

تمرین جامع سوم

شبیه‌سازی جریان آشفته در درون لوله با استفاده از کد پریک

سجاد خدادادی (9665612002)

توربولانس

دکتر علی جعفریان

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

اسفند 1396



فهرست

[چکیده 1](#_Toc507021915)

[مقدمه 2](#_Toc507021916)

[1- معرفی مسئله 3](#_Toc507021917)

[گذری اجمالی بر کد پریک 4](#_Toc507021918)

[توضیحات کلی برنامه 5](#_Toc507021919)

[شبکه بندی گره ها 8](#_Toc507021920)

[سابروتین CALCUV 9](#_Toc507021921)

[سابروتین CALCP 10](#_Toc507021922)

[سابروتین CALCT 10](#_Toc507021923)

[سابروتین CALCTK 10](#_Toc507021924)

[سابروتین CALCTE 11](#_Toc507021925)

[مروری بر روش ‌ 11](#_Toc507021926)

[مدل استاندارد کا اپسیلون 11](#_Toc507021927)

[ویژگیهای مدل استاندارد کا اپسیلون 13](#_Toc507021928)

[نحوه اعمال کد و معادلات حاکم بر رینولدز پایین 14](#_Toc507021929)

[مدل اول 15](#_Toc507021930)

[مدل دوم ( لاندر و شارما) 16](#_Toc507021931)

[بررسی هندسه، شبکه و سیال استفاده شده 17](#_Toc507021932)

[انجام شبیه‌سازی با استفاده از فلوئنت 18](#_Toc507021933)

[نتایج 19](#_Toc507021934)

[نتیجه گیری 20](#_Toc507021935)

[منابع 20](#_Toc507021936)

**فهرست شکل ها**

[شکل1: ساختار کلی مساله 2](#_Toc507021969)

[شکل2: نمایش گره هدف و گره‌های همسایه 9](#_Toc507021970)

[شکل3: مقایسه مدل‌ها برای رینولدز 4000 19](#_Toc507021971)

[شکل4: مقایسه مدل‌ها برای رینولدز 5000 19](#_Toc507021972)

[شکل5: مقایسه مدل‌ها برای رینولدز 6000 20](#_Toc507021973)

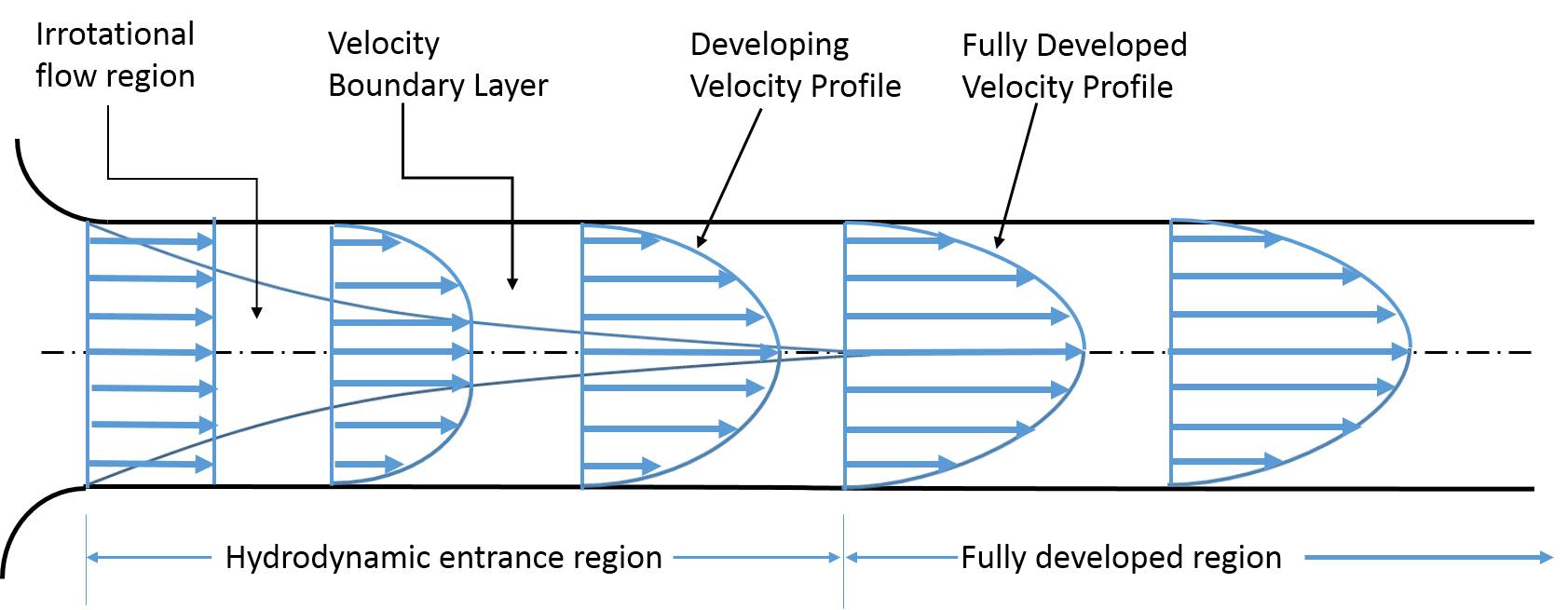
# چکیده

در این پروژه به شبیه سازی عددی جریان آشفته درون لوله پرداخته می‌شود. تولید شبکه و حل این مسئله با کد پریک[[1]](#footnote-1)بر اساس مدل آشفته برای دو مدل رینولدز کم(مدل 1 و مدل لاندر) انجام شده است و خروجی‌ها با نتایج حاصل از نرم‌افزار فلوئنت و همچنین مدل برای رینولدز بالا مقایسه‌شده‌اند. 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

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) |  |

# 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 LTE.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 (LTE.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.

## سابروتین CALCTK

این سابروتین نیز همانند سابروتین های CALCUV و CALCP می باشد که ماتریس ضرایب و ترم های چشمه از معادله انرژی جنبشی توربولانسی حاصل می‌شود و متغیرهای مجهول مقادیر k گره هدف و گره‌های همسایه آن می باشد.

## سابروتین CALCTE

این سابروتین نیز همانند سابروتین های CALCUV و CALCP می باشد که ماتریس ضرایب و ترم های چشمه از معادله اضمحلال انرژی جنبشی توربولانسی حاصل می‌شود و متغیرهای مجهول مقادیر گره هدف و گره‌های همسایه آن می باشد.

# مروری بر روش ‌

مدل های دو معادله ای، به عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان‌های آشفته، به خصوص در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی(که در عین قابلیت های بالا، دارای معادلات نسبتا ساده ای نیز می‌باشند) مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آن‌ها، حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین شدن جداگانه مقیاس سرعت و آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی می‌شوند.

مهم‌ترین اختلاف بین مدل‌های دو معادله‌ای و سایر معادله‌های ادی ویسکوزیته آن‌است که مدل‌های دو معادله‌ای مدل‌های کاملی می‌باشند یعنی از آن‌ها می‌توان برای پیش‌بینی خواص یک جریان آشفته بدون آگاهی قبلی از ساختار جریان و یا هندسه جریان استفاده نمود. در حالی که هم در معادلات صفر معادله‌ای و هم در معادلات یک معادله‌ای، طول مقیاس‌هایی وجود دارد که برای تعیین اندازه آنها، نیاز به دانستن رژیم جریان و شکل آن می‌باشد و این امر مدل‌سازی جریان های آشفته قبل از حل آنها را کمی پیچیده می‌نماید. نقطه آغاز تمامی مدل‌های ادی ویسکوزیته دو معادله‌ای، استفاده از تقریب بوزینسک و معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد. انتخاب متغیر دوم دلخواه بوده و تا امروز پیشنهادهای بسیاری برای این انتخاب ارائه شده است.

از نظر اقتصادی به صرفه بودن و دقت حل قابل قبول برای طیف وسیعی از جریان های آَشفته، این مدل را به یک مدل رایج برای جریان های صنعتی و مسائل مربوط به انتقال حرارت تبدیل نموده است.

## مدل استاندارد کا اپسیلون

کا اپسیلون معروف‌ترین مدل دو معادله ای می‌باشد زیرا درک آن آسان‌تر و استفاده از آن در برنامه‌نویسی ساده‌تر می‌باشد. در مدل های ادی ویسکوزیته کا اپسیلون، میدان آشفتگی بر حسب دو متغیر بیان می‌شود.

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته[[2]](#footnote-2)

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته[[3]](#footnote-3)

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |
| (8) |  |

میتوان به کمک آنالیز ابعادی[[4]](#footnote-4) نشان داد که ویسکوزیته آشفته را می‌توان به طول مقیاس ادی های بزرگ جریان آشفته مرتبط ساخت:

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

که در آن و به ترتیب سرعت مقیاس و طول مقیاس بزرگ‌ترین ادی‌ها در میدان جریان آشفته می‌باشد. به‌علاوه می‌توان نشان داد که:

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |
| (11) |  |

با جایگذاری معادلات (10) و (11) در معادله (9) نتیجه زیر حاصل می‌شود:

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

که در آن یک ضریب تجربی است که مقدار آن معمولا برابر 09/0 می‌باشد. در مدل استاندارد مقادیر و توسط معادله های نیمه تجربی زیر بدست می آیند.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |
| (14) |  |

که در آن و و ضرایب تجربی بوده و و به ترتیب اعداد پرانتل و اشمیت آشفته می‌باشند. عبارات و در معادله (14) به ترتیب بیانگر فرآیند های تولید برشی[[5]](#footnote-5) و فرآیندهای اضمحلال ویسکوز می‌باشند. عبارت بیانگر اثرات بویانسی می‌باشد. در معادله (14) عبارت بیانگر میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از اندرکنش بین جریان متوسط[[6]](#footnote-6) و میدان جریان آشفته می‌باشد و از همین رو به آن اصطلاحا عبارت تولید برشی گفته می‌شود. عبارت نیز بیانگر تولید اتلاف بویانسی ناشی از میدان چگالی نوسان کننده جریان[[7]](#footnote-7) می‌باشد. روابط صریح[[8]](#footnote-8) برای و به صورت زیر هستند:

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |
| (16) |  |

## ویژگیهای مدل استاندارد کا اپسیلون

مدل استاندارد کا اپسیلون وقتی در کنار رابطه بوزینسک ادی ویسکوزیته بکار برده می­شود، برای طیف وسیعی از مسائل نسبتا پیچیده به خوبی پاسخ می­دهد.، اما برای مسائلی که اثرات غیر تعادلی هستند، این مدل در نهایت به جواب هایی خواهد رسید که تا حدی فوق دیفیوژ[[9]](#footnote-9) است. یعنی مقادیر که توسط این مدل پیش بینی میشود، بسیار بزرگ خواهند بود. برای اینگونه از مسائل روابط اسپزیاله و لاندر معمولا منجر به نتایجی می‌شوند که از نتایج حاصل از استفاده از رابطه بوزینسک بهتر می­باشند.

با شناخته شدن نقاط ضعف و قدرت مدل کا اپلیسون، بهینه­سازی هایی بر روی این مدل و به منظور بهبود کارایی این مدل صورت گرفته است. این مدل به خصوص میتواند در جریان های محصور که در آنها تنش های برشی بسیار با اهمیت است نیز مورد استفاده قرار گیرد.

کاربردهای دیگر مدل کا اپسیلون عبارتند از:

* مدلسازی انحلال ادی در احتراق
* محاسبه جریان بویانت و جریان سیال در داخل ساختمان
* جریان در یک لوله با انقباض ناگهانی
* مدلسازی آتشسوزی در یک اتاق تست
* پیش بینی جریان و انتقال حرارت در یک دسته لوله پیچیده در مبدل های حرارتی
* مدلسازی جریان آرام در یک لوله به مقطع دایره ای با تغییرات فشار متناوب بین ورودی و خروجی نظیر جریان درون رگ های بدن، امواج فشاری در خطوط انتقال نفت و جریان هوا در مجرای هوای موتورهای احتراق داخلی.
* مدلسازی پراکندگی آلودگی در هوای جو و در دریاچه ها
* محاسبه و بررسی نرخ گسترش جت های متقارن محوری در محیط های ساکن

برخی دیگر از اینگونه نقایص عبارتند از:

* مدلسازی لایه های برشی ضعیف
* مدلسازی جریان های پیچشی، جریان های با کرنش های بسیار بزرگ و سریع، لایه های مرزی دارای انحنای بسیار و مسیرهای واگرا، جریان های دورانی و چرخشی.
* جریان ثانویه در کانال های با طول زیاد و مقاطع غیر دایروی.
* جریان های کاملا توسعه یافته در کانال های با مقاطع غیردایروی.

به منظور اصلاح این عیوب تلاش های زیادی بر روی اصلاح مدل دو معادله ای کا اپسیلون صورت گرفته است که به ظهور نسل های جدید از مدل کا اپسیلون منجر گردید.

# نحوه اعمال کد و معادلات حاکم در رینولدز پایین

در جریان­هایی با اعداد رینولدز بالا، استفاده از تابع دیواره باعث صرفه جوئی در زمان و حجم محاسبات می شود چرا که برای نواحی نزدیکی دیواره که گرادیان شدید است نیازی به حل ندارند و از روابط نیمه‌تجربی، جهت اعمال شرایط مرزی بقیه دامنه محاسباتی دور از دیواره استفاده می شود.

ولی در اعداد رینولدز پایین تلاش می‌شود که شبکه‌بندی هندسه بصورتی باشد که نود اول در زیر لایه ویسکوز قرار گیرد. در نتیجه به دنبال Resolve کردن نودهای نزدیک دیواره هستیم و دیگر لزومی به استفاده از توابع دیواره در اولین نود نیست. همچنین در این حالت، فرض تعادل موضعی تولید و اضمحلال انرژی جنبشی توربولانسی منظور نمی­گردد. مدل­های مختلفی برای مدل­سازی در رینولدز پایین وجود دارد. که در اینجا به دو مدل اشاره می­شود.

### مدل اول

معادلات حاکم در این مدل، با معادلات حالت رینولدز بالا تقریبا یکسان بوده و تفاوت آن در شرایط مرزی معادلات و است همچنین با توجه به اینکه در مدل استاندارد مقدار نزدیکی دیواره به بی نهایت میل می­کند و با فیزیک مسئله اختلاف دارد لذا در معادله انتقال از توابع میرا کننده[[10]](#footnote-10) به فرم زیر استفاده می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (17) |  |

و همچنین ویسکوزیته توربولانسی به فرم زیر اصلاح می­شود:

در مدل اول ضرایب و و به فرم زیر تعریف می­شود:

که برای اعمال ضریب میرایی در حلقه سیمپل بخش زیر به کد پریک اضافه می‌شود:

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  REY(IJ=YC(J)\*DENSIT\*TK(IJ)\*\*0.5/VISC  RET(IJ)=DENSIT\*TK(IJ)\*\*2/(VISC\*(TE(IJ)+SMALL))  FMU(IJ)=(1+(RET(IJ)\*\*0.75))\*tanh(0.008\*REY(IJ))  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

که تعاریف و در زیر آمده اند:

*و .*

*همچنین برای اعمال دمپینگ فانکشن‌های و در سابروتین CalcTE بخش زیر به کد اضافه می‌شود:*

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  DF1(IJ)=1.  DF2(IJ)=(1.-(2\*EXP(-RET(IJ)\*RET(IJ)/36.)/9.))\*(1.-EXP(-REY(IJ)/12.))  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*Rev\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  SU(IJ)=SU(IJ)+DF1(IJ)\*C\_1E\*TE(IJ)\*GEN(IJ)\*VOL/(TK(IJ)+SMALL)  AP(IJ)=AP(IJ)+DF2(IJ)\*C\_2E\*DENSIT\*VOL\*TE(IJ)/(TK(IJ)+SMALL)  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

*شرایط مرزی برای*  و *به فرم زیر است:*

همچنین برای اعمال شرط مرزی k روی دیواره صفر قرار داده می‌شود. برای شرط مرزی بر روی دیواره کد بخش زیر به کد اضافه شده است:

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  TE(IJ+1)=(2\*VISC)\*((ABS(TK(IJ))\*\*0.5)-(ABS(TK(IJ-1))\*\*0.5))  \* /((YC(NJ)-YC(NJM))\*DENSIT)  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

### مدل دوم ( لاندر و شارما[[11]](#footnote-11))

در این مدل، به معادلات انتقال و ترم منبع اضافه شده و همچنین شرایط مرزی و توابع میرا کننده متفاوت با مدل اول ارائه شده است. معادلات اصلاح شده­ی و به فرم زیر هستند:

|  |  |
| --- | --- |
| (18) |  |
| (19) |  |

که ضرائب مختلف در جدول(1) آورده شده است:

**جدول1** ثوابت مدل لاندر و شارما

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

مقدار شرایط مرزی مدل لاندرو شارما برای و برابر **صفر** فرض می­شود.

ترم‌های آخر معادله (18) و (19) پس از گسسته‌سازی به بخش سورس ترم کد اضافه‌می‌شوند. برای گسسته‌سازی این دو ترم از روش‌های موجود استفاده می‌شود. برای گسسته‌سازی ترم از تقریب مرتبه اول برای مش غیریک‌نواخت بخش زیر به کد اضافه شده‌است که از میانگین رو به جلو و رو به عقب استفاده می‌نماید.

|  |  |
| --- | --- |
| (20) |  |

برای گسسته‌سازی ترم بالا بخش زیر به کد اضافه ‌شده‌است.

|  |
| --- |
| C\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  TKDif(IJ)=(ABS(TK(IJ)\*\*0.5)-ABS(TK(IJ-1)\*\*0.5))/(YC(J)-YC(J-1))/2  \* +(ABS(TK(IJ+1)\*\*0.5)-ABS(TK(IJ)\*\*0.5))/(YC(J+1)-YC(J))/2  TKD2(IJ)=(2\*VISC\*TKDif(IJ))\*VOL  SU(IJ)=SU(IJ)+GEN(IJ)\*VOL-TKD2(IJ)  C\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

همچنین برای گسسته‌سازی ترم از اختلاف مرکزی برای مش نامتقارن استفاده می‌شود. که معادلات گسسته‌سازی شده آن به صورت زیر می‌باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (21) |  |

برای گسسته‌سازی ترم بالا بخش زیر به کد اضافه ‌شده‌است.

|  |
| --- |
| C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  DF1(IJ)=1.  DF2(IJ)=1.-0.3\*(EXP(-(RET(IJ)\*\*2)))  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*add\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*  B1(IJ)=2\*((U(IJ+1)\*(YC(J)-YC(J-1)))+(U(IJ-1)\*(YC(J+1)-YC(J)))-  \* U(IJ)\*((YC(J+1)-YC(J-1))))  B2(IJ)=(YC(J+1)-YC(J-1))\*(YC(J)-YC(J-1))\*(YC(J+1)-YC(J))  B(IJ)=2\*VOL\*VISC\*TVISC(IJ)\*((B1(IJ)/B2(IJ))\*\*2)/(2\*DENSIT)  SU(IJ)=SU(IJ)+DF1(IJ)\*C\_1E\*TE(IJ)\*GEN(IJ)\*VOL/(TK(IJ)+SMALL)+B(IJ)  C//\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* |

دو خط اول مربوط به دمپینگ فانکش‌های معادله می‌باشند که *در سابروتین CalcTE اضافه‌‌شده‌اند.*

# بررسی هندسه، شبکه و سیال استفاده شده

برای انجام این شبیه‌سازی از یک سیال با مشخصات زیر استفاده شده است:

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. برای انجام این شبیه‌سازی از یک لوله با طول 5 متر و شعاع 5 سانتی‌متر استفاده شده‌است. همانطور که می‌دانید در شبیه‌سازی با روش رینولدز کم باید اولین مش نزدیک دیواره در ناحیه زیرلایه لزج بی‌افتد. در جریان­هایی با اعداد رینولدز بالا، استفاده از تابع دیواره باعث صرفه جوئی در زمان و حجم محاسبات می­شود چرا که برای نواحی نزدیکی دیواره که گرادیان شدید است نیازی به حل ندارند و از روابط نیمه‌تجربی، جهت اعمال شرایط مرزیِ بقیه دامنه­ی محاسباتیِ دور از دیواره استفاده می شود.

ولی در اعداد رینولدز پایین تلاش می‌شود که شبکه‌بندی هندسه بصورتی باشد که نود اول در زیر لایه ویسکوز[[12]](#footnote-12) قرار گیرد. در نتیجه به دنبال Resolve کردن نودهای نزدیک دیواره هستیم و دیگر لزومی به استفاده از توابع دیواره در اولین نود نیست.

همچنین در این حالت، فرض تعادل موضعی تولید و اضمحلال انرژی جنبشی توربولانسی منظور نمی­گردد. مدل­های مختلفی برای مدل­سازی در رینولدز پایین وجود دارد.

برای این شبکه­بندی باید Y+ کوچک­تر از 63/11 باشد که این موضوع دقیقا در کد اعمال شده است.

برای این هندسه از 300 مش در راستای طول و 80 مش در راستای شعاع لوله استفاده شده است. اما در انجام شبیه‌سازی با روش رینولدزهای بزرگ الزامی به ریز شدن شبکه نزدیک به دیواره نیست. برای این منظور تعداد مش در جهت شعاع لوله از 80 به 20 عدد کاهش داده می‌شود. و با استفاده از Y+ موجود در کد بررسی می‌شود که اولین مش در زیرلایه ناحیه دلخواه قرار داده شود.

# انجام شبیه‌سازی با استفاده از فلوئنت

* حل به صورت پایا انجام می­شود.
* برای بررسی جریان آشفته، از مدل توربولانسی K-Epsilon Standard و تابع دیواره­ Enhanced Wall Treatment استفاده شده‌است.
* از سیالی با مشخصات فیزیکی که قبلا ارائه شد، استفاده شده است.
* سرعت ورودی‌متناسب با عدد رینولدز تنظیم شده و برای شرایط مرزی توربولانسی ورودی از متد Intensity & Hydraulic Diameter با شدت توربولانسی 1% و قطر هیدرولیکی 2/0 متر استفاده شده‌است.
* شرط مرزی برای مرز پایین مستطیل که همان خط مرکزی لوله می­باشد، از نوع محور (Axis) تعریف می‌شود.
* برای بقیه­ی شرایط مرزی (دیواره­ی لوله و مرز خروجی) از مقادیر پیش فرض فلوئنت استفاده شده‌است.
* مقادیر باقی­مانده­ی مطلوب به منظور همگرایی، برای همه­ی پارامترها روی 1E-06 تنظیم شده‌است.
* برای گسسته­سازی معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی توربولانسی و نرخ اضمحلال توربولانسی از متد Second Order Upwind استفاده شده است.

# نتایج

دو مدل رینولدز کم(مدل 1 و مدل لاندر) با نتایج حاصل از نرم‌افزار فلوئنت و همچنین نتیجه حاصل از مدل رینولدز بالا برای اعداد رینولدز 4000، 5000 و 6000 مقایسه شده‌اند.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\END\5000.tif  شکل4: مقایسه مدل‌ها برای رینولدز 5000 | C:\Users\sajad\Desktop\END\4000.tif  شکل3: مقایسه مدل‌ها برای رینولدز 4000 |
| C:\Users\sajad\Desktop\END\6000.tif  **شکل3: مقایسه مدل‌ها برای رینولدز** **6000** | |

همانطور که از شکل های بالا می‌توان دریافت کدهای توسعه یافته مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم افزار فلوئنت دارند و می‌توان به صحت کدهای توسعه یافته پی‌برد. همچنین اختلاف حالت رینولدز بالا با نتایج فلوئنت و همچنین کدهای توسعه داده شده را می‌توان به وضوح مشاهده نمود.

# نتیجه گیری

1. در جریان­هایی با اعداد رینولدز بالا، استفاده از تابع دیواره باعث صرفه جوئی در زمان و حجم محاسبات می­شود چرا که برای نواحی نزدیکی دیواره که گرادیان شدید است نیازی به حل ندارند و از روابط نیمه‌تجربی، جهت اعمال شرایط مرزیِ بقیه دامنه­ی محاسباتیِ دور از دیواره استفاده می شود.
2. در اعداد رینولدز پایین تلاش می‌شود که شبکه‌بندی هندسه بصورتی باشد که نود اول در زیر لایه ویسکوز[[13]](#footnote-13) قرار گیرد. در نتیجه به دنبال Resolve کردن نودهای نزدیک دیواره هستیم و دیگر لزومی به استفاده از توابع دیواره در اولین نود نیست.
3. نتایج کدهای توسعه‌یافته با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با فلوئنت با هم مطابقت دارد.

# منابع

کتاب توربولانس 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. Turbulent Kinetic Energy [↑](#footnote-ref-2)
3. Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy [↑](#footnote-ref-3)
4. Dimensional Analysis [↑](#footnote-ref-4)
5. Shear Generation Processes [↑](#footnote-ref-5)
6. Mean Flow [↑](#footnote-ref-6)
7. Fluctuating Density Field [↑](#footnote-ref-7)
8. Exact Realtions [↑](#footnote-ref-8)
9. Over Diffusive [↑](#footnote-ref-9)
10. Damping Functions [↑](#footnote-ref-10)
11. Launder and Sharma [↑](#footnote-ref-11)
12. Viscous SubLayer [↑](#footnote-ref-12)
13. [↑](#footnote-ref-13)