlosti v ose symetrie úlohy na bezrozměrové poloze. Proto i výsledky získané v této práci, popisující závislost rychlosti proudění na poloze, jsou zjišťované právě v ose symetrie úlohy. Aby tyto výsledky bylo možné porovnávat s výsledky studie, tak je nutné výsledky převést do bezrozměrového tvaru, a to stejně jako to prováděla studie. Závislost výsledků této práce ve formě bezrozměrové rychlosti na bezrozměrové poloze je zobrazena v grafu 8.



Graf 8: Výsledky CFD simulace přírubových difuzorů

Graf 8 nyní lze porovnat s grafy 6 a 7. Lze konstatovat, že tvarem a polohou jednotlivých křivek grafu 8, se graf 8 téměř shoduje s grafem 7. Graf 7 dosahuje maximální hodnoty rychlosti kolem 1,6, graf 8 dosahuje maximální rychlosti 1,49. Odlišnost výsledků rychlosti je 0,11, takovýto rozdíl lze považovat za vyhovující a výsledky simulací této práce za korektní. Mimo jiné se tímto provedlo porovnání výsledků srovnáním komerčního řešiče (ANSYS) a “in-house“ kódu. Proto při vzájemném porovnání jsou ve výsledcích nezbytné rozdíly, které jsou přijatelné.

## 10.8 Shrnutí výsledků simulací kuželových difuzorů zakončených přírubou

Z výsledků CFD simulací proudění kolem kuželových difuzorů s odlišnou výškou přírub lze vyvodit několik poznatků, na jejichž základě lze učinit závěry pro možnost využití těchto difuzorů v tunelových turbínách.

Použitím varianty difuzoru  $h/D = 0$ , tedy difuzoru bez příruby, je dosaženo zrychlení proudění na vstupní straně difuzoru. Rychlost proudění ale po dosažení maxima rychle klesá.

Příruba u difuzoru varianty  $h/D = 0,125$  zvýší dosahovanou maximální rychlost proudění a také docílí pomalejšího poklesu rychlosti proudění.

Zvýšení výšky příruby u difuzoru varianty  $h/D = 0,25$  již nevede k dalšímu výraznému zvýšení maximální dosahované rychlosti proudění, ale má za následek pozvolnější pokles rychlosti proudění po dosažení maximální hodnoty.

Ani další zvýšení příruby u difuzoru varianty  $h/D = 0,50$  nevede ke zvýšení maximální rychlosti proudění, ale rychlost proudění podél difuzoru opět klesá více pozvolna.

Jako nejvíce vhodná varianta takového typu difuzoru pro aplikaci do tunelové větrné turbíny z hlediska vlastností proudění je varianta  $h/D = 0,50$ . Ovšem tato varianta má zároveň nejvyšší hodnoty odporové síly a součinitele odporu, a proto nosná konstrukce tunelové větrné turbíny s tímto difuzorem bude při náporu větru nejvíce silově namáhána. Za účelem snížení silového namáhání nosné konstrukce lze uvažovat také o difuzorech varianty  $h/D = 0,25$

případně  $h/D = 0,125$ , které dosahují stejné maximální rychlosti proudění, mají sice méně pozvolný pokles rychlosti proudění, ale zato mají nižší hodnoty odporové síly a součinitele odporu.

## 11 Specifikování CFD úlohy pro difuzor s profilem ve tvaru křídla

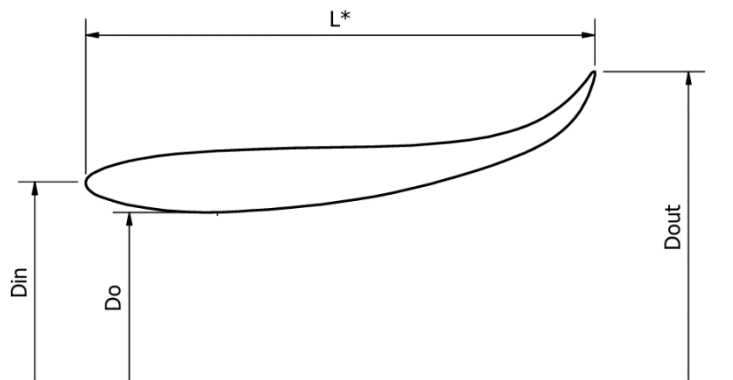
Následující část práce se zabývá CFD výpočtem difuzoru s profilem ve tvaru křídla. Jedná se o tvarovou modifikaci difuzoru, ale postup při řešení této úlohy je totožný s úlohou přírubového difuzoru. Opět je zapotřebí definovat veškeré parametry pro spuštění výpočtu. Je prováděn výpočet pouze pro jeden typ geometrie difuzoru. Při řešení úlohy je využívána studie LELOUDAS, Stavros N.; LYGIDAKIS, Georgios N; ESKANTAR, Alexandros I. a NIKOLOS, Ioannis K. *A robust methodology for the design optimization of diffuser augmented wind turbine shrouds* [2]. V této studii byl proveden CFD výpočet kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla.

### 11.1 Návrh geometrie

Je zapotřebí stanovit tvar a rozměr difuzoru a také rozměry zkoumané oblasti. V tomto případě se ze studie převezme pouze typ profilu difuzoru, zbylé informace studie buď neudává, nebo jsou pro návrh geometrie do této práce nevhodné.

#### 11.1.1 Rozměr difuzoru

Zkoumaný difuzor má profil ve tvaru křídla, jedná se o atypicky tvarovaný profil, kde zadní část profilu je výrazně vyvýšená. Zmíněná studie sice udává rozměry difuzoru, ale jedná se o difuzor značně veliký, jehož nejmenší průměr dosahuje 5,5 m. S přihlédnutím na omezený počet elementů výpočetní sítě studentské verze softwaru ANSYS FLUENT, není možné v této práci použít difuzor o stejné velikosti. Proto je v práci zkoumán difuzor stejného tvaru, ale ve zmenšené podobě. Zmenšení je provedeno tak, aby difuzor v nejužším místě dosahoval stejného průměru jako difuzor přírubový. Tedy průměr difuzoru v nejužším místě  $D_0$  je 200 mm. Jde o profil SD2, jehož geometrie je převzata ze studie [2]. Zkoumaný difuzor je zobrazen na obrázku číslo 38, kde jsou okótované hlavní rozměry, jako délka difuzoru  $L^*$ , vstupní průměr difuzoru  $D_{in}$ , nejmenší průměr difuzoru  $D_0$  a výstupní průměr difuzoru  $D_{out}$ . Konkrétní číselné hodnoty difuzoru jsou zobrazeny v tabulce číslo 4.



Obr. 38: Difuzor s profilem ve tvaru křídla

Tab. 4: Rozměry difuzoru s profilem ve tvaru křídla

Označení rozměru	Hodnota [mm]
$L^*$	158,4
$D_0$	200
$D_{in}$	218,8
$D_{out}$	287,8

Je patrné, že difuzor s profilem ve tvaru křídla má srovnatelné rozměry s přírubovým difuzorem. Je tak možno zkoumat a porovnávat vyhodnocované parametry mezi oběma typy difuzorů, tedy mezi přírubovými difuzory a difuzorem s profilem ve tvaru křídla.

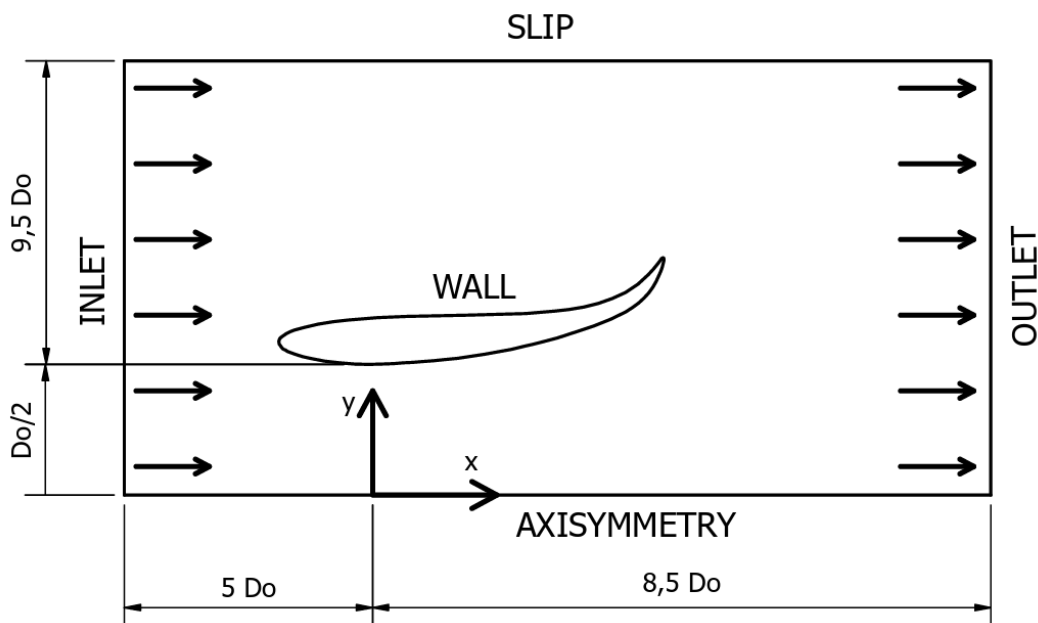
### 11.1.2 Rozměry zkoumané oblasti

Rozměry zkoumané oblasti studie [2] neudává, proto je zapotřebí je navrhnout. Jelikož difuzor má srovnatelné rozměry jako difuzor přírubový, tak lze použít srovnatelně velkou zkoumanou oblast. Na obrázku 39 je znázorněna výsledná geometrie úlohy, kde je velikost zkoumané oblasti vyjádřena pomocí nejmenšího průměru difuzoru  $D_0$ . Číselná velikost zkoumané oblasti je 2,7 m na 2 m.

## 11.2 Počáteční a okrajové podmínky

Aby bylo možné porovnat vlastnosti difuzoru s profilem ve tvaru křídla s přírubovým difuzorem, jsou v jedné řešené úloze použity stejné počáteční podmínky jako v případě úlohy přírubového difuzoru, tedy  $U_0 = 5$  m/s. Zmíněná studie ale pracovala s vyšší rychlostí proudění 6 m/s. Předpokládá se, že po převedení rychlosti do bezrozměrového tvaru budou výsledky stejné pro obě počáteční rychlosti proudění. Tento předpoklad je však vhodné ověřit dalším výpočtem, při kterém bude počáteční rychlost proudění 6 m/s.

Okrajové podmínky jsou totožné s úlohou přírubového difuzoru. Jedná se o okrajové podmínky INLET, OUTLET, WALL, SLIP, AXISYMMETRY, tyto okrajové podmínky jsou znázorněny na obrázku 39.



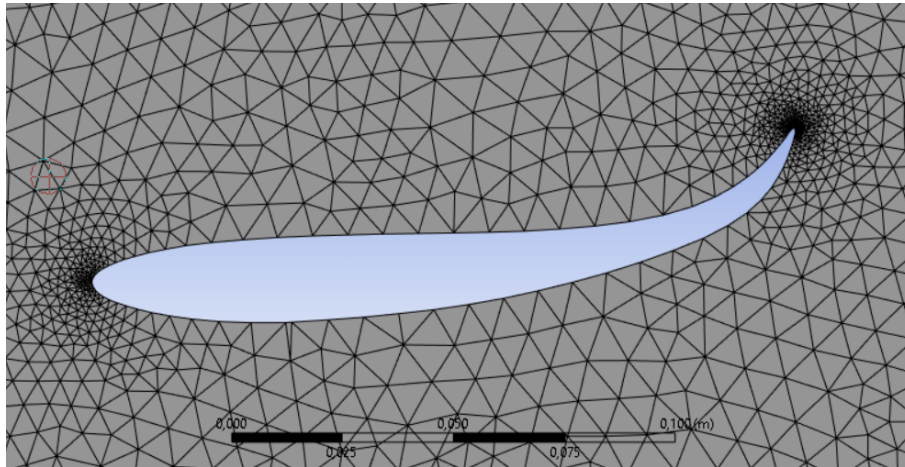
Obr. 39: Výsledná geometrie úlohy s okrajovými podmínkami

## 11.3 Síťování

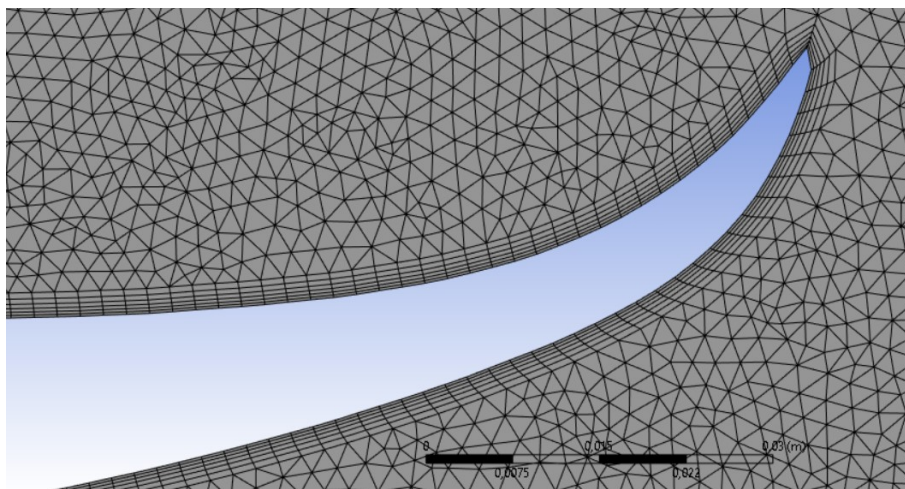
Struktura výpočetní sítě má stejnou podobu jako v případě úlohy s přírubovým difuzorem. Na tvorbu základní (hrubší) sítě je použita strukturovaná síť s elementy tvaru trojúhelníků s velikostí elementu 8 mm. Síť je zobrazena na obrázku číslo 40. Dále je kolem stěn difuzoru vytvořeno 6 jemných vrstev výpočetní sítě, které lze pozorovat na obrázku číslo 41. Nakonec je okolo difuzoru vytvořena jemnější síť ve tvaru kruhové plochy. Kruhová plocha



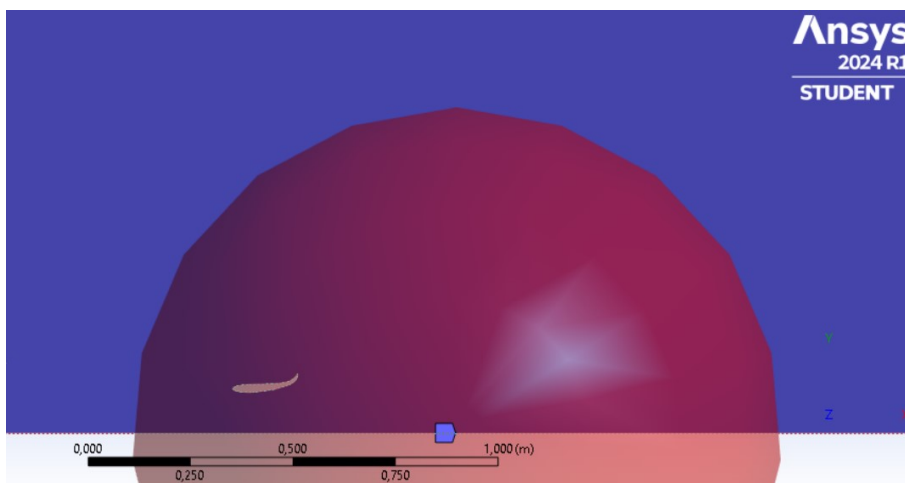
má střed umístěn v ose symetrie úlohy, na x-ové ose je střed kruhové plochy posunut směrem doprava o 500 mm od počátku souřadnicového systému úlohy. Poloměr kruhové plochy je 800 mm a velikost elementu v této ploše je 2 mm. Kruhovou plochu jemnější výpočetní síť lze pozorovat na obrázku číslo 42, na obrázku 43 je pak zobrazena výsledná výpočetní síť.



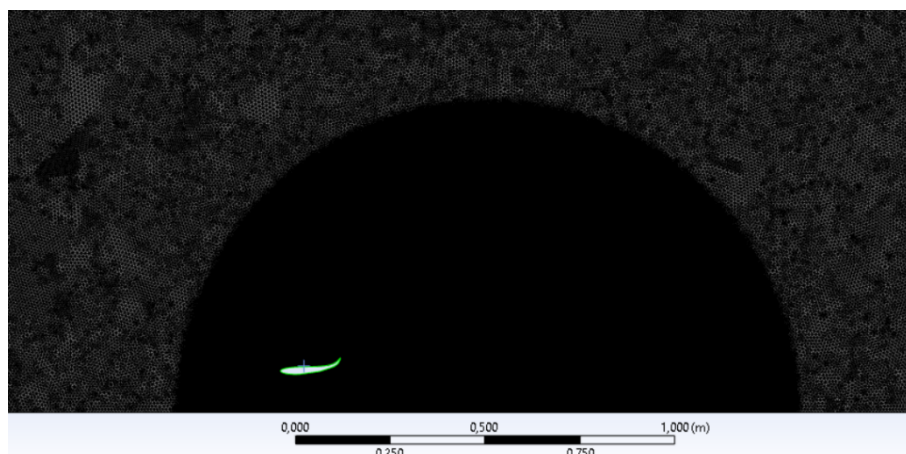
Obr. 40: Základní (hrubá) výpočetní síť



Obr. 41: Vrstvy jemné výpočetní sítě kolem stěn difuzoru



Obr. 42: Kruhová plocha jemné výpočetní sítě



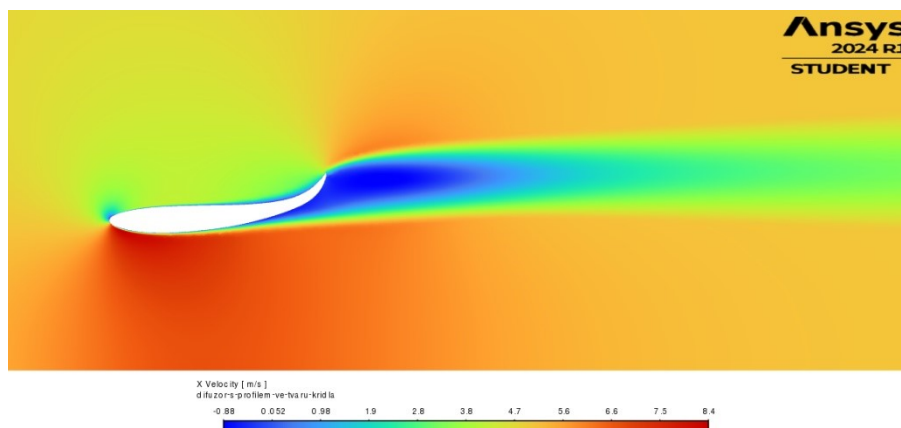
**Obr. 43: Výsledná výpočetní síť**

## 12 CFD výpočet difuzoru s profilem ve tvaru křídla

Kapitola se zaměřuje na vyhodnocení CFD simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla, na citlivostní analýzu výpočetní sítě a také na validaci získaných výsledků. Všechny prováděné simulace jsou pro jednu geometrii difuzoru.

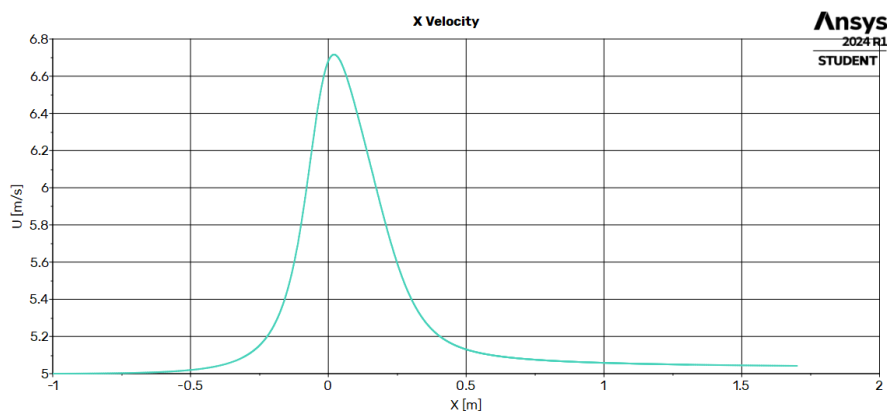
### 12.1 Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 5 \text{ m/s}$

Rychlost proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla je graficky zobrazena na obrázku 44. Je patrné zvýšení rychlosti proudění na vstupní straně difuzoru, naopak na konci difuzoru a za ním dochází k výraznému snížení rychlosti proudění. Snížení rychlosti na výstupní straně je způsobeno odtrháváním mezní vrstvy a vznikem úplavu. Na vnitřní stěně dochází k odtrhávání mezní vrstvy následkem výrazného rozevření difuzoru v zadní části. Na vnější stěně difuzoru mezní vrstva zůstává přimknutá ke stěně až ke konci difuzoru, poté dochází jejímu odtržení a vzniku úplavu.



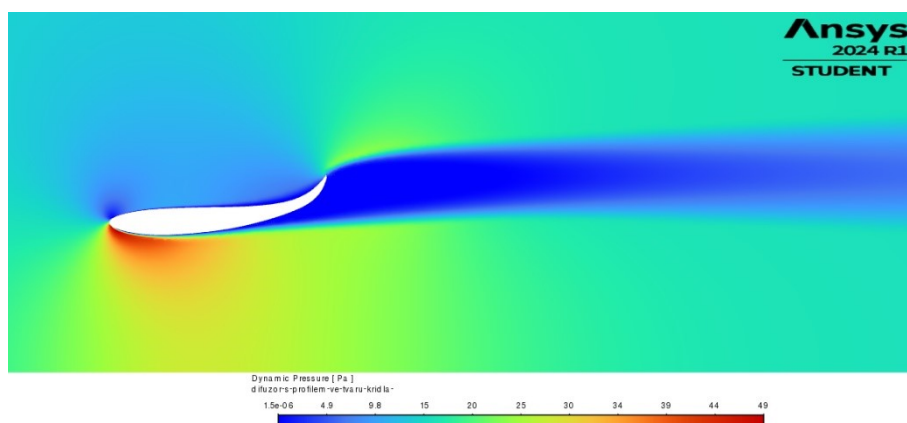
Obr. 44: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor s profilem ve tvaru křídla

Závislost rychlosti proudění v ose symetrie úlohy na poloze je zobrazena v grafu 9. Maximální dosažená rychlost proudění je  $6,72 \text{ m/s}$ . Přičemž rychlost začne prudce narůstat na vstupní straně difuzoru a maxima dosahuje těsně za nejmenším průměrem difuzoru. Po dosažení maxima rychlost proudění rychle klesá a ustaluje se na hodnoty počáteční rychlosti proudícího vzduchu.



Graf 9: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor s profilem ve tvaru křídla

Na obrázku 45 je zobrazen dynamický tlak kolem difuzoru. Na konci difuzoru a za difuzorem vzniká oblast nízkého tlaku, důsledkem toho se vzduch z oblastí o vyšším tlaku přemísťuje do této oblasti, což má za následek urychlení proudění vzduchu v difuzoru.



Obr. 45: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor s profilem ve tvaru křídla

Počet elementů výpočetní sítě činí 681036 a hodnota součinitele  $Y^+$  je 1,70. Vzhledem doporučeným hodnotám tohoto součinitele lze síť považovat za správně navrženou. Odporová síla na difuzor dosahuje hodnoty 0,44 N a součinitel odporu dosahuje hodnoty 0,73.

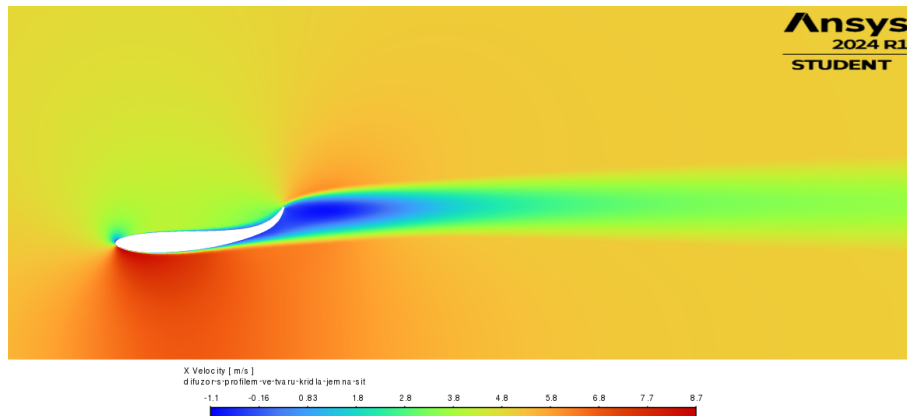
## 12.2 Citlivostní analýza výpočetní sítě

Stejně jako v případě přírubového difuzoru je zapotřebí provést citlivostní analýzu výpočetní sítě, kde se pro stejnou geometrii úlohy navrhne jemnější výpočetní síť a znovu se provede výpočet. Na základě porovnání výsledků úlohy bez modifikované výpočetní sítě s úlohou s modifikovanou výpočetní sítí lze pak vyhodnotit, zda zjemnění výpočetní sítě přinese zpřesnění výsledků, nebo nikoliv.

Modifikace výpočetní sítě se provádí na stejné geometrii, která je použita v předchozím výpočtu, tedy na úloze difuzoru s profilem ve tvaru křídla. Struktura modifikované sítě zůstává stejná, pozmění se parametry původní výpočetní sítě. Element základní (hrubé) sítě je nastaven na 5,5 mm oproti původním 8 mm. Poloměr kruhové plochy se z původních 800 mm sníží na 700 mm, ale jemnost sítě v této části se z původních 2 mm sníží na 1,5 mm. Poloha středu kruhové plochy zůstává nezměněna, také počet jemných vrstev kolem stěn difuzoru zůstává nepozměněn. Počet elementů výpočetní sítě po modifikaci je 1041114.

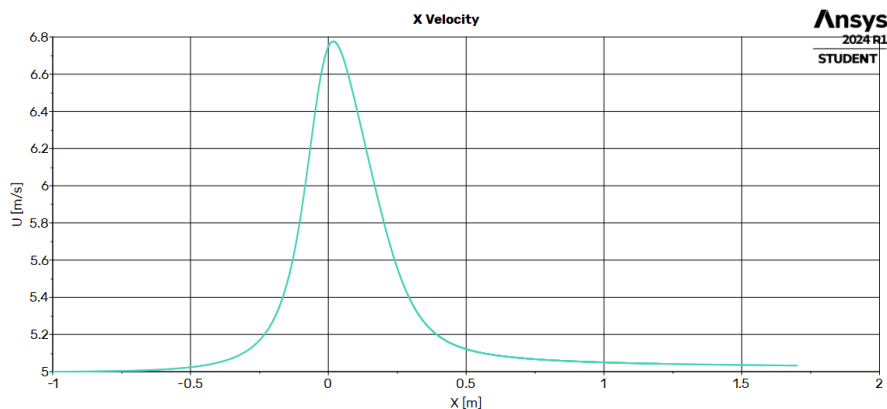
### 12.3 Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí pro $U_0 = 5 \text{ m/s}$

Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem difuzoru s modifikovanou výpočetní sítí je zobrazeno na obrázku 46. Při porovnání obrázku 46 s obrázkem 44, na kterém je zobrazena rychlost proudění bez modifikované sítě, není patrný žádný významný rozdíl.



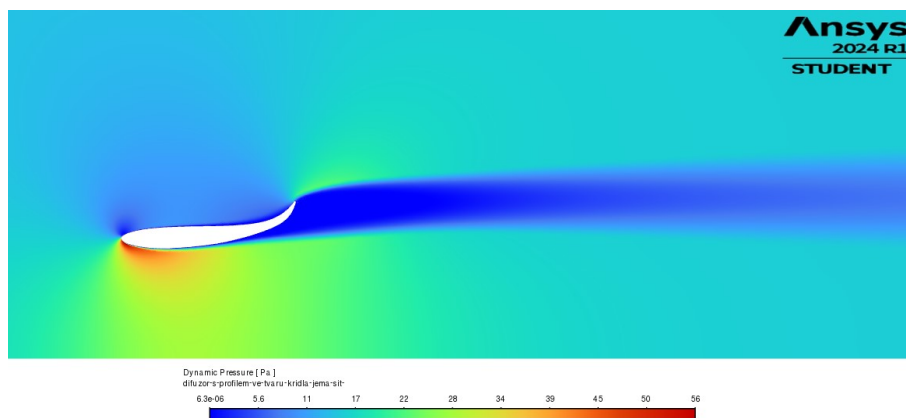
Obr. 46: Grafické znázornění rychlosti proudění pro difuzor s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí

Pro číselné vyjádření změn rychlosti proudění v úloze s modifikovanou sítí je v grafu 10 zobrazena závislost rychlosti proudění v ose symetrie úlohy na poloze. Z tohoto grafu je patrné zvýšení maximální dosažené rychlosti proudění, která v tomto případě je 6,78 m/s. Rozdíl maximální rychlosti proudění mezi modifikovanou a nemodifikovanou výpočetní sítí činí 0,06 m/s, což je zanedbatelný rozdíl. Jiné odlišnosti mezi grafy pozorovat nelze.



Graf 10: Závislost rychlosti proudění na poloze pro difuzor s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí

Na obrázku 47 je zobrazen dynamický tlak ve zkoumané oblasti. Při porovnání tohoto obrázku s obrázkem 45, na kterém je zobrazen dynamický tlak úlohy bez modifikované výpočetní sítě, nejsou viditelné žádné rozdíly.



Obr. 47: Grafické znázornění dynamického tlaku pro difuzor s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí

Součinitel  $Y^+$  pro úlohu s modifikovanou výpočetní sítí je 1,33. Dosažení součinitele  $Y^+$  rovno 1,33 značí velmi dobrou výpočetní síť, jelikož hodnota součinitele je blízká číslu 1.

Odporová síla úlohy s modifikovanou výpočetní sítí vyšla 0,40 N, při porovnání s výsledky úlohy bez modifikované sítě je rozdíl 0,04 N. Součinitel odporu úlohy s modifikovanou výpočetní sítí vyšel 0,65, rozdíl mezi součinitelem odporu úlohy bez modifikované výpočetní sítě je 0,08. Rozdíl mezi odporovými silami a součiniteli odporu není značný, ale vzhledem k tomu, že odporová síla i součinitel odporu nabývají velmi malých hodnot, tak i takto malý rozdíl nemusí být zanedbatelný.

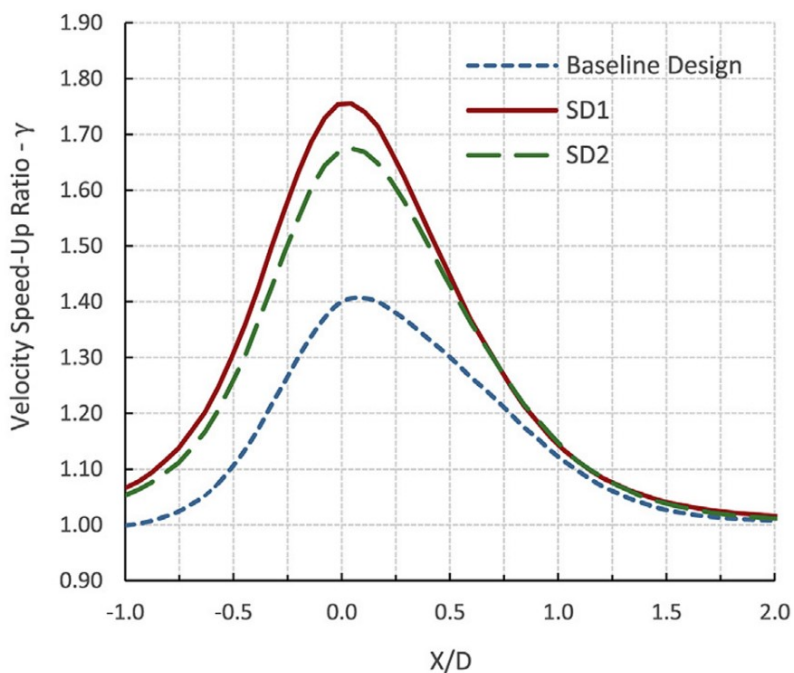
Po provedení citlivostní analýzy je možné prohlásit, že výsledky úlohy bez modifikované výpočetní sítě v porovnání s výsledky úlohy s modifikovanou výpočetní sítí nejsou stejné, zejména v oblasti odporové síly a součinitele odporu. Úloha s modifikovanou výpočetní sítí dosahuje vyšší přesnosti výsledků, a proto je brána za více korektní. Bylo by tedy vhodné provést další zjemnění výpočetní sítě a znovu porovnat výsledky, aby se ověřilo, že při zjemnění nebude docházet k dalším změnám výsledků. Zde ale nastává problém při použití studentské verze softwaru ANSYS FLUENT, jelikož i další malé zjemnění výpočetní sítě způsobí překročení maximálního počtu elementů sítě, kterým studentská verze disponuje.

## 12.4 Validace získaných výsledků difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 5 \text{ m/s}$

Validace výsledků je založena na výsledcích studie: LELOUDAS, Stavros N.; LYGIDAKIS, Georgios N; ESKANTAR, Alexandros I. a NIKOLOS, Ioannis K. *A robust methodology for the design optimization of diffuser augmented wind turbine shrouds* [2]. Tato studie prováděla CFD simulaci proudění kolem stejné geometrie difuzoru. Je nutné si uvědomit, že rozměry difuzoru, se kterými pracovala studie, a rozměry difuzoru, se kterými počítá tato práce, jsou rozdílné, totéž platí pro počáteční rychlosti proudění, a nelze tedy očekávat totožné výsledky.

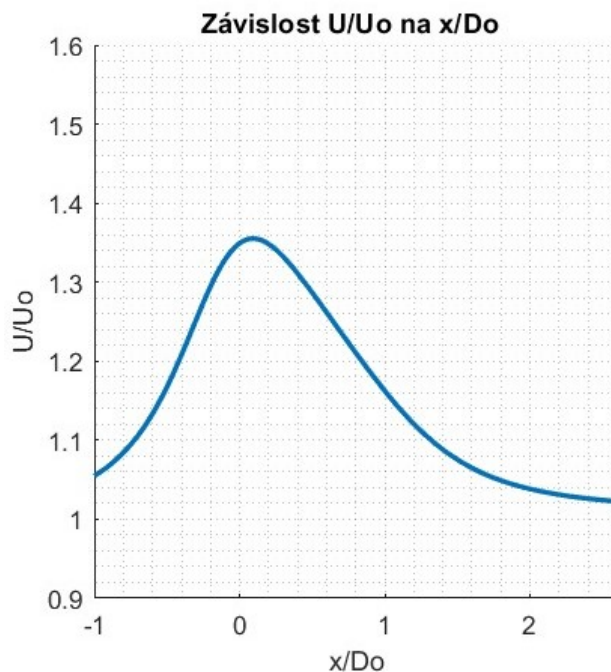
Výsledky CFD simulace, prováděné ve studii, jsou zobrazeny v grafu 11. V tomto grafu je vynesena závislost rychlosti v bezrozměrovém tvaru na poloze, která je rovněž v bezrozměrovém tvaru. Na svislé ose grafu je bezrozměrová rychlost podél osy symetrie úlohy, která je značena jako  $\gamma$  a vyjadřuje podíl skutečné a počáteční rychlosti proudění. Na vodorovné ose grafu je bezrozměrová vzdálenost vyjádřena pomocí nejmenšího průměru

difuzoru, tedy jako skutečná poloha dělená nejmenším průměrem difuzoru. Předmětem zkoumání v tomto grafu je křivka SD2.



Graf 11: Výsledky CFD simulací prováděné studie – převzato z [2]

Výsledky rychlosti proudění podél osy symetrie úlohy získané v této práci, pro úlohu s modifikovanou výpočetní sítí, jsou převedeny na bezrozměrové. Závislost bezrozměrové rychlosti na bezrozměrové poloze je zobrazena v grafu 12.

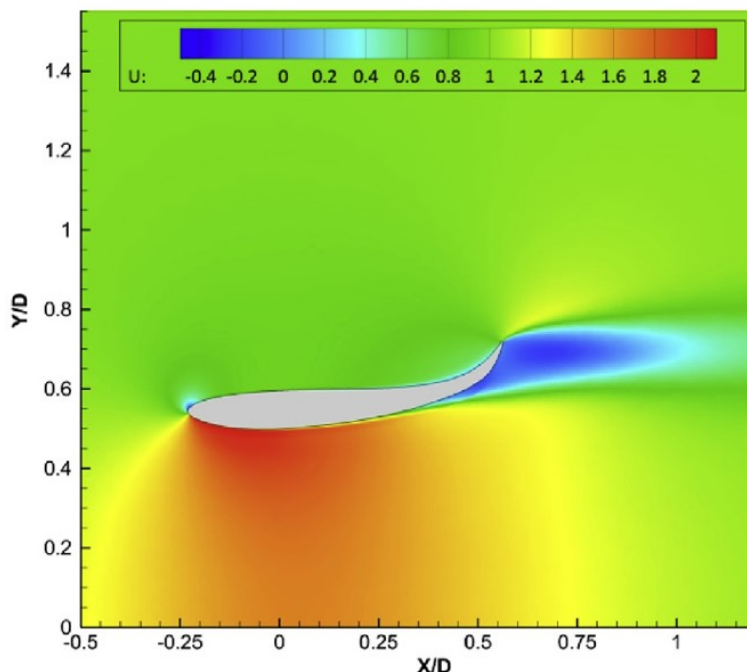


Graf 12: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro  $U_0 = 5 \text{ m/s}$

Porovnáním grafu 12 s grafem 11 je na první pohled patrné, že se výsledky liší v hodnotě maximální bezrozměrové rychlosti proudění. Maximální bezrozměrová rychlost výsledků ze studie je zhruba 1,68, kdežto maximální bezrozměrová rychlost proudění,

spočítaná v této práci, je 1,36. Při detailnějším zkoumání je možné pozorovat, že počáteční a koncové hodnoty bezrozměrových rychlostí jsou velmi podobné. Stejně tak průběh křivek (růst a pokles) je velmi podobný. Při zanedbání hodnot maximálních bezrozměrových rychlostí proudění jsou oba grafy velmi podobné.

Pokud se porovná grafický výsledek rychlosti proudění této práce, zobrazený na obrázku 46, s grafickým výsledkem studie [2], který je zobrazen na obrázku 48, tak je patrné, že výsledky jsou mírně odlišné, zejména v poloze odtržení mezní vrstvy na vnitřní straně difuzoru.



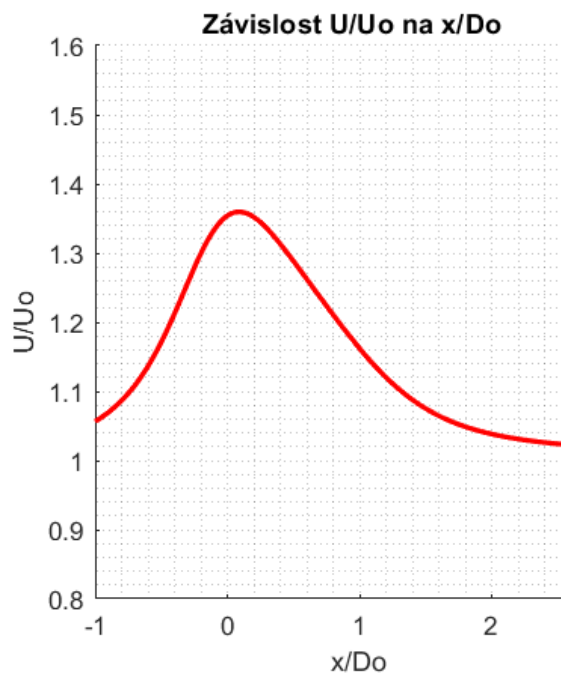
Obr. 48: Grafické znázornění rychlosti proudění studie - převzato z [2]

Před vyhodnocením správnosti řešení úlohy je vhodné zabývat se tím, co způsobilo rozdíl v maximálních bezrozměrových rychlostech proudění. Příčina může být způsobena třemi faktory, rozdílnou počáteční rychlostí proudění, příliš hrubou výpočetní sítí anebo rozdílem ve velikostech difuzorů. Je nutné se těmito faktory zabývat a zkoumat jejich vliv na výsledek bezrozměrové rychlosti proudění.

## 12.5 Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6 \text{ m/s}$

Jako první se ověří, zda rozdíl v bezrozměrových rychlostech proudění není způsoben jinou počáteční rychlostí proudění. Při řešení této úlohy je použita počáteční rychlost proudění stejná, jako je ve výchozí studii [2]. Tedy oproti předchozí úloze se zvýší pouze počáteční rychlost proudění, přičemž se rovnou použije modifikovaná výpočetní síť, tudíž počet elementů výpočetní sítě ani součinitel  $Y^+$  se nezmění. Dílní výsledky simulace nyní nejsou důležité, podstatný je pouze graf zobrazující závislosti bezrozměrových veličin. V grafu 13 je zobrazena závislost bezrozměrové rychlosti proudění na bezrozměrové poloze při počáteční rychlosti proudění 6 m/s.





Graf 13: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro  $U_0 = 6 \text{ m/s}$

Z porovnání grafu 12 s grafem 13 je patrné, že křivky obou závislostí jsou naprosto stejné co do tvaru průběhu křivek, tak ale i co do dosahovaných hodnot bezrozměrové rychlosti. Nenastala ale situace, kdy by se graf 13 více přiblížil ke grafu 11 (graf ze studie), z čehož vyplývá, že změna počáteční rychlosti proudění nemá vliv na výsledek bezrozměrové závislosti.

To, že graf 13 vyšel totožný s grafem 12, má ale i pozitivní dopad na vyhodnocení správnosti výsledků CFD simulací. Vzhledem k tomu, že došlo ke změně počáteční rychlosti proudění, ale nedošlo ke změně závislosti bezrozměrové rychlosti na bezrozměrové poloze, je možné výsledky simulace s vyšší rychlostí brát jako další část verifikace. Kdyby průběh těchto grafů byl významně odlišný, značilo by to problém ve správnosti výsledku jedné ze simulací.

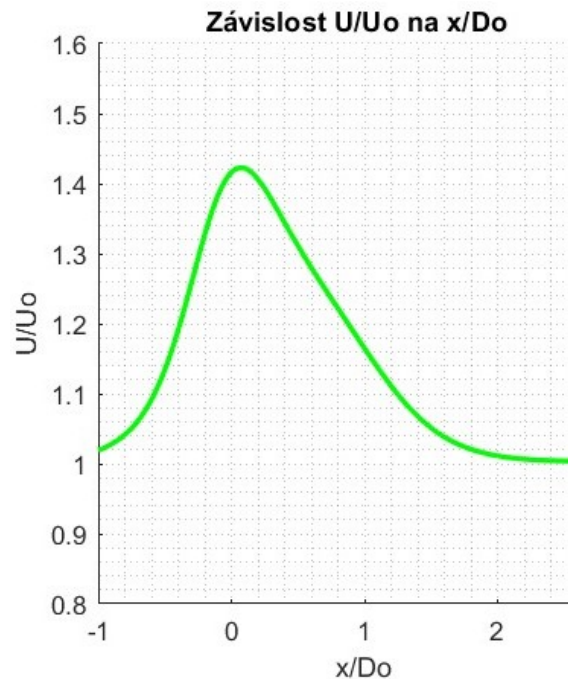
## 12.6 Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6 \text{ m/s}$ při dalším zjemnění výpočetní sítě

V následujícím kroku se provede další zjemnění výpočetní sítě, aby to ale vzhledem k omezené kapacitě studentské verze softwaru ANSYS FLUENT bylo možné, je nutné zmenšit výpočetní oblast. Přičemž rozměry difuzoru jsou stále stejné a použitá počáteční rychlost proudění je  $6 \text{ m/s}$ .

Výsledné rozměry výpočtové oblasti po zmenšení jsou  $1,7 \text{ m}$  na  $1 \text{ m}$ . Ačkoli se výpočtová oblast výrazně zmenšila, tak s ohledem na rozměry difuzoru, efekt blokace proudu nehrozí.

Zjemnění výpočetní sítě se provádí při zachování její struktury s předchozími sítěmi. Velikost elementu základní (hrubé) sítě je nastavena na  $4 \text{ mm}$  oproti předchozím  $5,5 \text{ mm}$ . Poloměr kruhové plochy je  $350 \text{ mm}$  oproti předchozím  $700 \text{ mm}$ , velikost elementu v této kruhové ploše je nastavena  $0,7 \text{ mm}$  oproti předchozím  $1,5 \text{ mm}$ . Poloha středu kruhové plochy je posunuta o  $200 \text{ mm}$  vůči počátku úlohy. Počet elementů této výpočetní sítě je  $1027347$ , hodnota součinitele  $Y^+$  je  $0,37$ .

Potřebným výsledkem CFD simulace této úlohy je opět pouze závislost bezrozměrové rychlosti na bezrozměrové poloze, která je zobrazena v grafu 14.



Graf 14: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro  $U_0 = 6$  m/s při dalším zjemnění výpočetní sítě

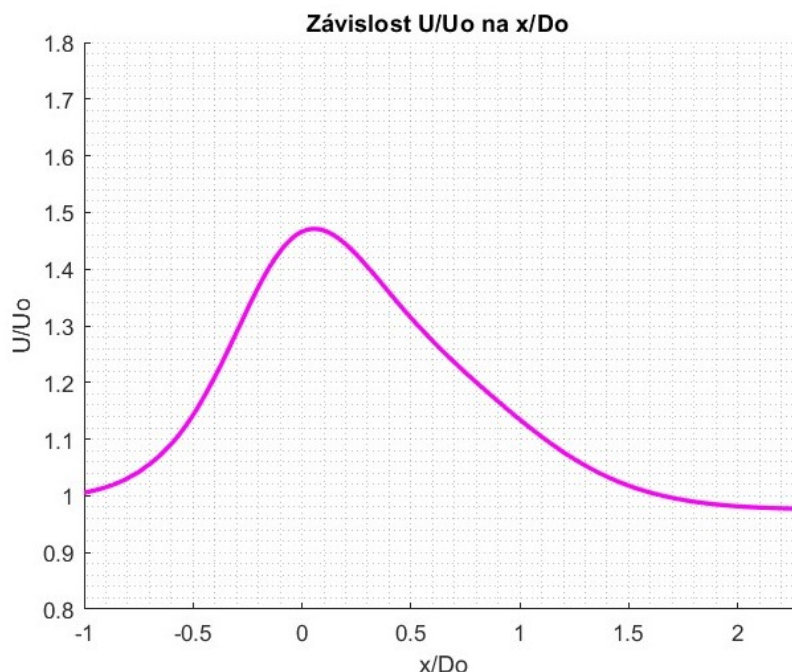
Při porovnání grafu 14 s grafem 12 je patrný malý nárůst maximální hodnoty bezrozměrové rychlosti, jejíž hodnota je 1,42. Zvýšení této hodnoty je ale pouze o 0,06, tedy ani touto úpravou se nedosáhlo přiblížení závislosti z grafu 11 (graf ze studie). Zjemnění výpočetní sítě přineslo zlepšení, byť jen malé, ale další zjemnění již není možné z důvodu omezené kapacity studentské verze softwaru ANSYS FLUENT.

## 12.7 Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro $U_0 = 6$ m/s při trojnásobném zvětšení difuzoru

V posledním kroku, který cílí na objasnění rozdílných hodnot bezrozměrových rychlostí, je zvětšení difuzoru na trojnásobek jeho stávající velikosti a zároveň zmenšení výpočetní oblasti pro získání jemnější výpočetní sítě.

Difuzor je trojnásobně zvětšen, a tedy jeho nejmenší průměr dosahuje hodnoty 600 mm. Rozměry výpočetní oblasti po zmenšení jsou 2,3 m na 1,5 m. Výpočetní síť má stejnou strukturu jako předchozí síť. Velikost elementu základní sítě je nastavena na 4,5 mm. Poloměr kruhové plochy je 700 mm, velikost elementu v této kruhové ploše je nastavena na 1,5 mm. Poloha středu kruhové plochy je posunuta o 350 mm vůči počátku úlohy. Kolem stěn difuzoru je 10 vrstev jemné výpočetní sítě. Počet elementů takovéto výpočetní sítě je 988651, hodnota součinitele  $Y^+$  je 0,76.

Výsledná závislost bezrozměrové rychlosti na bezrozměrové poloze tohoto výpočtu je zobrazena v grafu 15.



Graf 15: Výsledky CFD simulace difuzoru s profilem ve tvaru křídla pro  $U_0 = 6$  m/s při trojnásobném zvětšení difuzoru

Maximální hodnota bezrozměrové rychlosti z grafu 15 je 1,47. Opět došlo ke zvýšení hodnoty bezrozměrové rychlosti. Ve srovnání s grafem 12 se navýšila bezrozměrová rychlost o 0,11, a to již je nezanedbatelný rozdíl. Z výsledků tohoto výpočtu je zřejmé, že zvětšení difuzoru a zjemnění výpočetní sítě způsobilo významný nárůst bezrozměrové rychlosti. Další zjemnění výpočetní sítě již není možné kvůli omezené kapacitě studentské verze softwaru ANSYS FLUENT.

## 12.8 Shrnutí výsledků simulací difuzorů s profilem ve tvaru křídla

Na základě výsledků a zjištění, které byly získány při řešení několika variant této úlohy (kapitoly 12.1 až 12.7), je vhodné shrnout získané poznatky a posoudit správnost výsledků pro difuzor s profilem ve tvaru křídla z kapitoly 12.3 *Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí pro  $U_0 = 5$  m/s*.

Z výsledků vyplynulo, že zvýšení počáteční rychlosti proudění nemá vliv na výsledky po převedení veličin do bezrozměrových tvarů. Dále bylo zjištěno, že zjemnění výpočetní sítě má vliv na přesnost výsledků CFD simulací tohoto difuzoru. Také se ukázalo, že zvětšení velikosti difuzoru spolu se zjemněním výpočetní sítě má rovněž vliv na hodnoty výsledků simulací.

S ohledem na získané hodnoty jsou výsledky simulace z kapitoly 12.3 *Simulace proudění kolem difuzoru s profilem ve tvaru křídla s modifikovanou výpočetní sítí pro  $U_0 = 5$  m/s* hodnoceny jako přijatelné, a proto jsou v následující části práce za správné výsledky považovány právě tyto údaje. Je však nutné přihlídnout k faktu, že tyto výsledky jsou limitovány omezenou studentskou verzí softwaru.

### 13 Přehled počtu elementů a součinitelů Y+ výpočetních sítí

V tabulce 5 jsou souhrnně uvedeny počty elementů výpočetní sítě pro všechny řešené úlohy. Pro každou výpočetní síť je také uvedena hodnota součinitele Y+. U úlohy difuzoru s profilem ve tvaru křídla jsou dále uvedeny hodnoty pouze varianty úlohy, která je považována za správnou, tj. hodnoty z kapitoly 12.3.

Tab. 5: Přehled počtu elementů a součinitelů Y+ výpočetních sítí

Varianta úlohy	Počet elementů výpočetní sítě	Součinitel Y+
$h/D = 0$	840420	1,61
$h/D = 0,125$	843315	1,33
$h/D = 0,25$	833197	1,15
$h/D = 0,5$	835715	0,99
$h/D = 0,5$ modifikovaná výpočetní síť	1045619	0,87
Difuzor s profilem ve tvaru křídla	681036	1,70
Difuzor s profilem ve tvaru křídla modifikovaná výpočetní síť	1041114	1,33

## 14 Porovnání získaných výsledků přírubových difuzorů s výsledky difuzoru s profilem ve tvaru křídla

Srovnáním výsledků jednotlivých difuzorů lze porovnávat výhody a nevýhody jednotlivých variant difuzorů a hodnotit jejich vhodnost pro použití v tunelových větrných turbínách. Za tímto účelem jsou v tabulce 6 vypsány hodnoty maximální dosažené rychlosti proudění v ose difuzoru a hodnoty součinitele odporu pro jednotlivé difuzory.

Tab. 6: Porovnávané veličiny difuzorů

Varianta difuzoru	Maximální dosažená rychlost proudění [m/s]	Hodnota odporového součinitele [-]
$h/D = 0$	6,72	0,34
$h/D = 0,125$	7,42	1,02
$h/D = 0,25$	7,44	1,80
$h/D = 0,5$	7,39	3,79
S profilem ve tvaru křídla (kapitola 12.3)	6,78	0,65

Z hlediska zvyšování výkonu větrné turbíny je nejdůležitější zvýšení rychlosti proudění vzduchu před turbínou, ale nelze opomenout silové působení větru na difuzor, a tedy i na nosnou konstrukci větrné elektrárny. Podrobné porovnání jednotlivých variant přírubových difuzorů již bylo provedeno v předešlé kapitole, je však vhodné hlavní poznatky shrnout v kontextu s difuzorem s profilem ve tvaru křídla. Z hlediska maximální dosažené rychlosti větru jsou nejučinnější přírubové difuzory, nutno však podotknout, že zvyšování výšky příruby zprvu přináší zvýšení maximální rychlosti proudění, které není nijak výrazné, ale po překročení jisté hranice výšky příruby naopak maximální rychlost proudění začne klesat, přičemž tento pokles rovněž není výrazný. Naopak jakékoliv zvýšení výšky příruby vyvolá značné navýšení odporového součinitele. Co se týká difuzoru s profilem ve tvaru křídla, tak je zřejmé, že tato geometrie difuzoru dokáže zvýšit rychlost proudění, jelikož počáteční rychlost proudění byla 5 m/s a maximální 6,78 m/s. Toto urychlení není ale nijak markantní, jelikož je srovnatelné se zrychlením kuželového difuzoru bez příruby, zároveň však dosahuje téměř dvojnásobného navýšení součinitele odporu.

Ze všech pěti zkoumaných variant difuzorů vychází jako nejvýhodnější, pro použití do tunelových větrných turbín, přírubový difuzor varianty  $h/D = 0,125$ , jelikož dosahuje dobrého zvýšení maximální rychlosti proudění při poměrně nízkém součiniteli odporu. Výhodou tohoto difuzoru a obecně všech zde uváděných přírubových difuzorů je jejich jednoduchý tvar.

Nejméně vhodnou variantu difuzoru pro využití ve větrných turbínách nelze stanovit jednoznačně. Na jednu stranu, difuzor s profilem ve tvaru křídla dosahuje nízkého urychlení proudění při navýšení odporového součinitele, avšak tento difuzor je mnohem geometricky složitější v porovnání s přírubovými difuzory. Na druhou stranu ani přírubový difuzor s nejvyšší přírubou není příliš vhodný, přestože dosahuje velmi dobrého urychlení proudění, tak ale také dosahuje nejvyššího odporového součinitele ze všech zkoumaných difuzorů, a bude tedy také nejvíce zatěžovat nosnou konstrukci větrné elektrárny při náporu větru.

## 15 Závěr

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním rychlosti proudění vzduchu kolem různých tvarů difuzorů, pro využití v malých větrných elektrárnách, za účelem zvýšení výkonu větrných elektráren.

V teoretické části práce je uveden stručný přehled základních pojmů, shrnut dosavadní vývoj v této oblasti a popsán matematický model pro CFD výpočet proudění.

V praktické části byla provedena CFD simulace proudění kolem různých geometrií difuzorů a bylo zkoumáno, zda konstrukce typu difuzoru umístěná kolem větrné turbíny může zvýšit proudění vzduchu před turbínou a zvýšit tak výkon větrné turbíny. CFD simulace byly provedeny pomocí studentské verze softwarových řešení společnosti ANSYS, která pro studijní využití poskytuje studentský balíček potřebných programů.

Daná problematika je řešená od návrhu geometrie difuzoru, přes tvorbu výpočetní sítě, až po spuštění a vyhodnocení simulací. Všechny prováděné simulace jsou řešené jako axisymetrické a dvourozměrné. Součástí práce je také verifikace a validace získaných výsledků.

Metodika CFD byla aplikována na jeden kuželový difuzor bez příruby, dále na tři kuželové difuzory s rozdílnou výškou příruby a na jeden difuzor s profilem ve tvaru křídla. Výsledky CFD simulací proudění kolem těchto difuzorů ve všech případech ukázaly, že difuzor dokáže zvýšit proudění vzduchu. Již samotný kuželový difuzor bez příruby dokáže navýšit rychlost proudění vzduchu, umístění příruby na výstupní stranu difuzoru pak toto zrychlení učiní ještě markantnější. S rostoucí výškou příruby se již maximální dosahovaná rychlost proudění zvyšuje jen nepatrně a po překročení určité hranice naopak klesá. Výška příruby má však značný vliv na průběh rychlosti proudění vzduchu po délce difuzoru. Se zvyšující se výškou příruby dojde ale k výraznému zvýšení součinitele odporu, a tedy i silového působení náporu větru na difuzor, tím i na nosnou konstrukci větrné elektrárny. V případě difuzoru s profilem ve tvaru křídla, který využívá dobrých aerodynamických vlastností leteckého profilu, se sice ukázalo, že tato koncepce dokáže urychlit rychlost proudění vzduchu v difuzoru, ale maximální dosažená rychlost proudění je srovnatelná s difuzorem bez příruby, a tedy je nižší než v případě přírubových difuzorů.

Nelze však vyvodit závěr, že difuzory vybavené přírubou jsou vhodnější pro využití v tunelových větrných turbínách než difuzory s profilem ve tvaru křídla. Proudění bylo zkoumáno pouze kolem jedné geometrie difuzoru s profilem ve tvaru křídla, ale nebyly uvažovány jiné varianty. Geometrii difuzoru s profilem ve tvaru křídla, která je použita v této práci, lze modifikovat různými tvarovými úpravami, načež vznikne nepřeberné množství tvarových řešení difuzoru, přičemž každá modifikace bude mít větší či menší vliv na výsledné vlastnosti proudění.

Z provedených CFD simulací lze vyvodit, že difuzor dokáže zvýšit rychlost proudění vzduchu, je ale potřeba se dále zabývat dalším výzkumem v této oblasti. Prováděné simulace v této práci byly zaměřeny na prvotní zkoumání využití difuzoru ve větrné energetice a nebyla tak uvažována přítomnost samotné větrné turbíny uvnitř difuzoru. Proto je třeba se dále zabývat i CFD simulacemi úloh, ve kterých již přítomnost turbíny bude zohledněna, a zkoumat vliv přítomnosti turbíny na vlastnosti proudění vzduchu v difuzoru. Proto je nadále široký prostor pro další výzkum a vývoj tunelových větrných turbín, které představují perspektivní cestu k účinnějšímu využití větrné energie.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠKORPÍK, Jiří. *Proudění plynu a par difuzory*. Online. Transformační technologie (transformacni-technologie.cz; fluid-dynamics.education; turbomachinery.education; engineering-sciences.education; stirling-engine.education). Duben 2016, Červen 2023 (2. vydání). ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://fluid-dynamics.education/proudeni-plynu-a-par-difuzory.html>. [citováno 2023-11-28].
- [2] LELOUDAS, Stavros N.; LYGIDAKIS, Georgios N.; ESKANTAR, Alexandros I. a NIKOLOS, Ioannis K. *A robust methodology for the design optimization of diffuser augmented wind turbine shrouds*. Online. Renewable Energy, May 2020, Vol. 150, s. 722-742. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.098>. [citováno 2023-11-28].
- [3] INFORMAČNÍ PORTÁL ENERGETICKÉ GRAMOTNOSTI. *Větrné elektrárny*. Online. Dostupné z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/vetrne-elektrarny#article-top>. [citováno 2024-01-10].
- [4] OHYA, Yuji; KARASUDANI, Takashi; SAKURAI, Akira; ABE, Ken-ichi a INOUE, Masahiro. *Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser*. Online. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, May 2008, Vol. 96, No. 5, s. 524-539. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.01.006> [citováno 2023-11-28].
- [5] HANSLIAN, David. *Větrné podmínky pro malé větrné elektrárny* Online. In: TZB info, 12.3.2012. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/8358-vetrne-podminky-pro-male-vetrne-elektrarny>. [citováno 2023-12-04].
- [6] Balasem Abdulameer Jabbar Al-quraishi; Norzela Asmuin; Nurul Fitriah Nasir; Noradila Abdul Latif; Wisam Abd al-wahid et al. *CFD Investigation of Empty Flanged Diffuser Augmented Wind Turbine*. Online. INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING, Vol. 12, No. 3 (2020), s. 22-32, © Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's Office, ISSN: 2229-838X, e-ISSN: 2600-7916. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/338294425\\_CFD\\_Investigation\\_of\\_Empty\\_Flanged\\_Diffuser\\_Augmented\\_Wind\\_Turbine](https://www.researchgate.net/publication/338294425_CFD_Investigation_of_Empty_Flanged_Diffuser_Augmented_Wind_Turbine). [citováno 2024-01-05].
- [7] ABE, Ken-ichi a OHYA, Yuji. *An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD*. Online. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, March 2004, Vol. 92, No. 3 - 4, s. 315-330. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2003.12.003>. [citováno 2024-01-02].
- [8] SVĚT ENERGIE VZDĚLÁVACÍ PORTÁL ČEZ. *Větrná elektrárna*. Online. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie-pro-deti/vetrna-energie-pro-deti/vetrna-elektrarna/jak-jsou-velke>. [citováno 2023-12-06].
- [9] THE GREENAGE. *Introduction To Wind Turbines*. Online. Dostupné z: <https://www.thegreenage.co.uk/tech/introduction-to-wind-turbines/>. [citováno 2024-01-30].
- [10] OHYA, Yuji a KARASUDANI, Takashi. *A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-Lens Technology*. Online. Energies, 2010, 3(4), s. 634-649. Dostupné z: <http://doi.org/10.3390/en3040634> [citováno 2024-01-11].
- [11] RAMAYEE, Lm. a SUPRADEEPAN, K. *Performance evaluation of cowl-augmented wind turbine*. Online. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 03. January 2021, Vol. 43, No. 42, DOI:10.1007/s40430-020-02725-4. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/348177864\\_Performance\\_evaluation\\_of\\_cowl-augmented\\_wind\\_turbine](https://www.researchgate.net/publication/348177864_Performance_evaluation_of_cowl-augmented_wind_turbine). [citováno 2024-01-25].

- [12] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence modelování proudění – CFX, učební text*. Online. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2606-6. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FS/Tur/Turbulence.pdf>. [citováno 2024-01-26].
- [13] KLIMKO, Marek. *Učební texty pro cvičení z Mechaniky tekutin I*. Online. Plzeň 2019. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kke/mt/studijni-materialy.html>. [citováno 2024-01-19].
- [14] ANSYS INNOVATION COURSES. *Introduction to Turbulence Modeling in Ansys Fluent-Lesson 1*. Online. Dostupné z: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/turbulence-modeling-in-ansys-fluent/lessons/introduction-to-turbulence-modeling-in-ansys-fluent-lesson-1/>. [citováno 2024-01-28].
- [15] ANSYS. *Ansys Fluids Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation Software*. Online. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids>. [citováno 2024-01-25].
- [16] HIBŠ, Miroslav. *Podzvukové difuzory*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1985. Typové číslo L13-B3-V-41/22725.
- [17] ADEON. *Autodesk Simulation CFD*. Online. Dostupné z: <https://www.adeon.cz/katalog/autodesk/cfd/>. [citováno 2024-03-16].
- [18] BUZÍK, Jiří; LÉTAL, Tomáš a JEGLA, Zdeněk. *Význam metod verifikace a validace výsledků z CFD analýz při výpočtech vibrací vyvolaných prouděním pro návrh zařízení na výměnu tepla*. Online. All for Power, 9.6.2017. ISSN 1802-8535. Dostupné z: <http://old.allforpower.cz/clanek/vyznam-metod-verifikace-a-validace-vysledku-z-cfd-analyz-pri-vypoctech-vibraci-vyvolanych-proudenim-pro-navrh-zarizeni-na-vymenu-tepla/>. [citováno 2024-03-16].
- [19] MATFOUNI, N. a TAGHADDOSI, M. *A CFD study of a flanged shrouded wind turbine: Effects of different flange surface types on output power*. Scientia Iranica. January and February 2022, Vol. 29, No. 1, s.101-108. Dostupné z: <https://doi.org/10.24200/sci.2021.57513.5278>. [citováno 2024-03-17].
- [20] MR CFD. *Y-Plus Application in CFD Simulation*. Online. Dostupné z: <https://www.mrcfd.com/y-plus-application-in-cfd-simulation/>. [citováno 2024-03-30].
- [21] CFD Online. *Near-wall treatment for k-omega models*. Online. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Near-wall\\_treatment\\_for\\_k-omega\\_models](https://www.cfd-online.com/Wiki/Near-wall_treatment_for_k-omega_models). [citováno 2024-04-06].
- [22] ANSYS. *Y+ value for K Omega SST Model*. Online. Dostupné z: <https://forum.ansys.com/forums/topic/y-value-for-k-omega-sst-model/>. [citováno 2024-04-13].
- [23] EVROPSKÝ PARLAMENT. *Zelená dohoda pro Evropu: Cesta k ekologické EU*. Online. 25.06.2020, aktualizováno 21.11.2023. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20200618STO81513/zelena-dohoda-pro-evropu-cesta-k-ekologicke-eu>. [citováno 2024-05-17].
- [24] EVROPSKÝ PARLAMENT. *Jak zmírnit změny klimatu: řešení EU*. Online. 07.08.2018, aktualizováno 21.11.2023. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20180703STO07129/jak-zmirnit-zmeny-klimatu-reseni-eu>. [citováno 2024-05-17].



[25] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu*. 20.10.2023. Online. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/aktualizace-vnitrostatniho-planu-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--277532/>. [citováno 2024-05-17].

[26] ČESKÁ SPOLEČNOST PRO VĚTRNOU ENERGII. *Evropská unie urychlí výstavbu větrníků, jejich počet se bude násobit i v Česku*. 22.12.2023. Online. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/evropska-unie-urychli-vystavbu-vetrniku-jejich-pocet-se-bude-nasobit-i-v-cesku-n/583>. [citováno 2024-05-17].