

تمرین جامع دوم

شبیه‌سازی جریان آرام در درون لوله با استفاده از کد پریک

سجاد خدادادی (9665612002)

توربولانس

دکتر علی جعفریان

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

دی 1396



فهرست

[چکیده 1](#_Toc502805723)

[مقدمه 2](#_Toc502805724)

[1- معرفی مسئله معادلات حاکم و حل تحلیلی جریان درون لوله 3](#_Toc502805725)

[گذری اجمالی بر کد پریک 6](#_Toc502805726)

[توضیحات کلی برنامه 6](#_Toc502805727)

[شبکه بندی گره ها 9](#_Toc502805728)

[سابروتین CALCUV 11](#_Toc502805729)

[سابروتین CALCP 12](#_Toc502805730)

[سابروتین CALCT 12](#_Toc502805731)

[بررسی استقلال شبکه 12](#_Toc502805732)

[نتایج 14](#_Toc502805733)

[محاسبه طول ورودی 14](#_Toc502805734)

[مقایسه ضریب دارسی بدست آمده از کد پریک و رابطه ضریب دارسی 15](#_Toc502805735)

[شبیه سازی مساله با استفاده از OpenFOAM 17](#_Toc502805736)

[ایجاد دامنه محاسباتی و تولید شبکه 17](#_Toc502805737)

[نتیجه گیری 19](#_Toc502805738)

[منابع 19](#_Toc502805739)

**فهرست شکل ها**

[شکل1: ساختار کلی مساله 2](#_Toc502804642)

[شکل2: نمایش گره هدف و گره‌های همسایه 11](#_Toc502804643)

[شکل3: نمایش گره هدف و گره‌های همسایه 13](#_Toc502804644)

[شکل4:بررسی میزان ماکزیمم تکرار حلقه SIMPLE 14](#_Toc502804645)

[شکل5: سرعت در راستای طول لوله به ازای سرعت ورود مختلف 17](#_Toc502804646)

[شکل6:پروفیل سرعت به ازای سرعت‌های ورودی مختلف 17](#_Toc502804647)

[شکل7: هندسه ایجاد شده در OpenFOAM 18](#_Toc502804648)

[شکل8: مقایسه سرعت روی خط مرکز لوله با استفاده از OpenFoam و کد پریک 18](#_Toc502804649)

[شکل9: سرعت روی خط مرکزی لوله به ازای سرعت ورودی 5 متر بر ثانیه و وجود Overshoot 19](#_Toc502804650)

**فهرست جداول**

[جدول 1 – تعداد سلول‌های مختلف در شبیه‌سازی با استفاده از کد پریک 13](#_Toc502804694)

[جدول 2 – محاسبه ضریب دارسی با استفاده از کد پریک و رابطه ضریب دارسی برای شبکه‌های مختلف 13](#_Toc502804695)

[جدول 3 – پارامترهای فیزیکی مساله 14](#_Toc502804696)

[جدول 4 – محاسبه طول ورودی و ورود به ناحیه توسعه یافته با استفاده از رابطه و کد پریک 15](#_Toc502804697)

[جدول 5 – محاسبه ضریب دارسی با استفاده از کد پریک و رابطه ضریب دارسی برای شبکه‌های مختلف 16](#_Toc502804698)

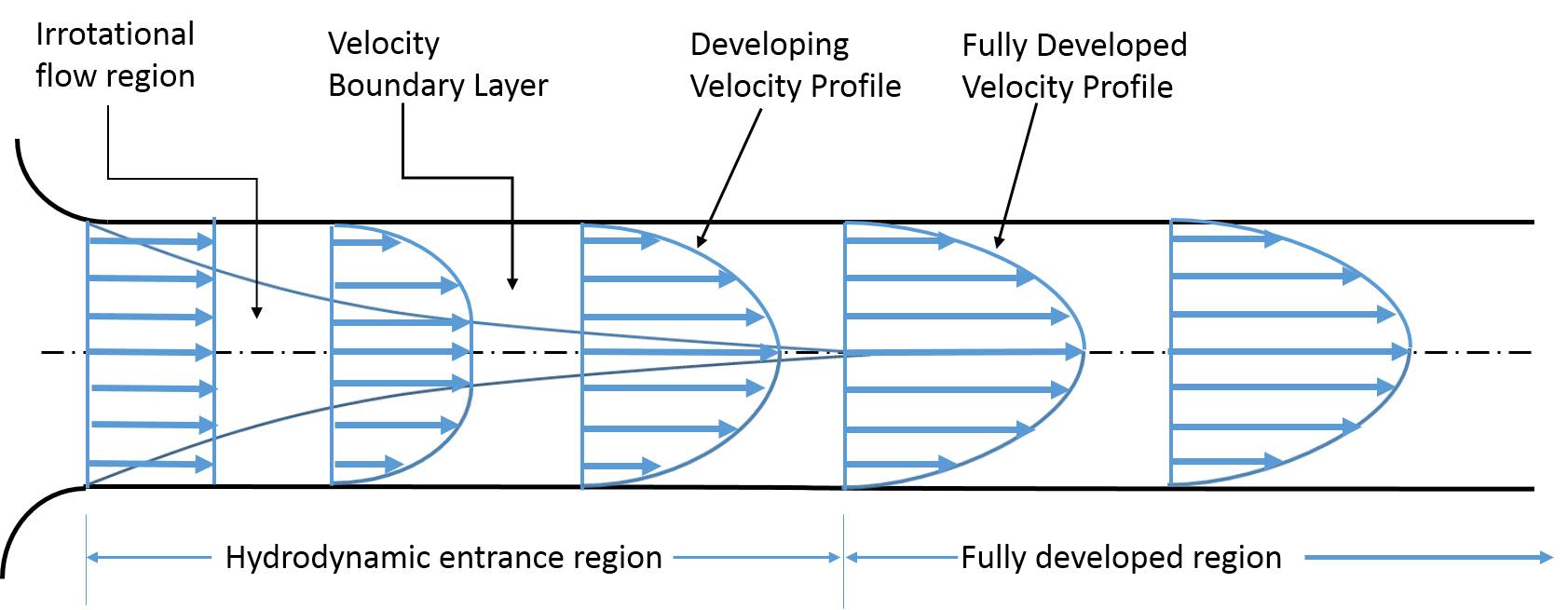
# چکیده

در این پروژه به شبیه سازی عددی مساله‌ای معروف در مکانیک سیالات تحت عنوان جریان آرام درون لوله پرداخته می‌شود. از حل این مسئله، با کمک نتایج موجود به بررسی و راستی آزمایی ضریب دارسی ویسباخ با معادله آن برای جریان آرام و هم چنین طول ورودی که بعد از آن جریان توسعه یافته می‌شود،پرداخته می‌شود. تولید شبکه و حل این مسئله با کد پریک[[1]](#footnote-1) انجام و با کدهای openFoam مقایسه شده‌اند. همچنین در طی این پروژه سعی شده است تا به نکات مهم و قابل توجه در CFD اشاره و تاثیر آن ها در این مسئله ارزیابی شود.

# مقدمه

جریان داخلی جریانی است که در آن سیال توسط یک سطح محصور می شود و اثرات لزجت رشد کرده و در تمام جریان مشاهده می‌گردد (مانند جریان در لوله). لذا لایه مرزی نمی تواند بدون محدودیت گسترش یابد.

هنگام بررسی جریان خارجی، فقط این سوال مطرح است که جریان لایه ای است یا متلاطم. ولی برای جریان داخلی باید وجود ناحیه ورودی یا ناحیه کاملاً فراگیر نیز بررسی شود.



شکل1: ساختار کلی مساله

جریان لایه‌ای را در لوله دایره‌ای به شعاع r0 در نظر بگیرید، که در آن سیال با سرعت یکنواخت وارد لوله می‌شود. می‌دانیم که وقتی سیال با سطح تماس می‌گیرد، اثر ویسکوز قابل توجه می‌شود و لایه مرزی با افزایش x رشد می‌کند. در نتیجه ناحیه جریان ناویسکوز کوچک می‌شود و با فراگیری لایه مرزی در خط مرکزی از بین می‌رود.

پس از آن، اثر ویسکوز تمام مقطع عرضی را فرامی گیرد و نمایه سرعت با افزایشx تغییر نمی‌کند. در این حالت می‌گویند جریان کاملاً فراگیر است و فاصله از ورودی را تا جایی که این حالت روی می‌دهد طول ورودی هیدرودینامیکی(xfd,h) می‌گویند. نمایه سرعت کاملاً فراگیر برای جریان لایه‌ای در لوله دایره‌ای به صورت سهمی است. در جرین متلاطم نمایه صافتر است و این ناشی از آمیختگی متلاطم در جهت شعاعی است. هنگام بررسی جریانهای داخلی اطلاع از وسعت ناحیه ورودی اهمیت دارد این وسعت به لایه‌ای یا متلاطم بودن جریان بستگی دارد.

# 1- معرفی مسئله معادلات حاکم و حل تحلیلی جریان درون لوله

عدد رینولدز تنها پارامتری است که بر طول ورودی تاثیر می‌گذارد:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

که در آن سرعت متوسط سیال در مقطع عرضی و قطر لوله است. در جریان کاملاً فراگیر عدد رینولدز بحرانی برای شروع تلاطم عبارت است از:

البته برای برقراری شرایط کاملاً متلاطم عدد رینولدز باید خیلی بزرگتر باشد .(Re ≈10000)گذار از جریان لایه ای به جریان متلاطم ممکن است در لایه مرزی ناحیه ورودی که در حال گسترش است روی دهد.

برای جریان لایه ای( Re ≈2300 )Re D ≲ 2300 {\displaystyle {{\operatorname {Re} }\_{D}}\lesssim 2300} طول ورودی هیدرودینامیکی را از عبارت زیر می توان به دست آورد:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

در این عبارت فرض می شود که سیال از یک نازل دایره ای همگرا وارد لوله می شود و لذا در ورودی دارای نمایه سرعت تقریباً یکنواخت است. گرچه عبارت کلی رضایت بخشی برای طول ورودی در جریان متلاطم وجود ندارد ولی می دانیم طول ورودی مستقل از عدد رینولدز است.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

همانطور که دیده می شود، شکل این مسئله یک حفره که از سه طرف دارای شرایط مرزی دیواره ثابت و از سمت بالا دیواره متحرک (که به صورت شماتیک آن را با یک نقاله که دائما در حال چرخش است، نشان می دهند) می باشد، حرکت دیواره بالا و شرایط فیزیکی حاکم بر سیال درون حفره باعث چرخش جریان درون آن می شود.

چون سرعت در مقطع عرضی تغییر می کند و جریان آزاد نیز وجود ندارد، هنگام بررسی جریانهای داخلی باید از سرعت میانگین( استفاده شود. سرعت میانگین سرعتی است که وقتی در چگالی ρ و مساحت Ac مقطع عرضی لوله ضرب می شود، آهنگ جریان جرمی در لوله را می دهد. لذا:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

که در آن :m ˙ = ρ u m A c {\displaystyle {\dot {m}}=\rho {{u}\_{m}}{{A}\_{c}}}

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

از ترکیب روابط بالا :

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

چون آهنگ جریان جرمی را به صورت انتگرال شار جرمی (ρu) روی مقطع عرضی نیز می توان بیان کرد یعنی:

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

از معادله ناویر استوکس در جهت برای ناحیه کاملا توسعه یافته:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

با دو بار انتگرال‌گیری از معادله (8) معادله 9 حاصل می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

شرایط مرزی موجود عبارتند از:

,

با اعمال این دو شرط مرزی در معادله 9 رابطه سرعت در لوله حاصل می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

همچنین برای سرعت متوسط درون لوله می‌توان نوشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

با جایگذاری رابطه 10 در معادله 11 نتیجه می‌شود که:

|  |  |
| --- | --- |
| (12) |  |

یا به عبارت دیگر:

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

با توجه به معادله 13 سرعت در مرکز لوله می‌باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |

و همچنین با استفاده از رابطه نتیجه می‌شود که:

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |

# گذری اجمالی بر کد پریک

کد پریک یک کد جامع است که برای مسایل مختلف با شرایط مورد نظر کاربرد دارد، این شرایط می‌تواند هم‌چون هندسه کانال یا لوله ،جریان آرام یا در هم، تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر و نیز شرایط مرزی مختلف همانند دما ثابت، شار ثابت و آدیاباتیک باشد که با روش حل تعین شده با دقت مورد نظر قابل اجراست برای عمل به شرایط مذرکور نیازی به تغیرات گسترده در کد نویسی و غالبا تغیرات کمی را می‌طلبد.

در این پروژه از کد پریک برای تحلیل مسئله استفاده شده است و تغیرات در سه بخش فایل ورودی کد اصلی کد اصلی به نام dcpipe ، فایل های ورودی کد تولید شبکه به نام dgpipe و کد اصلی به نام pcol1.f اعمال شده است. در فایل ورودی کد اصلی پارامتر های ثابت تعیین می‌شود و در آن خواص سیال هم‌چون چگالی ویسکوزیته عدد پرانتل مقدار تراکم پذیری و متغیرهای ورودی سرعت فشار و دمای ورودی و همچنین شرایط حل مسئله همانند نوع روش حل و دقت حل ثبت می‌شود که کل این تغییرات در قالب چند خط اعمال می‌شوند.

در فایل ورودی تولید شبکه (dgpipe) ابعاد هندسه کانال و تعداد گره ها در جهت طول و عرض آن تعریف می‌شود . در کد تولید شبکه محل قرار گیری کد گره ها و تراکم شبکه تعیین می‌شود که در این کد نیازی به تغییرات نمی‌باشد.

## توضیحات کلی برنامه

برای اجرای نرم افزارMicrosoft visual studio استفاده شده است که شامل دو فایل کد می‌باشد. ابتدا هندسه و شبکه بندی توسط فایل کد grid.f تولید خواهد شد و سپس اطلاعات شبکه در کد اصلی pcol1.f خوانده شده و برنامه اجرا خواهد شد.

هر فایل کد نیاز به فایل ورودی دارد. در فایل ورودی کد تولید شبکه اطلاعاتی مربوط به ابعاد هندسه و تعداد گره ها در جهت طول و عرض ثبت می‌شود ،که در حین اجرا کد تولید شبکه (grid.f) نام فایل ورودی و نیز نام فایل خروجی باید تایپ شود بدین صورت پس از اجرای این کد اطلاعات مربوط به شبکه گره ها در فایل خروجی (grid.inp) ثبت می‌شود. این فایل خروجی به عنوان فایل ورودی برای کد اصلی (psol1.f) می‌باشد، هم‌چنین کد اصلی فایل ورودی دیگری به نام dcpipeرا داراست که که پرامتر های ثابتی ویسکوزیته، عدد پارانتل، شتاب گرانش، تعداد ماکزیمم تکرار مقدار، حداکثر خطای همگرایی و مقادیر سرعت ، فشار و دما ورودی و یا هر ثانیه مورد نظر دیگر در این فایل ثبت می‌شود همچنین در این فایل ورودی شرایط و صورت مسئله هم‌چون نوع هندسه کانال یا لوله حالت گذرا یا پایا و نیز روش حل معادلات سرعت فشار و دما مشخص می‌شود که در قسمت های بعدی بیشتر شرح داده می‌شود با نوشتن دستوراتی در کد اصلی می‌توان فایل‌های خروجی را ایجاد کرد که فایل های خروجی out.txt اطلاعاتی مربوط به مقادیر سرعت، فشار و دما و مقادیر خطای آن در هر تکرار ثبت می‌کند، همچنین در مواقعی که برنامه خطا می‌دهد، توسط این فایل خروجی می‌توان پی برد که برنامه در کدام گام تکرار خطا می‌دهد و در حقیقت این خطا از کجا نشات می‌گیرد.

در این کد از تعداد زیادی سابروتین استفاده شده است که عمده این برنامه را تشکیل می‌دهد و در انتهای برنامه قرار می‌گیرند. به طور کلی وظیفه این سابروتین‌ها حل معادلات سرعت و فشار و دما است که خروجی آن محاسبه مقدار سرعت، دما و فشار در هر یک از گره ها می‌باشد، سپس با دستور call این مقادیر در ابتدای برنامه فراخوانی می‌شوند و مقدار خطا محاسبه می‌شود. اگر مقدار خطا از مقدار حداکثر خطای همگرایی تعیین شده بیشتر شد این مقدار به سابروتین‌ها بازگردانده می‌شود تا محاسبات جدید صورت گیرد. این چرخه تا زمانی که میزان خطا از خطای همگرایی تعیین شده کمتر شود ادامه می‌یابد. در این هنگام برنامه همگرا شده و دستور ترسیم کانتورها و نمودارها را می‌دهد. البته می‌توان تمام اطلاعات مربوط به چرخه تکرار را در یک فایل متنی ثبت کرد. همچنین اگرمقدار خطا از مقدار مشخصی بیشتر باشد برنامه دستور قطع برنامه و اعلام واگرایی را می‌دهد که تا این مرحله در فایل متنی ذخیره شده و با مراجعه به آن می‌توان پی برد محاسبات تا چه مرحله ای پیش رفته و خطا از کجا نشات می‌گیرد.

توضیحات قسمت های ابتدایی کد که شامل سابروتین ها نمی‌شود به شرح زیر می باشد:

در ابتدای برنامه متغیرهایی که در این کد استفاده می شود را باید تعریف نمود .این عمل از دو طریق انجام می‌شود. روش اول با استفاده از دستور command می باشد، بدین صورت که متغیرهایی که از یک طیف هستند در این دستور به اشتراک گذاشته می‌شوند. روشی دیگر که در کدهای فرترن زیاد دیده می‌شود استفاده از دستوراتی همانندinteger برای متغیر های اعداد صحیح doubleو precision برای متغیر های اعداد حقیقی با 16 رقم عدد معنی دار می‌باشد، که در این برنامه از هردو روش استفاده شده است.

با استفاده از دستور OPEN هر یک از از فایل های ورودی، خروجی و فایل اطلاعات شبکه با یک عدد معین تعریف و نامگذاری می شود به طوریکه در ادامه کد برای بازکردن فایل های مورد نظر کافی است اعداد تعریف شده در داخل پرانتز آورده شود، مثلا فایل ورودی dcpipe با عدد پنج تعریف شده است و با استفاده از دستور READ(5,\*) فایل ورودی باز شده و اطلاعات موجود در آن خوانده می‌شود همچنین برای فایل ورودی عدد دو برای فایل اطلاعات شبکه عدد یک در نظر گرفته شده است بطوریکه با دستور READ(1,\*) فایلGRID.INP باز شده و مختصات گره ها خوانده می‌شود و با دستور write(2,\*) فایل OUT.TXT باز شده و نتایج مورد نظر در آن ثبت می‌شود.

یکی از ویژگی های کد PERIC در این است که بدون نیاز به تغییرات گسترده در کد می‌توان برای مسائل و شرایط مختلف استفاده کرد، بدین منظور LTEST، LWRITE ، LREAD LOUTE ، LOUTS ، LAXIS درون دستور IF قرار می‌گیرد و با توجه به تعریف این متغیر های(true, false) در فایل ورودی، شرایط مسئله مشخص می‌شود مثلا متغیر LAXIS برای مسائل لوله (true) T و کانال F(false) تعریف می‌شود و یا متغیر LTIME برای مسایل گذرا trueو برای مسائل پایا false می باشد قابل ذکر است که متغیرهایی که FALS تعریف می‌شوند دستور IF مزبوط به آن در برنامه خوانده نمی‌شود و تنها متغیرهای تعریف شده(true)t دستورات و محاسبات درون حلقه ی IF اجرا می‌شوند.

در زیر قسمتی از کد آورده شده است که وضعیت همگرایی حل برنامه را کنترل می‌کند بدین صورت که مقادیر محسابه شده در سابروتین ها فراخوانده می‌شوند و با دستور WRITE مقادیر سرعت، فشار و دما در نقطه مرجع و خطاهای آن (RESOR) در فایل خروجی OUT.TXT ثبت می‌شود و ماکزیمم مقدار خطاهای سرعت ،فشار و دما با نام SOURCE تعریف می‌شوند در این هنگام با استفاده از دستورIF یکی از حالات زیر اتفاق می‌افتد:

1- اگر مقدار ماکزیمم خطا (SOURCE) از مقدار خطای واگرایی (تعریف شده در فایل ورودی ) بیشتر بود، حل واگرا شده و برنامه با ارجاع به خطر شماره 510 ارجاع داده می‌شود .

2- اگر مقدار ماکزیمم خطا از مقدار حداکثر خطای همگرایی کمتر بود حل همگرا شده برای رسم نمودار و نمایش کانکتور ها برنامه به خط با شماره 250 ارجاع داده می‌شود.

3- اگر هیچ یک از حالات فوق پیش نیامد حل تکرار می شود. حداکثر تعداد تکرار حل،مقدار MAXIT (تعریف شده در فایل ورودی) می باشد و نتایج آخرین تکرار حل در کانتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

|  |
| --- |
| DO ITER=1,MAXIT  IF(LCAL(IU)) CALL CALCUV  IF(LCAL(IU)) CALL OUTBC  IF(LCAL(IP)) CALL CALCP  IF(LCAL(IEN)) CALL CALCT  C.....CHECK CONVERGENCE OF OUTER ITERATIONS  WRITE(2,606) ITER,RESOR(IU),RESOR(IV),RESOR(IP),  \* RESOR(IEN),U(IJMON),V(IJMON),P(IJMON),T(IJMON)  SOURCE=MAX(RESOR(IU),RESOR(IV),RESOR(IP),RESOR(IEN))  IF(SOURCE.GT.SLARGE) GO TO 510  IF(SOURCE.LT.SORMAX) GO TO 250  END DO |

با بکار گیری دستورات OPEN,WRITE,DO,REWIND دستوراتی جهت رسم کانتور و نمودار داده می‌شود با دستور OPEN فایل خروجی ایجاد و نامگداری می‌شود اولین دستور WRITE مربوط به نامگذاری محور و دومین دستور WRITE تعداد ردیف و ستون و نتایج در فایل خروجی را مشخص می‌کند با دستور REWIND با اجرا و ران مجدد کانتور ها نمودارهای قبلی پاک می شود و خروجی جدید جایگزین می‌شود. فایل TECPLOT.PLT مربوط به کانتور های سرعت افقی و عمودی فشار و دما می‌باشد.

## شبکه بندی گره ها

یکی از قدرت‌های کدPERIC در آن است که می‌توان متخصات دو بعدی گره ها را به مختصات یک بعدی تبدیل نماید بطوری که هر گره فقط با یک شماره گره نمایش داده می‌شود این ویژگی باعث می‌شود سرعت ران بالا رفته و زمان ران به شدت کاهش پیدا کند. دراین کد شماره هر گره از روابط زیر به دست می‌آید که در آن IJ شماره گره،NJ تعداد گره های ماکزیمم در جهت Yو LI(I) شماره گره تصویر شده روی محور X و همچنین IوJ مولفه های مختصات دو بعدی گره ها می باشد.

LI(I) = (I-1) × NJ

IJ = LI(I)+J

طبق تعریف رابطه فوق شماره گره ها روی مرز های کانال از روابط زیر به دس میآِد.

|  |
| --- |
|  |

|  |  |
| --- | --- |
| شماره گره‌های روی دیواره پایینی | IJ = LI(I)+1 |
| شماره گره‌های روی دیواره بالایی | IJ = LI(I)+NJ |
| شماره گره‌های روی مرز شرقی (ورودی) | IJ = LI(1)+J |
| شماره گره‌های روی مرز غربی (خروجی ) | IJ = LI(NI)+ J |

|  |
| --- |
|  |

در این کد معادلات ناویر استوکس سرعت، فشار و دما پس از گسسته‌سازی معادلات به ماتریس های ضرایب و ترماهای چشمه تبدیل می‌شوند که در آن متغیر مجهول و مولفه‌های سرعت،فشار و دما در گره هدف و گره موجود در مجاورت گره هدف می باشد. مثلا در شکل زیر قسمتی از شبکه های گره نمایش داده شده است که در آن P گره هدف،E گره شرقی،W گره غربی،N شمالی و S گره جنوبی می باشد و همچنین خطوط کمرنگ شامل s ,n ,w ,e وجه یک المان به عنوا یک حجم کنترل را تشکیل می‌دهند قابل ذکر است که تراکم شبکه‌بندی یکنواخت بوده و ابعاد المان‌ها برابر می‌باشد البته به غیر از نواحی مرزی که مرکز وجه المان منطبق با گره روی مرز تعریف می شود.

|  |
| --- |
| شکل2: نمایش گره هدف و گره‌های همسایه |

|  |  |
| --- | --- |
| شماره گره شمالی | (IJ)N = IJ+1 |
| شماره گره جنوبی | (IJ)s = IJ-1 |
| شماره گره شرقی | (IJ)E = IJ+NJ |
| شماره گره غربی | (IJ)W = IJ-NJ |

## سابروتین CALCUV

در این سابروتین ضرایب ماتریس U (سرعت افقی) و V )سرعت عمودی) محاسبه می‌شود به طوریکه معادلات ناویراستوکس سرعت در جهت Xو Y پس از گسسته‌سازی معادلات به ماتریس ضرایب تبدیل می‌شود که درآن متغیرهای مجهول مولفه‌های سرعت در گره هدف و گره های موجود در مجاورت گره هدف می‌باشد. هر یک از متغیر های مجهول ضرایب مخصوص به خود را داراست، همچنین مقادیر ترم چشمه محاسبه و تعیین می‌شود مثلا اگر ضرب ماتریسی AX=B در نظر گرفته شود، ماتریس A ضرایب محاسبه شده و ماتریس ترم چشمه و ماتریس X مقادیر متغیر های مجهول مربوط به مولفه های سرعت می باشد که در این سابروتین مقادیر ضرایب ماترس مجهول و نیز آرایه های ترم چشمه محاسبه و یا صحیح می شود. توجه شود که مقادیر ضرایب سرعت در نواحی روی مرز به طور پیش فرض صفر در نظر گرفته می شود و در صورت لزون سابروتین BCUV این مقادیر صحیح می شود.

این سابروتین به طور کلی از سه بخش تشکیل شده است بخش اول به محاسبه ماتریس ضرایب گره های شرقی (AE) و غربی(AW) و ترم های چشمه SU , SV و بخش دوم به محاسبه ی ماتریس ضراب گره های شمالی AN و جنوبی AC تحصیح ترم چشمه پرداخته می‌شود و بخش سوم به اثرت فشار می پردازد و ترم های چشمه تصحیح شده و ضرایب گره های هدف (AP) محاسبه می‌شود.

## سابروتین CALCP

این سابروتین هماند سابروتین CALCUV می باشد با تفاوت به اینکه ماتریس ضرایب و ترم های چشمه از معادله ی فشار به دست می آید و متغیرهای مجهول، مقادیر فشار درگره هدف و گره های مجاور آن می باشد. در این سابروتین همچنین به اثرات فشار بروی دبی جرمی و سرعت پرداخته می‌شود و مقادیر دبی‌جرمی و سرعت تصحیح می‌شود.

## سابروتین CALCT

این سابروتین نیز همانند سابروتین های CALCUV و CALCP می باشد که ماتریس ضرایب و ترم های چشمه از معادله ی دما حاصل می‌شود و متغیرهای مجهول مقادیر دما گره هدف و گره‌های همسایه آن می باشد. مقادیر ضرایب دما بر روی مرز به طور پیش‌فرض در این سابروتین صفر در نظر گرفته می‌شود و در سابروتین BCT این مقادیر تصحیح می‌شود.

# بررسی استقلال شبکه

همانطور که در بالا نیز گفته شد شبکه با استفاده از کد grid.f ساخته می‌شود که ورودی این کد dgpipe و خروجی آن شبکه مورد نظر با اسم دلخواه است. جهت بررسی استقلال شبکه بایستی آن قدر شبکه را ریز کنیم تاجایی که نتایج حل تغییری نکند.

یا به عبارتی دیگر یک حالت بهینه بین نتایج صحیح و هزینه محاسبات انتخاب شود بطوری علاوه بر اطمینان از صحیح بودن نتایج هزینه محاسبات آن شبکه کمترین مقدار باشد. برای تحقق این منظور از 6 شبکه متفاوت استفاده شده که تعداد سلول در جهت طول و عرض برای لوله مورد نظر در جدول 1 داده شده است.

جدول 1 – تعداد سلول‌های مختلف در شبیه‌سازی با استفاده از کد پریک

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| تعداد سلول در راستای عرض | تعداد سلول در راستای طول | نام شبکه |
| 10 | 200 | GRID4 |
| 15 | 400 | GRID5 |
| 20 | 500 | GRID6 |
| 25 | 600 | GRID7 |
| 30 | 700 | GRID8 |
| 30 | 800 | GRID3 |

پروفیل سرعت برای شبکه‌های موجود در جدول 1 در عکس 2 نشان داده شده است.

|  |
| --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\rev7\Console1\Console1\RESULTS\GRID\grid3.tif  شکل3: نمایش گره هدف و گره‌های همسایه |

همچنین ضریب دارسی برای این 6 شبکه در جدول 2 نشان داده شده‌اند.

جدول 2 – محاسبه ضریب دارسی با استفاده از کد پریک و رابطه ضریب دارسی برای شبکه‌های مختلف

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| شبکه | مقدار دقیق ضریب دارسی | مقدار بدست آمده از شبکه |
| GRID4 | 2.56000012E-01 | 2.53465205E-01 |
| GRID5 | 2.56000012E-01 | 2.54867643E-01 |
| GRID6 | 2.56000012E-01 | 2.55361527E-01 |
| GRID7 | 2.56000012E-01 | 2.55591094E-01 |
| GRID8 | 2.56000012E-01 | 2.55716205E-01 |
| GRID3 | 2.56000012E-01 | 2.55773216E-01 |

با توجه به شکل 1 و جدول 2 می‌توان از GRID7 استفاده نمود زیرا با ریزتر نمودن شبکه تغییرات محسوسی در نتایج مشاهده نمی‌شود ولی برای یکسان بودن نتایج و قابل قیاس بودن از GRID3(ارسالی توسط آقای دارند) استفاده می‌شود.

# نتایج

شبیه سازی عددی با استفاده از کد پریک برای یک سیال با خواص فیزیکی موجود در جدول 3 انجام شده است.

جدول 3 – پارامترهای فیزیکی مساله

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| سرعت ورودی() | دانسیته | لزجت() |
| 1 | 1 | 10-3 |

پس از اجرای اولیه کد برای شرایط موجود مشاهده گردید که خطای عددی زیاد است و جریان درون لوله توسعه یافته نمی‌شود و نتایج عددی و تحلیلی با هم تفاوت دارد. با تغییر مقادیر MAXIT از 450 به 5000 و SORMAX از به مقدار خطا کم شده و نتایج عددی و تحلیلی هم‌خوانی خوبی با هم پیدا می‌کنند.

|  |
| --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\rev7\Console1\Console1\RESULTS\MAXIT.tif  **شکل4:بررسی میزان ماکزیمم تکرار حلقه** **SIMPLE** |

## محاسبه طول ورودی

در بخش اول از نتایج به بررسی رابطه 2 پرداخته می‌شود. برای بررسی طول ورودی از تغییرات متوسط سرعت نسبت به طول لوله بهره گرفته می‌شود. اختلاف سرعت متوسط در هر X وXi-1 اگر از یک مقدار خطا کمتر شود آن X را به عنوان پایان طول توسعه یافتگی در نظر می‌گیرد.یا به عبارت دیگر از آن X به بعد پروفیل سرعت ثابت می‌شود. برای اینکه کد، طول ورودی را به عنوان یک خروجی ارائه کند قسمت زیر به کد اصلی اضافه شده است

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add3\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  OPEN (UNIT=19, FILE = 'TECPLOT4.plt')  a=0  Do I=1,NI  Do J=1,NJ  IJ=LI(I)+J  a=(a+(YC(J)\*U(IJ)))/YC(NJ)  در هر I و به ازای j های مختلف سرعت هر سلول را در فاصله مرکز آن از خط مرکزی ضرب کرده و با هم جمع میکند و در پایان آن را بشعاع لوله تقسیم میکند.C  END DO  VELOCITY(I)=a  تعریف یک آرایه که سرعت متوسط را به ازای هر I ذخیره میکند. C  a=0;  End DO  DO I=2,NI  ERROR=(VELOCITY(I)-VELOCITY(I-1))/VELOCITY(I)  محاسبه اختلاف سرعت ها و خطای نسبی C  if (ERROR < 0.00025) THEN  WRITE(19,201) XC(I)  END IF  END Do  CLOSE(19)  WRITE(\*,\*)  WRITE(\*,\*)' TECPLOT4.plt was been created.'  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

در جدول 4 طول ورودی به ازای اعداد رینولدز مختلف با استفاده از کد پریک و رابطه 2 نشان داده شده‌اند.

جدول 4 – محاسبه طول ورودی و ورود به ناحیه توسعه یافته با استفاده از رابطه و کد پریک

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| عدد رینولدز | طول ورودی با استفاده از کد پریک | طول ورودی با استفاده از فرمول مربوطه | خطا(درصد) |
| 50 | 3.08600247E-01 | 2.5E-01 | 23.4 |
| 100 | 6.57957077E-01 | 5.0E-01 | 31.6 |
| 150 | 8.96066427E-01 | 7.5E-01 | 19.5 |
| 200 | 1.10072994E+00 | 10.0E-01 | 10.1 |
| 250 | 1.27169442E+00 | 12.5E-01 | 1.74 |

با مقایسه اعداد بدست آمده از جدول ... می‌توان دریافت که کد پریک نتایج قابل قبولی را ارائه ‌می‌دهد. علت اختلاف در مقادیر سرعت کمتر مقدار خطا می‌باشد. در صورت بیشتر کردن خطای داده شده به کد(error>0.00025) اختلاف طول ورودی با استفاده از کد و رابطه در سرعت های پایین خیلی کمتر می‌شود.

## مقایسه ضریب دارسی بدست آمده از کد پریک و رابطه ضریب دارسی

برای انجام مقایسه از رابطه 15 بهره گرفته می‌شود. برای محاسبه میزان تنش بر روی دیواره از تقریب خطی تغییرات سرعت صفر روی دیوار(شرط عدم لغزش) و سرعت در سلول‌های پایین‌تر از دیوار به اندازه فاصله این دو از هم استفاده شده است. بخش زیر برای محاسبه تنش روی دیواره و همچنین محاسبه ضریب دارسی با استفاده از رابطه 15 و رابطه مشهور دارسی برای جریان‌های آرام درون لوله اضافه شده است.

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add2\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  OPEN (UNIT=18, FILE = 'TECPLOT3.plt')  WRITE(18,\*) ' "VARIABLE" "shearStrees"'  I=NI  J=NJ  IJ=LI(I)+NJ  ShearStrees=VISC\*(U(IJ-1)-U(IJ))/(YC(J)-YC(J-1))  Cمحاسبه تنش برشی  DARCI1=(8\*ShearStrees)/(DENSIT\*UInlet\*UInlet)  Cمحاسبه تنش با استفاده از رابطه 15  DARCI2=(64\*VISC)/(DENSIT\*UInlet\*2\*YC(NJ))  Cمحاسبه تنش با استفاده از رابطه دارسی  WRITE(18,201) DARCI1,DARCI2,XC(I)  CLOSE(18)  WRITE(\*,\*)  WRITE(\*,\*)' TECPLOT3.plt was been created.'    C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

در جدول5 مقادیر ضریب دارسی حاصل از کد پریک و فرمول به ازای اعداد رینولدز مختلف را می‌توان مشاهده نمود.

جدول 5 – محاسبه ضریب دارسی با استفاده از کد پریک و رابطه ضریب دارسی برای شبکه‌های مختلف

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| عدد رینولدز | ضریب دارسی بدست آمده از کد | ضریب دارسی بدست آمده از فرمول | خطا(درصد) |
| 50 | 1.27874041E+00 | 1.28000009E+00 | 0.098412493 |
| 100 | 6.39363587E-01 | 6.40000045E-01 | |  | | --- | | 0.099446556 | |
| 150 | 4.26245481E-01 | 4.26666677E-01 | 0.09871781 |
| 200 | 3.19682777E-01 | 3.20000023E-01 | 0.099139368 |
| 250 | 2.55749017E-01 | 2.56000012E-01 | 0.098044917 |

از مقایسه نتایج بدست آمده در جدول5 می‌توان دریافت که نتایج حاصل از رابطه 15 و رابطه ضریب دارسی برای جریان آرام درون لوله تطابق خوبی با هم دارند. همچنین در شکل‌های5 و 6 نمودار سرعت بر روی خط مرکزی لوله و همچنین پروفیل سرعت را در انتهای صفحه می‌توان مشاهده نمود وهمچنین سرعت در خط مرکزی 2 برابرسرعت ورودی است که با نتایج تحلیلی هم‌خوانی دارد.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\rev7\Console1\Console1\RESULTS\U\VEL.tif  **شکل5: سرعت در راستای طول لوله به ازای سرعت ورود مختلف** | C:\Users\sajad\Desktop\rev7\Console1\Console1\RESULTS\U-P\U-Profile.tif  **شکل6:پروفیل سرعت به ازای سرعت‌های ورودی مختلف** |

برای ترسیم این نمودارها بخش زیر به کد اصلی اضافه شده است.

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  OPEN (UNIT=17, FILE = 'TECPLOT2.plt')  WRITE(17,\*) ' "VARIABLE" "X" "U" '  J=1  DO I=1,NI  IJ=LI(I)+J  WRITE(17,201) XC(I),U(IJ)  END DO  CLOSE(17)  WRITE(\*,\*)  WRITE(\*,\*)' TECPLOT2.plt was been created.'  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add2\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  OPEN (UNIT=17, FILE = 'TECPLOT2.plt')  WRITE(17,\*) ' "VARIABLE" "X" "U" '  J=1  DO I=1,NI  IJ=LI(I)+J  WRITE(17,201) XC(I),U(IJ)  END DO  CLOSE(17)  WRITE(\*,\*)  WRITE(\*,\*)' TECPLOT2.plt was been created.'  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

# شبیه سازی مساله با استفاده از OpenFOAM

## ایجاد دامنه محاسباتی و تولید شبکه یک حباب تنها

ازآنجایی‌که مسئله دارای تقارن محوری است بنابراین برای کاهش حجم محاسبات می‌توان ‌به جای مدل‌سازی کل دامنه محاسباتی، مطابق شکل‌ 6 تنها قطاعی از آن را مدل‌سازی نمود.‍‍‍ جهت پیاده‌سازی این کار از صفحات Wedge در اپن‌فوم [[2]](#footnote-2)استفاده شده است که به‌صورت پیش‌فرض‌ زاویه  بین صفحات جانبی قطاع مورد نظر 5 درجه هست. با توجه به تعاریف زیر، میدان محاسباتی مورد نظر را می‌توان در نرم‌افزار ترسیم و مش‌بندی نمود.

|  |  |
| --- | --- |
| (4-5) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Capture **شکل7: هندسه ایجاد شده در OpenFOAM** | C:\Users\sajad\Desktop\rev7\Console1\Console1\RESULTS\OpenFoam.tif  **شکل8: مقایسه سرعت روی خط مرکز لوله با استفاده از OpenFoam و کد پریک** |

با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که نتیجه حاصل از سرعت بر روی خط مرکزی لوله با استفاده از OpenFOAM و کد پریک کاملا بر هم منطبق شده است. لازم به ذکر است که کد پریک برای سرعت ورودی بالای 2.5 متر بر ثانیه دارای یک OverShoot در ناحیه ورودی لوله است که در شبیه‌سازی با استفاده از openFoam مشاهده نمی‌شود.

|  |
| --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\rev7\Console1\Console1\RESULTS\OVERSHoot.tif  **شکل9: سرعت روی خط مرکزی لوله به ازای سرعت ورودی 5 متر بر ثانیه و وجود Overshoot** |

# نتیجه گیری

1- با افزایش تکرار حلقه سیمپل حل از دقت بالاتری برخوردار خواهد شد و نتایج آن با Openfoam مطابقت دارد.  
2- سرعت روی خط مرکزی لوله دو برابر سرعت ورودی است که با نتایج تحلیلی همخوانی دارد.  
3-در سرعت‌های بالا نمودار سرعت خط مرکزی لوله دارای overshoot است.  
4- ضریب دارسی و همچنین طول ورودی لوله بدست آمده از کد پریک هم‌خوانی خوبی با نتایج حاصل از روابط مورد نظر دارد.

# منابع

کتاب سیالات پیشرفته دکتر حیدری نژاد،دانشگاه تربیت مدرس1393

آموزش کد پریک، جمال دارند، دانشگاه تربیت مدرس1396

آموزش کد پریک، سعدی جلیلی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

1. peric [↑](#footnote-ref-1)
2. OpenFoam [↑](#footnote-ref-2)