

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH ZTRÁT
V POTRUBÍ VE 3D

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

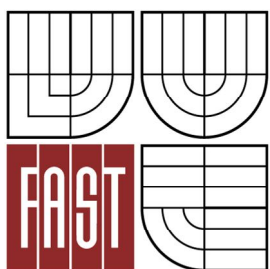
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. EVA KACÁLKOVÁ

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH ZTRÁT V POTRUBÍ VE 3D

NUMERICAL MODELLING OF ENERGY LOSSES IN PIPES IN 3D

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. EVA KACÁLKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN JANDORA, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Eva Kacálková
Název	Numerické modelování hydraulických ztrát v potrubí ve 3D
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J., PATOČKA, C. 1968. Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL, Praha.
- ČIHÁK, F., VALENTA, P., VANĚČEK, S., ZEMAN, E. 1991. Automatizace inženýrských úloh. ČVUT, Praha.
- KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. 1983. Hydraulika. SNTL/ALFA, Praha.
- RODI, W. 1980. Turbulence models and their application in hydraulics. International Association for hydraulic research, state-of-the-art paper, Delft.
- JANDORA, J. 2008. Matematické modelování ve vodním hospodářství. VUT v Brně.

Zásady pro vypracování

V diplomové práci bude nejprve provedena rešerše prací zabývajících se problémem matematického modelování ztrát vody v potrubí. Poté bude následovat vlastní numerického modelování ztrát vody v potrubí ve 3D. K řešení bude použito dostupných programů na Ústavu vodních staveb.

Pomocí numerických simulací s různými modely turbulence budou určeny součinitele místních ztrát a součinitele ztrát třením po délce.

Práce bude obsahovat:

- Úvod
- Ztráty vody v potrubí
- Matematické a numerické modelování proudění vody
- Výsledky řešení
- Závěr

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá numerickým modelováním hydraulických ztrát v potrubí ve 3D. Ukazuje postup tvorby matematického modelu, používané matematické rovnice a numerické metody jejich řešení. V praktické části je teorie využita na tvorbu modelu potrubí a jeho hydraulických ztrát za použití různých turbulentních modelů.

Abstract

The bachelor's thesis deals with numerical modelling of energy losses in pipes in 3D. It shows the process of creation of mathematical model, used mathematical equations and numerical methods of their solution. The theory is applied on the creation of pipe model and their energy losses with using different turbulent models.

Klíčová slova

Potrubí, numerické modelování, 3D, ztráty, ztrátový součinitel, turbulentní model, Ansys.

Key words

Pipes, numerical modelling, 3D, energy losses, dissipation coefficient, turbulent model, Ansys.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Eva Kacálková *Numerické modelování hydraulických ztrát v potrubí ve 3D*. Brno, 2016. 147 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4.1.2016

.....
podpis autora
Bc. Eva Kacálková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala všem, kteří mi přispěli svým přístupem a poskytli cenné informace pro vypracování závěrečné práce, zvláště doc. Ing. Janu Jandorovi, Ph.D. za vedení práce a Ing. Davidu Duchanovi, Ph.D. za pomoc při práci s počítačovými programy.

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	USTÁLENÉ TLAKOVÉ PROUDĚNÍ VODY V POTRUBÍ	4
2.1	Ztráty mechanické energie	4
2.2	Ztráty třením	5
2.2.1	Součinitel tření.....	6
2.3	Místní ztráty	6
2.3.1	Náhlé rozšíření průřezu	6
2.3.2	Kónické rozšíření průřezu	7
2.3.3	Náhlé zúžení průřezu.....	8
2.3.4	Kónické zúžení průřezu.....	8
3	MODELOVÁNÍ IZOTERMICKÉHO USTÁLENÉHO POHYBU NESTLAČITELNÉ KAPALINY	10
3.1	Matematická formulace proudění	10
3.1.1	Navier-Stokesovy rovnice a rovnice spojitosti.....	11
3.1.2	Reynoldsovy rovnice a rovnice spojitosti	11
3.1.3	Okrajové podmínky.....	12
3.2	Numerické řešení – metoda konečných prvků	12
4	TURBULENTNÍ MODELY	14
4.1	ALGERBAICKÉ (0 – ROVNICOVÉ) MODELY	14
4.2	k-ε MODEL	15
4.2.1	Standardní k - ε model.....	15
4.2.2	RNG k - ε model	16
4.3	k-ω model	17
4.3.1	Standardní (Wilcoxův) k - ω model.....	18
4.4	NKE TURBULENTNÍ MODEL	18
4.5	GIR TURBULENTNÍ MODEL	19
4.6	SZL TURBULENTNÍ MODEL	20
5	NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VE 2D	22
5.1	Postup při numerickém modelování ve 2D	22
5.1.1	Pre-processing.....	23
5.1.2	Solution (řešení).....	24

5.1.3	Post-processing	25
5.2	Náhlé zúžení	25
5.3	Kónické zúžení	36
5.4	Náhlé rozšíření	50
5.5	Kónické rozšíření	62
6	NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VE 3D.....	76
6.1	Postup při numerickém modelování ve 3D	76
6.1.1	Kreslení a tvorba geometrie.....	76
6.1.2	Tvorba výpočtové sítě	77
6.1.3	Nastavení okrajových podmínek	79
6.1.4	Řešič	81
6.1.5	Výstupy	81
6.2	Náhlé zúžení	82
6.3	Kónické zúžení	95
6.4	Náhlé rozšíření	109
6.5	Kónické rozšíření	122
7	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ	135
7.1	Porovnání jednotlivých turbulentních modelů	135
7.1.1	Modely ve 2D	135
7.1.2	Modely ve 3D	135
7.2	Porovnání výsledků 2D a 3D modelování.....	136
7.3	Porovnání náhlé a kónické změny průřezu	136
7.3.1	Zúžení.....	137
7.3.2	Rozšíření.....	137
8	ZÁVĚR.....	138
9	POUŽITÁ LITERATURA	139
10	SEZNAM TABULEK	140
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	142

1 ÚVOD

Cílem této práce je numerické modelování proudění vody v potrubí, určení součinitelů místních ztrát a součinitelů ztrát třením po délce z numerických modelů a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v literatuře.

Teoretická část v první části uvádí jednotlivá potrubí, jejich geometrii a součinitele ztrát, a to jak součinitele ztrát místních, tak i ztrát třením po délce. Následují rovnice pro výpočet ztrát v potrubí. Dále je uvedena matematická formulace proudění vody a numerické modelování v programu Ansys. V další části jsou uvedeny jednotlivé turbulentní modely společně s rozdíly mezi jednotlivými použitými modely.

Praktická část práce je rozdělena do dvou částí. V první části je nastíněn postup modelování ve 2D v programu Ansys Flotran. Dále následuje prezentace jednotlivých výsledků získaných z programu Ansys Flotran a výsledků počítaných dle hodnot uváděných v literatuře. Ve druhé části je uveden postup modelování ve 3D v programu Ansys Workbench. Následuje prezentace jednotlivých výsledků získaných z programu Ansys CFX a výsledků počítaných dle hodnot uváděných v literatuře.

V závěru práce jsou:

- porovnány jednotlivé turbulentní modely ve vztahu ke ztrátám v potrubí,
- porovnány výsledky modelování ve 2D a 3D za použití stejných turbulentních modelů,
- porovnány velikosti ztrát při použití stejných průměrů potrubí při použití náhlé a kónické změny průřezu.

2 USTÁLENÉ TLAKOVÉ PROUDĚNÍ VODY V POTRUBÍ

Při proudění vody v potrubí vznikají ztráty mechanické energie. Potrubím v tomto případě rozumíme zařízení na dopravu kapaliny [1].

Podle závislosti veličin tekutiny na čase můžeme proudění rozdělit na **ustálené** (stacionární), kdy jsou veličiny kapaliny v daném místě kapaliny na čase nezávislé a **neustálené** (nestacionární), kdy jsou veličiny kapaliny v daném místě kapaliny na čase závislé [2].

Při tlakovém proudění je zde dominantní vliv tlakového gradientu a nezáleží na sklonu potrubí. Typické příklady tlakového proudění jsou například spodní výpusti přehrad [3].

Dle hydraulického hlediska dělíme potrubí na:

- tlakové potrubí (vodovodní potrubí, tlakové přivaděče, závlahová potrubí,...);
- potrubí s volnou hladinou (kanalizační stoky, drenážní potrubí...), které se hydraulicky nijak neliší od otevřených koryt, a proto i jejich výpočet bude stejný [1].

2.1 ZTRÁTY MECHANICKÉ ENERGIE

Ztrát mechanické energie rozeznáváme v podstatě dva druhy [1].

Ztráta třením vzniká v celé délce proudu třením mezi jednotlivými vrstvami vazké kapaliny a třením kapaliny o pevné stěny vedení proudu. Ztráta třením je tedy úměrná délce proudu.

Místní ztráty vznikají deformací rychlostního pole (rozložení vektoru bodové rychlosti napříč profilem), tedy např. rozšířením nebo zúžením proudu. Při proudění kapaliny takovými místy vznikne hlavní proud, jehož vymezení od ostatní kapaliny bývá často nestabilní. Stykem se sousedními pomalejšími částicemi vzniká snadno vírová plocha. Vazkostí a deformací proudu se pohyb vzniklých vírů brzdí a část mechanické energie přechází v jinou. Tato disipace části mechanické energie je vlastní podstatou místních ztrát, ačkoliv zde samozřejmě přistupuje i tření [1].

Ztráty můžeme vyjádřit z Bernoulliho rovnice v proudu skutečné kapaliny

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_z \quad (2.1)$$

po úpravě pak:

$$h_z = \left(h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (2.2)$$

Celkovou ztrátu h_z dostaneme složením jednotlivých ztrát, jež se provede sečtením.

$$h_z = \sum h_t + \sum h_m, \quad (2.3)$$

Kde $\sum h_t$ je součet všech ztrát třením na uvažovaném úseku a $\sum h_m$ součet všech ztrát místních. Velikost ztrát určujeme z měření, a to za ustáleného pohybu z (2.1) změřením

rozdílů geodetických výšek ($h_2 - h_1$), tlakových (piezometrických) výšek $\left(\frac{p_1 - p_2}{\rho g}\right)$ a rychlostních výšek $\left(\frac{\alpha v_1^2 - \alpha v_2^2}{2g}\right)$ na začátku a konci příslušného úseku. Na vodorovném potrubí stálého průřezu bude ztrátová výška dána rozdílem tlakových výšek ($v_1 = v_2$ a $h_1 = h_2$):

$$h_z = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}. \quad (2.4)$$

Ztráta třením a místní ztráta se obvykle vyjadřují jako část rychlostní výšky ve tvaru:

$$h_z = \kappa \frac{v_1^2}{2g}, \quad (2.5)$$

kde κ je součinitel příslušné ztráty [1].

2.2 ZTRÁTY TŘENÍM

Rovnice (2.6) je základní rovnice, která udává závislost mezi rychlostí rovnoměrného proudění a hydraulickým sklonem i . Tato rovnice byla původně odvozena pro otevřená koryta Chézým v roce 1775 a nazývá se podle autora Chézyho rovnice.

$$v = C \sqrt{R i}; \quad Q = A v = A C \sqrt{R i}, \quad (2.6)$$

Pro kruhové potrubí o poloměru r a průměru D hydraulický poloměr nabývá tvaru [1]:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{\pi r^2}{2 \pi r} = \frac{r}{2} = \frac{D}{4}. \quad (2.7)$$

Úpravou (2.6) obdržíme:

$$i = \frac{4}{C^2} \frac{1}{D} v^2. \quad (2.8)$$

Zavedeme-li označení:

$$\frac{4}{C^2} = \frac{\lambda}{2g}, \quad (2.9)$$

vyjádříme hydraulický sklon i a ztrátovou výšku h_z ve vztahu k rychlostní výšce $\frac{v^2}{2g}$

a součinitel λ jako bezrozměrné číslo. Pak obdržíme Darcy-Weisbachovu závislost [1]:

$$i = \lambda \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g}; \quad h_z = i L = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.10)$$

kde

- i hydraulický sklon [-],
- L délka daného úseku [m],
- λ součinitel tření [-],
- D průměr potrubí [m],

- v rychlost kapaliny [m/s],
 g tíhové zrychlení [m/s²].

Tato rovnice (2.10) je základní vztah pro výpočet ztráty třením při rovnoměrném proudění vody [6].

2.2.1 Součinitel tření

Součinitel tření (odporový součinitel) λ je v podstatě závislý na drsnosti potrubí, jeho průměru a hodnotě Reynoldsova kritéria (tedy na průřezové rychlosti, průměru potrubí a vazkosti kapaliny).

V celé oblasti turbulentního proudění platí pro technická potrubí Colebrook-Whiteova rovnice:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,7D} \right) \quad (2.11)$$

- kde Δ absolutní drsnost stěn
 λ součinitel tření
 D průměr potrubí

2.3 MÍSTNÍ ZTRÁTY

Místní ztráty vznikají všude tam, kde dochází k deformaci rychlostního pole.

Místní ztráty vyjadřujeme dle Weisbacha ve tvaru násobku rychlostní výšky [1]:

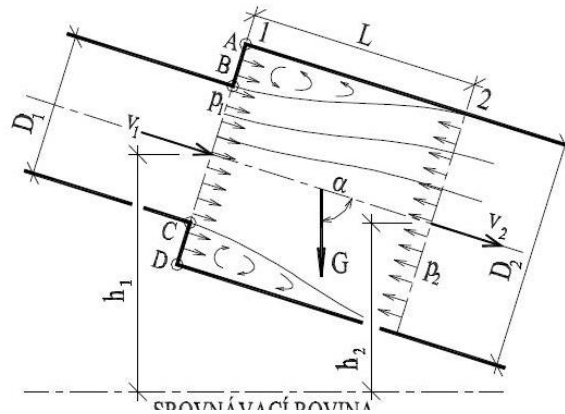
$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (2.12)$$

- kde v průřezová rychlost [m/s],
 ξ součinitel místní ztráty [-].

Součinitel místní ztráty ξ (např. součinitel ztráty rozšířením průřezu, kolenem, spojením proudů, šoupětem, vtokem, ...) je závislý na tvaru singularity (geometrickém uspořádání odporu), na drsnosti stěn, na rychlostním poli, na hodnotě Reynoldsova kritéria Re , atd. Nejvíce se vliv hodnoty Reynoldsova kritéria projevuje při malých hodnotách tohoto kritéria [1].

2.3.1 Náhlé rozšíření průřezu

Tato ztráta se nazývá ztráta Bordova. Vzniká při napojení potrubí o větším průměru D_2 na potrubí s menším průměrem D_1 v jednom místě (Obr. 1). Z průřezu 1 vytéká proud jako souvislý paprsek, mísí se s okolní kapalinou a uvádí ji do vířivého pohybu. Pozvolna se rozšiřuje, až v průřezu 2 zaujme celý průřez A_2 . Intenzivní víření vzniká v koutech za rozšířením [1].



Obr. 1 Náhlé rozšíření [1]

Ztráta náhlým rozšířením průřezu je dána rychlostní výškou rozdílu rychlostí v obou průřezích. Výraz odvodil Borda v roce 1766. Z rovnice spojitosti:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = v_3 A_3 \Rightarrow v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (2.13)$$

tedy vyjádříme:

$$h_{mr} = \frac{v_2^2}{2g} \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2. \quad (2.14)$$

Odporový součinitel ξ_{r2} (vztažený k rychlosti v průřezu „2“) tedy nabude tvar

$$\xi_{r2} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 = \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right)^2; \quad (2.15)$$

$$h_{mr} = \xi_{r2} \frac{v_2^2}{2g}. \quad (2.16)$$

2.3.2 Kónické rozšíření průřezu

Největší vliv na odpor má při kónickém rozšíření (Obr. 2 a) u daného poměru D_1/D_2 vrcholový úhel rozšíření 2δ a délka přechodu. Při vrcholovém úhlu $2\delta = 7$ až 9° nastávají minimální ztráty a maximální jsou při úhlu $2\delta = 65$ až 70° . Při úhlu $2\delta = 40$ až 50° je výhodnější použití náhlého rozšíření.

Vztah pro ztrátu kónickým rozšířením je dán vztahem:

$$h_{mrk} = \xi_{rk2} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (2.17)$$

kde ξ_{rk2} je součinitel ztráty kónickým rozšířením vztažený k průřezové rychlosti v_2 , pro který platí:

$$\xi_{rk2} = \psi \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right)^2. \quad (2.18)$$

Součinitel ψ (v závislosti na úhlu 2δ) je uveden v Tab. 1 [1].

Tab. 1 Součinitel Ψ pro výpočet ztráty kónickým rozšířením průřezu [1]

$2 \delta [^\circ]$	6°	8°	10°	12°	14°	16°	20°	25°	30°	40°	60°	90°	180°
ψ	0,08	0,11	0,15	0,19	0,23	0,27	0,36	0,50	0,65	0,92	1,15	1,10	1,00

2.3.3 Náhlé zúžení průřezu

Pro poměr ploch průřezů $n = \frac{S_2}{S_1} < 0,4$ jsou ztráty při náhlém zúžení (Obr. 2 b) menší než při náhlém rozšíření. Ztráta při náhlém zúžení je dána vztahem:

$$h_{mz} = \xi_{z2} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (2.19)$$

kde ξ_{z2} je součinitel ztráty náhlým zúžením průřezu:

$$\xi_{z2} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (2.20)$$

kde součinitel zúžení ε závisí na poměru $n = \frac{S_2}{S_1}$ podle vztahu [1]:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}. \quad (2.21)$$

2.3.4 Kónické zúžení průřezu

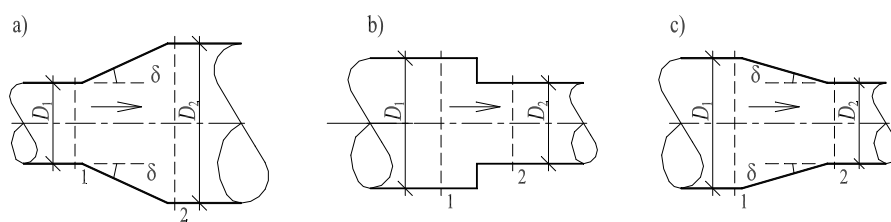
Ztráty při kónickém zúžení (Obr. 2 c) jsou poměrně nízké:

$$h_{mzk} = \xi_{zk2} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (2.22)$$

kde ξ_{zk2} je součinitel ztráty kónickým zúžením vztažený k průřezové rychlosti v_2 (Tab. 2) [1].

Tab. 2 Součinitel ztráty kónickým zúžením průřezu ξ_{zk2}

2δ	5°	7°	10°	15°	20°	30°	45°	60°	75°
ξ_{zk2}	0,06	0,12	0,16	0,18	0,20	0,24	0,30	0,32	0,34



Obr. 2 Změny průřezu potrubí [1]

3 MODELOVÁNÍ IZOTERMICKÉHO USTÁLENÉHO POHYBU NESTLAČITELNÉ KAPALINY

Obecně je pohyb tekutin v přírodě *neustálený* a *trojrozměrný*. Základní otázkou je určení rozdělení rychlostí a tlaku při pohybu tekutiny ve zkoumané oblasti.

Při řešení běžných praktických problémů jsme odkázáni na empirické metody, ale některé důležité technické problémy vyžadují znalost vlastností turbulentního proudění. Poznatky o turbulentním pohybu se vyvíjely jednak na základě výsledků dosažených experimentálními metodami a také na základě teoretických výsledků, které do hydrodynamiky zavedli koncem minulého století Reynolds a Boussinesq. Nyní se stále zdokonaluje původní Reynoldsova teorie tak, aby mohla sloužit za podklad k řešení těchto problémů.

Je vhodné podotknout, že pro izotermické proudění jsou neznámé:

- vektor rychlosti $v = [v_x, v_y, v_z]^T$ [m/s];
- tlak p [Pa],

tj. 4 neznámé a k dispozici jsou 4 rovnice (rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice). Je zřejmé, že soustava je uzavřena. Navier-Stokesovy rovnice popisující proudění kapaliny jsou obecně známé více jak 150 let. Tyto rovnice lze použít k tzv. přímé numerické simulaci (Direct Numerical Simulation - DNS), je však zapotřebí:

- dělení oblasti sítí s roztečí uzlů ve zlomcích milimetru;
- časový krok ve zlomcích sekundy;
- popsat počáteční podmínky a v každém časovém kroku okrajové podmínky.

Z tohoto pohledu není možné použít DNS pro modelování praktických úloh na fakultě. Proto je na řešení těchto Navier-Stokesových rovnic aplikován statistický přístup a Navier-Stokesovy rovnice jsou časově průměrovány. Pak tyto rovnice popisují vazby mezi středními hodnotami rychlosti a tlaku. Při průměrování rovnic se však otevřel nový problém, počet neznámých vzrostl na 8:

- 4 střední hodnoty složek rychlosti a tlaku ($\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z, \bar{p}$);
- 4 fluktuace složek rychlosti a tlaku (v'_x, v'_y, v'_z, p'),

ale rovnice zůstaly 4 (1 rovnice kontinuity a 3 Navier-Stokesovy rovnice pro střední hodnoty v čase, tedy tzv. Reynoldsovy rovnice). Systém je tedy otevřený, a lze ho uzavřít pouze zavedením dalších předpokladů, které spočívají ve vstupu empirických hodnot [4].

3.1 MATEMATICKÁ FORMULACE PROUDĚNÍ

V následujících odstavcích jsou uvedeny Navier-Stokesovy rovnice, rovnice kontinuity a Reynoldsovy rovnice. Rovinné proudění je aproximace obecného

třídídimenzionálního proudění. Tuto aproximaci lze s dostatečnou přesností použít v případech, kdy lze zanedbat jednu ze složek vektoru rychlosti (v tomto případě v_z) [4].

3.1.1 Navier-Stokesovy rovnice a rovnice spojitosti

Diferenciální rovnice Navier-Stokesovy jsou nejobecnější rovnice pohybu vazké nestlačitelné tekutiny s konstantní viskozitou ($\mu = \text{konst.}$). Vyjadřují pro jednotku hmotnosti protékající kapaliny vztah mezi silami vnějšími, tlakovými, odporovými a silami setrvačnými [4].

$$\begin{aligned} f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) &= \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}; \\ f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) &= \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}; \\ f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j \partial x_i} \right) &= \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}; \end{aligned} \quad (3.1)$$

S použitím rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

nabude (3.1) tvaru:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (3.3)$$

3.1.2 Reynoldsovy rovnice a rovnice spojitosti

Střední hodnoty a fluktuace okamžitých složek rychlosti, okamžitého tlaku a okamžité energie jsou [4]:

$$v_i = \bar{v}_i, \quad \bar{v}'_i = 0, \quad (3.4)$$

$$\bar{p} = \bar{p}; \quad \bar{p}' = 0. \quad (3.5)$$

$$\rho f_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^f}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j + \overline{v'_i v'_j})}{\partial x_j}, \quad (3.6)$$

kde

$$\tau_{ij}^f = \mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \cdot [\text{kg/m}^2\text{s} = \text{Pa}] \quad (3.7)$$

3.1.3 Okrajové podmínky

Stěnová podmínka

Na pevné stěně jsou střední hodnoty a flukтуаční složky rychlosti rovny 0. Z toho vyplývá, že stěna nepropouští proudící kapalinu a že na povrchu stěny ulpívají částice kapaliny. Naproti tomu disipace energie ε má na stěně konečnou nenulovou hodnotu.

Zadání stěnové podmínky vyžaduje integraci transportních rovnic napříč viskózní podvrstvou, to je však z následujících důvodů nevýhodné:

- strmé gradienty rychlostí ve viskózní podvrstvě vedou k volbě velkého počtu integračních bodů v této oblasti, aby se získalo uspokojivé řešení;
- v této vrstvě jsou dominantní síly viskozity a neplatí tedy modely turbulence odvozené pro vysoké hodnoty Reynoldsova kritéria.

Tuto integraci však lze ve viskózní vrstvě nahradit použitím dostatečně obecných empirických vztahů, které vyjadřují vztah sledované veličiny na stěně na hodnotách veličin ležících mimo viskózní podvrstvu.

Symetrická okrajová podmínka

Na osách nebo v rovinách symetrie jsou normálové gradienty všech veličin se symetrickým rozložením nulové. Nulový je tedy i jejich tok přes tuto hranici.

3.2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ – METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

U počátečních a okrajových podmínek byla použita metoda konečných prvků (MKP), která byla původně vyvinuta pro řešení úloh mechaniky deformovatelných těles. Základní kroky MKP lze shrnout do následujících bodů [4]:

1. Problém formuluje jako variační.
2. Oblast řešení Ω se rozdělí na konečný počet podoblastí nazývaných konečnými prvky. Každé dva prvky nemají společný žádný bod, nebo mají společný vrchol nebo stranu nebo stěnu (u 3D úloh).
3. Přibližné řešení se hledá na třídě funkcí, které jsou po prvcích daného dělení polynomy určitého typu a stupně (Lagrangeovy resp. Hermiteovy), resp. na lomené funkce (isoparametrické prvky).
4. Postupem, který je v MKP obvyklý, tj. pomocí kódových čísel se s přihlédnutím k okrajovým podmínkám z lokálních matic jednotlivých prvků sestaví výsledná matice soustavy a vektor pravé strany. Řešením soustavy rovnic se získají hodnoty neznámých parametrů v uzlech náhradní oblasti.

Výraznými výhodami MKP oproti starším numerickým metodám (metodě sítí, Ritzově metodě) jsou:

- algoritmus výpočtu není závislý na tvaru řešené oblasti, závisí pouze na typu elementu;
- při sestavení sítě konečných prvků není třeba dodržovat žádnou pravidelnou strukturu, síť je možné přizpůsobit tvaru řešené oblasti (včetně otvorů, zářezů, a nepravidelností) a očekávanému průběhu neznámé funkce;
- v místech, kde je toho zapotřebí, lze použít zahuštěné sítě, popřípadě síť kombinovanou z elementů různých typů;
- každý konečný prvek může mít obecně různé fyzikální vlastnosti, které je během výpočtu možné měnit na základě získaných mezivýsledků;
- matice soustavy algebraických lineárních rovnic je symetrická a pásová s dominantní diagonálou.

4 TURBULENTNÍ MODELY

Turbulentní modely mohou být klasifikovány dle různých hledisek. Následující hlediska jsou nejdůležitější pro uzavření Reynoldsových rovnic (3.6) a rovnice spjitosti pro nestlačitelnou kapalinu (3.2).

$$\rho f_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij}^f + \tau_{ij}^t)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2)$$

- způsob modelování neznámých korelací mezi flukтуаčními složkami rychlosti $(\bar{v}_i \bar{v}_j)$:
 - použitím Boussinesqovy aproximace (zavedení turbulentní viskozity);
 - modelováním korelací mezi flukтуаčními složkami rychlosti $(\bar{v}_i \bar{v}_j)$ - uzavření momentem druhého řádu (Reynoldsov model napětí);
- počet rovnic, které modelují μ_t :
 - 0 – rovnicové (algebraické) modely – model konstantní turbulentní viskozity, Prandtlův model směšovací délky, Prandtlův model volné smykové vrstvy, atd.;
 - 1 – rovnicové modely – Bradshawův model, atd.;
 - 2 – rovnicové modely – Launder-Spaldingův k-ε model, RNG k-ε model, Wolcoxův k-ω model, NKE, GIR, SZL, atd.;
 - modely s vyšším počtem rovnic již nepřinášejí očekávaný zisk informace, a proto se nepoužívají.

Obecně se dá říci, že 2 – rovnicové modely, založené na principu turbulentní viskozity (Boussinesqova aproximace) mají oproti 0 – rovnicovým a 1 – rovnicovým modelům daleko univerzálnější použití, a přitom nejsou o mnoho složitější než modely 1 – rovnicové [5].

4.1 ALGERBAICKÉ (0 – ROVNICOVÉ) MODELY

Tento nejjednodušší turbulentní model je založen na výpočtu turbulentní viskozity prostřednictvím turbulentního délkového a turbulentního rychlostního měřítka a nevyžadují řešení jakýchkoliv dalších rovnic. Turbulentní rychlostní měřítka je definováno jako maximální rychlost ve výpočtové oblasti. Tento velice jednoduchý model má celou řadu zjednodušení, a není příliš doporučován pro technické výpočty [11].

Velmi užitečné mohou být pro použití při jednodušší geometrii toku nebo při počátečních fázích výpočtu, v nichž mají složitější modely potíže.

Dva nejznámější algebraické modely jsou Baldwin-Lomax model a Cebeci-Smith model [7].

4.2 k - ε MODEL

Model k - ε je jedním z nejpoužívanějších modelů turbulence, i když neposkytuje dobré výsledky v případech velkých nepříznivých tlakových gradientů. k - ε model je model dvourovnicový. To znamená, že se v něm řeší dvě parciální diferenciální rovnice. První je pro turbulentní kinetickou energii k a druhá je pro disipaci turbulence ε .

Existují dvě hlavní formulace k - ε modelů. První od autorů Jonese a Laundera a druhá od autorů Laundera a Sharma. Formulace od autorů Laundera a Sharma je obvykle nazývána „standardní“ k - ε model. Původní podnět pro model k - ε bylo zlepšit model směšovací délky („mixing-length“) jakož i najít alternativu k algebraickému přepisování délkových měřítek ve střední až vysoké složitosti proudění.

Bylo prokázáno, že tento model je užitečný pro proudění s relativně malými tlakovými gradienty, což bylo prokázáno experimentálně. Přesnost modelu klesá v proudění s nežádoucími velkými tlakovými gradienty. Dalo by se tedy říci, že k - ε model je nevhodnou volbou pro řešení např. vtoků a kompresorů [8].

Obvyklé k - ε modely jsou:

- Standardní k - ε model,
- RNG k - ε model.

4.2.1 Standardní k - ε model

Transportní rovnice pro k - ε model jsou následující [8]:

- Pro turbulentní kinetickou energii k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.3)$$

- Pro rychlost disipace ε :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.4)$$

Turbulentní viskozita je modelována jako:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

kde:

- k turbulentní kinetická energie
- ε disipace turbulentní kinetické energie

Pro tvorbu k jsou rovnice [8]:

$$P_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.6)$$

$$P_k = \mu_t S^2 \quad (4.7)$$

Kde S je modul střední (průměrné) rychlosti deformace tenzoru, definovaná jako:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.8)$$

Účinek vztlaku se vyjádří dle vztahu:

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.9)$$

kde Pr_t je turbulentní Prandtlovo číslo pro energii a g_i je složka gravitačního vektoru v i -tém směru. Pro standardní a realizovatelné modely je výchozí hodnota pro Pr_t 0,85 [8].

Koeficient tepelné roztažnosti β je definován jako:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4.10)$$

Výchozí hodnoty pro různé konstanty ve standardním modelu jsou určeny Launderem a Spaldingem. Viz tabulka 3 [8].

Tab. 3 Koeficienty standardního modelu

Veličina	Hodnota
$C_1, C_{1\varepsilon}$	1,44
C_2	1,92
C_μ	0,09
σ_k	1,00
σ_ε	1,30
σ_t	1,00
C_3	1,00
C_4	0,00
β	0,00

4.2.2 RNG k - ε model

Tento model RNG byl vyvinut pomocí Re-normalisation group (RNG) metody dle Yakhot a kol. k normalizaci Navier-Stokesových rovnic, vysvětlujících dopady menších měřítek pohybu. Ve standardním modelu k - ε je vířivá viskozita určena z jednoho turbulentního délkového měřítka, takže vypočtená turbulentní difúze je ta, která se vyskytuje pouze v určeném rozsahu, zatímco ve skutečnosti všechna měřítka pohybu přispívají k turbulentní difúzi. RNG k - ε model (ReNormalization Group) je založen na matematickém základě a je podobný k - ε modelu. Formálně je tedy tento model shodný s modelem k - ε , jsou však zde jiné hodnoty empirických konstant a také turbulentní viskozita je definována odlišným vztahem.

Existuje celá řada způsobů, jak psát transportní rovnice pro k a ε . Jednoduchý způsob, kde je vztlak zanedbáván je následující [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.12)$$

kde

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (4.13)$$

a

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad \text{a} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (4.14)$$

Turbulentní viskozita se počítá stejným způsobem jako u standardního k - ε modelu (viz rovnice 4.5).

Výchozí hodnoty pro různé konstanty v RNG k - ε modelu jsou následující [9]:

Tab. 4 Koefficienty RNG k - ε modelu

Veličina	Hodnota
β_∞	0,12
C_2	1,68
C_μ	0,085
σ_k	0,72
σ_ε	0,72
η_∞	4,38

Hodnoty, které nejsou uvedeny v Tab. 4, jsou pokryty v tabulce ke standardnímu k - ε modelu (Tab. 3).

I když ve své době bylo odvození RNG rovnic docela revoluční, neprokázaly žádné zlepšení oproti standardnímu modelu pro předpovídání vývoje vírů. Tento model je oblíben pro simulaci vnitřního proudění vzduchu [9].

4.3 k - ω MODEL

Ve výpočtech dynamiky tekutin, je k - ω dvourovnicový turbulentní model, který je používán pro Reynoldsovy časově zprůměrované Navier-Stokesovy rovnice (RANS rovnice).

Tento model se snaží předpovědět turbulence podle dvou parciálních diferenciálních rovnic pro dvě proměnné, k a ω , přičemž první proměnnou je turbulence kinetické energie (k), zatímco druhou proměnnou ω je specifická míra rozptylu-disipace (z turbulence kinetické energie k) [10].

4.3.1 Standardní (Wilcoxův) k - ω model

Vířivá viskozita ν_T v RANS rovnicích, je dána vztahem $\nu_T = k/\omega$.

Turbulentní kinetická energie k vychází ze vztahu [10] :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta * k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma * \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.15)$$

Specifická disipace ω vychází ze vztahu

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma * \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4.16)$$

Hodnoty a pomocné vzorce vztahované k k - ω modelu [10]:

Tab. 5 Koefficienty standardního (Wilcoxova) k - ω modelu

Veličina	Hodnota
α	0.556
β	0.075
β^*	0.090
σ	0.500
σ^*	0.500
ε	$\beta^* \omega k$

4.4 NKE TURBULENTNÍ MODEL

Model NKE používá podmínky obou proměnných C_μ a novou zdrojovou podmínku disipace.

Funkce C_μ použitá v NKE modelu je funkcí neměnných [11].

$$C_\mu = \frac{1}{4 + 1,5\sqrt{\eta^2 + \zeta^2}} \quad (4.17)$$

Výchozí podmínka pro disipaci nabývá jiné podoby. Výchozí podmínka pro standardní model má podobu:

$$C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi \quad (4.18)$$

Model NKE toto nahrazuje:

$$\rho C_{\varepsilon,1} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \varepsilon \quad (4.19)$$

Konstanta v rovnici rozptylu disipace je upravena v modelu NKE na:

$$C_{\varepsilon,1} = \max\left(C_{1M}, \frac{\eta}{\eta + 5}\right) \quad (4.20)$$

Konstanta C_2 v rovnici disipace NKE modelu má jinou hodnotu než ta odpovídající standardnímu modelu.

Pro NKE model jsou vstupní parametry následující:

Tab. 6 Koeficienty NKE modelu

Veličina	Hodnota
C_{1M}	0,43
C_2	1,9
σ_k	1,0
σ_ε	1,2

Hodnota rotační konstanty Cr v NKE modelu je 3,0. Všechny parametry rovnic, které nejsou uvedeny v této tabulce, jsou uvedeny v tabulce pro standardní model [11].

4.5 GIR TURBULENTNÍ MODEL

Model Girimaji se spoléhá na komplexní funkce pro výpočet koeficientu C_μ . Jsou použity koeficienty v Tab. 7 [11].

Tab. 7 Koeficienty GIR modelu

Veličina	Hodnota
C_1^0	3,6
C_1^1	0,0
C_2	0,8
C_3	1,94
C_4	1,16

Tyto vstupní hodnoty jsou použity v sérii následujících výpočtů.

Nejprve všechny koeficienty L_1^0 až L_4 musí být stanoveny ze vstupních hodnot.

$$L_1^0 = \frac{C_1^0}{2} - 1 \quad L_1^1 = C_1^1 + 1 \quad L_2 = \frac{C_2}{2} - \frac{2}{3} \quad L_3 = \frac{C_3}{2} - 1 \quad L_4 = \frac{C_4}{2} - 1 \quad (4.21)$$

Dále jsou vypočteny následující koeficienty:

$$p = -\frac{2L_1^0}{\frac{1}{2}\eta^2 L_1^1} \quad r = \frac{L_1^0 L_2}{\left(\frac{1}{2}\eta^2 L_1^1\right)^2} \quad \Theta = \arccos \frac{-\frac{b}{2}}{\sqrt{-\frac{a^3}{27}}} \quad (4.22)$$

$$q = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\eta^2 L_1^1\right)^2} \left[(L_1^0)^2 + \frac{1}{2}\eta^2 L_1^1 L_2 - \frac{1}{3}\eta^2 (L_3)^2 + \zeta^2 (L_4)^2 \right] \quad (4.23)$$

$$a = q - \frac{p^2}{3} \quad b = \frac{1}{27}(2p^3 - 9pq + 27r) \quad D = \frac{b^2}{4} + \frac{a^3}{27} \quad (4.24)$$

S těmito koeficienty můžeme nyní stanovit koeficient C_μ z následující množiny rovnic [11]:

$$C_\mu = \begin{cases} L_1^0 L_2 / \left[(L_1^0)^2 + \zeta^2 (L_4)^2 \right] & \text{když } \eta = 0 \\ L_1^0 L_2 / \left[(L_1^0)^2 - \frac{1}{3}\eta(L_3)^2 + \zeta^2 (L_4)^2 \right] & \text{když } L_1^1 = 0 \\ -\frac{p}{3} + \left(-\frac{b}{2} + \sqrt{D} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{b}{2} - \sqrt{D} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{když } D > 0 \\ -\frac{p}{3} + 2\sqrt{\frac{-a}{3}} \cos\left(\frac{\Theta}{3}\right) & \text{když } D < 0, b < 0 \\ -\frac{p}{3} + 2\sqrt{\frac{-a}{3}} \cos\left(\frac{\Theta}{3} + \frac{2}{3}\pi\right) & \text{když } D < 0, b > 0 \end{cases}$$

Hodnota rotační konstanty C_r v GIR modelu je:

$$C_r = \frac{C_4 - 4}{C_4 - 2} \quad (4.25)$$

4.6 SZL TURBULENTNÍ MODEL

Shi – Zhu – Lemley turbulentní model používá základní vyjádření pro koeficient C_μ a používá standardní podmínku disipace.

Uživatel používá tři konstanty při výpočtu koeficientů:

$$C_\mu = \frac{A_{s1}}{A_{s2} + \eta + A_{s3}\zeta} \quad (4.26)$$

Konstanty a jejich základní nastavení jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 8).:

Tab. 8 Koeficienty SZL modelu

Veličina	Hodnota
A_{s1}	0,66666
A_{s2}	1,25
A_{s3}	0,90

Hodnota rotační konstanty C_r pro model SZL je 4,0.

Modely $k-\varepsilon$ nejsou platné v bezprostřední blízkosti stěn. Stěnový turbulentní model se používá pro stěnové prvky. S ohledem na aktuální hodnotu rychlosti rovnoběžně se stěnou v určité vzdálenosti od stěny se přibližným iteračním řešením získá pro stěnu smykové napětí. Rovnice je známá jako "Log-Law of the wall" [11].

$$\frac{V_{tan}}{\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}} = \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{E\delta}{\nu} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \right) \quad (4.27)$$

kde:

- V_{tan} rychlost paralelně se stěnou
- τ smykové napětí
- ν kinematická viskozita (μ/ρ)
- κ konstanta
- E konstanta
- δ vzdálenost od stěny

Základní hodnoty jsou $\kappa = 0,4$ a $E = 9,0$. Hodnota \square odpovídá podmínce hladké stěny.

Ze smykového napětí můžeme vypočítat viskozitu stěnového elementu [11]:

$$\mu_w = \delta \frac{\tau}{u_{tan}} \quad (4.28)$$

Hodnota viskozity stěnového elementu je větší než laminární viskozita a počítá se dle předchozí rovnice (4.28).

Hodnoty turbulentní kinetické energie v blízkosti stěny jsou získány z modelu $k-\varepsilon$. Hodnota disipace v blízkosti stěny je dána délkovým měřítkem a je dána rovnicí [11]:

$$\varepsilon_{nw} = \frac{C_\mu^{0,75} k_{nw}^{1,5}}{\kappa \delta} \quad (4.29)$$

kde:

- ε_{nw} hodnota disipace v blízkosti stěny
- k_{nw} hodnota kinetické energie v blízkosti stěny

5 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VE 2D

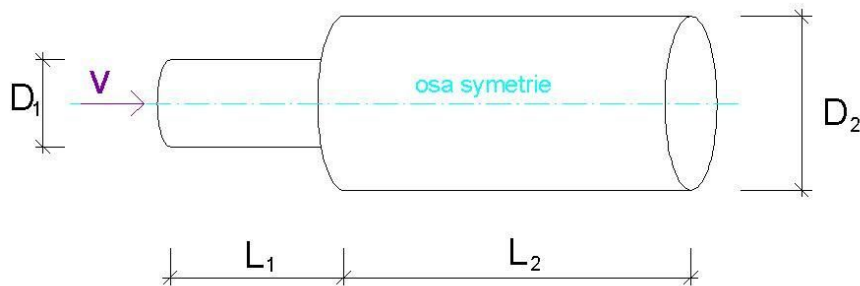
Pro výpočet modelů byl použit program ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 14.5 (Ansys Flotran). V tomto programu byl vytvořen geometrický model potrubí, vytvořena výpočtová síť, zadány počáteční a okrajové podmínky, proveden výpočet a po získání potřebných hodnot byly výpočty ztrát a jejich součinitelů prováděny v programu excel.

U jednotlivých variant byl měněn turbulentní model. Často používaný je model $k-\varepsilon$, který byl volen i při výpočtech mé bakalářské práce. Modely, které v této práci byly použity, jsou uvedeny v Tab. 9. Vztahy dle literatury byly počítány dle vztahů uváděných v kapitole 2.

Tab. 9 Použité turbulentní modely 2D

1	$k-\varepsilon$
2	Algebraický
3	RNG
4	NKE
5	GIR
6	SZL
7	Literatura

Jako názorná ukázka modelování je v této kapitole uvedeno řešení proudění v trubici s náhlým rozšířením. Geometrie a rozměry řešené oblasti jsou uvedeny na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma řešené oblasti [4]

5.1 POSTUP PŘI NUMERICKÉM MODELOVÁNÍ VE 2D

Rozměry trubice dle obrázku 9 jsou následující: $D_1 = 0,2$ m, $D_2 = 0,4$ m, $L_1 = 0,4$ m, $L_2 = 0,8$ m.

Řešení bylo provedeno pomocí turbulentních modelů, které jsou zapracovány v souboru programů ANSYS FLOTRAN. Tento programový soubor je založen na

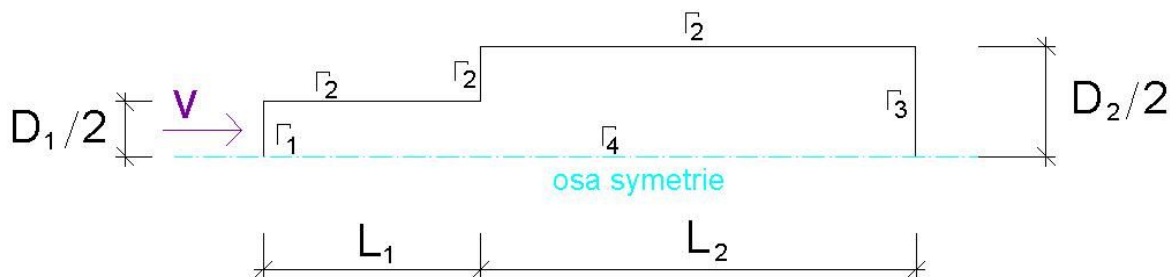
numerickém řešení Navier-Stokesových rovnic (kap. 3.1.1) metodou konečných prvků s použitím různých turbulentních modelů (kap. 4). Postup modelování sestává ze tří základních kroků [4]:

- přípravy vstupních dat (pre-processing);
- řešení (solution);
- zobrazení výsledků řešení (post-processing).

5.1.1 Pre-processing

Tento krok obsahuje schematizaci skutečného stavu s ohledem na zjednodušení tvaru oblasti, diskretizaci oblasti na konečné prvky a realizaci okrajových podmínek. V prostředí pre-processoru programu ANSYS postup spočívá v následujících krocích:

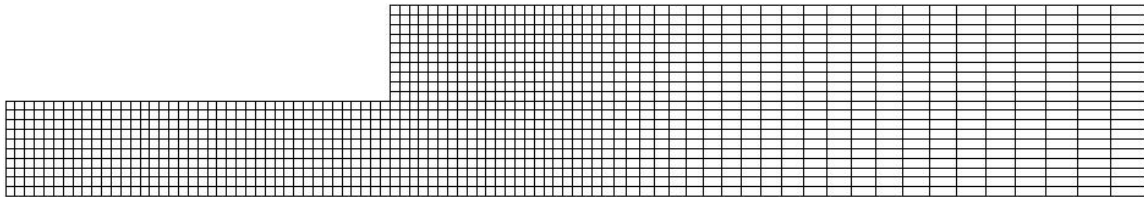
- **volba typu elementu** – pro výpočet proudění v potrubí dle Obr. 3 lze s výhodou využít dvojrozměrné izoparametrické elementy (FLUID141) definované v cylindrických souřadnicích, rotační symetrie je v tomto případě zvolena kolem osy x , která je osou potrubí. V našem případě lze s výhodou zmenšit oblast řešení pouze na polovinu řezu osou potrubí (Obr. 4) [4].



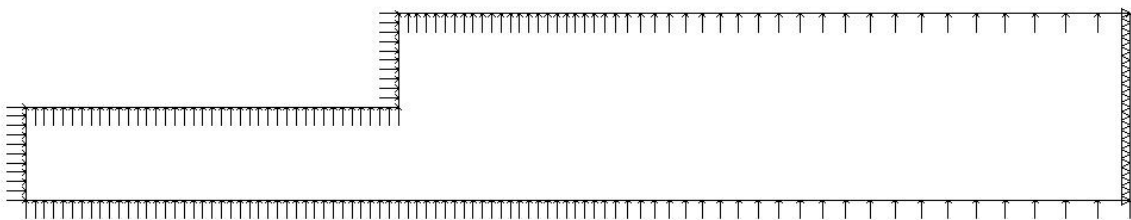
Obr. 4 Schéma náhradní oblasti

- **dělení oblasti řešení na podoblasti** následujícím postupem [4]:
 - určení vrcholů podoblastí (keypoints);
 - určení hran podoblastí (lines);
 - určení podoblastí (areas) pomocí hran;
- **diskretizace podoblastí** [4]:
 - určení jemnosti dělení na hranách podoblastí (shape and size);
 - automatické dělení (mesh) podoblastí na čtyřúhelníkové konečné prvky – FLUID141 (viz Obr. 5); oblast sestává z 1000 čtyřúhelníkových prvků;
- **realizace okrajových podmínek** (Obr. 6) [4]:
 - na části hranice Γ_{11} , která je vtokovým profilem, bylo zadáno rovnoměrné rozdělení rychlostí x -ovými složkami vektoru rychlosti $v_x = 0,5$ m/s;

- na části hranice Γ_{12} , která je stěnou potrubí, byly zadány nulové složky vektoru rychlosti $v_x = v_y = 0$ m/s;
- na části hranice Γ_2 , která je výtokovým profilem, byly zadány nulové hodnoty tlaku $p = 0$ Pa;
- na části hranice Γ_{13} (osa symetrie) byla zadána symetrická okrajová podmínka $v_y = 0$ m/s.



Obr. 5 Dělení náhradní oblasti na konečné prvky



Obr. 6 Realizace okrajových podmínek

- **definice materiálových vlastností [4]:**
 - konstantní mechanicko-fyzikální vlastnosti kapaliny;
 - hustota $\rho = 1000$ kg/m³;
 - dynamická viskozita $\mu = 0,001$ kg/m.s;
- **nastavení parametrů výpočtu [4]:**
 - turbulentní režim proudění;
 - počet iterací n ;
 - ustálený stav proudění;
 - byly použity různé hodnoty konstant dle daného turbulentního modelu (kap 4).

5.1.2 Solution (řešení)

Výsledkem řešení jsou [4]:

- složky vektoru rychlosti v uzlech náhradní oblasti;
- celkové vektory rychlosti;
- hodnoty tlaků v uzlech náhradní oblasti;

- hodnoty kinetické energie turbulence k a disipace turbulentní energie ε (v případě k - ε modelu);
- dynamická viskozita μ a efektivní viskozita μ_e .

5.1.3 Post-processing

Výsledky řešení je možno zobrazit jak v grafické, tak v tabelární formě. Soubory výstupních dat obsahují v tabelární formě hodnoty počítaných veličin. Výsledky řešení jsou vztaženy buď k uzlům, nebo k prvkům náhradní oblasti. Grafické zobrazení je možno provést ve formě [4]:

- vektorů rychlosti;
- izolinií vektorů rychlosti a jeho složek, tlaků a dalších počítaných veličin;
- průběhu vybraných veličin podél specifikované linie.

5.2 NÁHLÉ ZÚŽENÍ

V programu byl nejprve vytvořen geometrický model náhle se zužujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Flotran vymodelováno 24 variant náhlého zúžení. Průměry potrubí D_1 , D_2 a jejich poměry $n = D_2/D_1$ jsou uvedeny v Tab. 10. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitelé ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 . Dále následoval výpočet součinitele místní ztráty ζ a z něj vypočtena místní ztráta změnou průřezu h_m vztažena k profilu D_2 s rychlostí v_2 . Jako poslední byla vypočítána celková ztráta h_{celk} , která je součtem ztrát třením po délce h_{t1} a h_{t2} , a místní ztrátou h_m .

Tab. 10 Náhlé zúžení-průměry potrubí a jejich poměry

VAR	D_1	D_2	n
	[m]	[m]	[-]
1	0,080	0,050	0,63
2	0,125	0,100	0,80
3	0,150	0,100	0,67
4	0,250	0,200	0,80

Varianta 1

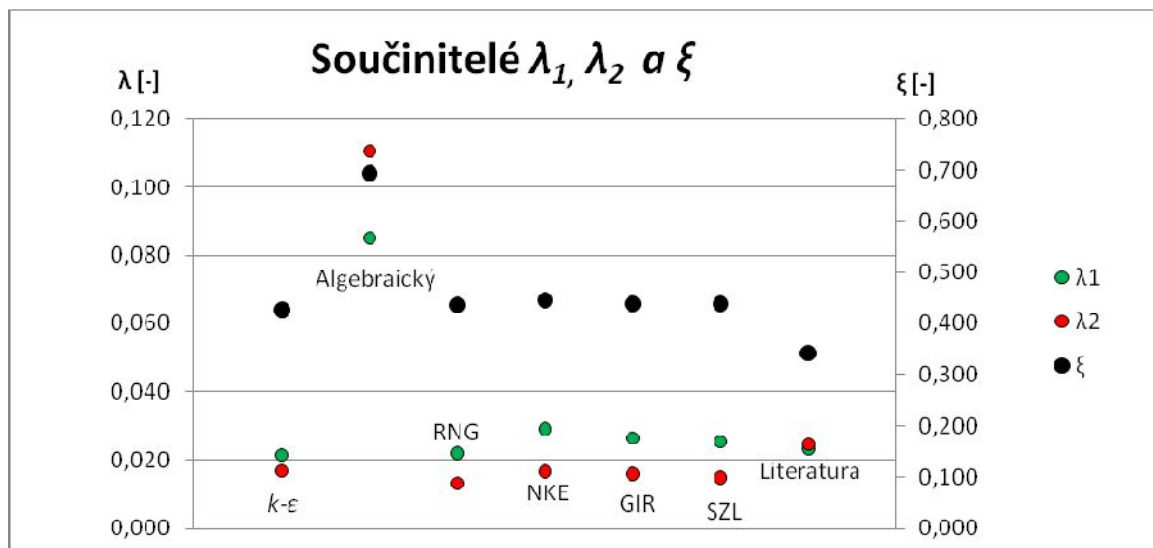
V první variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,080$ m a $D_2 = 0,050$ m. V následující tabulce (Tab. 11) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 1.

Tab. 11 Výsledky - var. 1

1	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,4270	0,6957	0,4364	0,4470	0,4390	0,4397	0,3431
λ_1	0,0217	0,0848	0,0222	0,0293	0,0266	0,0255	0,0234
λ_2	0,0169	0,1105	0,0134	0,0167	0,0160	0,0150	0,0248
h_m	0,1357	0,2211	0,1387	0,1421	0,1395	0,1398	0,1146
h_{t1}	0,0145	0,0566	0,0148	0,0196	0,0177	0,0170	0,0164
h_{t2}	0,1182	0,7728	0,0938	0,1167	0,1121	0,1047	0,1821
h_{celk}	0,2684	1,0505	0,2472	0,2784	0,2693	0,2615	0,3131

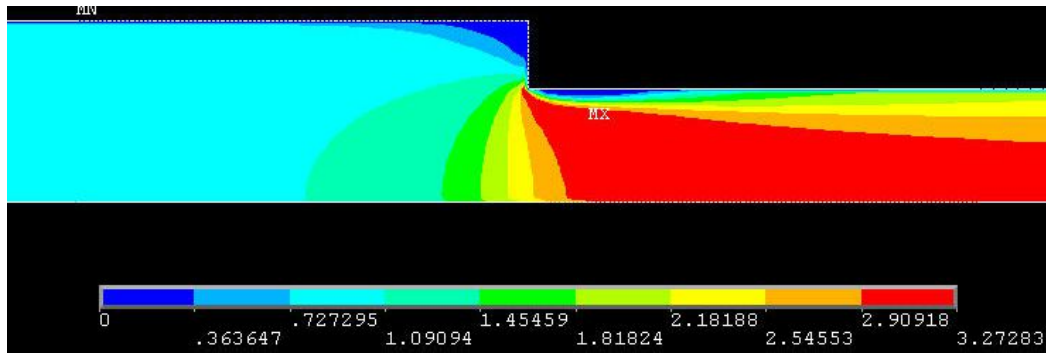
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 75%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ se od sebe použité turbulentní modely (kromě algebraického modelu) liší přibližně o 2-3 %. Největší rozdíl vzniká u modelů $k-\varepsilon$ a NKE, kde se hodnoty liší o 4,5 %. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 22%.



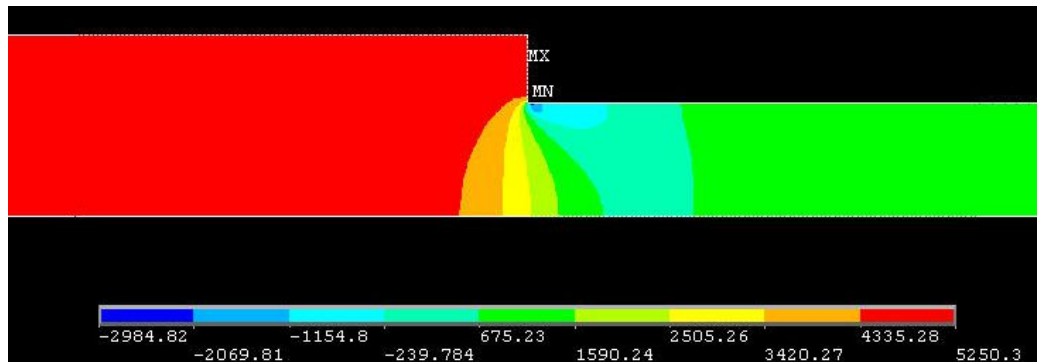
Obr. 7 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 1

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianta s použitím $k-\varepsilon$ modelu.



Obr. 8 Rozložení rychlostí var. 1 s modelem GIR

Na Obr. 8 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu GIR. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vzniká zde víření vody. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 9 Rozložení tlaků var. 1 s modelem GIR

Z Obr. 9 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 10 Celková ztrátová výška - var. 1

Jak můžeme vidět na Obr. 10, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 75%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 15,4 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,273.

Varianta 2

Ve druhé variantě bylo vmodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,125$ m a $D_2 = 0,100$ m. V následující tabulce (Tab. 12) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 2.

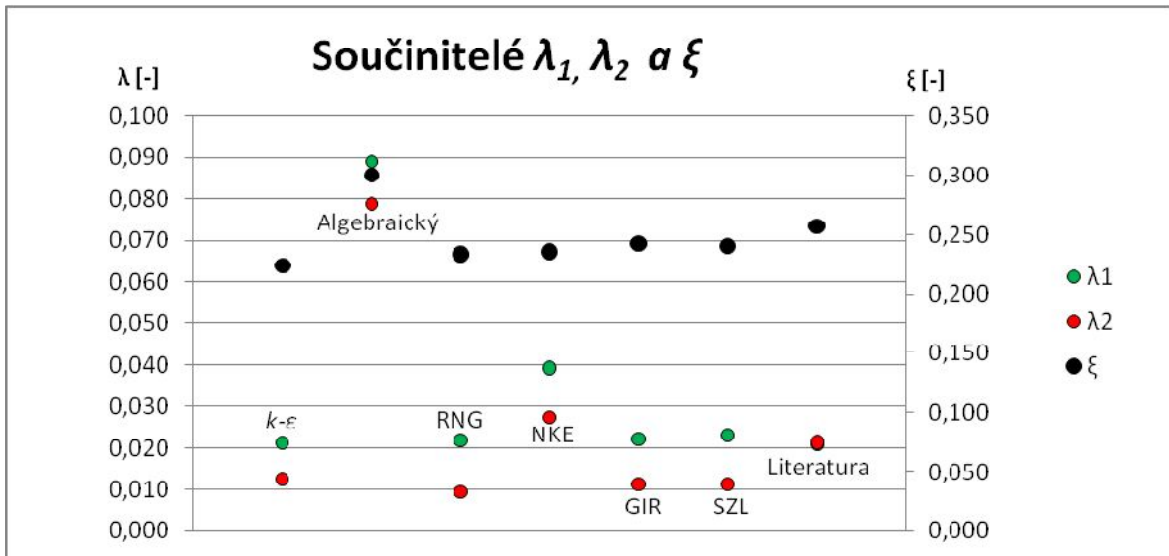
Tab. 12 Výsledky - var. 2

2	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	0,2236	0,3001	0,2334	0,2354	0,2422	0,2405	0,2573
λ_1	0,0213	0,0890	0,0218	0,0393	0,0221	0,0230	0,0210
λ_2	0,0125	0,0789	0,0096	0,0275	0,0113	0,0114	0,0214
h_m	0,0269	0,0361	0,0281	0,0283	0,0292	0,0290	0,0320
h_{t1}	0,0092	0,0386	0,0095	0,0170	0,0096	0,0100	0,0094
h_{t2}	0,0165	0,1045	0,0127	0,0364	0,0149	0,0151	0,0293
h_{celk}	0,0527	0,1792	0,0503	0,0818	0,0537	0,0540	0,0707

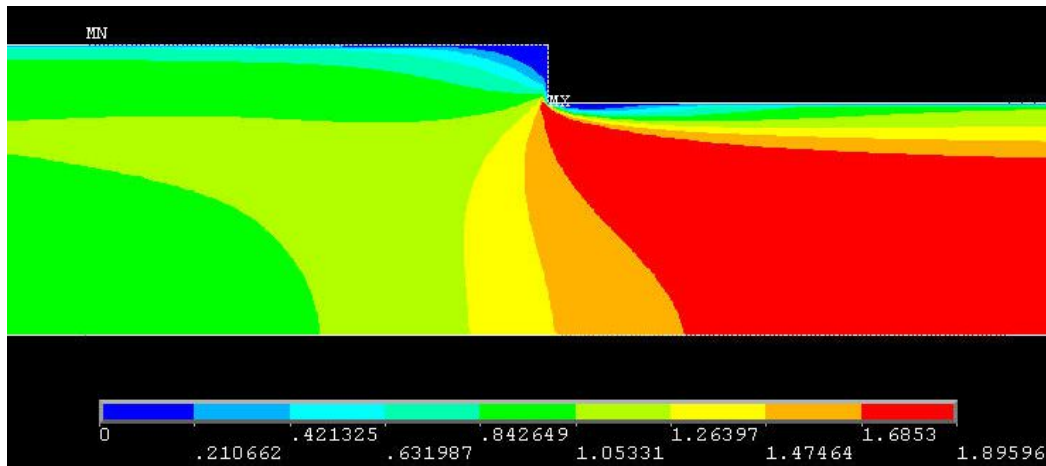
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 67,4%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a GIR, kde se hodnoty liší o 7,7%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 8,6%. Jak je patrné z Obr. 11, téměř všechny vypočítané hodnoty ζ jsou nižší, než hodnota vypočtená dle literatury.

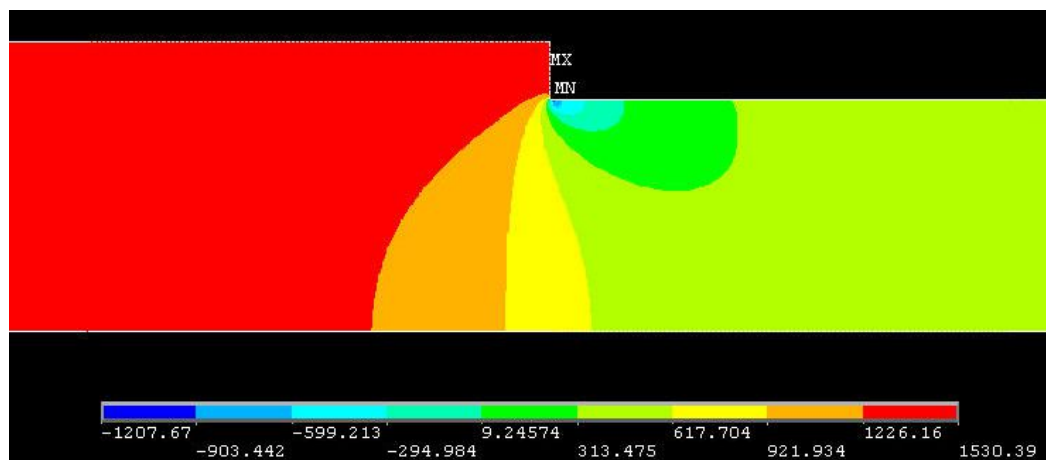
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 jsou varianty s použitím $k-\varepsilon$ modelu, RNG modelu, GIR modelu a SZL modelu nejvíce shodné.



Obr. 11 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 2



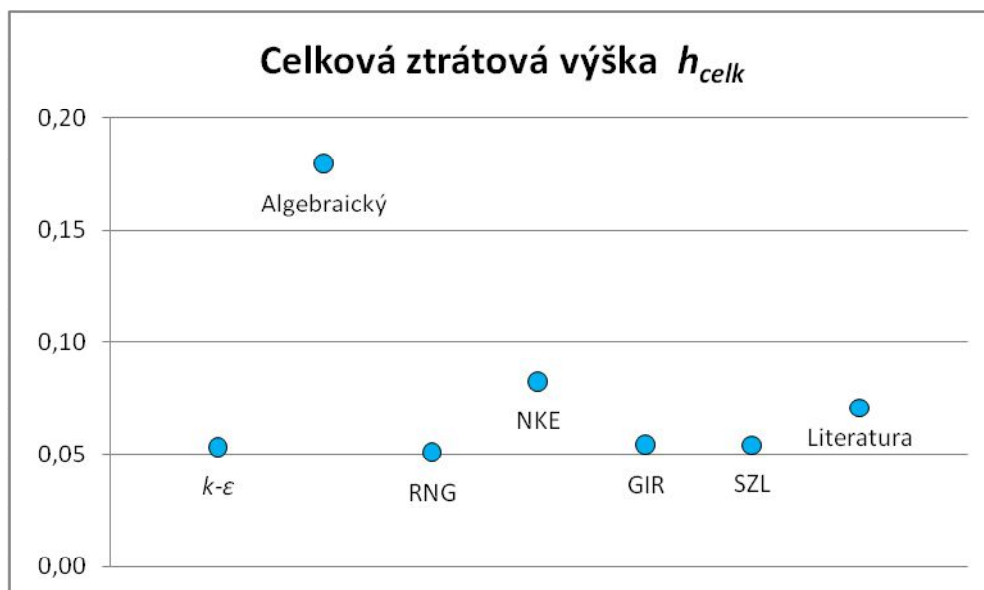
Obr. 12 Rozložení rychlostí var. 2 s modelem NKE



Obr. 13 Rozložení tlaků var. 2 s modelem NKE

Na Obr. 12 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu NKE. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vzniká zde víření vody. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.

Z Obr. 13 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 14 Celková ztrátová výška - var. 2

Jak můžeme vidět na Obr. 14, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 67,4%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 17,3 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,060.

Varianta 3

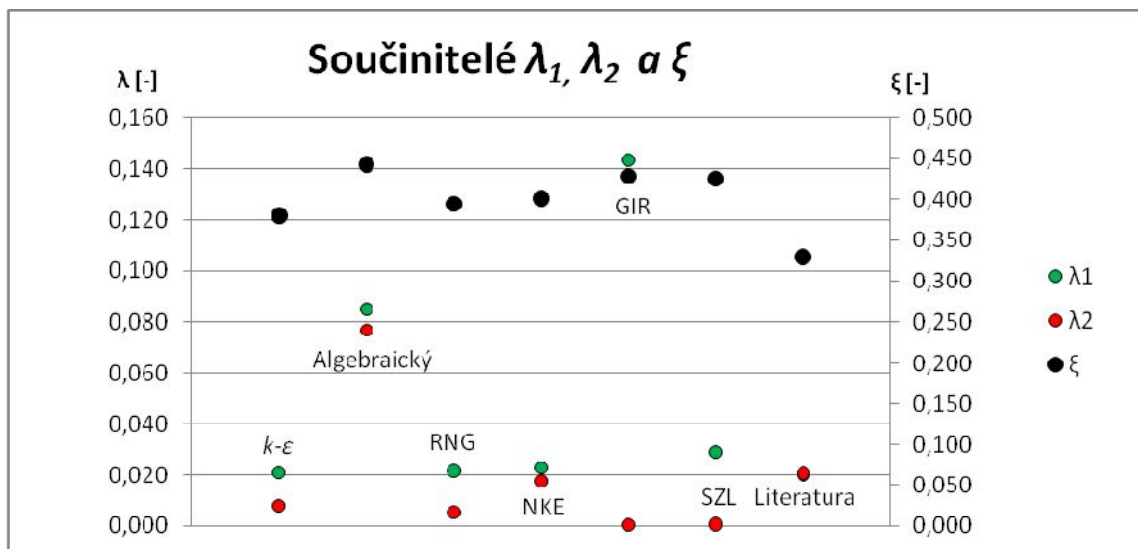
Ve třetí variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m a $D_2 = 0,100$ m. V následující tabulce (Tab. 13) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 3.

Tab. 13 Výsledky - var. 3

3	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	0,3798	0,4429	0,3941	0,4007	0,4282	0,4253	0,3287
λ_1	0,0211	0,0851	0,0216	0,0230	0,1433	0,0292	0,0201
λ_2	0,0082	0,0770	0,0056	0,0179	0,0007	0,0008	0,0209
h_m	0,0954	0,1113	0,0990	0,1007	0,1076	0,1069	0,0848
h_{t1}	0,0077	0,0310	0,0079	0,0084	0,0522	0,0106	0,0075
h_{t2}	0,0225	0,2129	0,0156	0,0494	0,0019	0,0022	0,0593
h_{celk}	0,1256	0,3552	0,1225	0,1585	0,1617	0,1197	0,1517

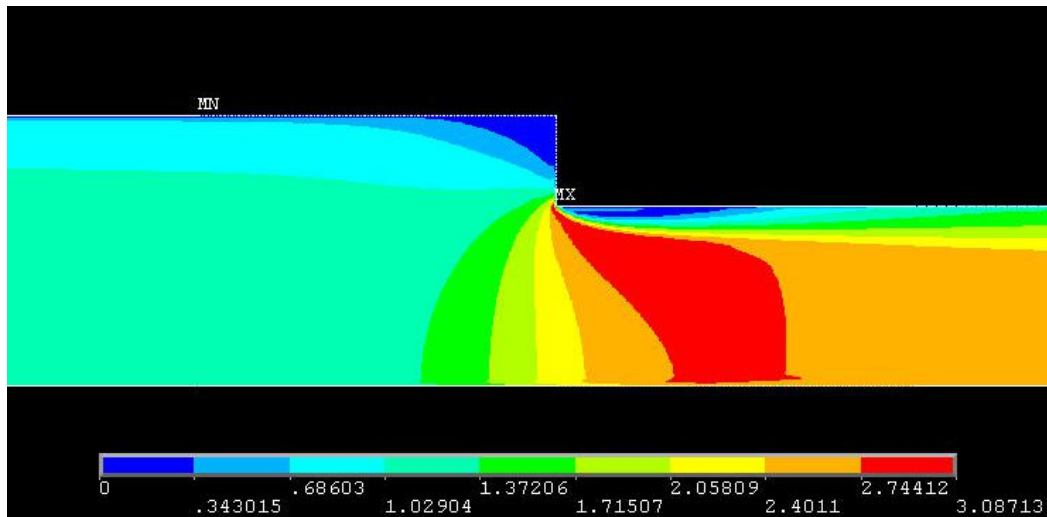
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 61%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a GIR, kde se hodnoty liší o 11,3%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 19%. Jak je patrné z Obr. 15, všechny vypočítané hodnoty ζ jsou vyšší, než hodnota vypočtená dle literatury.



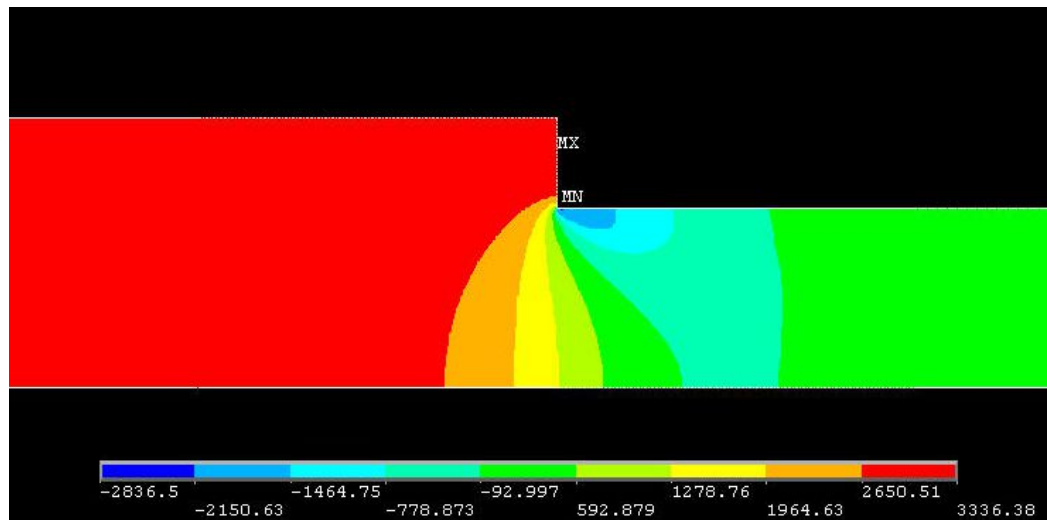
Obr. 15 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 3

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe hodnoty velmi liší, jak je vidět na Obr. 15. Nejvíce se hodnotám vypočítaným dle literatury přibližuje model NKE. Nejvíce se naopak liší varianta s použitím modelu GIR.



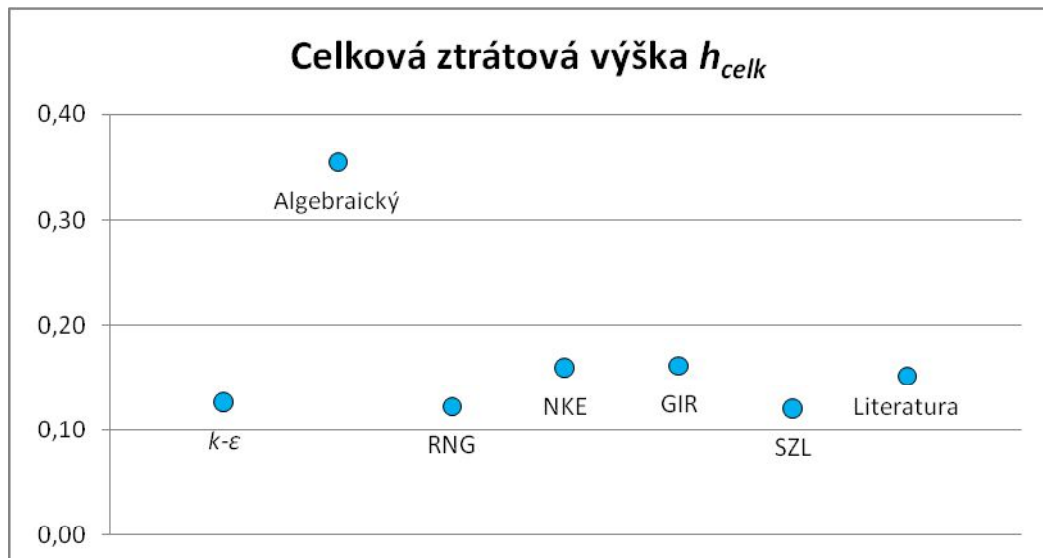
Obr. 16 Rozložení rychlostí var. 3 s modelem RNG

Na Obr. 16 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu RNG. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vzniká zde víření vody. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 17 Rozložení tlaků var. 3 s modelem RNG

Z Obr. 17 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 18 Celková ztrátová výška - var. 3

Jak můžeme vidět na Obr. 18, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 61,3%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 9,3 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,140.

Varianta 4

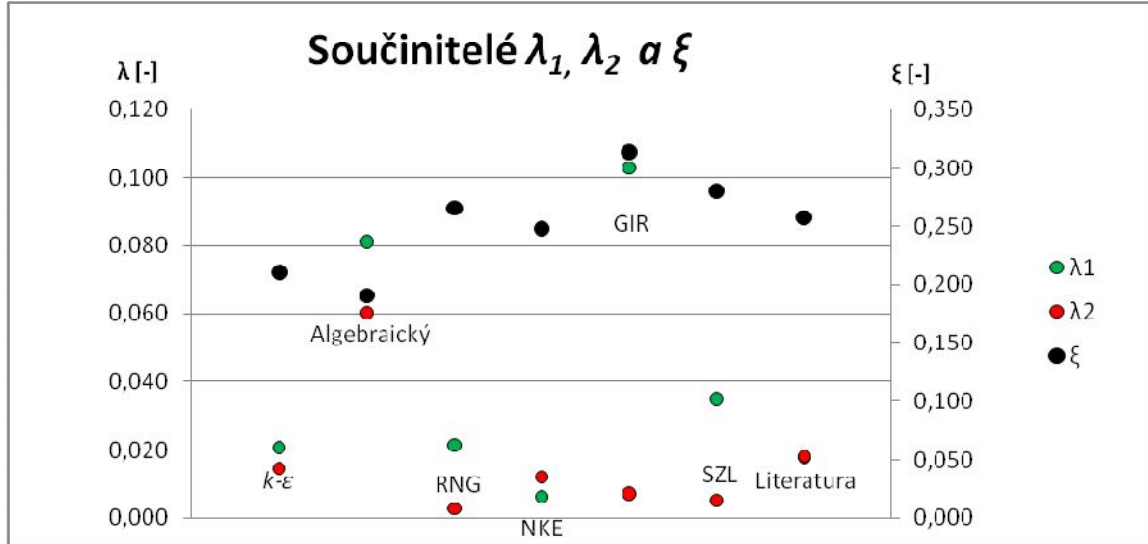
Ve čtvrté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,250$ m a $D_2 = 0,200$ m. V následující tabulce (Tab. 14) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 4.

Tab. 14 Výsledky - var. 4

4	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,2100	0,1901	0,2658	0,2477	0,3139	0,2804	0,2573
λ_1	0,0209	0,0812	0,0216	0,0066	0,1029	0,0351	0,0179
λ_2	0,0145	0,0600	0,0027	0,0119	0,0071	0,0051	0,0182
h_m	0,0257	0,0233	0,0326	0,0303	0,0385	0,0344	0,0320
h_{t1}	0,0046	0,0179	0,0048	0,0014	0,0227	0,0077	0,0040
h_{t2}	0,0098	0,0404	0,0018	0,0080	0,0048	0,0034	0,0124
h_{celk}	0,0401	0,0816	0,0391	0,0398	0,0660	0,0455	0,0485

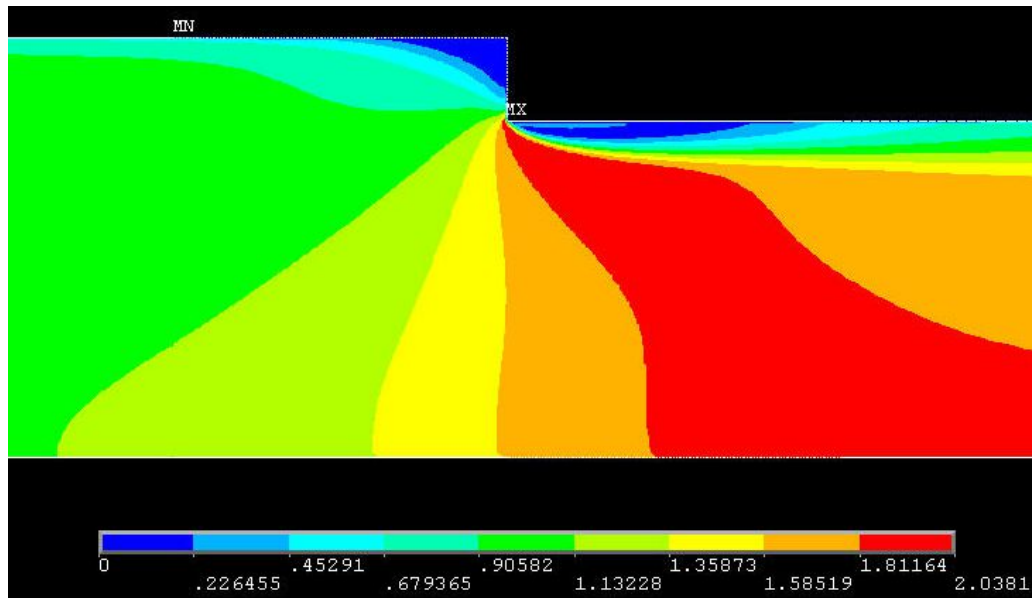
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 43,5%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a GIR, kde se hodnoty liší o 33,1%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 2,4%.

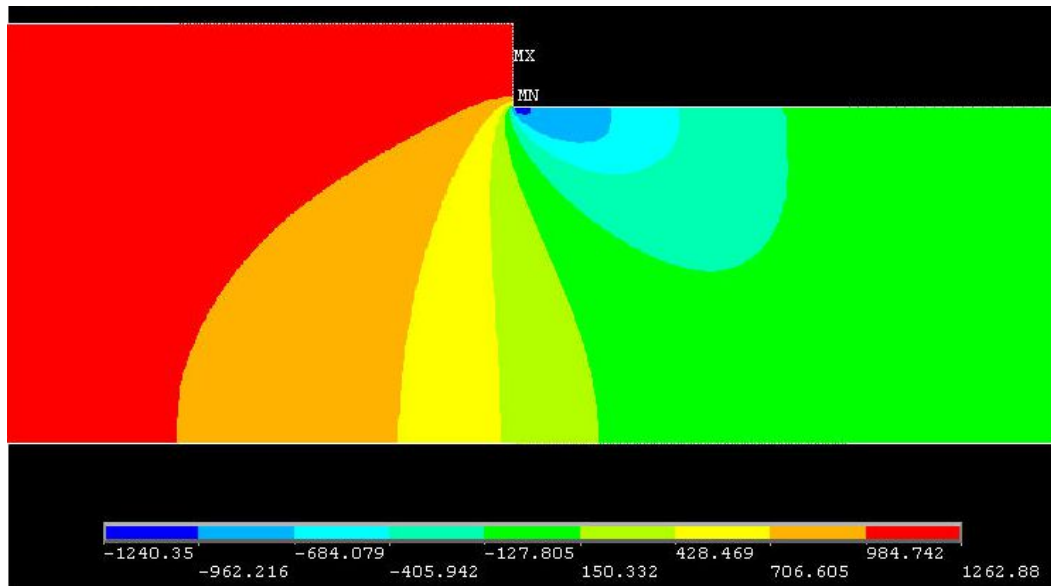


Obr. 19 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 4

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe hodnoty velmi liší, jak je vidět na Obr. 19. Nejvíce se hodnotám vypočítaným dle literatury přibližuje model $k-\varepsilon$. Nejvíce se naopak liší varianta s použitím modelu GIR.



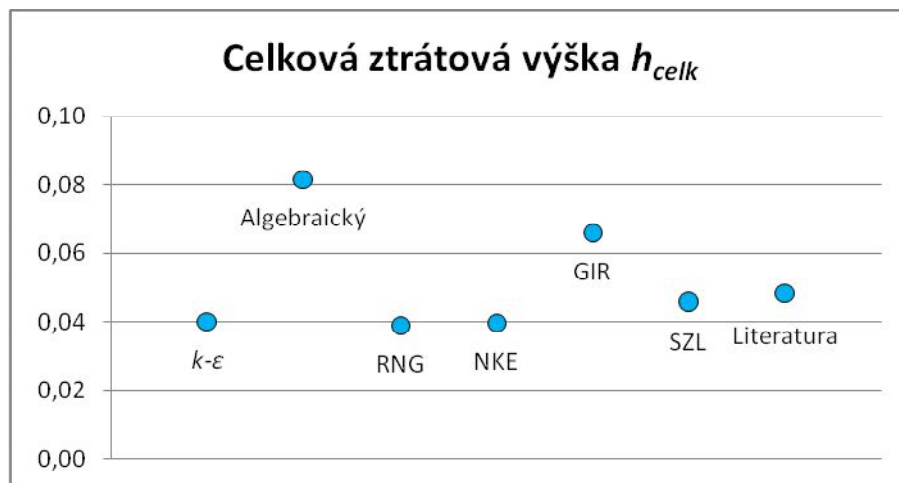
Obr. 20 Rozložení rychlostí var. 4 s modelem SZL



Obr. 21 Rozložení tlaků var. 4 s modelem SZL

Na Obr. 20 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu SZL. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vzniká zde víření vody.

Z Obr. 21 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



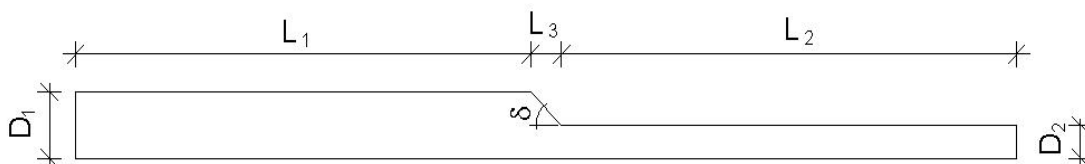
Obr. 22 Celková ztrátová výška - var. 4

Jak můžeme vidět na Obr. 22, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 43,5%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 4,9 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,043.

5.3 KÓNICKÉ ZÚŽENÍ

V programu byl vytvořen geometrický model kónicky se zužujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Flotran vymodelováno 30 variant kónického zúžení. Průměry potrubí D_1 , D_2 a jejich poměry $n = D_2/D_1$ jsou uvedeny v Tab. 15. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Délka kónické části potrubí byla volena tak, aby vznikl úhel $\delta = 45^\circ$ (Obr. 23). V této kapitole bohužel není možno porovnat vypočítané hodnoty pro součinitele ξ , místní ztráty a ztráty celkové s hodnotami uváděnými v literatuře, protože zde hodnota závisí na úhlu zúžení 2δ , který je v tomto případě 90° a v dostupné literatuře [12] je hodnota uváděna pouze do hodnoty 75° (Tab. 2).



Obr. 23 Schéma kónického zúžení

Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitele ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 .

Tab. 15 Kónické zúžení-průměry potrubí a jejich poměry

VAR	D_1	D_2	n
	[m]	[m]	[-]
5	0,080	0,050	0,63
6	0,125	0,100	0,80
7	0,150	0,100	0,67
8	0,300	0,150	0,50
9	0,250	0,200	0,80

Varianta 5

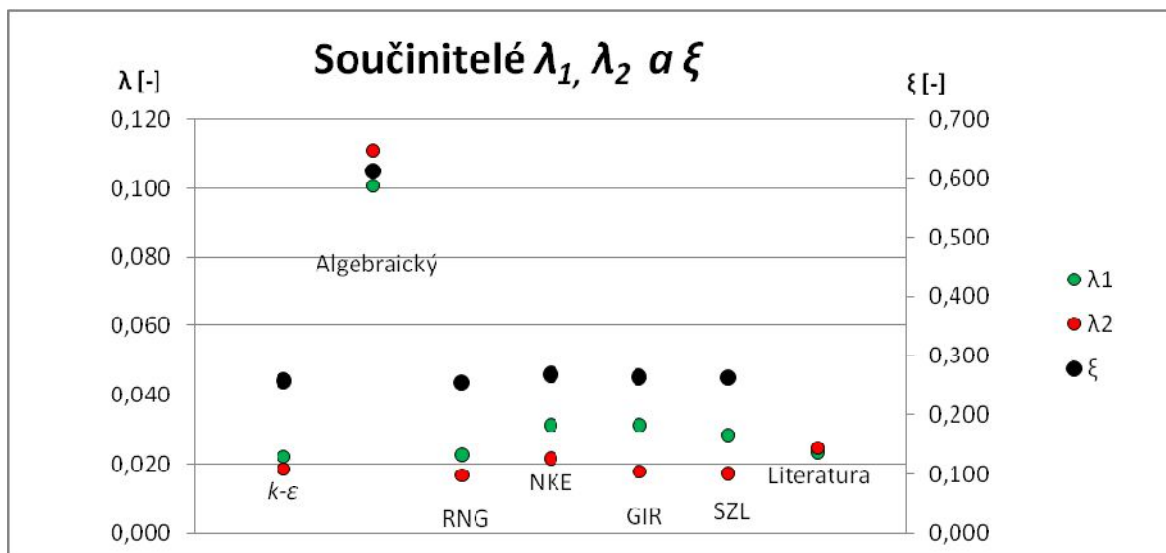
V páté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,08$ m, $D_2 = 0,050$ m a délka kónické části $L_3 = 0,015$ m. V následující tabulce (Tab. 16) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 5.

Tab. 16 Výsledky - var. 5

5	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,2576	0,6126	0,2553	0,2680	0,2642	0,2633	
λ_1	0,0223	0,1008	0,0228	0,0313	0,0314	0,0286	0,0234
λ_2	0,0187	0,1107	0,0170	0,0217	0,0180	0,0175	0,0248
h_m	0,0819	0,1947	0,0812	0,0852	0,0840	0,0837	
h_{11}	0,0149	0,0672	0,0152	0,0209	0,0210	0,0191	0,0164
h_{12}	0,1309	0,7742	0,1186	0,1521	0,1255	0,1220	0,1821
h_{celk}	0,2276	1,0361	0,2149	0,2582	0,2305	0,2248	

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 77,7%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

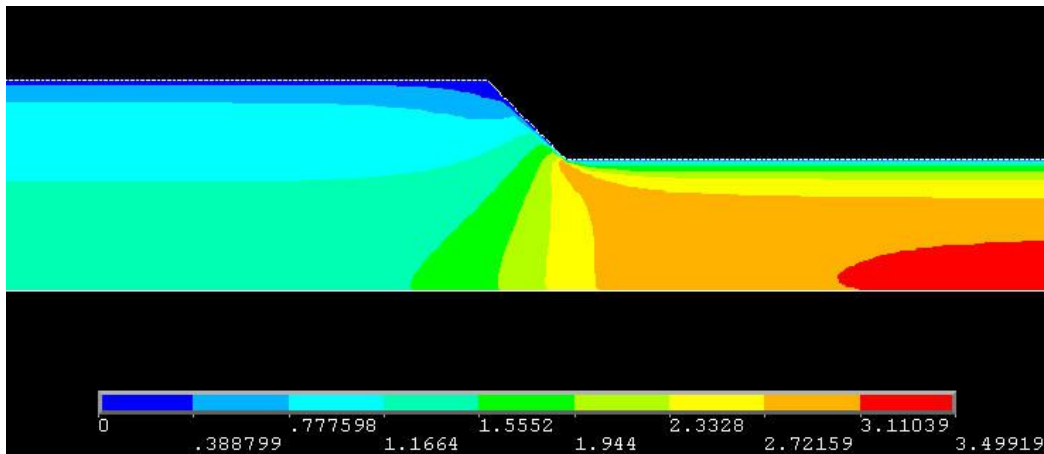
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů NKE a RNG, kde se hodnoty liší o 4,7%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ξ od hodnot s algebraickým modelem liší o 57,3%.



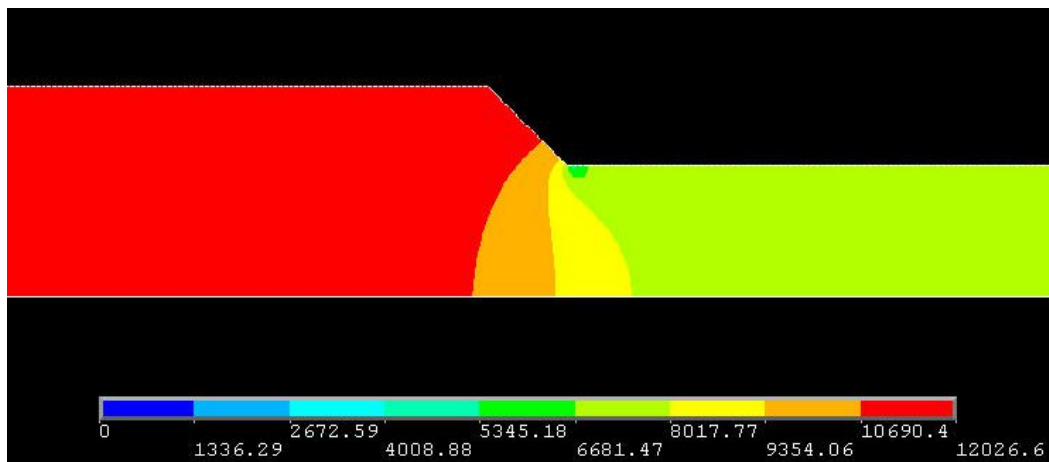
Obr. 24 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 5

Jak je vidět na Obr. 24, nejvíce se hodnotám součinitelů tření λ_1 a λ_2 přibližují hodnoty s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Nejvíce se naopak liší varianta s použitím algebraického modelu.

Na Obr. 25 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s $k-\varepsilon$ modelem. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vznikají zde vyšší rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 25 Rozložení rychlostí var. 5 s $k-\varepsilon$ modelem



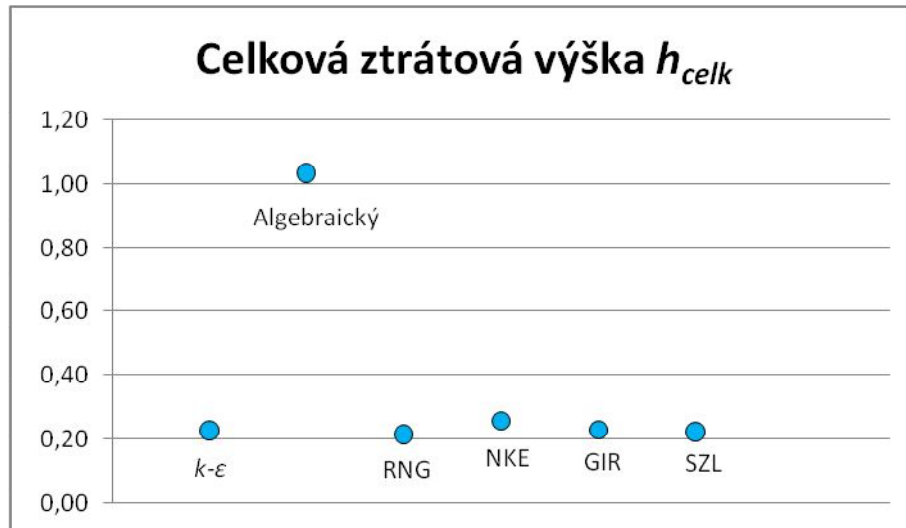
Obr. 26 Rozložení tlaků var. 5 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 26 je patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením. Ve variantě s použitím $k-\varepsilon$ modelu v místě za zúžením nedochází k podtlaku.

Jak můžeme vidět na Obr. 27, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 77,7%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím NKE turbulentního modelu a naopak nejnižší

hodnotu vykazuje varianta s použitím RNG modelu. Hodnoty s použitím NKE a RNG modelu se liší o 16,7%.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,231.



Obr. 27 Celková ztrátová výška - var. 5

Varianta 6

V šesté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,125$ m, $D_2 = 0,100$ m a délka kónické části $L_3 = 0,0125$ m. V následující tabulce (Tab. 17) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 6.

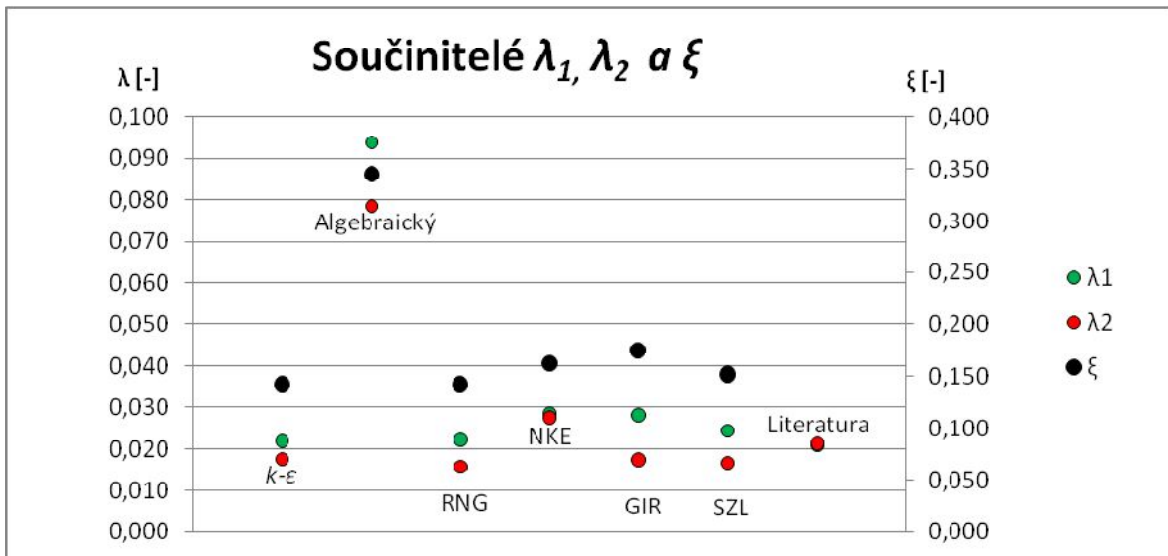
Tab. 17 Výsledky - var. 6

6	$k-\epsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,1429	0,3449	0,1426	0,1627	0,1754	0,1523	
λ_1	0,0219	0,0936	0,0223	0,0288	0,0283	0,0245	0,0210
λ_2	0,0177	0,0786	0,0159	0,0277	0,0175	0,0167	0,0214
h_m	0,0172	0,0415	0,0172	0,0196	0,0211	0,0183	
h_{t1}	0,0095	0,0406	0,0097	0,0125	0,0123	0,0106	0,0094
h_{t2}	0,0234	0,1042	0,0211	0,0367	0,0232	0,0221	0,0293
h_{celk}	0,0502	0,1863	0,0479	0,0688	0,0566	0,0510	

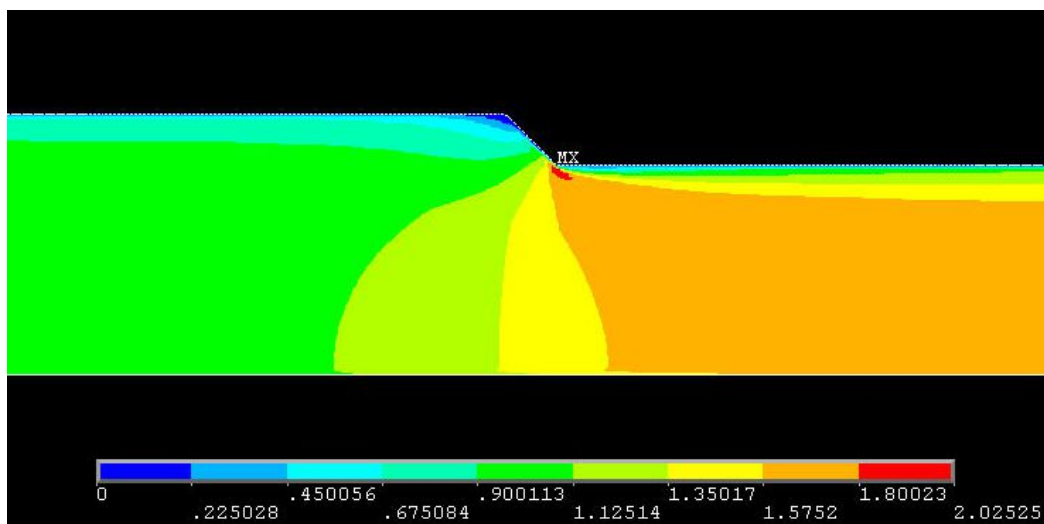
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 70,5%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů GIR a RNG, kde se hodnoty liší o 18,7%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ξ od hodnot s použitím algebraického modelu liší o 55,0%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianta s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Nejvíce se liší varianta s použitím algebraického modelu.



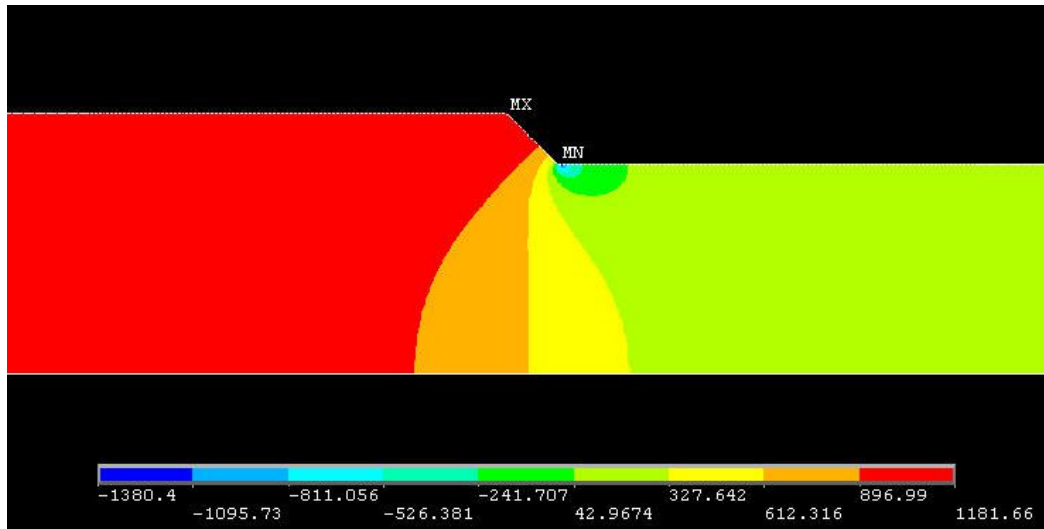
Obr. 28 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 6



Obr. 29 Rozložení rychlostí var. 6 s NKE modelem

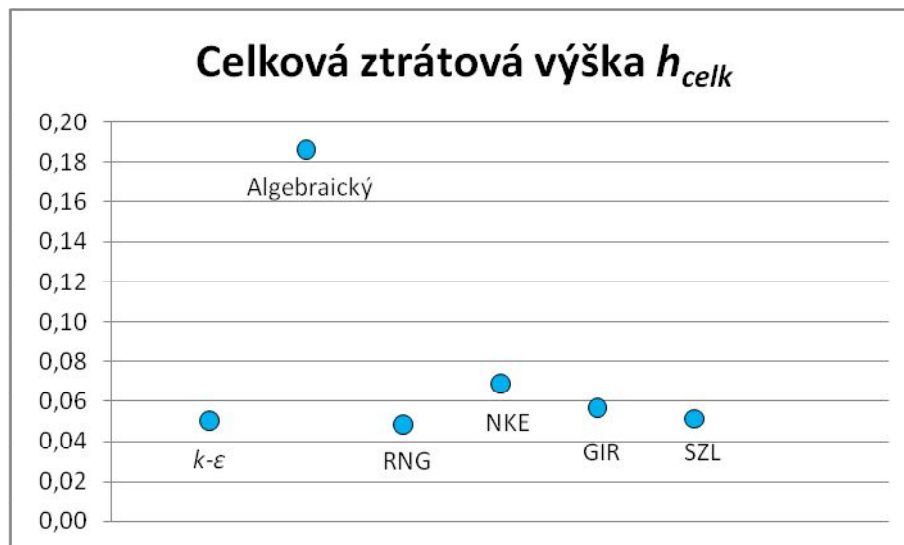
Na Obr. 29 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím NKE modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od

stěny a vznikají zde vyšší rychlosti. V místě ihned za zúžením vzniká větší rychlost. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 30 Rozložení tlaků var. 6 s NKE modelem

Z Obr. 30 je patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením. U varianty s NKE modelem vzniká v místě bezprostředně za zúžením oblast podtlaku.



Obr. 31 Celková ztrátová výška - var. 6

Jak můžeme vidět na Obr. 31, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 70,5%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím NKE turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím RNG modelu. Hodnoty s použitím NKE a RNG modelu se liší o 30,3%.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,051.

Varianta 7

V sedmé variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m, $D_2 = 0,100$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 18) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 7.

Tab. 18 Výsledky - var. 7

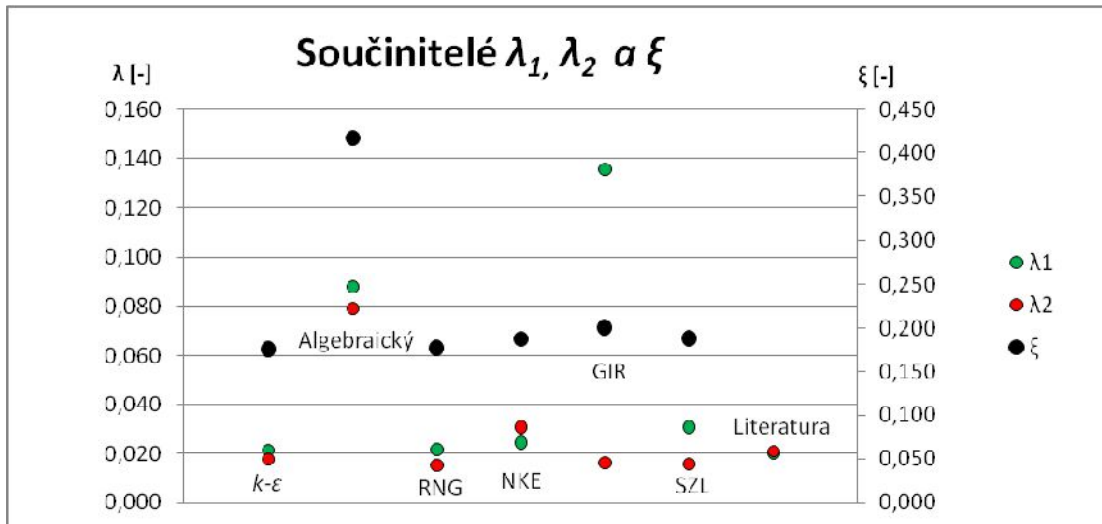
7	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	0,1766	0,4178	0,1781	0,1882	0,2015	0,1888	
λ_1	0,0215	0,0879	0,0217	0,0246	0,1355	0,0307	0,0201
λ_2	0,0173	0,0792	0,0151	0,0306	0,0160	0,0155	0,0209
h_m	0,0444	0,1050	0,0448	0,0473	0,0506	0,0475	
h_{t1}	0,0078	0,0320	0,0079	0,0089	0,0493	0,0112	0,0075
h_{t2}	0,0479	0,2189	0,0417	0,0845	0,0443	0,0430	0,0593
h_{celk}	0,1001	0,3559	0,0944	0,1407	0,1443	0,1016	

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 67,3%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

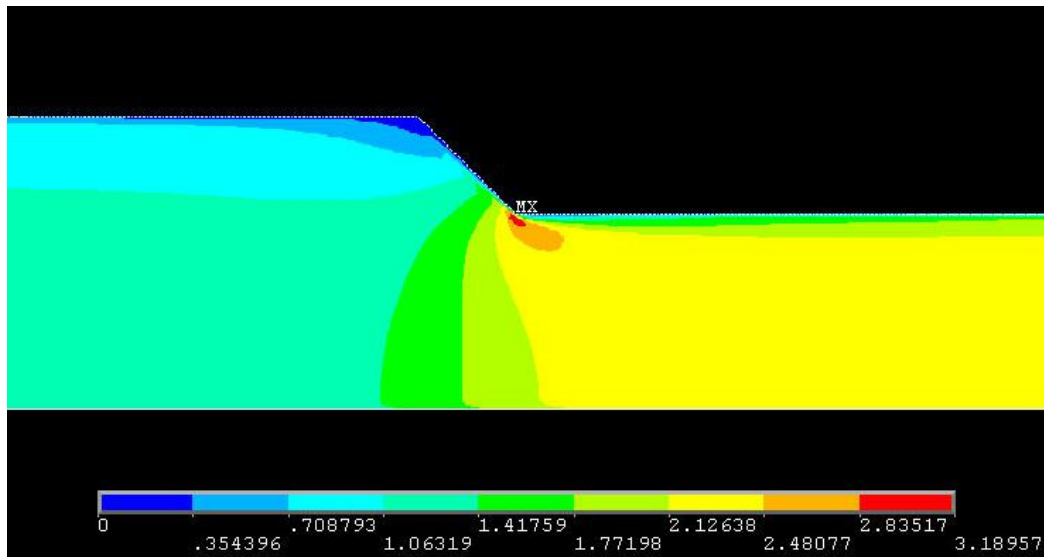
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů GIR a $k-\varepsilon$, kde se hodnoty liší o 12,3%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s použitím algebraického modelu liší o 55,3%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianta s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Nejvíce se liší varianta s použitím algebraického a GIR modelu.

Na Obr. 33 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s $k-\varepsilon$ modelem. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vznikají zde vyšší rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.

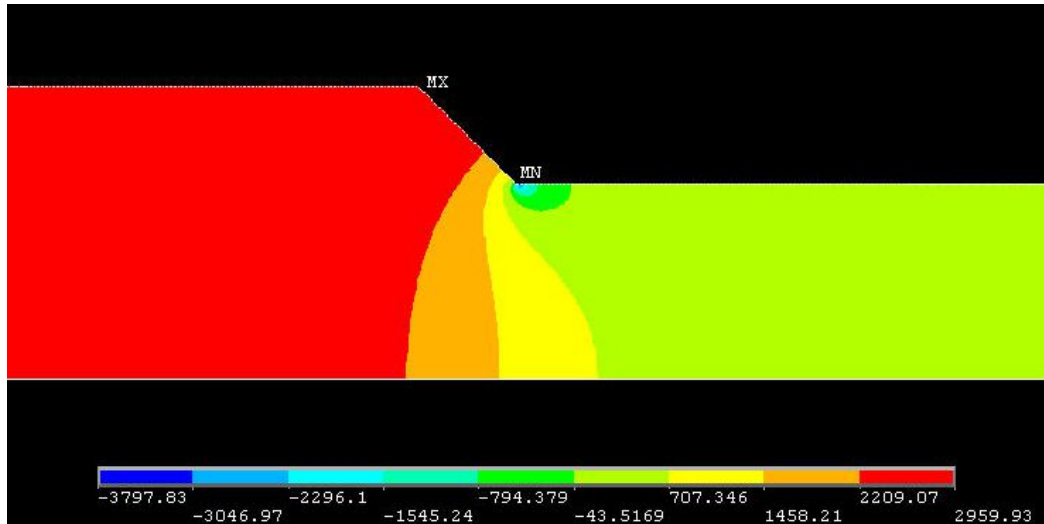


Obr. 32 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 7

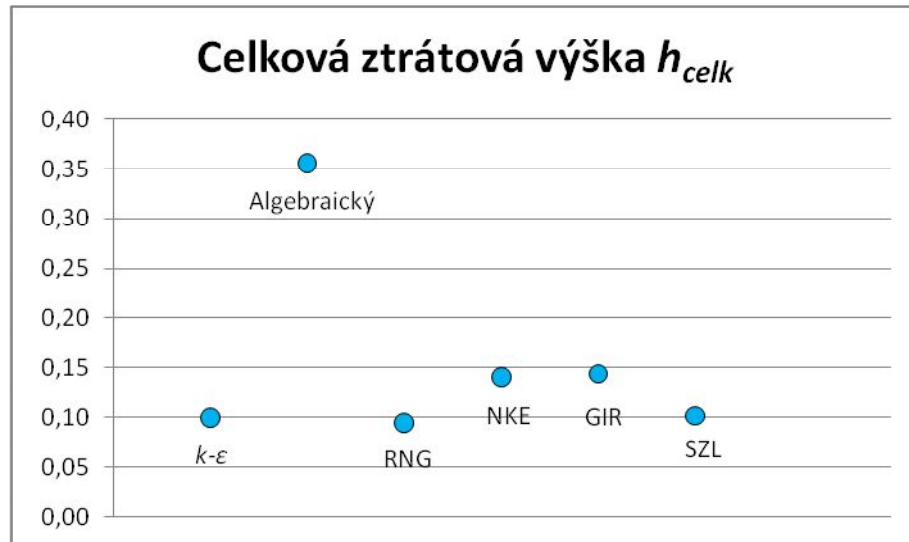


Obr. 33 Rozložení rychlostí var. 7 s $k-\epsilon$ modelem

Z Obr. 34 je patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením. V místě bezprostředně za zúžením vzniká oblast podtlaku.



Obr. 34 Rozložení tlaků var. 7 s $k-\epsilon$ modelem



Obr. 35 Celková ztrátová výška - var. 7

Jak můžeme vidět na Obr. 35, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 67,3%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím GIR turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím RNG modelu. Hodnoty s použitím GIR a RNG modelu se liší o 34,6%.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,100.

Varianta 8

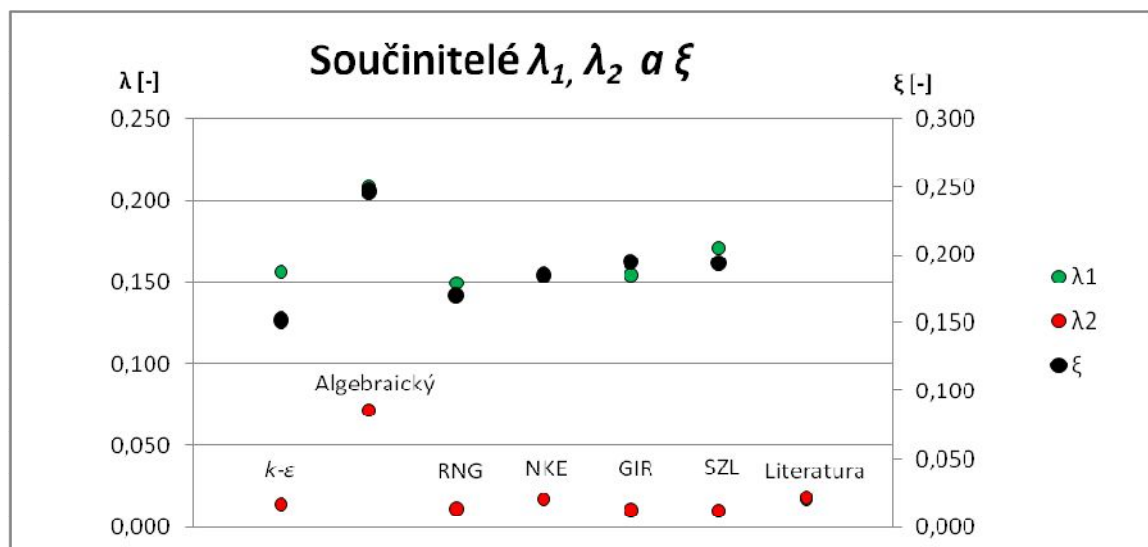
V osmé variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,300$ m, $D_2 = 0,150$ m a délka kónické části $L_3 = 0,075$ m. V následující tabulce (Tab. 19) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 8.

Tab. 19 Výsledky - var. 8

8	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,1518	0,2472	0,1705	0,1852	0,1948	0,1941	
λ_1	0,1560	0,2084	0,1495	0,1530	0,1543	0,1710	0,0172
λ_2	0,0145	0,0717	0,0118	0,0175	0,0111	0,0108	0,0185
h_m	0,1222	0,1990	0,1373	0,1511	0,1568	0,1562	
h_{1l}	0,0288	0,0384	0,0276	0,0286	0,0285	0,0315	0,0032
h_{12}	0,0856	0,4232	0,0694	0,1047	0,0657	0,0635	0,1107
h_{celk}	0,2366	0,6606	0,2342	0,2844	0,2509	0,2512	

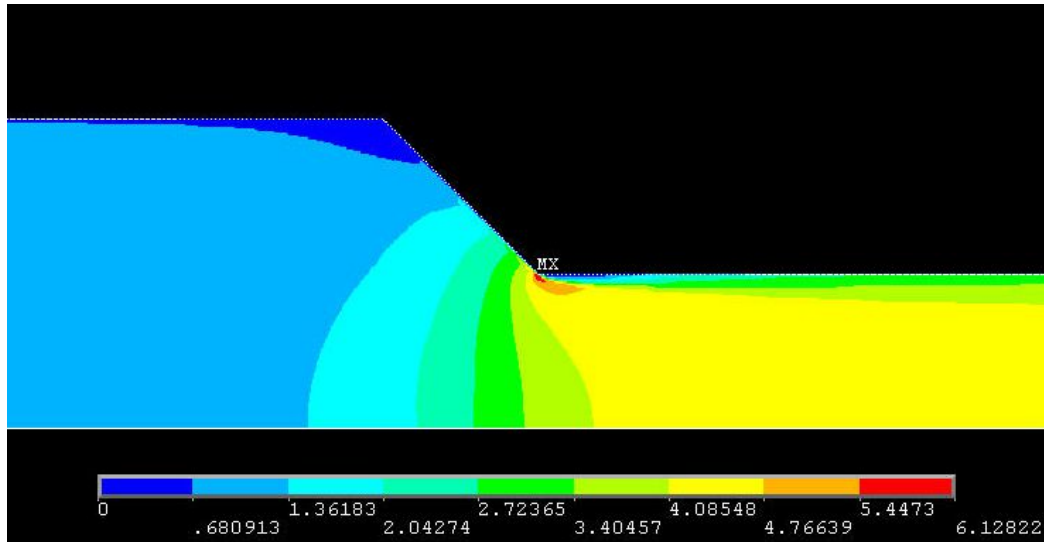
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 61,9%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů GIR a $k-\varepsilon$, kde se hodnoty liší o 22,1%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ξ od hodnot s použitím algebraického modelu liší o 27,5%.



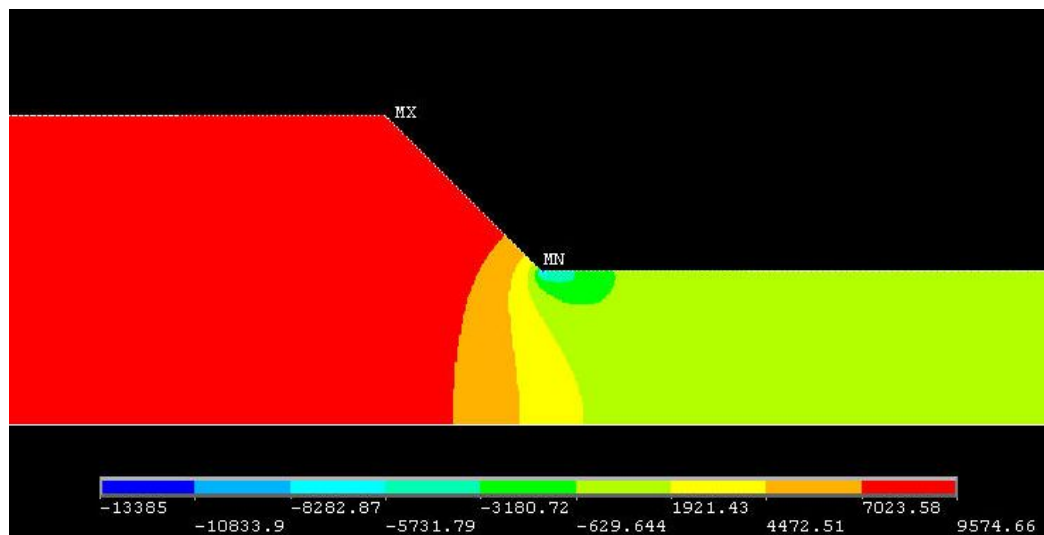
Obr. 36 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 8

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 vychází hodnoty s použitím modelů $k-\varepsilon$, RNG, NKE, GIR a SZL velice podobně. Ovšem liší se od hodnoty λ_1 vypočítané dle dostupné literatury. Výsledky při použití algebraického modelu opět dávají vyšší hodnoty než při použití ostatních turbulentních modelů.



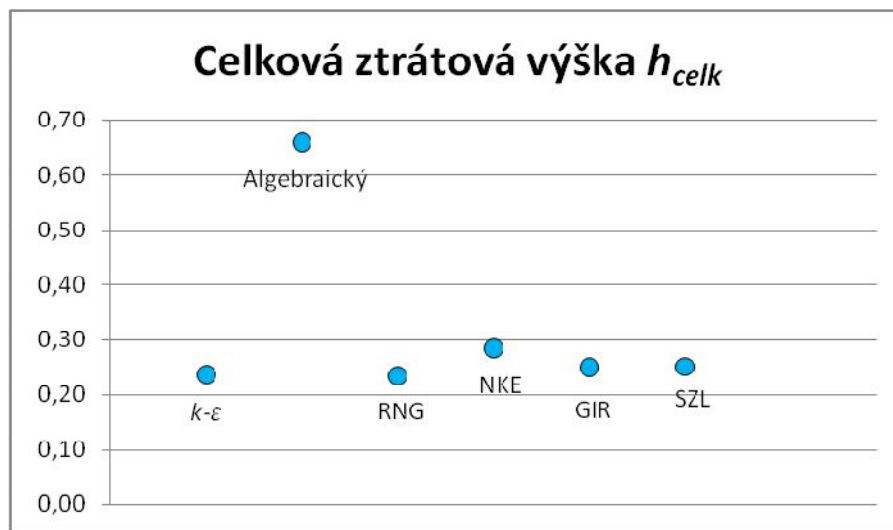
Obr. 37 Rozložení rychlostí var. 8 s RNG modelem

Na Obr. 37 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím RNG modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 38 Rozložení tlaků var. 8 s RNG modelem

Z Obr. 38 je patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením. V místě bezprostředně za zúžením vzniká oblast podtlaku.



Obr. 39 Celková ztrátová výška - var. 8

Jak můžeme vidět na Obr. 39, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 61,9%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím NKE turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím RNG modelu. Hodnoty s použitím NKE a RNG modelu se liší o 17,6%. Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,252.

Varianta 9

V deváté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,250$ m, $D_2 = 0,200$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 20) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 9.

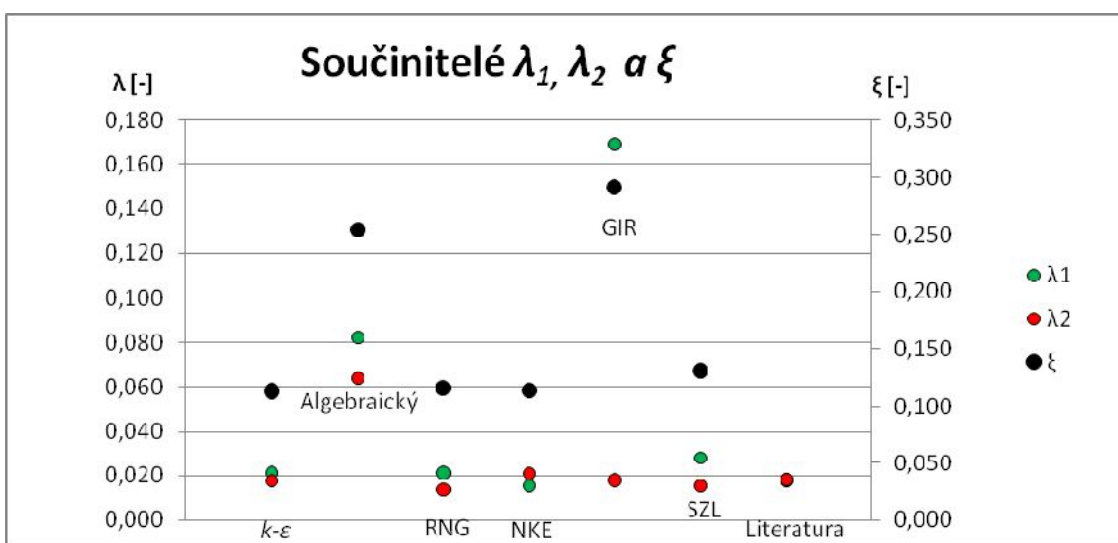
Tab. 20 Výsledky - var. 9

9	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,1129	0,2538	0,1157	0,1139	0,2911	0,1311	
λ_1	0,0210	0,0821	0,0211	0,0155	0,1691	0,0278	0,0179
λ_2	0,0174	0,0638	0,0138	0,0207	0,0177	0,0154	0,0182
h_m	0,0138	0,0311	0,0142	0,0139	0,0357	0,0161	
h_{t1}	0,0046	0,0181	0,0047	0,0034	0,0373	0,0061	0,0040
h_{t2}	0,0117	0,0430	0,0093	0,0140	0,0119	0,0104	0,0124
h_{celk}	0,0302	0,0922	0,0281	0,0313	0,0849	0,0326	

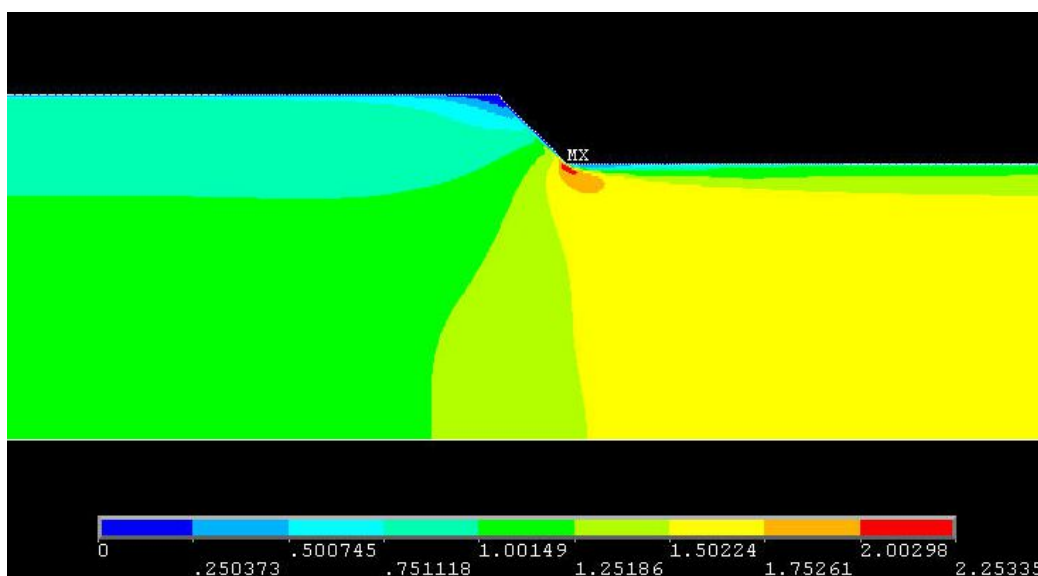
Na první pohled je zřejmé, že algebraický a GIR turbulentní modely se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišují a tudíž jsou v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesné.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů SZL a $k-\varepsilon$, kde se hodnoty liší o 13,9%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického a GIR) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s použitím algebraického modelu liší o 35,9%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 vychází hodnoty s použitím modelů $k-\varepsilon$, RNG, NKE, a SZL velice podobně. Výsledky při použití algebraického a GIR modelů dávají vyšší hodnoty než při použití ostatních turbulentních modelů.

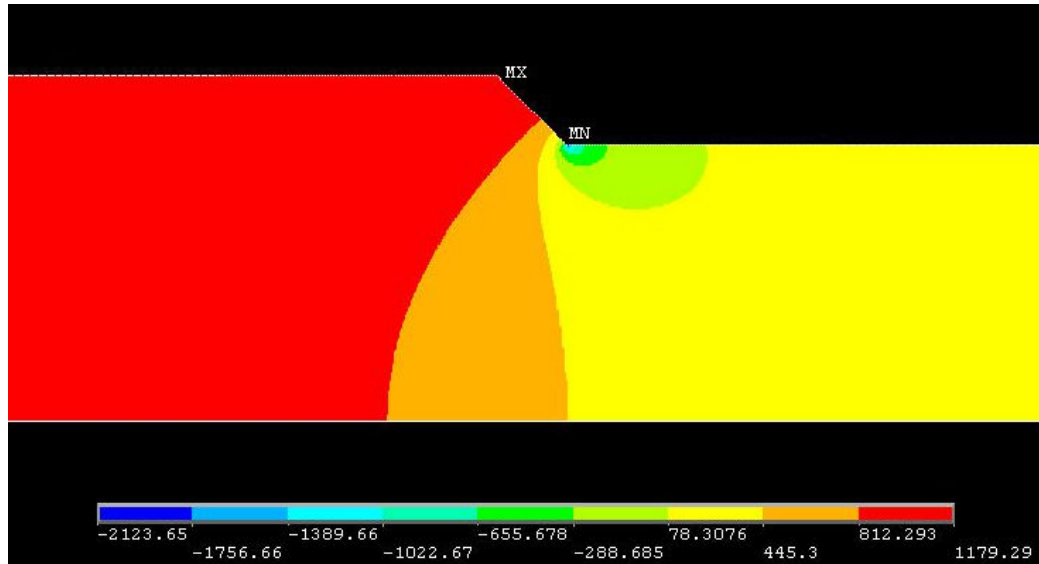


Obr. 40 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 9



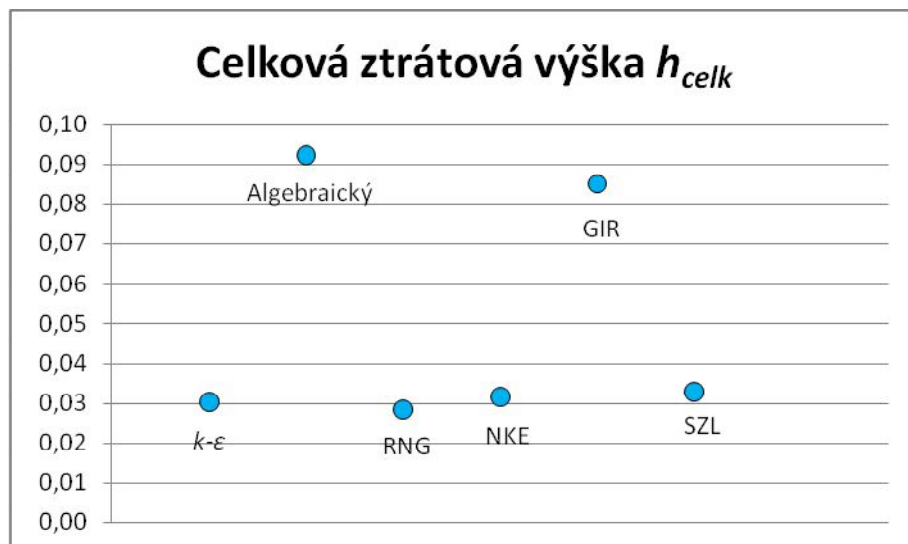
Obr. 41 Rozložení rychlostí var. 9 s NKE modelem

Na Obr. 40 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím NKE modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 42 Rozložení tlaků var. 9 s NKE modelem

Z Obr. 41 je patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením. Vzniká zde v místě bezprostředně za zúžením oblast podtlaku.



Obr. 43 Celková ztrátová výška - var. 9

Jak můžeme vidět na Obr. 43, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického a GIR turbulentních modelů se liší od ostatních vypočítaných hodnot. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} (v případě zanedbání modelů GIR a algebraického) vykazuje varianta s použitím SZL turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím RNG modelu. Hodnoty s použitím SZL a RNG modelu se liší o 13,8%.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,030.

5.4 NÁHLÉ ROZŠÍŘENÍ

V programu byl nejprve vytvořen geometrický model náhle se rozšiřujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Flotran vymodelováno 30 variant náhlého rozšíření. Průměry potrubí D_1 , D_2 jsou uvedeny v Tab. 21. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitelé ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 . Dále následoval výpočet součinitele místní ztráty ζ a z něj vypočtena místní ztráta změnou průřezu h_m vztažena k profilu D_2 s rychlostí v_2 . Jako poslední byla vypočítána celková ztráta h_{celk} , která je součtem ztrát třením po délce h_{t1} a h_{t2} , a místní ztrátou h_m .

Tab. 21 Náhlé rozšíření-průměry potrubí

VAR	D_1	D_2
	[m]	[m]
10	0,050	0,080
11	0,100	0,125
12	0,100	0,150
13	0,150	0,300
14	0,200	0,250

Varianta 10

V desáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,050$ m a $D_2 = 0,080$ m. V následující tabulce (Tab. 22) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 10.

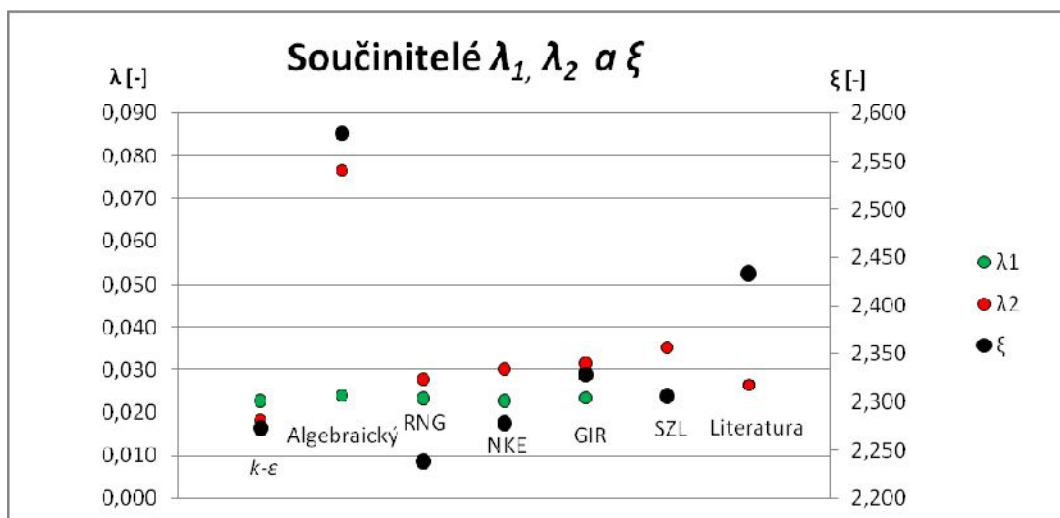
Tab. 22 Výsledky - var. 10

10	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	2,2734	2,5793	2,2385	2,2781	2,3283	2,3057	2,4336
λ_1	0,0227	0,0239	0,0232	0,0227	0,0233	0,0238	0,0265
λ_2	0,0183	0,0765	0,0278	0,0302	0,0315	0,0352	0,0263
h_m	0,0163	0,0185	0,0161	0,0164	0,0167	0,0166	0,0189
h_{t1}	0,0235	0,0247	0,0240	0,0235	0,0242	0,0247	0,0297
h_{t2}	0,0018	0,0076	0,0027	0,0030	0,0031	0,0035	0,0028
h_{celk}	0,0416	0,0508	0,0428	0,0428	0,0440	0,0447	0,0515

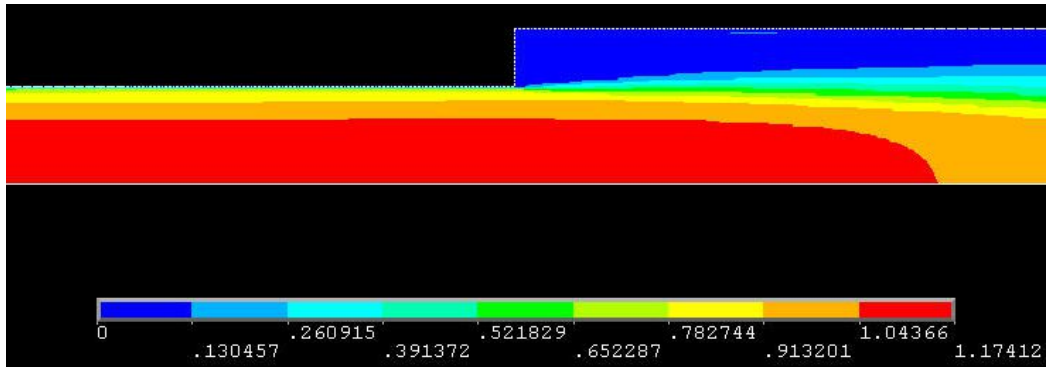
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 15,0%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů GIR a RNG, kde se hodnoty liší o 3,9%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 6,1%.

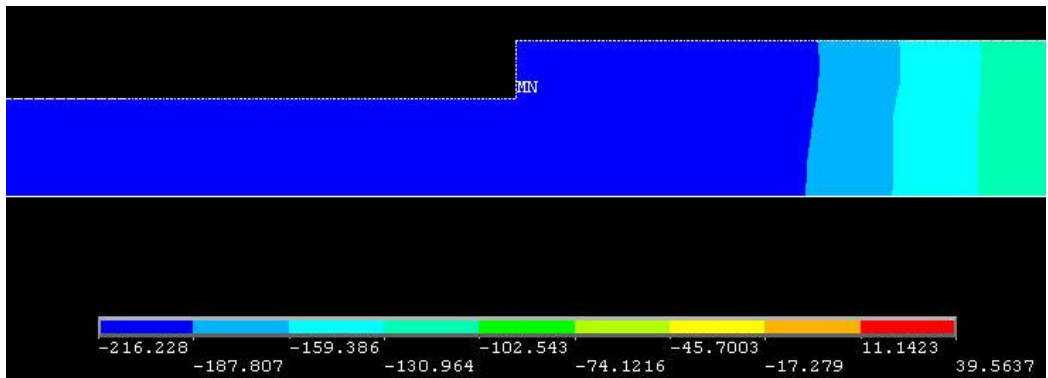
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianta s použitím RNG modelu.



Obr. 44 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 10



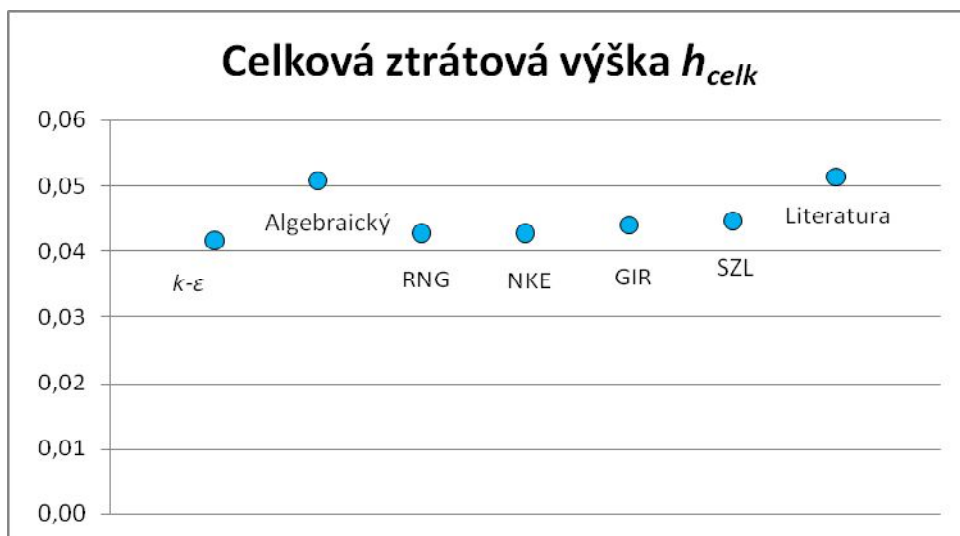
Obr. 45 Rozložení rychlostí var. 10 s GIR modelem



Obr. 46 Rozložení tlaků var. 10 s GIR modelem

Na Obr. 45 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s použitím GIR modelu.

Z Obr. 46 je patrné, že v užším průřezu vzniká podtlak.



Obr. 47 Celková ztrátová výška - var. 10

Na Obr. 47 můžeme vidět, že hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 15,0%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 16,1 %.

Varianta 11

V jedenácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m a $D_2 = 0,125$ m. V následující tabulce (Tab. 23) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 11.

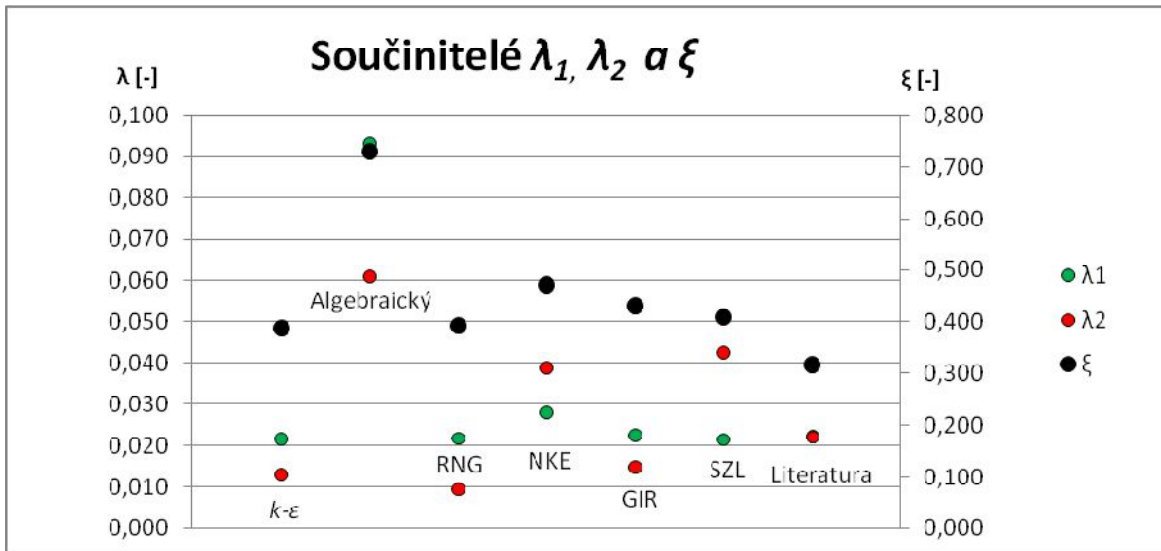
Tab. 23 Výsledky - var. 11

11	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	0,3889	0,7300	0,3929	0,4720	0,4316	0,4093	0,3164
λ_1	0,0216	0,0931	0,0217	0,0280	0,0224	0,0214	0,0222
λ_2	0,0131	0,0607	0,0096	0,0388	0,0148	0,0425	0,0220
h_m	0,0078	0,0146	0,0079	0,0095	0,0087	0,0082	0,0066
h_{t1}	0,0116	0,0502	0,0117	0,0151	0,0121	0,0115	0,0124
h_{t2}	0,0023	0,0107	0,0017	0,0069	0,0026	0,0075	0,0040
h_{celk}	0,0217	0,0756	0,0213	0,0314	0,0233	0,0273	0,0231

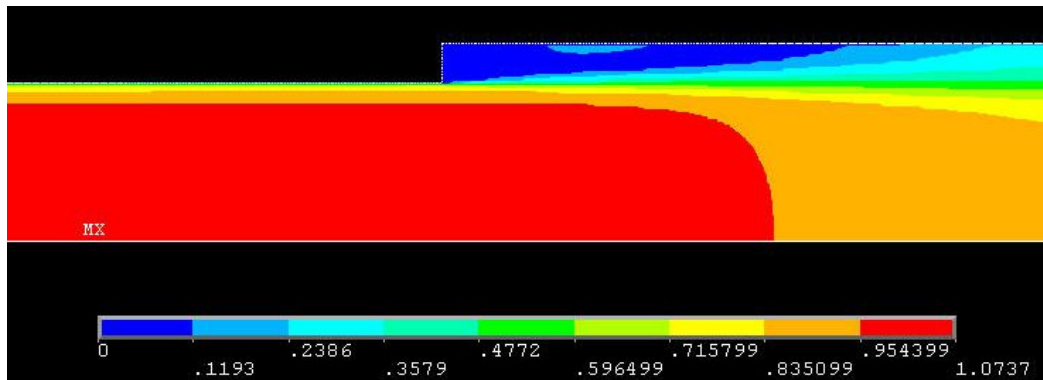
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 66,9%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a NKE, kde se hodnoty liší o 17,6%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 24,5%.

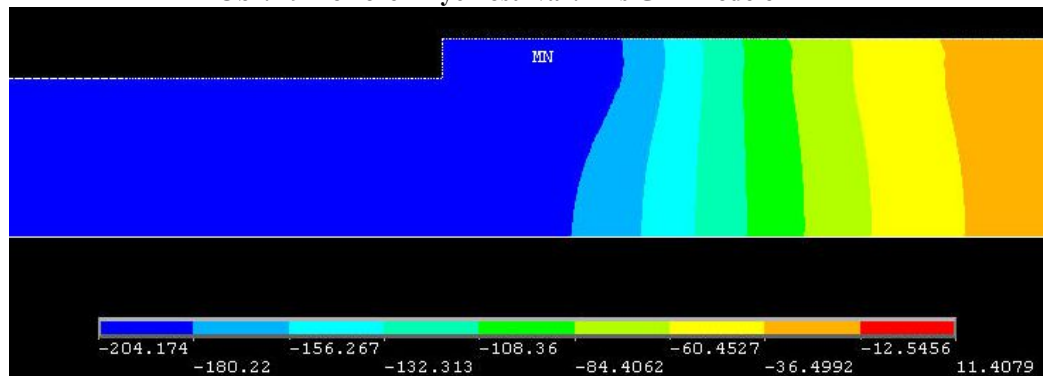
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a GIR turbulentních modelů. Při použití algebraického modelu se hodnoty λ_1 a λ_2 liší nejvíce.



Obr. 48 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 11



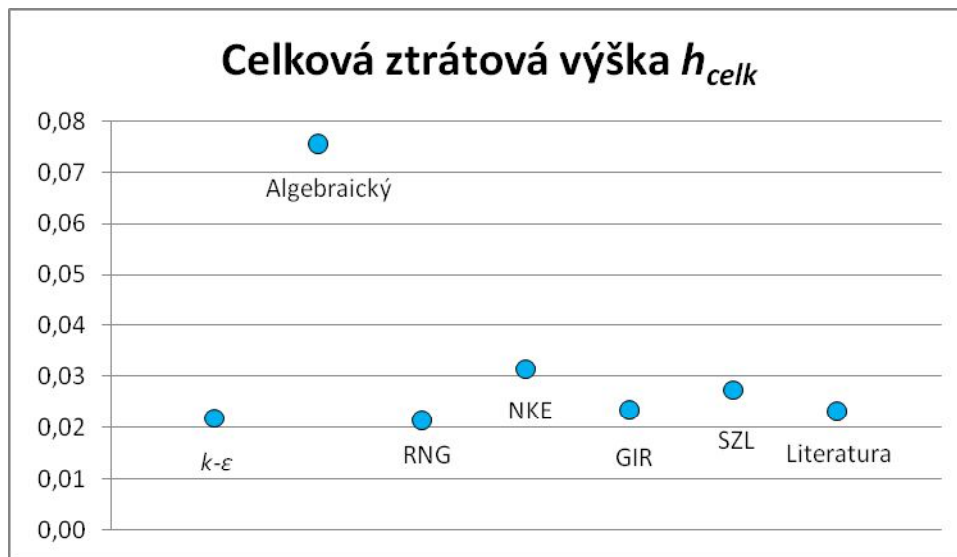
Obr. 49 Rozložení rychlostí var. 11 s GIR modelem



Obr. 50 Rozložení tlaků var. 11 s GIR modelem

Na Obr. 49 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s použitím GIR modelu.

Z Obr. 50 je patrné, že v užším průřezu vzniká podtlak. S rostoucí vzdáleností od změny průřezu se tlak zvyšuje.



Obr. 51 Celková ztrátová výška - var. 11

Jak můžeme vidět na Obr. 51, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 66,9%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 7,7 %.

Varianta 12

Ve dvanácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m a $D_2 = 0,150$ m. V následující tabulce (Tab. 24) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 12.

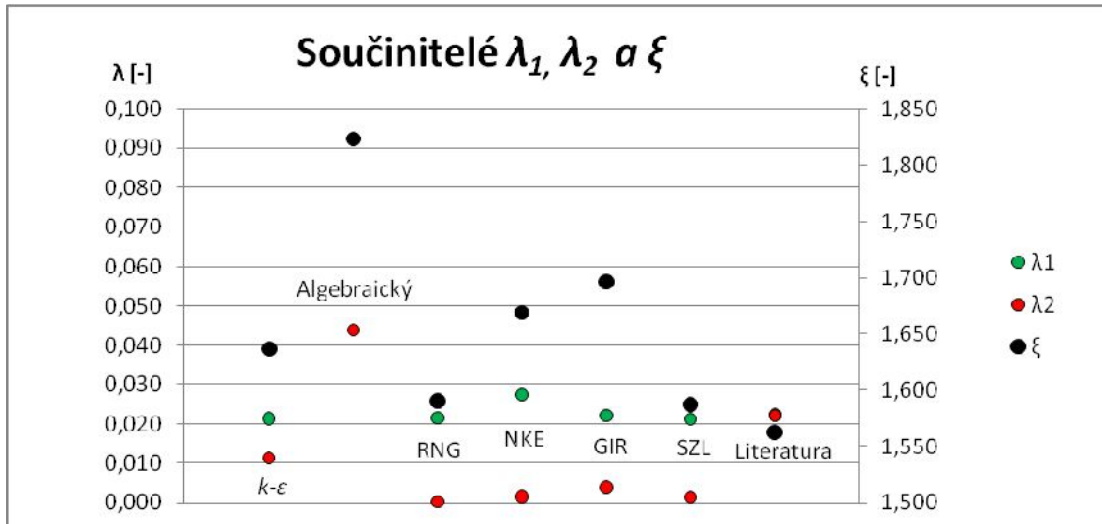
Tab. 24 Výsledky - var. 12

12	$k-\epsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	1,6364	1,8225	1,5897	1,6689	1,6961	1,5867	1,5625
λ_1	0,0214	0,0922	0,0216	0,0275	0,0220	0,0212	0,0222
λ_2	0,0112	0,0438	0,0003	0,0015	0,0040	0,0015	0,0221
h_m	0,0158	0,0176	0,0154	0,0161	0,0164	0,0154	0,0157
h_{t1}	0,0115	0,0497	0,0116	0,0148	0,0119	0,0114	0,0124
h_{t2}	0,0008	0,0031	0,0000	0,0001	0,0003	0,0001	0,0016
h_{celk}	0,0282	0,0704	0,0270	0,0311	0,0286	0,0269	0,0298

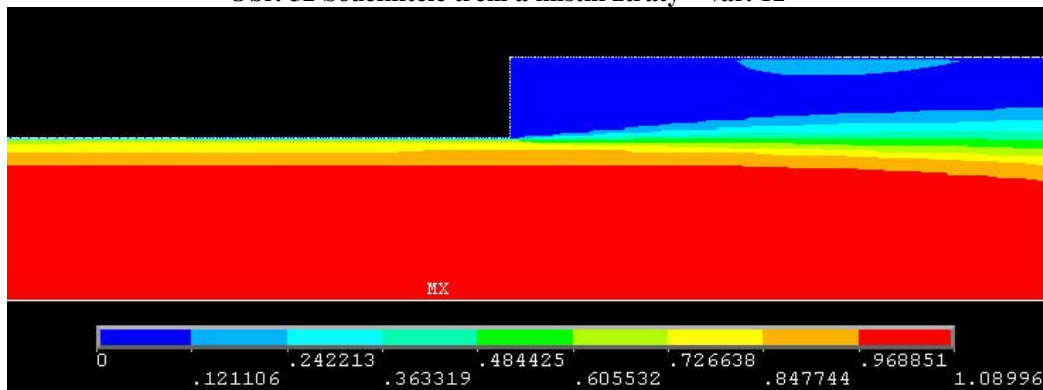
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 59,8%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a GIR, kde se hodnoty liší o 6,4%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 4,5%.

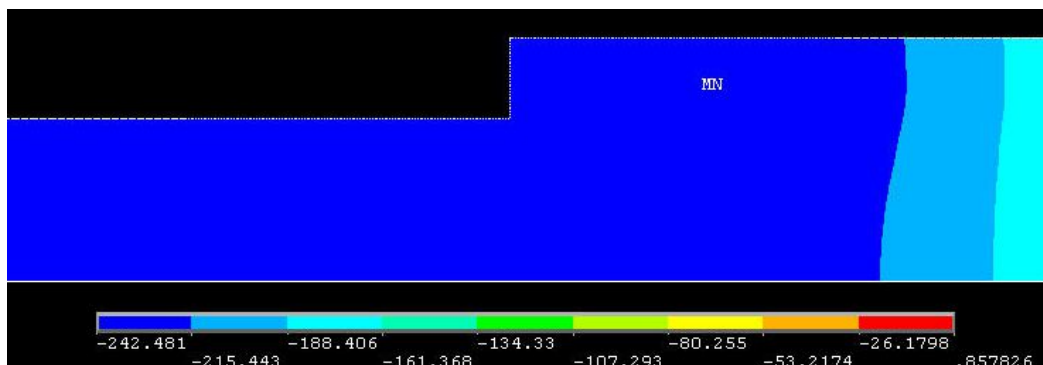
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Při použití algebraického modelu se hodnoty λ_1 a λ_2 liší nejvíce.



Obr. 52 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 12



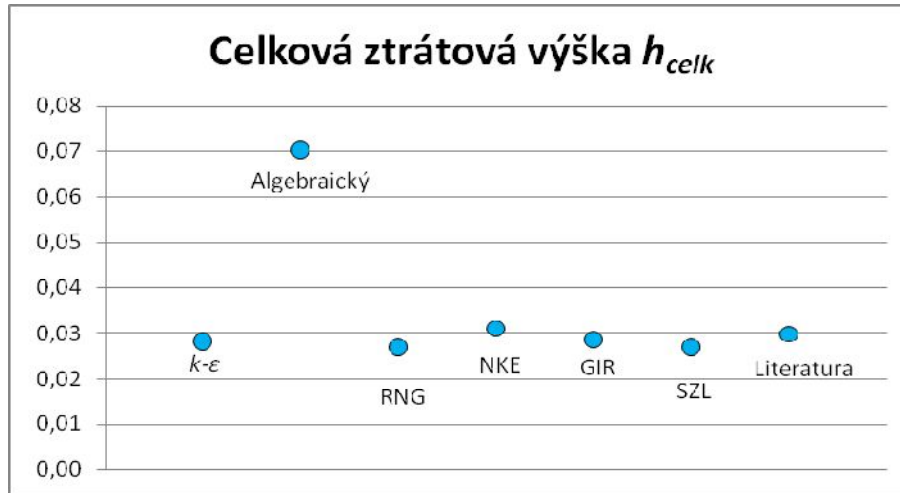
Obr. 53 Rozložení rychlostí var. 12 se SZL modelem



Obr. 54 Rozložení tlaků var. 12 se SZL modelem

Na Obr. 53 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s použitím SZL modelu. V oblasti bezprostředně za zúžením vzniká víření vody.

Z Obr. 54 je očividné, že v užším průřezu vzniká podtlak, který se s rostoucí vzdáleností od změny průřezu zmenšuje



Obr. 55 Celková ztrátová výška - var. 12

Jak můžeme vidět na Obr. 55, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 59,8%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 4,9 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,029.

Varianta 13

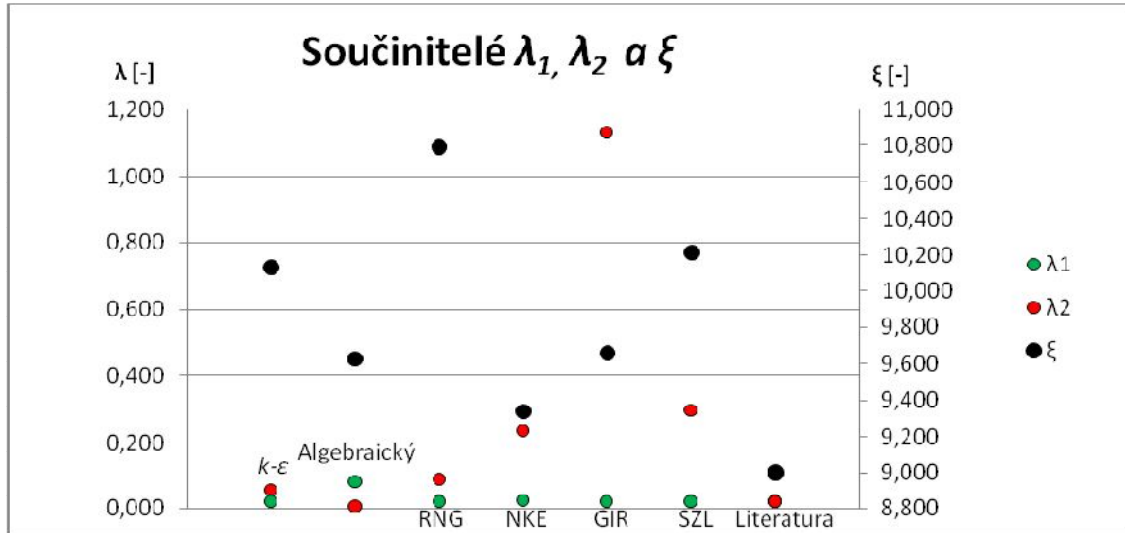
Ve třinácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m a $D_2 = 0,300$ m. V následující tabulce (Tab. 25) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 13.

Tab. 25 Výsledky - var. 13

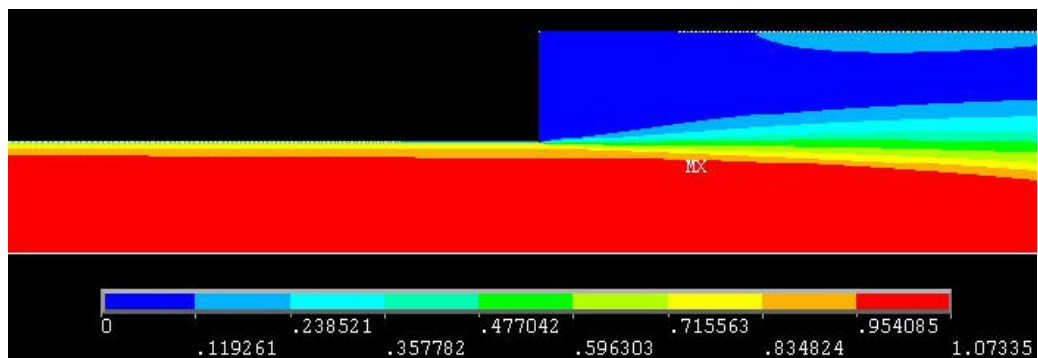
13	$k-\epsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	10,1294	9,6289	10,7934	9,3395	9,6620	10,2123	9,0000
λ_1	0,0206	0,0827	0,0208	0,0237	0,0209	0,0204	0,0201
λ_2	0,0572	0,0077	0,0888	0,2355	1,1322	0,2973	0,0205
h_m	0,0314	0,0299	0,0335	0,0290	0,0300	0,0317	0,0287
h_{11}	0,0075	0,0301	0,0076	0,0086	0,0076	0,0074	0,0075
h_{12}	0,0007	0,0001	0,0010	0,0027	0,0129	0,0034	0,0002
h_{celk}	0,0396	0,0601	0,0421	0,0403	0,0505	0,0425	0,0364

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a NKE, kde se hodnoty liší o 13,5%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 10,2%.

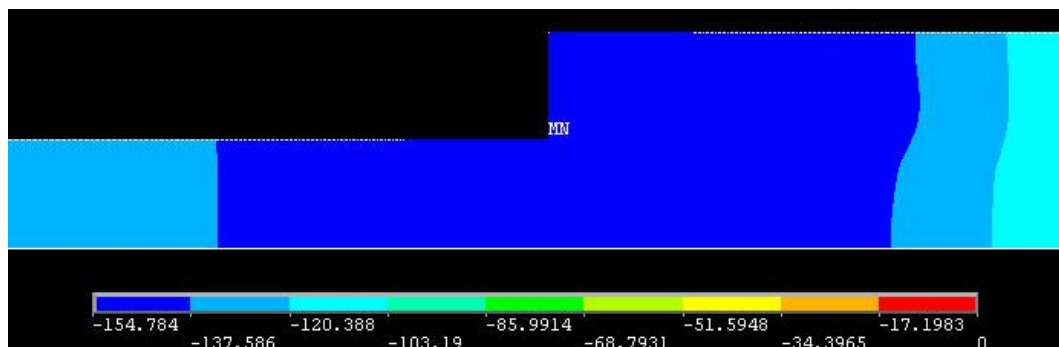
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ modelu.



Obr. 56 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 13



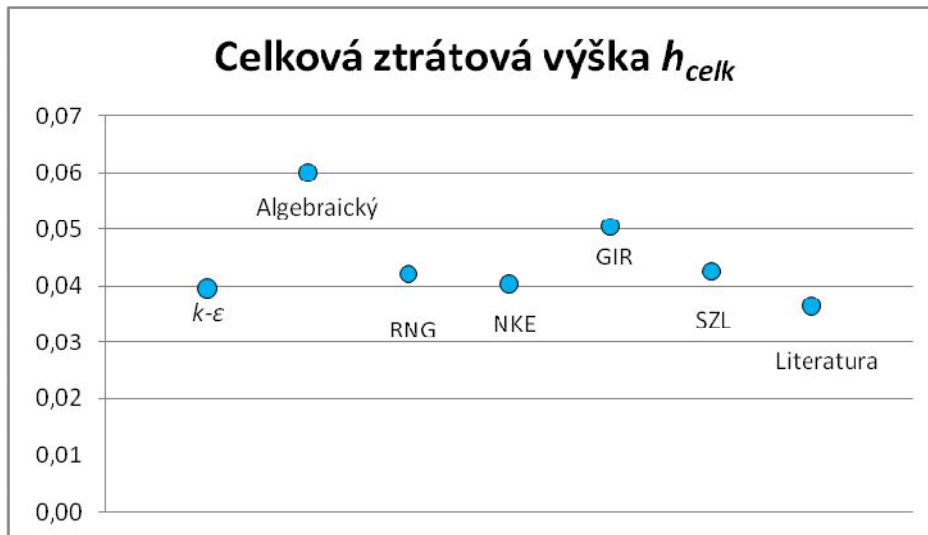
Obr. 57 Rozložení rychlostí var. 13 s $k-\varepsilon$ modelem



Obr. 58 Rozložení tlaků var. 13 s $k-\varepsilon$ modelem

Na Obr. 57 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s $k-\varepsilon$ modelem. V užším průřezu vznikají větší rychlosti a v místě ihned za zúžením dochází k víření vody.

Ze stupnice na Obr. 58 je patrné, že v celém potrubí vzniká podtlak, který je největší v oblasti kolem změny průřezu.



Obr. 59 Celková ztrátová výška - var. 13

Jak můžeme vidět na Obr. 59, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 28,4%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 15,2 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,140.

Varianta 14

Ve čtrnácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,200$ m a $D_2 = 0,250$ m. V následující tabulce (Tab. 26) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 14.

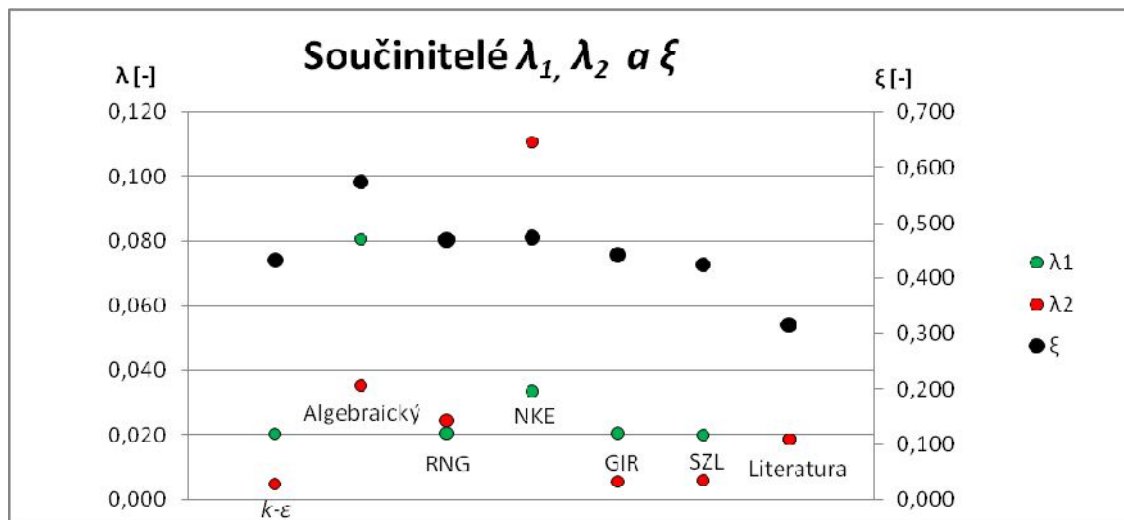
Tab. 26 Výsledky - var. 14

14	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	0,4326	0,5729	0,4693	0,4737	0,4422	0,4251	0,3164
λ_1	0,0205	0,0806	0,0207	0,0338	0,0207	0,0203	0,0188
λ_2	0,0051	0,0355	0,0245	0,1107	0,0057	0,0061	0,0187
h_m	0,0089	0,0117	0,0096	0,0097	0,0091	0,0087	0,0066
h_{t1}	0,0056	0,0222	0,0057	0,0093	0,0057	0,0056	0,0053
h_{t2}	0,0005	0,0032	0,0022	0,0100	0,0005	0,0005	0,0017
h_{celk}	0,0149	0,0371	0,0175	0,0289	0,0153	0,0148	0,0136

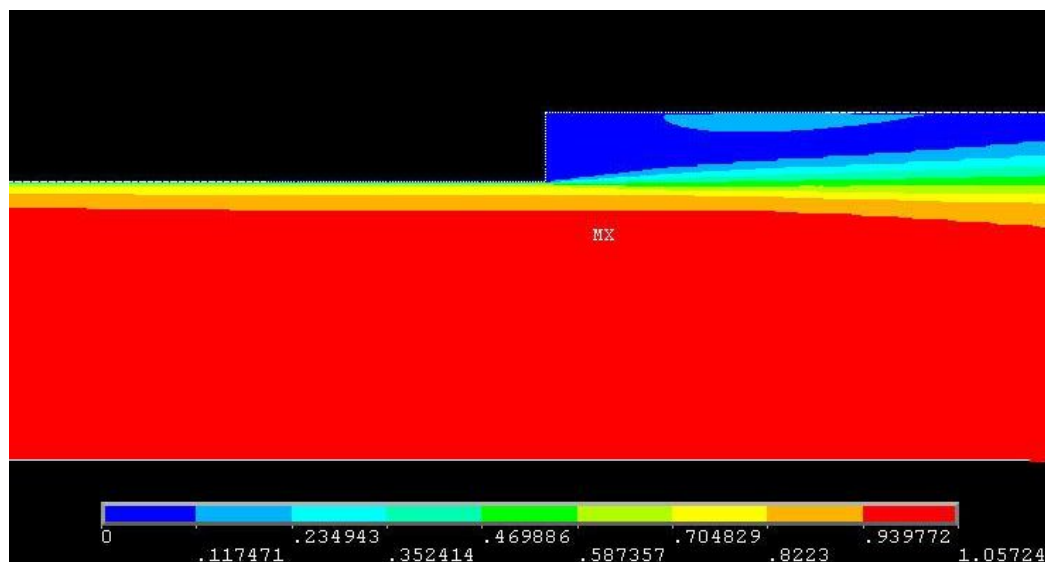
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 50,7%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů NKE a SZL, kde se hodnoty liší o 10,2%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 29,5%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianty s použitím RNG modelu. Při použití turbulentního NKE modelu a algebraického turbulentního modelu se hodnoty součinitelů tření liší nejvíce.

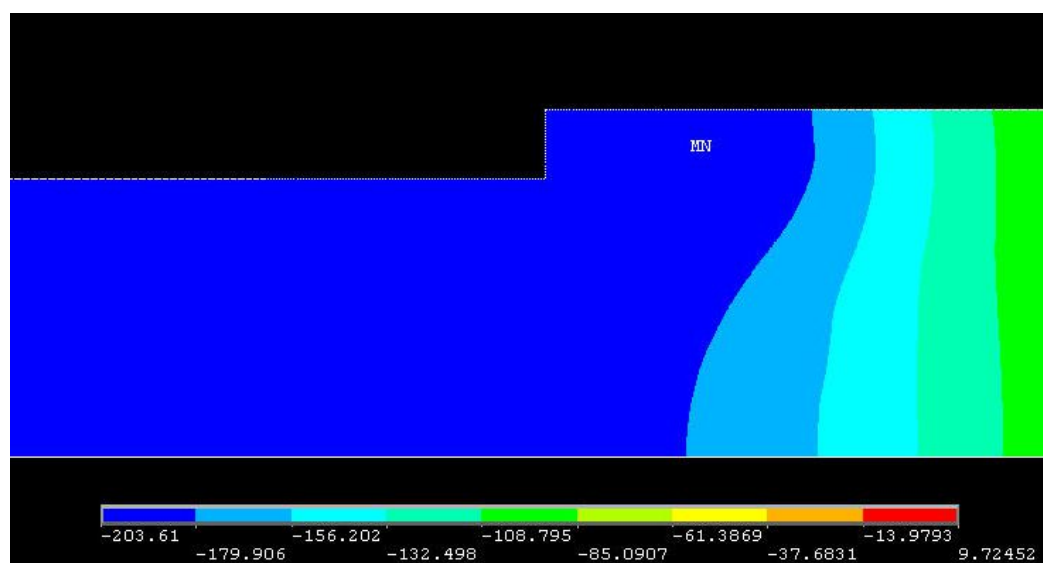


Obr. 60 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 14



Obr. 61 Rozložení rychlostí var. 14 s RNG modelem

Na Obr. 61 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s RNG modelem. V obou variantách vznikají v celém potrubí přibližně stejné rychlosti, jak je patrné ze stupnic na obrázcích.



Obr. 62 Rozložení tlaků var. 14 s RNG modelem

Z Obr. 62 je očividné, že v užším průřezu v oblasti před zúžením vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje.



Obr. 63 Celková ztrátová výška - var. 14

Jak můžeme vidět na Obr. 63, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 50,7%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 25,6 %.

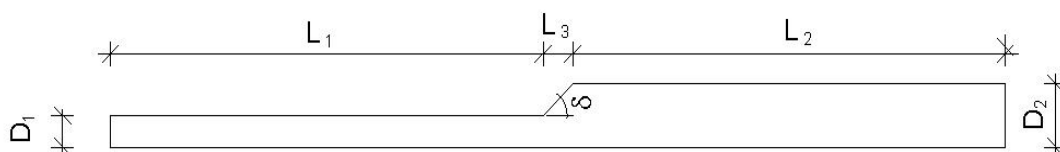
5.5 KÓNICKÉ ROZŠÍŘENÍ

V programu byl nejprve vytvořen geometrický model kónicky se rozšiřujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Flotran vymodelováno 30 variant kónického rozšíření. Průměry potrubí D_1 , D_2 jsou uvedeny v Tab. 27. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Délka kónické části potrubí byla volena tak, aby vznikl úhel $\delta = 45^\circ$ (viz Obr. 64) Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitele ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 . Dále následoval výpočet součinitele místní ztráty ζ a z něj vypočtena místní ztráta změnou průřezu h_m vztažena k profilu D_2 s rychlostí v_2 . Jako poslední byla vypočítána celková ztráta h_{celk} , která je součtem ztrát třením po délce h_{t1} a h_{t2} , a místní ztrátou h_m .

Tab. 27 Kónické rozšíření-průměry potrubí

VAR	D_1	D_2
	[m]	[m]
15	0,050	0,080
16	0,100	0,125
17	0,100	0,150
18	0,150	0,300
19	0,200	0,250



Obr. 64 Schéma kónického rozšíření

Varianta 15

V patnácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,050$ m, $D_2 = 0,080$ m a délka kónické části $L_3 = 0,015$ m. V následující tabulce (Tab. 28) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 15.

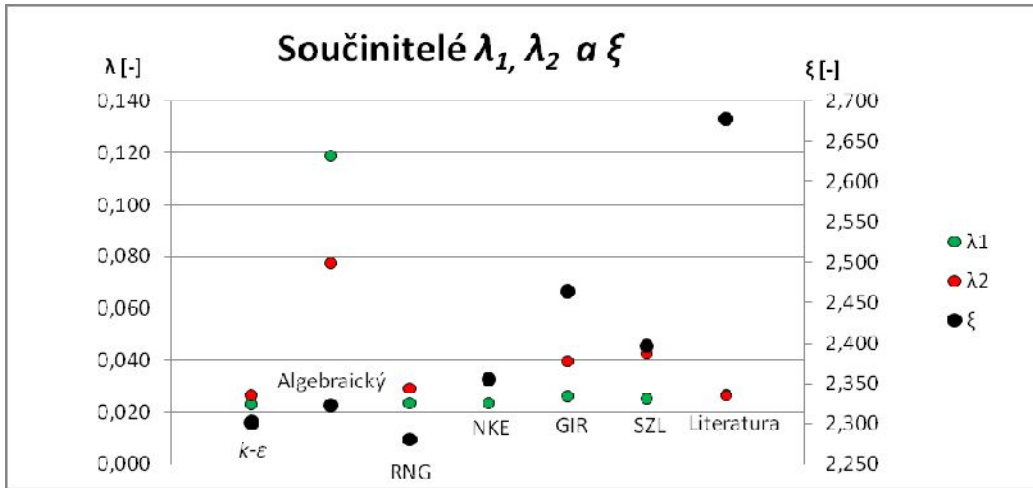
Tab. 28 Výsledky - var. 15

15	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	2,3014	2,3221	2,2808	2,3554	2,4638	2,3971	2,6770
λ_1	0,0229	0,1187	0,0232	0,0233	0,0259	0,0249	0,0265
λ_2	0,0264	0,0774	0,0291	0,0324	0,0398	0,0425	0,0263
h_m	0,0166	0,0167	0,0164	0,0169	0,0177	0,0172	0,0208
h_{t1}	0,0238	0,1246	0,0243	0,0244	0,0272	0,0261	0,0297
h_{t2}	0,0019	0,0080	0,0030	0,0033	0,0041	0,0044	0,0028
h_{celk}	0,0424	0,1493	0,0437	0,0447	0,0490	0,0477	0,0534

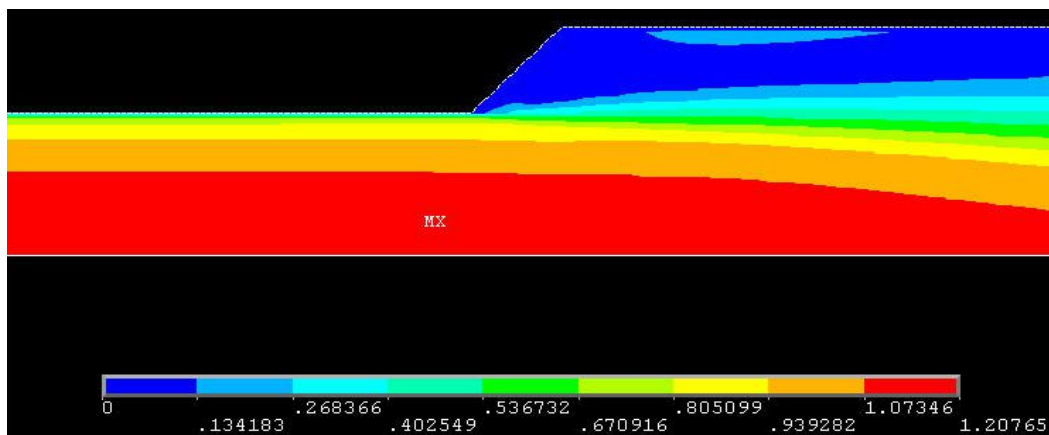
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 69,5%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a GIR, kde se hodnoty liší o 7,4%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 11,9%.

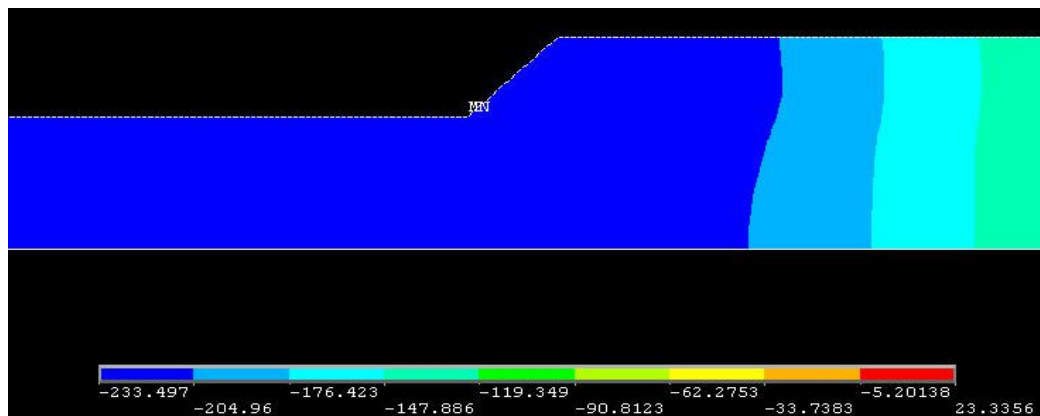
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Při použití algebraického turbulentního modelu se hodnoty součinitelů tření liší nejvíce.



Obr. 65 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 15



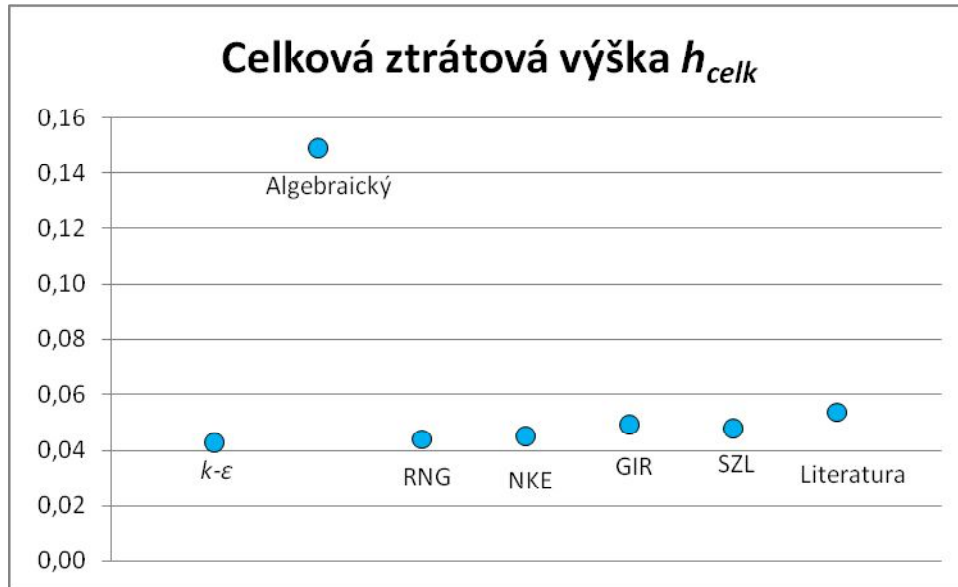
Obr. 66 Rozložení rychlostí var. 15 s $k-\varepsilon$ modelem



Obr. 67 Rozložení tlaků var. 15 s $k-\varepsilon$ modelem

Na Obr. 66 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického rozšíření pro variantu s $k-\varepsilon$ modelem.

Z Obr. 67 je očividné, že v užším průřezu v místě před rozšířením vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje.



Obr. 68 Celková ztrátová výška - var. 15

Jak můžeme vidět na Obr. 68, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 69,5%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 14,8 %.

Varianta 16

V šestnácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m, $D_2 = 0,125$ m a délka kónické části $L_3 = 0,0125$ m. V následující tabulce (Tab. 29) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 16.

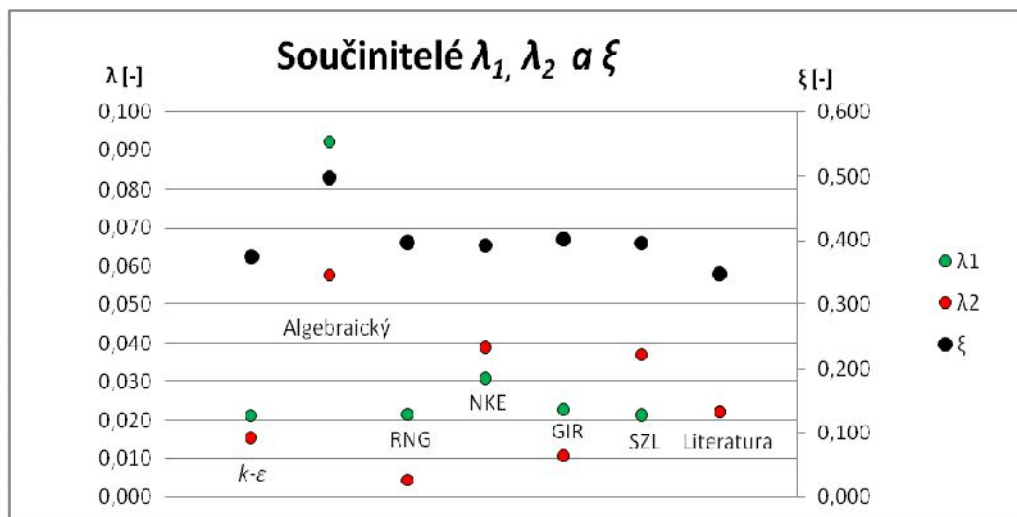
Tab. 29 Výsledky - var. 16

16	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	0,3749	0,4979	0,3967	0,3924	0,4020	0,3960	0,3480
λ_1	0,0213	0,0921	0,0215	0,0309	0,0228	0,0214	0,0222
λ_2	0,0154	0,0576	0,0045	0,0390	0,0108	0,0371	0,0220
h_m	0,0075	0,0100	0,0080	0,0079	0,0081	0,0079	0,0073
h_{t1}	0,0115	0,0496	0,0116	0,0167	0,0123	0,0115	0,0124
h_{t2}	0,0027	0,0102	0,0008	0,0069	0,0019	0,0065	0,0040
h_{celk}	0,0217	0,0698	0,0204	0,0314	0,0222	0,0260	0,0237

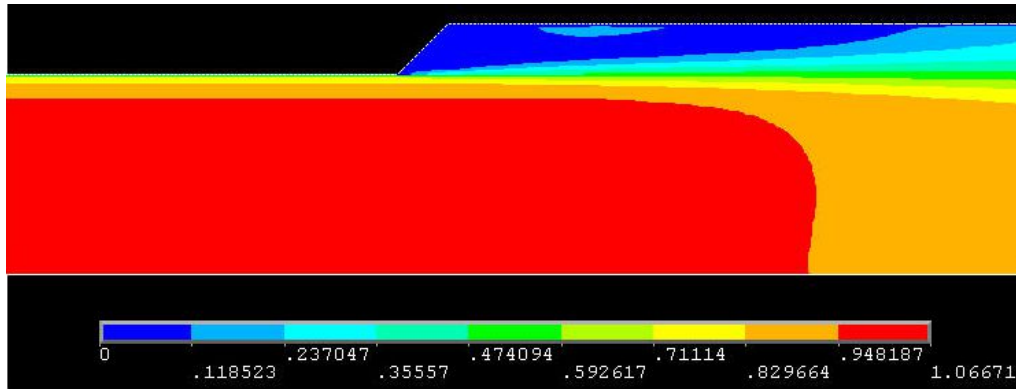
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 65,1%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a GIR, kde se hodnoty liší o 6,7%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 11,3%.

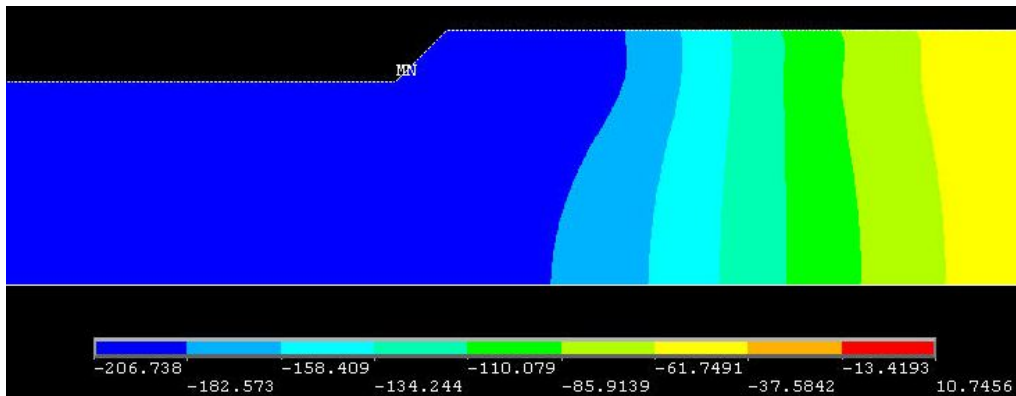
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Při použití algebraického turbulentního modelu se hodnoty součinitelů tření liší nejvíce.



Obr. 69 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 16



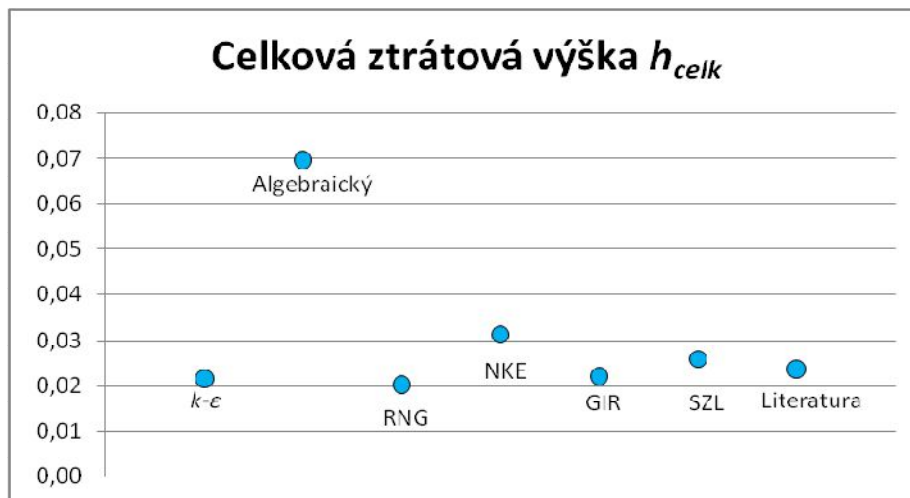
Obr. 70 Rozložení rychlostí var. 16 s GIR modelem



Obr. 71 Rozložení tlaků var. 16 s GIR modelem

Na Obr. 70 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického rozšíření pro variantu s použitím GIR modelu.

Z Obr. 71 je patrné, že v užším průřezu v místě před rozšířením vzniká podtlak, který se zmenšuje směrem k výtoku z potrubí.



Obr. 72 Celková ztrátová výška - var. 16

Jak můžeme vidět na Obr. 72, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 65,1%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 2,5 %.

Varianta 17

V sedmnácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m, $D_2 = 0,150$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 30) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 17.

Tab. 30 Výsledky - var. 17

17	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ζ	1,6018	1,4804	1,7045	1,6834	1,6300	1,5847	1,7188
λ_1	0,0212	0,0921	0,0216	0,0292	0,0220	0,0212	0,0222
λ_2	0,0075	0,0392	0,0250	0,0959	0,0007	0,0098	0,0221
h_m	0,0157	0,0143	0,0165	0,0163	0,0158	0,0153	0,0173
h_{11}	0,0115	0,0496	0,0116	0,0157	0,0119	0,0114	0,0124
h_{12}	0,0007	0,0028	0,0018	0,0068	0,0000	0,0007	0,0016
h_{celk}	0,0279	0,0667	0,0299	0,0388	0,0277	0,0275	0,0314

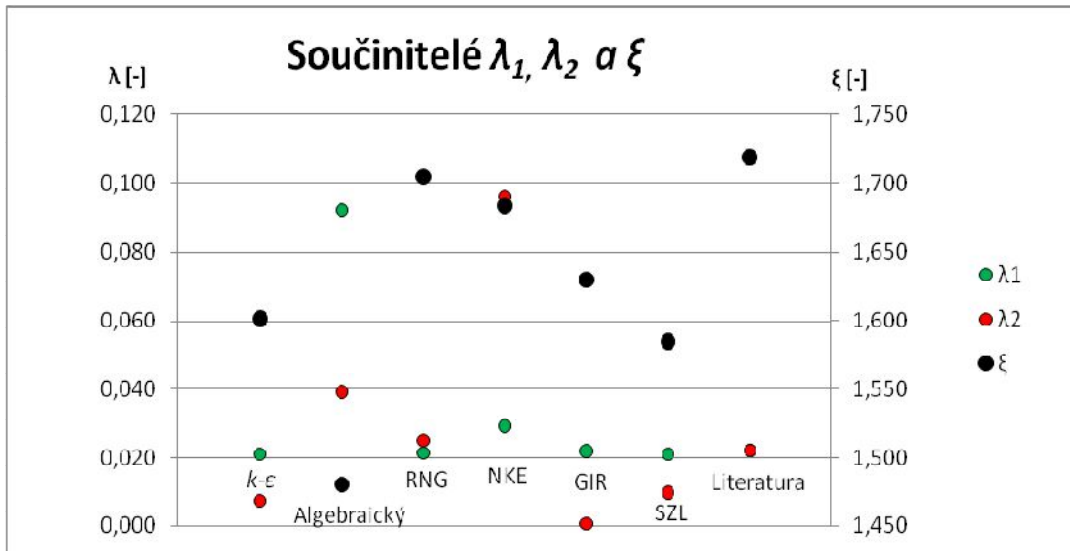
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 54,5%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a SZL, kde se hodnoty liší o 7,0%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 4,5%.

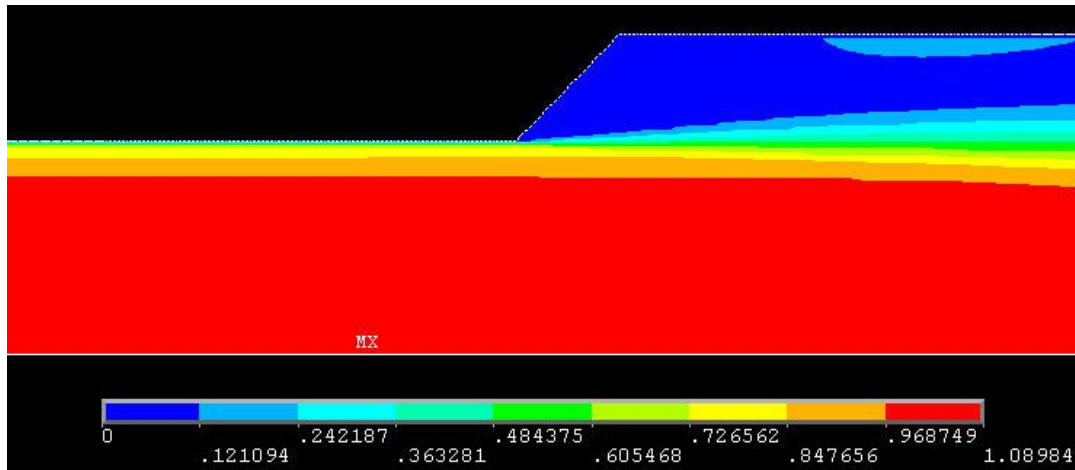
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianta s použitím RNG modelu.

Na Obr. 74 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického rozšíření pro variantu s použitím SZL turbulentního modelu.

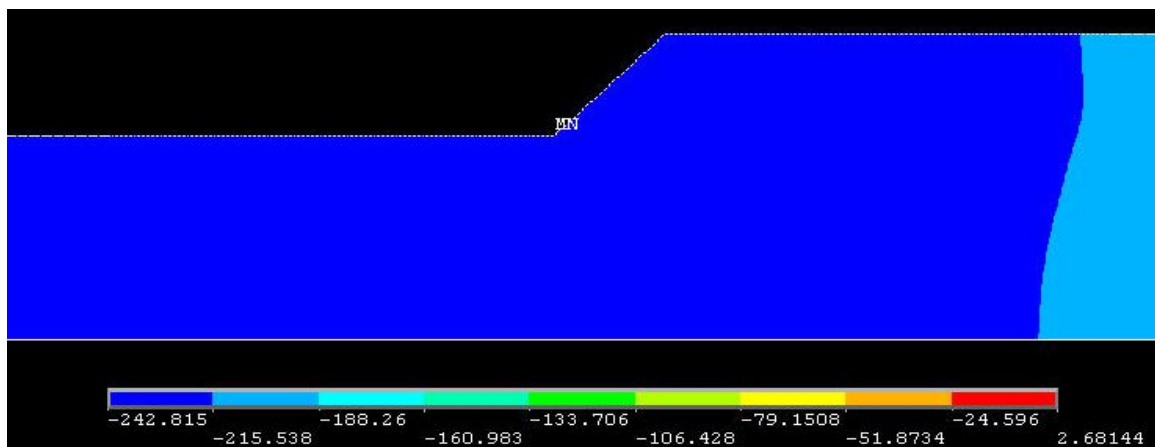
Na Obr. 75 můžeme vidět, že v oblasti kolem kónické změny průřezu vzniká podtlak kolem -250 Pa.



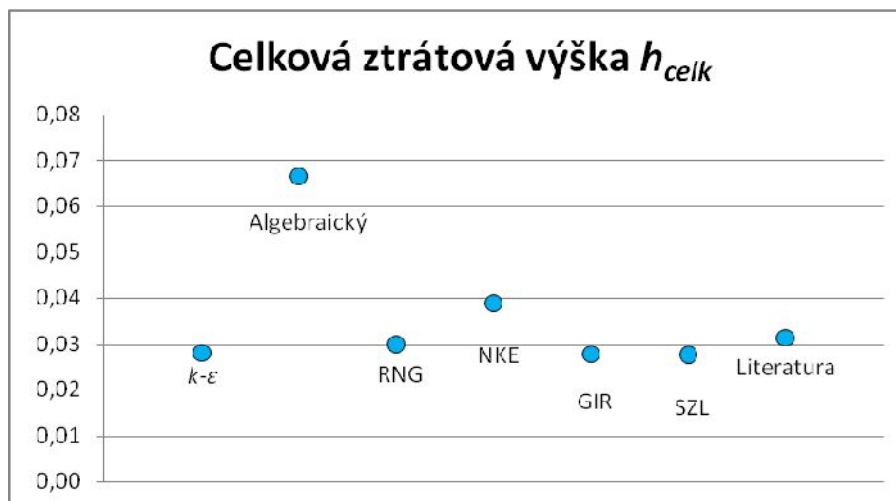
Obr. 73 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 17



Obr. 74 Rozložení rychlostí var. 17 se SZL modelem



Obr. 75 Rozložení tlaků var. 17 se SZL modelem



Obr. 76 Celková ztrátová výška - var. 17

Jak můžeme vidět na Obr. 76, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 54,5%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 3,3 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,03.

Varianta 18

V osmnácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m, $D_2 = 0,300$ m a délka kónické části $L_3 = 0,075$ m. V následující tabulce (Tab. 31) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 18.

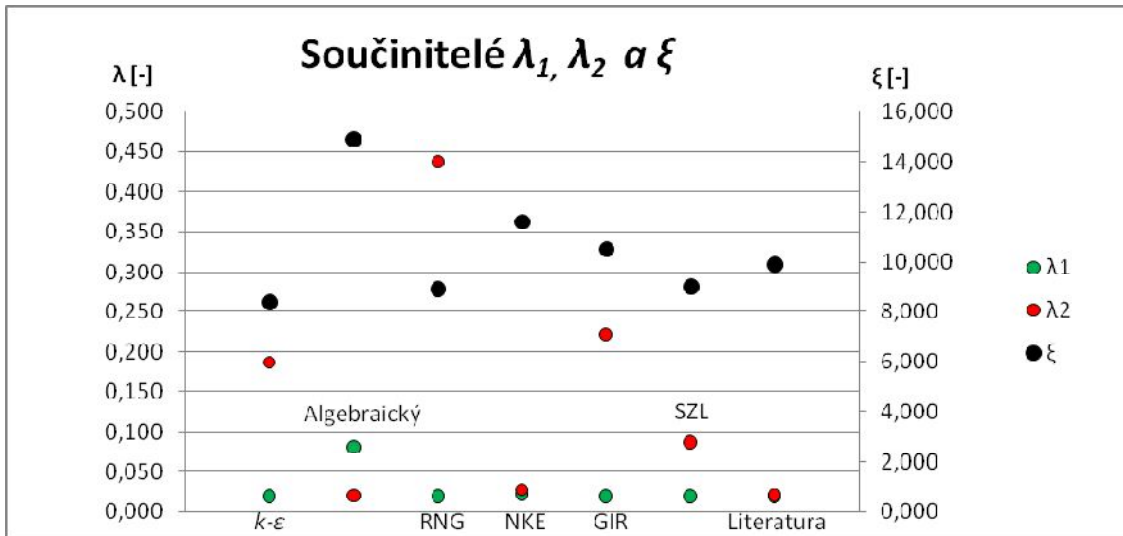
Tab. 31 Výsledky - var. 18

18	$k-\epsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	8,3636	14,8794	8,9031	11,6005	10,4998	9,0081	9,9000
λ_1	0,0206	0,0816	0,0208	0,0226	0,0208	0,0204	0,0201
λ_2	0,1860	0,0202	0,4379	0,0277	0,2206	0,0866	0,0205
h_m	0,0260	0,0462	0,0276	0,0360	0,0326	0,0280	0,0315
h_{t1}	0,0075	0,0297	0,0076	0,0082	0,0076	0,0074	0,0075
h_{t2}	0,0021	0,0002	0,0050	0,0003	0,0025	0,0010	0,0002
h_{celk}	0,0356	0,0761	0,0402	0,0445	0,0427	0,0363	0,0393

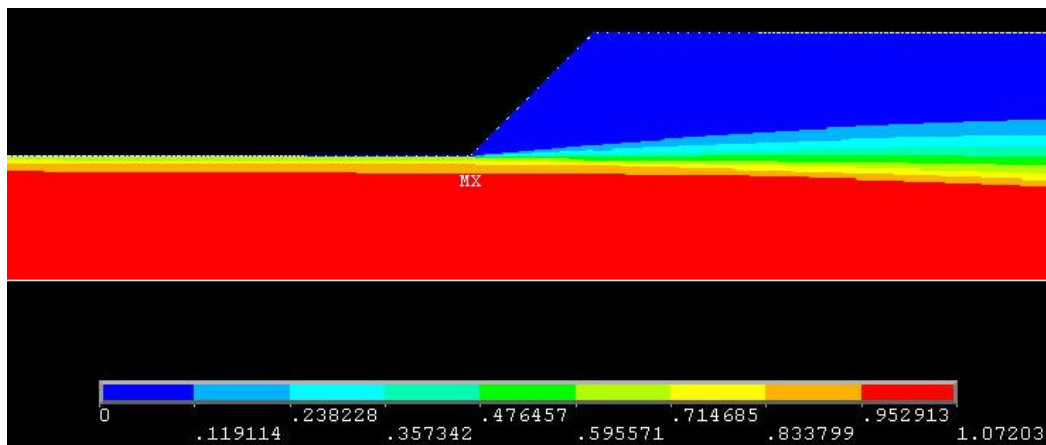
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 47,6%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a NKE, kde se hodnoty liší o 27,9%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 2,3%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od hodnot vypočítaných dle literatury nejméně liší varianta s použitím NKE modelu.



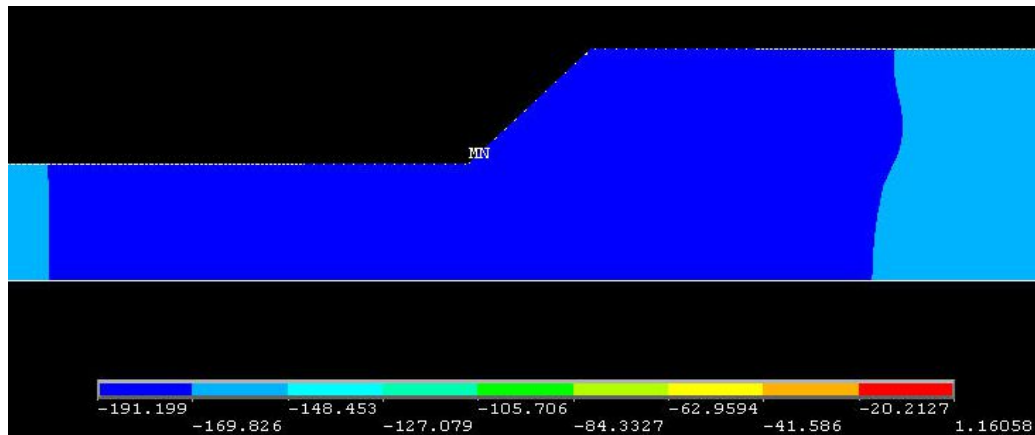
Obr. 77 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 18



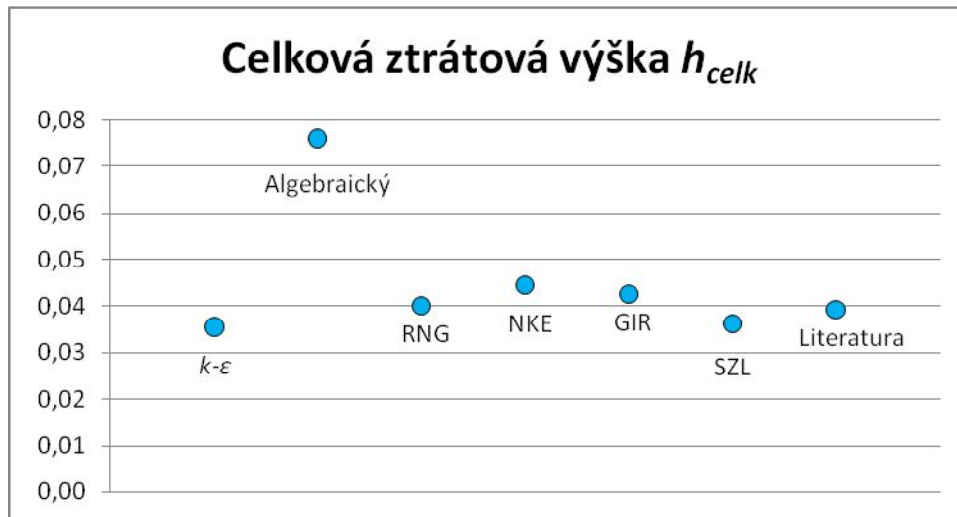
Obr. 78 Rozložení rychlostí var. 18 se SZL modelem

Na Obr. 78 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického rozšíření pro variantu s použitím SZL modelu.

Na Obr. 79 můžeme vidět, že v oblasti kolem kónické změny průřezu vzniká podtlak o hodnotě -191,2 Pa.



Obr. 79 Rozložení tlaků var. 18 se SZL modelem



Obr. 80 Celková ztrátová výška - var. 18

Jak můžeme vidět na Obr. 80, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 47,6%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 1,4 %.

Řádově se dle vypočítaných hodnot celková ztráta h_{celk} pro tuto variantu pohybuje kolem hodnoty 0,04.

Varianta 19

V devatenácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,200$ m, $D_2 = 0,250$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 32) jsou

uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 19.

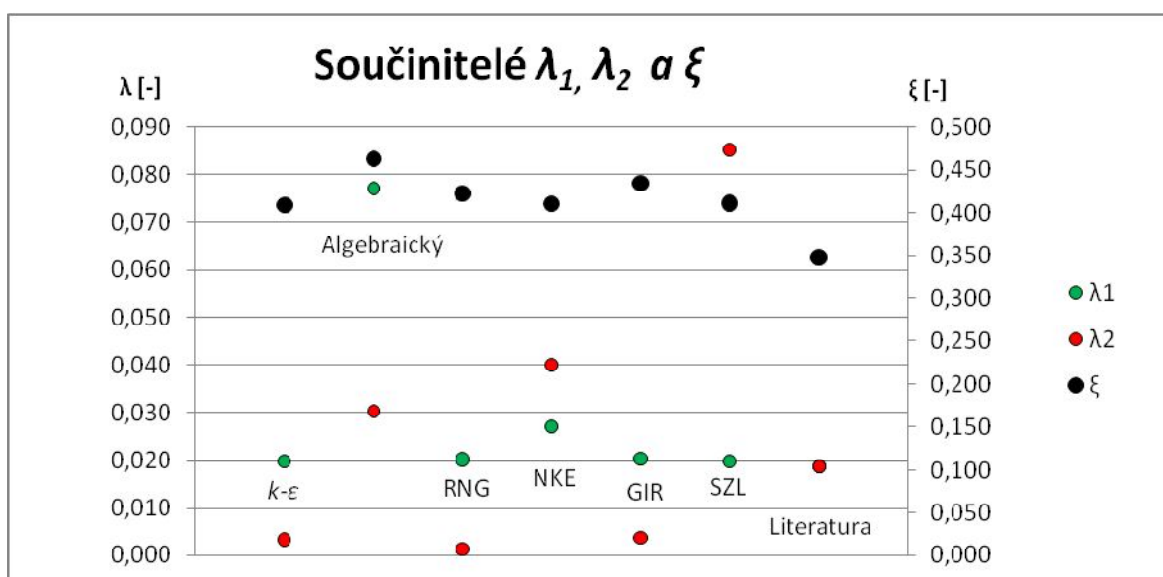
Tab. 32 Výsledky - var. 19

19	$k-\varepsilon$	Algebraický	RNG	NKE	GIR	SZL	Literatura
ξ	0,4091	0,4630	0,4228	0,4111	0,4349	0,4115	0,3480
λ_1	0,0199	0,0772	0,0203	0,0272	0,0203	0,0199	0,0188
λ_2	0,0031	0,0303	0,0012	0,0400	0,0035	0,0851	0,0187
h_m	0,0084	0,0095	0,0087	0,0084	0,0089	0,0084	0,0073
h_{t1}	0,0055	0,0212	0,0056	0,0075	0,0056	0,0055	0,0053
h_{t2}	0,0003	0,0027	0,0001	0,0036	0,0003	0,0077	0,0017
h_{celk}	0,0141	0,0334	0,0143	0,0195	0,0148	0,0216	0,0143

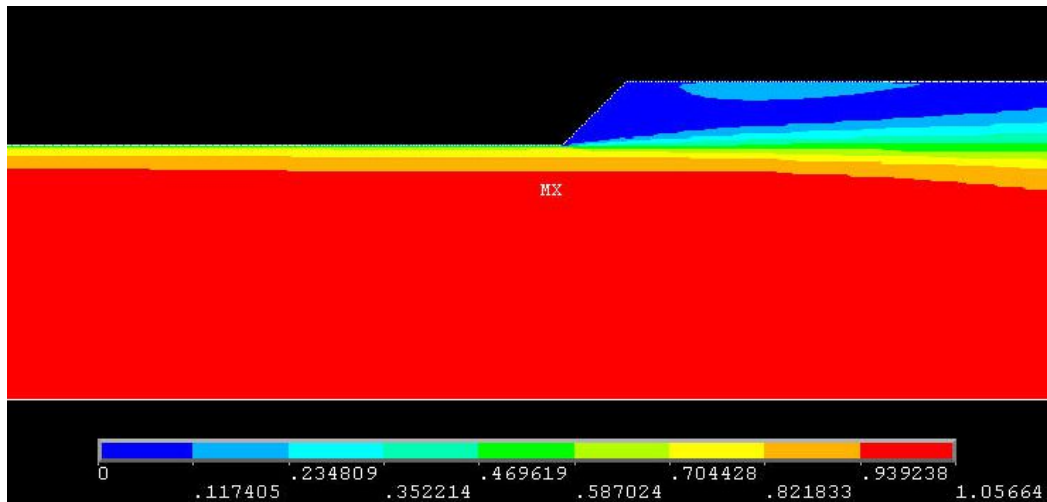
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 49,5%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a GIR, kde se hodnoty liší o 5,9%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 16,7%. Jak je patrné z Obr. 81, všechny vypočítané hodnoty ξ jsou vyšší, než hodnota vypočtená dle literatury.

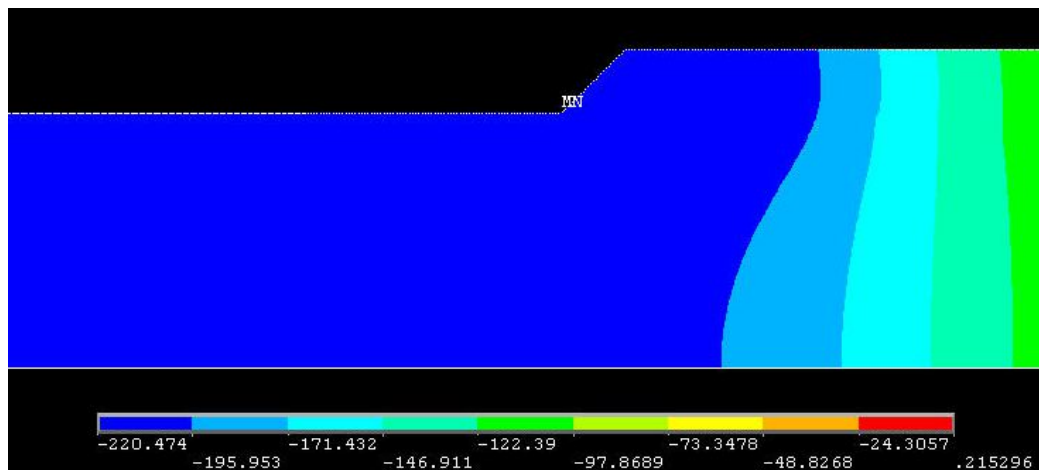
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 vyšly nejpodobnější hodnoty při variantách s $k-\varepsilon$ modelem, RNG modelem a GIR modelem.



Obr. 81 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 19



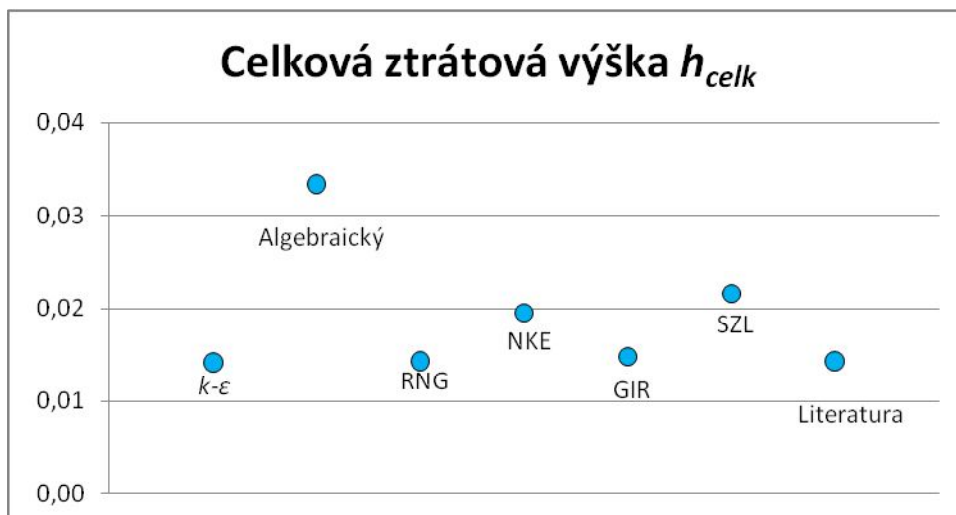
Obr. 82 Rozložení rychlostí var. 19 se SZL modelem



Obr. 83 Rozložení tlaků var. 19 se SZL modelem

Na Obr. 82 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického rozšíření pro variantu s použitím SZL modelu.

Na Obr. 83 můžeme vidět, že v oblasti kolem kónické změny průřezu vzniká podtlak o velikosti cca -220,5 Pa, který se směrem k oblasti výtoku zmenšuje.



Obr. 84 Celková ztrátová výška - var. 19

Jak můžeme vidět na Obr. 84, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 49,5%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 15,4 %.

6 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VE 3D

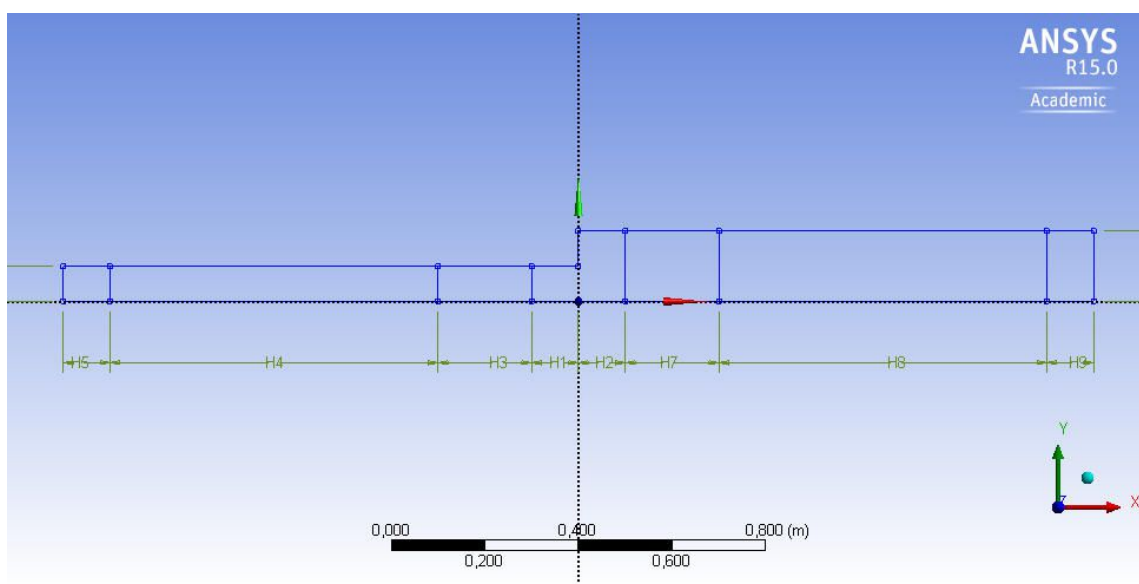
Pro tvorbu modelu a následný výpočet hodnot daného potrubí byl ve 3D použit program Ansys Workbench (tvorba geometrie, tvorba výpočtové sítě a zadávání okrajových podmínek) a Ansys CFX (samotné řešení a výsledky). V tomto programu byl vytvořen geometrický model potrubí, vytvořena výpočtová síť, zadány počáteční a okrajové podmínky, proveden výpočet a po získání potřebných hodnot byly výpočty ztrát a jejich součinitelů prováděny v programu excel.

6.1 POSTUP PŘI NUMERICKÉM MODELOVÁNÍ VE 3D

V programu bylo vytvořeno 80 geometrických modelů potrubí se změnou průřezu (náhlé zúžení, náhlé rozšíření, kónické rozšíření a kónické zúžení). V následující kapitole je popsáno řešení modelu náhlého zúžení potrubí s průměry $D_1 = 0,150$ m a $D_2 = 0,300$ m a délkami potrubí $L_1 = L_2 = 1,1$ m. Rychlost na vstupu do potrubí byla volena jako $v = 1,0$ m a na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa.

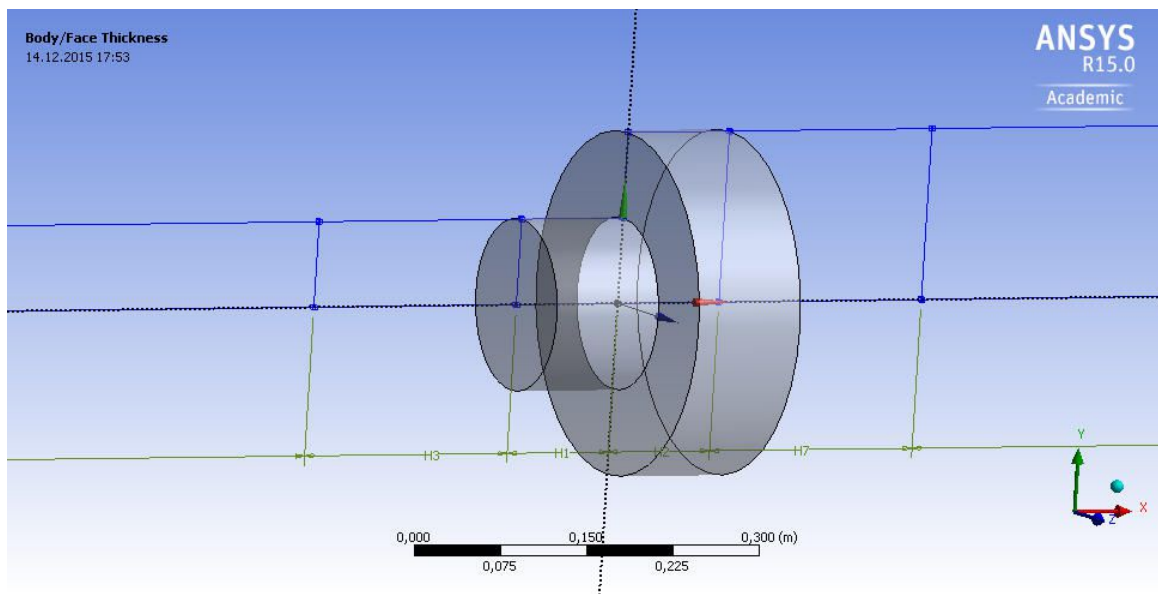
6.1.1 Kreslení a tvorba geometrie

Kreslení začneme tvorbou skicy, která bude reprezentovat tvar výpočtové oblasti. Během kreslení se nezadávají rozměry, ale nejprve se vytvoří obrazec geometricky podobný tomu, který chceme nakreslit, ten se okótuje a následně se upraví rozměry kót dle zadání.

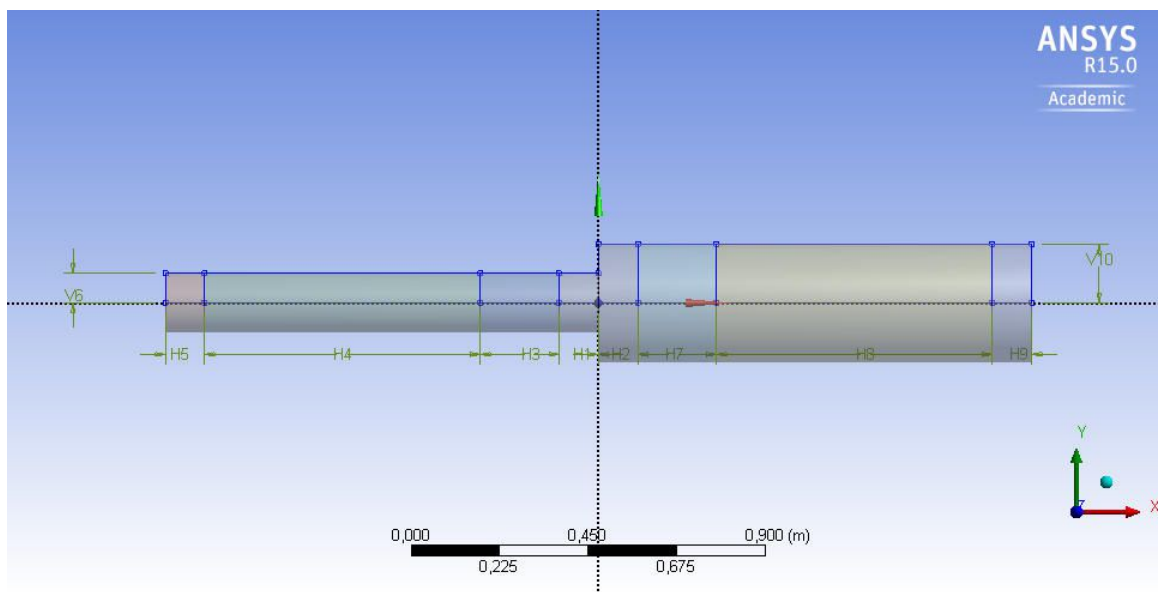


Obr. 85 Tvorba geometrie

Jelikož je potrubí modelováno ve 3D, byl použit příkaz „*Revolve*“, který jednotlivé části obrazce otouje kolem osy x, a tím vytvoří požadovaný tvar.



Obr. 86 Příkaz *Revolve*



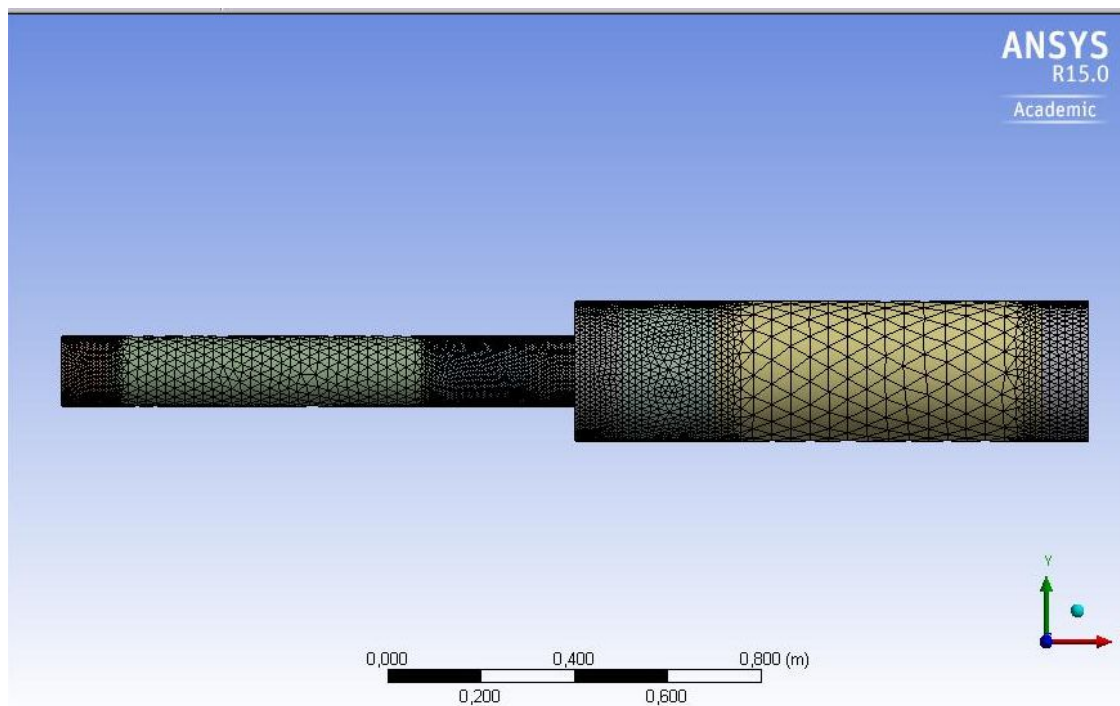
Obr. 87 Potrubí ve 3D

6.1.2 Tvorba výpočtové sítě

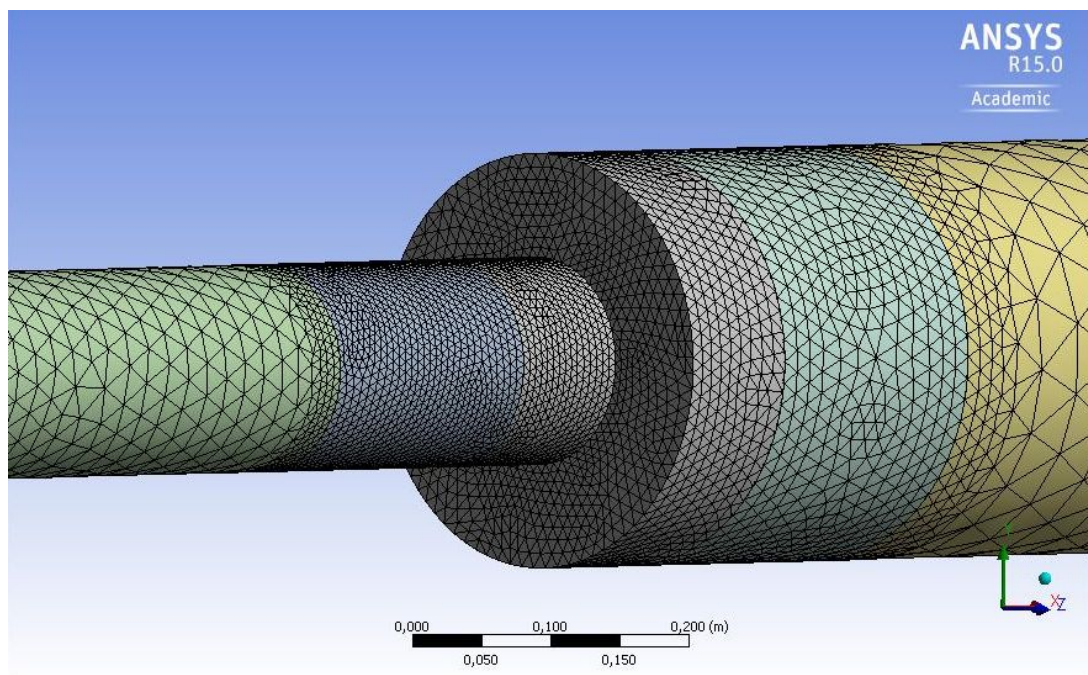
Tvorba výpočtové sítě je jeden z nejdůležitějších kroků při tvorbě výpočtu metodou konečných prvků. Kvalita sítě je jedním z podstatných parametrů, který dominantně ovlivňuje výsledky výpočtů.

Pro každou jednotlivou část obrazce se tvorba sítě provádí jednotlivě. Pro každou výpočtovou oblast můžeme zvolit jinou hustotu sítě pro lepší vykreslení změn rychlostí a

tlaků. V tomto případě bylo zadáváno zhuštění výpočetní sítě ve vzdálenosti 0,1 m od vstupu a výstupu, a dále 0,3 m před a 0,3 m za náhlým rozšířením průřezu.



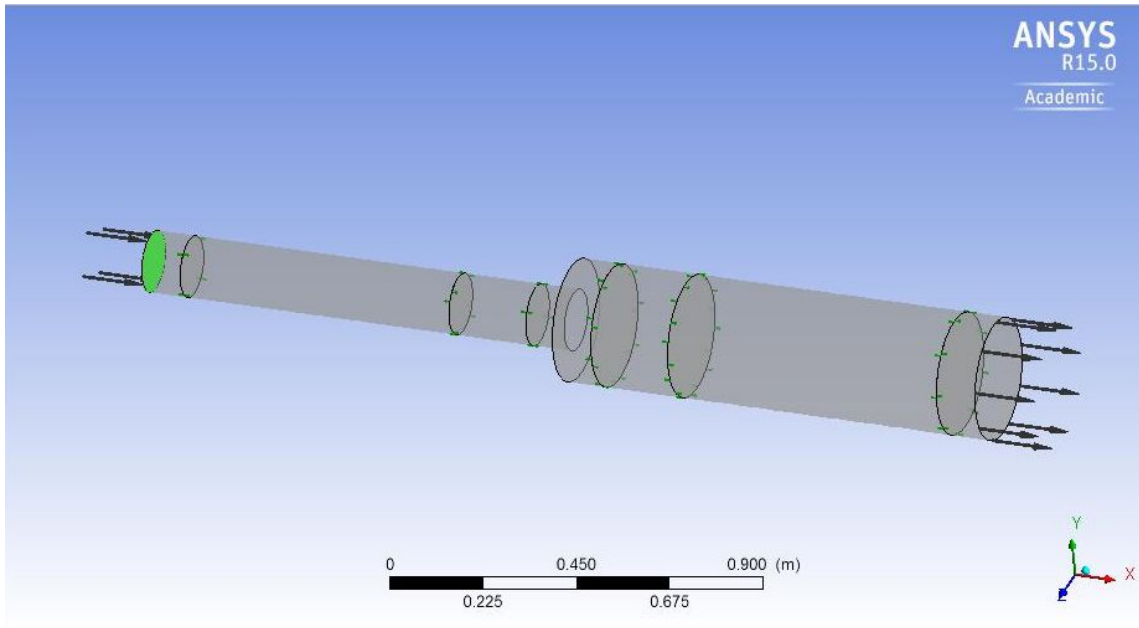
Obr. 88 Výpočtová síť



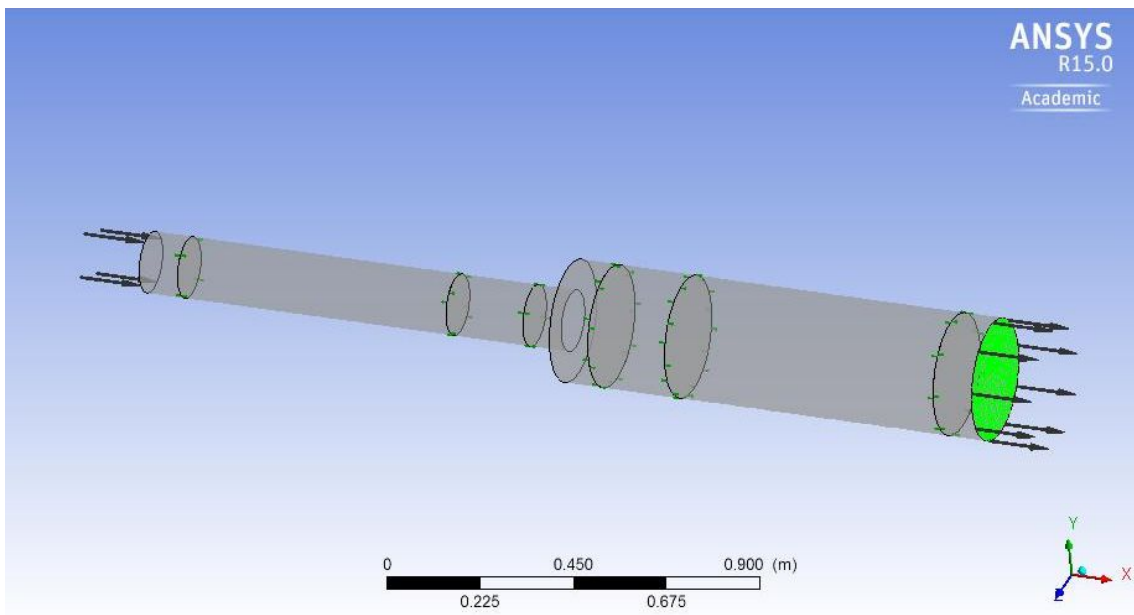
Obr. 89 Detail zhuštění výpočtové sítě

6.1.3 Nastavení okrajových podmínek

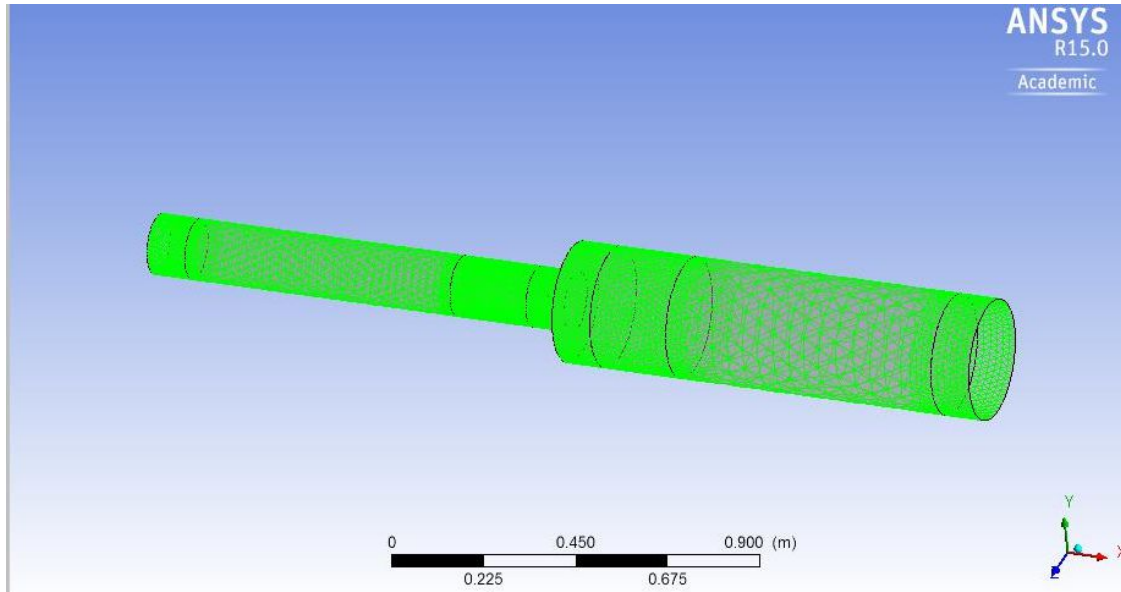
Nejprve bylo zadáno, že se jedná o ustálené proudění. Dále byla nastavena látka, která proudí v potrubí (v tomto případě je to voda o teplotě 20°C). Jako další podmínka bylo zadáno, že rychlost na vstupu do potrubí je $v = 1,0$ m/s, tlak na výstupu z potrubí je 0 Pa a vlastní potrubí bylo definováno jako *smooth wall* – hladká stěna.



Obr. 90 Okrajová podmínka - vtok



Obr. 91 Okrajová podmínka - výtok

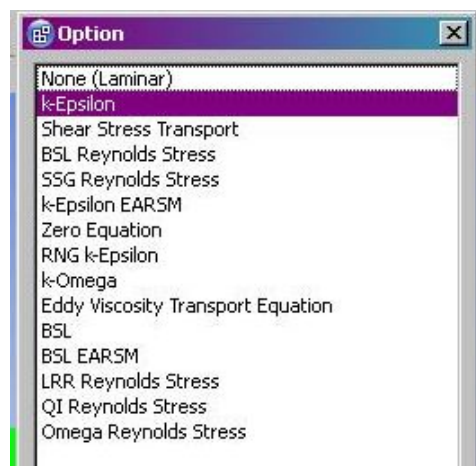


Obr. 92 Okrajová podmínka - stěna

Dále bylo provedení nastavení jednotek (SI soustava) a počet iterací.

Další podstatná část nastavení bylo určení turbulentního modelu. Pro každou variantu poměrů změny potrubí byl určen jeden z modelů:

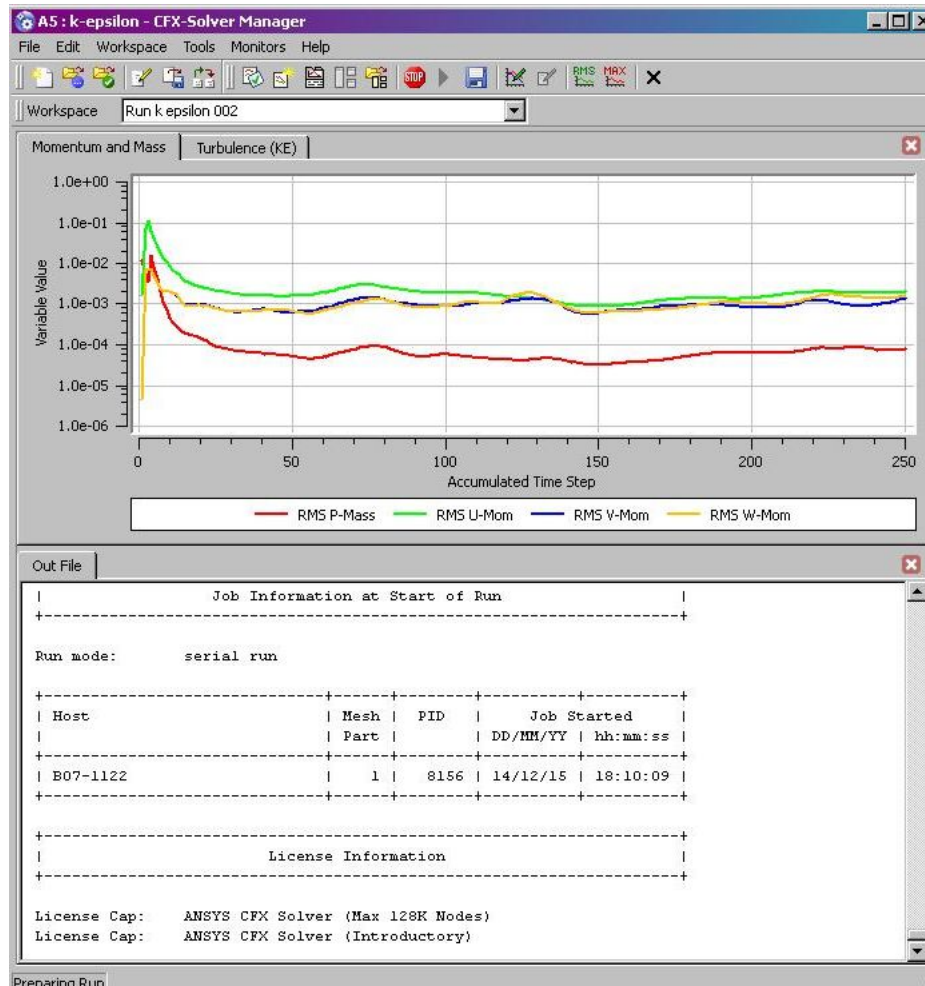
- Standardní $k-\varepsilon$ model
- RNG $k-\varepsilon$ model
- $k-\omega$ model
- Algebraický (nula rovnicový) model.



Obr. 93 Dostupné turbulentní modely v programu Ansys Workbench

6.1.4 Řešič

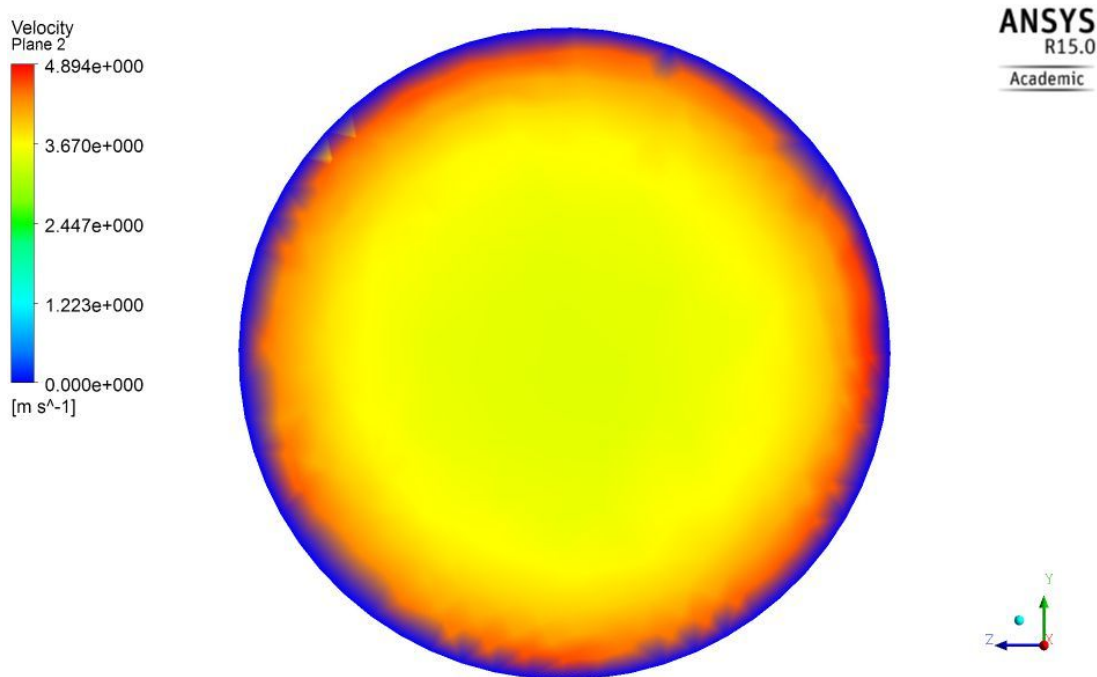
Zde probíhá vlastní výpočet řešené geometrie.



Obr. 94 Průběh výpočtu

6.1.5 Výstupy

V této diplomové práci nás zajímají hlavně výstupy v podobě rychlostí a tlaků. Můžeme je dostat v mnoha podobách – např. jako proudnice, vektory apod. Dále může být zvoleno, zda chceme dostat výstupy z celé řešené oblasti nebo jen z určitého řezu. Pro mou diplomovou práci bylo využito funkce tzv. „Function Calculator“, kde program vypočítá hodnotu např. průměrné rychlosti v daném řezu potrubí.



Obr. 95 Řez potrubím kónické zúžení – rychlost v místě přechodu z kónické části do části přímé

6.2 NÁHLÉ ZÚŽENÍ

V programu byl nejprve vytvořen geometrický model náhle se zužujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Workbench vymodelováno 20 variant náhlého zúžení. Průměry potrubí D_1 , D_2 a jejich poměry $n = D_2/D_1$ jsou uvedeny v kap 5.2, Tab. 10. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitelé ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 . Dále následoval výpočet součinitele místní ztráty ζ a z něj vypočtena místní ztráta změnou průřezu h_m vztažena k profilu D_2 s rychlostí v_2 . Jako poslední byla vypočítána celková ztráta h_{celk} , která je součtem ztrát třením po délce h_{t1} a h_{t2} , a místní ztrátou h_m .

Varianta 20

Ve dvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,080$ m a $D_2 = 0,050$ m. V následující tabulce (Tab. 33) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 20.

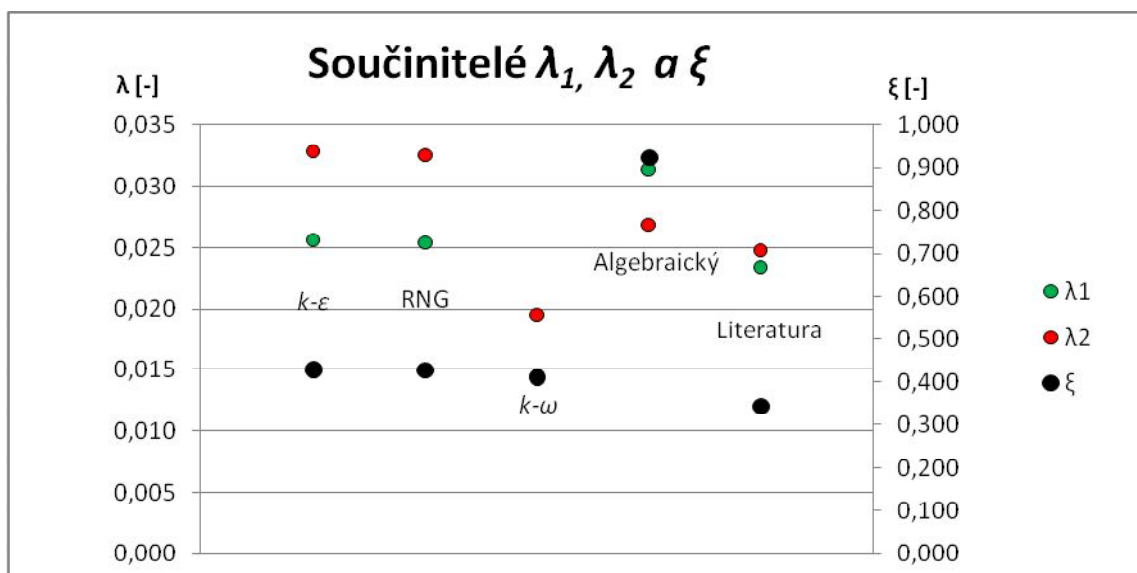
Tab. 33 Výsledky - var. 20

20	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,4283	0,4270	0,4099	0,9229	0,3431
λ_1	0,0257	0,0254	0,0145	0,0314	0,0234
λ_2	0,0328	0,0325	0,0196	0,0268	0,0248
h_m	0,1257	0,1253	0,1232	0,2640	0,1146
h_{t1}	0,0170	0,0169	0,0098	0,0215	0,0164
h_{t2}	0,2116	0,2096	0,1293	0,1689	0,1821
h_{celk}	0,3543	0,3518	0,2623	0,4544	0,3131

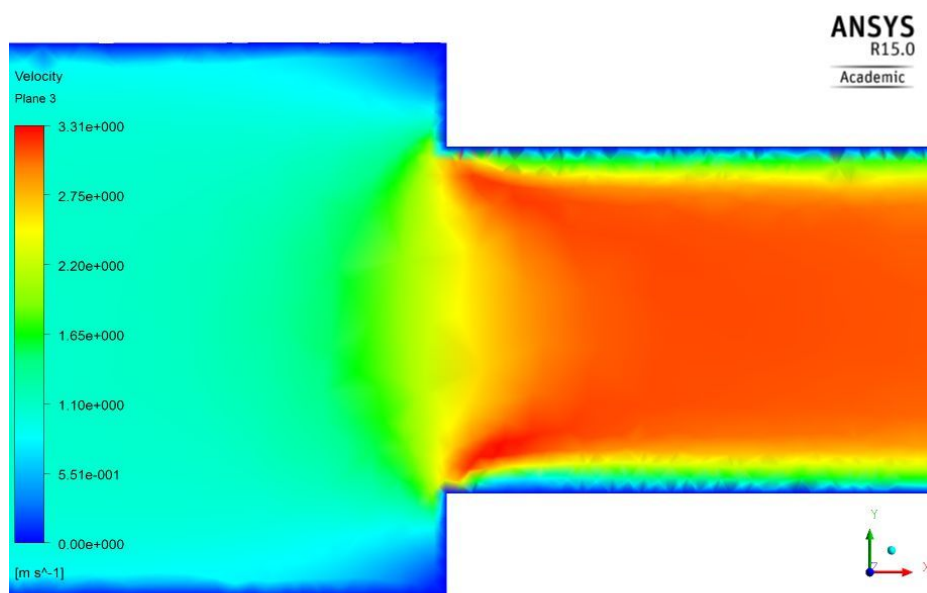
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 29%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 4,3%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 18,6%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

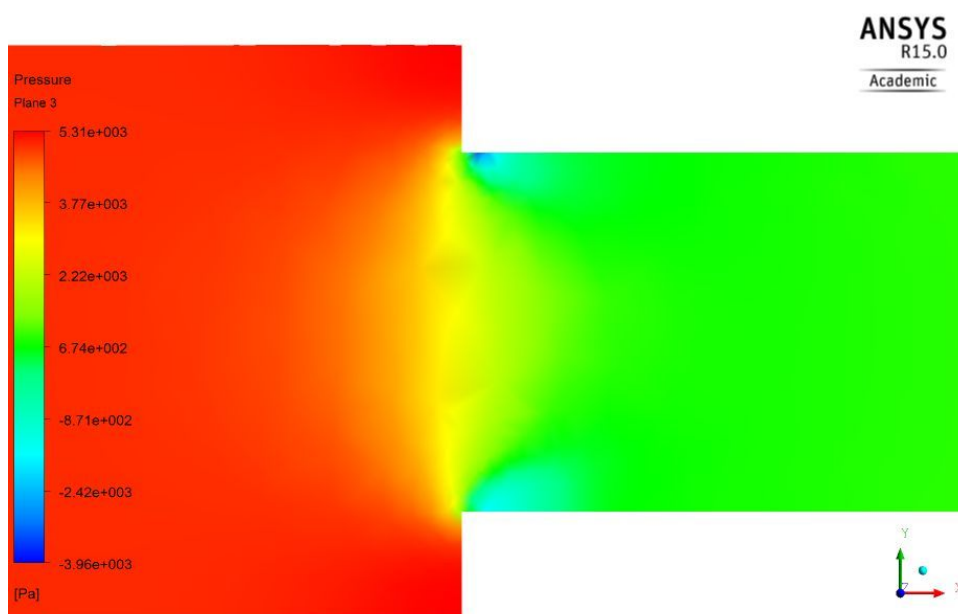


Obr. 96 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 20



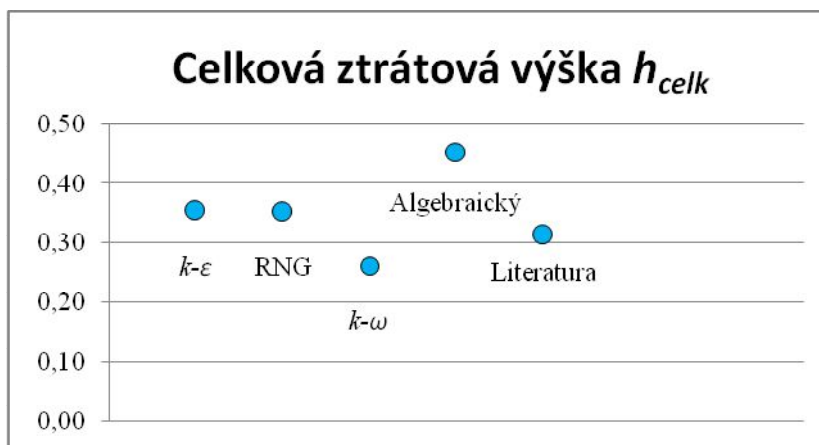
Obr. 97 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 20 s $k-\varepsilon$ modelem

Na Obr. 97 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu $k-\varepsilon$. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 98 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 20 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 98 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 99 Celková ztrátová výška - var. 20

Jak můžeme vidět na Obr. 99, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 29,0%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 3,0 %.

Varianta 21

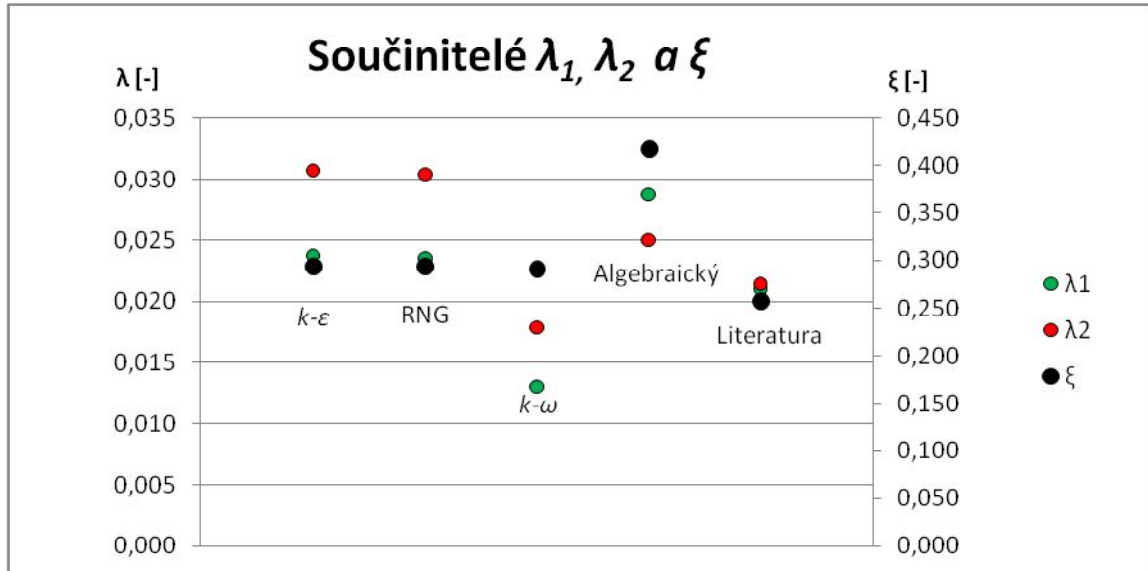
V jednadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,125$ m a $D_2 = 0,100$ m. V následující tabulce (Tab. 34) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 21.

Tab. 34 Výsledky - var. 21

21	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,2941	0,2936	0,2912	0,4179	0,2573
λ_1	0,0237	0,0235	0,0131	0,0287	0,0210
λ_2	0,0307	0,0304	0,0178	0,0250	0,0214
h_m	0,0321	0,0321	0,0324	0,0485	0,0320
h_{t1}	0,0102	0,0101	0,0057	0,0126	0,0094
h_{t2}	0,0369	0,0365	0,0219	0,0319	0,0293
h_{celk}	0,0792	0,0787	0,0600	0,0929	0,0707

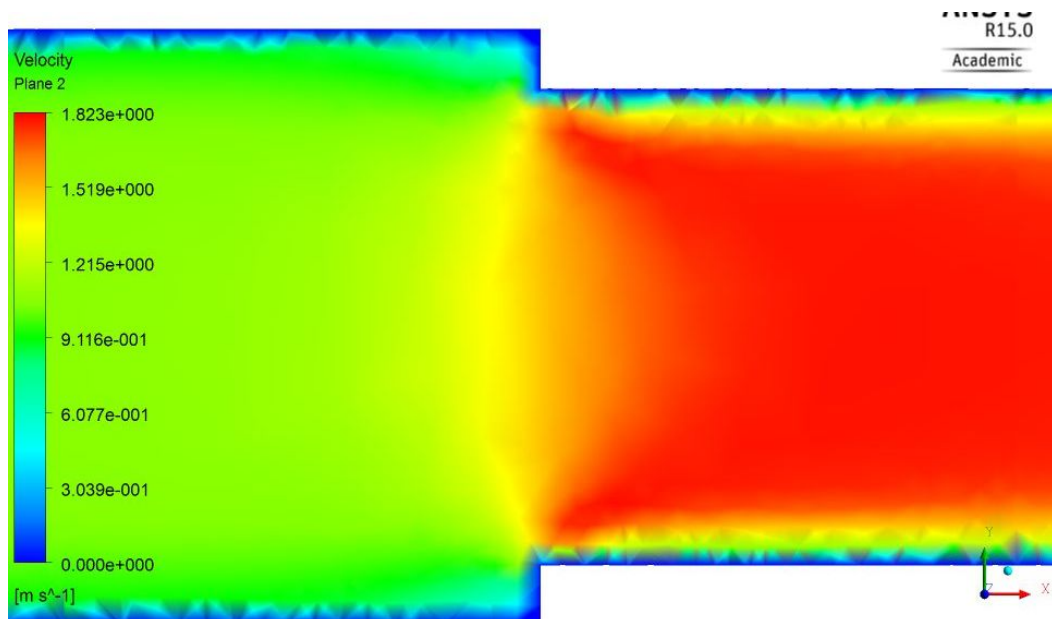
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 21,8%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 1,0%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 12,2%.



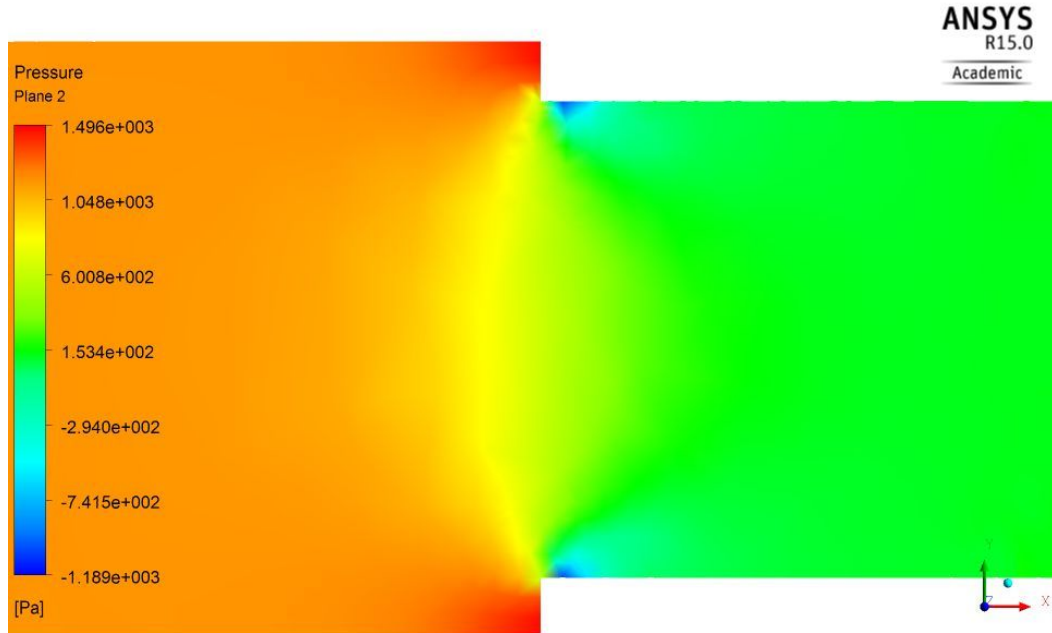
Obr. 100 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 21

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.



Obr. 101 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 21 s RNG modelem

Na Obr. 100 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu RNG. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 102 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 21 s RNG modelem

Z Obr. 101 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 103 Celková ztrátová výška - var. 21

Jak můžeme vidět na Obr. 103, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 21,8%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 2,7 %. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 22

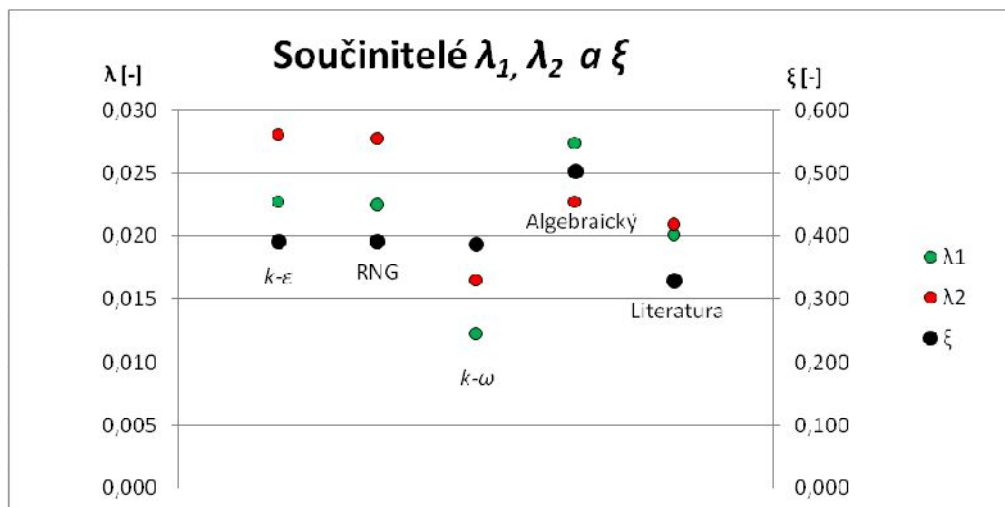
Ve dvaadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,125$ m a $D_2 = 0,100$ m. V následující tabulce (Tab. 35) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 22.

Tab. 35 Výsledky - var. 22

22	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,3919	0,3917	0,3876	0,5029	0,3287
λ_1	0,0228	0,0225	0,0123	0,0274	0,0201
λ_2	0,0280	0,0278	0,0165	0,0227	0,0209
h_m	0,0862	0,0862	0,0874	0,1207	0,0848
h_{t1}	0,0082	0,0081	0,0045	0,0100	0,0075
h_{t2}	0,0678	0,0672	0,0408	0,0600	0,0593
h_{celk}	0,1622	0,1614	0,1327	0,1908	0,1517

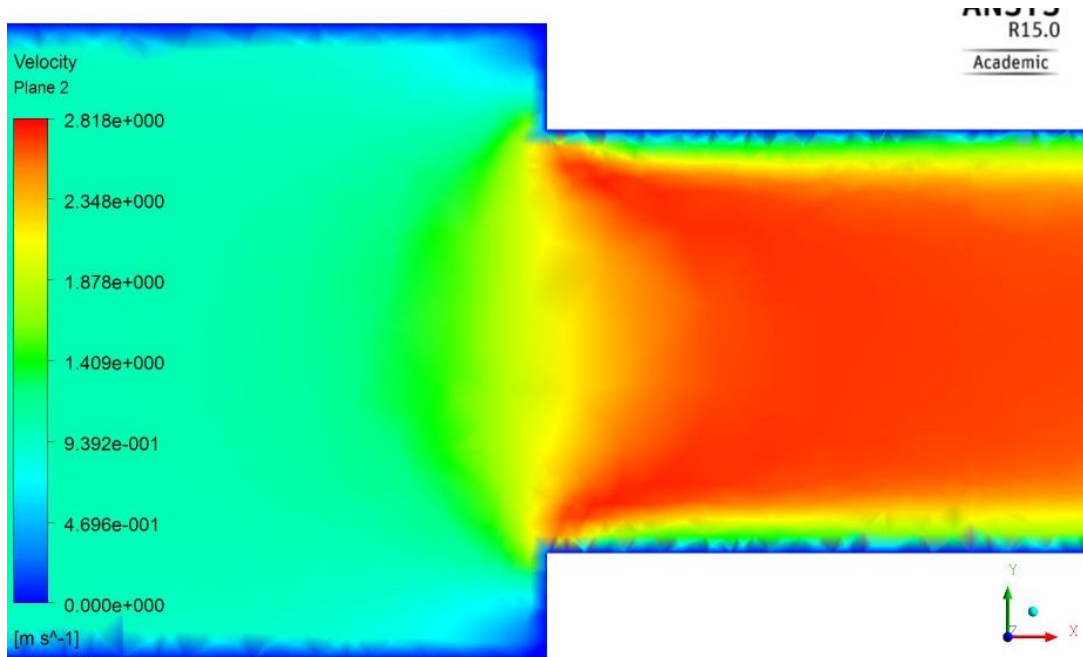
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 20,3%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 1,1%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 15,8%. Jak je patrné z Obr. 104, všechny vypočítané hodnoty ξ jsou vyšší, než hodnota vypočtená dle literatury.



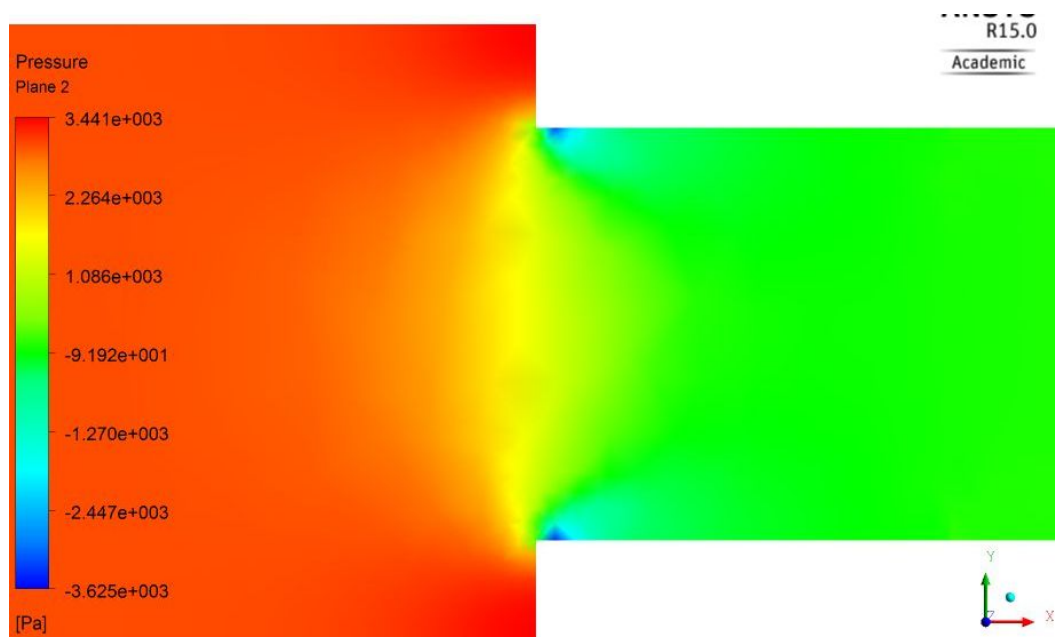
Obr. 104 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 22

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\epsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.



Obr. 105 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 22 s $k-\omega$ modelem

Na Obr. 105 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu $k-\omega$. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 106 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 22 s $k-\omega$ modelem

Z Obr. 106 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 107 Celková ztrátová výška - var. 22

Jak můžeme vidět na Obr. 107, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 20,3%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 0,3 %. Turbulentní modely $k-\epsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 23

Ve třídvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,300$ m a $D_2 = 0,150$ m. V následující tabulce (Tab. 36) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 23.

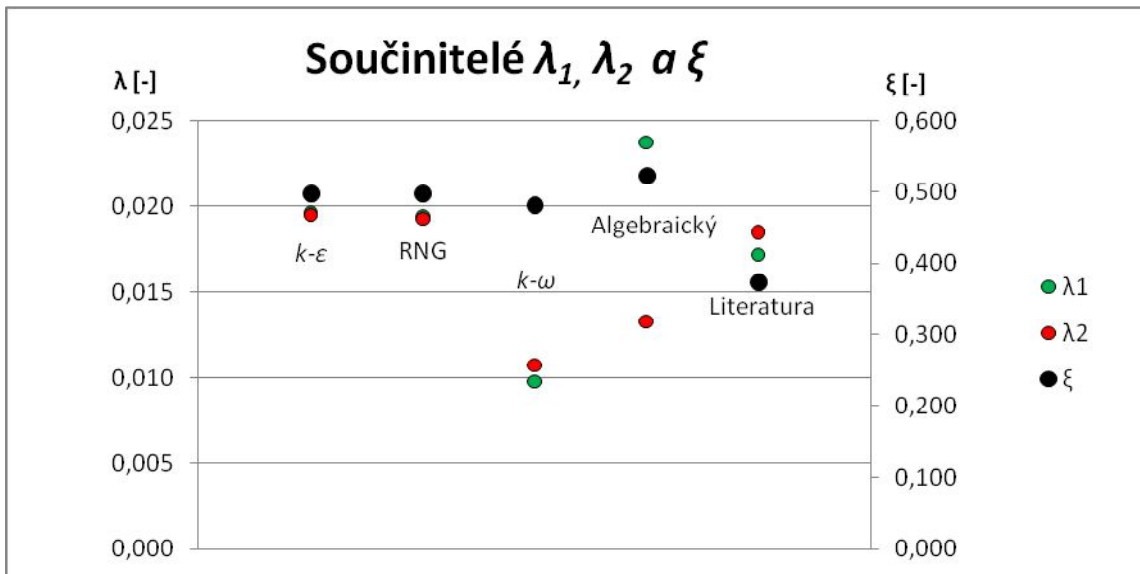
Tab. 36 Výsledky - var. 23

23	$k-\epsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,4975	0,4980	0,4817	0,5231	0,3738
λ_1	0,0196	0,0194	0,0098	0,0238	0,0172
λ_2	0,0195	0,0193	0,0108	0,0133	0,0185
h_m	0,3269	0,3268	0,3278	0,3860	0,3049
h_{i1}	0,0035	0,0034	0,0018	0,0043	0,0032
h_{i2}	0,0940	0,0930	0,0537	0,0720	0,1107
h_{celk}	0,4243	0,4232	0,3832	0,4622	0,4188

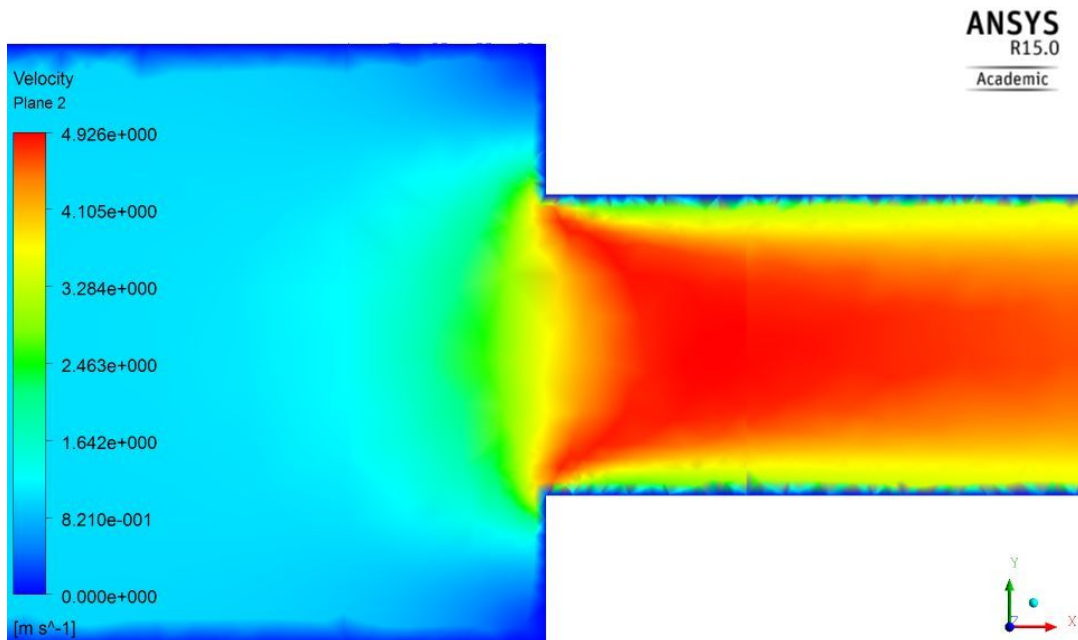
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 11,2%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 3,3%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 24,1%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

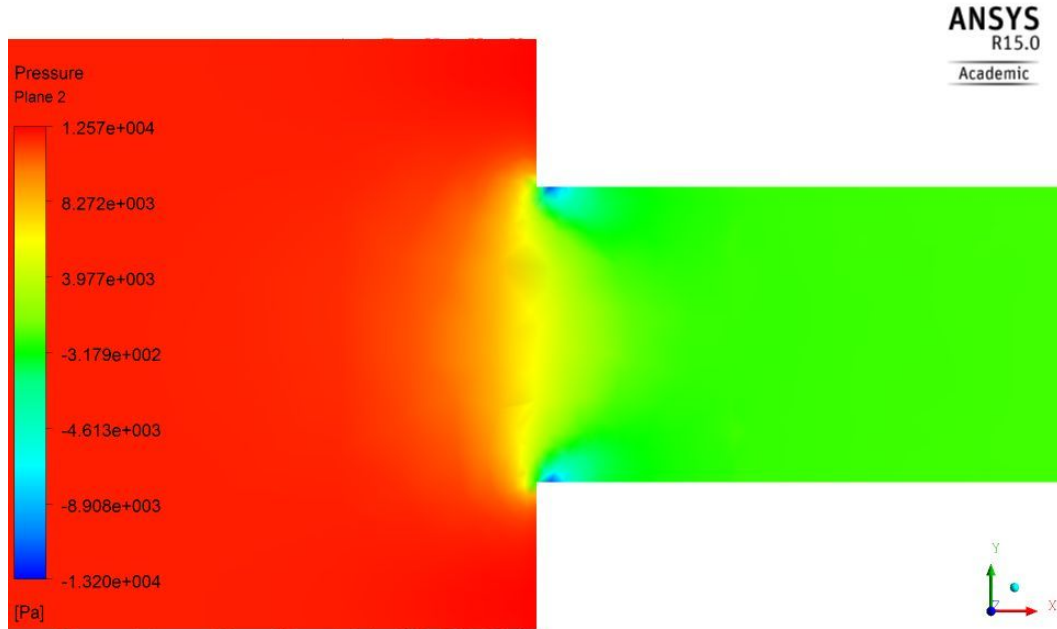


Obr. 108 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 23



Obr. 109 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 23 s algebraickým modelem

Na Obr. 109 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu s algebraickým modelem. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 110 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 23 s algebraickým modelem

Z Obr. 110 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 111 Celková ztrátová výška - var. 23

Jak můžeme vidět na Obr. 111, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 11,2%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 2,0%. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

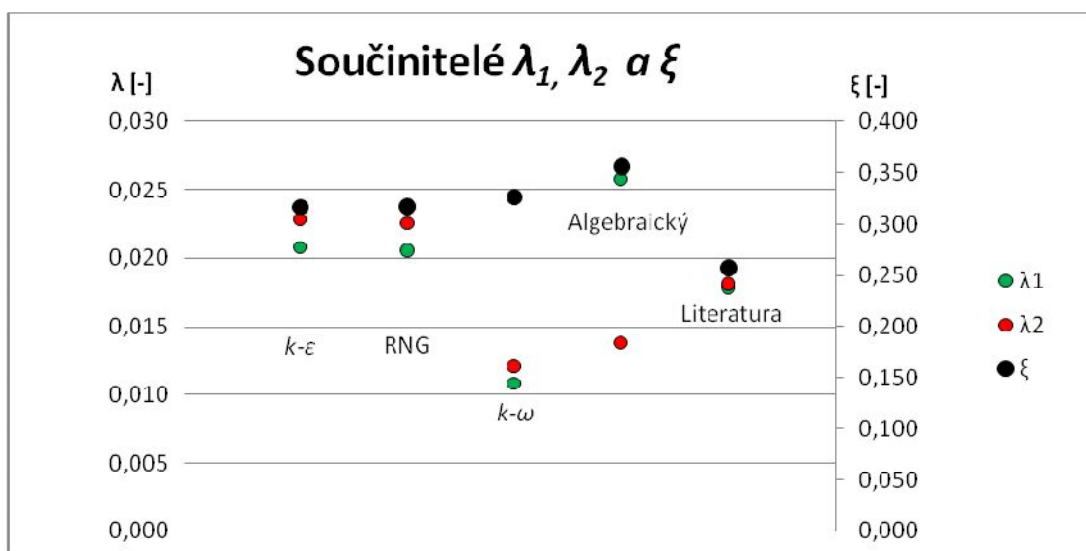
Varianta 24

Ve čtyřiaadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,250$ m a $D_2 = 0,200$ m. V následující tabulce (Tab. 37) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 24.

Tab. 37 Výsledky - var. 24

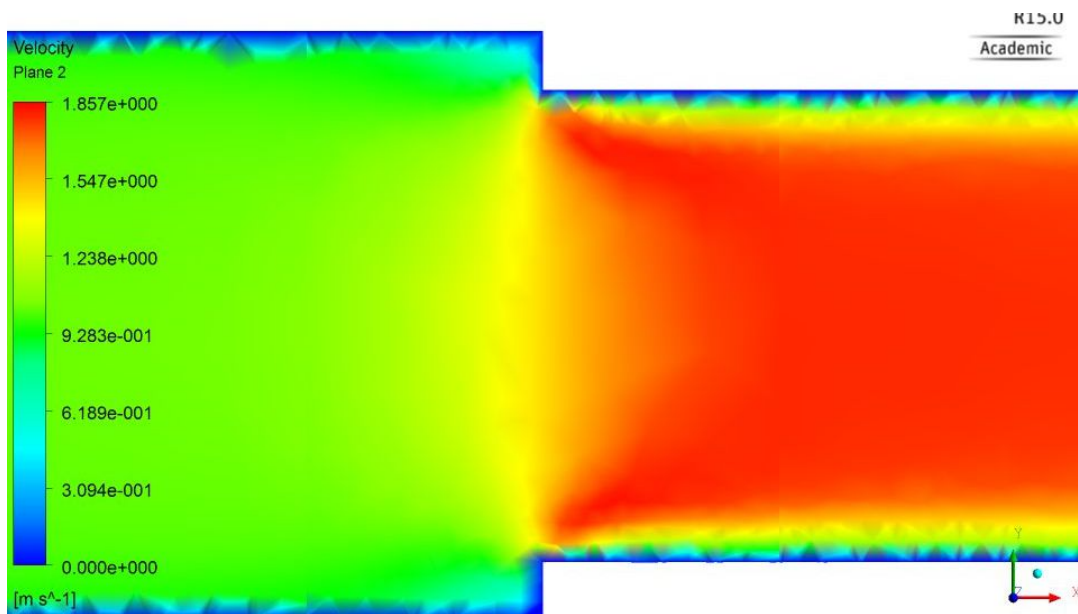
24	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,3167	0,3170	0,3261	0,3556	0,2573
λ_1	0,0208	0,0206	0,0109	0,0258	0,0179
λ_2	0,0229	0,0226	0,0121	0,0138	0,0182
h_m	0,0340	0,0340	0,0355	0,0401	0,0320
h_{i1}	0,0045	0,0045	0,0024	0,0056	0,0040
h_{i2}	0,0135	0,0134	0,0072	0,0085	0,0124
h_{celk}	0,0520	0,0518	0,0451	0,0543	0,0485

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 2,9%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 19,6%.



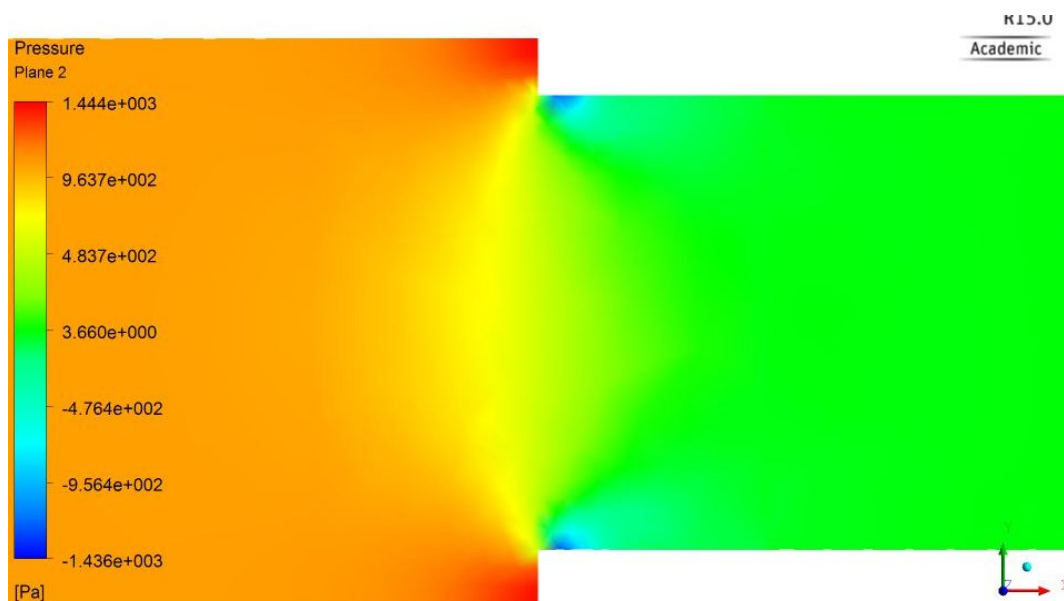
Obr. 112 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 24

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.



Obr. 113 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 24 s $k-\varepsilon$ modelem

Na Obr. 113 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého zúžení pro variantu s $k-\varepsilon$ modelem. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 114 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 24 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 114 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením a také že nejvyšší hodnoty tlaků vznikají v místech těsně před změnou průřezu.

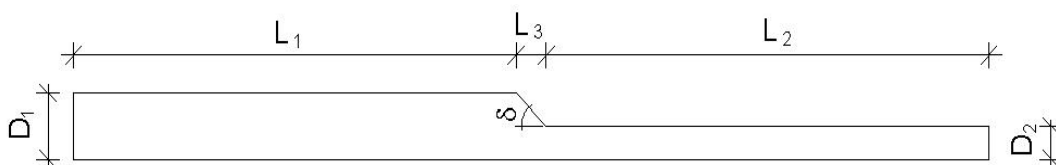


Obr. 115 Celková ztrátová výška - var. 24

Jak můžeme vidět na Obr. 115, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 8,6%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 2,4 %. Turbulentní modely $k-\epsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

6.3 KÓNICKÉ ZÚŽENÍ

V programu byl vytvořen geometrický model kónicky se zužujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Workbench vmodelováno 20 variant kónického zúžení. Průměry potrubí D_1 , D_2 a jejich poměry $n = D_2/D_1$ jsou uvedeny v kap. 5.3, Tab. 15. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Délka kónické části potrubí byla volena tak, aby vznikl úhel $\delta = 45^\circ$ (viz Obr. 116). V této kapitole bohužel není možno porovnat vypočítané hodnoty pro součinitele ξ , místní ztráty a ztráty celkové s hodnotami uváděnými v literatuře, protože zde hodnota závisí na úhlu zúžení 2δ , který je v tomto případě 90° a v dostupné literatuře je hodnota uváděna pouze do hodnoty 75° [12].



Obr. 116 Schéma kónického zúžení

Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitelé ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 .

Varianta 25

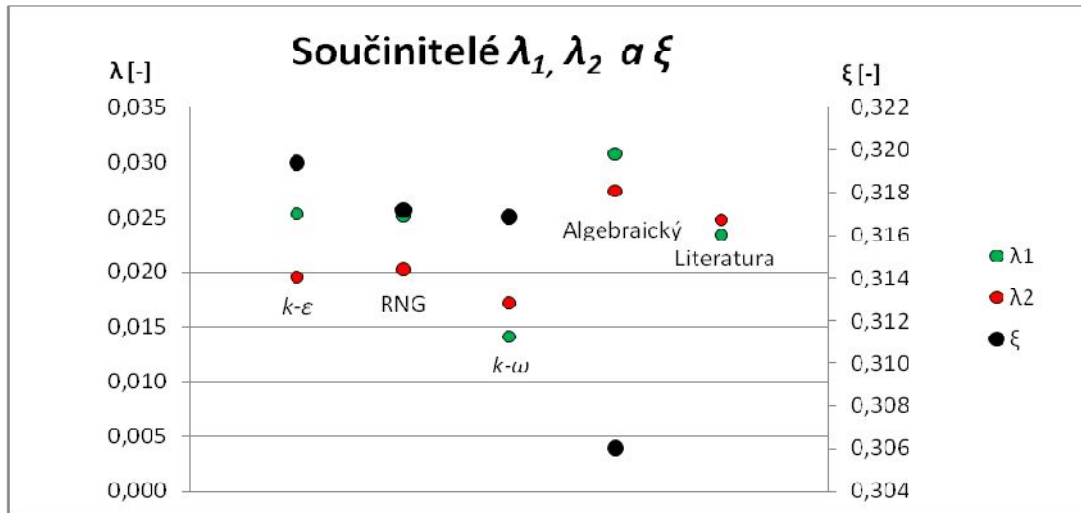
V pětadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,080$ m a $D_2 = 0,050$ m a délka kónické části $L_3 = 0,015$ m. V následující tabulce (Tab. 38) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 25.

Tab. 38 Výsledky - var. 25

25	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ζ	0,3194	0,3172	0,3169	0,3060	
λ_1	0,0253	0,0251	0,0141	0,0308	0,0234
λ_2	0,0196	0,0202	0,0171	0,0274	0,0248
h_m	0,0971	0,0964	0,0997	0,0983	
h_{t1}	0,0169	0,0167	0,0096	0,0211	0,0164
h_{t2}	0,1307	0,1352	0,1187	0,1936	0,1821
h_{celk}	0,2446	0,2483	0,2280	0,3130	

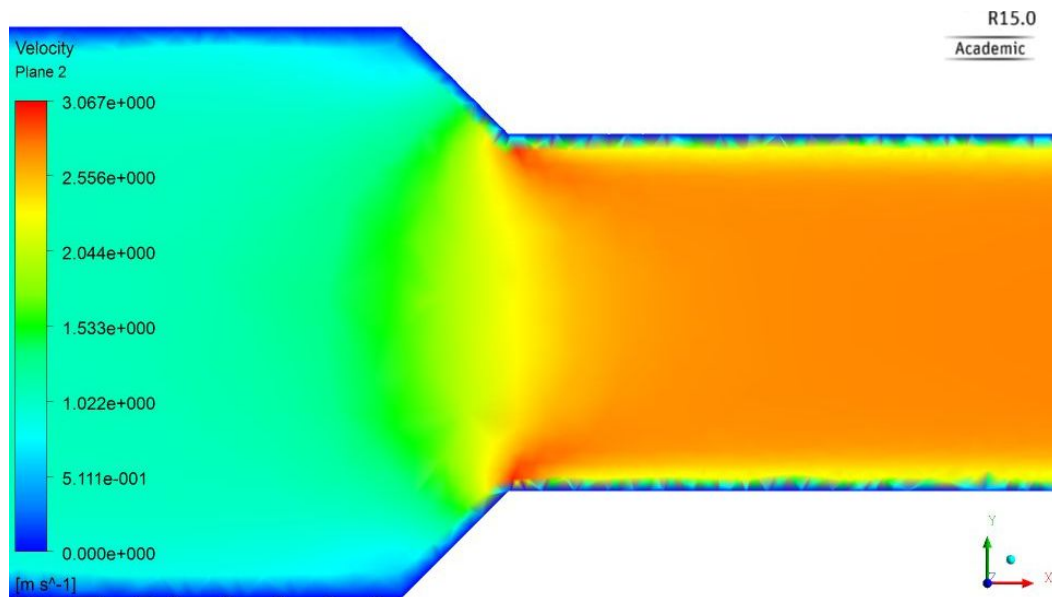
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 23,2%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 0,8%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s algebraickým modelem liší o 3,7%.



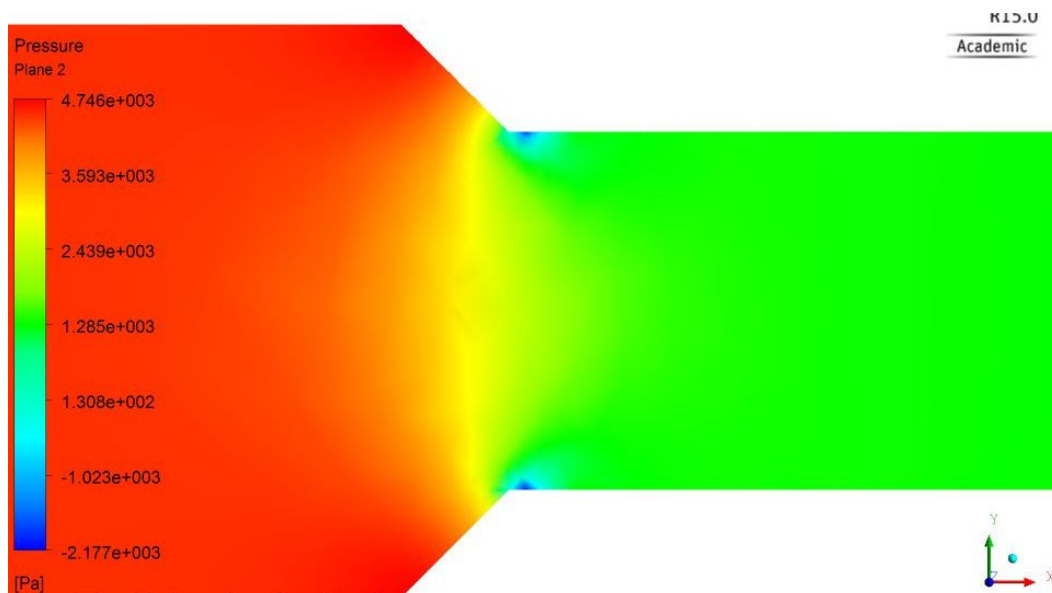
Obr. 117 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 25

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.



Obr. 118 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 25 s $k-\varepsilon$ modelem

Na Obr. 118 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vznikají zde velké rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 119 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 25 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 119 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 120 Celková ztrátová výška - var. 25

Jak můžeme vidět na Obr. 120, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 23,2%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím RNG turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím $k-\omega$ modelu. Hodnoty s použitím RNG a $k-\omega$ modelu se liší o 8,2%.

Varianta 26

V šestadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,125$ m a $D_2 = 0,100$ m a délka kónické části $L_3 = 0,0125$ m. V následující tabulce (Tab. 39) jsou

uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 26.

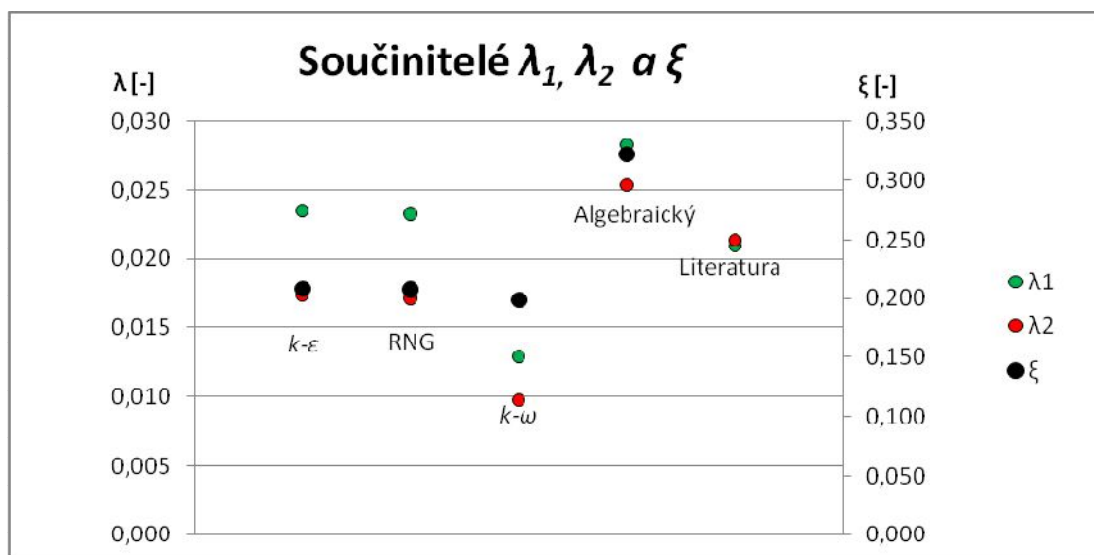
Tab. 39 Výsledky - var. 26

26	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ζ	0,2076	0,2073	0,1984	0,3223	
λ_1	0,0235	0,0233	0,0129	0,0283	0,0210
λ_2	0,0173	0,0172	0,0098	0,0253	0,0214
h_m	0,0237	0,0237	0,0232	0,0381	
h_{t1}	0,0101	0,0100	0,0057	0,0124	0,0094
h_{t2}	0,0218	0,0216	0,0126	0,0329	0,0293
h_{celk}	0,0556	0,0553	0,0414	0,0834	

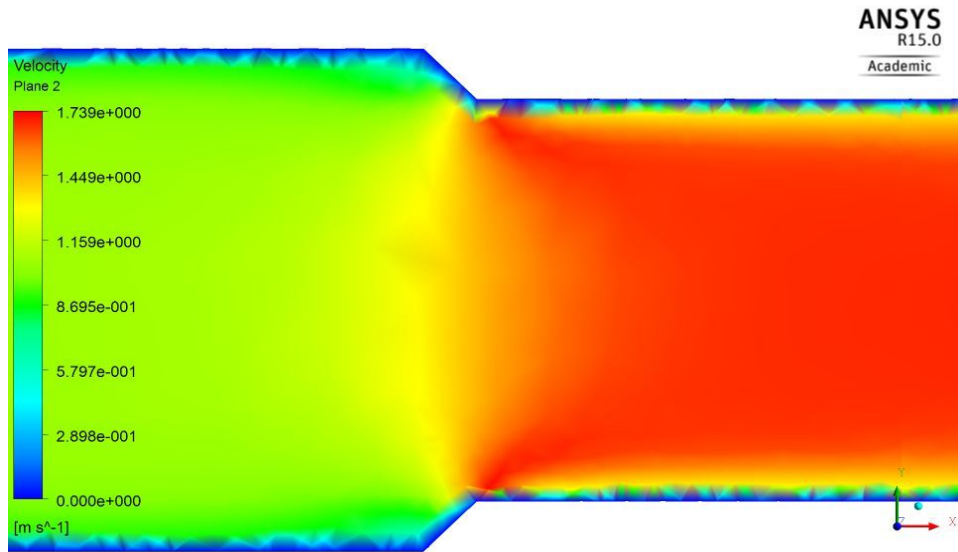
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 39,1%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 4,4%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s algebraickým modelem liší o 36,6%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

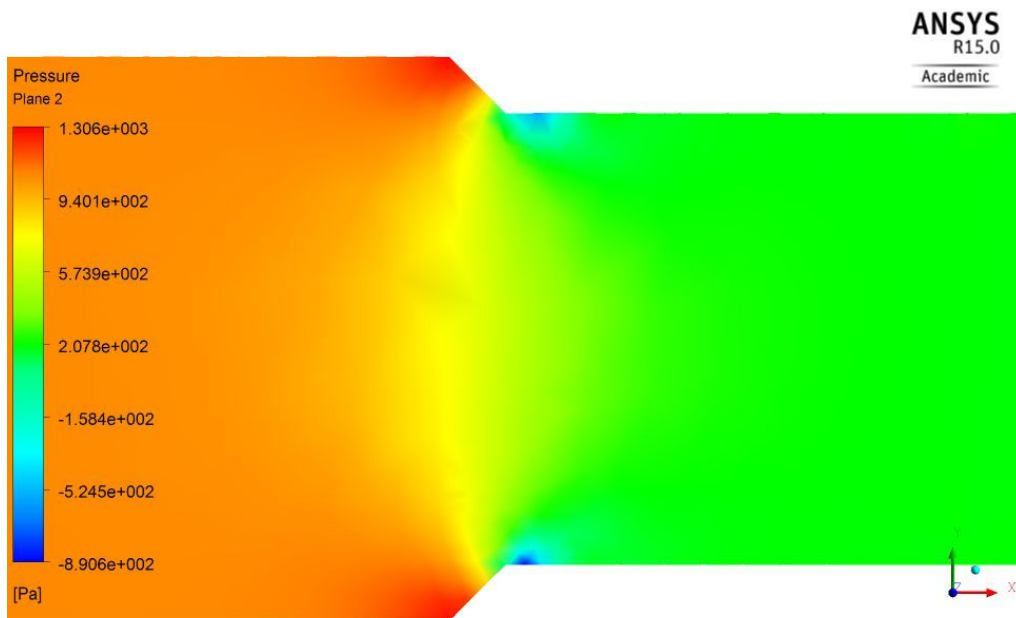


Obr. 121 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 26



Obr. 122 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 26 s RNG modelem

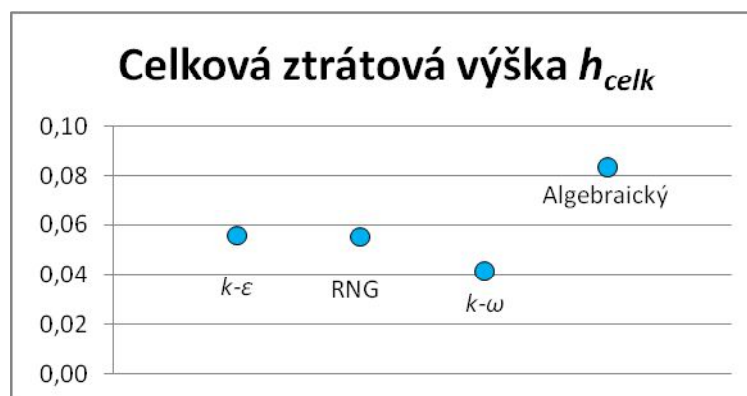
Na Obr. 122 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím RNG modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vznikají zde velké rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 123 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 26 s RNG modelem

Z Obr. 123 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší

než v profilu za zúžením. V místě přechodu ze širšího profilu do kónické části vznikají vysoké hodnoty tlaků.



Obr. 124 Celková ztrátová výška - var. 26

Jak můžeme vidět na Obr. 124, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 39,1%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím $k-\varepsilon$ turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím $k-\omega$ modelu. Hodnoty s použitím $k-\varepsilon$ a $k-\omega$ modelu se liší o 25,5%. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 27

V sedmadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m a $D_2 = 0,100$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 40) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 27.

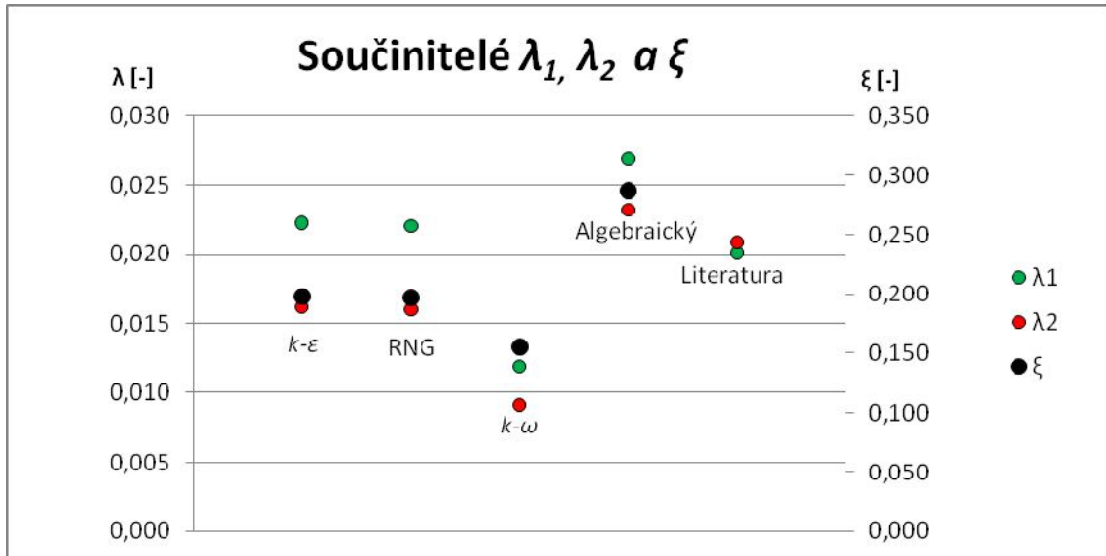
Tab. 40 Výsledky - var. 27

27	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,1978	0,1967	0,1548	0,2868	
λ_1	0,0223	0,0221	0,0120	0,0269	0,0201
λ_2	0,0162	0,0161	0,0092	0,0232	0,0209
h_m	0,0474	0,0471	0,0378	0,0706	
h_{t1}	0,0081	0,0080	0,0044	0,0099	0,0075
h_{t2}	0,0428	0,0423	0,0247	0,0629	0,0593
h_{celk}	0,0982	0,0974	0,0668	0,1433	

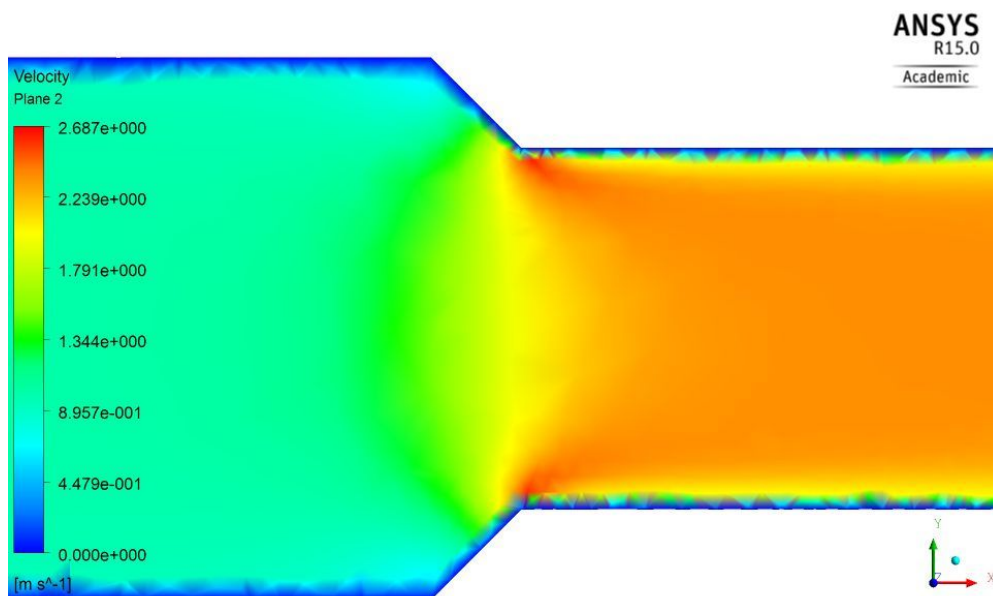
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 39,0%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 21,7%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s algebraickým modelem liší o 36,2%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant. Nejvyšší hodnoty vykazuje varianta s použitím algebraického modelu.

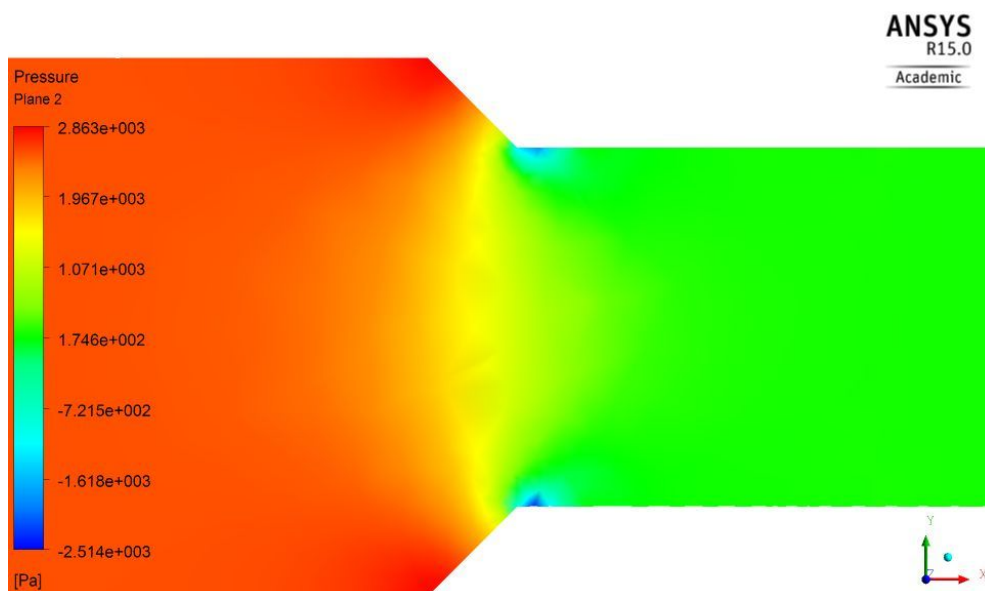


Obr. 125 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 27



Obr. 126 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 27 s $k-\omega$ modelem

Na Obr. 126 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím $k-\omega$ modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vznikají zde vysoké rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 127 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 27 s $k-\omega$ modelem

Z Obr. 127 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 128 Celková ztrátová výška - var. 27

Jak můžeme vidět na Obr. 128, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 39,0%. Nejvyšší hodnotu celkové

ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím $k-\varepsilon$ turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím $k-\omega$ modelu. Hodnoty s použitím $k-\varepsilon$ a $k-\omega$ modelu se liší o 31,9%. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 28

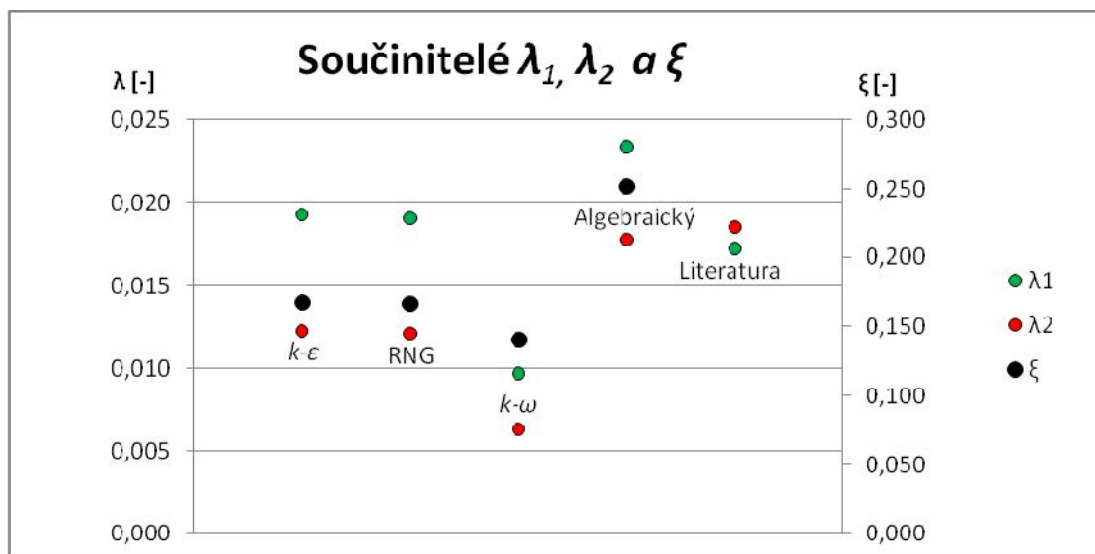
V osmadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,300$ m a $D_2 = 0,150$ m a délka kónické části $L_3 = 0,075$ m. V následující tabulce (Tab. 41) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 28.

Tab. 41 Výsledky - var. 28

28	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ζ	0,1676	0,1668	0,1410	0,2520	
λ_1	0,0193	0,0190	0,0097	0,0234	0,0172
λ_2	0,0122	0,0121	0,0064	0,0178	0,0185
h_m	0,1287	0,1281	0,1094	0,1961	
h_{t1}	0,0035	0,0035	0,0018	0,0043	0,0032
h_{t2}	0,0689	0,0681	0,0362	0,1015	0,1107
h_{celk}	0,2011	0,1996	0,1474	0,3019	

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 39,5%.

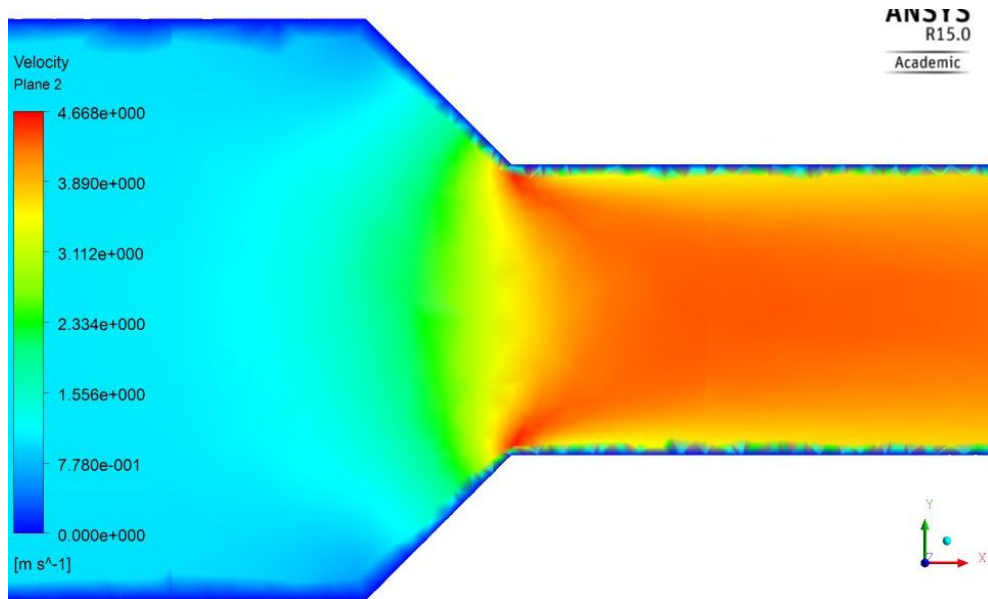
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 15,9%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s algebraickým modelem liší o 37,1%.



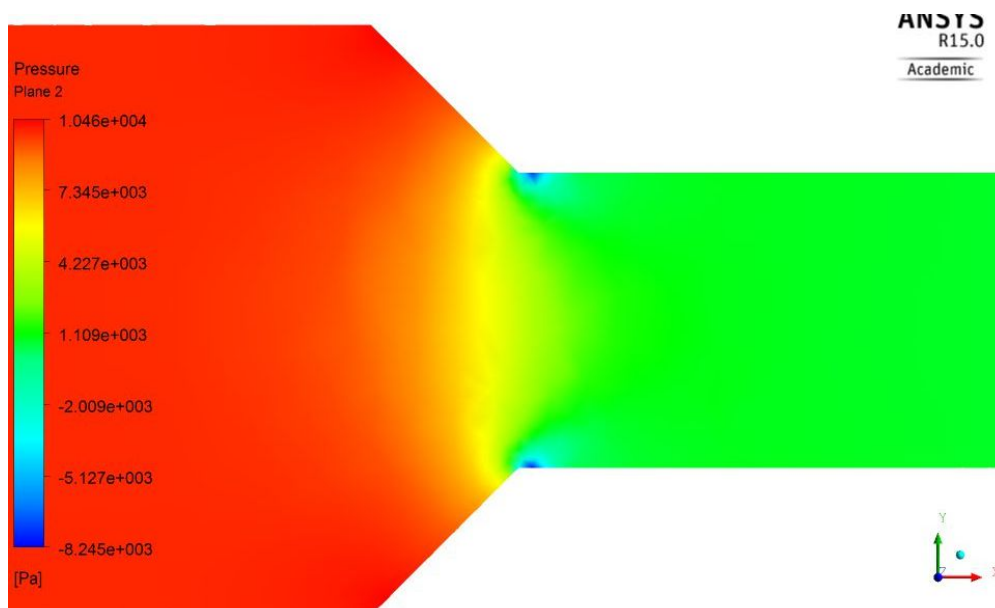
Obr. 129 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 28

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant. Nejvyšší hodnoty vykazuje varianta s použitím algebraického modelu.

Na Obr. 130 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím $k-\omega$ modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud odtrhnut od stěny a vznikají zde vysoké rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 130 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 28 s algebraickým modelem



Obr. 131 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 28 s algebraickým modelem

Z Obr. 131 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.



Obr. 132 Celková ztrátová výška - var. 28

Jak můžeme vidět na Obr. 132, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 39,5%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím $k-\varepsilon$ turbulentního modelu a naopak nejnižší hodnotu vykazuje varianta s použitím $k-\omega$ modelu. Hodnoty s použitím $k-\varepsilon$ a $k-\omega$ modelu se liší o 26,7%. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 29

V devětadvacáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,250$ m a $D_2 = 0,200$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 42) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 29.

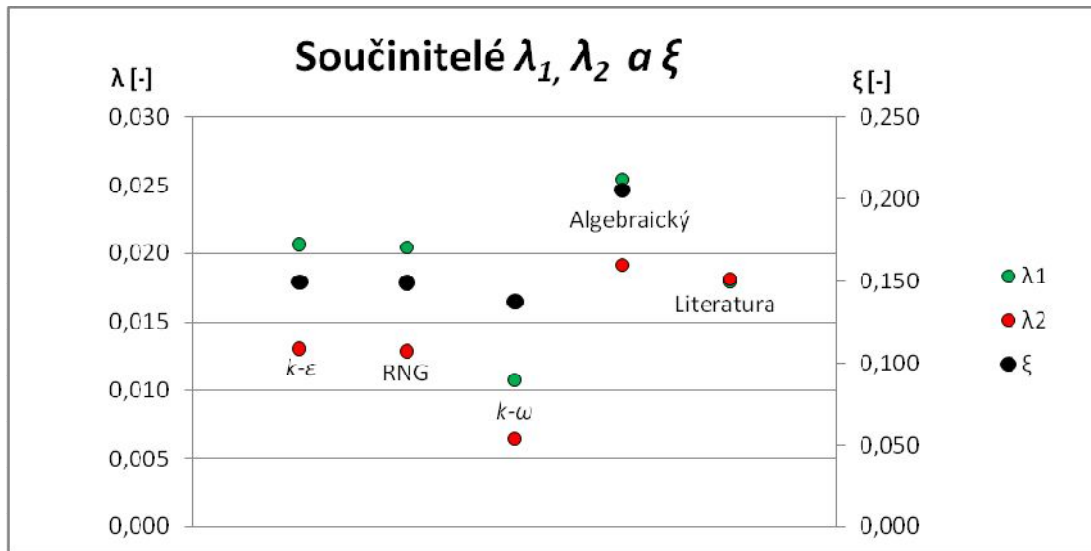
Tab. 42 Výsledky - var.29

29	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,1492	0,1487	0,1372	0,2050	
λ_1	0,0206	0,0204	0,0107	0,0254	0,0179
λ_2	0,0130	0,0129	0,0065	0,0192	0,0182
h_m	0,0172	0,0171	0,0160	0,0240	
h_{t1}	0,0045	0,0045	0,0024	0,0056	0,0040
h_{t2}	0,0083	0,0082	0,0042	0,0123	0,0124
h_{celk}	0,0299	0,0297	0,0226	0,0419	

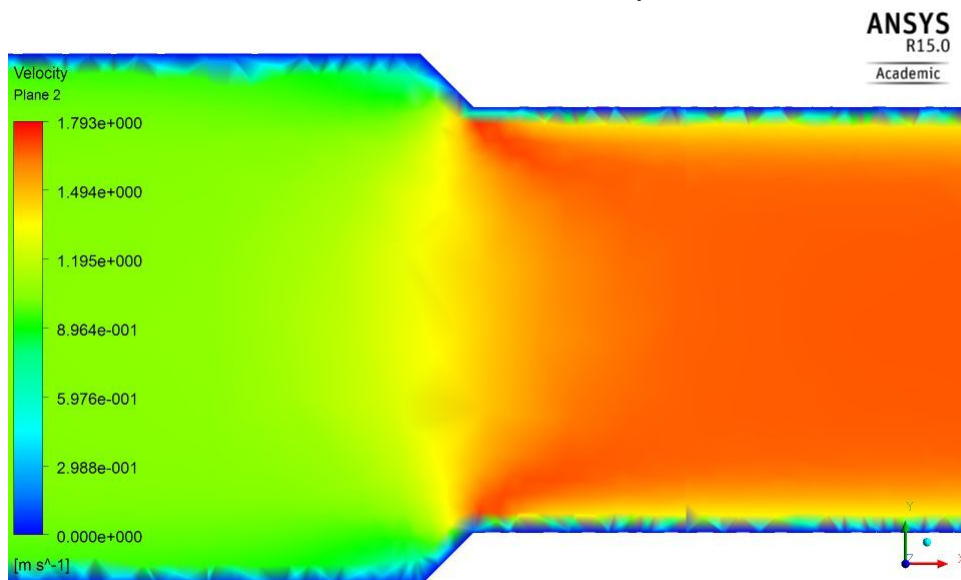
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 34,6%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 8,0%. Průměrné hodnoty turbulentních modelů (kromě algebraického) se pro součinitele místní ztráty ζ od hodnot s algebraickým modelem liší o 29,2%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant. Nejvyšší hodnoty vykazuje varianta s použitím algebraického modelu.



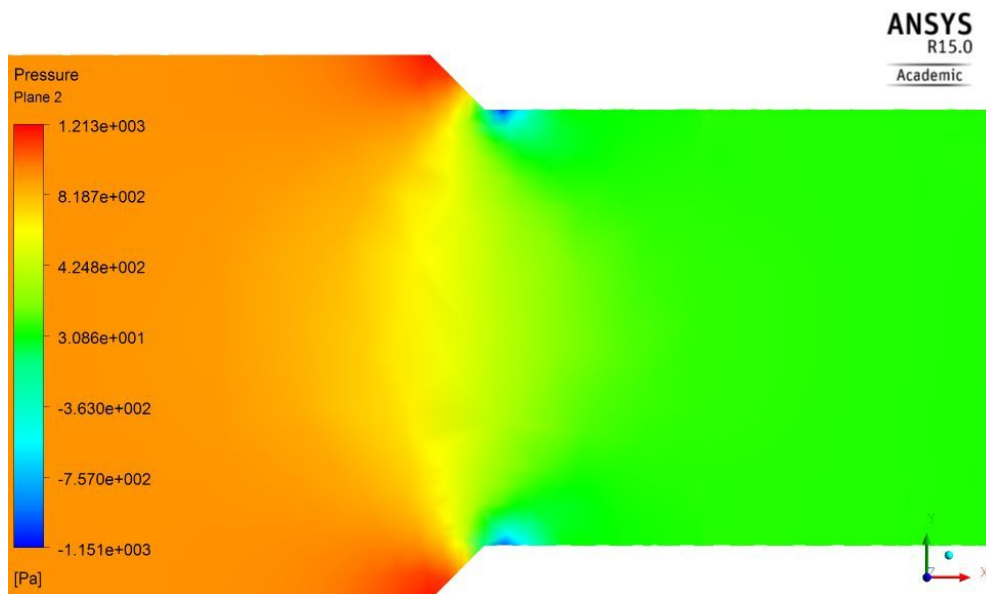
Obr. 133 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 29



Obr. 134 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 29 s $k-\varepsilon$ modelem

Na Obr. 133 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě kónického zúžení pro variantu s použitím $k-\varepsilon$ modelu. Jak je z obrázku patrné, v místě za zúžením je proud

odtrhnut od stěny a vznikají zde vysoké rychlosti. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



Obr. 135 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 29 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 134 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku v místě největšího odtržení proudu od stěny. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením. V místě přechodu ze širšího profilu do kónické části vznikají vysoké tlaky.



Obr. 136 Celková ztrátová výška - var. 29

Jak můžeme vidět na Obr. 136, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 34,6%. Nejvyšší hodnotu celkové ztráty h_{celk} vykazuje varianta s použitím $k-\varepsilon$ turbulentního modelu a naopak nejnižší

hodnotu vykazuje varianta s použitím $k-\omega$ modelu. Hodnoty s použitím $k-\varepsilon$ a $k-\omega$ modelu se liší o 24,6%. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

6.4 NÁHLÉ ROZŠÍŘENÍ

V programu byl nejprve vytvořen geometrický model náhle se rozšiřujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Workbench vymodelováno 20 variant náhlého rozšíření. Průměry potrubí D_1 , D_2 jsou uvedeny v kap. 5.4, Tab. 21. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitelé ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 . Dále následoval výpočet součinitele místní ztráty ξ a z něj vypočtena místní ztráta změnou průřezu h_m vztahena k profilu D_2 s rychlostí v_2 . Jako poslední byla vypočítána celková ztráta h_{celk} , která je součtem ztrát třením po délce h_{t1} a h_{t2} , a místní ztrátou h_m .

Varianta 30

V třicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,050$ m a $D_2 = 0,080$ m. V následující tabulce (Tab. 43) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 30.

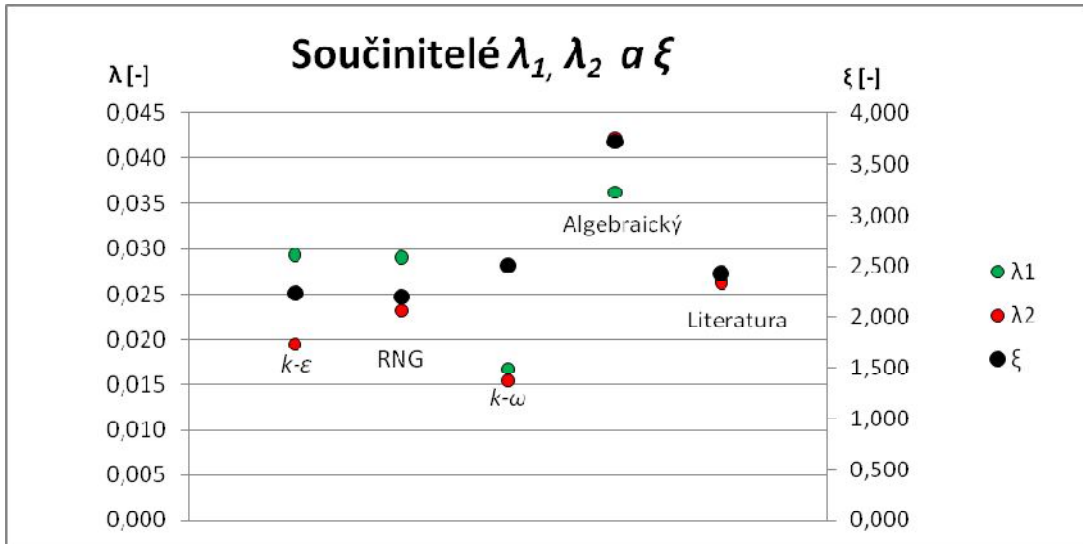
Tab. 43 Výsledky - var. 30

30	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	2,2376	2,2051	2,5135	3,7190	2,4336
λ_1	0,0294	0,0291	0,0168	0,0363	0,0265
λ_2	0,0195	0,0233	0,0155	0,0422	0,0263
h_m	0,0129	0,0146	0,0145	0,0232	0,0189
h_{t1}	0,0306	0,0303	0,0181	0,0391	0,0297
h_{t2}	0,0016	0,0021	0,0012	0,0036	0,0028
h_{celk}	0,0451	0,0471	0,0338	0,0659	0,0515

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 36,3%.

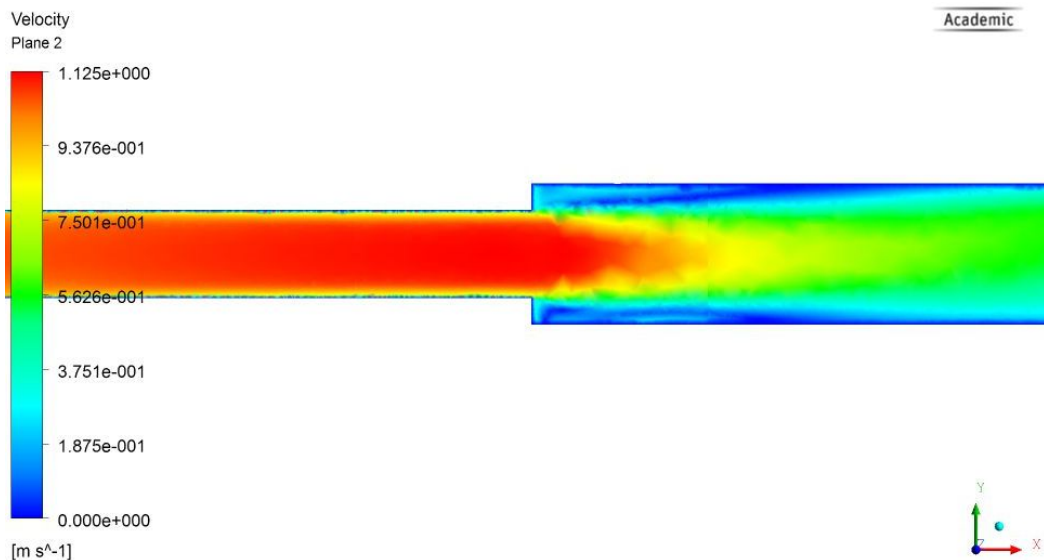
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\omega$ a RNG, kde se hodnoty liší o 12,3%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 4,7%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

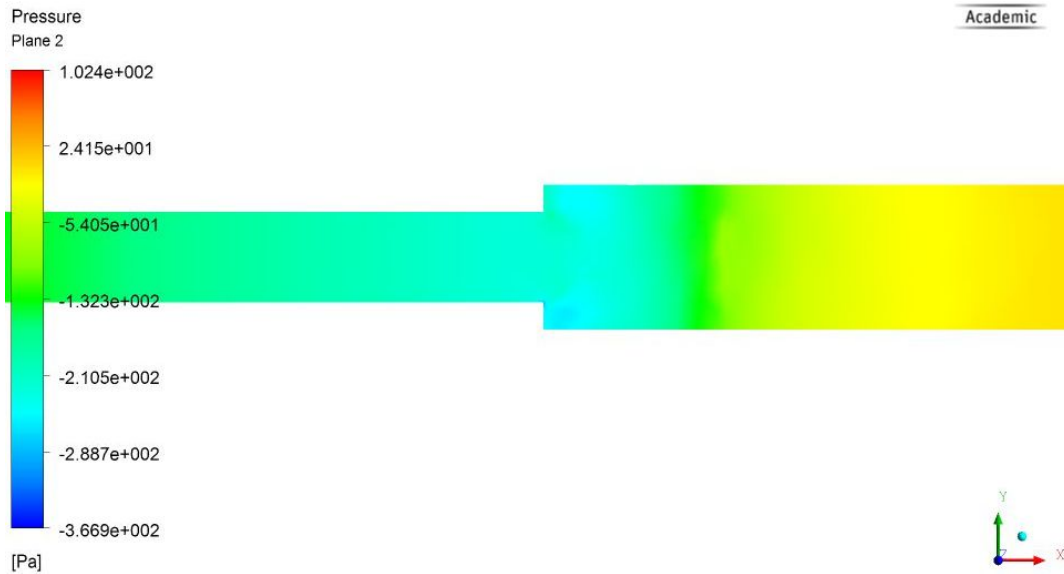


Obr. 137 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 30

Na Obr. 138 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu $k-\varepsilon$. V místě za změnou průřezu vzniká víření tekutiny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem.



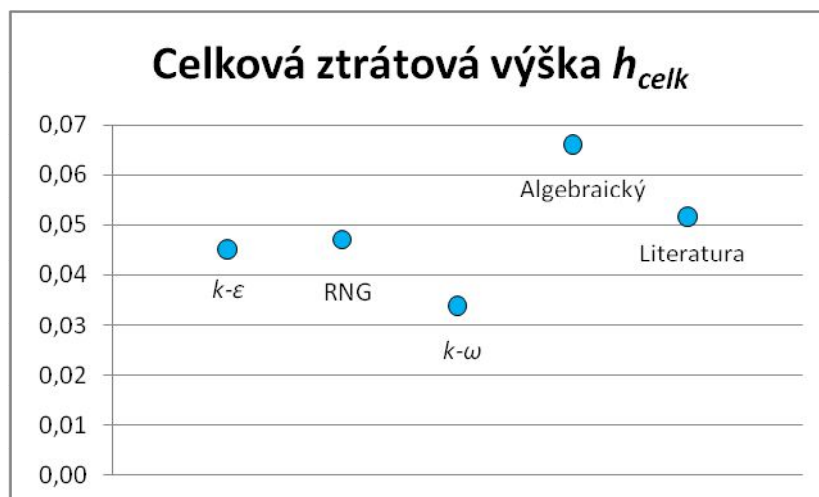
Obr. 138 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 30 s $k-\varepsilon$ modelem



Obr. 139 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 30 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 139 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku. Je zde patrné, že v širším průřezu je tlak vyšší než v profilu za zúžením.

Jak můžeme vidět na Obr. 140, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 36,3%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 18,5 %. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.



Obr. 140 Celková ztrátová výška - var. 30

Varianta 31

V jedenácté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m a $D_2 = 0,125$ m. V následující tabulce (Tab. 44) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 31.

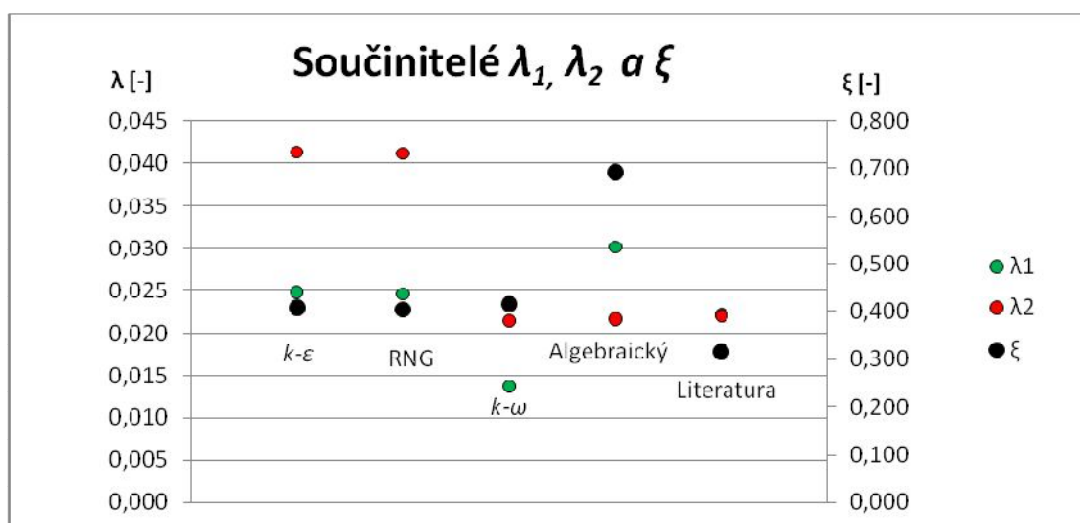
Tab. 44 Výsledky - var. 31

31	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,4086	0,4053	0,4168	0,6943	0,3164
λ_1	0,0248	0,0245	0,0138	0,0301	0,0222
λ_2	0,0413	0,0411	0,0215	0,0216	0,0220
h_m	0,0062	0,0062	0,0069	0,0125	0,0066
h_{t1}	0,0133	0,0131	0,0075	0,0164	0,0124
h_{t2}	0,0055	0,0055	0,0031	0,0034	0,0040
h_{celk}	0,0249	0,0248	0,0175	0,0323	0,0231

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 30,6%.

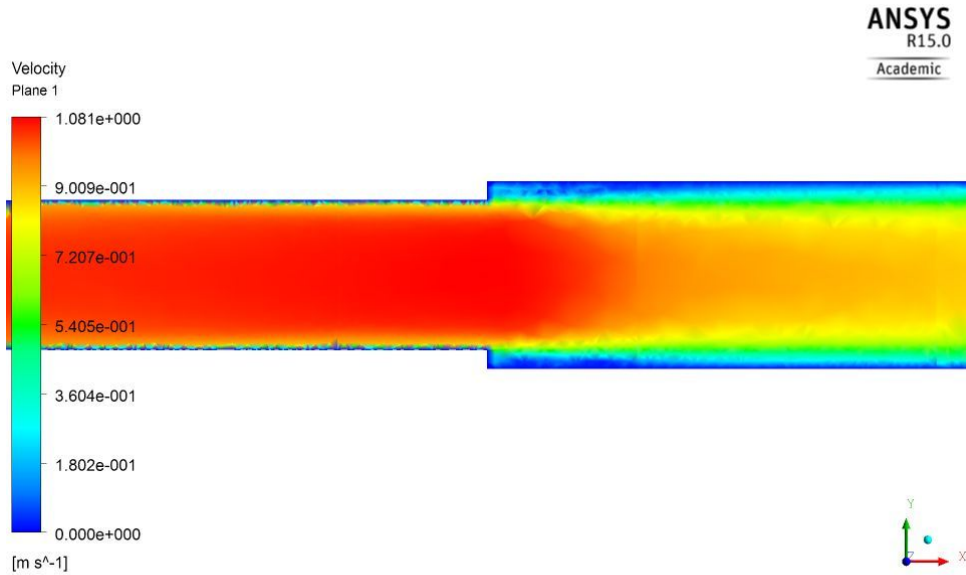
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 2,8%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 22,9%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

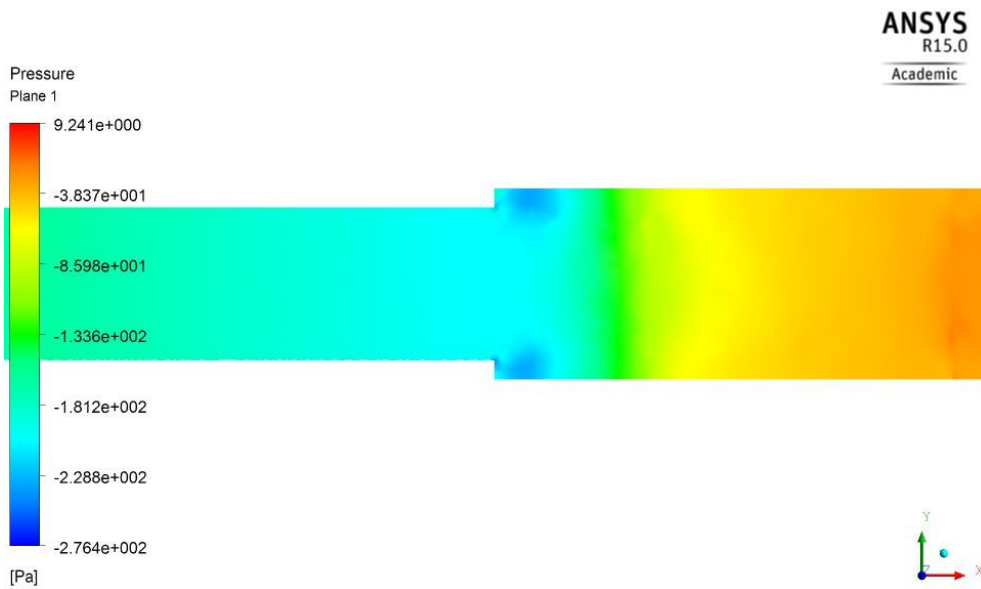


Obr. 141 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 31

Na Obr. 142 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s turbulentním RNG modelem. V místě za změnou průřezu vzniká víření tekutiny, ale ne tak výrazné jako u přechodu s výraznějším poměrem rozšíření. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem

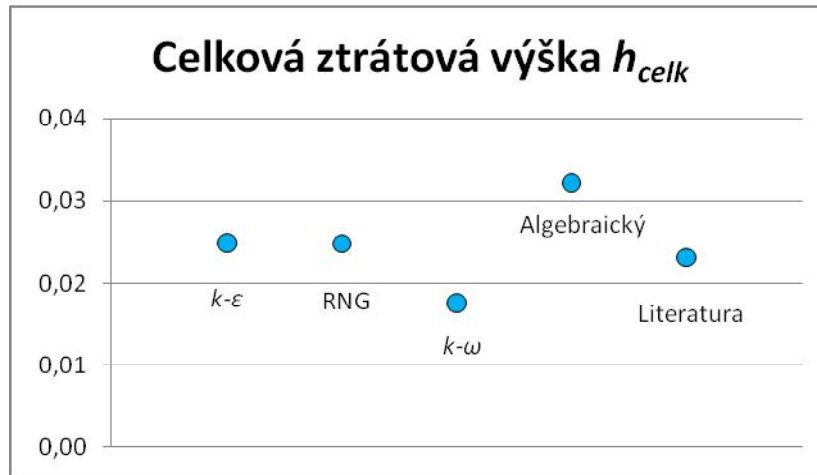


Obr. 142 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 31 s RNG modelem



Obr. 143 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 31 s RNG modelem

Z Obr. 143 je patrné, že v místě ihned za změnou průřezu vzniká oblast podtlaku.



Obr. 144 Celková ztrátová výška - var. 31

Jak můžeme vidět na Obr. 144, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 30,6%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 3,0 %. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 32

Ve dvaatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m a $D_2 = 0,150$ m. V následující tabulce (Tab. 45) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 32.

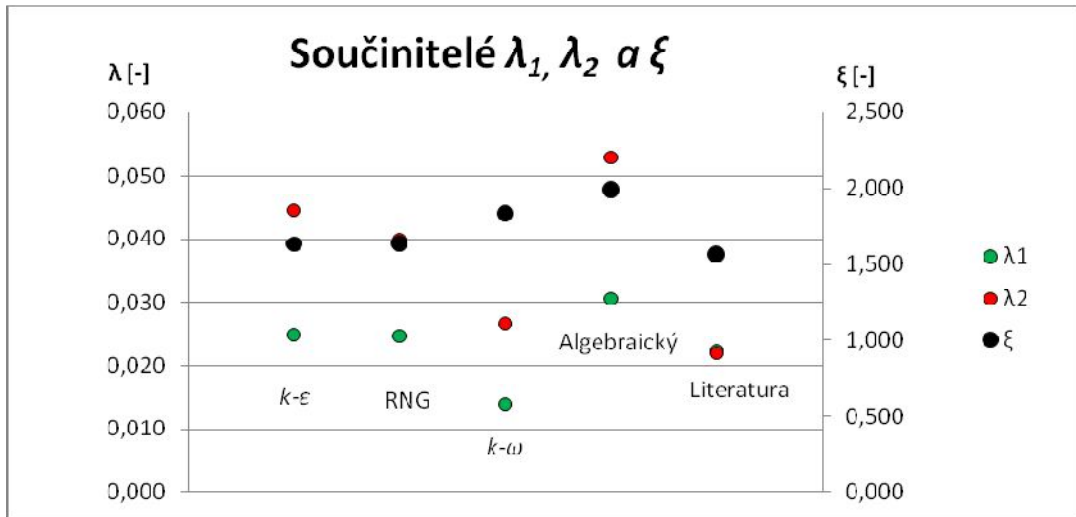
Tab. 45 Výsledky - var. 32

32	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ζ	1,6332	1,6349	1,8361	1,9958	1,5625
λ_1	0,0248	0,0245	0,0139	0,0305	0,0222
λ_2	0,0445	0,0398	0,0267	0,0528	0,0221
h_m	0,0124	0,0130	0,0133	0,0143	0,0157
h_{t1}	0,0133	0,0131	0,0076	0,0166	0,0124
h_{t2}	0,0025	0,0023	0,0014	0,0028	0,0016
h_{celk}	0,0281	0,0285	0,0223	0,0336	0,0298

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 21,7%.

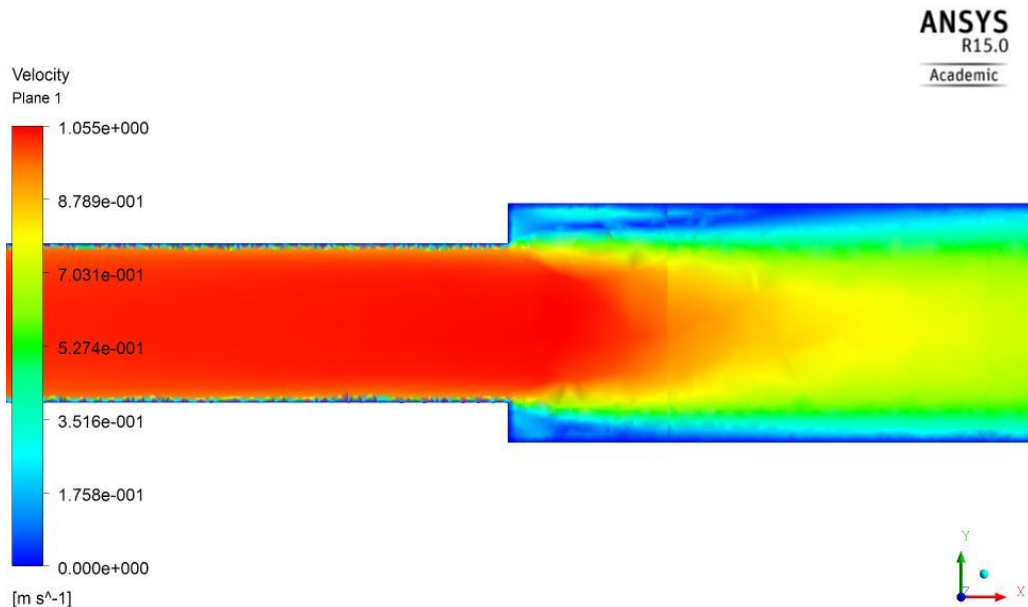
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ζ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 11,0%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 8,2%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

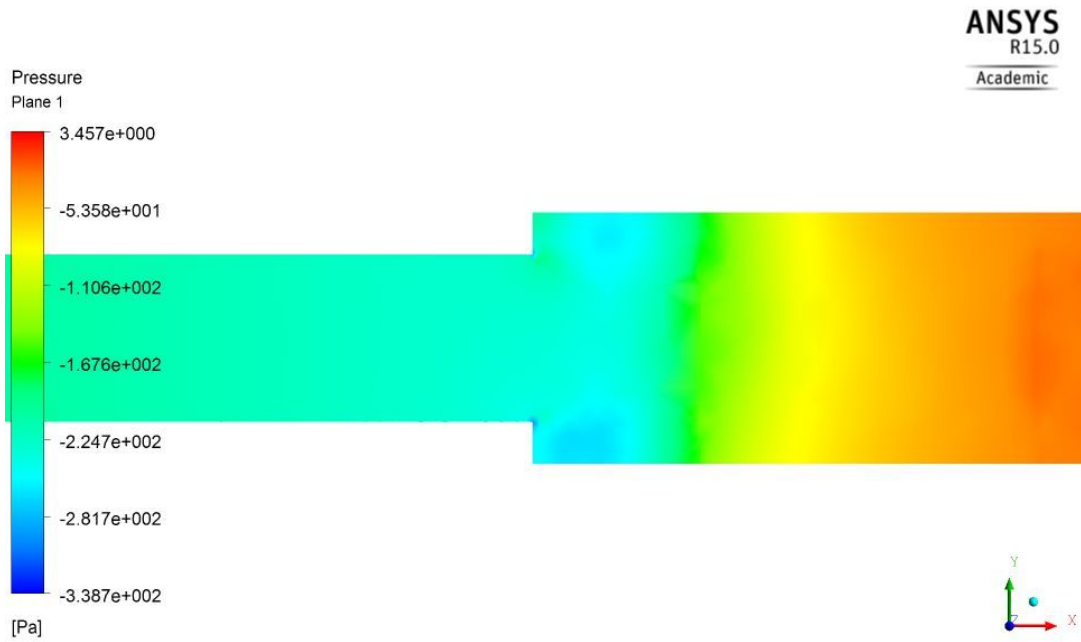


Obr. 145 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 32

Na Obr. 146 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s turbulentním $k-\omega$ modelem. V místě za změnou průřezu vzniká víření tekutiny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem

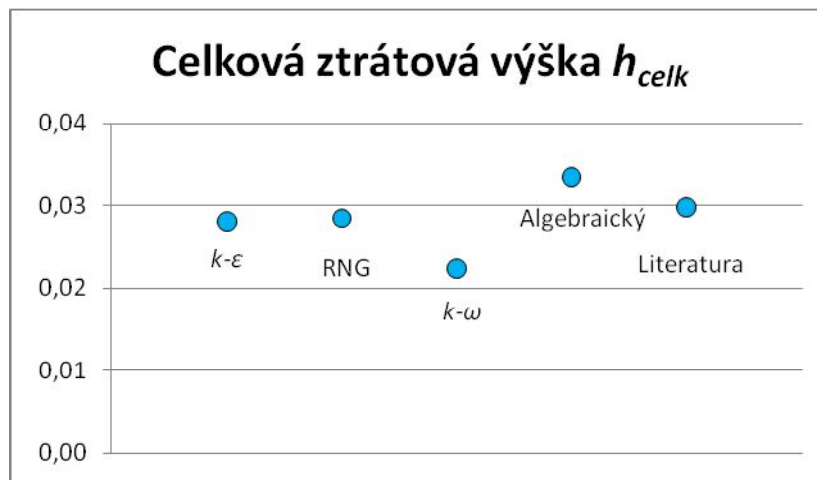


Obr. 146 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 32 s $k-\omega$ modelem



Obr. 147 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 32 s $k-\omega$ modelem

Z Obr. 147 je patrné, že v užším potrubí a v místě ihned za změnou průřezu vzniká podtlak.



Obr. 148 Celková ztrátová výška - var. 32

Jak můžeme vidět na Obr. 148, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 21,7%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 11,8 %. Turbulentní modely $k-\epsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 33

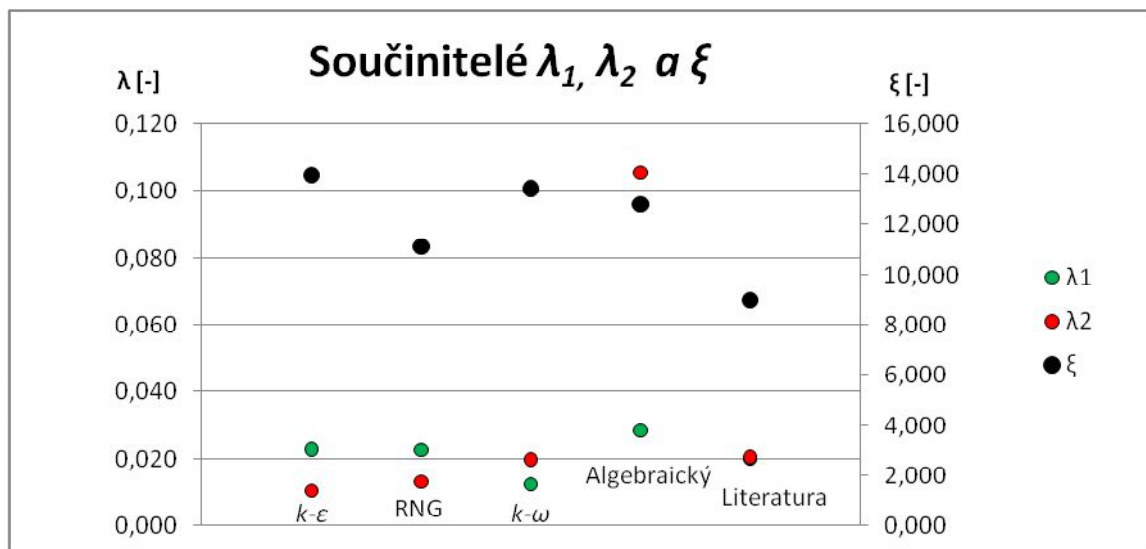
Ve třiatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m a $D_2 = 0,300$ m. V následující tabulce (Tab. 46) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 33.

Tab. 46 Výsledky - var. 33

33	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	13,9885	11,1406	13,4680	12,8351	9,0000
λ_1	0,0229	0,0227	0,0125	0,0285	0,0201
λ_2	0,0105	0,0131	0,0198	0,1054	0,0205
h_m	0,0460	0,0412	0,0368	0,0329	0,0287
h_{11}	0,0083	0,0082	0,0046	0,0104	0,0075
h_{12}	0,0001	0,0002	0,0002	0,0010	0,0002
h_{celk}	0,0544	0,0496	0,0415	0,0442	0,0364

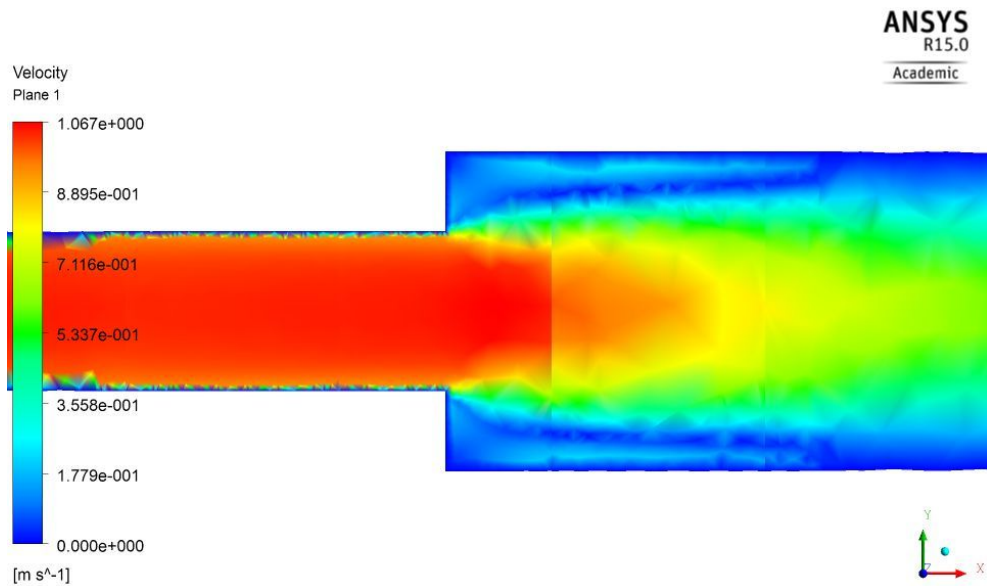
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a RNG, kde se hodnoty liší o 20,4%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 30,0%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

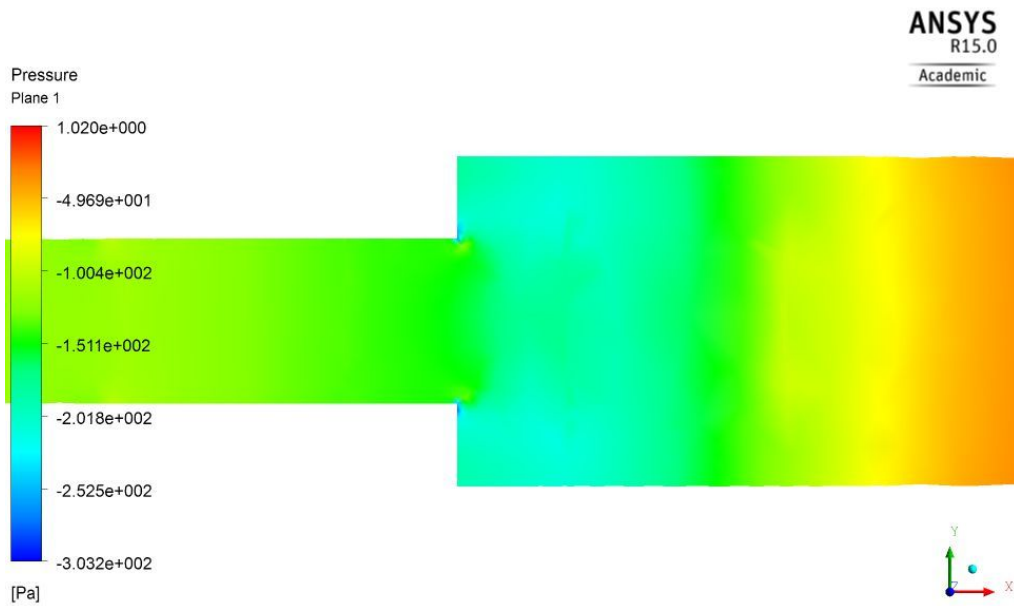


Obr. 149 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 33

Na Obr. 150 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s turbulentním algebraickým modelem. V místě za změnou průřezu vzniká víření tekutiny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem

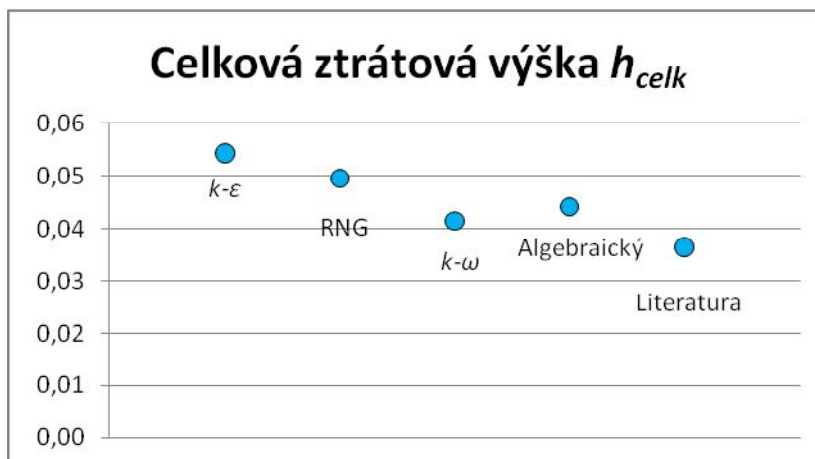


Obr. 150 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 33 s algebraickým modelem



Obr. 151 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 33 s algebraickým modelem

Z Obr. 151 je patrné, že v užším potrubí a v místě změnou průřezu vzniká podtlak.



Obr. 152 Celková ztrátová výška - var. 33

Průměr hodnot všech použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 24,9 %.

Varianta 34

Ve čtyřiatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,200$ m a $D_2 = 0,250$ m. V následující tabulce (Tab. 47) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 34.

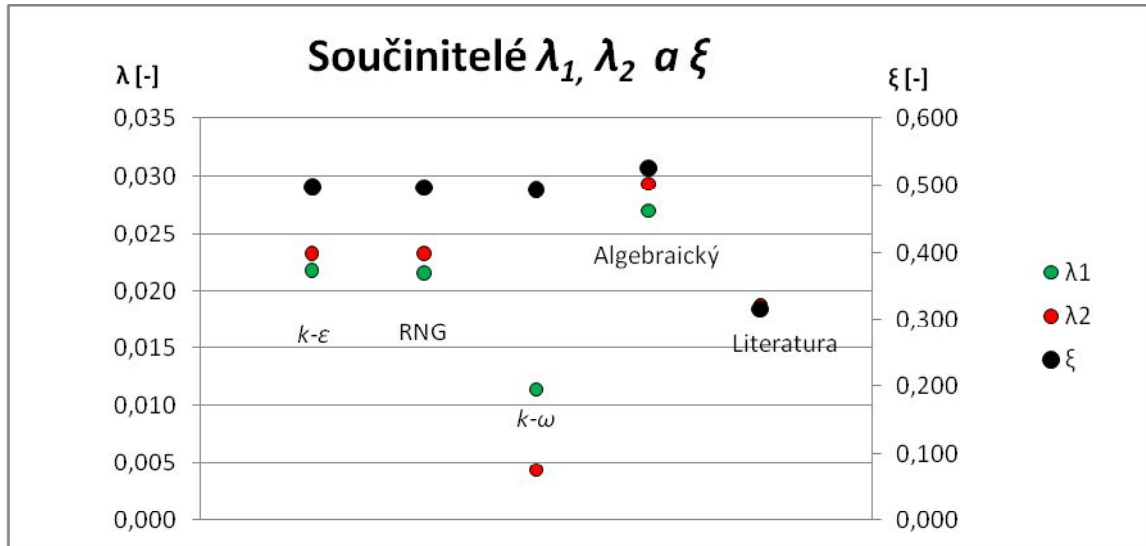
Tab. 47 Výsledky - var. 34

34	$k-\epsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,4988	0,4971	0,4945	0,5257	0,3164
λ_1	0,0219	0,0216	0,0115	0,0270	0,0188
λ_2	0,0233	0,0233	0,0045	0,0293	0,0187
h_m	0,0078	0,0078	0,0078	0,0086	0,0066
h_{t1}	0,0059	0,0059	0,0032	0,0074	0,0053
h_{t2}	0,0016	0,0016	0,0003	0,0021	0,0017
h_{celk}	0,0154	0,0153	0,0113	0,0181	0,0136

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 22,6%.

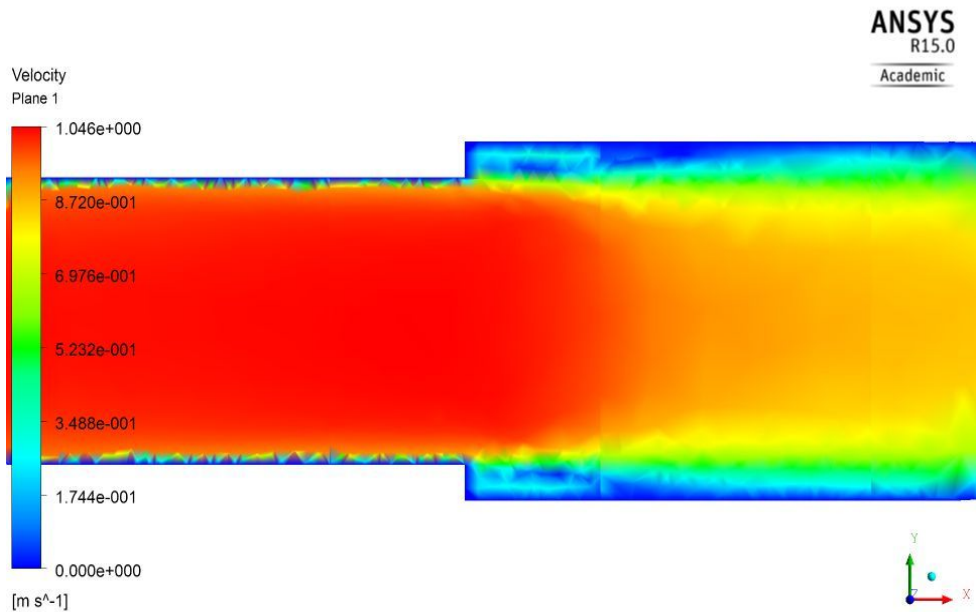
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\epsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 0,9%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 36,3%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.

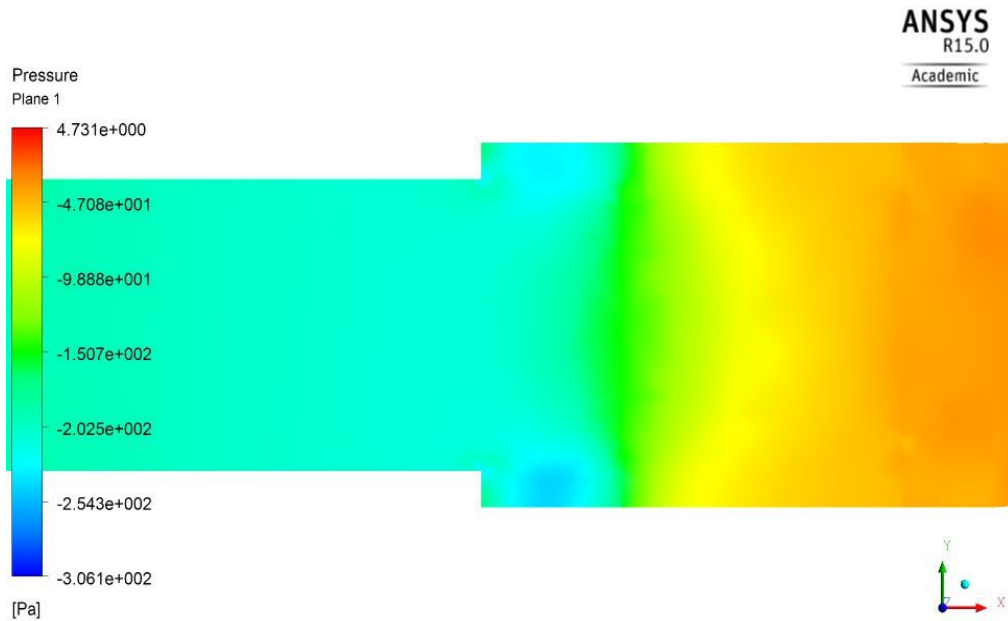


Obr. 153 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 34

Na Obr. 154 můžeme vidět rozložení rychlostí v místě náhlého rozšíření pro variantu s turbulentním $k-\varepsilon$ modelem. V místě za změnou průřezu vzniká víření tekutiny. V širším profilu jsou rychlosti nižší než u profilu menším průměrem

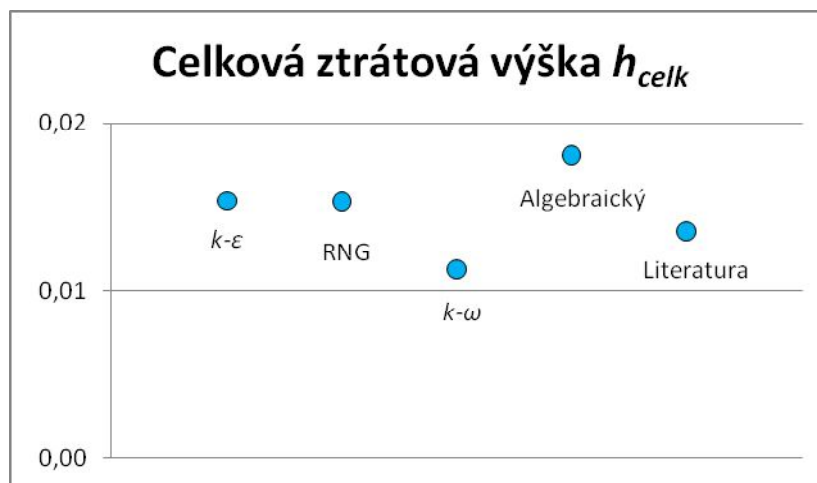


Obr. 154 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 34 s $k-\varepsilon$ modelem



Obr. 155 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 34 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 155 je patrné, že v užším potrubí a v místě změnou průřezu vzniká podtlak.



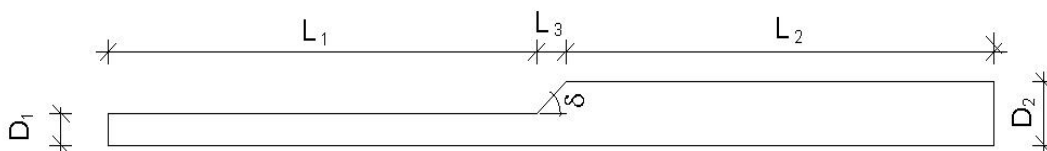
Obr. 156 Celková ztrátová výška - var. 34

Jak můžeme vidět na Obr. 156, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 22,6%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 2,8 %. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

6.5 KÓNICKÉ ROZŠÍŘENÍ

V programu byl nejprve vytvořen geometrický model kónicky se rozšiřujícího potrubí. Celkem bylo v programu Ansys Workbench vymodelováno 20 variant kónického rozšíření. Průměry potrubí D_1 , D_2 jsou uvedeny v kap. 5.5, Tab. 27. Délky potrubí L_1 a L_2 jednotlivých průměrů D_1 , D_2 byly určeny pro všechny varianty 1,1 m. Délka kónické části potrubí byla volena tak, aby vznikl úhel $\delta = 45^\circ$ (viz Obr. 157). Na výtoku z potrubí byl volen tlak $p = 0$ Pa a rychlost v potrubí, zadávaná na vstupu do potrubí, byla volena $v_1 = 1,0$ m/s.

Po získání potřebných hodnot byly v programu excel vypočteny součinitelé ztrát třením λ_1 pro průměr potrubí D_1 a λ_2 pro průměr potrubí D_2 . Z nich byly následně vypočteny ztráty třením h_{t1} pro D_1 a h_{t2} pro D_2 . Dále následoval výpočet součinitele místní ztráty ζ a z něj vypočtena místní ztráta změnou průřezu h_m vztažena k profilu D_2 s rychlostí v_2 . Jako poslední byla vypočítána celková ztráta h_{celk} , která je součtem ztrát třením po délce h_{t1} a h_{t2} , a místní ztrátou h_m .



Obr. 157 Schéma kónického rozšíření

Varianta 35

V pětaticáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,050$ m, $D_2 = 0,080$ m a délka kónické části $L_3 = 0,015$ m. V následující tabulce (Tab. 48) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 35.

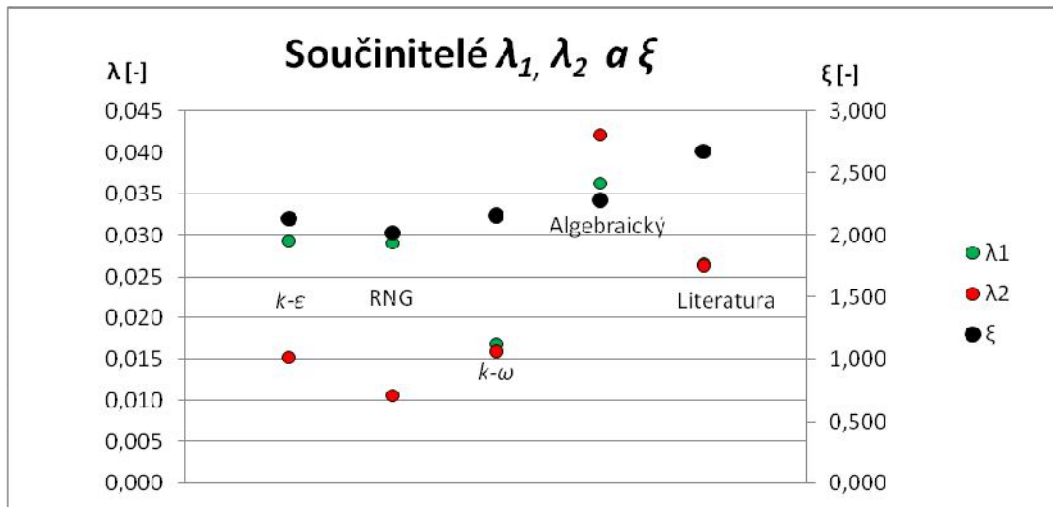
Tab. 48 Výsledky - var. 35

35	$k-\varepsilon$	RNG	k- ω	Algebraický	Literatura
ζ	2,1323	2,0208	2,1581	2,2799	2,6770
λ_1	0,0293	0,0291	0,0169	0,0363	0,0265
λ_2	0,0153	0,0107	0,0160	0,0421	0,0263
h_m	0,0129	0,0144	0,0136	0,0153	0,0208
h_{t1}	0,0309	0,0306	0,0183	0,0394	0,0297
h_{t2}	0,0013	0,0011	0,0014	0,0039	0,0028
h_{celk}	0,0450	0,0461	0,0332	0,0585	0,0534

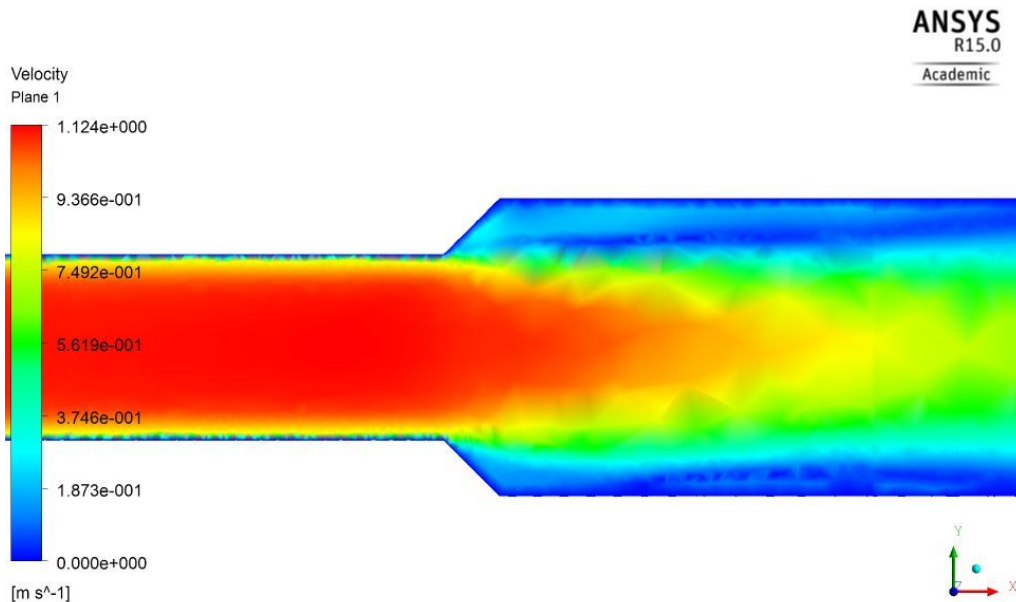
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 29,2%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\omega$ a RNG kde se hodnoty liší o 6,4%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 21,4%.

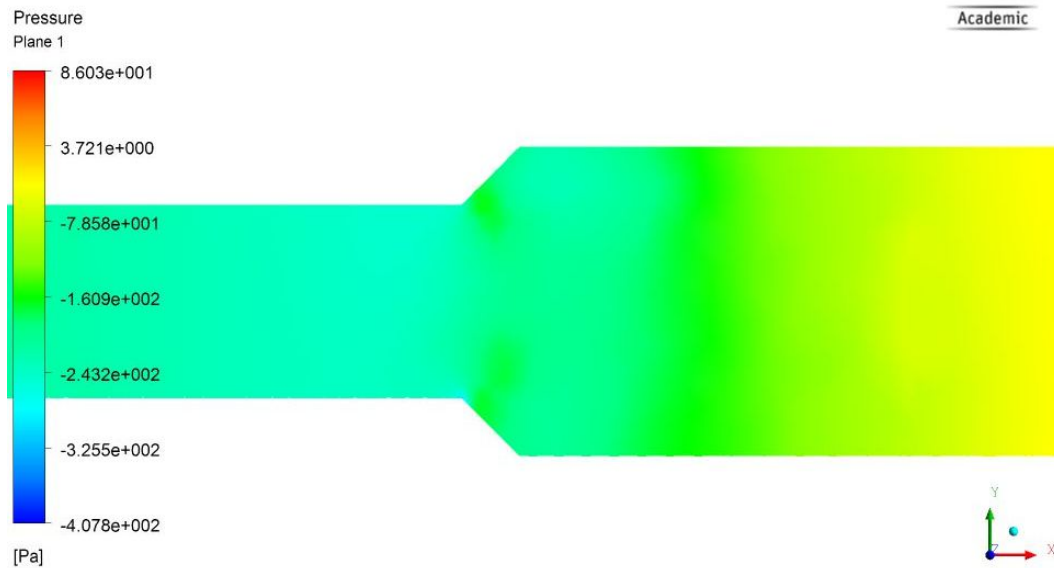
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.



Obr. 158 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 35



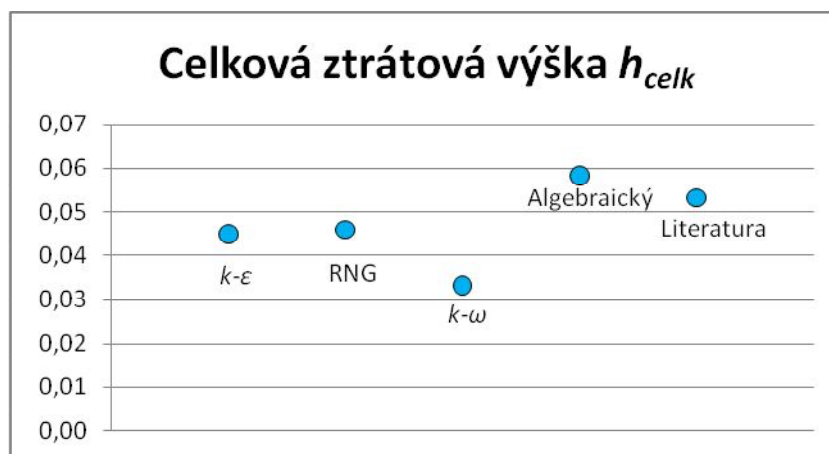
Obr. 159 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 35 s $k-\varepsilon$ modelem



Obr. 160 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 35 s $k-\epsilon$ modelem

Z Obr. 160 je očividné, že v užším průřezu v místě před rozšířením vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje.

Jak můžeme vidět na Obr. 161, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 29,2%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 22,3 %. Turbulentní modely $k-\epsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.



Obr. 161 Celková ztrátová výška - var. 35

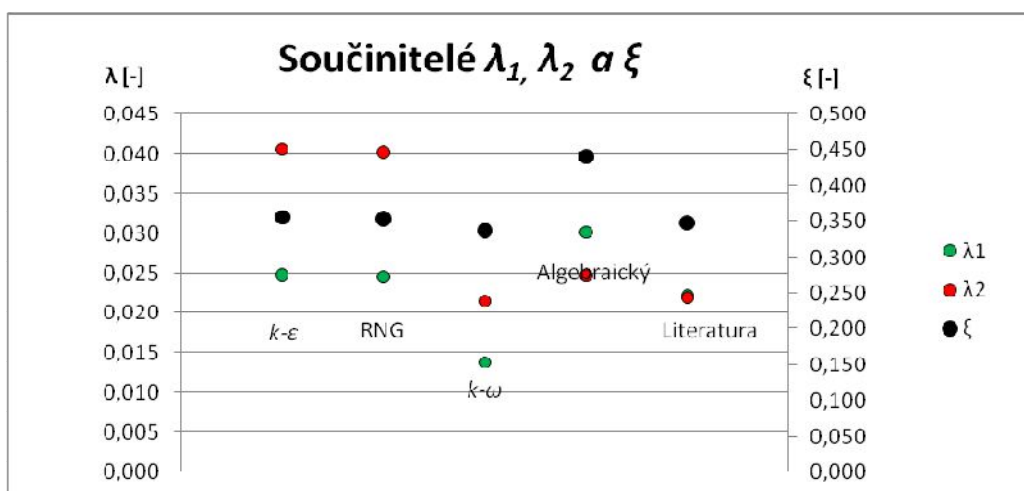
Varianta 36

V šestatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m, $D_2 = 0,125$ m a délka kónické části $L_3 = 0,0125$ m. V následující tabulce (Tab. 49) jsou

uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 36.

Tab. 49 Výsledky - var. 36

36	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,3555	0,3534	0,3372	0,4410	0,3480
λ_1	0,0248	0,0245	0,0138	0,0301	0,0222
λ_2	0,0406	0,0403	0,0216	0,0247	0,0220
h_m	0,0056	0,0056	0,0058	0,0082	0,0073
h_{t1}	0,0133	0,0131	0,0076	0,0164	0,0124
h_{t2}	0,0056	0,0056	0,0033	0,0041	0,0040
h_{celk}	0,0245	0,0243	0,0166	0,0287	0,0237

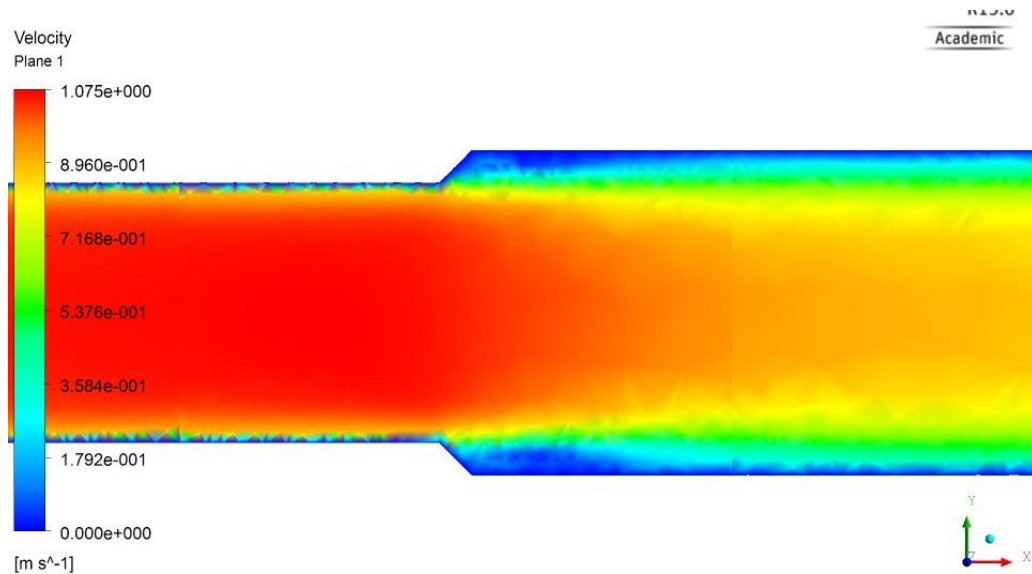


Obr. 162 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 36

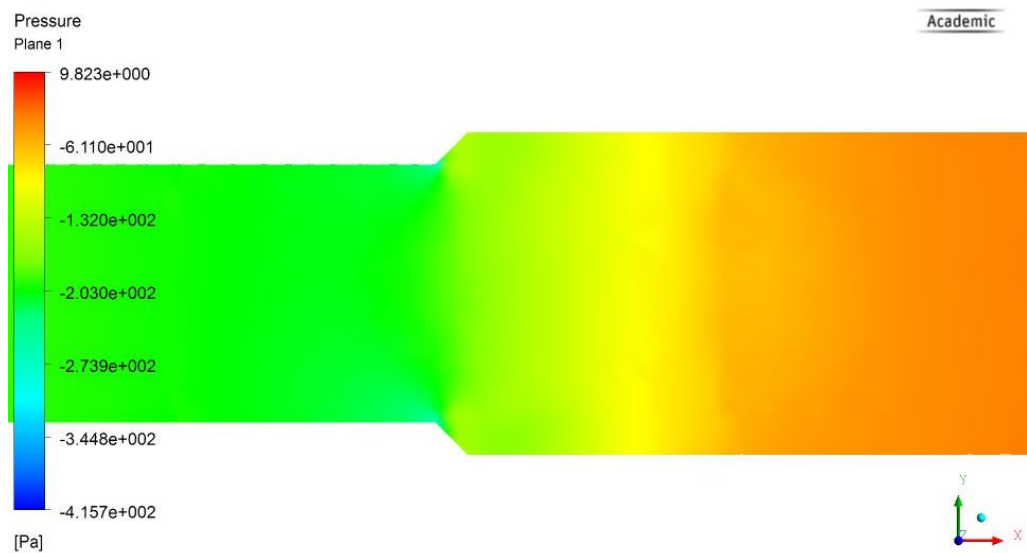
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 24,2%, tudíž je v tomto případě ze všech použitých algebraických modelů nejméně přesný.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 5,2%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 0,2%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\varepsilon$ a RNG modelu. Varianta s $k-\omega$ modelem dává nižší hodnoty než u všech ostatních počítaných variant.



Obr. 163 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 36 s RNG modelem



Obr. 164 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 36 s RNG modelem

Z Obr. 164 je očividné, že před a v místě kónické změny průřezu vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje.

Jak můžeme vidět na Obr. 165, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 24,2%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 8,3 %. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.



Obr. 165 Celková ztrátová výška - var. 36

Varianta 37

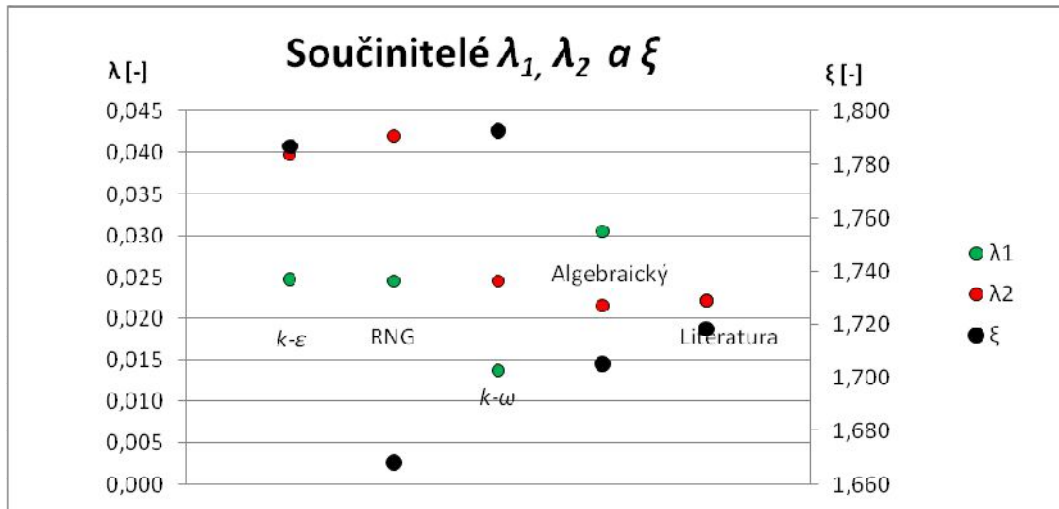
V sedmatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,100$ m, $D_2 = 0,150$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 50) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 37.

Tab. 50 Výsledky - var. 37

37	$k-\epsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	1,7867	1,6685	1,7930	1,7056	1,7188
λ_1	0,0248	0,0245	0,0139	0,0305	0,0222
λ_2	0,0398	0,0420	0,0245	0,0215	0,0221
h_m	0,0129	0,0128	0,0138	0,0135	0,0173
h_{t1}	0,0133	0,0131	0,0076	0,0166	0,0124
h_{t2}	0,0021	0,0024	0,0014	0,0013	0,0016
h_{celk}	0,0282	0,0283	0,0228	0,0313	0,0314

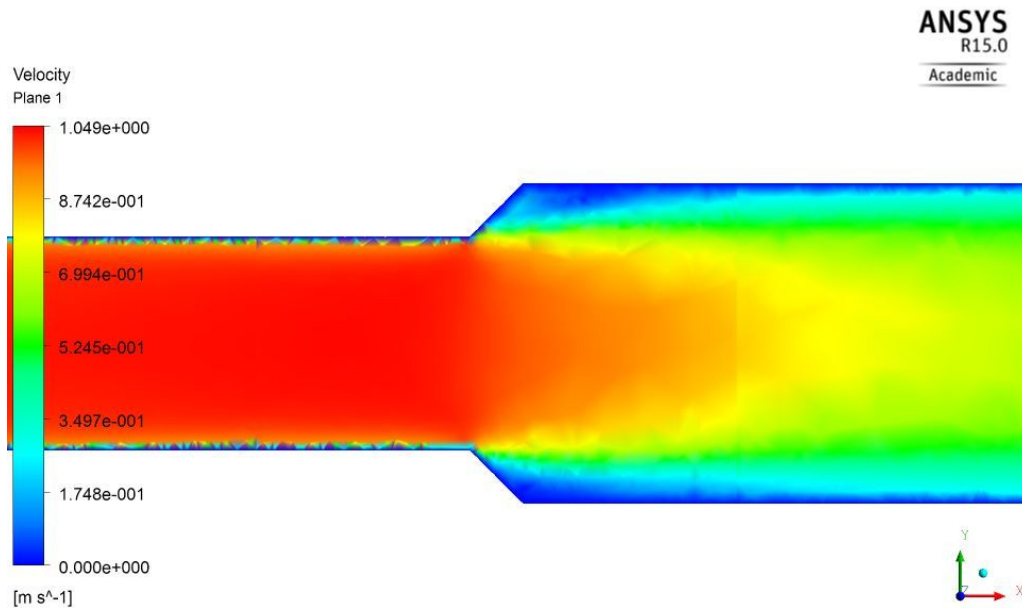
Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 15,6%.

V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů RNG a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 6,9%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 1,8%.



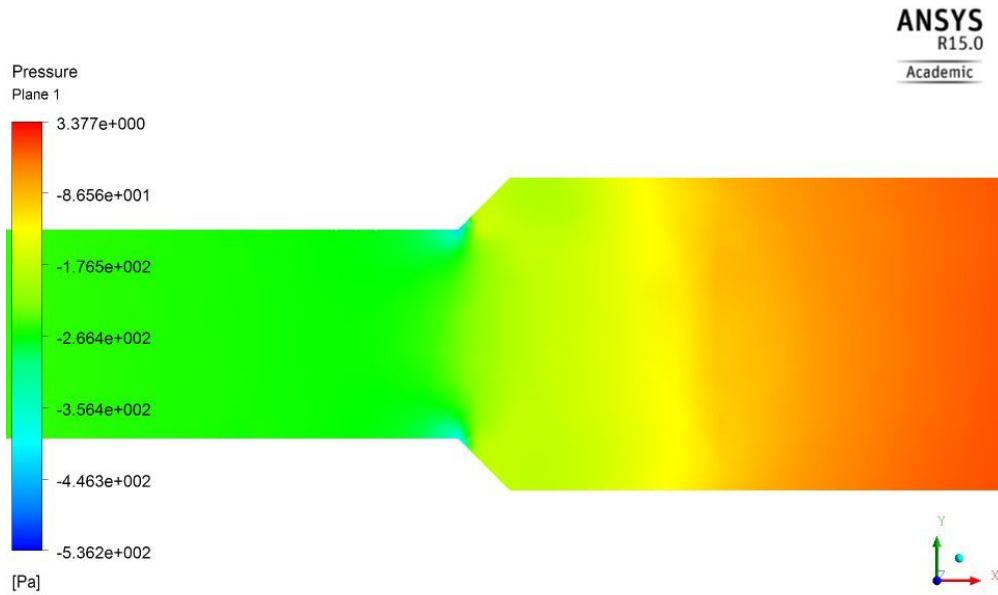
Obr. 166 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 37

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 se od sebe nejméně liší varianty s použitím $k-\epsilon$ a RNG modelu.



Obr. 167 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 37 s $k-\omega$ modelem

Z Obr. 168 je očividné, že před a v místě kónické změny průřezu vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje.



Obr. 168 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 37 s $k-\omega$ modelem



Obr. 169 Celková ztrátová výška - var. 37

Jak můžeme vidět na Obr. 169, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 15,6%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 15,7 %. Turbulentní modely $k-\epsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.

Varianta 38

V osmatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,150$ m, $D_2 = 0,300$ m a délka kónické části $L_3 = 0,075$ m. V následující tabulce (Tab. 51) jsou

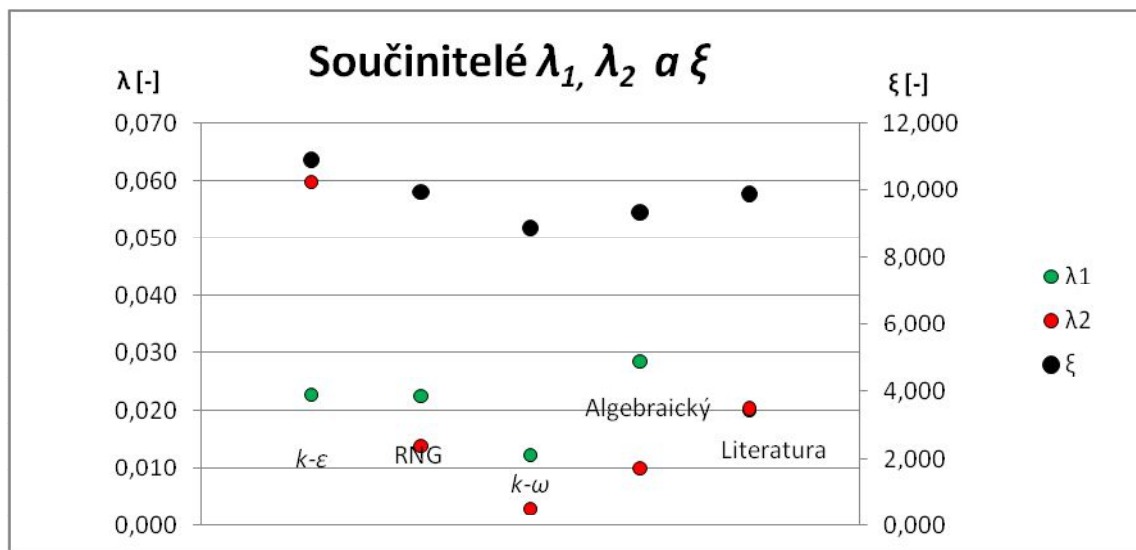
uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 38.

Tab. 51 Výsledky - var. 38

38	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	10,9058	9,9587	8,8997	9,3522	9,9000
λ_1	0,0229	0,0227	0,0124	0,0286	0,0201
λ_2	0,0598	0,0139	0,0030	0,0100	0,0205
h_m	0,0379	0,0380	0,0312	0,0222	0,0315
h_{t1}	0,0083	0,0082	0,0046	0,0104	0,0075
h_{t2}	0,0008	0,0002	0,00004	0,0001	0,0002
h_{celk}	0,0469	0,0464	0,0358	0,0327	0,0393

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 24,1%.

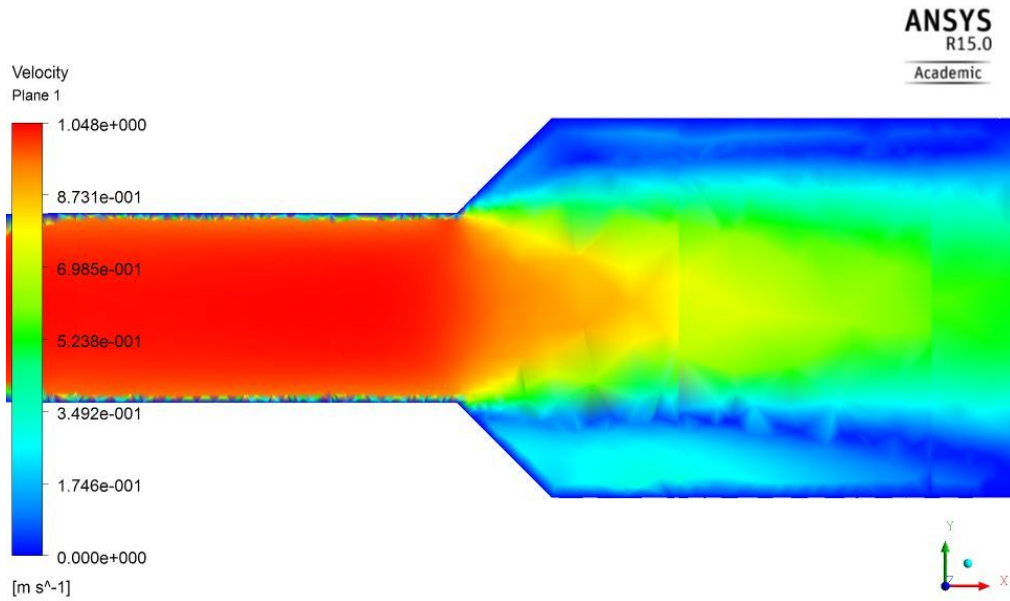
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 18,4%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 0,2%.



Obr. 170 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 38

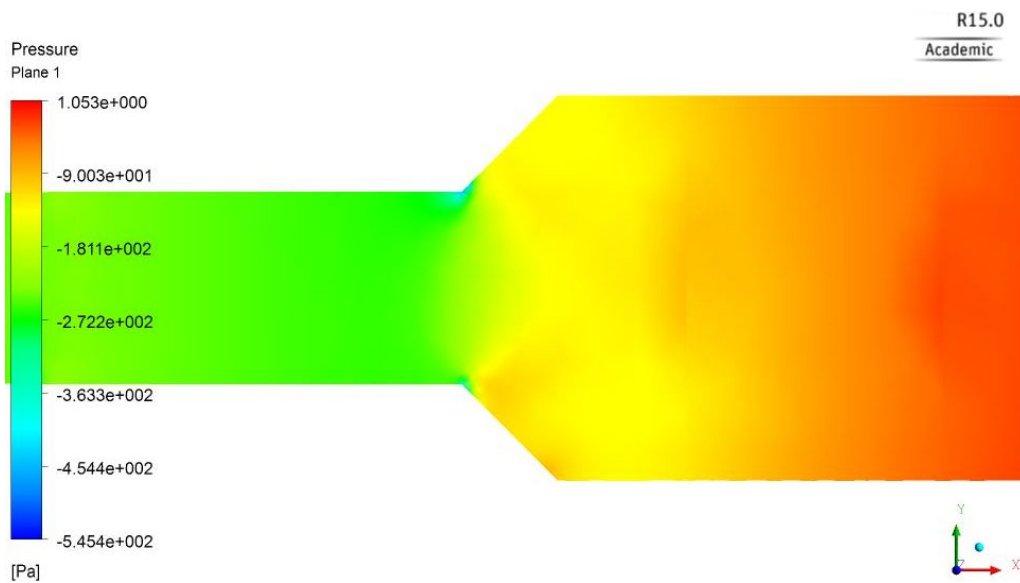
Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 dostáváme velice rozdílné výsledky.

Na Obr. 171 můžeme vidět rozložení rychlosti v místě kónického rozšíření. V místě přechodu úzcí části do kónické nám vzniká víření kapaliny.



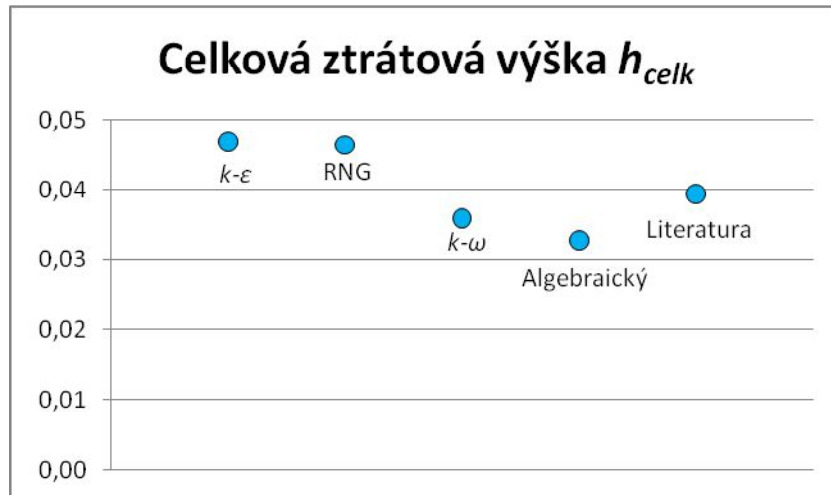
Obr. 171 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 38 s algebraickým modelem

Z Obr. 172 je očividné, že před a v místě kónické změny průřezu vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje. Největší podtlak vzniká v místě přechodu užší části do části kónické.



Obr. 172 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 38 s algebraickým modelem

Jak můžeme vidět na Obr. 173, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 24,1%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 8,7%. Turbulentní modely $k-\varepsilon$ a RNG vykazují velice podobné výsledky.



Obr. 173 Celková ztrátová výška - var. 38

Varianta 39

V devětatřicáté variantě bylo vymodelováno potrubí o průměru $D_1 = 0,200$ m, $D_2 = 0,250$ m a délka kónické části $L_3 = 0,025$ m. V následující tabulce (Tab. 52) jsou uvedeny hodnoty ztrátových součinitelů a vypočítané celkové ztráty jednotlivých turbulentních modelů pro variantu 39.

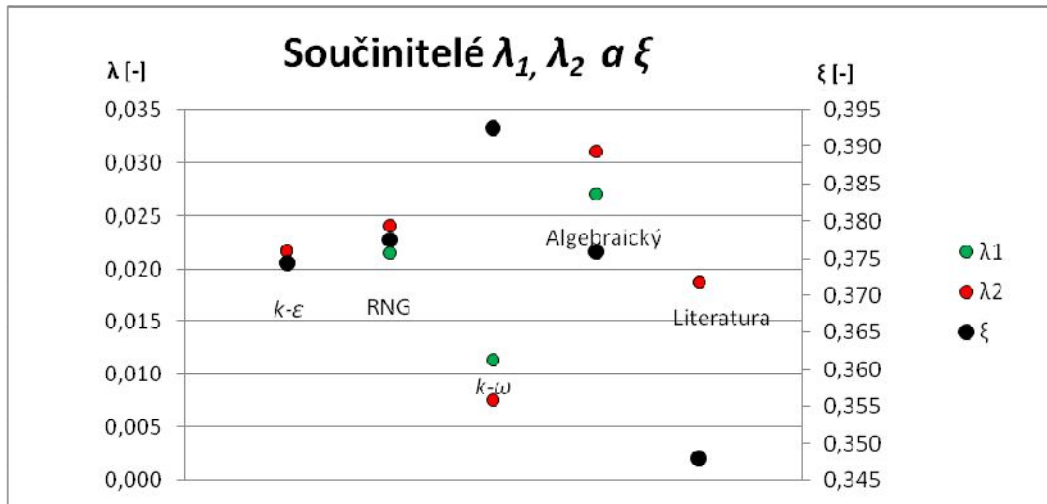
Tab. 52 Výsledky - var. 39

39	$k-\varepsilon$	RNG	$k-\omega$	Algebraický	Literatura
ξ	0,3745	0,3776	0,3927	0,3760	0,3480
λ_1	0,0218	0,0216	0,0115	0,0270	0,0188
λ_2	0,0217	0,0241	0,0076	0,0310	0,0187
h_m	0,0059	0,0059	0,0065	0,0066	0,0073
h_{t1}	0,0059	0,0059	0,0032	0,0074	0,0053
h_{t2}	0,0015	0,0017	0,0006	0,0024	0,0017
h_{celk}	0,0133	0,0135	0,0102	0,0164	0,0143

Na první pohled je zřejmé, že algebraický model se od ostatních výsledků ve všech hodnotách odlišuje a celková ztrátová výška se liší přibližně o 24,9%.

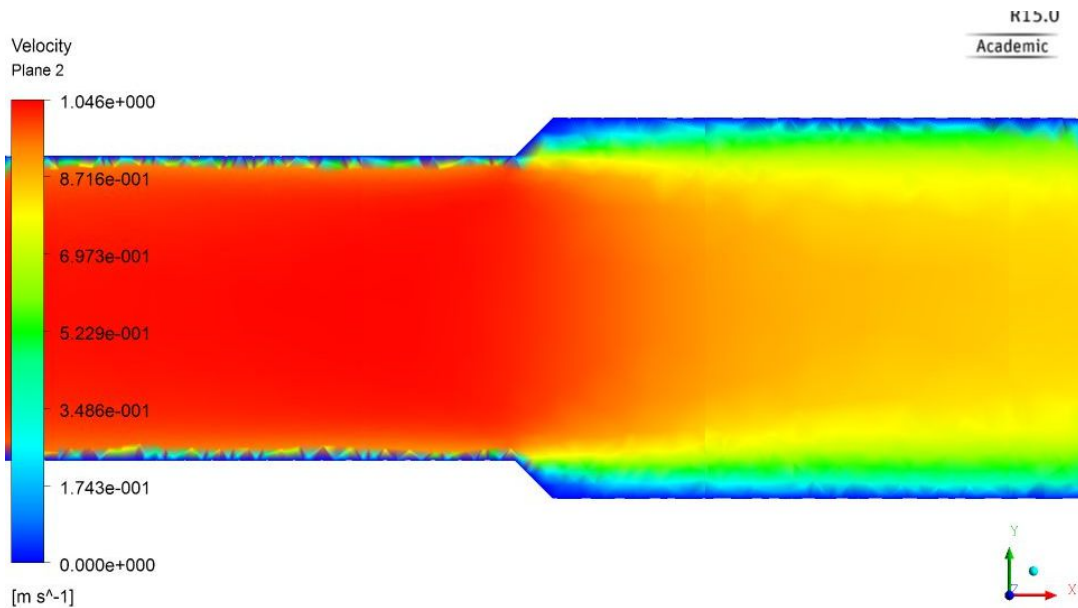
V případě výpočtu součinitele místní ztráty ξ vzniká největší rozdíl u modelů $k-\varepsilon$ a $k-\omega$, kde se hodnoty liší o 4,6%. Průměrná hodnota z turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle vztahů uváděných v literatuře se liší o 8,8%.

Při výpočtech součinitelů tření λ_1 a λ_2 dostáváme velice rozdílné výsledky.



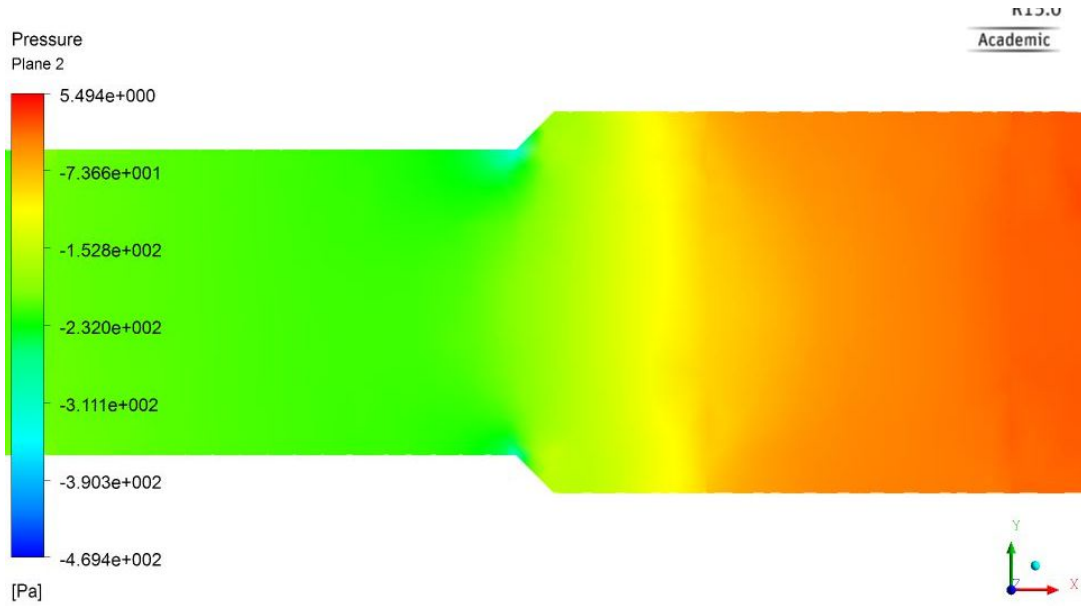
Obr. 174 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 39

Na Obr. 175 můžeme vidět rozložení rychlosti v místě kónického rozšíření. V místě přechodu úzčí části do kónické nám vzniká víření kapaliny.

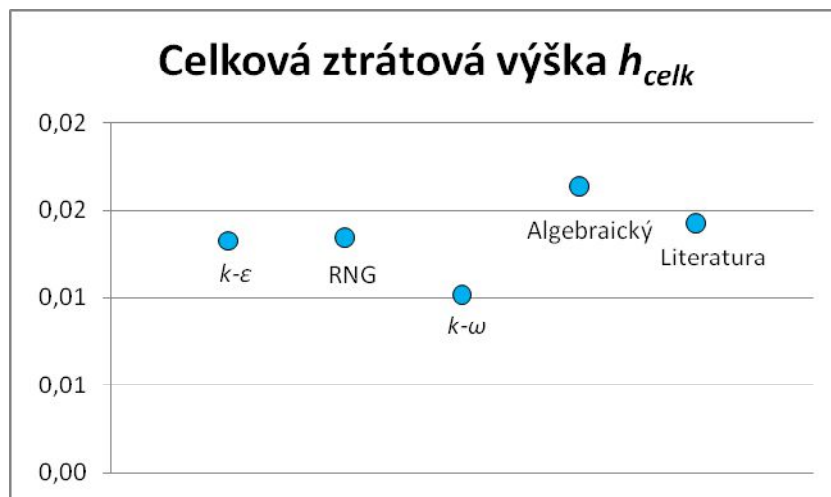


Obr. 175 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 39 s $k-\varepsilon$ modelem

Z Obr. 176 je očividné, že před a v místě kónické změny průřezu vzniká podtlak, který se za změnou průřezu zmenšuje. Největší podtlak vzniká v místě přechodu užší části do části kónické.



Obr. 176 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 39 s $k-\varepsilon$ modelem



Obr. 177 Celková ztrátová výška - var. 39

Jak můžeme vidět na Obr. 177, hodnota celkové ztráty při zadání algebraického modelu se liší od ostatních vypočítaných hodnot přibližně o 24,9%. Průměr hodnot ostatních použitých turbulentních modelů (kromě algebraického) se od hodnoty vypočítané dle literatury liší o 13,7 %.

7 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

V následující kapitole budu pracovat s dosaženými výsledky. Nejprve porovnáám jednotlivé turbulentní modely pro jednotlivé varianty. Následně budu porovnávat modely $k-\varepsilon$, RNG a algebraický model vzhledem k modelování ve 2D a 3D. Jako poslední budu porovnávat, jak velké rozdíly vznikají při použití náhlé a kónické změny průřezu.

7.1 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TURBULENTNÍCH MODELŮ

7.1.1 Modely ve 2D

Při modelování v programu Ansys Flotran, dávaly turbulentní modely podobné výsledky, vyjma modelu algebraického. U tohoto modelu vycházely téměř ve všech variantách ztrátový součinitel i ztrátové výšky jako vyšší hodnoty, než u zbylých variant.

Minimální hodnota rozdílu algebraického modelu od zbylých počítaných turbulentních modelů v programu Ansys Flotran je 15% a to u varianty 10 - náhlé rozšíření z průměru $D_1 = 0,050$ m na $D_2 = 0,080$ m. Naopak maximální hodnota rozdílu algebraického modelu od zbylých počítaných turbulentních modelů v programu Ansys Flotran je 77,7% a to u varianty 5 - kónické zúžení z průměru $D_1 = 0,080$ m na $D_2 = 0,050$ m. Průměrná hodnota rozdílu algebraického modelu od průměrné hodnoty ostatních turbulentních modelů je 57,3%.

Kvůli více než 50% rozdílu oproti zbylým turbulentním modelům bych algebraický model nedoporučovala pro výpočet. Jeho výhoda je krátký výpočetní čas.

Model SZL nedával stabilní výsledky. Jednou se jeho hodnoty pohybovaly mezi nejvyššími, poté zase mezi nejnižšími.

Modely GIR a NKE dávaly vyšší výsledky než ostatní modely, ale ne v tak markantních rozdílech, jako u modelu algebraického.

Modely $k-\varepsilon$ a RNG dávají velice podobné výsledky. Při porovnání $k-\varepsilon$ a RNG modelu dává RNG model nepatrně nižší hodnoty.

Při porovnání rozdílu průměrných hodnot turbulentních modelů a hodnot z literatury, byl nejnižší rozdíl 1,4% u varianty 18, kónického rozšíření z průměru $D_1 = 0,150$ m na $D_2 = 0,300$ m. Při porovnání rozdílu průměrných hodnot turbulentních modelů a hodnot z literatury, byl naopak nejvyšší rozdíl 25,6% u varianty 14, náhlého rozšíření z průměru $D_1 = 0,200$ m na $D_2 = 0,250$ m.

7.1.2 Modely ve 3D

Při modelování v programu Ansys Workbench, resp. Ansys CFX byly použity 4 turbulentní modely.

Turbulentní model $k-\omega$ dával téměř ve všech variantách nižší hodnoty celkové ztrátové výšky, než zbylé použité turbulentní modely a výpočty dle hodnot z literatury.

Algebraický turbulentní model, stejně jako u modelování ve 2D, dával hodnoty ztrátových součinitelů a celkové ztrátové výšky vyšší než zbylé hodnoty.

Minimální hodnota rozdílu algebraického modelu od zbylých počítaných turbulentních modelů v programu Ansys Workbench je 8,6% a to u varianty 24 - náhlé zúžení z průměru $D_1 = 0,250$ m na $D_2 = 0,200$ m. Naopak maximální hodnota rozdílu algebraického modelu od zbylých počítaných turbulentních modelů v programu Ansys Workbench je 39,5% a to u varianty 28 – kónické zúžení z průměru $D_1 = 0,300$ m na $D_2 = 0,150$ m. Průměrná hodnota rozdílu algebraického modelu od průměrné hodnoty ostatních turbulentních modelů je 26,1%.

Kvůli více než 25% rozdílu oproti zbylým turbulentním modelům bych algebraický model nedoporučovala pro výpočet. Jeho výhoda je krátký výpočetní čas.

Modely $k-\varepsilon$ a RNG dávaly velmi podobné výsledky, které se ve většině variant lišily jen v řádu maximálně 2-3%.

Při porovnání rozdílu průměrných hodnot turbulentních modelů a hodnot z literatury, byl nejnižší rozdíl 0,3% u varianty 22, náhlého zúžení z průměru $D_1 = 0,150$ m na $D_2 = 0,100$ m. Při porovnání rozdílu průměrných hodnot turbulentních modelů a hodnot z literatury, byl naopak nejvyšší rozdíl 24,9% u varianty 33, náhlého rozšíření z průměru $D_1 = 0,150$ m na $D_2 = 0,300$ m.

7.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ 2D A 3D MODELOVÁNÍ

U modelu $k-\varepsilon$ se hodnoty ztrátového součinitele ζ liší u jednotlivých variant dokonce i v řádu desetin. Nicméně hodnota místní ztráty h_m se u jednotlivých variant při stejných průměrech potrubí liší pouze v řádech setin, stejně jako celková ztrátová výška h_{celk} .

Turbulentní model RNG dává podobné hodnoty jako model $k-\varepsilon$, stejně tak jsou podobné rozdíly i mezi 2D a 3D modelováním. Hodnoty ztrátového součinitele ζ liší u jednotlivých variant dokonce i v řádu desetin. Hodnota místní ztráty h_m se téměř u všech jednotlivých variant při stejných průměrech potrubí liší pouze v řádech setin, stejně jako celková ztrátová výška h_{celk} .

U algebraického turbulentního modelu dávají hodnoty u jednotlivých variant u 2D a 3D modelování rozdíly v řádu desetin. Proto bych nedoporučovala tento turbulentní model pro výpočty.

7.3 POROVNÁNÍ NÁHLÉ A KÓNICKÉ ZMĚNY PRŮŘEZU

Vzhledem k získaným hodnotám z modelování potrubí ve 2D a 3D, mohu porovnat výsledky celkové ztrátové výšky h_{celk} . Vzhledem k velice odlišným výsledkům při použití algebraického turbulentního modelu od zbylých turbulentních modelů, nebyly jeho hodnoty v této kapitole uvažovány.

7.3.1 Zúžení

V Tab. 53 jsou uvedeny hodnoty celkové ztrátové výšky h_{celk} pro jednotlivé průměry potrubí. Jak je z tabulky patrné, hodnoty pro náhlé zúžení se u variant s poměrem zúžení menším než $n = 0,8$ (viz Tab. 15) pohybují v hodnotách desetín. U poměru zúžení $n = 0,8$ vycházejí hodnoty h_{celk} v řádu setin.

Jak je z Tab. 53 patrné, při přechodu náhlou změnou průřezu je ztrátová hodnota h_{celk} vyšší oproti kónické změně průřezu. Největší změna hodnoty je patrná u potrubí s profily 0,300 – 0,150, což je poměr zúžení $n = 0,5$.

Pro zužující se potrubí bych tedy dle získaných hodnot doporučila přechod kónickým zúžením, která dává nižší hodnoty ztrátové výšky h_{celk} .

Tab. 53 Celková ztrátová výška h_{celk} pro náhlé a kónické zúžení

Průměry potrubí	Náhlé zúžení	Kónické zúžení
0,080 - 0,050	0,290	0,235
0,125 - 0,100	0,058	0,053
0,150 - 0,100	0,144	0,105
0,300 - 0,150	0,412	0,183
0,250 - 0,200	0,048	0,036

7.3.2 Rozšíření

V Tab. 54 jsou uvedeny hodnoty celkové ztrátové výšky h_{celk} pro jednotlivé průměry potrubí. Jak je z Tab. 54 patrné, při přechodu náhlou změnou průřezu je ztrátová hodnota h_{celk} nižší v řádu tisícin oproti kónické změně průřezu. Pouze v případě rozšíření potrubí s profily 0,150 – 0,300 a 0,200 – 0,250 jsou nižší hodnoty pro přechod kónický.

Tab. 54 Celková ztrátová výška potrubí h_{celk} pro náhlé a kónické rozšíření

Průměry potrubí	Náhlé rozšíření	Kónické rozšíření
0,050 - 0,080	0,044	0,045
0,100 - 0,125	0,022	0,023
0,100 - 0,150	0,028	0,029
0,150 - 0,300	0,044	0,041
0,200 - 0,250	0,016	0,015

8 ZÁVĚR

Pro numerické modelování ve 2D i 3D bych nedoporučovala algebraický turbulentní model. Jeho výhodou je kratší výpočetní čas, ale ve většině případů dával velice rozdílné výsledky. Ve 2D modelování se hodnoty lišily o více jak 50% od ostatních turbulentních modelů. Ve 3D modelování to bylo o více jak 26% oproti ostatním turbulentním modelům.

Při modelování ve 2D model SZL nedával stabilní výsledky, proto bych ho pro výpočty také nedoporučovala. Jednou se jeho hodnoty pohybovaly mezi nejvyššími, poté zase mezi nejnižšími. Modely GIR a NKE dávaly při modelování ve 2D vyšší výsledky než ostatní modely, ale ne v tak markantních rozdílech, jako u modelu algebraického. Při modelování ve 2D modely $k-\varepsilon$ a RNG dávají velice podobné výsledky. Při porovnání $k-\varepsilon$ a RNG modelu dává RNG model nepatrně nižší hodnoty.

Turbulentní modely $k-\varepsilon$, RNG, GIR a NKE bych pro numerické modelování ve 2D doporučovala, protože tyto modely dávaly stabilní výsledky.

Při numerickém modelování ve 3D dával turbulentní model $k-\omega$ téměř ve všech variantách nižší hodnoty celkové ztrátové výšky, než zbylé použité turbulentní modely a výpočty dle hodnot z literatury. Modely $k-\varepsilon$ a RNG dávaly při modelování ve 3D velmi podobné výsledky, které se od sebe ve většině variant lišily jen v řádu maximálně 2-3%. Tyto hodnoty se nejvíce přibližovaly hodnotám spočítaným dle vzorců uváděných v literatuře.

Turbulentní modely $k-\varepsilon$, RNG a $k-\omega$ bych pro numerické modelování ve 3D doporučovala, protože tyto modely dávaly stabilní výsledky.

Při porovnání rozdílu průměrných hodnot celkové ztrátové výšky turbulentních modelů a hodnot z literatury, byl u 2D modelování průměrný rozdíl 11,0%. U 3D modelování byla tato hodnota 9,34%. Myslím si, že to jsou přijatelné výsledky vzhledem k tomu, že zde mohou být rozdíly výsledků mezi hodnotami vypočítanými dle vzorců uváděných v literatuře a mém modelování způsobeny nedostatečným počtem iterací, hrubší sítí v místech vírů, vymodelování kratší délky potrubí za změnou průřezu nebo výběrem turbulentního modelu.

Myslím si, že hodnoty vypočtené klasickou metodou dle vzorců z literatury, mohou být považovány za přesnější, neboť součinitelé ztrát místních a ztrát třením po délce byly ověřeny řadou měření, a tudíž experimentálně prokázány.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JANDORA, J., STARA, V., a STARÝ, M. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011.
- [2] Proudění. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Proud%C4%9Bn%C3%AD>
- [3] HY2V-Hydraulika potrubí. [online]. [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubu.pdf
- [4] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: PC-DIR, spol. s r.o., 1997.
- [5] JANDORA, Jan. *Matematické modelování ve vodním hospodářství*, VUT v Brně, 2008.
- [6] CHANG, H.K. a MORTOLA, J.P. *Fluid dynamic factors in tracheal pressure measurement*. Canada: American Physiological Society, 1981.
- [7] Algebraic turbulence models. *CFD Online* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: http://www.cfd-online.com/Wiki/Algebraic_turbulence_models .
- [8] Standard k-epsilon model. *CFD Online* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: http://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model .
- [9] RNG k-epsilon model. *CFD Online* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: http://www.cfd-online.com/Wiki/RNG_k-epsilon_model .
- [10] K-omega turbulence model. *CFD Online* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/K%E2%80%93omega_turbulence_model .
- [11] ANSYS ICEM CFD 2.1, 2016. *Tutorial manual*.
- [12] МОСТКОВ, М. А. 1954. Гидравлический справочник. Москва

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Součinitel Ψ pro výpočet ztráty kónickým rozšířením průřezu [1]	8
Tab. 2 Součinitel ztráty kónickým zúžením průřezu ξ_{zk2}	8
Tab. 3 Koeficienty standardního modelu	16
Tab. 4 Koeficienty RNG $k-\varepsilon$ modelu	17
Tab. 5 Koeficienty standardního (Wilcoxova) $k-\omega$ modelu	18
Tab. 6 Koeficienty NKE modelu	19
Tab. 7 Koeficienty GIR modelu	19
Tab. 8 Koeficienty SZL modelu	21
Tab. 9 Použité turbulentní modely 2D	22
Tab. 10 Náhlé zúžení-průměry potrubí a jejich poměry	25
Tab. 11 Výsledky - var. 1	26
Tab. 12 Výsledky - var. 2	28
Tab. 13 Výsledky - var. 3	31
Tab. 14 Výsledky - var. 4	33
Tab. 15 Kónické zúžení-průměry potrubí a jejich poměry	36
Tab. 16 Výsledky - var. 5	37
Tab. 17 Výsledky - var. 6	39
Tab. 18 Výsledky - var. 7	42
Tab. 19 Výsledky - var. 8	45
Tab. 20 Výsledky - var. 9	47
Tab. 21 Náhlé rozšíření-průměry potrubí	50
Tab. 22 Výsledky - var. 10	51
Tab. 23 Výsledky - var. 11	53
Tab. 24 Výsledky - var. 12	55
Tab. 25 Výsledky - var. 13	57
Tab. 26 Výsledky - var. 14	60
Tab. 27 Kónické rozšíření-průměry potrubí	63
Tab. 28 Výsledky - var. 15	63
Tab. 29 Výsledky - var. 16	66
Tab. 30 Výsledky - var. 17	68
Tab. 31 Výsledky - var. 18	70
Tab. 32 Výsledky - var. 19	73
Tab. 33 Výsledky - var. 20	83

Tab. 34 Výsledky - var. 21	85
Tab. 35 Výsledky - var. 22	88
Tab. 36 Výsledky - var. 23	90
Tab. 37 Výsledky - var. 24	93
Tab. 38 Výsledky - var. 25	96
Tab. 39 Výsledky - var. 26	99
Tab. 40 Výsledky - var. 27	101
Tab. 41 Výsledky - var. 28	104
Tab. 42 Výsledky - var. 29	106
Tab. 43 Výsledky - var. 30	109
Tab. 44 Výsledky - var. 31	112
Tab. 45 Výsledky - var. 32	114
Tab. 46 Výsledky - var. 33	117
Tab. 47 Výsledky - var. 34	119
Tab. 48 Výsledky - var. 35	122
Tab. 49 Výsledky - var. 36	125
Tab. 50 Výsledky - var. 37	127
Tab. 51 Výsledky - var. 38	130
Tab. 52 Výsledky - var. 39	132
Tab. 53 Celková ztrátová výška h_{celk} pro náhlé a kónické zúžení	137
Tab. 54 Celková ztrátová výška potrubí h_{celk} pro náhlé a kónické rozšíření	137

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Náhlé rozšíření [1]	7
Obr. 2 Změny průřezu potrubí [1]	9
Obr. 3 Schéma řešené oblasti [4]	22
Obr. 4 Schéma náhradní oblasti.....	23
Obr. 5 Dělení náhradní oblasti na konečné prvky	24
Obr. 6 Realizace okrajových podmínek	24
Obr. 7 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 1	26
Obr. 8 Rozložení rychlostí var. 1 s modelem GIR	27
Obr. 9 Rozložení tlaků var. 1 s modelem GIR	27
Obr. 10 Celková ztrátová výška - var. 1.....	27
Obr. 11 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 2.....	29
Obr. 12 Rozložení rychlostí var. 2 s modelem NKE	29
Obr. 13 Rozložení tlaků var. 2 s modelem NKE	29
Obr. 14 Celková ztrátová výška - var. 2.....	30
Obr. 15 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 3.....	31
Obr. 16 Rozložení rychlostí var. 3 s modelem RNG	32
Obr. 17 Rozložení tlaků var. 3 s modelem RNG	32
Obr. 18 Celková ztrátová výška - var. 3.....	33
Obr. 19 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 4.....	34
Obr. 20 Rozložení rychlostí var. 4 s modelem SZL	34
Obr. 21 Rozložení tlaků var. 4 s modelem SZL	35
Obr. 22 Celková ztrátová výška - var. 4.....	35
Obr. 23 Schéma kónického zúžení	36
Obr. 24 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 5.....	37
Obr. 25 Rozložení rychlostí var. 5 s $k-\varepsilon$ modelem.....	38
Obr. 26 Rozložení tlaků var. 5 s $k-\varepsilon$ modelem	38
Obr. 27 Celková ztrátová výška - var. 5.....	39
Obr. 28 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 6.....	40
Obr. 29 Rozložení rychlostí var. 6 s NKE modelem	40
Obr. 30 Rozložení tlaků var. 6 s NKE modelem	41
Obr. 31 Celková ztrátová výška - var. 6.....	41
Obr. 32 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 7.....	43
Obr. 33 Rozložení rychlostí var. 7 s $k-\varepsilon$ modelem.....	43

Obr. 34 Rozložení tlaků var. 7 s $k-\varepsilon$ modelem	44
Obr. 35 Celková ztrátová výška - var. 7.....	44
Obr. 36 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 8.....	45
Obr. 37 Rozložení rychlostí var. 8 s RNG modelem	46
Obr. 38 Rozložení tlaků var. 8 s RNG modelem.....	46
Obr. 39 Celková ztrátová výška - var. 8.....	47
Obr. 40 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 9.....	48
Obr. 41 Rozložení rychlostí var. 9 s NKE modelem	48
Obr. 42 Rozložení tlaků var. 9 s NKE modelem	49
Obr. 43 Celková ztrátová výška - var. 9.....	49
Obr. 44 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 10.....	51
Obr. 45 Rozložení rychlostí var. 10 s GIR modelem.....	52
Obr. 46 Rozložení tlaků var. 10 s GIR modelem	52
Obr. 47 Celková ztrátová výška - var. 10.....	52
Obr. 48 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 11.....	54
Obr. 49 Rozložení rychlostí var. 11 s GIR modelem.....	54
Obr. 50 Rozložení tlaků var. 11 s GIR modelem	54
Obr. 51 Celková ztrátová výška - var. 11.....	55
Obr. 52 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 12.....	56
Obr. 53 Rozložení rychlostí var. 12 se SZL modelem.....	56
Obr. 54 Rozložení tlaků var. 12 se SZL modelem	56
Obr. 55 Celková ztrátová výška - var. 12.....	57
Obr. 56 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 13.....	58
Obr. 57 Rozložení rychlostí var. 13 s $k-\varepsilon$ modelem.....	58
Obr. 58 Rozložení tlaků var. 13 s $k-\varepsilon$ modelem.....	58
Obr. 59 Celková ztrátová výška - var. 13.....	59
Obr. 60 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 14.....	60
Obr. 61 Rozložení rychlostí var. 14 s RNG modelem	61
Obr. 62 Rozložení tlaků var. 14 s RNG modelem.....	61
Obr. 63 Celková ztrátová výška - var. 14.....	62
Obr. 64 Schéma kónického rozšíření	63
Obr. 65 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 15.....	64
Obr. 66 Rozložení rychlostí var. 15 s $k-\varepsilon$ modelem.....	64
Obr. 67 Rozložení tlaků var. 15 s $k-\varepsilon$ modelem.....	64
Obr. 68 Celková ztrátová výška - var. 15.....	65

Obr. 69 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 16.....	66
Obr. 70 Rozložení rychlostí var. 16 s GIR modelem.....	67
Obr. 71 Rozložení tlaků var. 16 s GIR modelem	67
Obr. 72 Celková ztrátová výška - var. 16.....	67
Obr. 73 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 17.....	69
Obr. 74 Rozložení rychlostí var. 17 se SZL modelem.....	69
Obr. 75 Rozložení tlaků var. 17 se SZL modelem	69
Obr. 76 Celková ztrátová výška - var. 17.....	70
Obr. 77 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 18.....	71
Obr. 78 Rozložení rychlostí var. 18 se SZL modelem.....	71
Obr. 79 Rozložení tlaků var. 18 se SZL modelem	72
Obr. 80 Celková ztrátová výška - var. 18.....	72
Obr. 81 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 19.....	73
Obr. 82 Rozložení rychlostí var. 19 se SZL modelem.....	74
Obr. 83 Rozložení tlaků var. 19 se SZL modelem	74
Obr. 84 Celková ztrátová výška - var. 19.....	75
Obr. 85 Tvorba geometrie	76
Obr. 86 Příkaz <i>Revolve</i>	77
Obr. 87 Potrubí ve 3D	77
Obr. 88 Výpočtová síť.....	78
Obr. 89 Detail zhuštění výpočtové sítě	78
Obr. 90 Okrajová podmínka - vtok.....	79
Obr. 91 Okrajová podmínka - výtok.....	79
Obr. 92 Okrajová podmínka - stěna.....	80
Obr. 93 Dostupné turbulentní modely v programu Ansys Workbench	80
Obr. 94 Průběh výpočtu	81
Obr. 95 Řez potrubím kónické zúžení – rychlost v místě přechodu z kónické části do části přímé	82
Obr. 96 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 20.....	83
Obr. 97 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 20 s $k-\varepsilon$ modelem.....	84
Obr. 98 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 20 s $k-\varepsilon$ modelem.....	84
Obr. 99 Celková ztrátová výška - var. 20.....	85
Obr. 100 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 21	86
Obr. 101 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 21 s RNG modelem.....	86
Obr. 102 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 21 s RNG modelem	87

Obr. 103 Celková ztrátová výška - var. 21.....	87
Obr. 104 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 22.....	88
Obr. 105 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 22 s $k-\omega$ modelem.....	89
Obr. 106 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 22 s $k-\omega$ modelem.....	89
Obr. 107 Celková ztrátová výška - var. 22.....	90
Obr. 108 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 23.....	91
Obr. 109 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 23 s algebraickým modelem.....	91
Obr. 110 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 23 s algebraickým modelem	92
Obr. 111 Celková ztrátová výška - var. 23.....	92
Obr. 112 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 24.....	93
Obr. 113 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 24 s $k-\varepsilon$ modelem.....	94
Obr. 114 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 24 s $k-\varepsilon$ modelem.....	94
Obr. 115 Celková ztrátová výška - var. 24.....	95
Obr. 116 Schéma kónického zúžení.....	96
Obr. 117 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 25.....	97
Obr. 118 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 25 s $k-\varepsilon$ modelem.....	97
Obr. 119 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 25 s $k-\varepsilon$ modelem.....	98
Obr. 120 Celková ztrátová výška - var. 25.....	98
Obr. 121 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 26.....	99
Obr. 122 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 26 s RNG modelem.....	100
Obr. 123 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 26 s RNG modelem	100
Obr. 124 Celková ztrátová výška - var. 26.....	101
Obr. 125 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 27.....	102
Obr. 126 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 27 s $k-\omega$ modelem.....	102
Obr. 127 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 27 s $k-\omega$ modelem.....	103
Obr. 128 Celková ztrátová výška - var. 27.....	103
Obr. 129 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 28.....	104
Obr. 130 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 28 s algebraickým modelem.....	105
Obr. 131 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 28 s algebraickým modelem	105
Obr. 132 Celková ztrátová výška - var. 28.....	106
Obr. 133 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 29.....	107
Obr. 134 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 29 s $k-\varepsilon$ modelem.....	107
Obr. 135 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 29 s $k-\varepsilon$ modelem.....	108
Obr. 136 Celková ztrátová výška - var. 29.....	108

Obr. 137 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 30.....	110
Obr. 138 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 30 s $k-\varepsilon$ modelem	110
Obr. 139 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 30 s $k-\varepsilon$ modelem.....	111
Obr. 140 Celková ztrátová výška - var. 30.....	111
Obr. 141 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 31.....	112
Obr. 142 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 31 s RNG modelem.....	113
Obr. 143 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 31 s RNG modelem	113
Obr. 144 Celková ztrátová výška - var. 31.....	114
Obr. 145 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 32.....	115
Obr. 146 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 32 s $k-\omega$ modelem.....	115
Obr. 147 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 32 s $k-\omega$ modelem.....	116
Obr. 148 Celková ztrátová výška - var. 32.....	116
Obr. 149 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 33.....	117
Obr. 150 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 33 s algebraickým modelem.....	118
Obr. 151 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 33 s algebraickým modelem	118
Obr. 152 Celková ztrátová výška - var. 33.....	119
Obr. 153 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 34.....	120
Obr. 154 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 34 s $k-\varepsilon$ modelem.....	120
Obr. 155 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 34 s $k-\varepsilon$ modelem.....	121
Obr. 156 Celková ztrátová výška - var. 34.....	121
Obr. 157 Schéma kónického rozšíření	122
Obr. 158 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 35.....	123
Obr. 159 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 35 s $k-\varepsilon$ modelem	123
Obr. 160 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 35 s $k-\varepsilon$ modelem.....	124
Obr. 161 Celková ztrátová výška - var. 35.....	124
Obr. 162 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 36.....	125
Obr. 163 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 36 s RNG modelem.....	126
Obr. 164 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 36 s RNG modelem	126
Obr. 165 Celková ztrátová výška - var. 36.....	127
Obr. 166 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 37.....	128
Obr. 167 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 37 s $k-\omega$ modelem.....	128
Obr. 168 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 37 s $k-\omega$ modelem.....	129
Obr. 169 Celková ztrátová výška - var. 37.....	129
Obr. 170 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 38.....	130
Obr. 171 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 38 s algebraickým modelem.....	131

Obr. 172 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 38 s algebraickým modelem	131
Obr. 173 Celková ztrátová výška - var. 38.....	132
Obr. 174 Součinitelé tření a místní ztráty – var. 39.....	133
Obr. 175 Řez potrubím - rozložení rychlostí varianty 39 s $k-\varepsilon$ modelem	133
Obr. 176 Řez potrubím - rozložení tlaků varianty 39 s $k-\varepsilon$ modelem.....	134
Obr. 177 Celková ztrátová výška - var. 39.....	134