

حل عددی جریان شتابدار آشفته در ورودی لوله*

علی خالقی^(۱) محمود پسندیده فرد^(۲) علی رضا تیمورتاش^(۳)

چکیده در این مقاله با حل عددی یک، دو و سه بعدی جریان شتابدار آشفته در ورودی لوله به بررسی طول ناحیه توسعه یافته و تحلیل سایر مشخصه‌های جریان، پرداخته شده است. مدل آشفتگی مورد استفاده SST انتخاب گردید. این تحقیق نشان می‌دهد که هر سه حالت یک، دو و سه بعدی، روند کلی را به خوبی داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کنند. نتایج در بُعد زمان و بُعد مکان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مشخصه‌های خاص جریان آشفته مانند انرژی جنبشی آشفتگی در حالت یک بعدی نتایج قابل قبول‌تری در مقایسه با مقادیر تجربی نشان می‌دهد. همچنین نتایج دو و سه بعدی بهم بسیار نزدیک هستند. در مجموع با توجه به پیچیدگی‌های حل سه، دو و یک بعدی و توجه به میزان انطباق نتایج، استفاده از مدل یک بعدی در قسمت توسعه یافته جریان توصیه می‌شود ولی در قسمت در حال توسعه جریان حل دوبعدی کفایت می‌کند. نتایج این تحقیق نشان دهنده این واقعیت مهم است که در بررسی و تشخیص ناحیه توسعه یافته جریان نباید تنها به معیار سرعت محوری بسنده نمود بلکه به سایر مشخصه‌های جریان (مانند: انرژی جنبشی آشفتگی، لزجت آشفتگی، اتلافات و ...) توجه کافی مبذول داشت. با توجه به تعریف ناحیه توسعه یافته چون برای جریان شتابدار رفتار مشخصه‌های سیال دست خوش تغییرات می‌شود، بنابراین روابط مربوط به طول توسعه‌یافتگی که برای جریان‌های پایا مورد استفاده قرار می‌گرفت، کارایی و اعتبار خود را از دست داده و باید از روابط اصلاح شده که وابسته به شرایط دوره شتاب‌دهی است استفاده شود. مقایسه بین طول توسعه‌یافتگی برای جریان ناپایای مورد مطالعه در این تحقیق با جریان پایای معادل نشان می‌دهند تفاوت زیادی بین طول توسعه‌یافتگی برای دو نوع رژیم جریان پایا و ناپایا وجود دارد.

واژه‌های کلیدی جریان شتابدار، مدل SST، جریان ناپایا، جریان درون لوله، جریان آشفته

Numerical Simulation of Accelerating Flows in Inlet of Pipes

A. Khaleghi

M. Pasandideh Fard

A. Teymourash

Abstract In this paper using one, two and three dimensional simulations, the accelerating flows in developing inlet pipe region are considered numerically. The developing length calculated based on different turbulence parameters is studied thoroughly. The SST turbulence model in comparison with recent reported experimental data have been used to achieve reliable predictions. The predictions obtained using all 1, 2, and 3 dimensional cases are generally the same and follow the experiments well. Thus, it seems that one dimensional simulation in fully developed region is sufficient. However, for the inlet region in developing state a two dimensional axisymmetric analysis is required. This research shows that calculating the developing length based on only mean averaged velocity is not adequate, but also turbulence kinetic energy and viscosity must be paid enough attention. Further, the comparison between steady and unsteady flows for the developing length shows that they are very different. This length also depends on both the value of flow acceleration and turbulence delay time in addition to Reynolds number and pipe diameter.

Key Words Unsteady turbulent flow, accelerating pipe flow, developing length, inlet pipe flows

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۳/۵، نسخه پذیرش آن در تاریخ ۸۹/۱۱/۳۱ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۰/۵/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

جریان آشفته از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است که تاکنون به صورت تحلیلی، میدان مشخصه‌های آن محاسبه نشده‌اند. جریان آشفته از حیث تغییرات پروفیل سرعت ورودی با زمان، به دو گروه جریان آشفته‌ی پایا (پروفیل سرعت ثابت با زمان) و جریان آشفته‌ی ناپایا (پروفیل سرعت متغیر با زمان) تقسیم می‌شوند. همچنین جریان آشفته‌ی ناپایا نیز به دو رژیم جریان آشفته‌ی شتابدار پرودیک و غیر پرودیک قابل تقسیم است.

جریان آشفته‌ی ناپایا درون لوله به دلیل اهمیت عملی و سهولت تولیدش مورد توجه خاص محققین بوده است. مطالعه این نوع جریان توسط شامر و کیت [1] و شامر و همکاران [2] و برنل و همکاران [3,4] که در تحقیقاتشان از سیم داغ استفاده کردند و تو و راماپراین [5,6] و تاردو و همکاران [7] و گرین بلات و موز [8,9] و اسکوتی و پایوملی [10] که در مطالعات خود از سیستم‌های بادسنجی لیزری داپلر تک پرتویی استفاده کردند، انجام شد. متغیرهای اساسی جریان شتابدار پرودیک درون لوله، دامنه و فرکانس اعمالی و نرخ جریان متوسط هستند. در مطالعات مذکور مشخص گردید که تأثیرات عوامل فوق بر روی سرعت و فرکانس ارتعاش میدان‌های اغتشاش و نرخ جریان متوسط می‌تواند قابل توجه باشد هرچند که تأثیرات دامنه کم است. علاوه بر مطالعات تجربی مختلف، عده‌ای از محققان از مدل‌های رایانه‌ای استفاده کردند. به عنوان مثال اهمی و همکاران [11,12]، کیتا و همکاران [13]، شامر و ویگنانسکی [2] از مدل اغتشاشی صفر معادله‌ای استفاده نموده‌اند. پژوهشگرانی چون مورفی و پرنتر [14]، کوک، مورفی و اون [15]، راماپراین و تو [16] و Kirmse [17] از مدل‌های یک معادله‌ای اغتشاش برای شبیه‌سازی استفاده نمودند و

هم‌چنین کوستیکس [18] و بلوندیوکس و کولومبینی [19] مدل‌های دو معادله‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های به‌دست آمده با آزمایش‌ها هم‌خوانی کمی دارد. البته هی و جاکسون [20] با استفاده از مدل k-ε با عدد رینولدز پایین که توسط لندر و شارما [21] معرفی شده بود و هم‌چنین کتونو اسماعیل [22] به موفقیت بیشتری دست یافته‌اند.

رفتار مشخصه‌های سیال در جریان شتابدار اصولاً با رفتار سیال در جریان یکنواخت کاملاً متفاوت می‌باشد. بروز تأخیر در پاسخ به مشخصه‌های آشفتگی جریان یکی از بارزترین این ویژگی‌هاست. در این تحقیق به بررسی تأثیر ابعاد حل در دقت نتایج و محاسبه طول ناحیه توسعه‌یافتگی جریان برای جریان شتابدار آشفته غیر پرودیک در لوله پرداخته شده است. نمونه مورد مطالعه، لوله‌ای به شعاع ۲۵/۴ میلی‌متر می‌باشد که جریان در ابتدا با عدد رینولدز ۷۰۰۰ وارد لوله شده و در طی دوره معینی که زمان دوره شتابدهی نامیده می‌شود به صورت خطی به ۴۵۲۰۰ می‌رسد. عدد رینولدز بر اساس سرعت متوسط و قطر لوله محاسبه شده و سیال عامل آب با چگالی 1000 kg/m^3 و لزجت $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ در نظر گرفته شده است. زمان دوره شتابدهی ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه لحاظ شده است. برای بررسی میزان تأثیر پارامتر بُعد هندسی بر دقت نتایج و نیز اطمینان از نتایج حل‌های عددی، این تحقیق برای شرایط یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. هر چند در آزمایش تجربی انجام شده توسط هی و جاکسون [20] از لوله‌ای به طول ۲ متر استفاده شده است اما در این تحقیق برای بررسی طول واقعی توسعه‌یافتگی جریان آشفته شتابدار، لوله‌ای به طول ۴/۵ متر شبیه‌سازی شده است. با توجه به ویژگی‌های مدل‌های مختلف آشفتگی از مدل‌های صفر معادله مانند مدل‌های اسمیت-سی بی (Cebeci-Smith) تا مدل‌های آشفتگی پنج و هفت

که این روابط مبتنی بر ثبات پروفیل سرعت محوری در راستای جریان است. بدیهی است در رابطه (۱-ب) مشخصه‌های خاص جریان آشفته، حضور مؤثر ندارند و صرفاً بر عدد رینولدز و قطر تکیه شده است. در جریان‌های دارای پروفیل سرعت متغیر با زمان (شتابدار زمانی) بر اساس تحقیقات مراجع [20,24,26,27] رفتار مشخصه‌های سیال تفاوت فاحشی با جریان غیر شتابدار دارد. از این رو بدیهی است باید طول توسعه‌یافتگی در چنین رژیم جریانی مورد مطالعه مجدد و در صورت لزوم بازنگری قرار گیرد. بخش عمده‌ی این تحقیق به بررسی این موضوع اختصاص دارد.

شرایط هندسی، مشخصات سیال و جنبه‌های

عددی

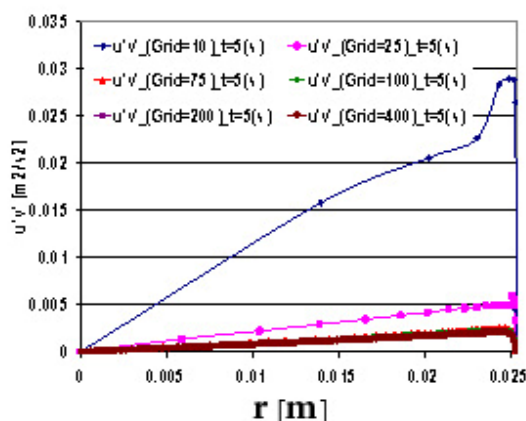
در این تحقیق لوله‌ای به قطر $50/8$ میلی‌متر (۲ اینچ) و طول $4/5$ متر مدل‌سازی شده است. سیال عامل آب با چگالی 1000 kg/m^3 و لزجت $0/001 \text{ Pa.s}$ در شرایط دما ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. شدت آشفتگی در این تحقیق ۳٪ لحاظ شده است. برای کلیه تحلیل‌ها سرعت ورودی آب در آغاز دوره $0/138 \text{ m/s}$ و در پایان دوره شتابدهی $0/891 \text{ m/s}$ لحاظ شده است که افزایش سرعت به صورت خطی اتفاق می‌افتد. با توجه به این‌که نتایج آزمایشگاه برای دوره شتابدهی ۵ و ۴۵ ثانیه موجود بود، از همین زمان‌ها برای اعتباردهی کد استفاده شده است. پس از اثبات کارایی کد [26] طول دوره شتابدهی برای زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد. مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق مدل SST و فضای حل یک بعدی، دو بعدی تقارن محوری و سه بعدی می‌باشد. شبکه‌بندی و گام‌های زمانی مختلفی جهت مستقل‌سازی (Independency) نتایج از مش‌بندی و گام زمانی مورد آزمایش قرار گرفت که در نهایت برای شبکه‌بندی در

معادله (به ترتیب برای دو و سه بعدی) (Reynold's Stress Model) و لحاظ نمودن میزان پیچیدگی‌ها و کارایی مدل‌ها بر اساس تحقیقات محققین مختلف، مدل ترکیبی از مدل‌های دو معادله‌ای $k-\omega$ و $k-\epsilon$ یعنی مدل آشفتگی (Shear Stress Transport) SST و با توجه به تحقیقات پژوهشگران این مقاله که در مرجع [۲۳] آمده است مدل SST انتخاب گردید. برای راستی آزمایی نتایج، چهار مقطع در راستای عمود بر دیواره به عنوان معیار سنجش در نظر گرفته شده‌اند. فاصله از دیواره $25/4$ ، $13/4$ ، $4/4$ ، $1/9$ میلی‌متر می‌باشند. این فاصله‌ها ضمن پراکندگی مناسب دارای مقادیر تجربی نیز هستند که به منظور تأیید نتایج از آن‌ها کمک گرفته می‌شود. نتایج تجربی مورد استفاده نتایج ارایه شده توسط وردی، آریاراته و هی [24] و هی و جاکسون [20] می‌باشند. از طرفی چند مشخصه اصلی مربوط به جریان، جهت مقایسه لحاظ گردیده‌اند. این مشخصه‌های مؤثر شامل سرعت محوری و انرژی جنبشی در هر مقطع می‌شود. هم‌چنین 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 سؤال در یک نگرش کیفی به مقوله‌ی توسعه‌یافتگی به دست آمده است. طبق تعریف «ناحیه توسعه یافته با پایان تغییرات مشخصه‌های سیال در راستای حرکت آغاز می‌گردد» و برای آن روابط (۱-الف و ۱-ب) به ترتیب برای جریان‌های آرام و آشفته در ورودی لوله‌ها ارایه شده است [25]:

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

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

۴۰۰ نقطه در راستای شعاعی در شکل آورده شده است) نیز یکسان است؛ بنابراین استقلال از تعداد نقاط شبکه در ۲۰۰ نقطه، مطلوب ارزیابی می‌گردد. در شکل‌های (۱-ج و ۱-د) تأثیر تعداد نقاط در راستای طولی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود تعداد نقاط ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کاملاً بر هم منطبق هستند و ثابت برای راستای طولی در ۸۰۰ نقطه اتفاق می‌افتد. با توجه به این نکته شبکه بندی در راستای یک بعدی (r) ۲۰۰ نقطه، شبکه دو بعدی (r, x) ۲۰۰×۸۰۰×۵۰ و شبکه سه بعدی (r, x, θ) ۲۰۰×۸۰۰×۵۰ لحاظ گردید. تعداد نقاط در راستای محیطی بر اساس حداقل مقدار ممکن قطاع برای خطی فرض کردن در نظر گرفته شد. همچنین گام زمانی بی بعد 5×10^{-2} (تقریباً معادل 2×10^{-4} ثانیه) معین شد که برای هر سه شبیه‌سازی یک، دو و سه بعدی کارآمد می‌باشد. در شکل‌های (۱-ه و ۱-و) روند مستقل سازی از گام زمانی آورده شده است. برای راستای محیطی نیز دقیقاً به روش مشابه استقلال از شبکه بررسی گردید. در هر صورت نتایج از شبکه و گام زمانی، مستقل گردیدند.

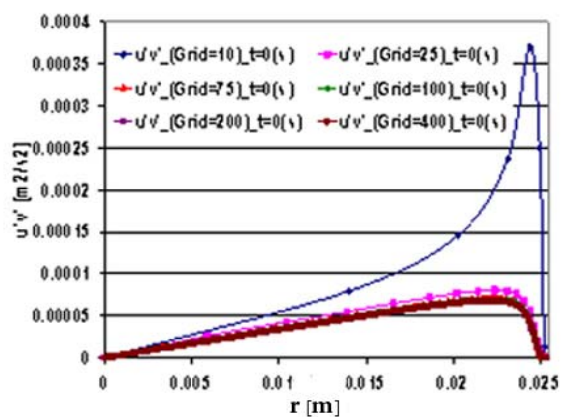


شکل ۱-ب بررسی اثر تعداد نقاط در راستای شعاعی برای تعداد ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ نقطه برای مشخصه تنش برشی آشفته بر حسب شعاع برای زمان پایان دوره شتابدهی

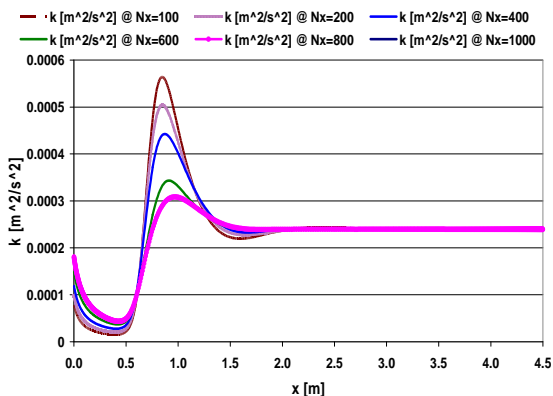
راستای شعاع از ۲۰۰ نقطه با ضریب انبساط ۱/۰۲ از کناره دیواره به مرکز، در راستای طول ۸۰۰ نقطه با ضریب انبساط ۱/۰۱ از ورودی به انتهای لوله و ۵۰ نقطه در جهت محیط لوله با توزیع یکنواخت، استفاده گردید. حل معادلات هم‌زمان توسط روش TDMA (Tridiagonal matrix algorithm) انجام شده است.

مستقل سازی از شبکه

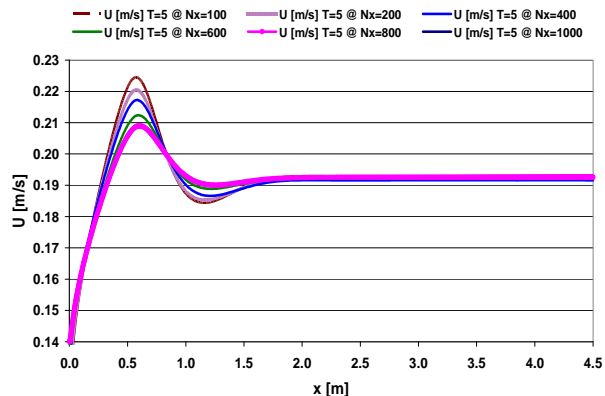
عملیات مستقل سازی برای کلیه راستاها و گام زمانی در دوره شتابدهی برای مشخصه‌های انرژی جنبشی آشفته، تنش برشی آشفته و شدت آشفتهگی انجام شده است؛ ولی برای اختصار، مشخصه انرژی جنبشی آشفتهگی در شکل‌های (۱-الف و ۱-ب) منعکس شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است مشخصه‌ها با تعداد نقاط کم، انطباق مناسبی ندارند و این موضوع دال بر این مهم است که تغییرات در تعداد شبکه می‌تواند باعث ایجاد تغییر در نتایج شود. افزایش تعداد نقاط از ۲۰۰ به ۴۰۰ نقطه، چون دارای ثابت بوده و از آنجا که نتایج ۲۰۰ نقطه با ۱۰۰۰ نقطه (البته تا



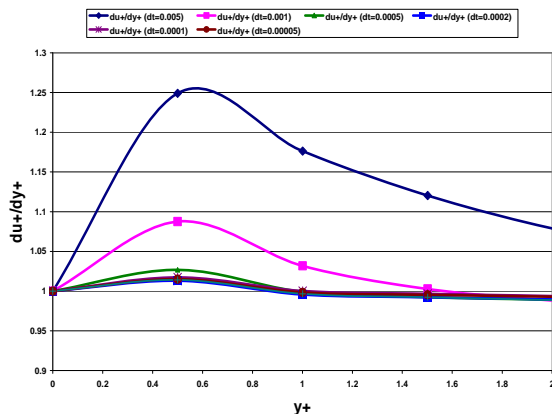
شکل ۱-الف بررسی اثر تعداد نقاط در راستای شعاعی برای تعداد ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ نقطه برای مشخصه تنش برشی آشفتهگی بر حسب شعاع برای زمان آغاز دوره شتابدهی



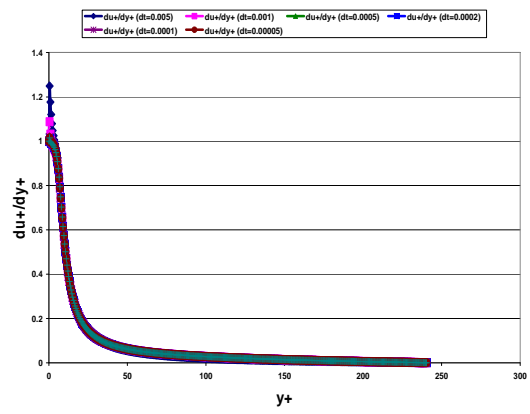
شکل ۱-د بررسی اثر تعداد نقاط در راستای طولی برای تعداد ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ نقطه برای مشخصه انرژی جنبشی آشفستگی بر حسب طول برای زمان آغاز دوره شتاب‌دهی



شکل ۱-ج بررسی اثر تعداد نقاط در راستای طولی برای تعداد ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ نقطه برای مشخصه سرعت اصلی بر حسب طول برای زمان آغاز دوره شتاب‌دهی



شکل ۱-ا و بررسی اثر گام زمانی بر نتایج برای du^+/dy^+ بر حسب y^+ در کنار دیواره برای گام‌های زمانی مختلف



شکل ۱-ه بررسی اثر گام زمانی بر نتایج برای du^+/dy^+ بر حسب y^+ از دیواره تا مرکز برای گام‌های زمانی متفاوت

بیان می‌دارد، انتقال تنش برشی اصلی در محاسبه و پیش‌بینی جریان‌ها با اختلاف شدید فشار معکوس بسیار اهمیت دارد. SST همچنین به یکی از رایج‌ترین مدل‌های مورد استفاده آیرودینامیک محاسباتی تبدیل شده است. برای برنامه نویسی مدل SST در مقایسه با مدل اصلی K-ε زمان بیشتری نیاز است در عوض این مدل حتی در عملکردهای پیچیده و مختلط نیز بسیار با ثبات می‌باشد. در این تحقیق مدل SST مورد استفاده قرار گرفته است که توسط متر (Menter) پیشنهاد شده است. جهت جلوگیری از وابستگی حل به ابعاد خاص،

روابط و معادلات حاکم

مدل SST از تلفیق دو مدل K-ε و K-ω به دست آمده است که باعث بهبود عمده‌ای در محاسبات اختلاف فشار معکوس (Adverse Pressure Gradient) (APG) و در جریان‌های لایه مرزی دارای جدایش شده است و موجب حذف حساسیت مدل K-ω به شرایط سطح آزاد و دیواره می‌شود. در این مدل اصلاح لزجت گردابه‌ای در مدل K-ω مطرح شده است. این مطلب بر پایه تئوری که در مدل اغتشاشی جانسون-کینگ (Johnson-king) می‌باشد، بنا شده است. این نظریه

معرفی می‌شود:

$$Re_{\tau} = \frac{u_{\tau}}{\nu} R \quad (7)$$

بنابراین به سادگی می‌توان نوشت:

$$(j+1) \frac{\tau_w}{R} = (j+1) \frac{\rho u_{\tau}^2}{R} \quad (8)$$

که در رابطه فوق z در مختصات کارتزین صفر و در مختصات استوانه‌ای برابر یک می‌باشد؛ در نتیجه:

$$-\frac{dp^+}{dx^+} = \frac{\nu}{Ru_{\tau}} = \frac{1}{Re_{\tau}} \quad (9)$$

با توجه به معادله (9) و با استفاده از معادلات فوق می‌توان رابطه (3-ب) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial u^+}{\partial t^+} = \frac{1}{Re_{\tau}} + \frac{\partial}{\partial y^+} \left((1 + v_t^+) \frac{\partial u^+}{\partial x^+} \right) \quad (10)$$

اکنون می‌توان به معادلات مربوط به مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق پرداخت که با توجه به مدل SST لزجت آشفته به صورت زیر معرفی می‌شود [28]:

$$v_t = \frac{k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{\alpha}, \frac{\Omega F_2}{\alpha_1 \omega}\right)} \quad (11)$$

که در آن:

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (12)$$

و

$$\sigma_k = \frac{1}{(F_1/\sigma_{k,1}) + [(1-F_1)/\sigma_{k,2}]} \quad (13)$$

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{(F_1/\sigma_{\omega,1}) + [(1-F_1)/\sigma_{\omega,2}]} \quad (14)$$

پارامترهای بی‌بعد زیر معرفی شده و معادلات حاکم به صورت زیر بدون بعد شده‌اند. علامت بالانویس (+) مبین مشخصه بی‌بعد می‌باشد:

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{u}{u_{\tau}}, \quad x^+ = \frac{u_{\tau}}{\nu} x, \quad y^+ = \frac{u_{\tau}}{\nu} y \\ p^+ &= \frac{p}{\rho u_{\tau}^2}, \quad t^+ = \frac{u_{\tau}^2}{\nu} t, \quad v^+ = \frac{v}{\nu} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{1}{r^j} \frac{\partial}{\partial r} \\ &\left(r^j \left((v + v_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) \end{aligned} \quad (3-الف)$$

با توجه به پارامترهای بی‌بعد فوق می‌توان معادله (3-الف) را به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{\partial u^+}{\partial t^+} = -\frac{dp^+}{dx^+} + \frac{\partial}{\partial y^+} \left((1 + v_t^+) \frac{\partial u^+}{\partial y^+} \right) \quad (3-ب)$$

همچنین می‌توان برای تنش برشی دیواره با توجه به رژیم جریان حاکم در این تحقیق معادله زیر را نتیجه گرفت:

$$(j+1) \frac{\tau_w}{R} = -\frac{dp}{dx} \quad (4)$$

اکنون با توجه به پارامترهای بی‌بعد تعریف شده می‌توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$-\frac{dp}{dx} = -\frac{d(\rho u_{\tau}^2 p^+)}{(x^+ \cdot \nu / u_{\tau})} = -\frac{\rho u_{\tau}^3}{\nu} \frac{dp^+}{dx^+} \quad (5)$$

و با توجه به تعریف سرعت اصطکاکی داریم:

$$\tau_w = \rho u_{\tau}^2 \quad (6)$$

و همچنین عدد رینولدز بر پایه سرعت اصطکاکی (Re_{τ}) نیز که در معادلات کاربرد دارد به شکل زیر

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_i)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right] \\ &+ G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (25)$$

که در معادلات فوق ثابت‌ها به صورت زیر تعیین شده‌اند [28]:

$$\begin{aligned} \sigma_{k,1} &= 1.176, \quad \sigma_{\omega,1} = 2.0 \\ \sigma_{k,2} &= 1.0, \quad \sigma_{\omega,2} = 1.168 \\ \alpha_1 &= 0.31, \end{aligned} \quad (26)$$

معادلات (۱۱ تا ۲۵) را می‌توان توسط روابط زیر

بی‌بعد نمود:

$$k^+ = \frac{k}{u_\tau^2}, \quad \omega^+ = \frac{\nu}{u_\tau^2} \omega \quad (27)$$

لزجت گردابه‌ای بی بعد از رابطه زیر محاسبه شده

است:

$$v_t^+ = \frac{a_1 k^+}{\max(a_1 \omega^+, |\omega^+ F_2|)} \quad (28)$$

$$a_1 = 0.31$$

با توجه به روابط بی‌بعد ساز (۲۷، ۲۸) می‌توان

معادلات (۲۵ و ۲۶) برای راستای شعاعی (یک بعدی)

را به این صورت نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k^+}{\partial t^+} &= v_t^+ \left(\frac{\partial u^+}{\partial y^+} \right) - \beta^* k^+ \omega^+ \\ &+ \frac{\partial}{\partial y^+} \left[\left(1 + \sigma^* v_t^+ \right) \frac{\partial k^+}{\partial y^+} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega^+}{\partial t^+} &= \alpha v_t^+ \frac{\omega^+}{k^+} \left(\frac{\partial u^+}{\partial y^+} \right)^2 - \beta \omega^{+2} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y^+} \left[\left(1 + \sigma v_t^+ \right) \frac{\partial \omega^+}{\partial y^+} \right] + \\ &2(1 - F_1) \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega^+} \frac{\partial k^+}{\partial y^+} \frac{\partial \omega^+}{\partial y^+} \end{aligned} \quad (30)$$

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (15)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^4) \quad (16)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho\omega y^2} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega,y}^+} \right] \quad (16)$$

$$\Phi_2 = \max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho\omega y^2} \right) \quad (17)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right] \quad (18)$$

$$G_k = \mu_t S^2 \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (19)$$

$$G_\omega = \frac{\alpha}{v_t} G_k \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left[\frac{\alpha_0 + Re_t / R_\omega}{1 + Re_t / R_\omega} \right] \quad (21)$$

$$R_\omega = 2.95 \quad \alpha_0 = 1/9$$

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (22)$$

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2 \quad (23)$$

برای محاسبه k و ω که در روابط فوق ظاهر

شده‌اند، باید معادلات دیفرانسیل زیر حل گردند [28]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &+ G_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (24)$$

روابط مورد استفاده در این تحلیل برای معادلات پیوستگی، ممنتوم در جهات x و r بر اساس دستگاه مختصات استوانه‌ای بوده‌اند. همچنین برای ورودی نمایه سرعت (و سایر مشخصه‌های جریان) یکنواخت در نظر گرفته شد. در کنار دیواره شرط عدم لغزش و مقدار صفر برای مشخصه‌ها لحاظ گردید البته برای ω^+ شرط زیر به کار گرفته شد:

$$\omega^+ = 10 \frac{6}{\beta_1 (\Delta y_1^+)^2} \quad y^+ = 0 \text{ در دیواره}$$

که در آن Δy_1^+ فاصله تا اولین نقطه در کنار دیواره است. برای حالت دو بعدی و سه بعدی در انتهای لوله نیز از شرط مرزی برون یابی کلیه مشخصه‌ها در حل دستگاه معادلات در برنامه رایانه‌ای، استفاده شده است. بدیهی است برای حل یک بعدی فرض بر توسعه‌یافتگی جریان است به عبارت دیگر تغییری در مشخصه‌ها وجود ندارد.

مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

مقایسه نتایج یک، دو و سه بعدی. شکل‌های (۲- الف و ب) نمودار تغییرات سرعت محوری بر حسب زمان (عدد رینولدز) را نمایش می‌دهند. شکل مبین انطباق مناسب حل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی است. البته برای مرکز لوله در انتهای دوره شتاب‌دهی هر سه حالت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی مقادیر کمتری را پیش‌بینی می‌کنند و انطباق از بین می‌رود.

شکل‌های (۳- الف و ب) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی را بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهند. رفتار انرژی جنبشی آشفتگی در جریان شتاب‌دار دارای تأخیر معناداری است. این تأخیر که در جریان پایا به هیچ عنوان مشاهده نمی‌شود تابع سرعت و شتاب، فاصله از دیواره لوله، جنس سیال و علامت

برای تحلیل شرایط دو بعدی و سه بعدی نیز روابط به همین روش استخراج می‌شوند.

شرایط مرزی و حل عددی

معادلات (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes) URANS برای حالت ناپایا و معادلات مدل اغتشاش وابسته به آن توسط برنامه‌های عددی تفاضل متناهی و گام زمانی حل شدند. کد دقیقی با استفاده از روش جداسازی مرتبه دوم کرانک - نیکلسون (Crank-Nicholson) بر روی یک شبکه غیریکنواخت نوشته و به خدمت گرفته شد. برای حالت یک بعدی با تکنیک به کار گرفته شده که در بخش قبل ذکر گردید از حل معادله فشار بی‌نیاز شدیم ولی برای میدان‌های دو بعدی و سه بعدی از روش سیمپل (Simple) استفاده گردید. شبکه بندی ساختار یافته در جهت x برای یک بعدی و r, x, θ برای دو بعدی و r, x, θ برای سه بعدی به کار گرفته شده است. در خط مرکزی لوله شرط مرزی شیب صفر بر کلیه مشخصه‌ها، اعمال گردید. شرایط مرزی اعمال شده به صورت شرط عدم لغزش در دیواره طبق رابطه (۳۱) و همچنین شرط شیب صفر در مرکز طبق رابطه (۳۲) و سرعت ورودی طبق رابطه (۳۳) تعریف شده‌اند.

$$\varphi = 0$$

$$\varphi \equiv u, v, u', v', u'v', \dots \quad (31)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$$

$$\varphi \equiv u, v, u', v', u'v', \dots \quad (32)$$

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

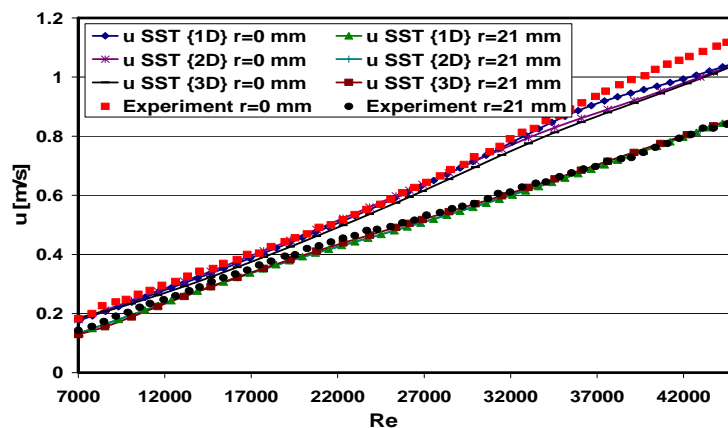
$$T \equiv 1, 5, 10, 20, 40 \quad s$$

$$u_i = 0.138 \text{ m/s}$$

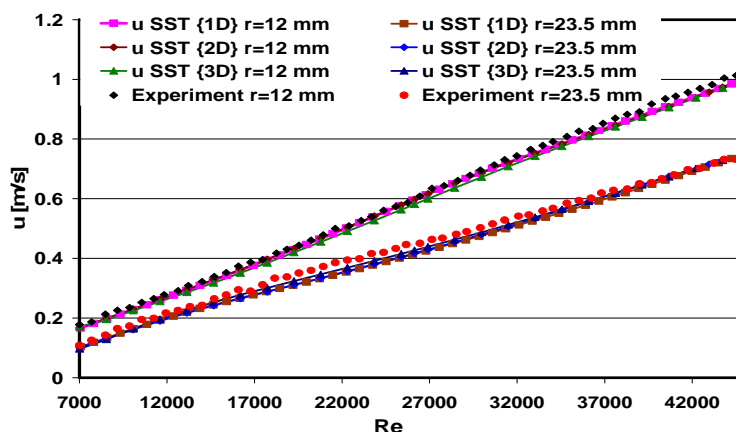
$$u_f = 0.891 \text{ m/s} \quad (33)$$

بالاتر (نزدیک دیواره) به سمت پتانسیل کمتر (مرکز لوله) سرازیر می‌شود. بنابراین مرکز لوله با تأخیر زمانی بیشتری، تغییرات افزایش انرژی جنبشی آشفتگی را احساس می‌کند. جالب این است که خصوصیات جریان چه قبل از مرحله تأخیر زمانی و چه بعد از این مرحله در حالت‌های ناپایا و پایا با یکدیگر متفاوتند. قبل از سپری شدن مرحله تأخیر زمانی انرژی جنبشی آشفتگی، نسبت به حالت پایا به مراتب کمتر است و این در حالی است که بعد از سپری شدن این مرحله حتی از مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی وضعیت پایا در همان عدد رینولدز و در کنار دیواره بیشتر شده است. این پدیده را می‌توان ناشی از اینرسی جریان ناپایا دانست که بعد از طی شدن تأخیر زمانی در حال شتاب جهشی است.

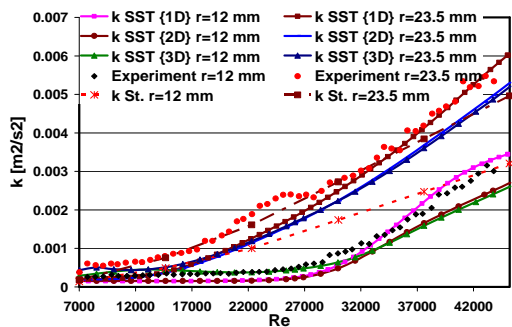
شتاب (سرعت افزایشی یا کاهششی بودن جریان) می‌باشد. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده نمود در مرکز لوله انطباق نتایج حل سه بعدی بر نتایج تجربی چشمگیر است. در همین مکان (مرکز لوله) حل دو بعدی و یک بعدی به ترتیب نتایج نزدیک‌تری بر مقادیر گزارش شده دارند. با حرکت به سمت دیواره کم کم حل یک بعدی انطباق خود بر نتایج آزمایشگاهی را افزایش داده و حل‌های دو و سه بعدی به خصوص در مراحل پایانی دوره شتاب‌دهی از نتایج تجربی فاصله می‌گیرند. نکته قابل تأمل دیگر در این نمودار (همانند سایر مشخصه‌های آشفتگی) افزایش مدت زمان تأخیر با فاصله از دیواره است. دلیل این رفتار آن است که منبع انرژی جنبشی آشفتگی نزدیک دیواره می‌باشد و انرژی از محلی با پتانسیل یا مقدار



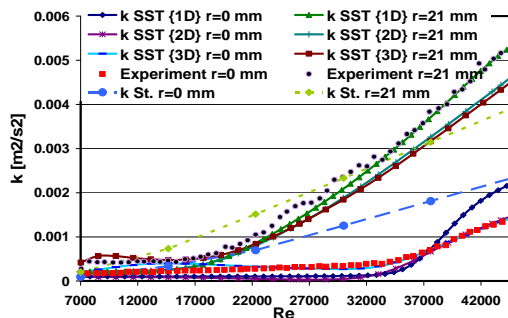
شکل ۲-الف تغییرات سرعت محوری با عدد رینولدز برای شعاع‌های $r=0, r=21$ mm برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s



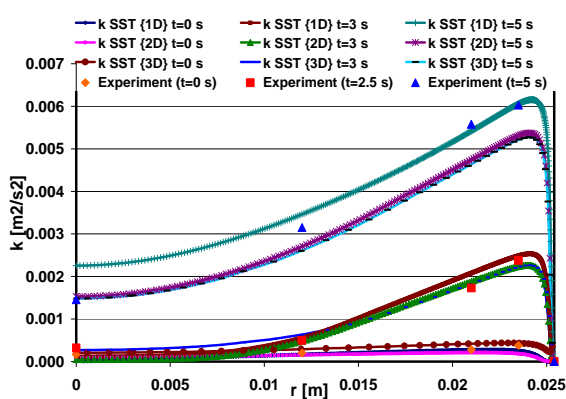
شکل ۲-ب تغییرات سرعت محوری با عدد رینولدز برای شعاع‌های $r=12, r=23.5$ mm برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s



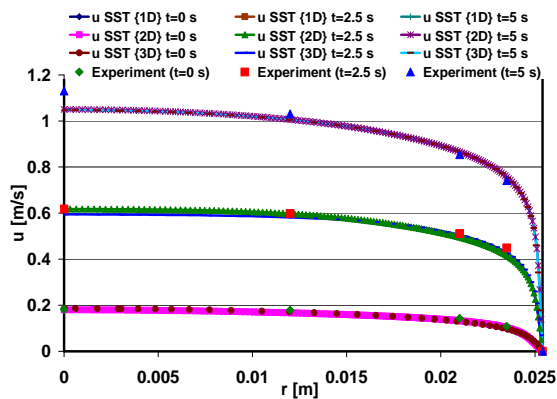
شکل ۳- ب تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی با عدد رینولدز برای شعاع‌های $r=12, r=23.5$ mm برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s



شکل ۳- الف تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی با عدد رینولدز برای شعاع‌های $r=0, r=21$ mm برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s



شکل ۴- ب تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی بر حسب شعاع در زمان‌های مختلف برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s



شکل ۴- الف تغییرات سرعت محوری بر حسب شعاع در زمان‌های مختلف برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s

مد نظر نباشد، ترجیحاً بهتر است از حل یک بعدی برای پیش بینی رفتار جریان آشفتگی غیر پررودیک در لوله استفاده نمود.

تأخیر زمانی. در شکل (۵) تغییرات نسبت سرعت اغتشاشی در راستای شعاعی به نوسانات سرعت محوری $(|v'|/|u'|)$ و همچنین نسبت سرعت نوسانی در راستای زاویه‌ای به نوسانات سرعت محوری $(|w'|/|u'|)$ که مستخرج از مقادیر تجربی مرجع [20] هستند، آورده شده‌اند. از آنجا که نوسانات سرعت در جهات مختلف محوری، شعاعی و زاویه‌ای از حیث مقدار کمی با هم متفاوتند، جریان در لوله را نمی‌توان یک جریان همگن دانست. نکته قابل تأمل در این نمودار

در شکل (۴- الف) تغییرات سرعت محوری جریان بر حسب شعاع لوله در زمان‌های مختلف آورده شده است که مبین این واقعیت می‌باشند که انطباق نتایج، کاملاً قابل قبول هستند.

در شکل (۴- ب) یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های جریان آشفتگی یعنی انرژی جنبشی آشفتگی ترسیم شده است.

با توجه به آنچه بیان گردید بسیار روشن است که با در نظر گرفتن پیچیدگی‌ها، مشکلات و هزینه تحلیل سه بعدی نسبت به دو بعدی و همچنین دو بعدی نسبت به یک بعدی در حالت ناپایا، در مواردی که بتوان تقریب معمول را پذیرفت و یا بررسی ناحیه گذار

همواره از نکات مورد توجه پژوهشگران است. یکی از روش‌های تشخیص، استفاده از آزمایش و بررسی مشخصه (معمولاً سرعت) سیال است و روش دیگر استفاده از تحلیل‌های عددی است. در تحلیل‌های عددی پس از استخراج نتایج از حل عددی برای مشخصه‌های مختلف سیال از جمله سرعت، انرژی جنبشی، لزجت آشفتگی و ... می‌توان با استفاده از روند تغییرات به صورت کیفی یا کمی به مکان توسعه یافته شدن جریان پی برد. طبیعتاً در روش‌های علمی با استفاده از معیارهای قابل تعریف نسبت به شناسایی این مکان اقدام می‌گردد و محققین این تحقیق نیز با استفاده از همین روش به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. برای پی بردن به مکان واقعی آغاز ناحیه توسعه‌یافتگی، شاخص‌های مختلفی باید لحاظ گردند از جمله: الف- مشخصه سیال (سرعت- انرژی جنبشی، نوسانات سرعت در راستاهای متفاوت، شدت آشفتگی، لزجت آشفتگی و ...); ب- موقعیت مکانی نسبت به مرکز لوله یا دیواره; ج- میزان قابل قبول مجانب شدن به معیار جهت مطلوب دانستن عدم تغییرات مشخصه (شیب تغییرات یا همان مشتق مشخصه نسبت به طول افقی).

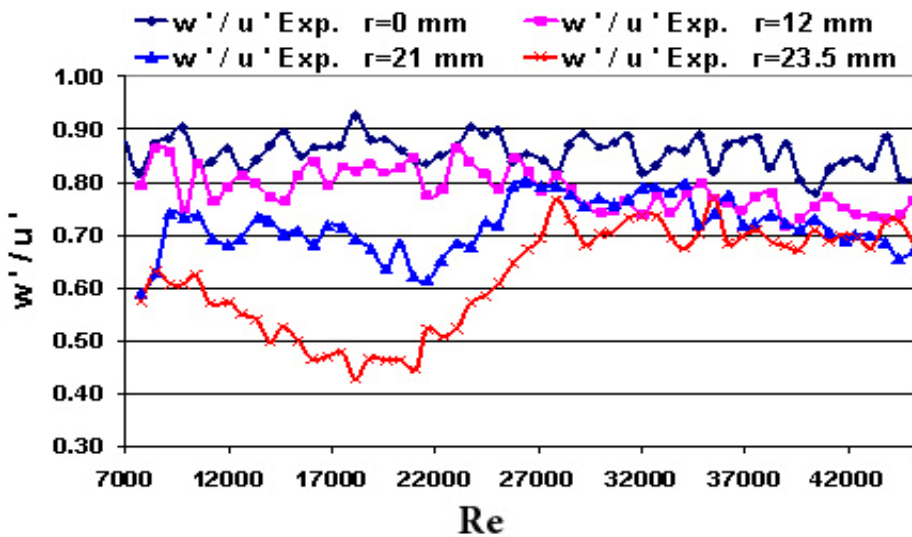
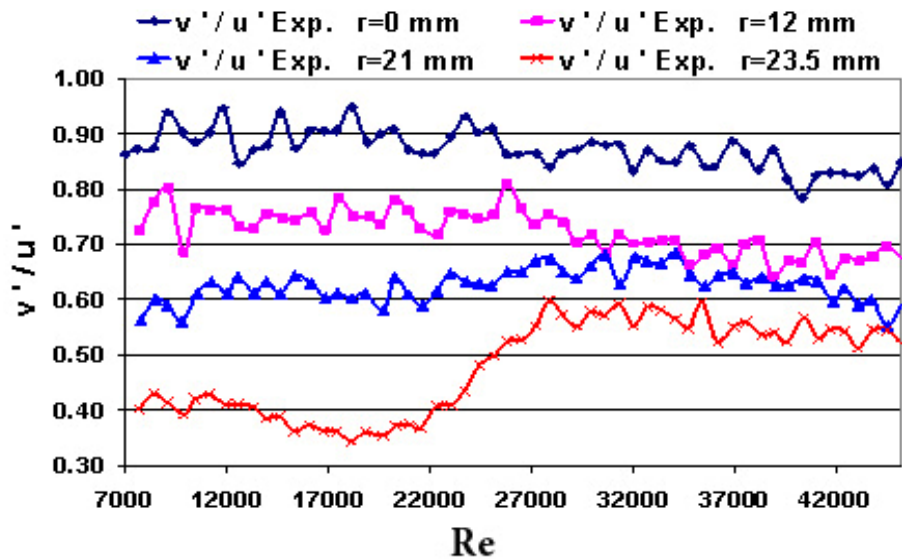
در این تحقیق طول توسعه‌یافتگی برای همه مشخصه‌های سیال در موقعیت‌های مختلف نسبت به دیواره و همچنین شیب‌های مختلف تقریب (نزدیک شدن به حد صفر) مورد مطالعه قرار گرفته است.

مشخص گردید در صورتی که موقعیت مکانی مرکز در نظر گرفته شود سایر فواصل از دیواره نیز پوشش داده می‌شوند. شیب مجانبی در بازه ۱۵٪ تا ۵٪ برای مشتق اول هر مشخصه و بازه ۱۰٪ تا ۱٪ برای مشتق دوم آن در نظر گرفته شد. بسیار روشن است از نقطه نظر ریاضی برای بررسی رفتار تغییرات مشخصه نمی‌توان فقط به مشتق اول اکتفا

این است که جز برای کنار دیواره در سایر مناطق نسبت $|v'/u'|$ و $|w'/u'|$ در کل دوره شتاب‌دهی دارای شیب ملایم کاهشی بوده و از روند یکنواختی تبعیت می‌کنند. در کنار دیواره نخست روند کاهشی ملاحظه می‌شود (مانند سایر فواصل از دیواره); اما در بازه $22000 < Re < 30000$ به یک‌باره جهشی در مقدار کمیت‌های $|v'/u'|$ و $|w'/u'|$ ملاحظه می‌شود و سپس روند کاهش ملایم تا انتها ادامه می‌یابد. به نظر می‌رسد نسبت‌های $|v'/u'|$ و $|w'/u'|$ در حین مرحله تأخیر زمانی و حتی لحظاتی بعد از آن، کاهشی است. یعنی اینکه در ابتدا دوره شتاب‌دهی $|u'|$ گرچه رشد چندانی ندارد ولی $|v'|$ و $|w'|$ اصلاً رشد نمی‌کند به طوری که نسبت‌های $|v'/u'|$ و $|w'/u'|$ کاهشی است. به عبارت دیگر در ابتدای دوره شتاب‌دهی مؤلفه محوری اغتشاش کمی متأثر شده، افزایش بسیار ملایمی دارد ولی دو مؤلفه شعاعی و محیطی تقریباً ثابت می‌مانند. پس از اینکه $|u'|$ شروع به افزایش نمود با کمی تأخیر دو مؤلفه دیگر هم افزایش می‌یابند تا اینکه پس از سپری شدن یک تأخیر زمانی دیگر نسبت سه مؤلفه اغتشاشی جریان در وضعیت یکنواختی قرار می‌گیرند. در حقیقت با توجه به شکل (۵) دو نوع تأخیر زمانی قابل مشاهده است. اول زمانی که سپری می‌شود تا مؤلفه محوری اغتشاشات رشد جهشی خود را شروع کند که در این مقاله تأخیر زمانی نامیده می‌شود. دوم بازه زمانی دومی که باید طی شود تا سه مؤلفه اغتشاشی در وضعیت یکنواختی قرار گرفته، دارای نسبت تقریباً ثابتی شوند. (تا حدود $Re < 30000$)

توسعه‌یافتگی پایا. مبحث طول توسعه‌یافتگی یکی از موضوعات مهم به خصوص در مباحث آزمایشگاهی که در آن اندازه‌گیری مشخصه‌های سیال مورد نظر است محسوب می‌شود. مقوله تشخیص مکانی که در آنجا بتوان جریان را توسعه یافته در نظر گرفت

کرد بلکه باید میزان تقعر-تحدب هم مد نظر قرار گیرد و از حیث ریاضی زمانی عدم تغییرات مشخصه بیان می‌شود که مشتق مشخصه و مشتق مشتق آن (یعنی مشتق دوم مشخصه) و... صفر باشد؛ اما در عمل محققین به مجانب شدن مشتق اول و دوم شاخص مد نظر اکتفا می‌کنند.



شکل ۵ تغییرات نسبت سرعت نوسانی در راستای شعاعی و زاویه‌ای به نوسانات سرعت محوری با عدد رینولدز برای چهار شعاع مختلف برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s [28]

همین شرایط برای شیب ۵/۰٪ مشتق اول نمایش داده شده است.

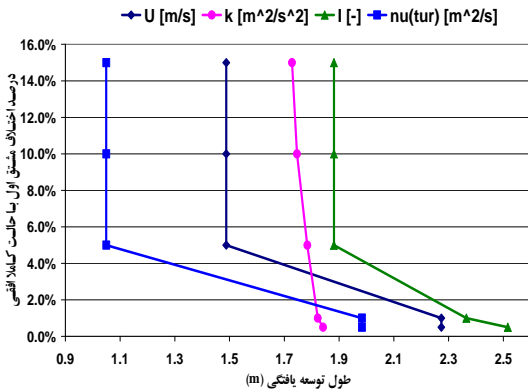
نکته قابل تأمل در مورد شکل‌های (۷- الف و ب) این است که حساسیت طول توسعه‌یافتگی به درصد شیب مشتق دوم جز برای مقادیر خیلی کوچک، قابل توجه نیست.

برای جلوگیری از اطاله این مبحث در جدول (۱- الف) قسمتی از نتایج آورده شده است که نشان دهنده عدم حساسیت طول توسعه‌یافتگی به درصد شیب افقی شدن مشتق دوم مشخصه‌ها می‌باشد:

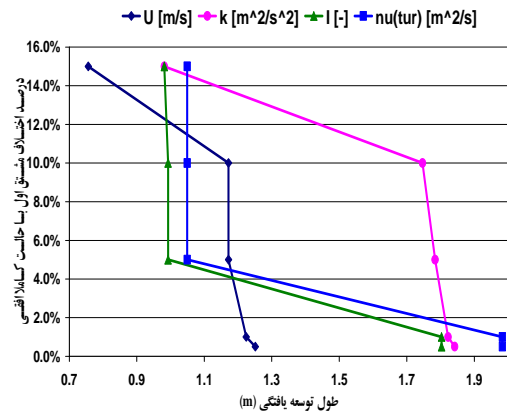
در ادامه قسمتی از نتایج تحقیق صورت گرفته که منجر به حصول نتایج نهایی شده، آمده است. به عنوان مثال در شکل (۶- الف) طول توسعه‌یافتگی بر اساس ۹۰٪ افقی شدن مشتق دوم (معادل شیب ۱۰٪) و برای مقادیر مختلف مشتق اول برای مشخصه‌های مختلف سیال در حالت حل پایا آمده است. در شکل (۶- ب) همین شرایط برای حالت ۹۹/۹٪ افقی شدن مشتق دوم (معادل شیب ۰/۱٪) لحاظ شده است. در شکل (۷- الف) طول توسعه‌یافتگی بر مبنای شیب ۱۵٪ مشتق اول برای مقادیر مختلف درصد شیب مشتق دوم آورده شده است. در شکل (۷- ب)

جدول ۱- الف مقایسه طول توسعه‌یافتگی بر حسب متر برای جریان پایا در عدد رینولدز ۷۰۰۰ بر اساس درصد شیب مشتق‌های اول و دوم مختلف نسبت به حالت افقی

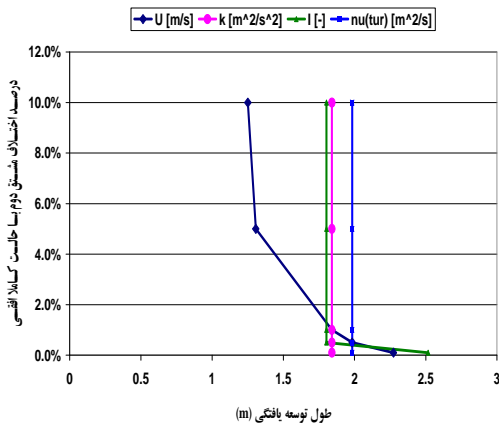
درصد شیب مشتق اول	درصد شیب مشتق دوم	v_i [m ² /s]	U [m/s]	k [m ² /s ²]	شدت تلاطمی [-]
٪۱۵	٪۱۰	۱/۰۵	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۹۸
٪۱۰	٪۱۰	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۷۵	۰/۹۹
٪۵	٪۱۰	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۷۸	۰/۹۹
٪۱	٪۱۰	۱/۹۸	۱/۲۲	۱/۸۲	۱/۸۰
٪۰/۵	٪۱۰	۱/۹۸	۱/۲۵	۱/۸۴	۱/۸۰
٪۱۵	٪۵	۱/۰۵	۰/۷۷	۰/۹۸	۰/۹۸
٪۱۰	٪۵	۱/۰۵	۱/۳۱	۱/۷۵	۰/۹۹
٪۵	٪۵	۱/۰۵	۱/۳۱	۱/۷۸	۰/۹۹
٪۱	٪۵	۱/۹۸	۱/۳۱	۱/۸۲	۱/۸۰
٪۰/۵	٪۵	۱/۹۸	۱/۳۱	۱/۸۴	۱/۸۰
٪۱۵	٪۱	۱/۰۵	۰/۷۹	۰/۹۸	۱/۶۹
٪۱۰	٪۱	۱/۰۵	۱/۴۴	۱/۷۵	۱/۷۳
٪۵	٪۱	۱/۰۵	۱/۴۴	۱/۷۵	۱/۷۳
٪۱	٪۱	۱/۰۵	۱/۴۴	۱/۷۵	۱/۷۳
٪۰/۵	٪۱	۱/۹۸	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۰
٪۱۵	٪۰/۵	۱/۹۸	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۰
٪۱۰	٪۰/۵	۱/۰۵	۱/۴۷	۱/۷۵	۱/۷۳
٪۵	٪۰/۵	۱/۰۵	۱/۴۷	۱/۷۸	۱/۷۷
٪۱	٪۰/۵	۱/۰۵	۱/۴۷	۱/۷۸	۱/۷۷
٪۰/۵	٪۰/۵	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۸۴	۱/۸۰
٪۱۵	٪۰/۱	۱/۰۵	۱/۴۹	۱/۷۳	۱/۸۸
٪۱۰	٪۰/۱	۱/۰۵	۱/۴۹	۱/۷۵	۱/۸۸
٪۵	٪۰/۱	۱/۰۵	۱/۴۹	۱/۷۸	۱/۸۸
٪۱	٪۰/۱	۱/۹۸	۲/۲۷	۱/۸۲	۲/۳۷
٪۰/۵	٪۰/۱	۱/۹۸	۲/۲۷	۱/۸۴	۲/۵۲



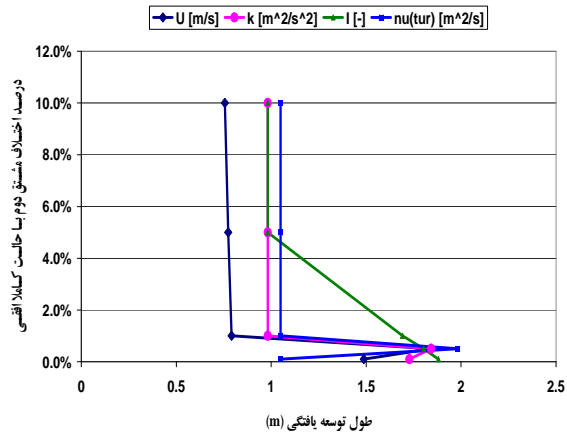
شکل ۶- ب طول توسعه یافتگی بر اساس 0.1% افقی شدن مشتق دوم و برای مقادیر مختلف مشتق اول برای مشخصه‌های مختلف سیال در حالت حل پایا



شکل ۶- الف طول توسعه یافتگی بر اساس 10% افقی شدن مشتق دوم و برای مقادیر مختلف مشتق اول برای مشخصه‌های مختلف سیال در حالت حل پایا



شکل ۷- ب طول توسعه یافتگی بر اساس مشتق اول برابر 0.5% و برای مقادیر مختلف مشتق دوم برای مشخصه‌های مختلف سیال در حالت حل پایا



شکل ۷- الف طول توسعه یافتگی بر اساس مشتق اول برابر 15% و برای مقادیر مختلف مشتق دوم برای مشخصه‌های مختلف سیال در حالت حل پایا

صرفاً با نگرش فیزیکی به چگونگی تغییرات سرعت بر حسب مکان (بدون نگرش ریاضی) مقدار محاسبه شده، تقریباً درست به نظر می‌رسد. اما نگاه دقیق‌تر و همچنین وارد نمودن مقدار مشتق سرعت، مبین این نکته اساسی است که طول توسعه یافتگی برابر با مکان محاسبه شده از طریق رابطه، تفاوت دارد. همچنین با توجه به شکل می‌توان گفت نمودار تغییرات سرعت بر

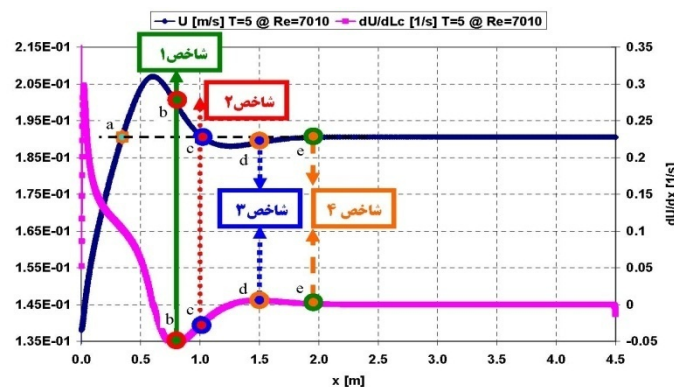
شکل (۸) نشان دهنده تغییرات مشخصه سرعت سیال و مشتق آن نسبت به راستای حرکت برای مرکز لوله بر حسب طول می‌باشد. این شکل یکی از مهم‌ترین شکل‌های مورد بررسی است. طول ناحیه توسعه یافتگی برای عدد رینولدز ۷۰۰۰ با استفاده از رابطه (۱-ب) برابر ۰/۹۷۸ متر به دست می‌آید و همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود با صرف نظر از مقدار مشتق سرعت و

آشفته همانند لزجت آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی، نوسانات سرعت و ... که عملاً به طور کامل بدون تغییر فرض نمودن آن‌ها غیر ممکن است با معیار ۹۹٪ شیب افقی به عنوان شاخص عدم تغییر مشخصه (یا همان مکان آغاز توسعه یافتگی) تحلیل عددی دنبال می‌شود. بدیهی است استحصال شیب ۱۰۰٪ افقی برای مشخصه‌های خاص جریان آشفته نیاز به زمان و طول مجانب به بی‌نهایت جهت توسعه یافتگی کامل دارد که با اغماض و به جهت عملیاتی شدن تحقیق می‌توان 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 ۱/۴۴ متر به دست می‌آید.

باید توجه داشت همان‌طور که در بالا گفته شد مقدار کمی مشخصه به تنهایی ملاک مناسبی نمی‌باشد چرا که در غیر این صورت در شکل (۸) محل a باید به عنوان محل توسعه یافتگی انتخاب شود که پر واضح است کاملاً غلط است. بنابراین باید غیر از مقدار کمی مشخصه معیار دیگری را لحاظ کنیم که شیب تغییرات (مشتق) به عنوان معیار سنجش بعدی در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۸) شاخص‌هایی بر اساس موارد فوق تعریف شده است که این شاخص‌ها عبارتند از:

حسب طول نشان می‌دهد آنچه تحت عنوان سرعت نهایی در ناحیه توسعه یافتگی اندازه گیری می‌شود و برای این تحقیق در مرکز لوله برابر ۰/۱۹۱ متر بر ثانیه است، در مجموع سه بار قابل اندازه گیری است، یکبار در محدوده شیب صعودی سرعت در بازه ابتدای لوله تا ۰/۶۰۳ متری (به طور دقیق در ۰/۳۵ متری از ابتدای لوله سرعت سیال در مرکز لوله به ۰/۱۹۱ m/s می‌رسد). بار دوم در ناحیه شیب کاهشی سرعت؛ یعنی در بازه ۰/۶۰۳ m تا ۱/۱۲۱ m (به طور دقیق در ۰/۹۷۸ متری سرعت سیال در مرکز لوله به ۰/۱۹۱ m/s می‌رسد). که با مقدار محاسبه شده در رابطه (۱-ب) انطباق دارد. به نظر می‌رسد که این رابطه بر اساس سرعت همین مقطع ارائه شده است. مرتبه سومی که مقدار سرعت سیال در مرکز لوله به مقدار حالت توسعه یافته می‌رسد مربوط به حالت شیب (تقریباً) صفر یعنی محدوده ۱/۱۲۱ m تا انتهای لوله است. با توجه به میزان تعریف و اهمیت استفاده کننده، طول‌های مختلفی را می‌توان به عنوان طول ناحیه توسعه یافته معرفی نمود.

در این تحقیق برای 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



شکل ۸ تغییرات سرعت سیال و مشتق آن نسبت به راستای حرکت بر

حسب طول در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s

اهمیت تاکید مضاعف بر مقدار افقی شدن تغییرات در نظر گرفته شده است که مبین این واقعیت است که الزامی به این دقت مضاعف وجود ندارد چرا که تغییرات مشخصات جریان از حدی به بعد رفتاری مجانبی دارند).

با توجه با توضیح فوق، اگر صرفاً مقدار کمی مشخصه ملاک باشد محل a طول توسعه یافتگی را نشان خواهد داد و اگر شیب به تنهایی ملاک قرار گیرد (شاخص ۱) نقطه b به دست خواهد آمد که هر دو اشتباه است. همچنین شاخص ۲ دارای مقدار کمی مشخصه سیال معادل با حالت توسعه یافتگی می باشد اما دارای شیب تغییرات شدید است پس این شاخص نیز نمی تواند مورد قبول باشد (نقطه c). شاخص ۴ مبین این نکته است که حالت مجانبی، به علت حدی شدن شیب، گستره طول توسعه یافتگی را به شدت افزایش می دهد (نقطه e)؛ به طوری که افزایش ۵٪ در شیب مشخصه سیال باعث تغییر حدوداً ۵۰٪ طول توسعه یافتگی می شود. بنابراین شاخص ۴ نیز نمی تواند معیار مناسبی برای تشخیص طول توسعه یافتگی باشد.

شاخص ۳ که در آن از معیار تقریب ۹۹٪ استفاده شده است می تواند به عنوان شاخص مناسب مد نظر قرار گیرد چرا که هم از لحاظ مقدار کمی مشخصه و هم از نظر مقدار شیب تغییرات و نیز طول توسعه یافتگی دارای مقادیر منطقی می باشد. (نقطه d)

شاخص ۱ معرف مکان محاسبه شده برای توسعه یافتگی، طبق تحلیل عددی حاضر بر مبنای افقی شدن کامل تغییرات مشخصه سرعت جریان می باشد. (این شاخص جهت تبیین این واقعیت که صرف صفر شدن مشتق معیار مناسبی نیست لحاظ شده است).

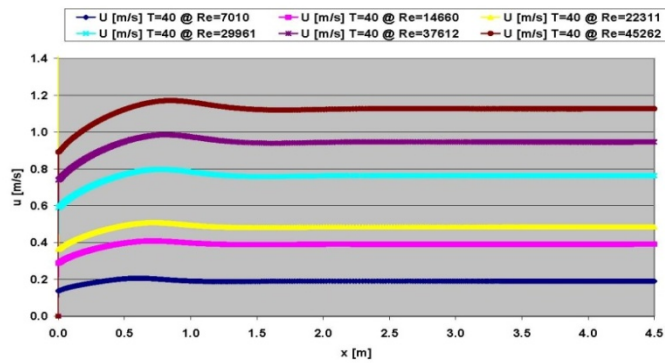
شاخص ۲ بیانگر مکان محاسبه شده برای توسعه یافتگی طبق (رابطه ۱ - ب) که در آن مقدار کمی مشخصه با مقدار حالت توسعه یافتگی کامل برابر گردد بدون لحاظ نمودن شیب تغییرات مشخصه سیال می باشد. (این شاخص جهت تبیین این حقیقت که صرفاً مقدار کمی خود مشخصه معیار مناسبی برای تعیین طول توسعه یافتگی نیست، ارائه شده است).

شاخص ۳ مبین مکان محاسبه شده برای توسعه یافتگی طبق تحلیل عددی حاضر و بر مبنای مقدار کمی ۹۹٪ مشخصه سیال و همچنین ۹۹٪ افقی شدن تغییرات مشخصه مذکور که این شاخص مناسب ترین معیار می باشد. (رابطه ۳۴) (این شاخص جهت مشاهده تأثیر لحاظ نمودن توأم مقدار کمی و شیب مشتق در مکان واقعی طول توسعه یافتگی ارائه شده است).

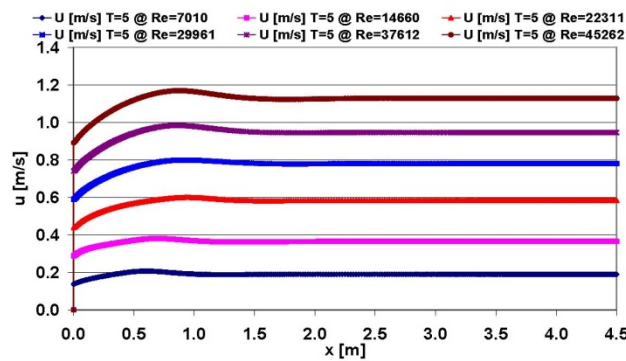
شاخص ۴ معرف مکان محاسبه شده برای توسعه یافتگی طبق تحلیل عددی حاضر و بر مبنای در نظر گرفتن انطباق ۹۹/۵٪ مقدار کمی و نیز افقی شدن ۹۹/۵٪ تغییرات مشخصه سیال ارائه شده است. (این شاخص نیز جهت بررسی

جدول ۱-ب مقایسه طول توسعه یافتگی بر اساس رابطه (۱-ب) و حل عددی پایا برای مشخصه سرعت جریان اصلی سیال در مرکز لوله

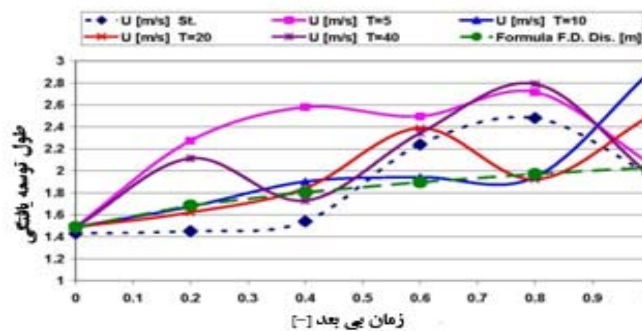
Re	$L_{Fully\ Dev.}$	فرمول (۱-ب)	ضریب جایگزین ۴/۴ در رابطه (۱-ب)
۷۰۰۰	۱/۴۴	۰/۹۸	۶/۴۴
۱۴۶۴۰	۱/۴۵	۱/۱۱	۵/۷۷
۲۲۲۸۰	۱/۵۴	۱/۱۹	۵/۷۱
۲۹۹۲۰	۲/۰۸	۱/۲۵	۷/۳۵
۳۷۶۵۰	۲/۴۸	۱/۲۹	۸/۴۴
۴۵۲۰۰	۱/۹۷	۱/۳۳	۶/۵۰
ضریب متوسط	--	--	۶/۷۰



شکل ۹-الف تغییرات سرعت سیال نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=40$ s در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۹-ب تغییرات سرعت سیال نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتابدهی $T=5$ s در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۱۰ تغییرات طول توسعه‌یافتگی بر مبنای سرعت اصلی جریان نسبت به زمان بی بعد (عدد رینولدز) در مرکز لوله برای دوره‌های شتابدهی (T) مختلف و رابطه (۳۴)

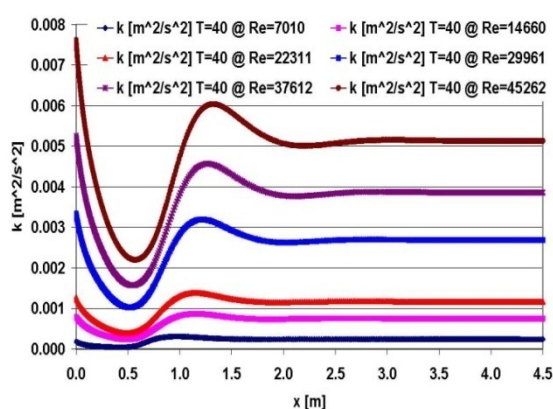
اصلاح شود:

$$L_{Turbulence} = 6.7 Re_D^{1/6} D \quad (34)$$

بدیهی است در چنین شرایطی باید رابطه محاسبه طول توسعه‌یافتگی برای جریان آشسته را از جدول ۱-ب به صورت زیر و با قید شرط معیار ۹۹٪ انطباق شیب افقی به عنوان شاخص عدم تغییر مشخصه

مقدار کمی فیزیکی مشخصه نیست بلکه تغییرات مقدار مشتق آن در راستای طولی نیز ملاک عمل بوده که ۹۹٪ افقی شدن (عدم تغییر مشخصه) به عنوان معیار لحاظ شده است. شکل (۱۰) مبین این نکته مهم است که هر چند رابطه و محاسبات عددی روند افزایشی در گذر زمان را پیش بینی می‌کنند اما شیب این تغییرات برای جریان آشفته شتابدار به خصوص در ابتدای دوره شتاب‌دهی به مراتب بیشتر از مقادیر محاسبه شده در حالت پایا است. نکته دیگری که قابل استنتاج است اینکه در پایان دوره‌های شتاب‌دهی مختلف، طول‌های توسعه‌یافتگی ناپایا از نظر مقدار به طول متناظر پایای آن نزدیک می‌شود.

دومین مشخصه مورد مطالعه انرژی جنبشی آشفته‌یافتگی است که این بار برای نمونه تغییرات این پارامتر در شکل‌های (۱۱-الف و ب) برای دوره‌های شتاب‌دهی $T=5s$ و $T=40s$ آورده شده‌اند. طول توسعه‌یافتگی برای این مشخصه جریان (که یک مشخصه خاص برای جریان آشفته است) با افزایش زمان، زیاد می‌شود.

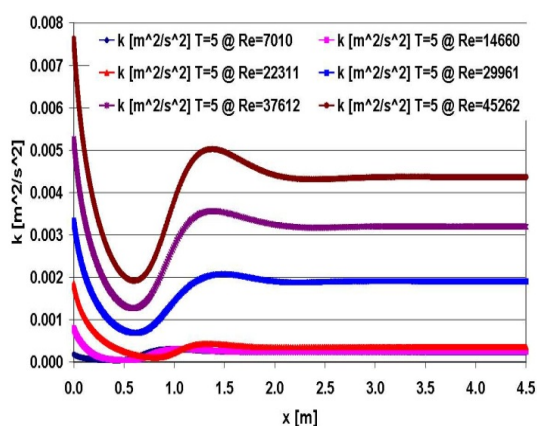


شکل ۱۱-ب تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌یافتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=40s$ در اعداد رینولدز مختلف

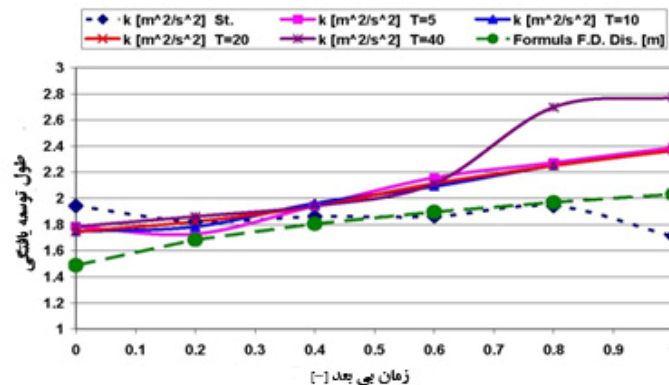
طول توسعه‌یافتگی در حالت ناپایا. در ادامه نتایج تحلیل عددی به منظور محاسبه طول توسعه‌یافتگی در حالت ناپایا برای پارامترهای مختلف جریان به خصوص مشخصه‌های آشفته‌یافتگی جریان، آورده شده است. با توجه به اینکه روند کلی تغییرات سرعت اصلی بر حسب زمان‌های مختلف تقریباً یکسان است برای نمونه شکل‌های (۹-الف و ب) نمایه تغییرات سرعت بر حسب طول برای دو دوره شتاب‌دهی مختلف یعنی $T=5s$ و $T=40s$ آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۹-الف و ب) دیده می‌شود با افزایش عدد رینولدز طول توسعه‌یافتگی افزایش می‌یابد.

برای بررسی میزان تأثیر شتاب (طول دوره شتاب‌دهی T که در آن سرعت از $0.138 m/s$ به $0.891 m/s$ می‌رسد) می‌توان از شکل (۱۰) استفاده نمود. در شکل (۱۰) تغییر طول توسعه‌یافتگی بر حسب زمان بی‌بعد (یا همان عدد رینولدز) برای دوره‌های مختلف شتاب با مقدار محاسبه شده از طریق رابطه (۳۴) مقایسه شده است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد مبنای محاسبه طول توسعه‌یافتگی در تحلیل عددی حاضر، اکتفای صرف به

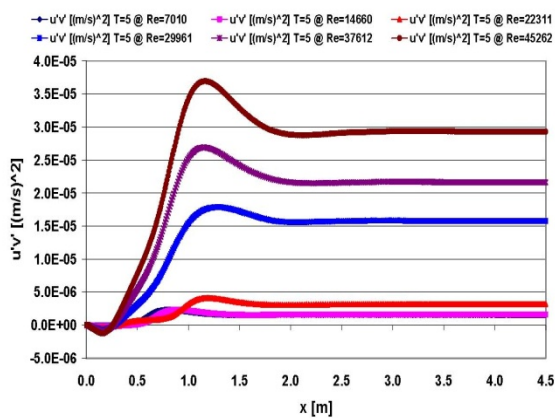


شکل ۱۱-الف تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌یافتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=5s$ در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۱۲ تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای انرژی جنبشی جریان نسبت به زمان بی بعد (عدد رینولدز) در مرکز لوله برای دوره‌های شتاب‌دهی (T) مختلف و رابطه (۳۴)

جریان آشفته بعد از نوساناتی که در راستای حرکت سیال دارد به حالت آرامش و ثبات می‌رسد. 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 آشفتگی افزایش می‌یابد اما روند کلی رفتار و نمایه حرکت مشخصه، تقریباً یکسان است. کما اینکه در شکل (۱۵) که همین طول توسعه یافتگی برای این مشخصه مورد بررسی قرار گرفته است کاملاً مشهود است که طول توسعه یافتگی برای دوره‌های شتاب‌دهی $T > 0.5$ تقریباً بر هم منطبق شده است.



شکل ۱۳ تغییرات تنش آشفتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی T=5 s در اعداد رینولدز مختلف

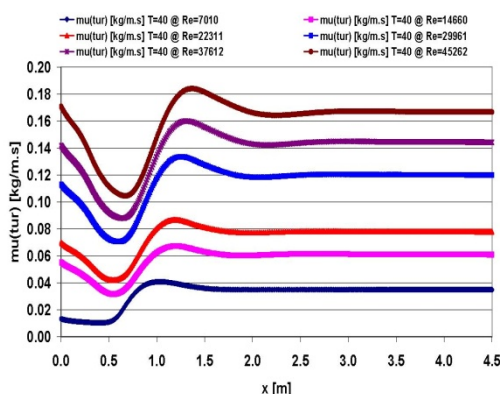
در شکل (۱۲) تغییرات طول توسعه یافتگی بر اساس انرژی جنبشی آشفتگی جریان نسبت به زمان بی بعد (عدد رینولدز) در مرکز لوله برای دوره‌های شتاب‌دهی (T) مختلف با مقادیر محاسبه شده از رابطه (۳۴) مقایسه شده است. نکته قابل تأمل آن است که طول به دست آمده برای دوره‌های مختلف شتاب‌دهی تقریباً یکسان هستند. ضمن اینکه همانند مشخصه سرعت اصلی شیب افزایش مقدار طول توسعه یافتگی نسبت به رابطه بیشتر است. نکته دیگر اینکه طول توسعه یافتگی به دست آمده بر اساس سرعت متوسط و انرژی جنبشی آشفتگی در انتهای دوره شتاب‌دهی به هم نزدیک بوده، کمی بیشتر از حالت پایا است؛ ولی در ابتدای دوره شتاب‌دهی طول توسعه یافتگی به دست آمده بر اساس سرعت متوسط جریان به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر از طول توسعه یافتگی متناظر آن بر اساس انرژی جنبشی آشفتگی است. دلیل این امر این است که در ابتدای دوره شتاب‌دهی سرعت متوسط سریعاً افزایش می‌یابد ولی اغتشاشات در افزایش تأخیر دارند.

شکل‌های (۱۳ و ۱۴) رفتار یکی دیگر از مشخصه جریان آشفته را به تصویر می‌کشند. این مشخصه معادل تنش برشی آشفتگی است که همانند سایر مشخصه‌های

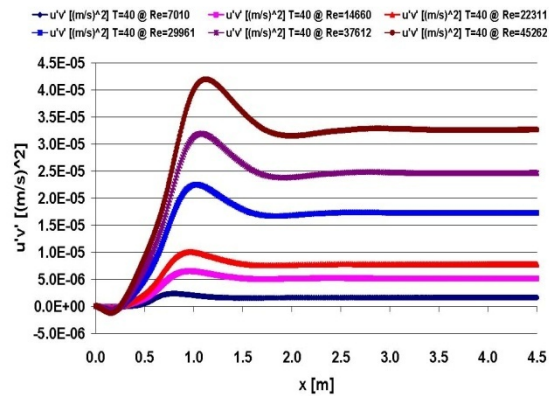
میل کردن شیب تغییرات آن به سمت صفر، به طول بیشتری نیاز دارد و از طرفی بیانگر ترکیبی از سایر مشخصه‌های آشفتگی است می‌تواند به عنوان نماینده قابل قبولی از مشخصه‌های جریان مورد مطالعه عمیق‌تر قرار گیرد. رفتار این مشخصه و تغییرات مشتق آن نسبت به راستای حرکت برای دو دوره شتاب‌دهی مختلف $T=5s$ و $T=40s$ در شکل‌های (۱۶ تا ۱۹) آورده شده‌اند.

در شکل (۲۰) تغییرات طول توسعه‌یافتگی بر مبنای لزجت آشفتگی جریان نسبت به زمان بی بعد (عدد رینولدز) در مرکز لوله برای دوره‌های شتاب‌دهی (T) مختلف با مقادیر محاسبه شده از رابطه (۳۴) مقایسه شده است. نکته قابل تأمل در این شکل آن است که در جریان‌های آشفتگی ناپایا نمی‌توان از روابط مربوط به طول توسعه‌یافتگی در جریان آشفتگی پایا - رابطه (۳۴) - بهره گرفت. این شکل نشان می‌دهد که طول توسعه‌یافتگی به دست آمده بر مبنای لزجت آشفتگی که مهم‌ترین مشخصه جریان‌های آشفتگی است حدود ۵۰٪ بزرگ‌تر از طول توسعه‌یافتگی حاصله بر مبنای سرعت و در حالت پایا می‌باشد.

در جدول‌های (۲ تا ۷) طول توسعه‌یافتگی برای مشخصه‌های مختلف که در شکل‌های قبل آمد، در دوره‌های مختلف شتاب‌دهی با رابطه (۳۴) مقایسه شده است.

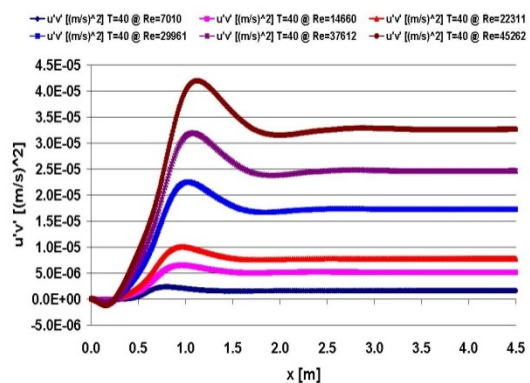


شکل ۱۶ تغییرات لزجت آشفتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=40s$ در اعداد رینولدز مختلف



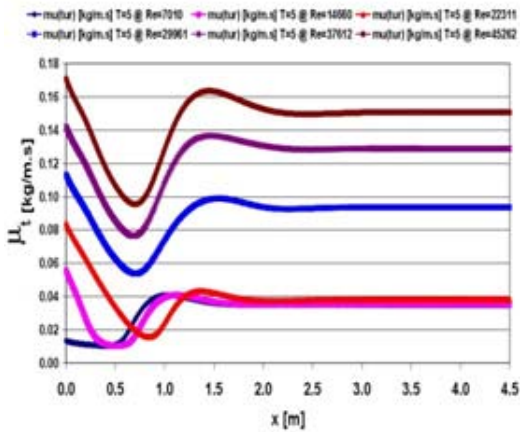
شکل ۱۴ تغییرات تنش آشفتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=40s$ در اعداد رینولدز مختلف

شکل (۱۵) مبین این مهم است که هر چند به لحاظ مقدار عددی طول توسعه‌یافتگی برای جریان آشفتگی ناپایا با رابطه (۳۴) متفاوت است اما با یک پرش نسبتاً ثابت، نمایه‌ای یکسان دارند. البته این یک قاعده قابل تعمیم نیست و به خصوص برای جریان‌های با شتاب زیاد (طول دوره شتاب‌دهی کوتاه) رفتار نوسانی طول توسعه‌یافتگی مشاهده می‌شود.

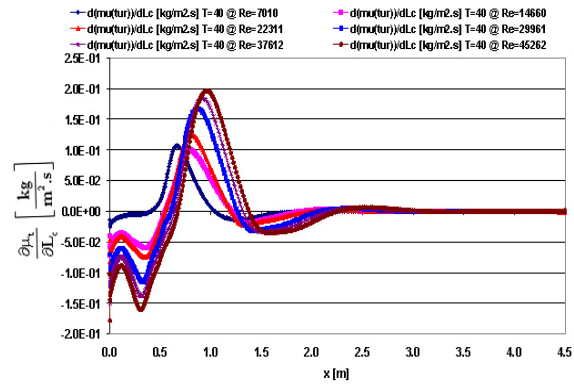


شکل ۱۵ تغییرات طول توسعه‌یافتگی بر مبنای تنش آشفتگی جریان نسبت به زمان بی بعد (عدد رینولدز) در مرکز لوله برای دوره‌های شتاب‌دهی (T) مختلف و رابطه (۳۴)

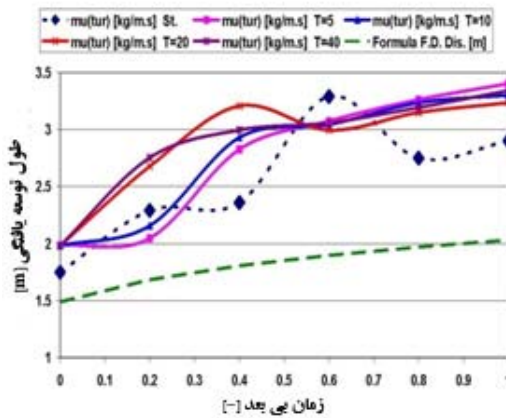
در ادامه و از شکل‌های (۱۶ تا ۲۰) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جریان‌های آشفتگی که همان لزجت آشفتگی است مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. از آنجا که این مشخصه برای رسیدن به ثبات تقریبی و



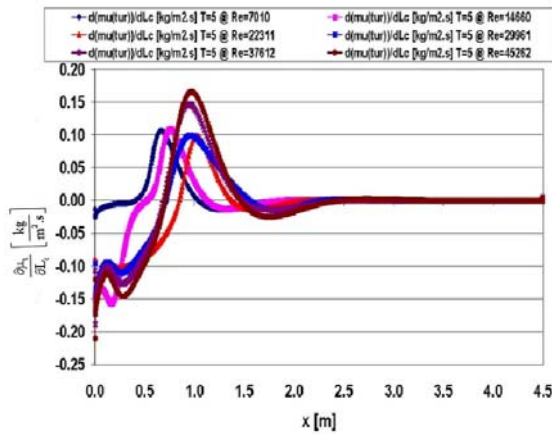
شکل ۱۸ تغییرات لزجت آشفتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۱۷ تغییرات مشتق لزجت آشفتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=40$ s در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۲۰ تغییرات طول توسعه یافتگی بر مبنای لزجت آشفتگی جریان نسبت به زمان بی بعد در مرکز لوله برای دوره‌های شتاب‌دهی (T) مختلف و رابطه (۳۴)



شکل ۱۹ تغییرات مشتق لزجت آشفتگی نسبت به راستای حرکت در مرکز لوله برای دوره شتاب‌دهی $T=5$ s در اعداد رینولدز مختلف

جدول ۲ طول توسعه یافتگی (m) در $t^* = 0$

زمان شیب صعودی [s]	U [m/s]	κ [m^2/s^2]	$u'v'$ [$(m/s)^2$]	μ_t [kg/m.s]
همه	۱/۴۴	۱/۷۶	۱/۵۵	۱/۹۸
رابطه	ثابت و برابر ۱/۴۹			

جدول ۳ طول توسعه یافتگی (m) در $t^* = 0.2$

زمان شیب صعودی [s]	U [m/s]	κ [m ² /s ²]	$u' v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
۱	۱/۴۹	۱/۶۰	۱/۵۷	۲/۰۰
۵	۲/۲۷	۱/۷۳	۱/۶۶	۲/۰۵
۱۰	۱/۶۷	۱/۸۶	۱/۰۳	۲/۷۰
۲۰	۱/۶۲	۱/۸۴	۱/۷۳	۲/۶۸
۴۰	۲/۱۱	۱/۸۶	۱/۷۳	۲/۷۵
رابطه	ثابت و برابر ۱/۶۹			

جدول ۴ طول توسعه یافتگی (m) در $t^* = 0.4$

زمان شیب صعودی [s]	U [m/s]	κ [m ² /s ²]	$u' v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
۱	۲/۰۰	۱/۵۲	۱/۶۴	۲/۰۷
۵	۲/۵۸	۱/۹۴	۲/۷۲	۲/۸۳
۱۰	۱/۹۰	۲/۰۳	۱/۹۲	۲/۹۳
۲۰	۱/۸۴	۱/۹۶	۱/۰۵	۳/۲۱
۴۰	۱/۷۳	۱/۹۴	۱/۷۸	۳/۰۰
رابطه	ثابت و برابر ۱/۸۱			

جدول ۵ طول توسعه یافتگی (m) در $t^* = 0.6$

زمان شیب صعودی [s]	U [m/s]	κ [m ² /s ²]	$u' v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
۱	۲/۲۷	۱/۲۲	۱/۷۳	۲/۱۳
۵	۲/۵۰	۲/۱۶	۱/۳۱	۳/۰۷
۱۰	۱/۹۴	۲/۱۳	۲/۰۰	۳/۰۴
۲۰	۲/۳۹	۲/۱۱	۱/۹۰	۳/۰۰
۴۰	۲/۳۴	۲/۱۱	۱/۸۶	۳/۰۶
رابطه	ثابت و برابر ۱/۹۰			

جدول ۶ طول توسعه یافتگی (m) در $t^* = 0.8$

زمان شیب صعودی [s]	U [m/s]	κ [m ² /s ²]	$u' v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
۱	۲/۲۰	۱/۳۶	۲/۷۷	۲/۲۷
۵	۲/۷۲	۲/۲۷	۱/۱۷	۳/۲۶
۱۰	۱/۹۴	۲/۲۵	۱/۱۲	۳/۲۴
۲۰	۱/۹۲	۲/۶۸	۱/۹۴	۳/۱۵
۴۰	۲/۷۹	۲/۷۰	۱/۹۴	۳/۱۹
رابطه	ثابت و برابر ۱/۹۷			

جدول ۷ طول توسعه یافتگی (m) در $t^* = 1$

زمان شیب صعودی [s]	U [m/s]	κ [m ² /s ²]	$u' v'$ [(m/s) ²]	μ_t [kg/m.s]
۱	۲/۳۴	۱/۵۴	۲/۰۹	۲/۴۳
۵	۲/۰۷	۲/۳۹	۱/۱۸	۳/۴۰
۱۰	۲/۹۰	۲/۷۳	۱/۱۶	۳/۳۰
۲۰	۲/۵۰	۲/۷۵	۱/۱۵	۳/۲۴
۴۰	۱/۹۶	۲/۷۷	۲/۰۳	۳/۳۴
رابطه	ثابت و برابر ۲/۰۳			

بحث

با بررسی شکل‌ها و کمیت‌های مختلف مشخصه‌های آشفتگی می‌توان به این نتیجه مهم رسید که در مدل آشفتگی SST، حالت یک بعدی انرژی جنبشی، آشفتگی را به خصوص در نواحی دورتر از مرکز لوله به خوبی حل‌های دو بعدی و سه بعدی پیش‌بینی می‌کند. برای مشخصه شدت آشفتگی نیز، تقریباً همین شرایط حاکم است و حل یک بعدی در نیمه دوم دوره شتاب‌دهی بهتر از دو حالت دو بعدی و سه بعدی است. در پیش‌بینی مشخصه سرعت محوری جریان حالت‌های مختلف یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی ارجحیتی بر هم ندارند. بنابراین در مجموع و با لحاظ نمودن جنبه‌های عددی و هزینه، فایده دقت و زمان، استفاده از حل یک بعدی برای جریان شتابدار آشفتگی در لوله پیشنهاد می‌گردد.

همچنین نمودارها و جدول‌های این تحقیق نشان دهنده این واقعیت مهم هستند که در بررسی و تشخیص ناحیه توسعه یافته جریان نباید تنها به معیار سرعت محوری بسنده نمود بلکه باید به سایر مشخصه‌های جریان به خصوص در جریان آشفتگی به مشخصه‌های آشفتگی مانند انرژی جنبشی آشفتگی، لزجت آشفتگی، اتلافات و ... توجه کافی مبذول داشت. طبق تعریف طول توسعه یافتگی طولی است که تغییرات مشخصه‌ها در راستای حرکت ثابت (صفر) می‌شود. با توجه به این تعریف، چون برای جریان

شتابدار رفتار مشخصه‌های سیال دست خوش تغییرات می‌شود (24, 26, 27, 23) و از طرفی جریان آشفتگی به طور ذاتی دارای نوسان‌های تصادفی است، بنابراین استفاده از روابط مربوط به طول توسعه یافتگی که برای جریان‌های پایا مورد استفاده قرار می‌گیرد (روابط ۱-الف و ۱-ب)، محل اشکال و تردید است و باید از روابط اصلاح شده که وابسته به شرایط دوره شتاب‌دهی است استفاده شود. مقایسه بین طول توسعه یافتگی برای جریان ناپایای مورد مطالعه در این تحقیق با جریان پایای معادل که در جدول‌ها آمده است، نشان می‌دهند که تفاوت زیادی در پیش‌بینی طول توسعه یافتگی برای دو نوع رژیم جریان آشفتگی پایا و ناپایا وجود دارد و طول توسعه یافتگی جریان حداقل ۵۰٪ نسبت به حالت پایا افزایش دارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حل‌های یک، دو و سه بعدی و با لحاظ نمودن زمان مورد نیاز برای حل و پیچیدگی‌های مربوط به حالت‌های مختلف، استفاده از مدل آشفتگی SST، در حل یک بعدی برای مدل‌سازی جریان آشفتگی ناپایا در لوله توصیه می‌شود.

همان‌طور که از جدول‌ها و شکل‌ها بر می‌آید طول توسعه یافتگی بر حسب سرعت و شتاب نوسانی و غیرقابل پیش‌بینی دقیق است، به عبارتی طول توسعه یافتگی مشخصی را در این وضعیت نداریم. ولی

پایا افزایش می‌یابد. نتیجه کلی اینکه در جریان‌های ناپایای داخل لوله، طول توسعه‌یافتگی به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با جریان پایا افزایش می‌یابد و جالب اینکه این طول با افزایش زمان دوره شتاب‌دهی زیاد می‌شود.

اگر بیشترین طول را که بر اساس این تحقیق مربوط به لزجت آشفته‌گی است انتخاب کنیم، با افزایش t^* افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان دوره شتاب‌دهی طول توسعه‌یافتگی، گاهی تا حدود ۱/۵ برابر طول پیش‌بینی شده توسط روابط موجود برای حالت

فهرست علائم

علائم یونانی		D [m] قطر لوله
κ [m ² /s ²] انرژی جنبشی آشفته‌گی		p فشار در لوله
u_τ سرعت اصطکاکی		R شعاع لوله
τ_w تنش برشی دیواره		t [s]-[*] زمان-زمان (بی بعد شتاب‌دهی)
v_f لزجت گردابه‌ای		u [m/s] سرعت (نوسانات) در جهت محوری
ρ kg/m ³ چگالی		v [m/s] سرعت (نوسانات) در جهت شعاعی
μ kg/m.s لزجت سیال		L [m] طول توسعه‌یافتگی جریان
θ جهت زاویه‌ای در مختصات استوانه‌ای		r [m] موقعیت در راستای شعاعی
ω SST گردابه (در مدل)		Re [-] عدد رینولدز
زیرنویس		T [s] زمان دوره شتاب‌دهی
I مقدار اولیه		U [m/s] سرعت میدان جریان
τ مشخصه بر پایه سرعت اصطکاکی		x [m] موقعیت در راستای محوری
F مقدار نهایی		بالانویس
		' پریم، نوسانات
		*,+ بی بعد

مراجع

- Shemer, L. & Kit, E., "An experimental investigation of the quasi-steady turbulent pulsating flow in a pipe", *Phys. Fluids*, 27, pp. 72-76, (1984).
- Shemer, L., Wagnanski, I. & Kit, E., "Pulsating flow in a pipe", *Journal of the Fluid Mech*, 153, pp. 313-337, (1985).
- Burnel, S., Raelison, J.C. and Thomas, J.M., "Radial distribution of the Reynolds stress in a turbulent pulsating flow in a pipe", *In Engineering Turbulence Modeling and Experiments* (ed. W. Rodi & Y. Ganic), pp. 419-427, Elsevier, (1990).
- Burnel, S., Raelison, J.C. and Thomas, J.M., "Radial distribution of the Reynolds stress in a turbulent

- pulsating flow in a pipe", *Euromech Colloquium 272 Response of Shear Flows to Imposed Unsteadiness*, Aussois, France, (1991).
5. Ramaprian, B. R. and S.W. Tu, "An experimental study of oscillatory pipe flow at transitional Reynolds numbers", *Journal of the Fluid Mech*, 100, pp.513-544, (1980).
 6. Ramaprian, B.R. and S.W. Tu, "Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 2. The detailed structure of the flow", *Journal of the Fluid Mech*, 137, pp. 59-81, (1983).
 7. Tardu, S.F., Binder, G. and Blackwelder, R.F, "Turbulent channel flow with large amplitude", *Journal of the Fluid Mech*, 269, pp. 109-151, (1994).
 8. Greenblatt, D. and Moss, E.A, "pipe-flow relaminarization by temporal acceleration", *Phys. Fluids 11*, 3478-3481, (1999).
 9. Greenblatt, D. & Moss, E.A, "Rapid temporal acceleration of a turbulent pipe flow", *Journal of the Fluid Mech 2004*, vol. 514, pp. 65-75, (2004).
 10. Scotti, A. and Piomelli, U., "Turbulence models in pulsating flows", *AIAA Journal*, 40, pp. 537-540, (2002).
 11. Ohmi, M., Usui, T., Tanaka, O. and Toyama, M., "Pressure and velocity distributions in pulsating turbulent pipe flow, part 1: Theoretical treatments", *Bull. JSME*, 19, pp. 307-313, (1976).
 12. Ohmi, M., Kyomen, S. and Usui, T., "Analysis of velocity distribution in pulsating turbulent pipe flow with time-dependent friction velocity", *Bull. JSME*, 21, pp. 1137-1143, (1978).
 13. Kita, Y., Adachi, Y. and Hirose, K., "Periodically oscillating turbulent flow in a pipe", *Bull. JSME*, 23, pp. 656-664, (1980).
 14. Murphy, J.D. & Prenter, P.M., "A hybrid computing scheme for unsteady turbulent boundary layers. Proc", *Third Symp. On Turbulent Shear Flows*, Pennsylvania State University, pp. 8.26-8.34, (1981).
 15. Cook, W.J., Murphy, J.D. & Owen, F.K., "An experimental and computational study of turbulent boundary layers in oscillating flows", *Fifth Symp. On Turbulent Shear Flows*, Cornell University, Ithaca, New York.
 16. Ramaprian, B.R. & S.W. Tu, "Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 2. The detailed structure of the flow", *Journal of the Fluid Mech*, 137, pp. 59-81, (1983).
 17. Kirmse, R.E., "Investigations of pulsating turbulent pipe flow", *Trans. ASME*, 101, pp. 436-442, (1979).
 18. Cousteix, J., Javelle, J. and Houdeville, R., "*Influence of Strouhal number on the structure of a flat plate turbulent boundary layer*", Third Symp. On Turbulent Shear Flows, University of California, Davis, USA, (1981).
 19. Blondeaux, P. and Colombini, M., "*Pulsating turbulent pipe flow*", Fifth Symp. On Turbulent Shear Flows, Cornell University, Ithaca, New York, (1985).

20. He, S. and Jackson, J.D., "A Study of Turbulence under Conditions of Transient Flow in a Pipe", *Journal of the Fluid Mech*, 408, pp.1–38, (2000).
21. Launder, B.E. and Sharma, B.I., "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc", *Lett. Heat Mass Transfer*, 1, pp. 131-138, (1974).
22. Cotton, M.A. and Ismael, J.O., "An examination of periodic turbulent pipe flow using a low-Reynolds-number $k-\epsilon$, turbulence model", *Eighth Symp. On Turbulent Shear Flows*, Technical University of Munich, Germany, (1991).
۲۳. خالقی علی ، پسندیده فرد محمود ، منصور ساعتلو مهتاب، تیمورتاش علی رضا، بررسی جریان شتابدار غیر پرئودیک توربولنس با استفاده از مدل آشفستگی SST، هفدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک ISME2009، ایران، تهران، (۱۳۸۸).
24. He, S., Ariyaratne C. and Vardy A.E., "A computational study of wall friction and turbulence dynamics in accelerating pipe flows", *Journal of the Computers & Fluids*, 37, pp. 674–689, (2008).
25. Langhaar, H. L., "Steady Flow in the Transition Length of a Straight Tube," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 9, (1942).
26. Khaleghi, A., Pasandideh-Fard, M., Malek-Jafarian, M. and 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).
27. Greenblatt, D. and Moss, E., "Rapid Temporal Acceleration of a Turbulent Pipe Flow", *Journal of Fluid Mechanics*, 514, pp. 65-75, (2004).
28. Menter, F.R., "Two-Equation Turbulence-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal*, 32, pp. 1598-1605, (1994).