

تمرین جامع چهارم

بررسی جریان مغشوش درون لوله با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

سجاد خدادادی (9665612002)

توربولانس

دکتر علی جعفریان

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

بهمن 1396



فهرست

[چکیده 1](#_Toc505995244)

[شرح کلی مساله 2](#_Toc505995245)

[مقدمه 2](#_Toc505995246)

[معادلات حاکم و حل تحلیلی جریان درون لوله 3](#_Toc505995247)

[مروری بر روش شبیه‌‌سازی گردابه‌های بزرگ 6](#_Toc505995248)

[مروری بر روش ‌ 8](#_Toc505995249)

[شبیه سازی مساله 11](#_Toc505995250)

[هندسهی مساله 12](#_Toc505995251)

[مش زدن هندسه 12](#_Toc505995252)

[شبیه‌سازی مسئله در نرم افزار فلوئنت 14](#_Toc505995253)

[برای انجام شبیه‌سازی جریان مورد نظز مراحل زیر را طی باید طی شده و گزینه های مورد نظر انتخاب شوند: 14](#_Toc505995254)

[صحت‌سنجی 15](#_Toc505995255)

[نتایج 15](#_Toc505995256)

[کانتور سرعت متوسط و لحظه‌ای 16](#_Toc505995257)

[محاسبه Y+ و U+ 17](#_Toc505995258)

[پروفیل سرعت Power Law 18](#_Toc505995259)

[نتیجه گیری 19](#_Toc505995260)

[منابع 19](#_Toc505995261)

**فهرست شکل ها**

[شکل1: ساختار کلی مساله 3](#_Toc505995276)

[شکل2: هندسه مسئله در DesignModeler 12](#_Toc505995277)

[شکل3:نمایی از هندسه ی مش زده شده ی مساله توسط نرم افزار Ansys Meshing 13](#_Toc505995278)

[شکل4:مقایسه سرعت در مرکز لوله با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ و کا اپسیلون 15](#_Toc505995279)

[شکل5:کانتور سرعت لحظه ای در مقطع گذرنده از مرکز لوله در روش LES 16](#_Toc505995280)

[شکل6: کانتور سرعت میانگین در مقطع عمودی در وسط لوله با روش LES 16](#_Toc505995281)

[شکل7:کانتور سرعت میانگین در مقطع عمودی در وسط لوله با روش کا اپسیلون 16](#_Toc505995282)

[شکل8:کانتور سرعت میانگین در مقطع عمودی در وسط لوله با روش کا اپسیلون 17](#_Toc505995283)

[شکل9: نمودار U+ بر حسب Y+ و نمایش نواحی مختلف 18](#_Toc505995284)

[شکل10:نضریب اصطکاک پوستی در جهت شعاع لوله 18](#_Toc505995285)

[شکل11:نمودار به مقدار به 19](#_Toc505995286)

**فهرست جداول**

[جدول 1 پارمترهای فیزیکی حاکم بر مسئله 2](#_Toc505995958)

[جدول 2 اسامی برای بخش‌های مختلف هندسه 13](#_Toc505995959)

[جدول 3 تعداد حلقه‌های تکرار در هر مرحله 15](#_Toc505995960)

# چکیده

در این پروژه به شبیه سازی عددی جریان مغشوش درون لوله با روش گردابه‌های بزرگ پرداخته می‌شود. در این پروژه بعد از شبیه‌سازی با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ به شبیه‌سازی با روش کا اپسیلون پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از این دو شبیه سازی با هم مقایسه می‌شوند. سرعت میانگین حاصل از این دو شبیه سازی با هم مطابقت دارد.

# شرح کلی مساله

در این پروژه به شبیه‌سازی جریان آشفته درون یک لوله با استفاده از مدل گردابه‌های بزرگ پرداخته می‌شود.

هندسه جریان، سرعت ورودی و مشخصات سیال در جدول 1 آمده است:

**جدول 1 پارمترهای فیزیکی حاکم بر مسئله**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ویسکوزیته­ی دینامیکی سیال** | **چگالی سیال** | **سرعت بالک ورودی** | **طول لوله** | **قطر لوله** |
|  |  |  |  |  |

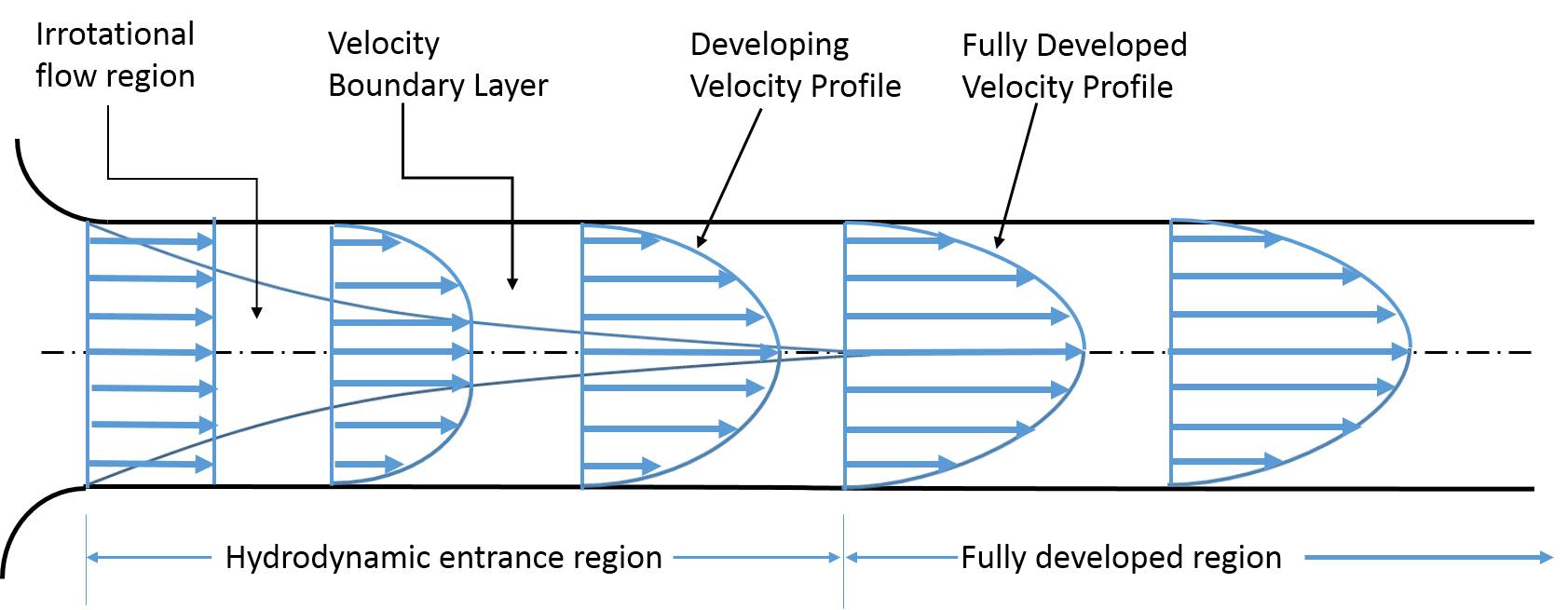
با توجه به اطلاعات موجود در جدول 1، عدد رینولدز بدست آمده عبارتست از:

جریان درون لوله در رینولدز 2300 از حالت آرام خارج شده و در عدد رینولدز 4400 کاملا آشفته می‌شود. با توجه به عدد رینولدز بدست آمده جریان درون لوله کاملا آشفته است. برای انجام این شبیه‌سازی از نرم افزار تجاری انسیس فلوئنت ورژن 15 استفاده شده است. در این شبیه‌سازی با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ کانتور سرعت لحظه­ای و میانگین و نمودار سرعت در خط مرکزی لوله ترسیم و نمودار سرعت حاصله با نمودار سرعت حاصل از روش کا اپسیلون مقایسه شده است.

# مقدمه

جریان داخلی جریانی است که در آن سیال توسط یک سطح محصور می‌شود و اثرات لزجت رشد کرده و در تمام جریان مشاهده می‌گردد (مانند جریان در لوله). لذا لایه مرزی نمی‌تواند 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.

# 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) |  |

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) |  |

برای جریان متلاطم کاملاً فراگیر تحلیل خیلی پیچیده تر است و باید به نتایج ازمایشی متوسل شد. در نمودار مودی ضریب اصطکاک برای گستره وسیعی از عدد رینولدز نشان داده شده است. ضریب اصطکاک علاوه بر این که به عدد رینولدز بستگی دارد، تابعی از شرایط سطح لوله است. ضریب اصطکاک برای سطوح صاف دارای مقدار مینیمم است و با افزایش زبری سطح افزایش می یابد. رابطه های تقریبی برای سطح صاف عبارتند از:

|  |  |
| --- | --- |
| (16) |  |
| (17) |  |

در نمودار مودی ضریب اصطکاک برای جریان کاملاً فراگیر در لوله دایره‌ای مطابق رابطه ساده زیر که شامل اعداد رینولدز بزرگ است، داده شده است:

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

# مروری بر روش شبیه‌‌سازی گردابه‌های بزرگ

روش گردابه­های بزرگ یک روش شبیه‌سازی در [دینامیک سیالات محاسباتی](https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%AF%DB%8C%D9%86%D8%A7%D9%85%DB%8C%DA%A9_%D8%B3%DB%8C%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%AA_%D9%85%D8%AD%D8%A7%D8%B3%D8%A8%D8%A7%D8%AA%DB%8C) و تکنیکی درحال گسترش است که می‌توان از آن برای پیش‌بینی درست جریان های آشفته استفاده کرد. در این روش [معادلات ناویه-استوکس](https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%85%D8%B9%D8%A7%D8%AF%D9%84%D8%A7%D8%AA_%D9%86%D8%A7%D9%88%DB%8C%D9%87-%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D9%88%DA%A9%D8%B3) برای مقیاس‌های بزرگ که حاوی انرژی هستند حل می‌شوند و اثر مقیاس‌های کوچک بر مقیاس‌های بزرگ [مدل‌سازی](https://fa.wikipedia.org/w/index.php?title=%D9%85%D8%AF%D9%84%E2%80%8C%D8%B3%D8%A7%D8%B2%DB%8C_%D8%AC%D8%B1%DB%8C%D8%A7%D9%86_%D8%A2%D8%B4%D9%81%D8%AA%D9%87&action=edit&redlink=1) می‌شود. در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ[[1]](#footnote-1) برخلاف روش شبیه سازی مستقیم[[2]](#footnote-2)، عددی همه گردابه های میدان جریان حل نمی شود. در واقع این روش بر اساس تقسیم بندی میدان جریان به دو قسمت مقیاس‌های حل‌شده و مقیاس های زیرشبکه می‌باشد. مقیاس­های بزرگ در جریان آشفته مستقیما توسط معادلات ناویراستوکس فیلترگیری شده حل می­شوند و اثرات مقیاس­های کوچک و تقابل آن­ها با مقیاس­های حل شده، به صورت مدل وارد معادلات می­گردد. از نظر هزینه این روش بین روش [شبیه سازی عددی مستقیم](https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%B4%D8%A8%DB%8C%D9%87_%D8%B3%D8%A7%D8%B2%DB%8C_%D8%B9%D8%AF%D8%AF%DB%8C_%D9%85%D8%B3%D8%AA%D9%82%DB%8C%D9%85) و [شبیه سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر- استوکس](https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%B4%D8%A8%DB%8C%D9%87_%D8%B3%D8%A7%D8%B2%DB%8C_%D8%A8%D9%87_%D8%B1%D9%88%D8%B4_%D9%85%DB%8C%D8%A7%D9%86%DA%AF%DB%8C%D9%86_%DA%AF%DB%8C%D8%B1%DB%8C_%D8%B1%DB%8C%D9%86%D9%88%D9%84%D8%AF%D8%B2_%D9%85%D8%B9%D8%A7%D8%AF%D9%84%D8%A7%D8%AA_%D9%86%D8%A7%D9%88%DB%8C%D8%B1-_%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D9%88%DA%A9%D8%B3) قرار دارد. از آن جایی که در این روش مقیاس های بزرگ جریان که به طور مستقیم حل می‌شوند این روش بسیار دقیق تر از روش [شبیه سازی به روش میانگین گیری رینولدز معادلات ناویر- استوکس](https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%B4%D8%A8%DB%8C%D9%87_%D8%B3%D8%A7%D8%B2%DB%8C_%D8%A8%D9%87_%D8%B1%D9%88%D8%B4_%D9%85%DB%8C%D8%A7%D9%86%DA%AF%DB%8C%D9%86_%DA%AF%DB%8C%D8%B1%DB%8C_%D8%B1%DB%8C%D9%86%D9%88%D9%84%D8%AF%D8%B2_%D9%85%D8%B9%D8%A7%D8%AF%D9%84%D8%A7%D8%AA_%D9%86%D8%A7%D9%88%DB%8C%D8%B1-_%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D9%88%DA%A9%D8%B3) است.

همان­طور که گفته شد، در روش شبیه­سازی گردابه­های بزرگ، پارامترهای مختلف جریان، فیلترگیری می­شوند.

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

سرعت نیز طبق همین قاعده به دو بخش سرعت فیلترگیری شده و سرعت در مقیاس زیر شبکه، تقسیم می­شود:

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

که در آن سرعت فیلترگیری شده در مقیاس معین بوده و بیان‌گر حرکات ناپایای مقیاس بزرگ می­باشد.

ترم نیز سرعت در مقیاس زیرشبکه[[3]](#footnote-3) می­باشد که از فیلتر ما عبور کرده و مدل می­شود. با توجه به تابع فیلترگیری، برای به دست آوردن ترم­های فیلتر شده به طریق زیر عمل می­شود:

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

معادلات فیلترگیری شده برای سرعتِ فیلتر شده از معادلات ناویراستوکس حاصل می­شود. بعد از استفاده از قاعده فیلترگیری بالا، ترم­های Convective غیرخطی در معادله­ی مومنتوم، یک تانسور تنش مطابق زیر تولید می­کنند:

|  |  |
| --- | --- |
| (22) |  |

که به صورت زیر تعریف می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (22) |  |

# 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.

2-9 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[[4]](#footnote-4)

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته[[5]](#footnote-5)

|  |  |
| --- | --- |
| (23) |  |
| (24) |  |

میتوان به کمک آنالیز ابعادی[[6]](#footnote-6) نشان داد که ویسکوزیته آشفته را می‌توان به طول مقیاس ادی های بزرگ جریان آشفته مرتبط ساخت:

|  |  |
| --- | --- |
| (25) |  |

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

|  |  |
| --- | --- |
| (26) |  |
| (27) |  |

با جایگذاری معادلات (26) و (27) در معادله (25) نتیجه زیر حاصل می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (28) |  |

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.

|  |  |
| --- | --- |
| (29) |  |
| (30) |  |

که در آن و و ضرایب تجربی بوده و و به ترتیب اعداد پرانتل و اشمیت آشفته می‌باشند. عبارات و در معادله (30) به ترتیب بیانگر فرآیند های تولید برشی[[7]](#footnote-7) و فرآیندهای اضمحلال ویسکوز می‌باشند. عبارت بیانگر اثرات بویانسی می‌باشد. در معادله (30) عبارت بیانگر میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از اندرکنش بین جریان متوسط[[8]](#footnote-8) 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[[9]](#footnote-9) می‌باشد. روابط صریح[[10]](#footnote-10) برای و به صورت زیر هستند:

|  |  |
| --- | --- |
| (31) |  |
| (32) |  |

2-9-1 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[[11]](#footnote-11) 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.

# شبیه سازی مساله

در ابتدا طبق روال همه شبیه‌سازی‌ها هندسه جریان ساخته شده سپس بعد از مش‌زنی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به شبیه‌سازی جریان پرداخته می‌شود.

## هندسه­ی مساله

برای شبیه­سازی مسئله ابتدا هندسه لوله با توجه به مشخصات گفته شده در بخش اول، در نرم افزار DesignModeler با استفاده از دستور مربوط به سیلندر، ساخته می­شود. در شکل 2 تصویری از این هندسه مشاهده می­شود

|  |
| --- |
|  |
| شکل2: هندسه مسئله در DesignModeler |

## مش زدن هندسه

با استفاده از ابزار Inflation در بخش Ansys Meshing مش‌زنی هندسه مورد نظرانجام می‌شود. در شکل 3 تصویری از این مش را می‌توان مشاهده نمود.

|  |
| --- |
|  |
| شکل3:نمایی از هندسه ی مش زده شده ی مساله توسط نرم افزار Ansys Meshing |

بعد از اتمام مش‌زنی نام‌های زیر برای بخش‌های مختلف هندسه تعریف می‌شود.

**جدول 2 اسامی برای بخش‌های مختلف هندسه**

|  |  |
| --- | --- |
| ورودی | Inlet |
| دیوار | PipeWall |
| خروجی | Outlet |

مشخصات مش هندسه مورد نظر عبارتست از:

|  |
| --- |
| Mesh Size  Level Cells Faces Nodes Partitions  0 851830 1995746 334232 4  1 cell zone, 4 face zones. |
| Mesh Size  Level Cells Faces Nodes Partitions  0 851830 1995746 334232 4  1 cell zone, 4 face zones.  Zone sizes on domain 1:  851830 mixed cells, zone 2.  1954514 mixed interior faces, zone 1.  2518 mixed pressure-outlet faces, zone 5.  2518 mixed velocity-inlet faces, zone 6.  36196 triangular wall faces, zone 7.  334232 nodes. |

با بررسی مش می‌توان از رضایت‌بخش بودن آن اطمینان ‌حاصل کرد.

|  |
| --- |
| Mesh Check  Domain Extents:  x-coordinate: min (m) = -6.350000e-03, max (m) = 6.350000e-03  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 6.350000e-02  z-coordinate: min (m) = -6.350000e-03, max (m) = 6.350000e-03  Volume statistics:  minimum volume (m3): 3.180722e-13  maximum volume (m3): 8.757561e-11  total volume (m3): 8.040012e-06  Face area statistics:  minimum face area (m2): 2.323920e-09  maximum face area (m2): 4.542666e-07  Checking mesh.....................................  Done. |

## شبیه‌سازی مسئله در نرم افزار فلوئنت

## برای انجام شبیه‌سازی جریان مورد نظز مراحل زیر را طی باید طی شده و گزینه های مورد نظر انتخاب شوند:

* تعریف ویژگی­های مربوط به حلگر (Pressure-Based و Transient)
* انتخاب مدل ویسکوز LES و مدل زیر شبکه­ WMLES
* تعریف خواص سیال متناسب با جدول 1
* انتخاب شرایط مرزی
* انتخاب مقادیر مرجع
* انتخاب متد گسسته سازی مربوط به Transient Formulation بصورت Second Order Implicit
* هم­چنین انتخاب متد گسسته‌سازی Bounded Central Differencing برای مومنتوم
* دادن حدس اولیه
* تنظیم 1e-06 برای مقادیر همگرایی همه­ پارامترها
* اجرای برنامه

انجام این شبیه‌سازی شامل 2 بخش است. بخش اول مربوط به رسیدن به حالت ایستا می‌باشد که تا زمان 1/0 ثانیه طول می‌کشد و پس از آن data sampling فعال کرده و مسئله 5000 استپ زمانی اجرا می‌شود. تعداد تکرار در این شبیه‌سازی را در جدول 3 می‌توان مشاهده نمود.

**جدول 3 تعداد حلقه‌های تکرار در هر مرحله**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| وضعیت | تعداد گام زمانی | تعداد تکرار در هر تایم زمانی | تعداد Itraition |
| Non Stationary | 10000 | 20 | 200000 |
| Stationary | 5000 | 20 | 100000 |

زمان اجرای برنامه برای حالت Stationary با 4 هسته موازی حدودا 72 ساعت به طول انجامید.

## صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی مورد نظر سرعت در مرکز لوله را با استفاده از مدل گردابه‌های بزرگ و کا اپسیلون را هم مقایسه می‌شوند.

|  |
| --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\export.tif  شکل4:مقایسه سرعت در مرکز لوله با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ و کا اپسیلون |

با مقایسه بین این دو روش می‌توان دریافت که در پیش‌بینی سرعت در مرکز لوله در روش کا اپسیلون با سرعت میانگین مرکز لوله در روش گردابه‌های بزرگ، مطابقت خوبی دارد. برای روش K-Epsilon از عبارت سرعت و برای روش LES از عبارت سرعت میانگین استفاده می‌شود. دلیل این موضوع این است که مدل‌های RANSذاتا متوسط­گیری شده‌اند و به همین دلیل دقت و هزینه­ی محاسباتی به مراتب کمتری از روش LES دارند. اما در روش LES، تنها ساختارهای زیرشبکه(ریز مقیاس‌ها) مدل شده و بقیه­ی پارامترهای فیلتر گیری شده حل می­شوند و از متوسط گیری استفاده نمی­شود. این موضوع باعث افزایش چشم‌گیر دقت حل و البته هزینه­ی محاسباتی خواهد شد. برای به دست آوردن متوسط پارامترها (مثلا سرعت) می­توان از سمپل­گیری و جمع­آوری داده‌ها با استفاده از متوسط زمانی آن پارامتر بدست آورد.

# نتایج

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی گزارش شده‌اند.

## کانتور سرعت متوسط و لحظه‌ای

با استفاده از رابطه (20) می‌توان مشاهده نمود که سرعت در روش شبیه­سازی گردابه­های بزرگ به دو بخش تقسیم ‌می‌شود:

* سرعت لحظه­ای که در حقیقت همان سرعت واقعی در هر لحظه از دامنه می­باشد.
* سرعت میانگین که توسط جمع­آوری داده­های مربوط به سرعت و میان­گیریِ زمانی روی سرعت­های لحظه­ای (توسط سمپل گیری انجام شده) ، حاصل می­شود.

کانتور سرعت لحظه­ای در مقطع گذرنده از مرکز لوله وسط لوله به صورت شکل 5 می‌باشد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل5:کانتور سرعت لحظه ای در مقطع گذرنده از مرکز لوله در روش LES |

کانتور سرعت میانگین روی همین مقطع نیز در شکل 6 نمایش داده شده است. همچنین در شکل 7 می‌توان سرعت در جهت y را با شبیه‌سازی به روش کا اپسیلون مشاهده نمود.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| شکل6: کانتور سرعت میانگین در مقطع عمودی در وسط لوله با روش LES | شکل7:کانتور سرعت میانگین در مقطع عمودی در وسط لوله با روش کا اپسیلون |

با مقایسه کانتور سرعت متوسط و لحظه‌ای می‌توان دریافت که روش گردابه‌های بزرگ به‌خوبی نتایج حاصل از اغتشاشات جریان را محاسبه می‌نماید. در روش گردابه‌های بزرگ متوسط گیری مکانی انجام می‌شود و برای انجام متوسط‌گیری زمانی باید data samplingرا فعال نمود و با استفاده از کانتور unsteady statistics و ترسیم سرعت متوسط در جهت y می‌توان متوسط سرعت را مشاهده نمود. با مشاهده کانتور سرعت می‌توان دریافت که روش گردابه‌های بزرگ برای این شبیه‌سازی جزییات بیشتری را به نمایش می‌گذارد.

## محاسبه Y+ و U+

در شکل 8 می‌توان تنش برش را در راستای شعاع لوله مشاهده نمود. همچنین شکل 10 ضریب اصطکاک پوستی را نمایش داده شده که با تقسیم آن بر 4 مقدار ضریب اصطکاک دارسی بدست آمده و با استفاده از رابطه 16 به صحت سنجی این مقدار پرداخته شده است.

|  |
| --- |
| شکل8:کانتور سرعت میانگین در مقطع عمودی در وسط لوله با روش کا اپسیلون |

مشاهده می­شود تنش برشی بعد از طی روندی نزولی، به مقدار ثابتی می­رسد. این مقدار با میانگین‌گیری داده‌ها با استفاده از نرم افزار اکسل 3/0 بدست می‌آید. با استفاده از مقدار تنش برشی به دست آمده، می­توانیم مقادیر مربوط به u+ و y+ را به صورت زیر محاسبه کنیم:

|  |  |
| --- | --- |
| (33) |  |
| (34) |  |
| (35) |  |

با گرفتن خروجی سرعت متوسط در جهت شعاع می‌توان u+ و y+ را برای نواحی مختلف محاسبه نمود. عدم پیوستگی در نمودار بخاطر نمایش و تفکیک سه ناحیه از هم می‌باشد.

|  |
| --- |
| C:\Users\sajad\Desktop\111t.tif |
| شکل9: نمودار U+ بر حسب Y+ و نمایش نواحی مختلف |
|  |
| شکل10:نضریب اصطکاک پوستی در جهت شعاع لوله |

مقدار میانگین ضریب اصطکاک پوستی نزدیک دیواره 1/0 می‌باشد که از تقسیم این مقدار بر عدد 4 مقدار 0025/0 حاصل می‌شود. با استفاده از رابطه 16 مقدار بدست آمده برابر 004/0 است و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت دارد.

## پروفیل سرعت Power Law

پروفیل سرعت در جریان توربولانسی در مرکز لوله، حالت تقریبا صاف‌تری نسبت به حالت آرام به خود می‌گیرد. برای توزیع سرعت توربولانسی درون لوله روابط متعددی ارائه شد که مشهور ترین آن‌ها پروفیل سرعت Power Law می‌باشد که از رابطه 36 بدست می‌آید که با توجه به شکل 11 مقدار n=9 حاصل می‌شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (36) |  |
| شکل11:نمودار به مقدار به | |

# نتیجه گیری

1. نتایج حاصل از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل کا اپسیلون با هم مطابقت دارد.
2. برای متوسط گیری زمانی در مدل گردابه های بزرگ از data sampling استفاده می‌شود.

# منابع

کتاب سیالات پیشرفته دکتر حیدری نژاد، دانشگاه تربیت مدرس1393

جزوه درس توربولانس-دکتر جعفریان- تربیت مدرس 1396

# Turbulent Flows, [Stephen B. Pope](https://www.amazon.com/s/ref=dp_byline_sr_book_1?ie=UTF8&text=Stephen+B.+Pope&search-alias=books&field-author=Stephen+B.+Pope&sort=relevancerank), Cambridge University Press, 2000

1. Large Eddy Simulation (LES) [↑](#footnote-ref-1)
2. Direct Numerical Simulation (DNS) [↑](#footnote-ref-2)
3. Sub Grid Scale (SGS) [↑](#footnote-ref-3)
4. Turbulent Kinetic Energy [↑](#footnote-ref-4)
5. Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy [↑](#footnote-ref-5)
6. Dimensional Analysis [↑](#footnote-ref-6)
7. Shear Generation Processes [↑](#footnote-ref-7)
8. Mean Flow [↑](#footnote-ref-8)
9. Fluctuating Density Field [↑](#footnote-ref-9)
10. Exact Realtions [↑](#footnote-ref-10)
11. Over Diffusive [↑](#footnote-ref-11)