ISME2019-XXXX

بررسی عددی تغییرات سرعت انتشار انرژی جنبشی آشفتگی در راستای طولی و عمودی در جریان شتاب‌دار بر روی صفحه تخت

مهرنوش خرقانی[۱]، محمود پسندیده فرد[۲]، محمد نعیمی راد[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، me.kharghani@stu.um.ac.ir
[۲] استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد،fard_m@um.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، mohammad.naeimirad@yahoo.com

چکیده

در بسیاری از کاربردهای تکنولوژیکی، لایه‌های مرزی آشفته تحت تغییرات سرعت شدیدی قرار می گیرند(مانند هیدروفویل‌ها). علیرغم اهمیت بالای این نوع جریان، به دلیل پیچیدگی تغییر پارامترها و تعداد زیاد متغییرها در این نوع جریان‌ها، به اندازه جریان پایا مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این پژوهش، جریان آشفته شتاب‌دار تحت چهار شتاب مختلف بر روی صفحه تخت موردبررسی قرارگرفته است، ابتدا جریان با سرعت ثابت بر روی صفحه تخت شبیه‌سازی‌شده است، سپس طی اعمال شتاب‌های مختلف، جریان از سرعت اولیه $۱\ m/s$ به سرعت نهایی $۶\ m/s$ رسیده‌است. مدل آشفتگی مورداستفاده مدل *K-ω-SST-intermittency* بوده که بیشترین تطبیق را با نتایج تجربی و حل تحلیلی در حالت پایا دارد. در این تحقیق اثر جریان شتاب‌دار بر انرژی جنبشی آشفتگی، تاخیر زمانی و سرعت انتشار اطلاعات آشفتگی در راستای عمودی و افقی مورد بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در شتاب‌های کند اعمالی، رفتار جریان تقریباً مشابه جریان پایا است درصورتی‌که با افزایش اندازه شتاب اعمالی پدیده *bypass-like-transition* مشاهده‌شده است. این پدیده خود را به صورت نوعی تاخیر زمانی در آغاز پدیده‌های آشفتگی نشان می‌دهد. سرعت انتشار آشفتگی متاثر از شتاب اعمالی به جریان بوده و هرچه شتاب اعمالی به جریان بیشتر باشد سرعت انتشار اثرات آشفتگی در راستای عمودی کمتر است و به بیان دیگر تاخیر زمانی در واکنش لایه‌های سیال مشهودتر است. اما در راستای عرضی تاخیر زمانی به این شکل قابل مشاهده نیست، در این راستا سرعت انتشار اثرات آشفتگی از طول حدودا ۰/۳ به میزان زیادی افزایش یافته، به‌طوری که تغییرات مشهودی در تاخیر زمانی به‌وجود آمده قابل مشاهده نیست.

واژه‌های کلیدی

صفحه تخت، جریان شتاب‌دار، انرژی جنبشی آشفتگی، تاخیر زمانی

مقدمه

جریان آشفته ناپایا را میتوتن به طور کلی به دو دسته تقسیم بندی کرد: جریان پالسی پریودیک و جریان غیر پریودیک. در این پژوهش تمرکز ما بر روی جریان های غیر دوره‌ای با شتاب یکنواخت است. جریان پالسی به دلیل کاربرد زیادو سهولت شبیه سازی از ابتدا مورد توجه محققین قرار گرفته است. در جریان پالسی داخل لوله تحقیقات آزمایشگاهی بسیاری صورت گرفته است. جرارد و رونبرگر [2][1] و همچنین میزوشیما و همکاران [4][3] با استفاده از روش سیم الکتریکی به بررسی جریان پرداختند. شمر و کیت [5]، شمر و همکاران [6] و برنل و همکاران [7] این نوع جریان را با استفاده از باد سنج سیم داغ مورد مطالعه قرار دادند. همچنین در مطالعاتی دیگر رمپرایان و توو [9][8]، تاردو و همکاران [10]، گرین بلات و موس [12][11] و اسکاتی و پیوملی [13] جریان‌های توسعه‌یافته درون لوله با شتاب‌دهی‌های ناگهانی از سیستم‌های باد سنجی لیزری داپلر استفاده کردند. متغیرهای اساسی جریان شتابدار پریودیک 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 قابل‌توجه باشد، هرچند که تأثیرات دامنه کم است. همچنین برای لایه مرزی شتاب‌دار با ایجاد جریان چاه تحقیقاتی انجام شده است. لاندر و جونز [15][14]، بدری و رامجی [16] با بررسی جریان آشفته چاه دریافتند که لایه مرزی در مواجهه با چاه به حالت آرام در می‌آید و آشفتگی پایدار نیست. همچنین سیال مورد استفاده در اکثر اینگونه تحقیقات هوا بوده است. هی و جکسون [17] در تحقیقی آزمایشگاهی جریان شتاب‌دار با شتاب یکنواخت را تحت شتاب افزاینده و کاهنده با استفاده از لیزر داپلر (*LDV*) مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها ضمن این تحقیق متوجه تاثیر شتاب به پاسخ جریان در فاصله های مختلف از صفحه شدند. در واقع آنها سه تاخیر زمانی را در این گونه جریان ها مشاهده کردند که شامل تأخیر در تولید آشفتگی، تأخیر در توزیع انرژی جنبشی آشفتگی و تأخیر در انتشار شعاعی آشفتگی اضافی می‌باشند. گرین بلات و موس [12] در تحقیقی آزمایشگاهی اعداد رینولدر بالاتری را مورد تحقیق قرار دادند و مشاهده کردند که پاسخ جریان مشابه یافته های گذشته بوده است. همچنین تحقیقات عددی بسیاری در اینگونه جریانها صورت گرفته است [22][21][20][19][18]. در تحقیقات اخیر علاوه بر جریان داخل لوله جریان داخل کانال نیز مورد توجه قرار گرفته است. هی و صدیقی [23] با استفاده از روش DNS جریان ترنزینت داخل لوله و کانال را

مقایســـه کردند و دریافتند که در این‌گونه جریان‌ها نواحی نزدیک دیواره پا سخ م شابهی دارد اما در فوا صل نزدیک به مرکز لوله و کانال تفاوت های چشــمگیری قابل مشــاهده اســت [24]. آنچه در اینگونه جریانات قابل توجه اســت تاخیر زمانی موجود وهمچنین رفتار جریان در مواجهه با تغییرات ناگهانی اســت. این رفتار جریان آنگونه که در جریان های داخلی شتاب‌دار مشاهده شده رفتاری مشابه انتقال جریان از آرام به آ شفته ا ست (*bypass-like transition*). هی و صدیقی در تحقیقی بر روی جریان آشــفته در رینولدزهای پایین این پدیده را گزارش کردند [23]. همچنین جانگ و کیم در تحقیقی مشــابه تاثیر شــتاب متوســط را بر کنار دیواره در کانال اندازه گیری کردند و این رفتار را در جریان با ورودی کاملا تو سعه یافته شتابدار گزارش کردند. آنها همچنین دریافتند که در شــتابهای ملایم رفتار جریان شــتابدار مشــابه رفتار جریان پایاســت و این پدیده تنها در شــتابهای بالا قابل مشاهده است [25]. خالقی، پسندیده فرد و تیمورتاش مقاله‌ای با حل عددی جریان شــتابدار آشــفته در ورودی لوله به بررســی طول ناحیه توسعه‌یافته و تحلیل سایر مشخصه‌های جریان پرداختند [26]. نعیمی راد و پسندیده فرد جریان شتابدار درون لوله و کانال را بررسی کرده و اثر شتاب اعمالی به جریان بر ترم های مختلف انرژی جنبشی آشفتگی را بررسی نموده اند [27] [28]. در بررسی جریان شتابدار خارجی نیز سوریا و سنگوپتا به برر سی آزمایشگاهی و عددی جریان شتابدار در شتاب‌های پایین بر روی هیدرو فویل متقارن پرداختند و دریافتند که شدت لایه برشی در شتاب‌های اعمالی بالاتر بیشتر است[29] [30]. در برر سی جریان‌های شتاب‌دار با شتاب یکنواخت بالا هنوز تحقیقات قابل توجهی صــورت نگرفته و رفتار جریان و پاســخ آشــفتگی تحت اینگونه تغییرات شــدید اعمالی هدفی اســت که در این پژوهش دنبال شده است.

معادلات حاکم بر جریان و جنبه‌های عددی

معادلات حرکت ســیال در این پژوهش ســه معادله حاکم بر جریان یعنی معادلات بقای جرم یا پیوســتگی، اندازه حرکت یا همان ناویر-استوکس و معادله بقای انرژی می‌باشد.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}}\nabla^2 u_i \qquad (۲)$$

برای همه جریان‌ها لازم است معادلات پایستگی و ممنتم حل شوند. معادلات (۱) و (۲) به ترتیب معادله پیوســتگی و ممنتم حاکم بر جریان اســت که در این‌جا $\mathrm{Re} = U\delta/\upsilon$ می‌باشد و $i = 1,2$. با توجه به این‌که جریان موردبررســی در این پژوهش جریان آشــفته می‌باشد، لازم است شکل معادلات در قالب آشفته بررسی گردد. برای اعمال اثرات آشــفتگی جریان از مدل[۱] *k-ω-SST-Intermittency* که یکی از انواع مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشــد و در آن مدل k-ε اســتاندارد به فرمولاســیون مدل k-ω ویلکاکس ســوییچ می‌کند که درنتیجه آن یک ترم اضافی به نام ترم انتشار مشترک ظاهر می‌شود. از آنجا که در این تحقیق با توجه به بررســی پدیده انتقال در صــفحه پیش¬بینی درست این پدیده مهم است از روش همگام سازی معادله *Intermittency* با مدل آشفتگی مذکور استفاده شده است. معادله *Intermittency* به این صورت است:

$$\frac{\partial \rho u_j \gamma}{\partial x_j} = P_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma}\right)\frac{\partial \gamma}{\partial x_j}\right] \qquad (۳)$$

که در معادله فوق γ فاکتور *Intermittency* ، ρ چگالی، u_j فاکتور سرعت، μ ویسکوزیته ملکولی، μ_t ویسکوزیته آشفتگی و $p_{\gamma 1}, p_{\gamma 2}$ فاکتورهایی برای تعیین مکان و طول ناحیه انتقال می‌باشد. تمام نتایج ارائه‌شــده در این تحقیق با اســتفاده از روش مرتبه دوم *Upwind* گسسته سازی شده‌اند. اجزای سرعت، فشار و همه اسکالرها در مرکز هر یک از حجم کنترل‌ها محاسبه می‌شوند و از روش کوپل کامل برای کوپل کردن سرعت و فشار استفاده شده است [31] که برای بررسی جریان داخل لایه‌مرزی بهترین پاسخ را دارا هستند. شدت آشفتگی در مرز ورودی جر یان ۳٪ در نظر گرفته می‌شــود و با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده مشابه است[32]

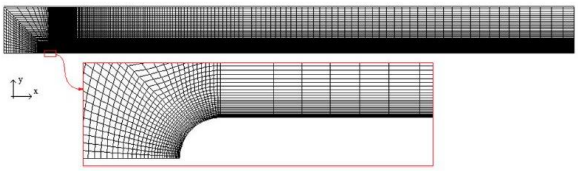
شرایط هندسی، مشخصات جریان سیال

در این پژوهش سعی شده است که ناحیه محاسبانی بیشترین نزدیکی را با نمونه آزمایشگاهی موجود دا شته با شد. در ابتدای صفحه شرط مرزی تقارن برای جلوگیری از ایجاد نقطه ســکون طبیعی وتاثیر آن بر روی لایه‌مرزی در نظر گرفته‌شده. در سمت چپ، راست و بالای صفحه به ترتیب از شــرط مرزی ســرعت ورودی،[۲] فشــار خروجی[۳] و تقارن[۴] ا ستفاده شده ا ست. مکان صفحه متقارن به‌اندازه کافی از صفحه دور بوده و بدین‌وســیله از اثرات شــتاب ناچیز جریان آزاد که ناشــی از ضـخامت محدود صـفحه و رشـد لایه‌مرزی اسـت پرهیز شـود. پاسـخ جریان به انتقال از حالت آرام به آشــفته با اســتفاده از نتایج تجربی و تســت کیس *T3A* (*European Research Consortium on Flow, Turbulence and Combustion _ERCOFTAC_ database*) [33]. هندسه‌ای که در شکل (۱) نمایش داده‌شده است شــامل ســلول‌های ریز مربعی که در کنار دیواره و لبه حمله به‌اندازه کافی ریز شده‌اند می‌باشد. برای اطمینان از قرار گرفتن اولین سلول در زیر لایه آرام لازم اســت تا مقدار y^+ تا حد امکان از ضـخامت زیر لایه آرام کمتر باشــد. به همین منظور y^+ اولین ســلول برای زمان‌های مختلف شتاب‌دهی حداکثر ۰/۶ ا ست. شکل (۲) پا سخ هند سه را به تعداد سلول ها ن شان می‌دهد و همان‌طور که ن شان‌داده شده ا ست با

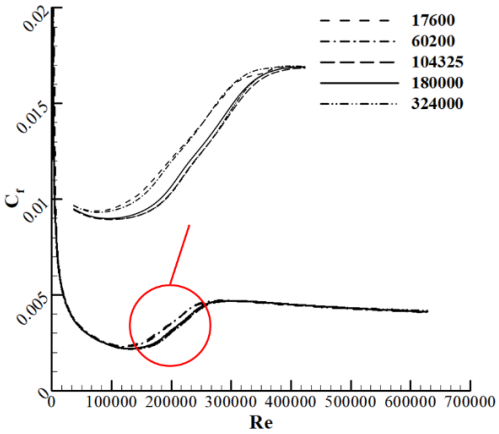
---

[۱] The shear stress transport
[۲] velocity inlet
[۳] Pressure outlet
[۴] symmetry

بیشتر کردن تعداد سلول‌ها از مقدار ۱۸۰۰۰۰ سلول در هندسه، تغییر چندانی در پاسخ مشاهده نشده است.



شکل ۱- هندسه دوبعدی مدل



شکل ۲- مستقل سازی هندسه از شبکه

شکل(۳) صحت نتایج تحقیق حاظر را با حل تجربی نمایش می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، نتایج حالت پایا با حل تجربی در ناحیه انتقال جریان از حالت آرام به آشفته که بخش مهمی از جریان را در برمی‌گیرد، نزدیکی بسیار خوبی دارد [۳۲]. برای بررسی درستی نتایج در حالت آشفته، از معادلات تحلیلی استفاده شده است. معادله (۴) که حل تحلیلی ضریب اصطکاک صفحه در جریان آشفته است توسط پرانتل-شلیختینگ ارائه‌شده است که در این پژوهش برای تائید درستی نتایج در ناحیه آشفته استفاده شده است. در ناحیه آشفته، مدل آشفتگی به‌کار گرفته شده نزدیکترین پاسخ را به نتایج تحلیلی داشت.

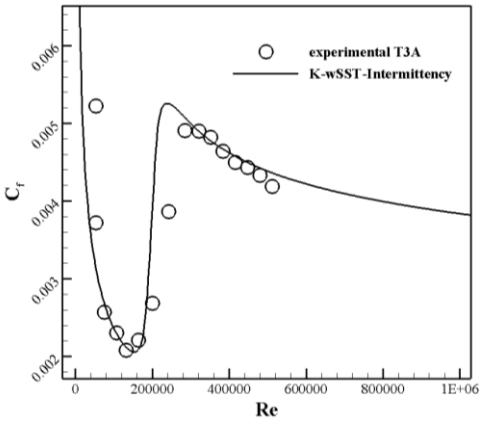
$$C_{f_x} = 0/455[\log(Re_x)]^{-2.58} \qquad (۴)$$

سیال مورد نظر در این تحلیل آب با دمای ۲۷ بوده است. سرعت ابتدایی $U_0 = 1m/s$ و سرعت نهایی $U_1 = 6m/s$ می‌باشد. در ابتدا ($t < 0$) جریان در حالت پایا در سرعت $1m/s$ برای تمامی دوره‌های شتاب‌دهی یکسان بوده و سپس تحت شتاب‌های متفاوت طبق معادله (۵)) به‌سرعت نهایی رسیده‌اند. شکل(۴) تغییرات ضریب اصطکاک دیواره را به ازای گام‌های زمانی متفاوت در دوره شتاب‌دهی ۱ ثانیه نشان میدهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از. گام زمانی $\Delta t = 10^{-5}$ با کوچکتر کردن گام زمانی تغییرات بسیار ناچیز است بنابراین برای کمتر کردن هزینه محاسبات و دریافت پاسخ قابل قبول گام زمانی $\Delta t = 10^{-5}$ درنظر گرفته شده است.

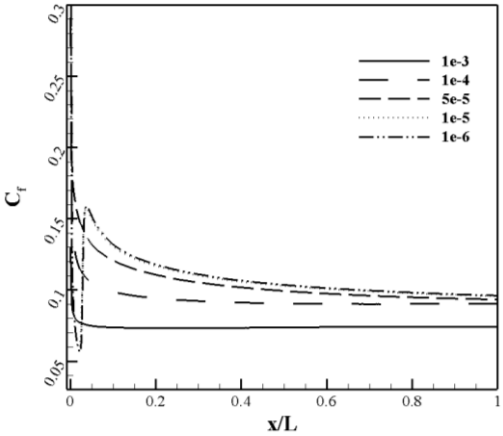
$$U(t) = \frac{U_1 - U_0}{T} + U_0 \qquad (۵)$$

جدول ۱: دوره‌های شتاب‌دهی انتخاب‌شده

Case	T	Δt	du/dt
A1	2 s	2e-5	2.5
A2	1 s	1e-5	5
A3	0.5 s	5e-6	10
A4	0.25 s	25e-7	20



شکل ۳- مقایسه ضریب اصطکاک حل عددی و تجربی

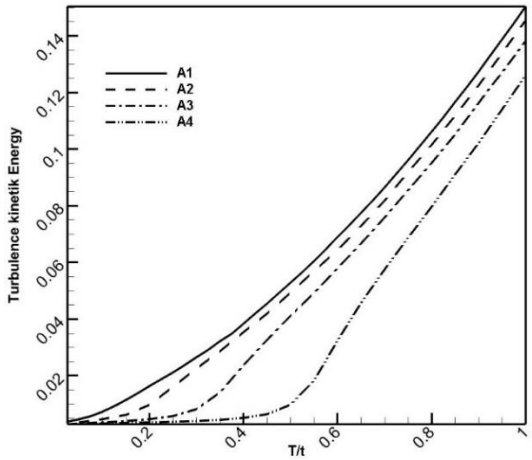


شکل۴- ضریب اصطکاک صفحه در گام‌های زمانی متفاوت

ارایه نتایج و بحث

شکل (۵) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در طول ۱ متری از صفحه در ارتفاع ۲ میلیمتری از سطح صفحه را نشان می‌دهد. در شدیدترین شتاب اعمالی به جریان، انرژی جنبشی آشفتگی پس از ۵۰ درصد از ابتدای دوره شتاب‌دهی شروع به رشد کرده است. این در حالی است که برای کندترین شتاب اعمالی به جریان انرژی جنبشی آشفتگی از ابتدای دوره آشفتگی شروع به رشد کرده است. این امر نشان دهنده‌ی نوعی عدم آگاهی جریان نسبت به اثرات دیواره و لزجت است. در شدیدترین شتاب اعمالی به جریان به دلیل اعمال ممنتم بسیار بالا به جریان، ضخامت لایه مرزی کمتر از کندترین شتاب اعمالی به جریان

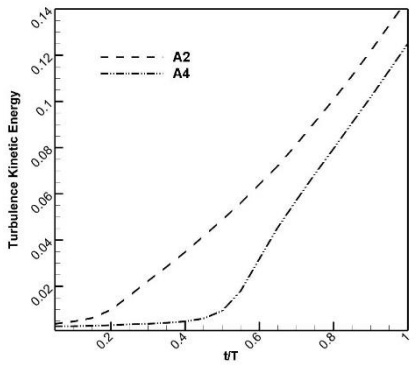
ا ست. بنابراین در شدیدترین شتاب اعمالی به جریان (*A4*)، گرادیان سرعت در نزدیک دیواره بسیار شدیدتر از کندترین شتاب اعمالی به جریان ا ست. از طرفی، می‌دانیم که انرژی جنبشی آ شفتگی برای یک صفحه تخت به طور کلی متناسب با ترم تولید انرژی جنبشی آشفتگی اســت (ترم اتلاف و ترم پخش در مقایســه با ترم تولید قابل صــرفنظر کردن است).



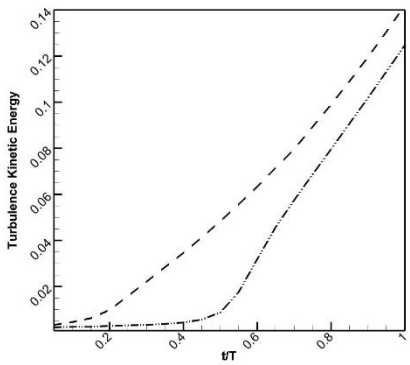
شکل۵- تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در طول ۱ متری از صفحه

از سوی دیگر ترم تولید انرژی جنبشی آ شفتگی با توان دوم گرادیان سرعت متناسب ا ست. بنابراین انتظار داریم در شرایطی که ضخامت لایه مرزی کم تر باشــد (شــتاب های شــدید اعمالی به جریان) انرژی جنبشــی آشــفتگی به شــدت افزایش پیدا کند. این در حالی اســت که شکل(۵) رفتاری متناقض از تغییرات انرژی جنبشی آ شفتگی را نشان می‌دهد، به طوری که در شتاب *A4* نوعی عدم آگاهی جریان نسبت به اثرات دیواره دیده می شود. این پدیده ا صطلاحا پدیده تاخیر زمانی که خود را به صــورت *bypass-transition* *نشــان می‌دهد*، نامیده می‌ـشــود. این پدیده خود را به صــورت نوعی ناآگاهی و بی خبری جریان از تغییرات ممنتم جریان ورودی و اثرات آن بر پدیده های غالب آ شفتگی نمایان می‌کند. همانطور که در شکل(۵) مشهود ا ست، هرچه شتاب اعمالی به جریان افزایش دا شته ا ست میزان تاخیر ر شد انرژی جنبشــی آشــفتگی نیز بیشــتر اســت. شــکل (۶) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی برای دو شتاب *A2* و *A4* در طول ۱/۲ متر، ۱/۵ متر و ۱/۷ متر از ابتدای صفحه و ارتفاع ۲ میلی متری از سطح صفحه را نشان می‌دهد. در فا صله۱/۲ متری از صفحه برای شدیدترین شتاب اعمالی به جریان تا حدود ۴۷ در صد از کل دوره شتاب دهی از اثرات دیواره و آشــفتگی ناآگاه اســت. این در حالی اســت که در فاصــله ۱/۵ متری جریان در حدود ۴۸ درصــد از دوره شــتاب دهی از تغییرات اعمالی به جریان بی اطلاع بوده و در فاصله ۱/۷ متری این عدد حدودا ۴۹ درصد است. بنابراین پدیده تاخیر زمانی در حرکت به سمت پایین دست جریان به میزان نامحسوسی زیاد شده پس می‌توان نتیجه گرفت که میزان تاخیر زمانی با حرکت به ســمت فواصــل دورتر از میزان ناآگاهی جریان نســبت به آشــفتگی جریان کاســته شــده و از طول۰/۳میزان ناآگاهی جریان نسبت به آشفتگی ها تقریبا مقدار ثابتی خواهد بود و با حرکت به انتهای صفحه تغییر نخواهد کرد. شکل (۷) تغییرات انرژی جنبشی آ شفتگی را در هشت فا صله مختلف از دیواره در فاصله یک متر از ابتدای صفحه نشان می‌دهد. از مقایسه نمودارهای موجود در شــکل (۷) ملاحظه می شــود که هرچه به ســطح دیواره نزدیکتر می شــویم، آگاهی جریان نســبت تغییرات به وجود آمده در ممنتم جریان ورودی و پدیده‌های آ شفتگی بیشتر شده ا ست. با فا صله گرفتن از دیواره، میزان آگاهی جریان نیز کاهش می‌یابد. به‌طوری که تاخیر زمانی در رشــد انرژی جنبشــی آشــفتگی افزایش می‌یابد. از مقایسه شکل(۷- الف) و شکل (۷- ب) مشاهده می شود که با افزایش شــتاب اعمالی، اختلاف ســطح نا آگاهی لایه مختلف جریان نســبت به یکدیگر بیشتر شده ا ست و این درحالی است که در شتاب‌های کمتر، سطح آگاهی لایه های سیال به هم نزدیک‌تر ا ست. از طرفی با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در فواصل نزدیک به دیواره، مقدار انرژی جنبشی آ شفتگی در دو شتاب *A2* و *A4* تفاوت چندانی ندارند اما با فاصله گرفتن از سطح دیواره، در لایه‌های بالاتر، این اختلاف نیز بیشتر شــده اســت. این امر به این دلیل اســت که جریان بیشــتر زمان را در بی‌خبری بوده اما پس از آگاهی از تغییرات، با گرادیان‌های شــدیدتری به مقدار نهایی می‌رســد. با افزایش ممنتم اعمالی به جریان، جریان پس از طی کردن یک دوره بی‌خبری با شــیب بیشــتری در مقایســه با شــتاب اعمالی کمتر شــروع به رشــد می‌کند که این امر نیز به دلیل افزایش تاخیر زمانی و فرصت کم جریان برای همگام شدن با تغییرات است.

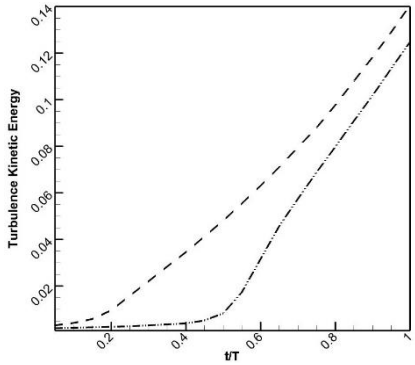
(الف)



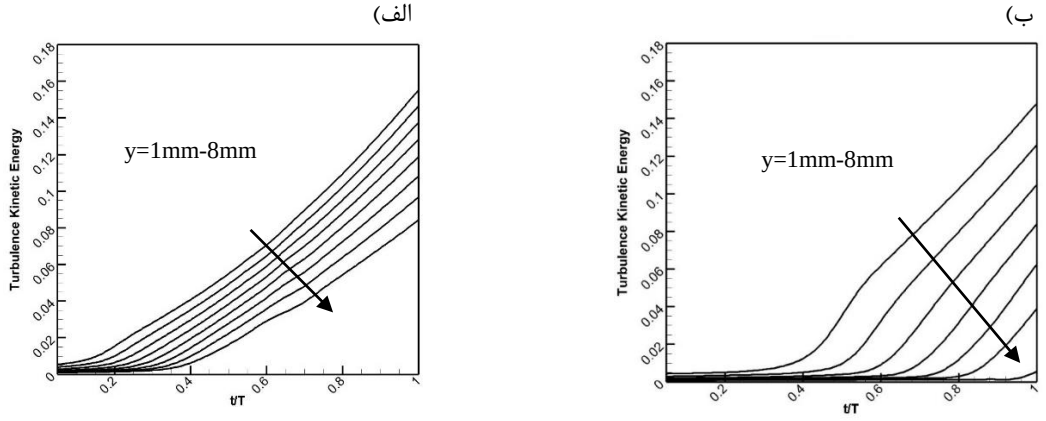
(ب)



(ج)



شکل۶- تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی بر حسب زمان در ارتفاع ۲ میلیمتری در الف) ۱/۲متر، ب) ۱/۵ متر و ج) ۱/۷ متر از ابتدای صفحه



شکل۷- تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی بر حسب زمان در مکان ۱متری از ابتدای صفحه در دو شتاب الف) A2 ب) A4

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق سرعت انتشار آشفتگی‌ها در جریان آشفته شتاب‌دار بر روی صفحه تخت تحت چهار شتاب مختلف بررسی‌شده است و شدیدترین شتاب اعمالی به جریان هشت برابرکندترین شتاب اعمالی به جریان است. جریان نا پایا به‌صورت بنیادی با جریان پایا تفاوت دارد. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که هرچه شتاب اعمالی به جریان بیشتر باشد به علت ممنتم بیشتر جریان، رشد لایه‌مرزی محدودتر می‌شود و گرادیان سرعت تخت‌تری نسبت به شتاب‌های پایین‌تر داریم بنابراین انتظار میرود که ترم تولید انرژی جنبشی آشفتگی که با توان دوم گرادیان سرعت متناسب است، در شرایطی که ضخامت لایه مرزی کم تر باشد (شتاب های شدید اعمالی به جریان) به شدت افزایش پیدا کند. این در حالی است که در این پژوهش رفتاری متناقض از تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی مشاهده شد، به طوری که در شتاب *A4* نوعی عدم آگاهی جریان نسبت به اثرات دیواره دیده می‌شود. این پدیده اصطلاحا پدیده تاخیر زمانی یا *bypass-like-transition* نامیده می‌شود. این پدیده خود را به صورت نوعی ناآگاهی و بی خبری جریان از تغییرات ممنتم جریان ورودی و اثرات آن بر پدیده های غالب آشفتگی نشان داده است. همچنین با افزایش شتاب اعمالی به جریان، مدت ناآگاهی افزایش یافته است. این پدیده می‌تواند در انتشار اطلاعات آشفتگی تاثیر زیادی داشته باشد، به‌طوری که با حرکت در راستای طولی و یا عرضی در صفحه شاهد تاخیرات زمانی متفاوت هستیم. در این پژوهش مشاهده شد که بعد از گذر از نواحی ابتدایی صفحه، تاخیر در انتشار اطلاعات آشفتگی در راستای طولی تغییر چندانی نمی‌کند اما در راستای عمود بر صفحه این اختلاف حتی در شتاب‌های پایین‌تر نیز قابل مشاهده است. به طور کلی، با فاصله گرفتن از سطح دیواره، آگاهی جریان نسبت تغییرات به وجود آمده در ممنتم جریان ورودی و پدیده های آشفتگی بیشترشده است. به طوری که تاخیر زمانی در رشد انرژی جنبشی آشفتگی افزایش می یابد. از مقایسه سرعت انتقال اطلاعات آشفتگی در راستای عمود بر صفحه در دو شتاب *A2* و *A4* مشاهده می شود که با افزایش شتاب اعمالی به جریان، نه تنها سرعت انتشار اثرات دیواره و لزجت و یا اطلاعات آشفتگی در این راستا کاهش یافته است بلکه لایه‌های سیال نیز تاخیر بیشتری نسبت به یکدیگر پیدا کرده‌اند. از طرفی، در پی افزایش مدت ناآگاهی جریان نسبت به کل دوره شتاب‌دهی در لایه‌های بالاتر، مقدار انرژی جنبشی آشفتگی نیز، به خصوص در نواحی دورتر، کاهش چشمگیری داشته است.

در این پژوهش تنها اثر شتاب‌های تندشونده بر انتشار آشفتگی‌ها بررسی گردید، بررسی تحت شتاب‌های کندشوند می‌تواند موضوع پژوهش آینده باشد.

مراجع و منابع

[1] J. H. Gerrard, “An experimental investigation of pulsating turbulent water flow in a tube,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 46, no. 1, pp. 43–64, 1971.

[2] D. Ronneberger and C. D. Ahrens, “Wall shear stress caused by small amplitude perturbations of turbulent boundary-layer flow: An experimental investigation,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 83, no. 3, pp. 433–464, 1977.

[3] T. Mizushina, T. Maruyama, and Y. Shiozaki, “Pulsating turbulent flow in a tube,” Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 6, no. 6, pp. 487–494, 1974.

[4] T. Mizushina, T. Maruyama, and H. Hirasawa, “Structure of the turbulence in pulsating pipe flows,” Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 8, no. 3, pp. 210–216, 1975.

[5] L. Shemer and E. Kit, “An experimental investigation of the quasisteady turbulent pulsating flow in a pipe,” Physics of Fluids, vol. 27, no. 1, pp. 72–76, 1984.

[6] L. Shemer, I. Wygnanski, and E. Kit, “Pulsating flow in a pipe,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 153, pp. 313–337, 1985.

[7] S. Burnel, J. C. Raelison, and J. M. Thomas, Radial distribution of the Reynolds stress in a turbulent pulsating flow in a pipe. New York, 1990.

[8] B. R. Ramaprian and S. W. Tu, “An experimental study of oscillatory pipe flow at transitional Reynolds numbers,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 100, no. 3, pp. 513–544, 1980.

[9] S. W. Tu and B. R. Ramaprian, “Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 1. Main experimental results and comparison with predictions,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 137, pp. 31–58, 1983.

[10] S. F. Tardu, G. Binder, and R. F. Blackwelder, “Turbulent channel flow with large-amplitude velocity oscillations,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 267, no. 5–6, pp. 109–151, 1994.

[11] D. Greenblatt and E. A. Moss, “Pipe-flow relaminarization by temporal acceleration,” Physics of Fluids, vol. 11, no. 11, pp. 3478–3481, 1999.

[12] D. Greenblatt and E. A. Moss, “Rapid temporal acceleration of a turbulent pipe flow,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 514, pp. 65–75, 2004.

[13] A. Scotti and U. Piomelli, “Turbulence Models in Pulsating Flows,” AIAA Journal, vol. 40, no. 3, pp. 537–544, 2002.

[14] B. E. Launder and W. P. Jones, “Sink flow turbulent boundary layers,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 38, no. 4, pp. 817–831, 1969.

[15] W. P. Jones and B. E. Launder, “Some properties of sink-flow turbulent boundary layers,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 56, no. 2, pp. 337–351, 1972.

[16] M. A. B. Narayanan and V. Ramjee, “On the criteria for reverse transition in a two-dimensional boundary layer flow,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 35, no. 2, pp. 225–241, 1969.

[17] S. He and J. D. Jackson, “A study of turbulence under conditions of transient flow in a pipe,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 408, pp. 1–38, 2000.

[18] S. He, C. Ariyaratne, and A. E. Vardy, “Wall shear stress in accelerating turbulent pipe flow,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 685, pp. 440–460, 2011.

[19] Y. M. Chung, “Unsteady turbulent flow with sudden pressure gradient changes,” International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 47, no. 8–9, pp. 925–930, 2005.

[20] C. Ariyaratne, S. He, and A. E. Vardy, “Wall friction and turbulence dynamics in decelerating pipe flows,” Journal of Hydraulic Research, vol. 48, no. 6, pp. 810–821, 2010.

[21] M. Seddighi, S. He, P. Orlandi, and A. E. Vardy, “A comparative study of turbulence in ramp-up and ramp-down unsteady flows,” Flow, Turbulence and Combustion, vol. 86, no. 3–4, pp. 439–454, 2011.

[22] S. Y. Jung and Y. M. Chung, “Large-eddy simulation of accelerated turbulent flow in a pipe,” 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP 2009, vol. 2009–June, pp. 277–282, 2009.

[23] S. He and M. Seddighi, “Turbulence in transient channel flow,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 715, pp. 60–102, 2013.

[24] S. He and M. Seddighi, “Transition of transient channel flow after a change in Reynolds number,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 764, pp. 395–427, 2015.

[25] S. Y. Jung and K. Kim, “Transient behaviors of wall turbulence in temporally accelerating channel flows,” International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 67, pp. 13–26, 2017.

[26] خالقی علی، پسندیده فر محمود و تیمورتاش علیرضا،”تحلیل عددی جریان آشفته داخل لوله تحت شرایط شتاب‌های متوسط “ ، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک. ۱۳۹۰

[27] M.Pasandideh-fard, M.Naeimirad, A.Khaleghi (2017). Comparison of Different Turbulence Kinetic Energy Terms Behavior under Various Exerted Accelerations in Pipe Flow, Advances and Applications in Fluid Mechanics, accepted

[28] M.Pasandideh-fard, M.Naeimirad, A.Khaleghi (2017). Numerical Study of Turbulence Kinetic Energy Budget in Accelerated Channel Flow, Advances and Applications in Fluid Mechanics, accepted

[29] Soria, J., New, T. H., Lim, T. T. & Parker, K. 2003 Multigrid CCDPIV measurements of accelerated flow past an airfoil at an angle of attack of 30◦. Expl Therm. Fluid Sci. 27, 667–676.Antoine Ducoin, Jacques Andre´ Astolfi a, François Deniset a, Jean-François Sigrist, Computational and experimental investigation of flow over a transient pitching hydrofoil, European Journal of Mechanics B/Fluids 28 (2009) 728–743.

[30] T. K. SENGUPTA, T. T. LIM, SHARANAPPA V. SAJJAN1,S. GANESH2 AND J. SORIA. Accelerated flow past a symmetric aerofoil: experiments and computations ,2007.,“Fluid Mechanics,” vol. 591, pp. 255–288.

[31] User Guide Fluent 6.3, Fluent Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA.

[32] J. Coupland, ERCOFTAC special interest group on laminar to turbulent transition and retransition T3A and T3B Test cases, 1990.Antoine

[33] Coupland, J., 1990, ERCOFTAC Special Interest Group on Laminar to Turbulent Transition and Retransition: T3A and T3B Test Cases.