

بررسی عددی جریان توربولنس شتابدار در حال توسعه در ورودی

علی خالقی¹، محمود پسندیده فرد²

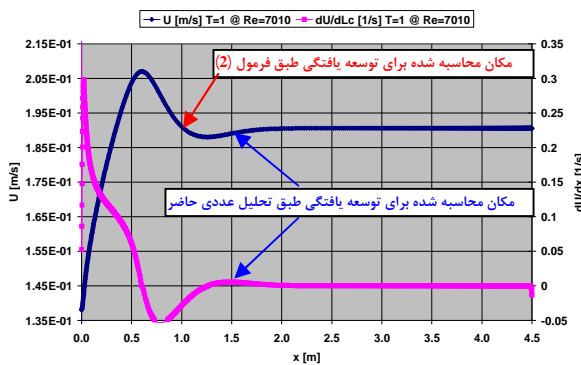
¹ دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Khaleghi79@yahoo.com

² دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Fard_m@um.ac.ir

چکیده

که این روابط مبتنی بر ثبات پروفیل سرعت محوری در راستای جریان هستند. البته با توجه به اینکه در رابطه (2) مشخصه‌های خاص جریان متلاطم حضور موثر ندارند و صرفاً بر عدد رینولدز و قطر تکیه شده است بدیهی است که نبایستی از این فرمول چندان توقع کاربردی زیادی داشت به عنوان مثال شدت تلاطم که به نوعی بیانگر میزان نوسانات سرعت است در این رابطه لحاظ نشده است و برای دو جریان با رینولدز و هندسه یکسان ولی شدت تلاطمی مختلف (مثلاً 0/03% و 10%) طول توسعه یافتگی یکسان بدست می‌آید که عملاً اینگونه نیست. در جریانهای دارای پروفیل سرعت متغیر با زمان (شتابدار زمانی) بر اساس تحقیقات مراجع [3]، [4]، [5] و [6] رفتار مشخصه‌های سیال تفاوت فاحشی با جریان غیر شتابدار دارد. از این رو بدیهی است بایستی طول توسعه یافتگی در چنین رژیم جریانی مورد مطالعه مجدد و در صورت لزوم بازنگری قرار گیرد.

شکل 1 نشان دهنده تغییرات مشخصه سرعت سیال و مشتق آن نسبت به راستای حرکت برای مرکز لوله مورد مطالعه بر حسب طول می‌باشد.



شکل 1: تغییرات سرعت سیال و مشتق آن نسبت به راستای حرکت بر حسب طول در مرکز لوله

طول ناحیه توسعه یافتگی برای این عدد رینولدز (7000) با استفاده از فرمول (2) برابر 0/978 متر بدست می‌آید و همانطور که در شکل 1 ملاحظه می‌شود با صرف نظر از توجه به مقدار مشتق سرعت و صرفاً با نگرش فیزیکی به نمایه تغییرات سرعت بر حسب مکان (بدون نگرش ریاضی) مقدار محاسبه شده تقریباً درست به نظر می‌رسد. اما نگاه دقیق تر و همچنین دخیل نمودن مقدار مشتق سرعت مبین این نکته اساسی است که طول توسعه یافتگی تا مکان محاسبه شده طریق فرمول نمی‌باشد. با توجه به میزان تعریف و اهمیت استفاده کننده طول های مختلفی را می‌توان به عنوان طول ناحیه در حال توسعه یافته معرفی نمود. در این تحقیق برای

اصولاً در مطالعه جریان درون لوله، ناحیه توسعه یافته مد نظر است. بنابراین تشخیص ناحیه توسعه یافته برای بررسی میدان جریان در لوله دارای اهمیت ویژه‌ای است. تا کنون در مبحث طول توسعه یافتگی در لوله‌ها از فرمولهای مشهور مربوطه استفاده می‌شود. در این تحقیق نتایج حاصل از تحلیل عددی با مقادیر محاسبه شده از فرمولهای ارائه شده برای جریان پایا در مراجع مختلف، مقایسه گردیده است. نتایج تحلیل عددی اختلاف فاحشی را با مقادیر محاسبه شده از فرمول نشان می‌دهد 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 می‌رسد که مقادیر فرمول که برای تشخیص طول ناحیه در حال توسعه، بعضاً مبتنی بر عدم تغییر در مشخصه‌های ماکروسکوپی جریان (همانند سرعت) بنا شده است، از پیش بینی صحیح تغییرات مشخصه‌های میکروسکوپی جریان (مانند نوسانات سرعت) که ماهیت جریان‌های متلاطم قائم به آنست بازماند. در این تحقیق طول توسعه یافتگی لوله از زاویه نگرش به مشخصه‌های سیال در جریان متلاطم شتابدار مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است و نهایتاً ایده ای جدید پیرامون این موضوع ارائه شده است که می‌تواند منشاء تغییر نگرشی عمیق به مقوله توسعه یافتگی جریان متلاطم در لوله‌ها بخصوص برای جریانهای شتابدار باشد.

کلمات کلیدی: جریان شتابدار، متلاطم، در حال توسعه، ورودی لوله،

مدل RSM

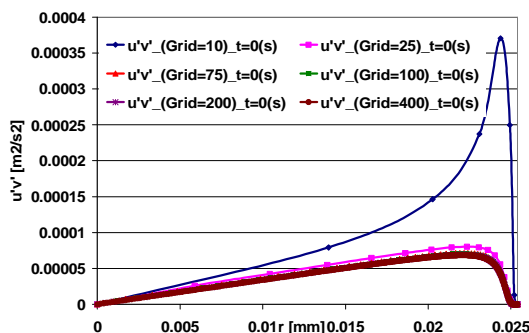
مقدمه

یکی از مقولات مطرح در مطالعه جریان در لوله، 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 می‌توان ناحیه توسعه یافته در لوله فرض کرد؟ پاسخ به این سوال در نگرش کیفی به مقوله توسعه یافتگی معین شده است. طبق تعریف "ناحیه توسعه یافته با پایان تغییرات مشخصه‌های سیال در راستای حرکت آغاز می‌گردد." و برای آن روابط (1) و (2) به ترتیب برای جریانهای آرام و متلاطم در ورودی لوله‌ها ارائه شده است [1]:

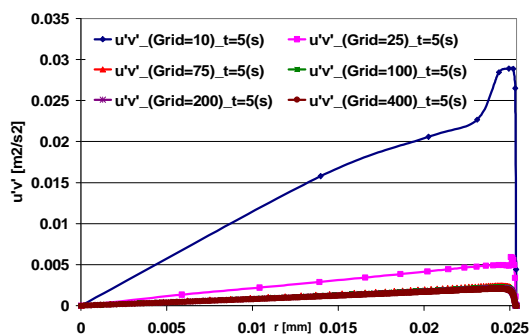
$$L_{\text{Laminar}} = 0.058 \text{ Re}_D D \quad (1)$$

$$L_{\text{Turbulence}} = 4.4 \text{ Re}_D^{1/6} D \quad (2)$$

و شدت تلاطم انجام شده است ولی برای اختصار به نحوه استقلال در راستای شعاع برای دو گام زمانی ابتدا و انتهای دوره شتابدهی و برای مشخصه انرژی جنبشی تلاطم در شکل های (2) و (3) منعکس شده است. همانطور که در این شکلها مشخص است مشخصه ها با تعداد نقاط کم انطباق مناسبی ندارند و این موضوع دال بر این مهم است که تغییرات در تعداد شبکه می تواند باعث ایجاد تغییر در نتایج شود. افزایش تعداد نقاط از 200 به 400 نقطه چون دارای ثبات بوده و از آنجائیکه نتایج 200 نقطه با 1000 نقطه (که در شکل نیامده) نیز یکسان است بنابراین استقلال از تعداد نقاط شبکه در 200 نقطه مطلوب لحاظ می گردد. برای سایر راستاها نیز دقیقاً به روش مشابه استقلال از شبکه بررسی گردید. در هر صورت نتایج از شبکه و گام زمانی مستقل گردیدند.



شکل (2) - بررسی اثر تعداد نقاط در راستای شعاعی برای تعداد 10، 25، 50، 75، 100، 200 و 400 نقطه برای مشخصه تنش برشی تلاطمی بر حسب شعاع برای زمان آغاز دوره شتابدهی



شکل (3) - بررسی اثر تعداد نقاط در راستای شعاعی برای تعداد 10، 25، 50، 75، 100، 200 و 400 نقطه برای مشخصه تنش برشی تلاطمی بر حسب شعاع برای زمان پایان دوره شتابدهی

روابط حاکم

مدل مورد استفاده RSM است که این مدل توسط رودی (Rodi) [7] پیشنهاد شده است. معادلات حاکم بر رژیم جریان مورد مطالعه به شرح زیر می-باشند. این معادلات شامل مدل پیوستگی، ممنوم و مدل‌های آشفتگی است، معادله پیوستگی در غیاب تغییرات در جهت θ را می توان به شکل زیر نوشت:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

معادله ممنوم در غیاب نیروهای حجمی به شکل عمومی به صورت زیر است:

$$r \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + m \nabla^2 \mathbf{V} \quad (7)$$

که در آن از اپراتورهای زیر استفاده شده است:

ایجاد وحدت رویه از یک سو و همچنین پذیرش این موضوع بسیار مهم که با توجه به ماهیت نوسانی مشخصه‌های میکروسکوپی و همچنین کمیات خاص جریان متلاطم همانند لزجت تلاطمی، انرژی جنبشی تلاطم، نوسانات سرعت و ... که عملاً بدون تغییر فرض نمودن آنها به طور کامل غیر ممکن است با معیار 95% شیب افقی به عنوان شاخص عدم تغییر مشخصه - به عنوان مکان آغاز توسعه یافتگی - تحلیل عددی دنبال می شود. بدیهی است استحصال شیب 100% افقی برای مشخصه‌های خاص جریان متلاطم نیاز به زمان و طول بیشتری جهت توسعه یافتگی کامل دارد که با کمی اغماض و به جهت عملیاتی شدن تحقیق می توان از آن صرف نظر کرد. با توضیحات فوق طول ناحیه توسعه یافتگی برای مشخصه سرعت جریان در مرکز لوله و با توجه به شرایط حاکم بر موضوع مورد تحقیق برابر 1/49 متر بدست می-آید.

شرایط هندسی، مشخصات سیال و جنبه های عددی

در این تحقیق لوله‌ای به قطر 50/8 میلیمتر (2 اینچ) و طول 4/5 متر مدلسازی شده است. سیال عامل آب با چگالی 1000 kg/m^3 و لزجت $0/001 \text{ pa.s}$ در شرایط دما ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. شدت تلاطم در این تحقیق 3% لحاظ شده است. برای کلیه تحلیل‌ها سرعت ورودی آب در آغاز دوره 0/138 m/s و در پایان دوره شتابدهی 0/891 m/s لحاظ شده است. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاه برای دوره شتابدهی 5 و 45 ثانیه موجود بود از همین زمانها برای اعتباردهی کد استفاده شده است. پس از اثبات کارایی کد [3] طول دوره شتابدهی برای زمانهای 1، 5، 10، 20 و 40 ثانیه در نظر گردید. مدل تلاطمی مورد استفاده در این تحقیق مدل RSM و فضای حل دو بعدی تقارن محوری می‌باشد. مش بکار گرفته شده 600×200 است با ضریب انبساط 1/01 در جهت محوری و ضریب انبساط 1/01 در جهت شعاعی و از گام زمانی 0/01 ثانیه به عنوان معیار افزایش زمان تا تکمیل کل دوره شتابدهی استفاده گردید. بهر حال نتایج از ابعاد مش و همچنین گام زمانی مستقل گردیدند. شرایط مرزی اعمال شده به صورت شرط عدم لغزش در دیواره طبق رابطه (3) و همچنین شرط شیب صفر در مرکز طبق رابطه (4) و سرعت ورودی طبق رابطه (5) تعریف شده‌اند.

$$\mathbf{f} = 0 \quad \mathbf{f} \equiv u, v, u', v', u'v', \dots \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial r} = 0 \quad \mathbf{f} \equiv u, v, u', v', u'v', \dots \quad (4)$$

$$u(r, x, t) = (u_f - u_i) * \frac{t}{T} + u_i \quad (5)$$

$$T \equiv 1, 5, 10, 20, 40 \quad s$$

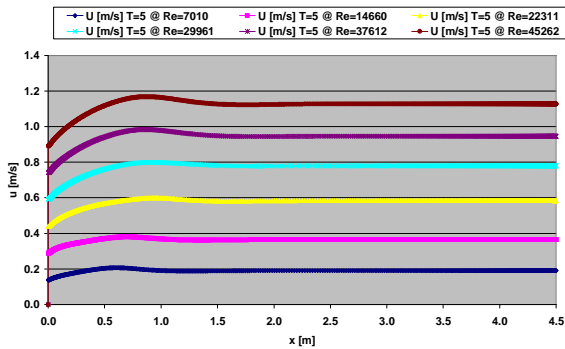
$$u_i = 0.138 \text{ m/s} \quad u_f = 0.891 \text{ m/s}$$

روابط مورد استفاده در این تحلیل برای معادلات پیوستگی، ممنوم در جهات X, Γ براساس دستگاه مختصات استوانه ای بوده‌اند. گسسته سازی بر اساس دقت مرتبه دوم مکان در هر دو جهت X, Γ و همچنین در راستای بعد زمان صورت گرفته است. حل معادلات همزمان توسط روش TDMA انجام شده است.

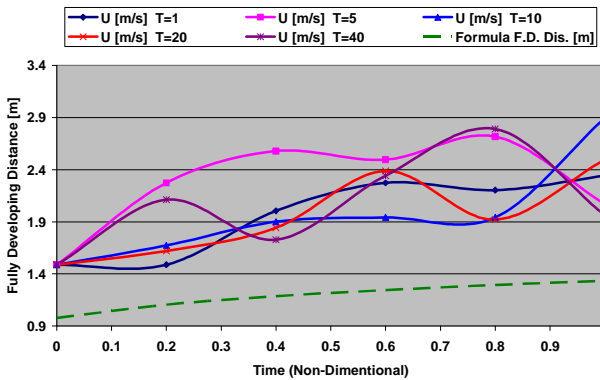
مستقل سازی از شبکه

عملیات مستقل سازی برای کلیه راستاها و گام یک ثانیه ای در دوره شتابدهی برای مشخصه های انرژی جنبشی تلاطمی، تنش برشی تلاطمی

همانطور که قبلا گفته شد مبنای محاسبه طول توسعه یافتگی در تحلیل عددی حاضر اکتفا صرف به مقدار کمی فیزیکی مشخصه نیست بلکه تغییرات مقدار مشتق آن در راستای طولی نیز ملاک عمل بوده که 95% افقی شدن (عدم تغییر مشخصه) به عنوان معیار لحاظ شده است. شکل 6 مبین این نکته مهم است که هر چند فرمول و محاسبات عددی روند افزایشی در گذر زمان را پیش بینی می کنند اما شیب این تغییرات برای جریان متلاطم شتابدار بیشتر از مقادیر محاسبه شده از فرمول است.

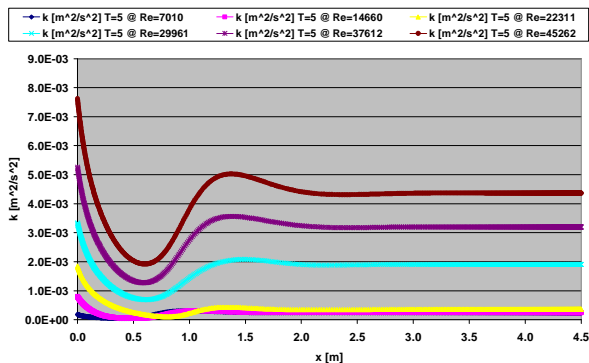


شکل 5: تغییرات سرعت سیال نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی T=5 s در رینولدزهای مختلف



شکل 6: تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای سرعت اصلی جریان نسبت به زمان بی بعد (رینولدز) در مرکز لوله برای دوره شتابدهی (T) های مختلف و فرمول (2)

دومین مشخصه مورد مطالعه انرژی جنبشی تلاطمی است که این بار برای نمونه تغییرات این پارامتر در شکلهای 7 و 8 برای دوره های شتابدهی T=5s و T=40s آورده شده اند.



شکل 7: تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی T=5 s در رینولدزهای مختلف

طول توسعه یافتگی برای این مشخصه جریان (که یک مشخصه خاص برای جریان متلاطم است) با افزایش زمان، زیاد می شود.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \quad (8)$$

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{V} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial x^2} \quad (9)$$

$$\mathbf{r} \cdot \nabla = v \frac{\partial}{\partial r} + u \frac{\partial}{\partial x} \quad (10)$$

معادلات دیفرانسیل حل شده برای دو جهت r, θ عبارتند از:

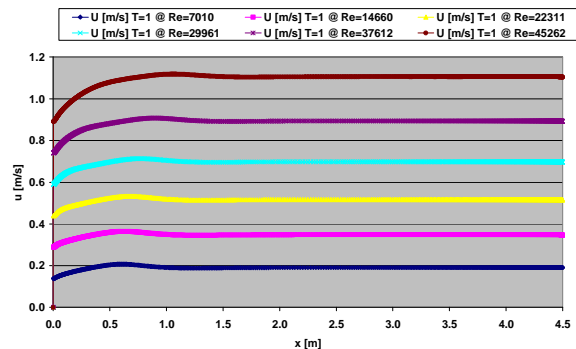
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (r \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (r u_k \overline{u'_i u'_j}) = \\ & - \frac{\partial}{\partial x_k} [r \overline{u'_i u'_j u'_k} + p (d_{kj} u'_i + d_{ik} u'_j)] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(m \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_j} \right) - r \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \\ & - r b (g_i \overline{u'_j q} + g_j \overline{u'_i q}) + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \\ & - 2m \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - 2r \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} e_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} e_{jkm}) \end{aligned} \quad (11)$$

معادلات فوق بایستی توسط روشهای عددی موجود حل شوند تا میدان مشخصه های سیال از جمله میدان سرعت، فشار، نوسانات سرعت در راستاهای مختلف، انرژی جنبشی تلاطمی، اتلافات، تنش برشی تلاطمی و ... بدست آیند

تحلیل عددی

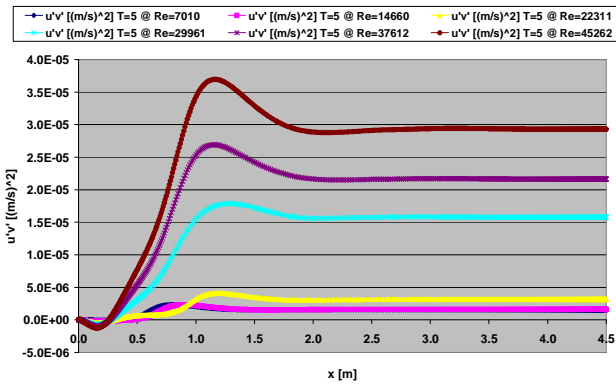
در زیر نتایج تحلیل عددی برای محاسبه طول توسعه یافتگی برای پارامترهای مختلف جریان بخصوص مشخصه های تلاطمی جریان آورده شده است.

اولین مشخصه مورد مطالعه سرعت اصلی جریان است. با توجه به اینکه روند کلی تغییرات سرعت اصلی بر حسب زمانهای مختلف تقریباً یکسان است برای نمونه شکلهای 4 و 5 نمایه تغییرات سرعت بر حسب طول برای دو زمان افزایش سرعت مختلف یعنی T=1 s و T=5 s آورده شده است. همانطور که در شکلهای 4 و 5 دیده می شود با افزایش عدد رینولدز طول توسعه یافتگی افزایش می یابد.

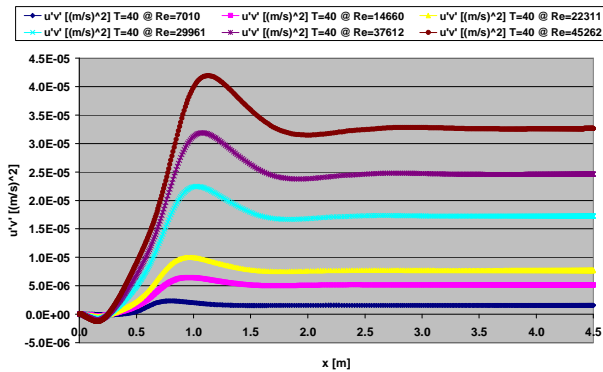


شکل 4: تغییرات سرعت سیال نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی T=1 s در رینولدزهای مختلف

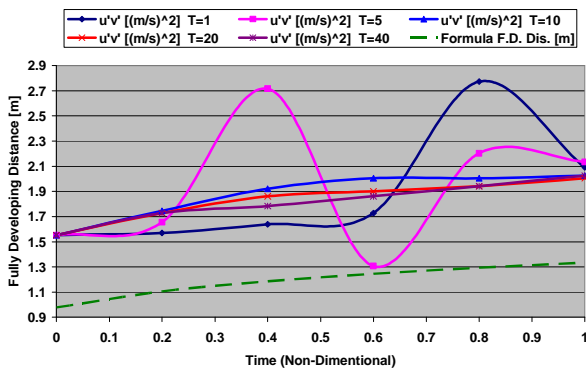
برای بررسی میزان تاثیر شتاب (طول دوره شتابدهی T که در آن سرعت از 0/138 m/s به 0/891m/s می رسد) می توان از شکل 6 استفاده نمود. در شکل 6 تغییر طول توسعه یافتگی بر حسب زمان بی بعد (یا همان رینولدز) برای دوره های مختلف شتاب با مقدار محاسبه شده از طریق فرمول (2) مقایسه شده است.



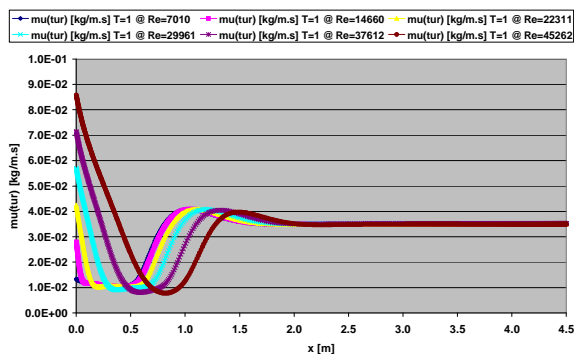
شکل 10: تغییرات تنش تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=5$ s در رینولدزهای مختلف



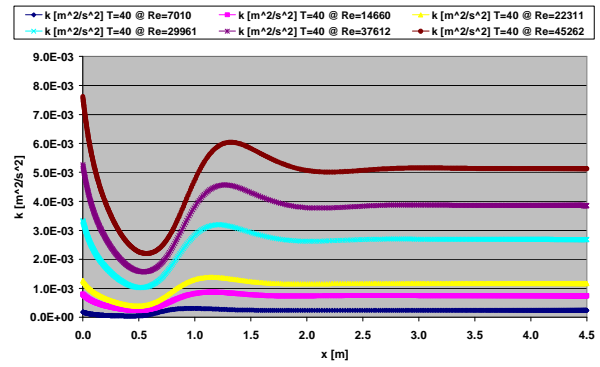
شکل 11: تغییرات تنش تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=40$ s در رینولدزهای مختلف



شکل 12: تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای تنش تلاطمی جریان نسبت به زمان بی بعد (رینولدز) در مرکز لوله برای دوره شتابدهی (T) های مختلف و فرمول (2)

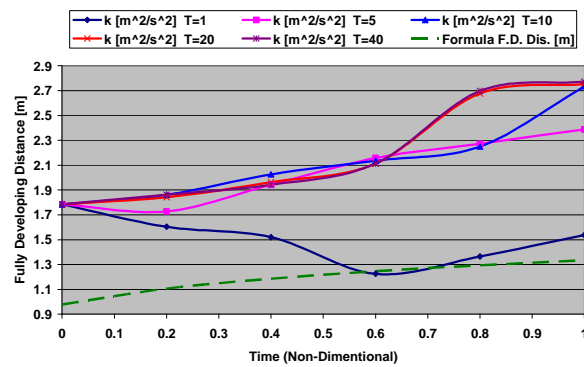


شکل 13: تغییرات لزجت تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=1$ s در رینولدزهای مختلف



شکل 8: تغییرات انرژی جنبشی تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=40$ s در رینولدزهای مختلف

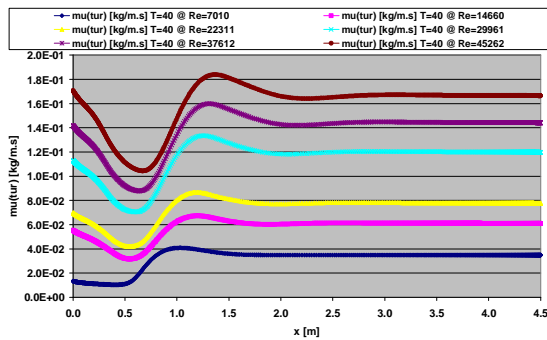
در شکل 9 تغییرات طول توسعه یافتگی بر اساس انرژی جنبشی تلاطمی جریان نسبت به زمان بی بعد (رینولدز) در مرکز لوله برای دوره شتابدهی (T) های مختلف با مقادیر محاسبه شده از فرمول (2) مقایسه شده است. نکته قابل تامل در این شکل این است که طول بدست آمده برای دوره های مختلف شتابدهی تقریباً یکسان هستند (بجز در $T=1$ s) ضمن اینکه همانند مشخصه سرعت اصلی شیب افزایش مقدار طول توسعه یافتگی نسبت به فرمول بیشتر است.



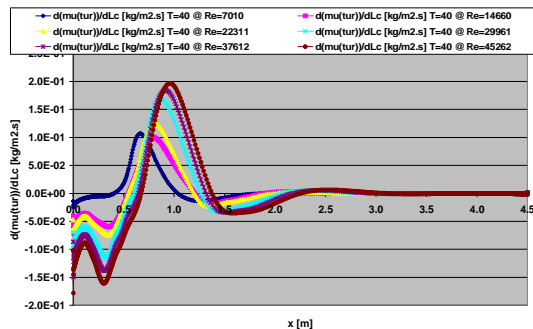
شکل 9: تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای انرژی جنبشی تلاطمی جریان نسبت به زمان بی بعد (رینولدز) در مرکز لوله برای دوره شتابدهی (T) های مختلف و فرمول (2)

شکلهای 10 و 11 رفتار یکی دیگر از مشخصه جریان متلاطم را به تصویر می کشند. این مشخصه تنش تلاطمی است که همانند سایر مشخصه های جریان متلاطم بعد از نوساناتی که در راستای حرکت سیال دارد به حالت آرامش و ثبات می رسد. آنچه در این شکلها نمود دارد این است که با افزایش زمان دوره شتابدهی (یا همان کاهش شتاب) هر چند به لحاظ کمی مقدار تنش تلاطمی افزایش می یابد اما روند کلی رفتار و نمایه حرکت مشخصه تقریباً یکسان است. کما اینکه در شکل 12 که همین طول توسعه یافتگی برای این مشخصه مورد بررسی قرار گرفته است کاملاً مشهود است که طول توسعه یافتگی برای دوره های شتابدهی $T > 5$ s تقریباً بر هم منطبق شده است.

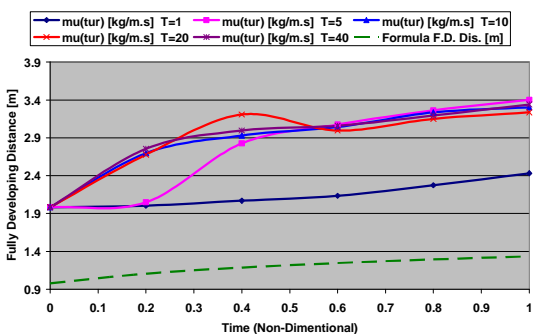
شکل 12 مبین این نکته مهم است که هر چند به لحاظ مقدار عددی طول توسعه یافتگی برای جریان متلاطم ناپایا با فرمول (2) متفاوت است اما با یک پرش نسبتاً ثابت، نمایه بی یکسان دارند. البته این یک قاعده قابل تعمیم نیست و بخصوص برای جریان های با شتاب زیاد (طول دوره شتاب دهی کوتاه) رفتار نوسانی طول توسعه یافتگی مشاهده می شود.



شکل 17: تغییرات لزجت تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=40$ s در رینولدزهای مختلف



شکل 18: تغییرات مشتق لزجت تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=40$ s در رینولدزهای مختلف



شکل 19: تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای لزجت تلاطمی جریان نسبت به زمان بی بعد در مرکز لوله برای دوره شتابدهی (T) های مختلف و فرمول (2)

در جداول 1 تا 6 طول توسعه یافتگی برای مشخصه های مختلف، در دوره های مختلف شتاب دهی با فرمول (2) مقایسه شده است.

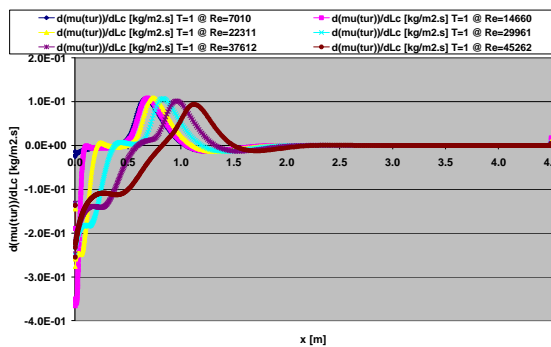
جدول 1: طول توسعه یافتگی (m) در $t^*=0$

Ramp up Time[s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [(m/s) 2]	μ_t [kg/m.s]
همه	1.49	1.78	1.55	1.98
فرمول	ثابت و برابر 0.98			

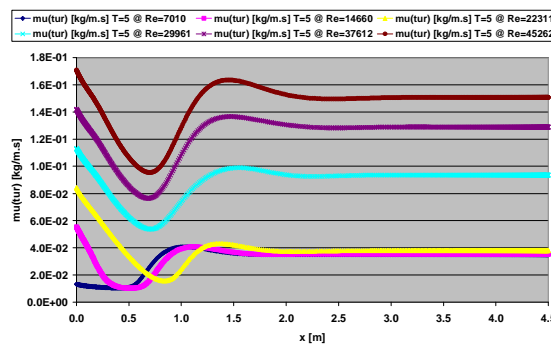
جدول 2: طول توسعه یافتگی (m) در $t^*=0.2$

Ramp up Time[s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [(m/s) 2]	μ_t [kg/m.s]
1	1.49	1.60	1.57	2.00
5	2.27	1.73	1.66	2.05
10	1.67	1.86	1.03	2.70
20	1.62	1.84	1.73	2.68
40	2.11	1.86	1.73	2.75
فرمول	ثابت و برابر 1.11			

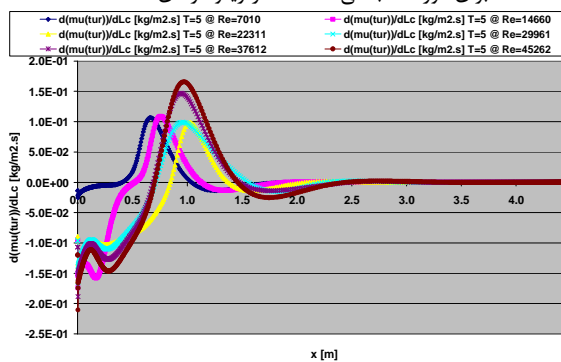
از شکل 13 تا 19 یکی از مهم ترین ویژگیهای جریانهای متلاطم که همان لزجت تلاطمی است مورد بحث و تحلیل قرار می گیرد. از آنجا که این مشخصه برای رسیدن به ثبات و صفر شدن شیب تغییرات آن به طول بیشتری نیاز دارد و از طرفی بیانگر ترکیبی از سایر مشخصه های تلاطمی است می تواند بعنوان نماینده قابل قبولی از مشخصه های جریان مورد مطالعه عمیق تر قرار گیرد. رفتار این مشخصه و تغییرات مشتق آن نسبت به راستای حرکت برای سه دوره شتابدهی مختلف $T=1s$ ، $T=5s$ و $T=40s$ در شکلهای 13 تا 18 آورده شده اند.



شکل 14: تغییرات مشتق لزجت تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=1$ s در رینولدزهای مختلف



شکل 15: تغییرات لزجت تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=5$ s در رینولدزهای مختلف



شکل 16: تغییرات مشتق لزجت تلاطمی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=5$ s در رینولدزهای مختلف

در شکل 19 تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای لزجت تلاطمی جریان نسبت به زمان بی بعد (رینولدز) در مرکز لوله برای دوره شتابدهی (T) های مختلف با مقادیر محاسبه شده از فرمول (2) مقایسه شده است. نکته قابل تأمل در این شکل این است که در جریانهای متلاطم ناپایا نمی توان از روابط مربوط به طول توسعه یافتگی در جریان متلاطم پایا - فرمول (2) - بهره گرفت.

جدول 3: طول توسعه یافتگی (m) در $t^*=0.4$

Ramp up Time[s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
1	2.00	1.52	1.64	2.07
5	2.58	1.94	2.72	2.83
10	1.90	2.03	1.92	2.93
20	1.84	1.96	1.05	3.21
40	1.73	1.94	1.78	3.00
فرمول	ثابت برابر 1.19			

جدول 4: طول توسعه یافتگی (m) در $t^*=0.6$

Ramp up Time[s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
1	2.27	1.22	1.73	2.13
5	2.50	2.16	1.31	3.07
10	1.94	2.13	2.00	3.04
20	2.39	2.11	1.90	3.00
40	2.34	2.11	1.86	3.06
فرمول	ثابت و برابر 1.25			

جدول 5: طول توسعه یافتگی (m) در $t^*=0.8$

Ramp up Time[s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
1	2.20	1.36	2.77	2.27
5	2.72	2.27	1.17	3.26
10	1.94	2.25	1.12	3.24
20	1.92	2.68	1.94	3.15
40	2.79	2.70	1.94	3.19
فرمول	ثابت و برابر 1.29			

جدول 6: طول توسعه یافتگی (m) در $t^*=1$

Ramp up Time[s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
1	2.34	1.54	2.09	2.43
5	2.07	2.39	1.18	3.40
10	2.90	2.73	1.16	3.30
20	2.50	2.75	1.15	3.24
40	1.96	2.77	2.03	3.34
فرمول	ثابت و برابر 1.33			

نتیجه

نمودارها و جداول این تحقیق نشان دهنده این واقعیت مهم هستند که در بررسی و تشخیص ناحیه توسعه یافته جریان نایستی صرفاً به معیار سرعت محوری بسنده نمود بلکه به سایر مشخصه های جریان بخصوص در جریان متلاطم به مشخصه های تلامپی (مانند انرژی جنبشی تلامطم، لزجت تلامپی، اتلافات و ...) توجه کافی را مبذول داشت. طبق تعریف کمی طول توسعه یافتگی طولی است که تغییرات مشخصه های در راستای حرکت ثابت (صفر) می شود. با توجه به همین تعریف چون برای جریان شتابدار رفتار مشخصه های سیال دست خوش تغییراتی می شود (مراجع [3]، [4]، [5] و [6]) و از طرفی جریان متلاطم بطور ذاتی نوسانی است، بنابراین فرمولهای مربوط به طول توسعه یافتگی که برای جریانهای دائم مورد استفاده قرار می گرفت، کارائی و اعتبار خود را از دست داده و بایستی از روابط اصلاح شده که وابسته به شرایط دوره شتابدهی است استفاده شود. مقایسه بین طول توسعه یافتگی برای جریان غیر دائم مورد مطالعه در این تحقیق با جریان دائم معادل که در جداول آمده است، نشان می دهند تفاوت زیادی طول توسعه یافتگی برای دو نوع رژیم جریان دائم و غیردائم وجود دارد.

فهرست علائم

D	قطر لوله، [m]
L	طول توسعه یافتگی جریان، [m]
r	موقعیت در راستای شعاعی، [m]
Re	عدد رینولدز، [-]
t	زمان-زمان (بی بعد شتابدهی)، [s]-[*]
T	زمان دوره شتابدهی، [s]
u	سرعت (نوسانات) در جهت محوری، [m/s]
v	سرعت (نوسانات) در جهت شعاعی، [m/s]
U	سرعت میدان جریان، [m/s]
x	موقعیت در راستای محوری، [m]

علائم یونانی

κ	انرژی جنبشی تلامطم، [m^2/s^2]
r	چگالی، kg/m^3
μ	لزجت سیال، $kg/m.s$
θ	جهت زاویه ای در مختصات استوانه ای

زیرنویس

i	مقدار اولیه
f	مقدار نهائی

بالانویس

'	پریم، نوسانات
*	بی بعد

مراجع

- [1] Dr. Hermann Schlichting, 1978. Boundary Layer Theory Seventh Edition. McGraw Hill Series in Mechanical Engineering, p. 451.
- [2] H. L. Langhaar, "Steady Flow in the Transition Length of a Straight Tube," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 9, 1942.
- [3] Khaleghi A., Pasandideh-Fard M., Malek-Jafarian M., Yongmann M. Chung, "Assessment of common turbulence models under conditions of temporal acceleration in a pipe", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 1, pp. 25-33, 2009.
- [4] S. He, C. Ariyaratne, A.E. Vardy, "A computational study of wall friction and turbulence dynamics in accelerating pipe flows", *Journal of the Computers & Fluids* 37, 2008, pp.674-689
- [5] Greenblatt, D. and Moss, E., "Rapid Temporal Acceleration of a Turbulent Pipe Flow", *Journal of Fluid Mechanics*, 514, 65-75, 2004.
- [6] He, S. and Jackson, J. D., "A Study of Turbulence under Conditions of Transient Flow in a Pipe," *Journal of Fluid Mechanics*. 408, 1-38, 2000.
- [7] Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W. (1975), "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure.", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 68(3), pp. 537-566