

بررسی عددی سهم ترمهای مختلف انرژی جنبشی تلاطمی در جریان آشفته شتابدار در داخل لوله و کانال

محمود پسندیده فرد^۱، محمد نعیمی راد^۲، علی خالقی^۳

۱- گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

انرژی جنبشی تلاطمی به طور کلی تشکیل شده است از سه ترم تولید، پخش و اتلاف که با یک دیگر در تعادل میباشند. مطالعه این ترم ها میتواند ما در کنترل آشفتنی در شرایطی که جریان درهم برای انتقال حرارت بهتر لازم است یا کاهش ضریب درگ در کاربردهای هوافضایی لازم است و یا در شرایطی که جریان آرام برای کاهش ضریب اصطکاک لازم است، کمک کند. بررسی تاثیر جریان ناپایا (شتابدار) در داخل لوله بر سه ترم انرژی جنبشی تلاطمی اعم از ترم پخش، ترم اتلاف و ترم تولید نشان میدهد که این سه ترم با فاصله گرفتن از دیوار لوله به طوری محسوسی تغییر میکنند و به نظر میرسد وابستگی این ترم ها به مکان شدیدتر از وابستگی آن ها به زمان است. هرچه از مرکز لوله به سمت دیواره نزدیک تر میشویم اثر پخش کمتر و اثر تولید زیادتر میشود. بررسی نتایج حاصله مبین این مهم میباشد که ترم های تولید و اتلاف بسیار متاثر از اندازه شتاب اعمالی هستند. به طوری که هرچه این شتاب بزرگتر باشد ترم تولید و ترم اتلاف در یک زمان بی بعد معین کوچکتر هستند. مقایسه رفتار جریان شتاب دار سیال در کانال ها و لوله نشان میدهد که تاخیر زمانی در تبدیل شدن جریان آرام به درهم که ناشی از شتاب گیری سیال است در کانال ها مقداری بزرگتر است. در مقاله پیشرو با استفاده از مدل آشفتنی $k - \epsilon - v^2$ به بررسی سهم این ترم پرداخته ایم.

واژه های کلیدی: جریان آشفته-انرژی جنبشی تلاطمی-جریان شتابدار- جریان داخلی

مقدمه

ماهیت تقریباً کلیه جریان های سیال ایجاد شده در صنعت و طبیعت از نوع جریان آشفته است. لذا شناخت پدیده ی آشفتنی امری واجب مینماید. از طرفی بسیاری از جریان های آشفته، ناپایا (شتابدار) هستند. جریان های شتابدار آشفته در داخل لوله ها حضوری گسترده در تمامی بخش های صنعت دارند. از مهم ترین نکاتی که برای مطالعه این جریان ها باید در نظر گرفته شود بحث انرژی جنبشی تلاطمی است. انرژی جنبشی تلاطمی به طور کلی تشکیل شده است از سه ترم تولید، پخش و اتلاف که با یک دیگر در تعادل میباشند. مطالعه این ترم ها میتواند ما در کنترل آشفتنی در لوله ها در شرایطی که جریان درهم برای انتقال حرارت بهتر لازم است و یا در شرایطی که جریان آرام برای کاهش ضریب اصطکاک لازم است، کمک کند.

جریان های شتابدار آشفته داخل لوله موضوع بحث بسیاری از مقالات و تحقیقات بوده است. اما آنچه که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است، بررسی سهم ترم های مختلف انرژی تلاطمی در جریان شتابدار است. شاید جدی ترین و علمی ترین تحقیقات پیرامون جریان داخل لوله به وسیله رینولدز (Reynolds)، دانشمند ایرلندی قرن نوزدهم آغاز شد. به دنبال وی محققان بسیاری از قبیل پرائتل (Prantel)، شلیختینگ (Shelkhting) و فن کارمن (Von Karman) و بسیاری دیگر پیرامون همین موضوع به یافته های بسیاری دست یافتند که این نتایج جان مایه بسیاری از مقالات و تحقیقات علمی شده است. جریان شتابدار داخل لوله بحثی بسط است که تا کنون تحقیقات بسیاری چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت عددی و تئوری روی آن صورت گرفته است. هی (He) و جکسون (Jakson) [۱] نتایجی تجربی را در مورد جریان آشفته داخل لوله تحت شرایط شتاب متوسط به دست آوردند. آداموفسکی (Adamkowski) و لواندوسکی (Lewandowski) [۲] مدل هایی عددی برای ضریب اصطکاک ناپایا در توصیف پدیده چکش آب ارائه کردند و برای بررسی صحت داده هایشان مدلی آزمایشگاهی را اجرا کرده و از آن استفاده کردند. ایوو پتوف (Ivo Pothof) [۳] مدل های ضریب اصطکاک ناپایا مختلفی را به کار گرفته و نتایج را ارائه کرده است. کوروکاو (Kurokawa) و موریکاو (Morikawa) [۴] با استفاده از یک طرح آزمایشگاهی تأثیر شتاب تند شونده و کند شونده را بر پروفیل سرعت متوسط، رینولدز بحرانی و ضریب اصطکاک برای مقادیر مختلفی از شتاب در جریان داخل لوله بررسی کردند. آنوس (Annus) و کوپل (Koppel) و واردی (Vardy) [۵] نیز با استفاده از یک روش آزمایشگاهی، گذار از جریان آرام به توربولنت (Turbulent) را در جریان شتابدار داخل لوله بررسی کرده اند. نیشی هارا (Nishihara)، ناکاهاتا (Nakahata)، کنیسلی (Knisely) و ساساکی (Sasaki) [۶] در یک مدل آزمایشگاهی دیگر تأثیر شتاب اولیه بر تاریخچه گذار به توربولنت را برای سه گرادیان فشار مختلف (سه پروفیل سرعت مختلف) مورد آزمایش قرار دادند و تأثیر شتاب را بر تأخیر توربولنت شدن جریان داخل لوله را گزارش کردند. سی یون جانگ (Seo Yun Junga) و چونگ (Chung) [۷] جریان شتابدار درهم را در لوله با مقطع دایروی را به صورت عددی شبیه سازی کردند. گرین بلات (Greenblatt) و مووز (Moss) [۸] اسکوتی (Scotti) و پایوملی (Piomelli) [۹] مطالعاتی آزمایشگاهی را با استفاده از بادسنج لیزری داپلر بر روی این موضوع انجام دادند. از طرفی محققانی نظیر شمر (Shemer) و ویگناسکی (Wynanski) [۱۰] از مدل عددی اغتشاش صفر معادله ای، تو (Tu) و رمپاریان (Ramprian) [۱۱] از مدل اغتشاش یک معادله ای و بلودیوکس (Blondeaux) و کلومبینی (Colombini) [۱۲] از مدل

۱- دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

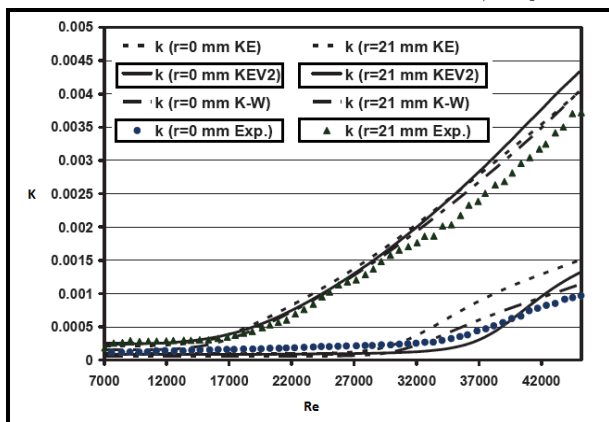
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی مشهد، ۰۹۱۵۱۰۴۶۸۸۳

۳- mohamad.naemirad@yahoo.com

۳- استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود

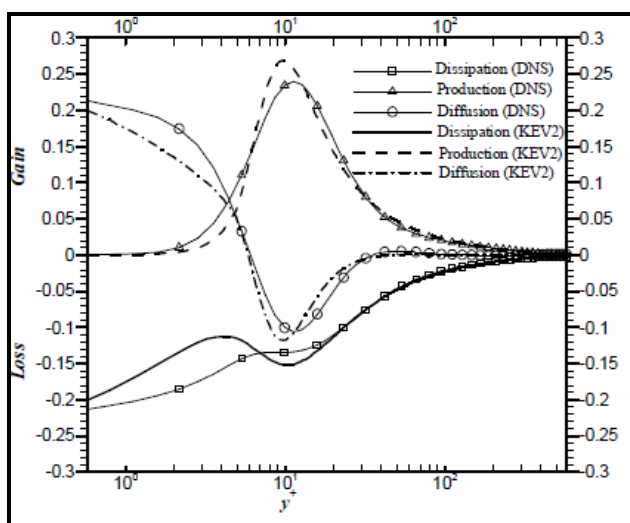
صحه گذاري مدل

برای صحت آزمایی کد نوشته با مدل های آشفتگی مختلف که البته در اینجا مدل $k - \epsilon - v^2$ مورد استفاده قرار گرفته است، از نتایجی تجربی که توسط هی و جکسون [۱] در آزمایشات شان بدست آورده بودند استفاده کرده ایم.



شکل ۱- مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی و حل تجربی

مطابق شکل ۱ مشاهده میشود که برای انرژی جنبشی آشفتگی کل همخوانی بسیار مناسبی بین نتایج بدست آمده از کد با مدل $k - \epsilon - v^2$ و نتایج تجربی وجود دارد. هرچند که بحث صورت گرفته در شکل ۶ انرژی جنبشی تلاطمی کل را مورد کاوش قرار داده است اما با توجه به مطابقت داده های کد و تجربی در این مورد، انتظار داریم که کد با مدل آشفتگی مذکور در مورد سهم ترم های مختلف انرژی جنبشی تلاطمی نیز جوابی در خور و مناسب را ارائه دهد. شایان ذکر است که در شکل ۲ سهم ترم های مختلف انرژی جنبشی تلاطمی اعم از ترم پخش، اتلاف و تولید بدست آمده از اجرای کد با مدل $k - \epsilon - v^2$ مطابقت بسیار مناسبی با داده های حل عددی مستقیم دارد که این موضوع مبین این مهم است که انتخاب این مدل آشفتگی برای حل بسیار صحیح و مناسب بوده است.



شکل ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی مستقیم و حل با مدل $k - \epsilon - v^2$

اغتشاش دو معادله ای استفاده کردند. لام (Lam) و برم هورست (Bremhorst) [۱۳] نیز از مدل $k - \epsilon$ برای پیش بینی توربولنسی نزدیک دیواره استفاده کردند.

در مقاله پیشرو با استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon - v^2$ به بررسی سهم این ترم ها انرژی در داخل لوله ای به قطر ۵۰٫۸ میلی متر (دو اینچ) که در آن آب به صورت شتابدار جریان دارد پرداخته ایم. در این طرح جریان شتابدار زمانی غیر پریودیک وارد لوله ای به قطر دو اینچ میشود. عدد رینولدز ورودی ۷۰۰۰ و عدد رینولدز در انتهای بازه شتاب دهی به ۴۵۲۰۰ میرسد. برای مدل کردن شتابدهی سرعت جریان آب از ۰٫۱۳۸ متر در هر ثانیه به ۰٫۸۹۱ متر در هر ثانیه میرسد. با تغییر زمان های لازم برای این افزایش سرعت میتوان شتاب های مختلفی را به جریان اعمال کرد. این موضوع با دو شتاب دهی مختلف که در یکی از آن شتابداری عدد بزرگی است و دیگری عددی کوچک است، بررسی میشود. سپس نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از حل برای کانال مقایسه خواهد شد. همچنین برای مدل کردن آشفتگی از مدل $k - \epsilon - v^2$ استفاده شده است. این مدل به عنوان یک مدل تخفیف بیضوی در نواحی شدیداً غیرهمگن نزدیک دیواره برای جریان متلاطم، اثرات ناشی از دیواره را به خوبی اعمال می کند و با داده های حل عددی مستقیم مطابقت خوبی دارد. از مهم ترین مزیت های این مدل عدم وابستگی آن به توابع میرا است

فرمول ها و روابط

قبل از شروع بحث سهم ترم های مختلف انرژی جنبشی لازم است مروری مجدد نسبت به این ترمها داشته باشیم. همانطور که می دانیم معادله انتقال انرژی جنبشی تلاطمی در شکل بی بعد به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial k^+}{\partial t^+} = P^+ - \epsilon^+ + \frac{\partial}{\partial y^+} \left[\left(1 + \frac{v_t^+}{\sigma} \right) \frac{\partial k^+}{\partial y^+} \right] \quad (1)$$

که در آن سهم ترم تولید عبارتست از:

$$P^+ = v_t^+ \left(\frac{\partial u^+}{\partial y^+} \right)^2 \quad (2)$$

و سهم ترم پخش:

$$\frac{\partial}{\partial y^+} \left[\left(1 + \frac{v_t^+}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k^+}{\partial y^+} \right] \quad (3)$$

و ترم اتلافات هم ϵ^+ است که از معادله انتقال مربوطه خود استخراج می شود:

$$\frac{\partial \epsilon^+}{\partial t^+} = C_{\epsilon 1}^* \frac{P^+}{T^+} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^+}{T^+} + \frac{\partial}{\partial y^+} \left[\left(1 + \frac{v_t^+}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon^+}{\partial y^+} \right] \quad (4)$$

که در آن:

$$C_{\epsilon 1}^* = C_{\epsilon 1} \left(1 + a_1 \frac{P^+}{\epsilon^+} \right)$$

$$T = \max \left[\frac{k^+}{\epsilon^+}, 6 \left(\frac{1}{\epsilon^+} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

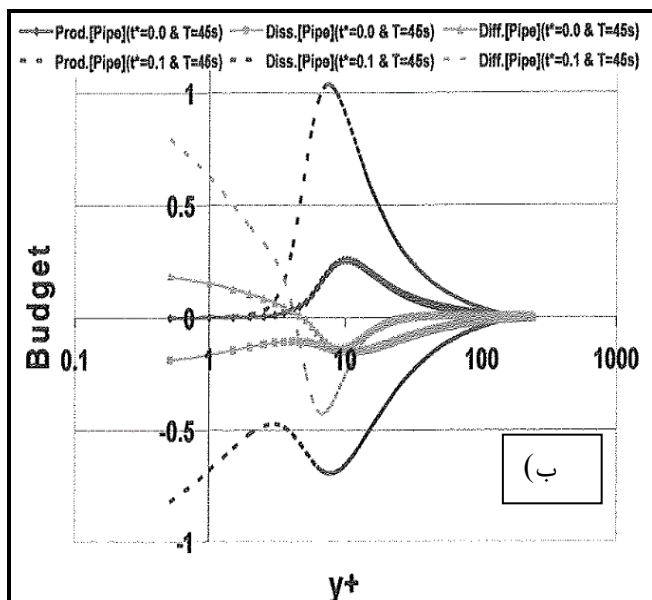
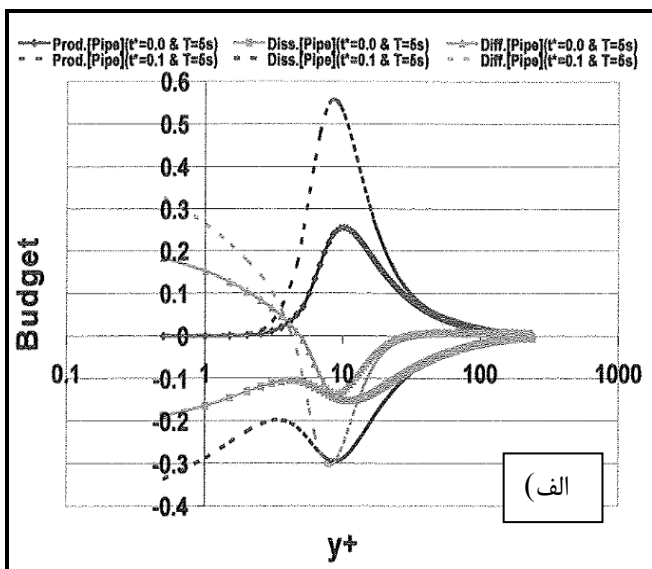
با توجه به مطالب فوق به راحتی می توان سهم هر یک از ترم های موردنظر (اعم از تولید، پخش یا اتلافات) را محاسبه نمود. در مقاله پیشرو با استفاده از یک کد کامپیوتری تاثیر شتاب گیری جریان بر رفتار این سه ترم در داخل لوله با مقطع دایروی بررسی میشود

بررسی نتایج

از کنار دیواره تا $y^+ = 20$ برای ابتدای دوره شتابدهی و تا $y^+ = 4$ برای انتهای دوره شتابدهی می‌توان برای سهم پخش مقداری را متصور بود) است.

در ادامه این مقاله مقایسه‌ای بین سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفتگی در حالت‌های متنوع ارائه شده است. اساساً این نوع مقایسه برای بررسی کارایی مدل‌ها و اثر هر یک از ترم‌ها بسیار مفید و مطلوب می‌باشد. شکل‌های ۳ سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفتگی در زمان‌های $t^* = 0$ و $t^* = 0.1$ و $t^* = 1.0$ را برای دوره شتابدهی ۴۵ ثانیه مقایسه می‌کنند. که در آن $\frac{t}{T} = t^*$ است و T زمان کل دوره بازه شتابدهی است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، از لحظات اولیه دوره شتابگیری، اکستریم (بیشینه) میزان تولید انرژی جنبشی در محدوده $y^+ = 10$ اتفاق می‌افتد و در همین مکان نیز اکستریم (کمینه) پخش و اتلافات نیز مشاهده می‌شود. از لحظات اولیه دوره شتابگیری، اکستریم (بیشینه) میزان تولید انرژی جنبشی در محدوده $y^+ = 10$ اتفاق می‌افتد و همانند دوره شتابدهی ۴۵ ثانیه به مرور زمان نقاط بیشینه به سمت دیواره متمایل می‌شوند. از نکات مهم و حائز اهمیت در رفتارشناسی این پدیده انتقال تدریجی محل نقاط بیشینه $y^+ = 10$ به $y^+ < 10$ در طول دوره شتابدهی است، که نشان‌دهنده محدودتر شدن ناحیه لزوج کنار دیواره و نفوذ بیش از پیش ممنوم از لایه‌های دور از دیواره به نواحی نزدیک دیواره است. بنابراین می‌توان چنین استنتاج نمود که در جریان شتابدار مذکور ناحیه تحت تأثیر جریان آشفته گسترش یافته است.

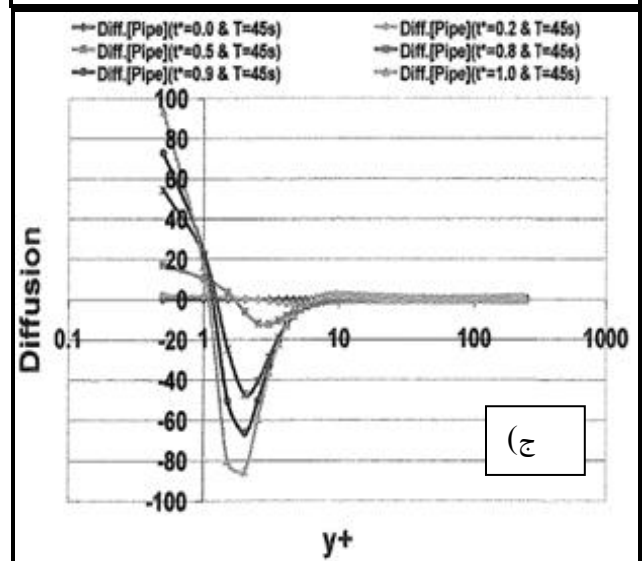
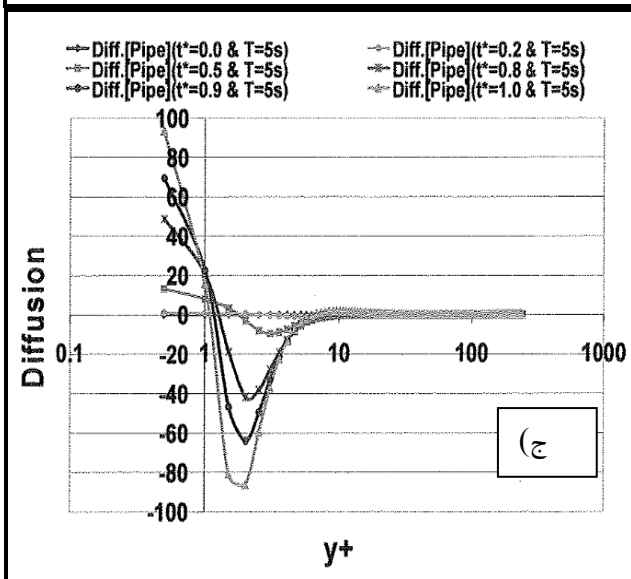
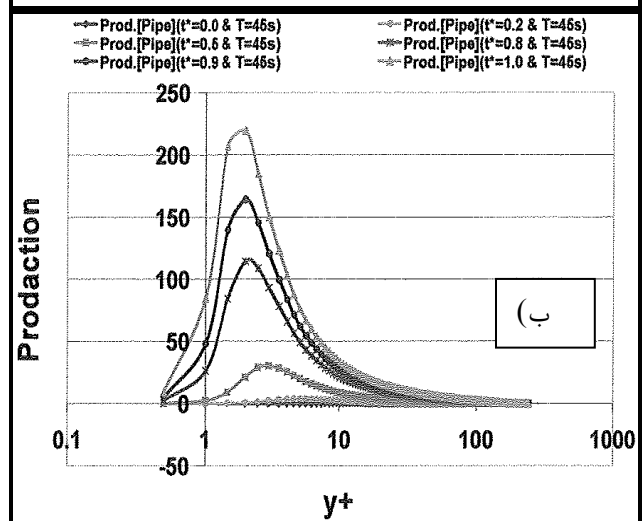
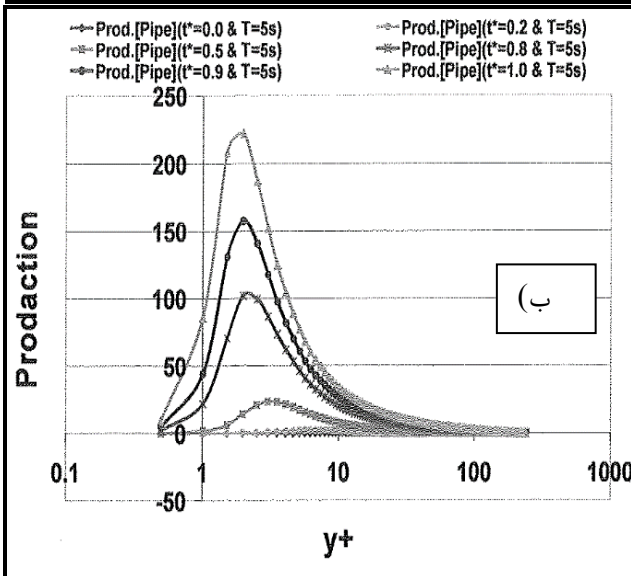
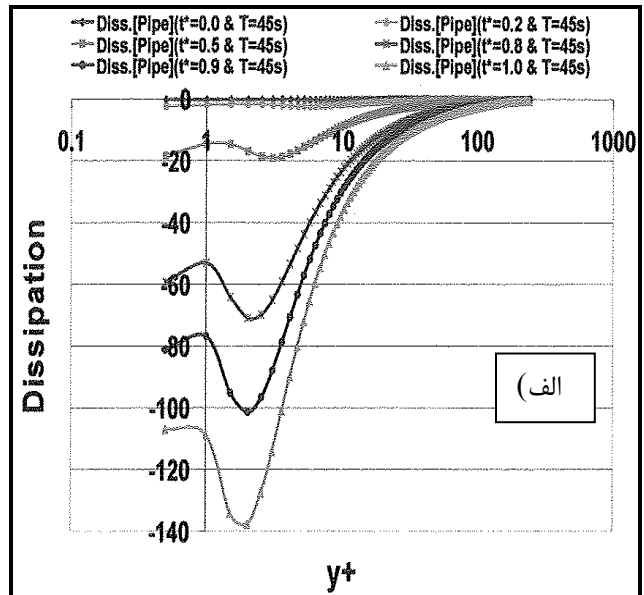
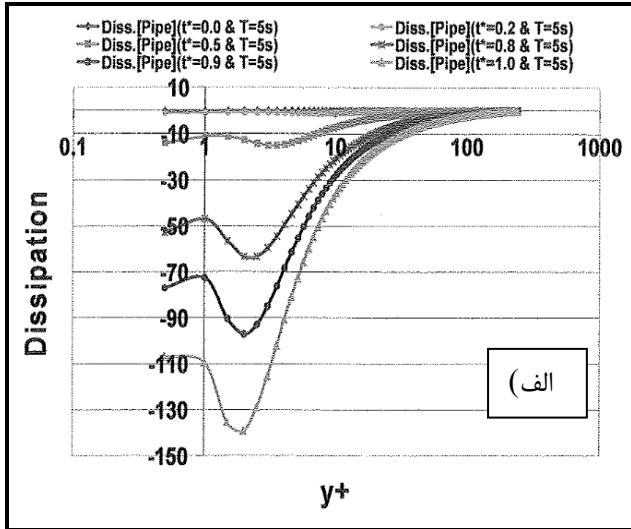
در شکل‌های ۴ سهم ترم‌های تولید، پخش و اتلافات برای زمان‌های بی‌بعد مختلف نسبت به هم برای دوره شتابدهی ۴۵ ثانیه، مقایسه شده‌اند. در این شکل‌ها حرکت نقطه اکستریم به سمت دیواره در گذر زمان واضح‌تر نمایش داده شده است. شکل‌های نیز سهم ترم‌های تولید، پخش و اتلافات برای زمان‌های بی‌بعد مختلف نسبت به هم برای دوره شتابدهی ۵ ثانیه، مقایسه شده‌اند. این شکل‌ها نیز حرکت نقطه اکستریم به سمت دیواره در گذر زمان را به صورت واضح‌تری نشان می‌دهند. توجه به تغییر مکان نقطه بیشینه و کمینه تولید، پخش و اتلافات، در مدل‌سازی‌های عددی برای محققین نکته بسیار حائز اهمیتی تلقی می‌گردد، چرا که اگر y^+ اولین گره کنار دیواره از مقداری که در انتهای دوره شتابدهی به آن میل می‌کند بیشتر باشد ممکن است نتایج حساس کنار دیواره به شکل مطلوبی مدل‌سازی نشوند. (این موضوع می‌تواند یکی از علل ناکارآمدی برخی مدل‌های مشهور در مدل‌سازی این گونه رژیم‌های جریانی باشد). روند مشابه تحولات برای زمان‌های مختلف دوره شتابدهی بر این موضوع مهم تأکید دارد که سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی تلاطمی (تولید- پخش و اتلافات) چندان تحت تأثیر زمان دوره شتابدهی نیست و این تغییرات بیشتر متأثر از قید مکان (فاصله از دیواره) هستند تا قید زمان (زمان شتابگیری). در شکل‌های ۴ مقایسه ترم‌های مختلف در زمان بی‌بعدهای متفاوت برای دوره‌های شتابدهی ۴۵ و ۵ ثانیه آورده شده‌اند. یکی از نکات بسیار مهم در این شکل‌ها مشاهده اثر تأخیر زمانی در ظهور و بروز و رشد ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفتگی است. همانطور که مشاهده می‌شود برای دوره شتابدهی ۵ ثانیه با توجه به پدیده تأخیر زمانی در ابتدای دوره شتابدهی رشد سهم‌های مختلف کند بوده و پس از اتمام دوره تأخیر زمانی رشد سهم‌های زیاد شده به طوری که در محدوده پایانی دوره شتابدهی تطبیق برقرار می‌شود و ترم‌های سهم تولید، پخش و اتلافات مستقل از شتاب می‌شوند. یکی دیگر از نکات قابل توجه در تحلیل نمودارهای سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی تلاطمی ارزیابی ضریب وزنی هر یک از ترم‌هاست که بررسی موضوع نشان‌دهنده ضریب وزنی بسیار ناچیز ترم پخش در مقابل تولید و اتلافات برای نواحی دور از دیواره



شکل ۳- سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفتگی در زمان‌های بی‌بعد $t^* = 0$ و $t^* = 0.1$ (در دوره شتابدهی الف) ۵ ثانیه و ب) ۴۵ ثانیه

با توجه به اینکه با گذر زمان عدد رینولدز جریان افزایش می‌یابد انتظار داریم اثرات نفوذ ممنوم به لایه‌های نزدیک دیواره افزایش یابد و زیرلایه لزوج که تنها متأثر از ترم‌های لزوج است و انرژی در آن از طریق پخش منتشر می‌گردد، لحظه به لحظه محدودتر به کنار دیواره گردد، که این موضوع در جریان‌های آشفته شتابدار نیز رخ می‌دهد. همچنین از دید ناظر متحرک با زمان می‌توان چنین مشاهده کرد که با توجه به فاصله از دیواره زمان آغاز تولید، پخش و اتلافات انرژی متفاوت است (تیبین موضوع تأخیر زمانی که قبلاً به طور مفصل راجع به آن بحث شد)، بطوری که در مرکز لوله دیرتر از سایر مکان‌ها رشد ترم‌ها، آغاز می‌شود. در نزدیکی دیواره نیز زمان آغاز تولید انرژی و اتلاف آن نسبتاً کوتاه است. (بایستی توجه نمود که در این مکان سهم ترم پخش جز برای انتهای دوره شتابدهی بسیار اندک بوده و عملاً می‌توان از آن صرف‌نظر نمود). اثر تأخیر

زمانی که در مرکز لوله کاملاً مشهودتر است. همانطور که قبلاً ذکر شد، در مرکز لوله اثر تولید به سمت صفر میل می‌کند و ترم‌های پخش و اتلافات برقرارکننده تعادل هستند.



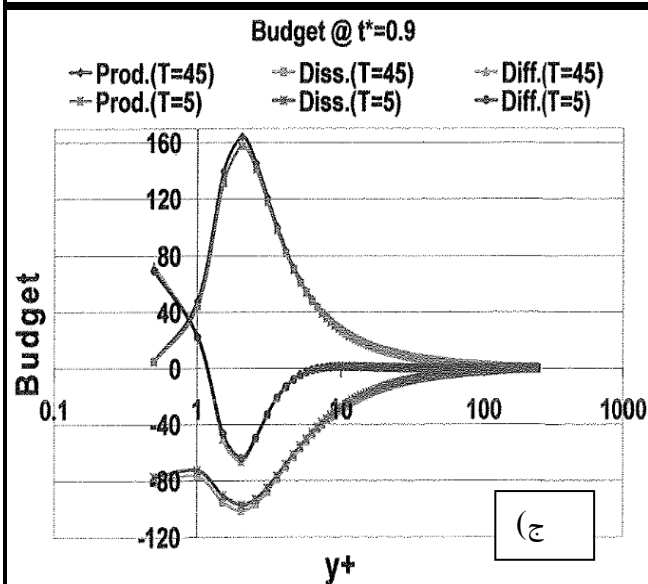
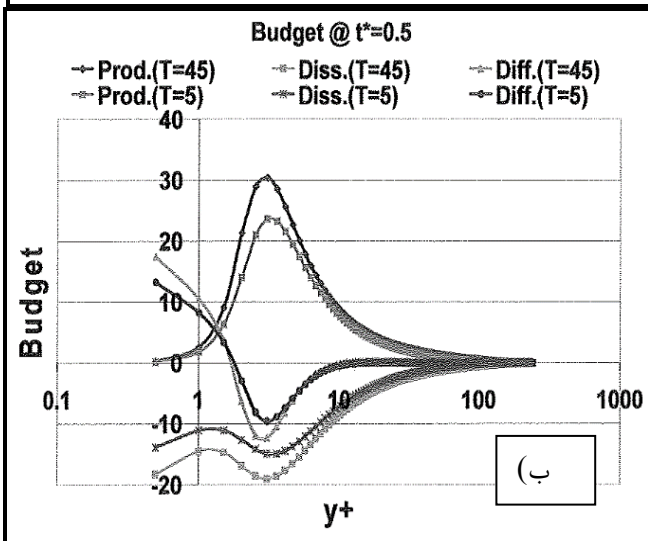
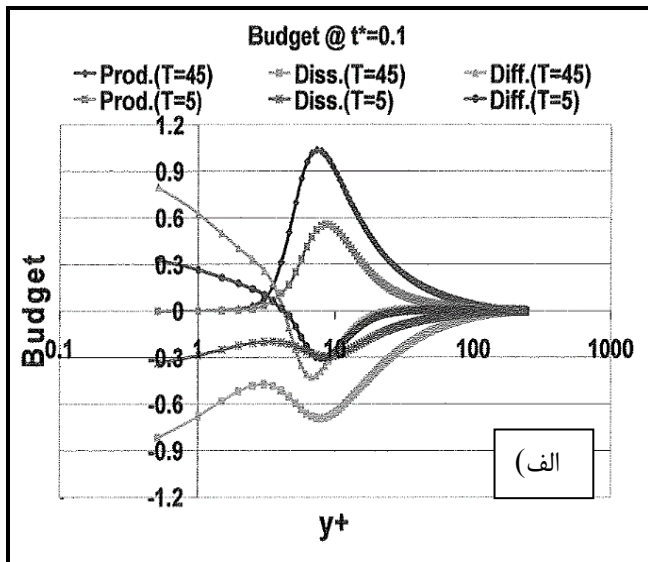
شکل ۵ - سهم ترم های انرژی جنبشی آشفتگی (الف) اتلاف (ب) تولید (ج) پخش در زمان های بی بعد مختلف در دوره شنا بدهی ۵ ثانیه هرچه به سمت دیواره نزدیکتر می شویم، با کاهش اثر تاخیر زمانی مواجه می شویم و در این محدوده اثرات پخش کم رنگ تر و ترم تولید

شکل ۴ - سهم ترم های انرژی جنبشی آشفتگی (الف) اتلاف (ب) تولید (ج) پخش در زمان های بی بعد مختلف در دوره شنا بدهی ۴۵ ثانیه

دارای ضریب وزنی بالاتری می‌شود. بدیهی است نقطه اوج تولید انرژی جنبشی در نزدیکی دیواره (که با توجه به گذشت زمان از حدود $y^+ = 10$ به $y^+ < 10$ تغییر می‌کند) است. در بازه بین نقطه بیشینه تولید تا دیواره اثر تولید به شدت کاهش می‌یابد بطوری که روی دیواره اثر پخش با اتلافات در تعادل قرار می‌گیرند.

از آنجائیکه معادلات انتقال حاکم در کانال و لوله دارای تفاوت‌هایی هستند به نظر می‌رسد بررسی جریان شتابدار درون کانال و مقایسه آن با جریان داخل لوله در جای خود دارای جذابیت‌هایی باشد. به عنوان مثال می‌توان به مقایسه حل حالت پایا و ناپایای جریان داخل کانال و لوله که در شکل‌های ۷ آمده است، اشاره نمود. این شکل‌ها نشان می‌دهد همانطور که پیش‌بینی می‌شد سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفستگی در این دو جریان متفاوت باشد بطوریکه رشد تولید انرژی جنبشی آشفستگی در جریان داخل کانال با افزایش زمان دارای شتاب بیشتری است و نقطه اوج هر یک از سهم‌های مختلف سریع‌تر به سمت دیواره حرکت می‌کنند. البته با توجه به اینکه در ابتدای دوره شتاب‌دهی (حالت پایا) تولید در لوله بیشتر از کانال است، بطور منطقی در مدت دوره شتاب‌دهی (که در $t^* = 0.5$ است) انطباقی بین نتایج سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفستگی در لوله و کانال ظاهر خواهد شد.

مقایسه سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفستگی برای جریان داخل کانال و لوله مبین این نکته مهم است که اولاً سرعت حرکت نقاط اکسترمم به سمت دیواره در کانال نسبت به جریان داخل لوله بیشتر است. ثانیاً تأخیر زمانی در کانال بیشتر از لوله است. هرچه به دیواره نزدیک‌تر می‌شویم کانال آزادی عمل بیشتری در تولید انرژی جنبشی آشفستگی پیدا می‌کند که این موضوع می‌تواند به علت محدودیت مضاعف کنار دیواره در لوله (به واسطه وجود انحناء در مقابل گسترش بی‌نهایت عرضی در کانال) باشد. اثر پخش در فاصله دور از دیواره برای لوله بیشتر از کانال است. نکته بسیار مهم و قابل تأمل که می‌تواند در تحقیقات آتی محققین مورد توجه قرار گیرد این است که تأخیر زمانی در تبدیل جریان آرام به آشفته در کانال بیشتر از لوله است.



شکل ۶- مقایسه سهم ترم‌های مختلف انرژی جنبشی آشفستگی در (الف) $t^* = 0.1$ (ب) $t^* = 0.5$ و (ج) $t^* = 0.9$ در دوره‌های زمان شتاب‌دهی ۵ و ۴۵ ثانیه

نکته واجب است که بدانیم تاثیر پذیری این سه ترم نسبت به اندازه شتاب اعمالی در زمان های اولیه بازه شتاب دهی بسیار بالاست حال آنکه رفتار این سه ترم در انتهای بازه زمانی شتاب دهی بستگی به بزرگ و یا کوچک بودن شتاب اعمالی ندارد. همچنین در نمودار تغییرات سهم این ترمها مشخص شد با گذشت زمان (افزایش عدد رینولدز) نقطه بیشینه تولید و اتلاف انرژی لحظه به لحظه به سمت دیواره نزدیک می شوند که با توجه به مقوله نفوذ ممنوم و اینرسی قابل توجه است. از طرفی تاخیر زمانی در کانال بیشتر از لوله است. هرچه به دیواره نزدیک تر می شویم کانال آزادی عمل بیشتری در تولید انرژی جنبشی آشفتگی پیدا می کند. موضوع می تواند به علت محدودیت مضاعف کنار دیواره در لوله باشد.

مراجع

1.S. HE, J. D. JAKSON, 1999. "A study of turbulence under condition of transient flow in pipe". Cambridge University Press.

2.Adam Adamkowski, Mariusz Lewandowski, 2006. "Experimental Examination of Unsteady Friction Models for Transient Pipe Flow Simulation". ASME.

3.IVO POTHOFF, 2008. "A turbulent approach to unsteady friction". Journal of Hydraulic Research Vol. 46 No. 5(2008).

4.Junichi KUROKAWA, Masahiro MORIKAWA, 1986. "Accelerated and Decelerated Flows in Circular Pipe". Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 249 March 1986.

5.Ivar Annus, Tiit Koppel, Alan Vardy, 2010. "TRANSITION TO TURBULENCE IN ACCELERATING FLOW". Proceedings of the HYDRALAB Joint User Meeting, Hannover, February 2010.

6.Kazuyoshi NISHIHARA, Yusuke NAKAHAT, Yoshiaki UEDA, Charles W. KENISLY, Yasusshi SASAKI, Manabu IGUCHI, 2010. "Effect of Initial Acceleration History on Transition to Turbulence in Pipe Flow". Journal of JSEM, Vol. 10, Special Issue (2010)

7.Seo Yun Junga, Yungmann M. Chung, 2011. "Large-eddy simulation of accelerated turbulent flow in a circular pipe". University of Warwick institutional repository

8.Greenblatt D., E. Moss, 2004, "Rapid Temporal Acceleration of a Turbulent Pipe Flow", J. Fluid Mech. 514, 65-75

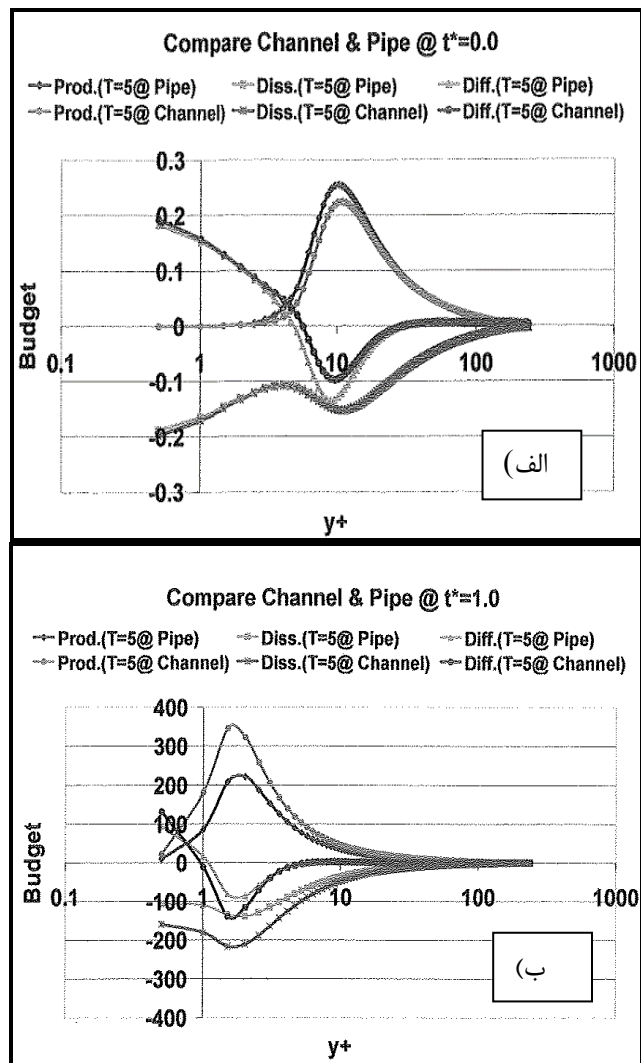
9.Scotti A., U. Piomelli, 2002, "Turbulence Models in Pulsating Flows", AIAA J. 40, 537-540

10.Shemer, L. & Wygnanski, L., 1981, "On the pulsating flow in pipe. Third Symp. On Turbulent Shear Flows", University of California, Davis, 8.13-8.18.

11.Ramprian, B. R. & Tu, S. W., 1983, "Fully developed periodic turbulent pipe flow, Part 2. The detailed structure of the flow", J. Fluid Mech., 137, 59-81

12.Blondeaux, P. & Colombini, M., 1985, "Pulsating turbulent pipe flow, Fifth Symp. On Turbulent Shear Flows", Cornell University, Ithaca, New York.

13.Lam, C.K.G. and K.A. Bremhorst (1981). "Modified form of the k-ε model for predicting wall turbulence", Journal of Fluids Engineering 103, 456-460.



شکل ۷- مقایسه سهم ترمهای مختلف برای زمان بی بعد الف) $t^*=0$ و ب) $t^*=1$ در دوره های زمان شتاب دهی ۵ ثانیه برای لوله و کانال

نتیجه گیری

انرژی جنبشی تلاطمی به طور کلی تشکیل شده است از سه ترم تولید، پخش و اتلاف. مطابق رابطه (۱) تغییرات این انرژی با زمان متاثر از تغییرات ترم های پخش و تولید و اتلاف با زمان است. مشاهده گردید که این سه ترم با فاصله گرفتن از دیواره به طوری محسوسی تغییر میکنند و به نظر میرسد وابستگی این ترم ها به مکان شدیدتر از وابستگی آن ها به زمان است. در بررسی توزیع سهم های ترم های مختلف انرژی جنبشی آشفتگی مشاهده گردید هرچه از مرکز لوله به سمت دیواره نزدیک تر می شویم اثر پخش کمتر و اثر تولید زیادتر میشود. بنابراین ترم تولید در نزدیک دیواره ضریب وزنی بالایی دارد در حالی که ترم پخش در مرکز لوله ضریب وزنی بالاتری دارد. جالب این که ترم اتلاف در کلیه مکان ها دارای ضریب وزنی یکسانی است. در جریان شتابدار نوعی تاخیر زمانی در انتشار آشفتگی ها وجود دارد. این تاخیر زمانی در مرکز لوله مشهود تر است در حالی که در نزدیکی دیواره با کاهش اثر تاخیر زمانی مواجه می شویم. بررسی نمودار ها مبین این مهم میباشد که ترم های تولید و اتلاف بسیار متاثر از اندازه شتاب اعمالی هستند. به طوری که هرچه این شتاب بزرگتر باشد ترم تولید و ترم اتلاف در یک زمان بی بعد معین کوچکتر هستند که خود به گونه ای علت تاخیر زمانی در انتشار آشفتگی با افزایش شتاب را توضیح میدهد. اما تاثیر اندازه شتاب بر ترم پخش ناچیز است. توجه به این

