



Flow Through Pipe, Fitting and Valve

۱ مقدمه

بزرگترین شبکه انتقال سیال در جهان از طریق خطوط لوله است. در طول انتقال سیالات از طریق لوله‌ها، چندین "اتصالات" در سیستم لوله کشی مانند زانویی^۱، اتصالات سه راهی^۲، کاهنده‌ها^۳، منبسط کننده‌ها^۴، خم‌ها^۵، کوپلینگ‌ها^۶، شیرها^۷ و غیره در سیستم لوله کشی استفاده می‌شود. پیچیدگی‌های جریان در اتصالات لوله به دلیل افت فشار است. در طراحی شبکه لوله کشی افت فشار با استفاده از ضریب تلفات یا روش طول معادل با استفاده از نمودارهای استاندارد برآورد می‌شود.

دینامیک سیالات محاسباتی^۸ ابزاری قابل اعتماد برای تخمین افت فشار و درک عوامل غیر ایده آل در اتصالات لوله است [۱].

۲ تشریح مسئله:

۲،۱ هدف:

هدف این پروژه، بررسی رفتار جریان، مقدار افت فشار و ضرایب افت فشار در لوله‌ی صاف، زانویی، پخش کننده مخروطی، اتصال سه راهی و شیر کنترلی در هندسه و شرایط مرزی متفاوت است.

۲/۲ معادلات حاکم بر حجم کنترل:

در دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات حرکت و پیوستگی به صورت تکراری برای دامنه مورد نظر با استفاده از شرایط مرزی مناسب حل می‌شوند. این معادلات پیوستگی و تکانه در شکل لحظه‌ای خود در زیر به ترتیب در معادلات (۲-۱) و (۲-۲) نشان داده شده است. این معادلات برای جریان تراکم ناپذیر با خواص ثابت است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + F_i \quad (2-2)$$

u_i بردار سرعت، P فشار و x_i بردار مکان، F_i بردار نیرو و ν لزجت سینماتیکی سیال است.

۲/۳ معادلات افت فشار

یک شبکه انتقال ممکن است تلفات جزئی زیادی داشته باشد. از آنجایی که همه با $v^2/(2g)$ مرتبط هستند، می‌توان آنها را به یک تلفات کل سیستم خلاصه کرد:

اگر لوله ثابت باشد، می‌توان آنها را در یک افت کل سیستم جمع کرد:

$$\Delta h_{tot} = h_f + \sum h_m = \frac{v^2}{2g} \left(\frac{fL}{D} + \sum k \right) \quad (2-3)$$

Elbow^۱
Tee Junction^۲
Reducer^۳
Expander^۴

Bend^۵
Coupling^۶
Valve^۷
Computational Fluid Dynamics^۸

h_f افت فشار اصلی و h_m افت فشار جزئی یا مکانی است. f ضریب اصطکاک داری (یا ضریب اصطکاک داری ویزباخ^۹) است. V سرعت متوسط سیال، L طول لوله، D قطر لوله و k ضریب افت است.

۲،۴ شرایط شبیه‌سازی

جدول ۱-۲. حالت‌های مختلف جریان عبوری از استوانه‌ای دایره‌ای و بیضی شکل

شماره پروژه	موعد تحویل	مدل جریان	هندسه (سه بعدی)	عدد رینولدز ورودی
۱	۱۰ فروردین	لایه‌ای و آشفته	لوله مستقیم	۵۰۰ ، ۱۰۰۰۰
۲	۳۱ فروردین	لایه‌ای و آشفته	زانویی (۲-۴-۶-۸)	۵۰۰ ، ۱۰۰۰۰
۳	۱۴ اردیبهشت	آشفته	پخش‌کننده مخروطی (۱۰ - ۲۰ - ۳۰ - ۴۰)	۱۰۰۰۰
۴	۲۱ اردیبهشت	آشفته	اتصال سه راهی طول هر راه ۵ متر قطر سه مقطع ۰.۱ متر	۱۰۰۰۰
۵	۵ تیر	آشفته	نازل همگرا-واگرا (۲ بعدی)	۴۲.۵

➤ هندسه‌ها و شرایط مرزی در سایت https://docs.google.com/spreadsheets/d/۱۰NyUSfKjmfBy۹r-JwnOkroO۱seTOitL۰-zAw۰_pFYyAY/edit?usp=drive_link

قرار دارند.

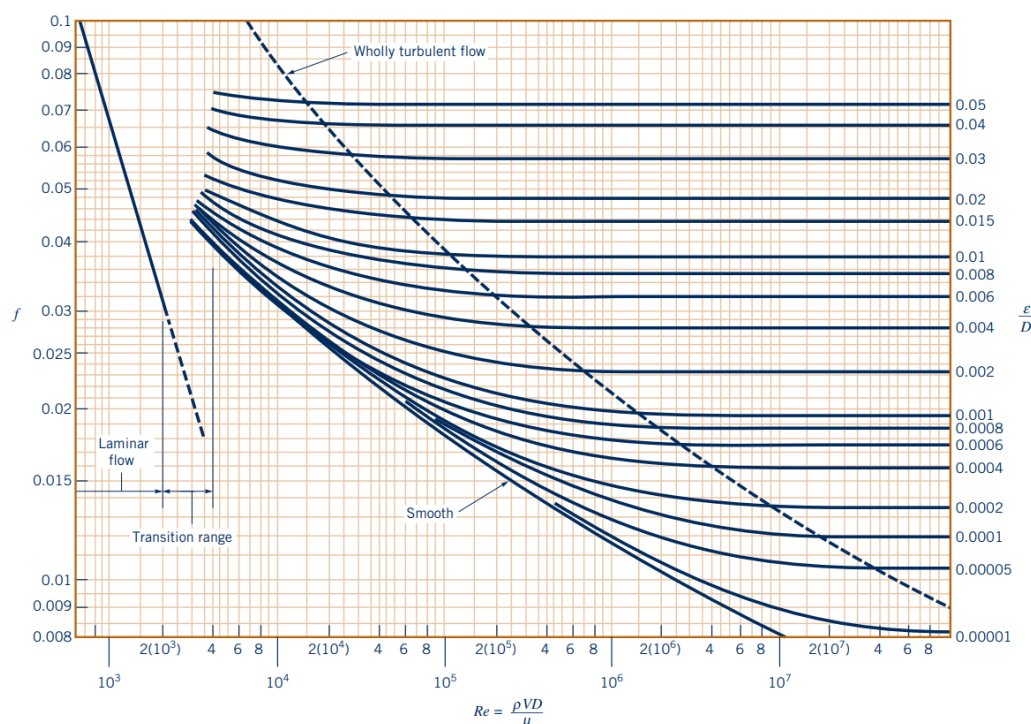
➤ در هندسه‌ی زانویی اعداد نسبت شعاع انحنا به قطر لوله می‌باشند.

➤ در هندسه‌ی پخش‌کننده اعداد زاویه انبساط پخش‌کننده (۲۰) می‌باشد.

۳ مدل‌سازی:

۳،۱ لوله‌ی گرد

لوله‌ی گرد ساده‌ترین هندسه‌ی انتقال جریان است. جهت تخمین افت فشار درون لوله از نمودار مودی^{۱۰} (دیاگرام مودی) استفاده می‌شود. نمودار مودی در محاسبه افت فشار یا افت هد ناشی از اصطکاک در جریان لوله استفاده می‌شود. به طور خاص، نمودار مودی برای یافتن ضریب اصطکاک برای جریان در یک لوله استفاده می‌شود.



نمودار ۳-۱ ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی برای لوله‌های گرد - نمودار مودی [۲]

ضریب اصطکاک در برابر عدد رینولدز و زبری نسبی در نمودار ۳-۱ رسم شده است. زبری نسبی به عنوان ارتفاع زبری لوله، ε ، تقسیم بر قطر داخلی، D ، عدد رینولدز، Re ، نسبت اثرات جریان سیال اینرسی به اثرات جریان لزج است. عدد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰ نشان دهنده جریان آشفته است، در حالی که عدد رینولدز کمتر از تقریباً ۲۰۰۰ نشان دهنده جریان آرام است. هنگامی که عدد رینولدز و زبری نسبی مشخص شد، ضریب اصطکاک را می‌توان از نمودار پیدا کرد و در معادله دارسی وایزباخ^{۱۱} (۳-۱) برای محاسبه افت فشار ناشی از اصطکاک استفاده کرد.

$$\Delta p = L \cdot f \cdot \frac{\rho v^2}{2D} \quad (3-1)$$

➤ Δp : کاهش فشار [Pa]

➤ ρ : چگالی سیال [kg/m^3]

اولین قدم در خواندن نمودار مودی، محاسبه زبری نسبی دیواره لوله است. زبری نسبی نسبت بی‌بعدی ارتفاع زبری، ε ، به قطر داخلی لوله، D ، است. هنگامی که زبری نسبی محاسبه شد، نزدیکترین منحنی زبری به نسبت ثابت را از محور سمت راست نمودار مودی بیابید. اگر زبری نسبی بین دو منحنی قرار گیرد، ممکن است نیاز به درون‌یابی باشد.

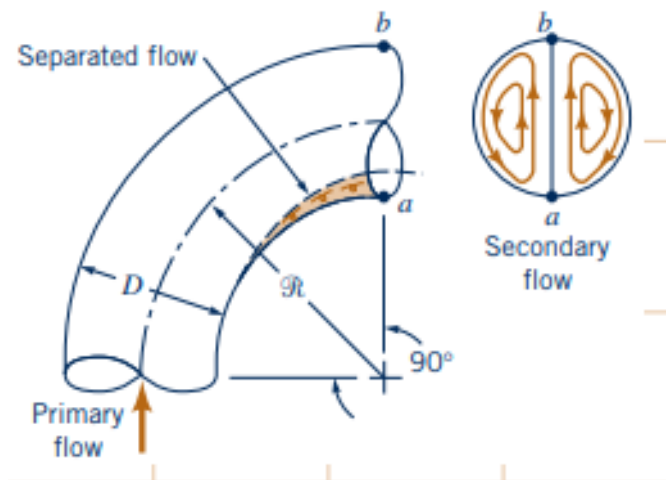
سپس عدد رینولدز را برای جریان محاسبه کنید. عدد رینولدز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3-2)$$

μ لزجت دینامیکی سیال است.

۳،۲ زانویی

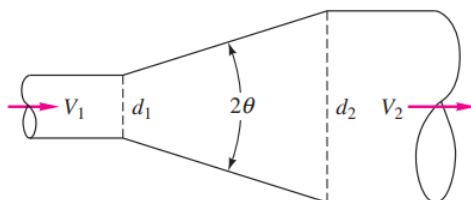
یک خم یا منحنی در یک لوله، به دلیل جدا شدن جریان در دیوارها و یک جریان ثانویه چرخشی ناشی از شتاب مرکزگرا، همیشه باعث تلفات بزرگتر از تلفات اصطکاک ساده مودی می‌شود. ضرایب تلفاتی تعریف می‌شوند که برای این خمش اضافی است. افت فشار مودی به دلیل طول محوری خم باید به طور جداگانه محاسبه شود. یعنی طول خم باید به طول لوله اضافه شود.



شکل ۳-۱ هندسه‌ی زانویی ۹۰ درجه [۲]

۳/۳ پخش‌کننده مخروطی

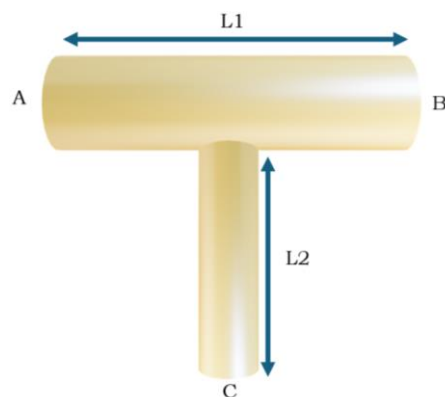
با ورود جریان به یک انبساط یا پخش‌کننده تدریجی، مانند هندسه مخروطی شکل ۳-۲ سرعت کاهش می‌یابد و فشار افزایش می‌یابد. اگر زاویه مخروط خیلی زیاد باشد، افت هد می‌تواند به دلیل جدایش جریان روی دیوارها زیاد باشد. یک لایه مرزی ورودی نازک‌تر، باعث تلفات کمی کم‌تر از یک جریان ورودی کاملاً توسعه یافته می‌شود. افت جریان ترکیبی از بازیابی فشار غیر ایده‌آل و اصطکاک دیواره است. ضریب تلفات وابسته به هد سرعت در لوله ورودی (مقطع کوچک)، زاویه مخروط و نسبت قطر پخش‌کننده است.



شکل ۳-۲ هندسه‌ی انبساط تدریجی یا پخش‌کننده مخروطی [۳]

۳/۴ اتصال سه راهی

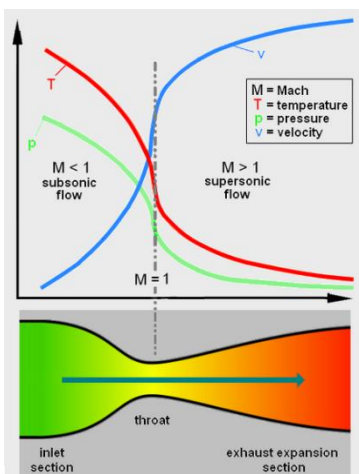
اتصال سه راهی یکی از رایج‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین بخش‌های هر شبکه لوله‌کشی است. اتصال سه راهی عمدتاً برای تجمع (همگرایی) جریان‌ها از بسیاری از لوله‌ها به یک لوله اصلی و برای توزیع (واگرایی) جریان از لوله اصلی به چندین لوله انشعاب استفاده می‌شود. اتصال سه راهی با سطوح جریان مختلف (A، B و C) در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. چهار ترکیب مختلف ورودی-خروجی برای جریان از طریق یک اتصال سه راهی امکان‌پذیر است؛ ترکیب متقارن (که در آن سطوح A و B به عنوان ورودی عمل می‌کنند و C تنها خروجی است)، ترکیب نامتقارن (که در آن سطوح B و C به عنوان ورودی و A تنها خروجی است)، تقسیم متقارن (که در آن سطح C تنها ورودی و A و B دو خروجی هستند) و تقسیم غیر متقارن (سطح B تنها ورودی است در حالی که A و C خروجی هستند).



شکل ۳-۳ هندسه‌ی اتصال سه راهی با سه مقطع (A,B,C)

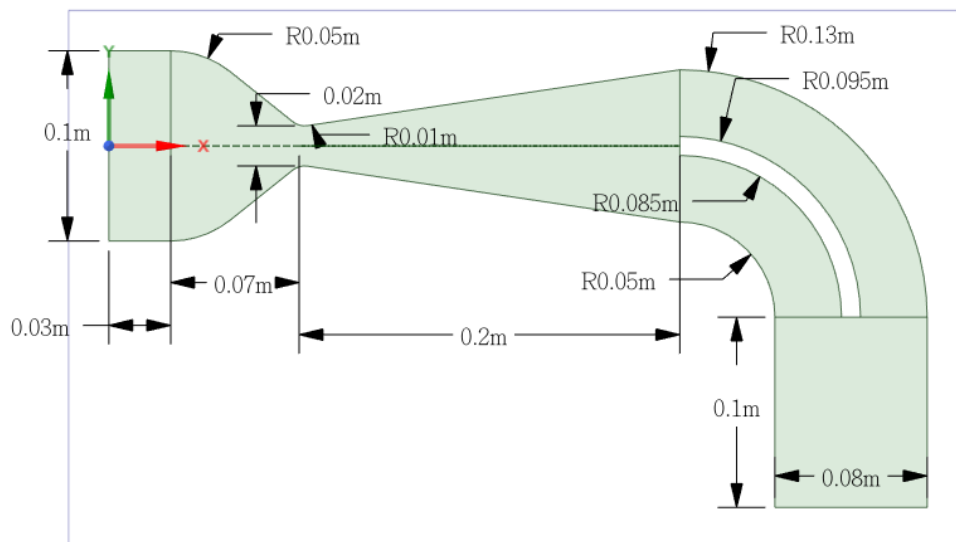
۳/۵ نازل همگرا - واگرا^{۱۲}

نازل همگرا-واگرا، یک جزء حیاتی در سیستم‌های پیشران مختلف از جمله رم‌جت‌ها، اسکرم جت‌ها و موشک‌ها است. هدف اصلی آن شتاب دادن یک سیال تراکم پذیر (معمولاً گاز) به سرعت‌های مافوق صوت در جهت محوری است (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ ساختار کلی نازل همگرا - واگرا و تغییرات دما، فشار و سرعت در راستای محوری

در این پروژه قصد بر رسیدن به سرعت مافوق صوت نیست، بلکه بررسی ساده‌ی تغییرات سرعت و فشار در راستای محوری است. در ادامه‌ی این نازل یک زانویی به همراه پره راهنما^{۱۳} قرار دارد. دامنه‌ی محاسباتی در شکل ۳-۵ آورده شده است.



شکل ۳-۵ دامنهی محاسباتی نازل همگرا - واگرا و زانویی به همراه پره راهنما

۴ خواسته‌ها

۴,۱ کلی

- ۱- با استفاده از یک حلگر حجم محدود، فرایند حل معادلات پایستگی جرم و تکانه خطی را برای جریان سه‌بعدی سیال تراکم‌ناپذیر طبق شرایط مرزی‌های تعیین شده برای هر یک از حالت‌های جریان پیاده‌سازی نمایید. حل با دقت مرتبه ۲ انجام شود.
- ۲- مطالعه شبکه را برای پروژه ۱ با استفاده از اختلاف فشار به صورت کیفی حداقل با ایجاد چهار سطح شبکه (یک مرتبه جریان آرام و یک مرتبه آشفته) مختلف اجرا نمایید. علاوه بر اختلاف فشار، در پروژه ۱ نمودار سرعت محوری در یک مقطع از لوله مورد بررسی قرار گیرند.
- ۳- در پروژه‌های ۳ تا ۵ در صورت پدید آمدن جدایش در هر شبیه‌سازی محل جدایش و اتصال مجدد را به صورت کیفی (بدون محاسبات) در تصویر مشخص کنید.
- ۴- شکل‌ها و نمودارهای خروجی باید واضح و دارای کیفیت مناسب باشند و برداشت خود را پیرامون فیزیک مسئله بیان کنید.
- ۵- گزارش پروژه باید در فرمت استاندارد شامل مواردی همچون چکیده، مقدمه، تشریح مسئله و ... باشد. گزارش، بایستی یک چکیده و مقدمه‌ی کلی داشته باشد و در هر پروژه به فرایند شبیه‌سازی، نتایج و بحث پیرامون نتایج حاصل پرداخته شود.
- ۶- تمام پروژه‌ها در یک فایل گزارش نوشته شوند و در هر موعود زمانی، گزارش بروزرسانی و ارسال شود. (جهت بهبود بخشیدن به گزارش تلاش می‌شود در هر مرحله بازخورد برای دانشجویان ارسال شود).
- ۷- در هر پروژه نتیجه‌گیری جدید نسبت به پروژه‌ی قبل ارائه شود (از کپی‌کردن نتایج پروژه‌ی قبل در پروژه‌ی جدید خودداری کنید).
- ۸- در صورتی که گزارش نهایی به فرم لاتک^{۱۴} باشد مقداری نمره امتیازی به گزارش تعلق می‌گیرد.
- ۹- فرایند پس‌پردازش نتایج شامل رسم کانتور فشار و سرعت در نرم‌افزار متلب^{۱۵} باشد. شکل‌ها در نرم‌افزار متلب با فرمت ^{۱۶}svg ذخیره شوند. در صورتی که گزارش با لاتک نوشته می‌شود از فرمت eps استفاده کنید. اگر تمایل به رسم در نرم‌افزار ندارید کانتورهای دریافتی از فلوئنت را گزارش کنید.
- ۱۰- نمودار خطوط جریان را به صورت سه بعدی از فلوئنت استخراج و گزارش کنید (نیازی به رسم در متلب نیست).

۴,۲ جزئی

۴,۲,۱ پروژه ۱

۱. پروفیل سرعت در انتهای لوله را در تمام رینولدزها رسم کنید و پیرامون نتایج بدست آمده بحث کنید.
۲. طول ورودی^{۱۷} را بر اساس نمودار سرعت محوری تخمین زنید و نسبت به نتایج تجربی بسنجید.
۳. نمودار تغییرات فشار در راستای لوله را نسبت به رینولدز متفاوت بدست آورید.
۴. افت فشار بدست آمده در هر رینولدز را نسبت به داده‌های تجربی اعتبارسنجی کنید.
۵. یک صفحه تعریف کنید که از محور لوله^{۱۸} عبور کند و کانتور فشار و سرعت را در ۱ رینولدز استخراج کنید.
۶. نمودار خطوط جریان کل محدوده محاسباتی را به صورت سه بعدی در ۱ رینولدز استخراج کنید.

۴,۲,۲ پروژه ۲

۱. به دلخواه از ۴ نسبت شعاع نوشته شده ۲ نسبت شعاع را برای شبیه‌سازی انتخاب کنید.
۲. سرعت و شرایط آشفته (در جریان آشفته) خروجی پروژه ۱ را شرط مرز ورودی پروژه ۲ در نظر بگیرید.
۳. پروفیل سرعت را در ۳ مقطع، ۲ مقطع قبل و بعد انحناء، و ۱ مقطع در انحناء، در رینولدز ۱۰۰۰۰ با دو نسبت شعاع مورد بررسی قرار دهید (در هر نسبت شعاع ۳ پروفیل سرعت را در یک نمودار رسم کنید) .
۴. نمودار تغییرات فشار در راستای لوله را نسبت به ۲ رینولدز در هر نسبت شعاع بدست آورید (چهار نمودار را در یک نمودار رسم کنید).
۵. با استفاده از افت فشار و روابط، ضریب افت فشار را در هر چهار شرایط بدست آورده و نسبت به داده‌های تجربی بسنجید.
۶. یک صفحه تعریف کنید که از محور لوله عبور کند و کانتور فشار و سرعت را با رینولدز ۱۰۰۰۰ در ۱ نسبت شعاع استخراج کنید.
۷. نمودار خطوط جریان کل محدوده محاسباتی را به صورت سه بعدی با رینولدز ۱۰۰۰۰ در ۱ نسبت شعاع استخراج کنید.

۴,۲,۳ پروژه ۳

۱. این پروژه را می‌توان دو نفره انجام داد. در صورتی که تک نفره انجام می‌شود از بین اعداد در جدول ۱ زاویه انبساط را به دلخواه انتخاب کنید و در صورتی که دو نفره انجام می‌شود میانگین نسبت شعاع هر دو نفر به عنوان نسبت شعاع و ۲ زاویه انبساط به دلخواه انتخاب شود.
۲. سرعت و شرایط آشفته (در جریان آشفته) خروجی پروژه ۱ را شرط مرز ورودی پروژه ۳ در نظر بگیرید (در صورتی که گروهی انجام می‌شود از بین دو نفر یک زبری انتخاب شود و ادامه مراحل انجام شود).
۳. پروفیل سرعت را در ۱ مقطع در ناحیه‌ی انبساط، در ۱ زاویه (گروهی، ۲ زاویه) مورد بررسی قرار دهید.
۴. نمودار تغییرات فشار در راستای لوله را در ۱ زاویه (گروهی، ۲ زاویه) بدست آورید.
۵. با استفاده از افت فشار و روابط، ضریب افت فشار را در هر شرایط بدست آورده و نسبت به داده‌های تجربی بسنجید.
۶. یک صفحه تعریف کنید که از محور مرکزی عبور کند و کانتور فشار را در ۱ زاویه استخراج کنید.
۷. یک صفحه تعریف کنید که از محور مرکزی عبور کند و کانتور سرعت را در ۱ زاویه (گروهی، ۲ زاویه) استخراج کنید. در صورت پدید آمدن جدایش در هر شبیه‌سازی محل جدایش و اتصال مجدد را به صورت کیفی (بدون محاسبات) در تصویر مشخص کنید.
۸. نمودار خطوط جریان کل محدوده محاسباتی را به صورت سه بعدی در بزرگ‌ترین زاویه‌ی انتخاب شده استخراج کنید.

۴,۲,۴ پروژه ۴

۱. پروفیل سرعت و دمای ورودی یکنواخت در نظر گرفته شوند. زبری سطوح مانند پروژه اول اعمال شود.
۲. شتاب ۱۰ متر بر مجذور ثانیه در تمام شبیه‌سازی‌ها در جهت مقطع C شکل ۳-۳ اعمال کنید.
- ۴ حالت شرط مرزی را شبیه‌سازی کنید و ضریب افت فشار در هر حالت را همانند مرجع [۱] با استفاده از فشارهای ورودی و خروجی و رابطی و رابطی، بدست آورید.
۳. در هر حالت، خط جریان سه بعدی را به جهت بهتر نمایش دادن تغییرات، در محل اتصال، استخراج کنید.
۴. پایداری جرم را با استخراج میانگین سرعت در سه مقطع بررسی کنید.
۵. در صورت تمایل به انجام پروژه به صورت گروهی (۲ نفره)، خواسته‌های بالا یک مرتبه و خواسته‌های زیر نیز انجام شوند.
۶. مقاطع A و B شرط مرزی سرعت ورودی با همان رینولدز و شرط مرزی دمایی مقطع A برابر ۲۸۰ درجه کلونین و مقطع B برابر ۳۵۰ درجه کلونین باشد.
۷. پایداری انرژی را با استخراج میانگین دما در سه مقطع بررسی کنید.
۸. علاوه بر برقراری شرایط مرزی مورد ۶، شرایط مرزی دمایی بر روی کل دیوارها با دمای ثابت ۳۰۰ درجه کلونین نیز اعمال و شبیه‌سازی انجام شود.
۹. نمودار تغییرات دما در راستای لوله‌ها را در حالت مورد ۸ از هر مقطع تا قسمت انشعاب رسم کنید.

۴,۲,۵ پروژه ۵

۱. شرط مرزی سرعت ورودی a متربرثانی، دمای ورودی ۶۰۰ درجه کلونین، تمامی دیوارهای خارجی ۲۵۰ درجه کلونین و شار گرمی دیواره‌ی پره‌ی راهنما b کیلوگرم بر مترمربع ثانیه با دمای ۳۰۰ درجه کلونین در نظر گرفته شود (توجه شود که جرم به صورت عمود از سطح خارج می‌شود).
۲. توجه شود که چگالی هوا در این مسئله بدلیل تغییرات دمایی ثابت نیست. می‌توان چگالی را در نرم‌افزار بر اساس ideal gas محاسبه کرد.
۳. بردار سرعت با استفاده از قسمت vectors را در مقاطع X برابر با ۰.۱، ۰.۲ و ۰.۳ و همچنین در قسمت میانه زانویی (مقطع با زاویه ۴۵ درجه) و انتهای زانویی بدست آورید (تمام بردارها را همزمان رسم کنید).
۴. پروفیل سرعت را در مقطع X برابر با ۰.۲ با استفاده از xy plot رسم کنید.
۵. پروفیل دما را در مقطع خروجی با استفاده از xy plot رسم کنید.
۶. کانتور فشار، سرعت، دما، چگالی و خطوط جریان را استخراج کنید.
۷. نمودار تغییرات فشار و سرعت را در راستای محور نازل بدست آورید.
۸. مقدار جرم عبوری از ابتدای هر طرف پره راهنما را محاسبه کنید و پایداری جرم را در کل دامنه‌ی محاسباتی با توجه به مقادیر جرم در مرزها بررسی کنید.

۵ مراجع

- [۱] B. D. Gajbhiye, H. A. Kulkarni, S. S. Tiwari, C. S. Mathpati, and S. Mathpati, 'Teaching turbulent flow through pipe fittings using computational fluid dynamics approach', *Wiley Online LibraryBD Gajbhiye, HA Kulkarni, SS Tiwari, CS MathpatiEngineering Reports, 2020•Wiley Online Library*, vol. ۲, no. ۱, Jan. ۲۰۲۰.
- [۲] B. R. Munson, 'Fundamentals of Fluids Mechanics, ۷th Edition', p. ۷۴۷, ۲۰۱۲, Accessed: Mar. ۱۵, ۲۰۲۴.
- [۳] F. White, *Fluid mechanics*. ۲۰۰۸. Accessed: Mar. ۰۵, ۲۰۲۴.

