



شبیه سازی و بررسی تأثیر تغییرات هندسی در جریان توسعه یافته آشفته درون لوله عمودی به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

زاهد محرمیاری^{۱*}، محمدعلی اشجاری اقدم^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد بین المللی جلفا، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، واحد بین المللی جلفا، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران.

* zahed.mahramyari@yahoo.com

ارسال: فروردین ماه ۹۶ پذیرش: تیر ماه ۹۶

چکیده

یکی از مقولات مطرح در مطالعه جریان درون لوله ها، عموماً به بررسی جریان در ناحیه توسعه یافته متمرکز است. از این رو تشخیص این ناحیه دارای اهمیت است. لذا در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر عدد رینولدز، قطر هیدرولیکی و پروفیل سرعت در جریان درون لوله ها پرداخته می شود. جهت دستیابی به نیل، از دو هندسه متفاوت لوله (دایره، مثلث) به طول و قطر هیدرولیکی یکسان (۲۵۰×۱۰۰) میلیمتر از طریق مدل سازی و شبیه سازی در نرم افزار قدرتمند ANSYS CFX بهره گرفته شد. شبکه بندی انجام شده بر روی لوله ها کاملاً منظم بوده و سیال درون لوله را آب، با دمای ورودی و محیط به ترتیب برابر ۶۰ و ۰ درجه سانتی گراد در نظر می گیریم. نتایج حاصل از پژوهش نشان می دهد در بررسی تأثیر هندسه بر پروفایل جریان در عدد رینولدز ۲۵۰۰ طول توسعه یافته برای هر دو مقطع دایره و مثلث برابر با ۱.۶، و در رینولدز ۴۰۰۰ بترتیب ۱.۸ و ۱.۹ متر می باشد که با بررسی دقیق تر می توان دریافت که طول توسعه یافته با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد و این مقدار برای سطح هندسی مثلث بیشتر از دایره است.

کلمات کلیدی: جریان توسعه یافته، جریان آشفته، رینولدز، هندسه لوله، نرم افزار CFX.

۱. مقدمه

یکی از مقولات مطرح در مطالعه جریان در لوله ها، عموماً به بررسی جریان در ناحیه توسعه یافته متمرکز است. از این رو تشخیص این ناحیه دارای اهمیت است. اما به درستی از چه مکانی به بعد را می توان ناحیه توسعه یافته در لوله فرض کرد؟ پاسخ به این سوال در نگرش کیفی به مقوله توسعه یافته معین شده است. طبق تعریف "ناحیه توسعه یافته با پایان تغییرات مشخصه های سیال در راستای حرکت آغاز می گردد." و برای آن روابط (۱) و (۲) به ترتیب برای جریانهای آرام و متلاطم در ورودی لوله ها ارائه شده است [۱]:

$$L_{laminar} = 0.058Re_D D \quad (1)$$

$$L_{turbulence} = 4.4Re_D^{1/6} D \quad (2)$$

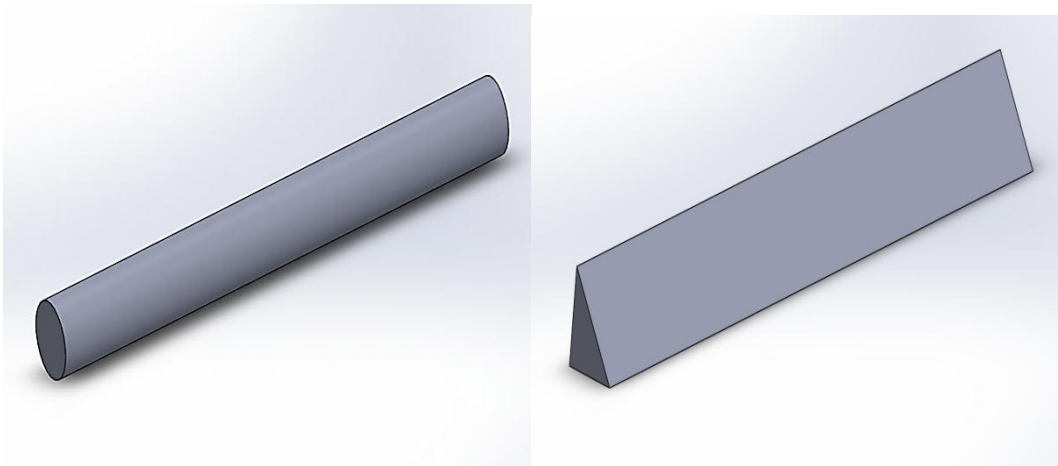
که در رابطه فوق $L_{laminar}$ طول ناحیه توسعه یافته جریان آرام، $L_{turbulence}$ طول ناحیه توسعه یافته جریان متلاطم، Re_D عدد رینولدز درون لوله، D قطر لوله می باشند و این روابط مبتنی بر ثبات پروفیل سرعت محوری در راستای جریان هستند. البته با توجه به اینکه در رابطه (۲) تمامی مشخصه های جریان متلاطم حضور ندارند و صرفاً بر عدد رینولدز و قطر تکیه شده است بدیهی است که نبایستی از این رابطه چندان توقع کاربردی زیادی داشت.

مطالعات گسترده ای در رابطه با شبیه سازی عددی جریان سیال به کمک معادلات ناویه- استوکس و سیستم مختصات [۲،۳] در لوله های منحنی و همچنین بررسی مشخصات جریان ثانویه از نظر شدت چرخش [۴] و بررسی تجربی وابستگی عدد رینولدز در افت فشار جریان درون لوله ها [۵] انجام گردیده است. در جریان های دارای پروفیل سرعت متغیر با زمان براساس تحقیقات مراجع [۶، ۷، ۸] رفتار مشخصه های سیال تفاوت فاحشی با جریان غیر شتابدار دارد. از این رو بدیهی است باید طول توسعه یافتگی در چنین رژیم جریانی مورد مطالعه مجدد و در صورت لزوم بازنگری قرار گیرد. سینگ و بیهاندری [۹] به بررسی توسعه یافتگی جریان درون لوله ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخت، نتایج بدست آمده توافق مورد قبولی با نتایج تحلیلی داشت. زیانگ [۱۰] در بخشی از پایان نامه خود به بررسی انتقال گرما جریان آشفته در یک سیال تراکم پذیر (هوا)، در یک لوله عمودی، در جهت بالا، با سه دیواره با شار حرارتی متفاوت به شکل یکنواخت پرداخته است. در این تحقیق، معادله فیلتر شده ناویر و استوکس برای سیالات تراکم پذیر به همراه نیروهای بدنی، با استفاده از روش حجم محدود دقیق مرتبه دوم، حل شده است و عدد ماخ پایین به عنوان پیش شرط، جهت سازگاری با سیالات تراکم پذیر مد نظر قرار گرفته شده است و برای آشفتهگی زیر شبکه، مدل تنش زیر شبکه پویا در نظر گرفته شده است. ام سی الیگوت [۱۱]، در تحقیق خود نشان داده است که زمانی که سیال تراکم پذیر بشدت حرارت داده می شود، جریان آشفته ویژگی جریان آرام به خود می گیرد، این درحالی است که شرایط مرزی دیواره ها به مقادیر شرایط مرزی در جریان آرام نزدیک می گردد. نتایج تحقیقات باتیس و همکاران [۱۲]، نشان داده است که با افزایش دمای یک سیال در یک لوله، عدد رینولدز محلی، بخصوص در نزدیکی دیواره حرارت داده شده، به شکل قابل توجهی کاهش پیدا می کند که این مسئله ناشی از ضخیم شدن زیر لایه ویسکوز در جریان حرارتی نسبت به جریان غیر حرارتی است. همچنین دانسته محلی در جریانهای حرارتی کمتر از جریانهای غیر حرارتی می گردد. خالقی و پسندیده فرد [۱۳]، به بررسی عددی جریان توربولنس شتابدار در حال توسعه در ورودی پرداختند، در این تحقیق نتایج تحلیل عددی اختلاف فاحشی را با مقادیر محاسبه شده از فرمول نشان می دهد و از آنجا که کد مورد استفاده قبلاً با استفاده از نتایج مطالعات تجربی برای جریان متلاطم ناپایا اعتباردهی گردیده است و از طرفی با توجه به ماهیت ذاتی پدیده تلاطم و به طور اخص جریان متلاطم ناپایا طبیعی به نظر می رسد که مقادیر فرمول که برای تشخیص طول ناحیه در حال توسعه، بعضاً مبتنی بر عدم تغییر در مشخصه های میکروسکوپی جریان (همانند سرعت) بنا شده است، از پیش بینی صحیح تغییرات مشخصه های میکروسکوپی جریان (مانند نوسانات سرعت) که ماهیت جریانهای متلاطم قائم به آن است بازماند.

۲. مدل سازی و شبیه سازی هندسی لوله در نرم افزار ANSYS CFX

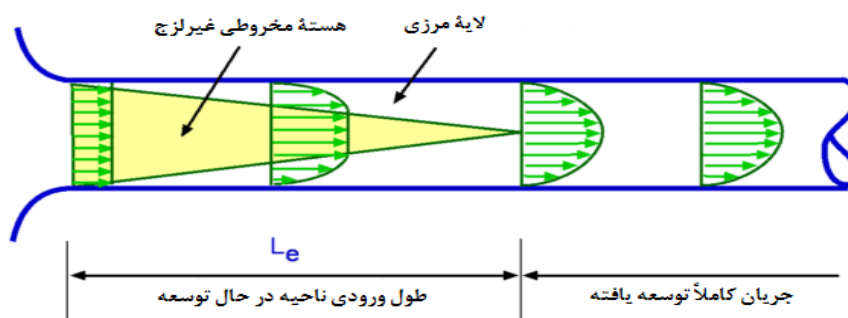
هر جریان آشفته را با در نظر گرفتن جزئیات آن و تغییرات وسیعی که نسبت به مکان و زمان در آن به چشم می خورد می توان منحصر به فرد قلمداد کرد. گر چه فرمول های ریاضی توضیح دهنده جریان های آشفته توسعه یافته اند، یک فرمول بندی واحد که فراگیر همه جریان های آشفته سیال باشد استخراج نشده است. با دانش امروز ما به نظر هم نمی رسد که چنان مدل ریاضی هرگز به

دست آید. با این وجود، بیشتر جریان های آشفته مشخصه های مشترکی دارند به قسمی که به پدیده آشفتگی هویت می بخشد و آن را از سایر پدیده ها متمایز می گرداند. در این مطالعه از مدل $k - \epsilon$ که یکی از مدل های آشفتگی متداول دو معادله ای است استفاده شده است. از این معادله می توان برای محاسبه تأثیرات جابجایی و پخش در انرژی آشفتگی بهره برد. اولین متغیر انتقالی، انرژی آشفتگی جنبشی یا همان k است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا همان ϵ است. هدف اصلی مدل $k - \epsilon$ را می توان بهبود مدل طول مختلط دانست، به گونه ای که بتواند یک توصیف جبری برای مقیاس طول آشفتگی در جریان های با پیچیدگی زیاد بیان کند. بر این اساس در این قسمت به کمک نرم افزار قدرتمند ANSYS CFX با مطالعه تأثیر پارامترهایی نظیر عدد رینولدز، هندسه هیدرولیکی مختلف، پروفیل سعی در بررسی و تحلیل واقعی از خروجی این نرم افزار بصورت کانتور خواهیم بود. در این قسمت از مطالعه از دو هندسه متفاوت دایره و مثلث با قطر هیدرولیکی یکسان ۱۰۰ میلیمتر جهت شبیه سازی استفاده می شود. شماتیک این سه هندسه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه با مقطع دایره و مثلث به قطر هیدرولیکی ۱۰۰ میلیمتر و طول ۲/۵ متر

دقت شود که طول ناحیه توسعه یافتگی به طور تقریبی بر اساس عدد رینولدز و به صورت زیر تعریف می شود.

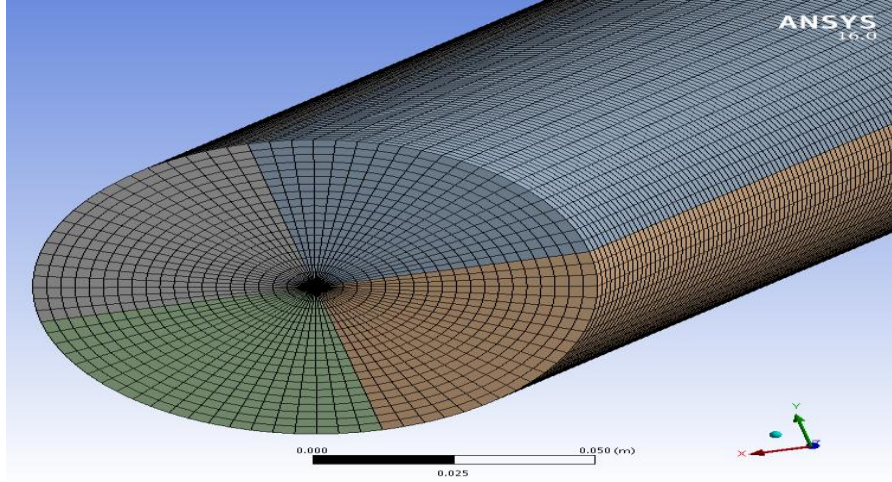


شکل ۲- تعریف طول ناحیه توسعه یافتگی

$$\frac{L_e}{d} \approx 4.4 Re_d^{1/6} \quad (3)$$

که در رابطه فوق L طول ناحیه توسعه یافتگی و d قطر لوله است. بر اساس این رابطه ماکسیمم طول لوله برای رینولدز ۴۰۰۰ برابر ۱/۸۵ متر محاسبه می شود. بنابراین در کل اجراها طول لوله برابر ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. شبکه بندی انجام شده بر روی لوله

کاملاً منظم بوده و دارای کیفیت عالی است. شرایط مرزی برای ورودی سیال درون لوله آب با دمای 60°C به چگالی $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ۹۹۷ و دمای محیط 0°C و شتاب جاذبه زمین $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ۹.۸۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به قطر ۱۰۰ میلیمتری لوله سرعت در رینولدز ۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ بترتیب برابر ۰/۲۳ و ۰/۳۶ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ می باشد و در خروجی لوله شرایط توسعه یافتگی بررسی می شود. جهت شروع کار ساختار هندسی لوله در نرم افزار سالیدورک مدل سازی و شبکه بندی شده و روابط جریان در ANSYS CFX حل می شود. این شبکه بندی در شکل (۲) نشان داده شده است.



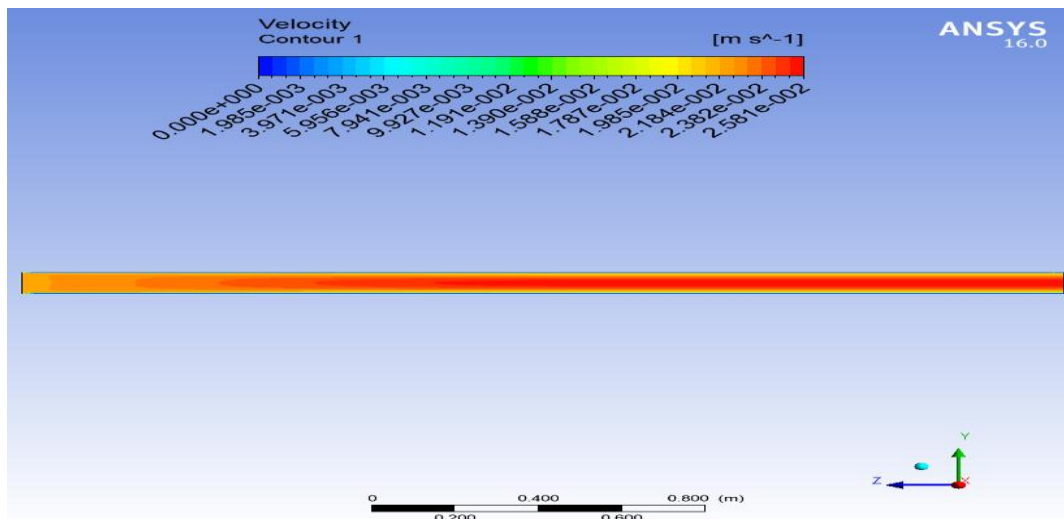
شکل ۳- شبکه بندی انجام شده بر روی هندسه با مقطع دایره ای شکل

۱.۲. شبیه سازی و بررسی تأثیر عدد رینولدز ۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ بر پروفیل جریان

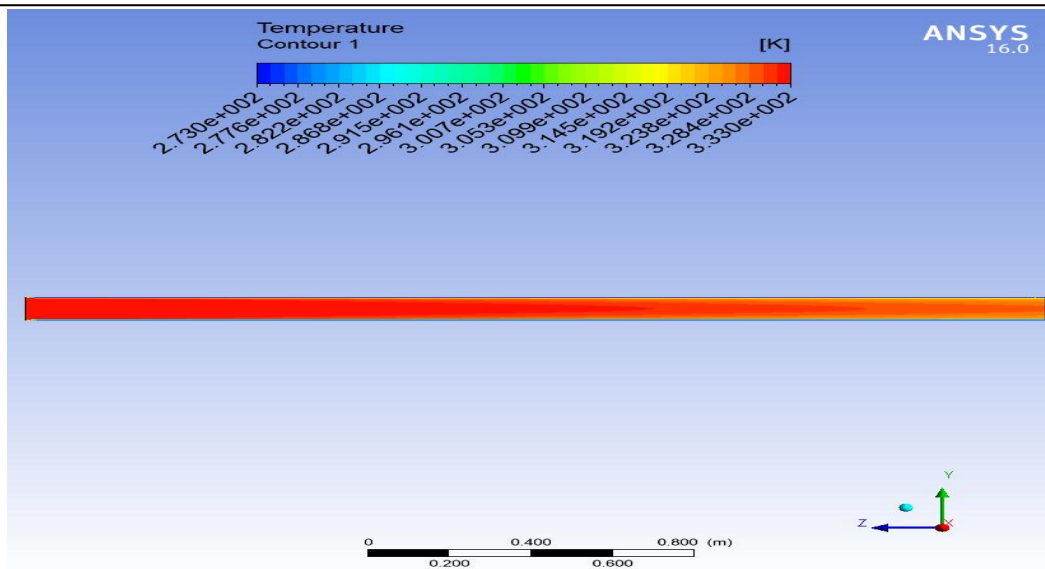
در این بخش تأثیر عدد رینولدز بر پروفیل جریان مطالعه خواهد شد. برای هر دو مقطع، نتایج برای دو عدد رینولدز ۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ ارائه شده است. نتایج برای این دو مقطع در ادامه بیان شده است.

• مقطع دایره ای

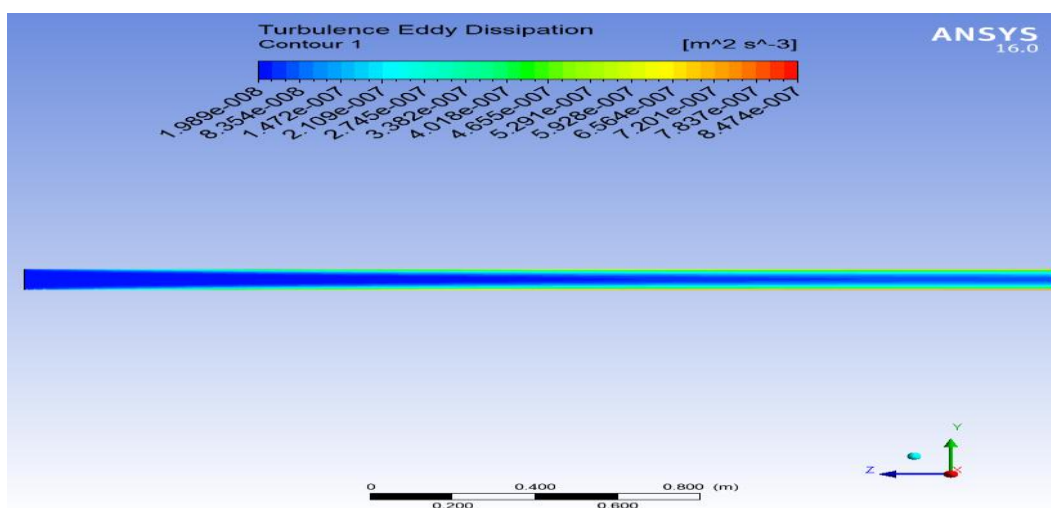
ابتدا نتایج برای هندسه با مقطع دایره ای شکل ارائه خواهد شد. کانتور سرعت و وکتور جریان در اشکال زیر نشان داده شده است.



شکل ۴- پروفیل سرعت جریان در هندسه با مقطع دایره ای شکل با رینولدز ۲۵۰۰

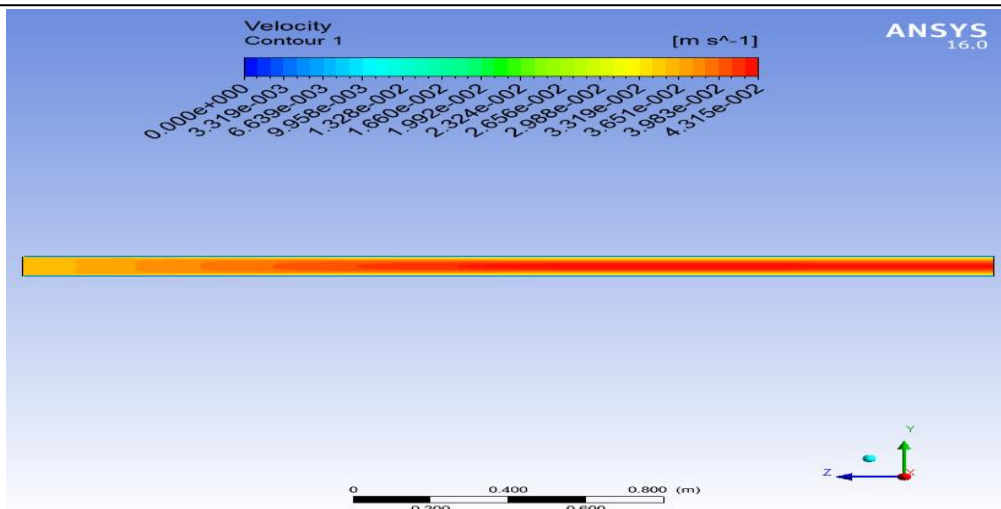


شکل ۵- کانتور دما در هندسه با مقطع دایره ای شکل با رینولدز ۲۵۰۰

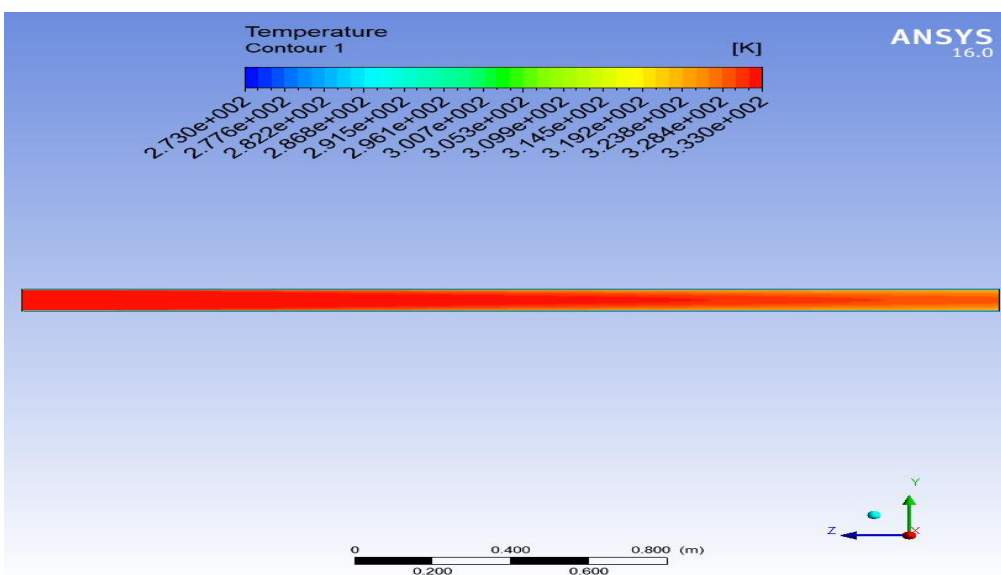


شکل ۶- کانتور آشفتگی در هندسه با مقطع دایره ای شکل با عدد رینولدز ۲۵۰۰

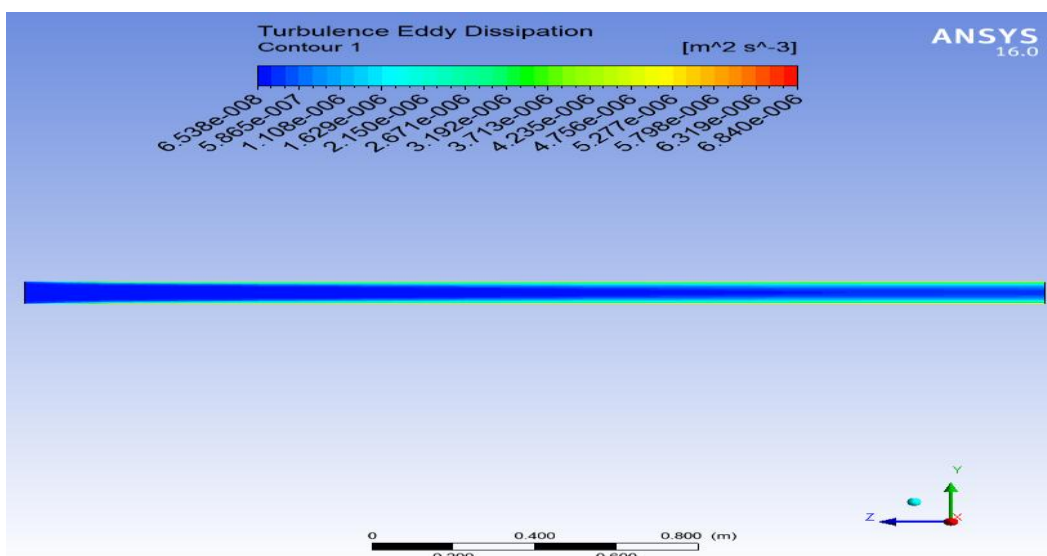
نتایج مربوط به عدد رینولدز ۲۵۰۰ در اشکال فوق نشان داده شده است. به طور تقریبی می توان دید که طول توسعه یافتگی برابر ۱/۶ متر است. نتایج برای عدد رینولدز ۴۰۰۰ در اشکال زیر نشان داده شده است.



شکل ۷- پروفیل سرعت جریان در هندسه با مقطع دایره ای شکل با رینولدز ۴۰۰۰



شکل ۸- کانتور دما در هندسه با مقطع دایره ای شکل با رینولدز ۴۰۰۰

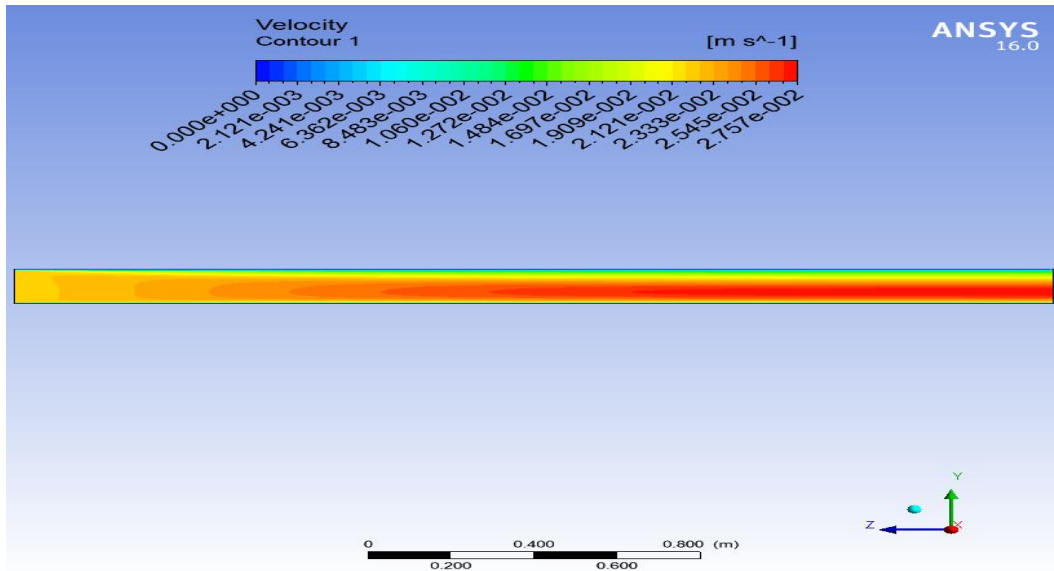


شکل ۹- کانتور آشفتگی در هندسه با مقطع دایره ای شکل با رینولدز ۴۰۰۰

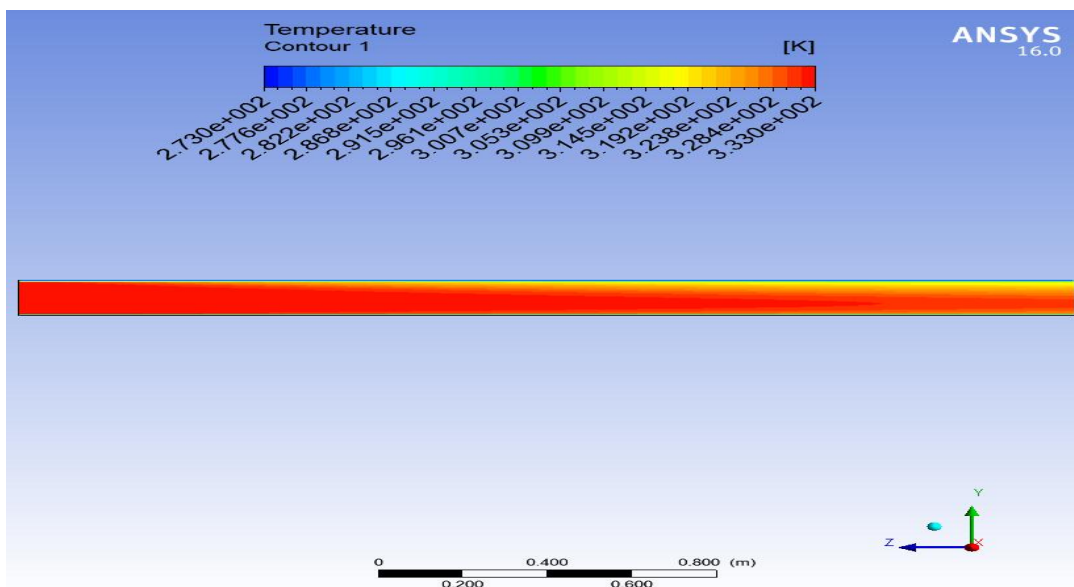
نتایج مربوط به دو عدد رینولدز ۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ در اشکال فوق نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که میزان آشفتگی در رینولدز ۴۰۰۰ بسیار بیشتر از رینولدز ۲۵۰۰ خواهد بود. به همین ترتیب میزان طول توسعه یافتگی در عدد رینولدز ۴۰۰۰ بیشتر از ۲۵۰۰ خواهد بود. میزان طول توسعه یافتگی در عدد رینولدز ۴۰۰۰ به طور تقریبی برابر ۱/۸ متر خواهد بود.

• **مقطع مثلث**

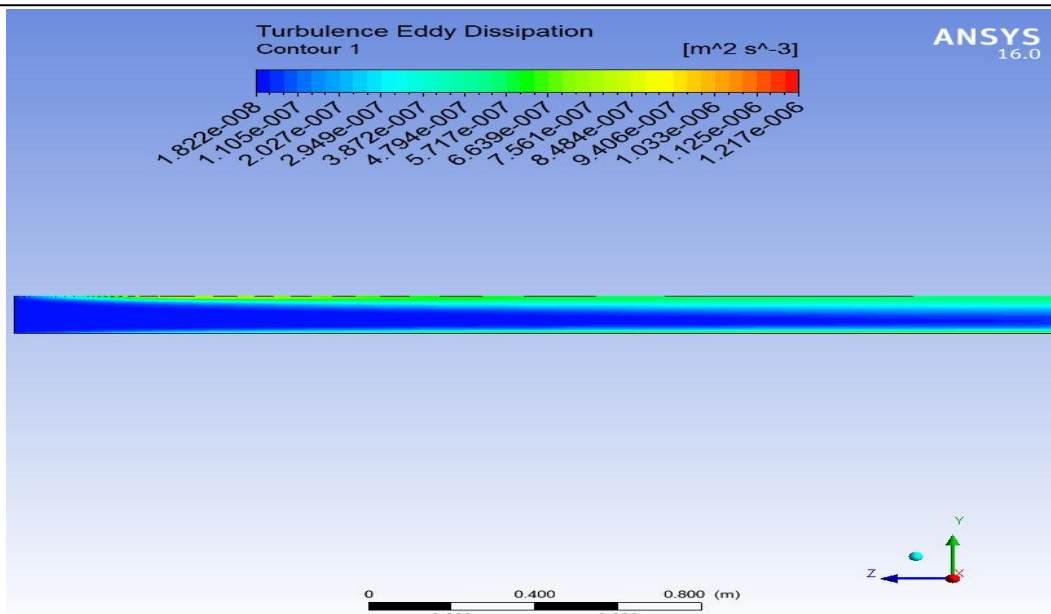
در این بخش نتایج مربوط به شبیه سازی عددی جریان در کانال با مقطع مثلثی ارائه شده است. توزیع سرعت و توربالانس جریان در اشکال زیر نشان داده شده است. در این حالت نیز از دو عدد رینولدز ۲۵۰۰ و ۴۰۰۰ برای شبیه سازی استفاده شده است.



شکل ۱۰- پروفیل سرعت جریان در هندسه با مقطع مربعی شکل با عدد رینولدز ۲۵۰۰

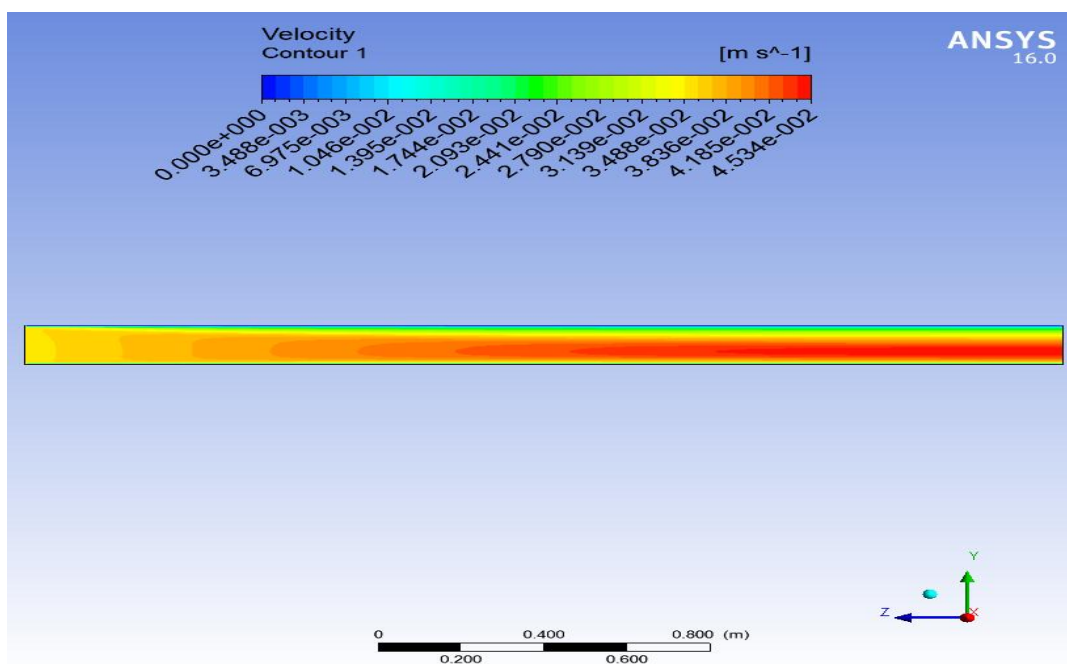


شکل ۱۱- کانتور دما در هندسه با مقطع مثلثی شکل با عدد رینولدز ۲۵۰۰

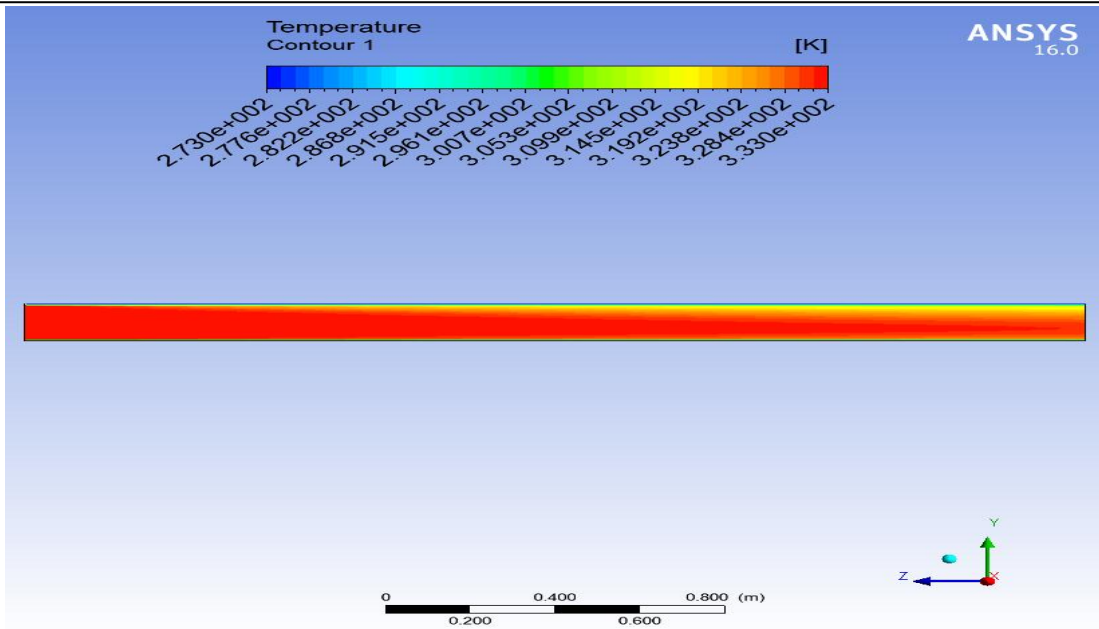


شکل ۱۲- کانتور آشفتگی در هندسه با مقطع مثلثی شکل با عدد رینولدز ۲۵۰۰

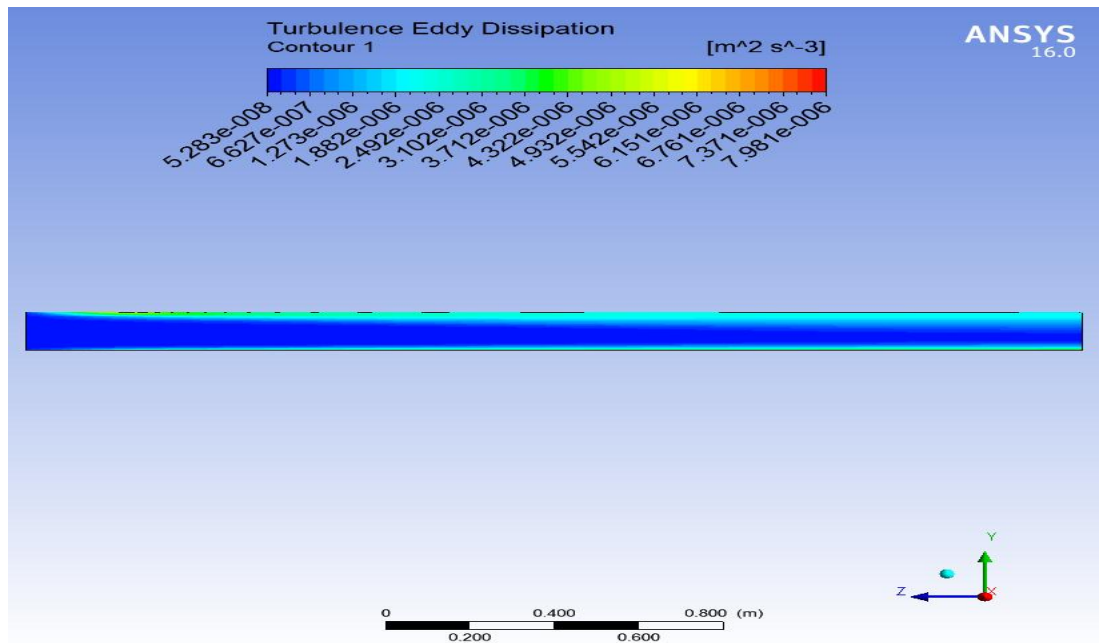
در این حالت طول توسعه یافتگی به طور تقریبی برابر ۱/۶ متر می باشد. زوایای موجود در دو شکل دایره و مثلث موجب افزایش آشفتگی و بالتبع افزایش طول توسعه یافتگی خواهد شد.



شکل ۱۳- وکتور جریان و پروفیل سرعت در هندسه با مقطع مثلثی شکل با عدد رینولدز ۴۰۰۰



شکل ۱۴- کانتور دما در هندسه با مقطع مثلثی شکل با عدد رینولدز ۴۰۰۰



شکل ۱۵- کانتور آشفتگی در هندسه با مقطع مربعی شکل با عدد رینولدز ۴۰۰۰

طول آشفتگی در این حالت برابر ۱/۹ متر خواهد بود.

۳. نتیجه گیری

در دینامیک سیالات، تلاطم، آشفتگی یا جریان آشفته به نوعی رژیم جریان اطلاق می‌شود که مشخصه‌ی آن تغییرات تصادفی و آشوبناک خصوصیات سیال است. هر جریان آشفته را با در نظر گرفتن جزئیات آن و تغییرات وسیعی که نسبت به مکان و زمان در آن به چشم می‌خورد می‌توان منحصر به فرد قلمداد کرد. گرچه فرمول‌های ریاضی توضیح دهنده جریان‌های آشفته توسعه یافته‌اند، ولی یک فرمول بندی واحد که فراگیر همه جریان‌های آشفته سیال باشد استخراج نشده است. با توجه به اینکه بخش عمده انتقال انرژی در دنیای واقعی، با استفاده از سیستم‌های مبتنی بر جریان آب می‌باشد، که تحت تأثیر عوامل مختلفی چون هندسه، واحد

سطح، و شکل جریان می‌باشد از اینرو در این پژوهش اقدام به مدلسازی و شبیه سازی جریان درون لوله ها پرداخته شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در بررسی تأثیر هندسه بر پروفایل جریان در عدد رینولدز ۲۵۰۰ طول توسعه یافتگی برای هر دو مقطع دایره و مثلث برابر با ۱.۶ متر، و در رینولدز ۴۰۰۰ بترتیب ۱.۸ و ۱.۹ متر می باشد که با بررسی دقیق تر می توان دریافت که طول توسعه یافتگی با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد و این مقدار با سطح هندسی مثلث بیشتر از دایره است.

۴. منابع

1. Langhaar, H. L. (1942). Steady Flow in the Transition Length of a Straight Tube," Journal of Applied Fluid Mechanics, vol. 9.
 2. H'uttel, T. J. and Friedrich, R.: Direct numerical simulation of turbulent flows in curved and helically coiled pipes, Computers & fluids, 30(5), 591-605, 2001.
 3. Noorani, A., El Khoury, G. K. and Schlatter, P.: Evolution of turbulence characteristics from straight to curved pipes, International Journal of Heat and Fluid Flow, 41, 16-26, 2013.
 4. Kim, J., Yadav, M. and Kim, S.: Characteristics of Secondary Flow Induced by 90° Elbow in Turbulent Pipe Flow, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 8(2), 229-239, 2014.
 5. Shiraishi, T., Watakabe, H., Sago, H. and Yamano, H.: Pressure fluctuation characteristics of the short-radius elbow pipe for FBR in the postcritical Reynolds regime, Journal of Fluid Science and Technology, 4(2), 430-441, 2009.
 6. Greenblatt, D. and Moss, E. (2007). Rapid Temporal Acceleration of a Turbulent Pipe Flow", Journal of Fluid Mechanics, 514, pp. 65-75.
 7. He, S., Ariyaratne C. and Vardy A.E. (2008). A Computational Study of Wall Friction and Turbulence Dynamics in Accelerating Pipe Flows", Journal of the Computers & Fluids, 37, pp. 674-689.
 8. He, S. and Jackson, J.D. (2000). A Study of Turbulence Under Conditions of Transient Flow in a Pipe", Journal of the Fluid Mech, 408, pp.1-38.
 9. Bhandari D. and Singh S. (2012). Analysis of Fully Developed Turbulent Flow in a Pipe Using Computational Fluid Dynamics. International Journal of Engineering Research and Technology. Vol. 1, 2278-0821.
 10. Xu, Xiaofeng, ,2003, Large eddy simulation of compressible turbulent pipe flow with heat transfer, Retrospective Theses and Dissertations. Paper 1477.
 11. Mc Eligot D. M. (1986). Convective heat transfer in internal gas flows with temperature dependent properties. Advances in Transport Processes. Vol. 4, pp. 113-200.
 12. Bates, J. A., Schmall, R. A., Hansen, G. A. and McEligot, D. M.,1974, Effects of Buoyancy Body Forces on Forced Convection in Heated Laminarizing Flows, Int. Heat Transfer Conf, Tokyo, Japan, Vol. II, pp. 141-145.
۱۳. خالقی علی. پسندیده فرد، محمود، منصور ساعتلو مهتاب، تیمورتاش علیرضا. (۱۳۸۹). بررسی جریان شتابدار غیر پریرودیک با استفاده از مدل آشفتگی SST. هفدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک ایران، ISME2009 ص. ۱-۶. تهران ۱۳۸۸.