

بررسی آثار زبری بستر بر پارامترهای آشفتنگی جتهای دیواره‌ای سه‌بعدی

علی شجاعی‌زاده^۱، مسعود قدسیان^۲، سید علی اکبر صالحی‌نیشابوری^{۳*}، اکبر صفرزاده^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۴- استادیار مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۱/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۰۲

چکیده- در این مقاله برای بررسی تأثیر زبری بستر بر پارامترهای آشفتنگی، مانند تنش‌های رینولدز و شدت آشفتنگی، الگوی جریان پیرامون جت دیواره‌ای بررسی آزمایشگاهی شده است. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV انجام شده و از سری‌های زمانی سه مؤلفه سرعت برای تحلیل روند تغییرات پارامترهای آشفتنگی استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش زبری بستر، شدت آشفتنگی مؤلفه‌های u و w در فواصل طولی متناظر از جت افزایش یافته و برای یک زبری ثابت، شدت آشفتنگی مؤلفه u از w بیشتر است. همچنین با افزایش فاصله از جت، تنش برشی بستر کاهش یافته و با افزایش زبری بستر، تنش برشی روند افزایشی دارد. محل وقوع بیشینه‌ی تنش برشی بستر با تغییر زبری ثابت می‌ماند.

واژگان کلیدی- جت دیواره‌ای، زبری، پارامترهای آشفتنگی، سرعت‌سنج سه‌بعدی، تنش برشی

۱- مقدمه
نوع جت‌ها قرار می‌گیرد. در جت‌های دیواره‌ای، میدان جریان را بر اساس استهلاک سرعت بیشینه می‌توان به سه منطقه هسته پتانسیل^۱، منطقه استهلاک مشخصات^۲ و منطقه استهلاک شعاعی^۳ تقسیم کرد [Padmanabham و Gowda (۱۹۹۱)].

در گذشته تحقیقات زیادی درباره جت‌های دیواره‌ای

جت‌های محصور^۱ در ارتباط با مرزهایی در نزدیکی جریان است که آن‌ها را می‌توان از لحاظ ارتباط با مرزها به دو دسته جت آفست^۲ و جت دیواره‌ای^۳ تقسیم کرد. در جت دیواره‌ای، یک دیواره موازی محور جت، منطبق بر محل انتشار قرار دارد. جریان عبوری از زیر دریچه در گروه این

4- Potential core
5- Characteristic decay
6- Radial decay

1- Confined Jet
2- Offset Jet
3- Wall Jet

دیواره‌ای به طور محسوس با فاصله گرفتن از جت به علت کشیده شدن جریان برگشتی، مستهلک می‌شود. استهلاک مومتم با نسبت عمق پایاب و فاصله نسبی در جهت طولی جریان مرتبط است. برای یک جت دیواره‌ای مستغرق روی یک بستر صاف، سرعت پیشینه در هر مقطعی از جت با $u_m \propto 1/\sqrt{x}$ رشد می‌کند. که در آن x فاصله طولی از نازل است [Rajaratnam (۱۹۷۶)].

Sarkar و Dey (۲۰۰۸) مطالعه آزمایشگاهی خود بر میدان جریان در یک پرش مستغرق روی بستر افقی زیر را با استفاده از یک دستگاه سرعت سنج ADV^۵ انجام دادند. ایشان آزمایش‌های خود را با ضرایب استغراق ۰/۹۶ تا ۱/۸۵ و اعداد فرود جت ۲/۵۸ تا ۴/۸۷ روی بسترهای زیر با زبری معادل ماسه‌ای نیکورادزه^۶ برابر ۰/۴۹، ۰/۸، و ۱/۸۶ و ۳ میلی‌متر انجام دادند. بردارهای سرعت رسم‌شده میدان جریان نشان داد که نرخ استهلاک سرعت خروجی جت در یک پرش مستغرق با افزایش زبری بستر افزایش می‌یابد. مهم‌ترین نتیجه محققین آن بود که جریان در منطقه کاملاً توسعه‌یافته به حفظ بقای خود^۷ می‌رسد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده روی جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی آمده است. که در آن $Z_{1/2}$ و $\gamma_{1/2}$ نیم پهنای^۸ عمودی و عرضی جت است.

با وجود تحقیقات فراوانی که روی این جت‌ها انجام شده است در تعداد کمی از کارهای انجام‌شده پارامترهای آشفته‌گی در این گونه جت‌ها بررسی شده است؛ همچنین بیشتر آزمایش‌های روی سطوح صاف انجام شده و آزمایش‌هایی که در آن‌ها درباره‌ی پارامترهای آشفته‌گی بحث شده روی سطوح مختلف زبر و صاف بیشتر به صورت دوبعدی بوده است. بنابراین هدف از ارائه این مقاله بررسی

انجام شده است که نشان از کاربرد زیاد و همچنین اهمیت آن‌ها دارد. اولین مطالعات آزمایشگاهی روی جت دیواره‌ای سه‌بعدی به‌وسیله‌ی Sforza و Herbst در سال ۱۹۷۰ آغاز شد. در ادامه نیز تحقیقات زیادی در مورد این گونه جت‌ها، به‌ویژه جت‌های دیواره‌ای دوبعدی انجام شده است. Rajaratnam و Pani (۱۹۷۴) تحقیقات و مطالعات آزمایشگاهی خود را روی جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی گسترش دادند. روی تغییرات زبری و ابعاد نازل با شکل‌های مختلف از جمله مستطیلی، مثلثی، بیضوی، دایره‌ای و مربعی، سرعت‌ها و تنش برشی دیواره مطالعه و نتیجه‌گیری کردند که اگر برش روی دیواره ناچیز در نظر گرفته شود، مسئله را می‌توان مانند یک جت آزاد سه‌بعدی تحلیل کرد.

Herlina و Law (۲۰۰۲) آزمایش‌هایی روی جت دیواره‌ای سه‌بعدی انجام دادند آن‌ها با استفاده از دستگاه‌های PIV^۱ و PLIF^۲، پروفیل سرعت را تا $x/d=50$: قطر نازل، x : فاصله طولی) با عدد رینولدزهای مختلف، ۱۲۲۰۰، ۵۵۰۰ و ۱۳۷۰۰ برداشت کردند. Rajaratnam و Ead (۲۰۰۴) بررسی آزمایشگاهی روی جت دیواره‌ای دوبعدی روی بسترهای زیر با زبری نسبی ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ و با محدوده اعداد فرود ۴ تا ۸ و عمق پایاب کم انجام دادند. ایشان سعی کردند آثار زبری بستر و عمق پایاب را بر پارامترهای جت دیواره‌ای دوبعدی روی سطوح زبر بررسی کنند. بر این اساس مشخص شد که پروفیل سرعت متوسط زمانی^۳ در مقاطع مختلف در جت دیواره‌ای دارای تشابه است ولی در عین حال یک سری اختلافات جزئی با جت دیواره‌ای کلاسیک دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای عمق پایاب کم، شار مومتم^۴ جریان جلورونده در جت

5- Acoustic Doppler Velocimeter

6- Nikuradse

7- Self-preserving

8- Jet half-width

1- Particle Image Velocimetry

2- Planar Laser Induced Fluorescence

3- Time-average velocity profile

4- Momentum Flux

آثار زبری بر پارامترهای آشفتگی تنش‌های رینولدز و شدت آشفتگی در حالت سه بعدی است.

جدول (۱) خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده روی جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی

محققین و سال تحقیق	ابزار استفاده شده	شکل نازل	محدوده اندازه‌گیری	عدد رینولدز جت	$\frac{dy_{1/2}}{dx}$	$\frac{dz_{1/2}}{dx}$
Newman و همکاران (1972)	HFA ¹	دایره‌ای با قطر (میلی‌متر) ۰/۲	x/D ۲۰۰ تا ۲۰	۱۶۴۰۰	۰/۰۵۲	۰/۲۸
Rajaratnam and Pani (1974)	پروپ هد کل ^۲ و برای تنش برشی لوله پرستون ^۳	دایره‌ای با قطر ۰/۳۷۵ اینچ مربعی با ضلع ۰/۳۸۱ اینچ مستطیلی با h=0/375 B=0/563 in مثلی با h=0/5 B=0/567 in	x/h ۷۰ تا ۷۰ ۴۳ تا ۴۳ ۴۳ تا ۴۴	۶۵۰۰۰ ۶۷۰۰۰ ۹۷۵۰۰ ۸۶۰۰۰	۰/۰۴۵ ۰/۰۴۵ ۰/۰۴۲ ۰/۰۴۲	۰/۲ ۰/۲۶۵ ۰/۲۰۵ ۰/۲۰۸
Davis and Winarto (1980)	HWA ^۴	نازل حد فاصلی ^۴ h/D=1 h/D=1/5 h/D=2/5 h/D=4/5	x/D ۴۸ تا ۴۰ ۵۶ تا ۴۰ ۶۴ تا ۴۸ ۵۶ تا ۴۸	۱۷۰۰۰۰	۰/۰۳۷ ۰/۰۳۶ ۰/۰۳۹ ۰/۰۴۶	۰/۳۲ ۰/۳۳ ۰/۲۹ ۰/۲۳
Padmanabham and Gowda (1991)	پروپ فشار کل ^۷ و HWA	قطعه‌ای ^۶ h/D=0/23 h/D=0/50 h/D=0/80 h/D=1	x/h ۱۲۰ تا ۵۰ ۱۰۰ تا ۲۰	۹۵۴۰۰	۰/۰۴۰ ۰/۰۴۹ ۰/۰۴۳ ۰/۰۴۵	۰/۲۵۰ ۰/۲۴۵ ۰/۲۱۵ ۰/۲۱۶
Eriksson و همکاران (1991)	LDV ^۹	لوله طویل ^۸ h/D=1	x/D ۷۶/۱ تا ۲۵	۱۰۰۰۰	۰/۰۵۵	۰/۲۷
Abrahamsson و همکاران (1997)	HWA و SW ^{۱۰} برای تنش برشی لوله پرستون	دایره‌ای با قطر (میلی‌متر) ۲۰	x/D ۹۰ تا ۵۰	۷۹۰۰۰	۰/۰۶۵	۰/۳۲
Maslov و همکاران (2001)	HWA و پروپ پیتوت ^{۱۱}	نازل حد فاصلی	x/D ۳۵۰ تا ۵۰ ۳۵۰ تا ۱۵۰	۱۰۰۰۰۰	۰/۰۵۶ ۰/۰۵۷	۰/۳۰ ۰/۳۱
Law and Herlina (2002-a)	PIV	دایره‌ای با قطر ۵/۵ میلی‌متر	x/D ۵۰ تا ۵۰	۱۳۷۰۰ تا ۵۵۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۲۱

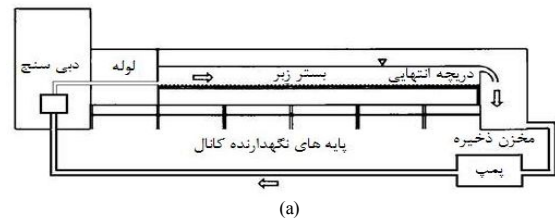
- 1- Hot film anemometer
- 2- Total head probe
- 3- Preston tube
- 4- Contoured nozzle
- 5- Hot wire anemometry
- 6- Segment
- 7- Total pressure tube
- 8- Long pipe
- 9- Laser doppler velocimeter
- 10- Single wire
- 11- Pitot probe

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

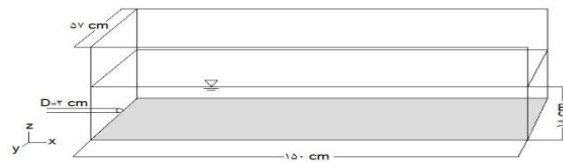
کانالی که آزمایش‌ها در آن انجام شده است جداره شیشه‌ای و کف فلزی به عرض ۰/۵۷، ارتفاع ۱ متر و طول ۱۰ متر دارد. جت ورودی به کانال از طریق لوله‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر به صورت افقی وارد وسط کانال می‌شود. شکل ۱ نمای شماتیک تجهیزات آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل (۲) دستگاه ADV حین برداشت داده



(a)



(b)

شکل (۱) نمای شماتیک از (a) کانال با تجهیزات مربوط (b) محدوده مورد آزمایش

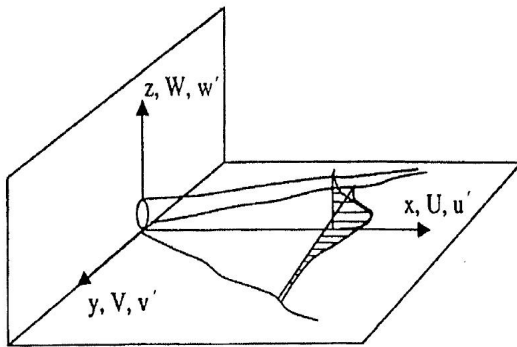
برای فراهم کردن بستر کاملاً صلب و ایجاد شرایط کامل هیدرولیکی از نظر زبری بستر از یک ورقه آلومینیومی استفاده شد. بدین صورت که ابتدا سطح ورق کاملاً تمیز و سپس تمام سطح آن آغشته به چسب آهن شد. بعد از این مرحله، مصالح خشک به طور کامل روی آن ریخته شد به صورتی که تمام سطح آن را پوشش دهد. بعد از خشک شدن، ورقه در داخل کانال قرار داده و با برقراری جریان جت و ضمن تامین عمق پایاب مورد نظر، اندازه‌گیری میدان انجام شد. زبری معادل نیکورادزه برای یک بستر شنی و ماسه‌ای از طریق پروفیل سرعت (جریان یکنواخت) تعیین می‌شود که تقریباً معادل d_{50} است [Dey, Raikar, 2007]. در این پژوهش نیز زبری معادل ماسه‌ای، d_{50} در نظر گرفته شد. مشخصات آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۲ آمده است (همه آزمایش‌ها برای عمق پایاب ثابت ۱۸ سانتی‌متر است).

جدول (۲) مشخصات آزمایش‌ها

شماره آزمایش	K_s (زبری معادل Nikuradse با میلی‌متر)	Re (عدد رینولدز)	U (سرعت ورودی جت با واحد متر بر ثانیه)
۱	۱/۰۵	۳۳۴۰۰	۱/۶۷۱
۲	۱/۶	۳۳۴۰۰	۱/۶۷۱
۳	۳/۲۸	۳۳۴۰۰	۱/۶۷۱

سایر تجهیزات استفاده شده، دبی‌سنج و عمق‌سنج است که به ترتیب میزان جریان واردشده به کانال و عمق جریان در کانال را تنظیم می‌کنند. برای اندازه‌گیری سرعت از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی وکترینو^۱ که نمونه جدید سرعت‌سنج‌های ADV است استفاده شد. این دستگاه که در آن بسیاری از نقایص دستگاه‌های قبلی برطرف شده است، در سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ طراحی و ساخته شده و بر اساس پدیده داپلر عمل می‌کند. شکل ۲ دستگاه ADV را هنگام برداشت میدان سرعت در کانال آزمایشگاهی نشان می‌دهد که روی یک دستگاه حرکت‌دهنده برای سهولت و ثابت نگه‌داشتن دستگاه ADV سوار شده است.

1- Vectrino



شکل (۳) نمای شماتیک جت دیواره‌ای سه‌بعدی

شبه‌بندی برداشت میدان شامل ۸ نقطه در جهت طول (x)، ۳ نقطه در جهت عرض (y) و ۲۰ نقطه در جهت ارتفاع (z) است که با توجه به بررسی‌های انجام شده در تمام نقاط میدان، زمان ۳ دقیقه برای پایداری سری‌های زمانی برای محاسبه ممان‌های اول و دوم سرعت کافی است. فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز بوده است. با توجه به وجود داده‌های خطادار در سری‌های زمانی سرعت برداشت شده با سرعت‌سنج، این سری‌های در دو مرحله بررسی شد: ابتدا با توجه به پیشنهاد شرکت سازنده دستگاه، ضریب همبستگی نوسانات^۱ و نسبت سیگنال به نویز^۲ سری‌های گفته شده کنترل و سری‌های زمانی به نحوی برداشت شد که در تمام سری‌ها، پارامترهای گفته شده به ترتیب بالاتر از ۸۵ درصد و ۱۸ باشند. در مرحله بعد برای حذف داده‌های خطادار ناشی از وجود پالس‌های صوتی مراحل قبلی اندازه‌گیری در میدان و همچنین تداخل امواج صوتی با مرزهای صلب، سری‌های زمانی با روش فضای فازی موجود در نرم‌افزار WinADV فیلتر شد. سرانجام با استفاده از سری‌های زمانی به دست آمده، مقادیر متوسط زمانی مؤلفه‌های سرعت و همچنین پارامترهای آشفتگی محاسبه شد.

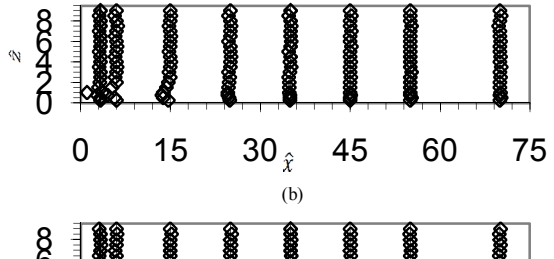
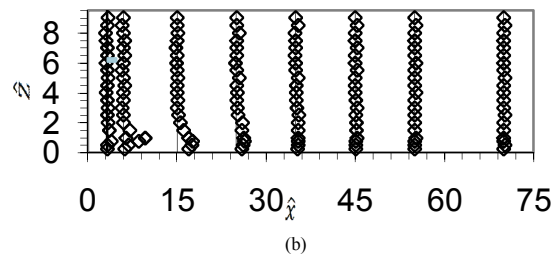
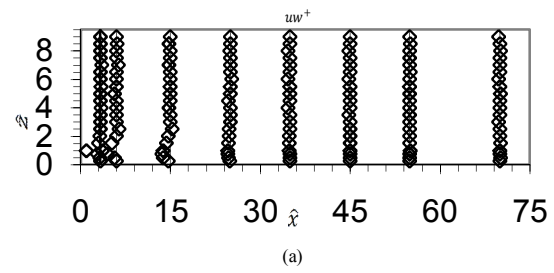
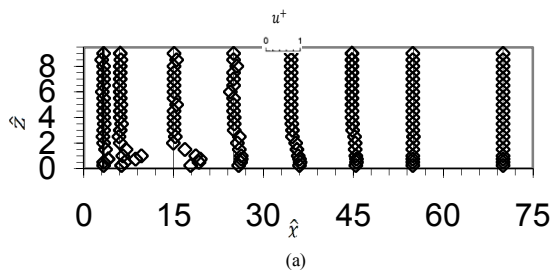
۳- تحلیل نتایج

در این بخش اثر زبری بر تنش‌های رینولدز، شدت آشفتگی و همچنین تنش برشی بستر بررسی شده است. شکل ۳ نمای شماتیک جت دیواره‌ای سه‌بعدی و نحوه توسعه آن در راستای طولی و عرضی و همچنین معرفی مؤلفه‌های طولی، عرضی و ارتفاعی را نشان می‌دهد.

۳-۱- تنش‌های رینولدز

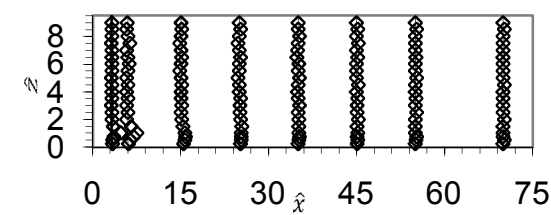
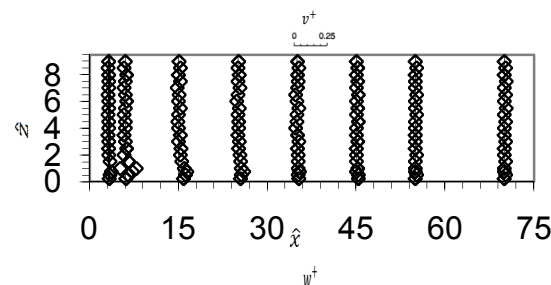
شکل ۴ نشانگر توزیع قائم تنش رینولدز uw^+ در فواصل طولی مختلف از جت دیواره‌ای برای زبری‌های مختلف بستر است. با توجه به این شکل، تنش رینولدز uw^+ در نزدیکی بستر، مقداری مثبت دارد و ناگهان تغییر جهت داده و منفی شده که علت آن جریان برگشتی در محدوده نزدیک جت است. با فاصله گرفتن از جت، پدیده وقوع پیک منفی شدید در پروفیل تنش رینولدز از بین می‌رود. اما آنچه شکل ۴ مشخص می‌کند این است که بیشینه مقدار uw^+ منفی در توزیع عمودی با افزایش زبری، افزایش می‌یابد؛ یعنی با افزایش زبری، تنش رینولدز و در نتیجه آن آشفتگی افزایش می‌یابد. نتیجه حاصل شده با کارهای انجام شده قبلی مطابقت دارد [Dey, Srakar (۲۰۰۸)]. لازم به ذکر است که در این جا $uw^+ = \frac{-\overline{u'w'}}{U^2}$ و $\hat{x} = x/d$ و $\hat{z} = z/d$ به ترتیب ارتفاع و فاصله طولی بی‌بعد شده نسبت به قطر نازل خروجی (d) است. بررسی روند تغییرات دو مؤلفه دیگر تنش رینولدز ($\overline{u'v'}$ و $\overline{w'v'}$) نشان داد که مقادیر این دو تنش در مقایسه با تنش uw^+ ناچیز بوده و تغییرات خاصی در طول میدان ندارد.

1- Correlation
2- Signal to noise ratio



شکل (۴) توزیع عمودی uw^+ برای $U=1.67$ m/s و برای زبری‌های مختلف، $d_{50}=1.05$ mm(a)، $d_{50}=1.6$ mm(b) و $d_{50}=3.28$ mm(c)

شکل (۵) توزیع عمودی u^+ برای $U=1.67$ m/s و برای زبری‌های مختلف، $d_{50}=1.05$ mm(a)، $d_{50}=1.6$ mm(b) و $d_{50}=3.28$ mm(c)



شکل (۶) توزیع عمودی v^+ و w^+ برای $u=1.67$ m/s و برای بستر $d_{50}=3.28$ mm

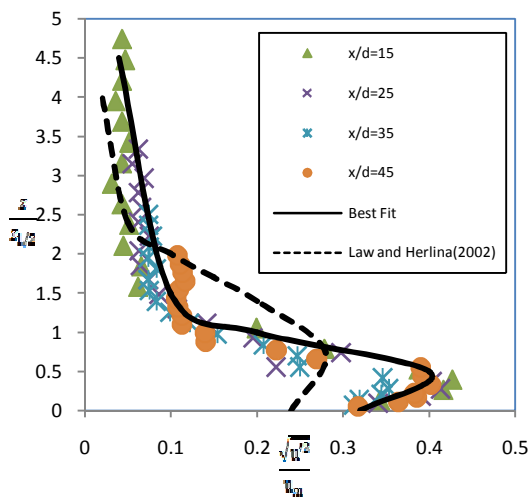
۲-۳- شدت آشفتگی

در شکل ۵ توزیع عمودی بی‌بعد شده مؤلفه افقی شدت آشفتگی، یعنی $u^+ = \frac{\overline{u'^2}}{U^2}$ برای زبری‌های مختلف در نمای مختلف رسم شده است. مؤلفه‌های عمودی و جانبی شدت آشفتگی یعنی $w^+ = \frac{\overline{w'^2}}{U^2}$ و $v^+ = \frac{\overline{v'^2}}{U^2}$ نسبت به زبری‌های مختلف بستر، تغییرات چندانی نداشتند؛ ولی برای $u=1.67$ m/s و $d_{50}=3.28$ mm در [شکل ۶] نشان می‌دهد شدت آشفتگی دو مؤلفه v و w از شدت آشفتگی مؤلفه u کمتر است. همچنین با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که شدت آشفتگی مؤلفه v از شدت آشفتگی مؤلفه w بیشتر است که به تبع آن نرخ پخش جت در راستای عرضی بیشتر از راستای قائم است.

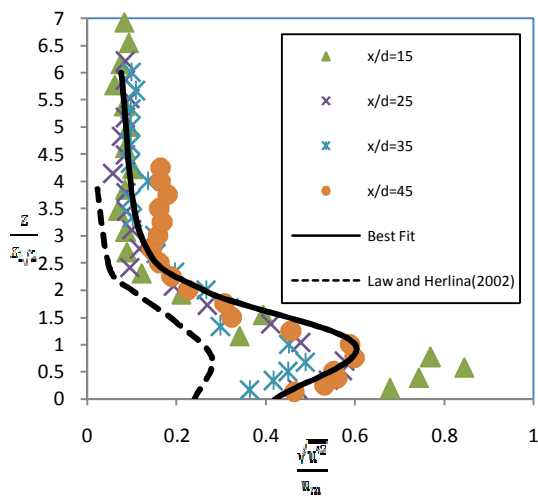
۳-۳- بررسی مشخصه‌های آشفتگی^۱

شکل ۷ توزیع شدت آشفتگی مؤلفه u را در x/d های مختلف و برای عدد رینولدز ۳۳۴۰۰ نشان می‌دهد. بیشینه‌ی شدت آشفتگی در شکل ۷ با افزایش میزان زبری افزایش یافته است. همچنین با توجه به شکل، بیشینه‌ی مقدار بهترین برازش^۲ برای این پژوهش برای هر دو حالت زبری از مقدار به دست آمده به وسیله‌ی Law و Herlina (۲۰۰۲) بیشتر است که علت آن، زبر بودن بستر در این پژوهش است. با مقایسه دو شکل $(a-7)$ و $(b-7)$ می‌توان به خوبی دید که با افزایش زبری بستر، میزان اختلاف منحنی برازش این تحقیق با منحنی ارائه شده به وسیله‌ی Law و Herlina افزایش می‌یابد که این نکته به خوبی بیانگر تأثیر زبری بستر در تغییر ساختار آشفتگی نزدیک بستر است. در این منحنی، $Z_{1/2}$ نیم‌پهنای عمودی جت (ارتفاعی که در آن، سرعت در هر مقطع نصف سرعت بیشینه است) و u_m مقدار بیشینه‌ی سرعت در هر مقطع است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در این پژوهش، محل وقوع بیشینه‌ی مقدار $\frac{\sqrt{u'^2}}{u_m}$ بزرگ‌تر از $0.5 \frac{z}{Z_{1/2}}$ است که به وسیله‌ی Law و Herlina در سال ۲۰۰۲ برای سطوح صاف (پرسپکس^۳ با ضریب زبری ۰/۰۱) و برای عدد رینولدز ۱۲۲۰۰ گزارش شده است. همچنین با افزایش زبری، مقدار $\frac{z}{Z_{1/2}}$ متناظر با محل وقوع بیشینه‌ی مقدار شدت آشفتگی مؤلفه طولی سرعت، افزایش یافته و به عبارت بهتر، هسته آشفتگی جت، از دیواره دورتر می‌شود.



(a)



(b)

شکل (۷) تغییرات مؤلفه u شدت آشفتگی در جهت طولی برای بستر

$d_{50}=3.28$ mm(b) و $d_{50}=1.05$ mm(a)

شکل ۸ توزیع شدت آشفتگی مؤلفه w را در x/d های مختلف برای عدد رینولدز ۳۳۴۰۰ نشان می‌دهد. همانند شدت آشفتگی مؤلفه u ، مقدار بیشینه‌ی شدت آشفتگی با افزایش میزان زبری افزایش یافته است و همان‌طور که از شکل مشخص است برای یک زبری یکسان، شدت آشفتگی مؤلفه u از شدت آشفتگی مؤلفه w بیشتر است. با افزایش زبری بستر، مقدار $\frac{z}{Z_{1/2}}$ متناظر با بیشینه‌ی $\frac{\sqrt{w'^2}}{u_m}$ نیز افزایش یافته است. برای یک زبری ثابت، موقعیت قائم

1- Turbulence Characteristics
2- Best fit
3- Perspex

۳-۴- تأثیر زبری روی تنش برشی بستر

روش پیشنهاد شده برای تعیین اندازه تنش برشی بستر، مرتبط کردن اندازه این تنش آشفته به تنش‌های رینولدز است که این روش در توصیف جریان‌های آشفته آزاد مانند جریان‌های جت، موفق عمل کرده است؛ بنابراین در این مقاله نیز برای به دست آوردن تنش برشی از تنش‌های رینولدز استفاده شده است. برای به دست آوردن تنش برشی بستر از طریق رابطه ارائه شده به وسیله‌ی Dey و Barbhuiya در سال ۲۰۰۴ که در ادامه آمده، استفاده شده است:

$$\tau_b = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} \quad (1)$$

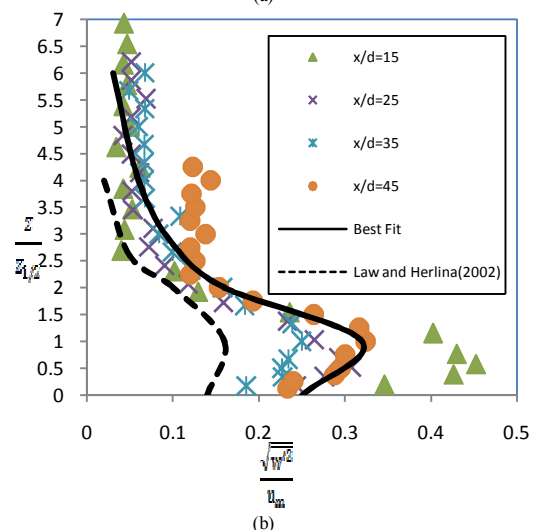
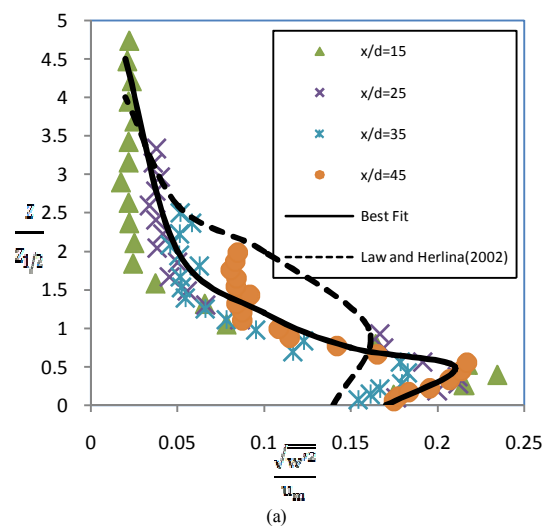
τ_x و τ_y از طریق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_x = -\rho(\overline{w'u'} + \overline{v'u'}) \quad (2)$$

$$\tau_y = -\rho(\overline{u'v'} + \overline{w'v'}) \quad (3)$$

همان‌طور که از رابطه بالا پیداست، تنش‌های رینولدز باعث بالا رفتن اندازه تنش برشی می‌شود. در شکل ۹ تنش بی‌بعد شده بستر در مقابل فاصله طولی بی‌بعد شده در فاصله ۵ میلی‌متری از کف برای زبری‌های مختلف بستر رسم شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش فاصله از جت، تنش برشی بستر کاهش می‌یابد و با افزایش زبری بستر، بیشینه‌ی تنش برشی نیز روند افزایشی دارد. در فاصله حدود $x/d=15$ از نازل همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه‌ی تنش برشی برای زبری‌های مختلف رخ داده است که علت آن تداخل گردابه‌های طولی و عرضی ایجاد شده در نزدیکی بستر است. همچنین در آزمایش‌های قبلی در خصوص آب‌شستگی جت، نشان داده شده است که بیشینه‌ی مقدار آب‌شستگی در نزدیکی جت اتفاق نمی‌افتد بلکه در فاصله‌ای از جت (تقریباً $x/d=15$) شکل می‌گیرد که این

وقوع بیشینه‌ی $\frac{z}{z_{1/2}} \sqrt{\frac{w'^2}{u_m}}$ بالاتر از محل وقوع بیشینه‌ی $\frac{z}{u_m} \sqrt{\frac{w'^2}{u_m}}$ است که این نتیجه با کارهای قبلی انجام شده مطابقت دارد [Law و Herlina (۲۰۰۲)]. مشابه پروفیل مؤلفه طولی شدت آشفتگی، میزان اختلاف پروفیل حاصل از این پژوهش با منحنی ارائه شده به وسیله‌ی Law و Herlina (۲۰۰۲) در صورتی که زبری بستر شدید نباشد، کم بوده و با افزایش بیشتر زبری بستر در شکل ۸-b دو منحنی کاملاً از یکدیگر فاصله گرفته است.



شکل (۸) تغییرات مؤلفه w شدت آشفتگی در جهت طولی برای بستر:

$d_{50}=1.05$ mm(a) و $d_{50}=3.28$ mm(b)

بیشینه‌ی مقدار منفی uw^+ در توزیع عمودی با افزایش میزان زبری بستر، افزایش می‌یابد یا به عبارتی دیگر با افزایش زبری بستر، تنش رینولدز و در نتیجه آن آشفتگی افزایش می‌یابد.

مؤلفه u شدت آشفتگی با افزایش زبری بستر، افزایش یافته است.

توزیع شدت آشفتگی مؤلفه‌های u و w در x/d های مختلف نشان داد که مقدار بیشینه‌ی شدت آشفتگی با افزایش میزان زبری افزایش یافته است.

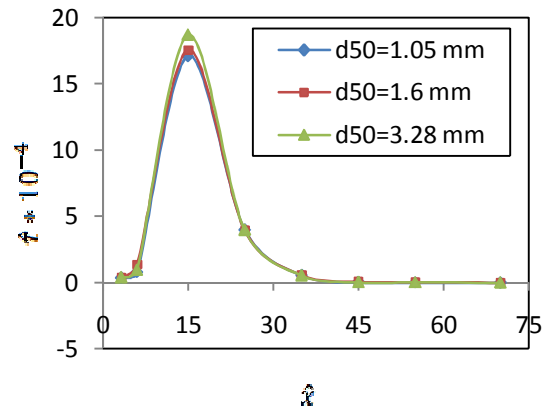
برای یک زبری یکسان، شدت آشفتگی مؤلفه u از شدت آشفتگی مؤلفه w بیشتر است.

با افزایش فاصله از جت، تنش برشی بستر کاهش می‌یابد و با افزایش زبری بستر، تنش برشی روند افزایشی دارد.

۵- مراجع

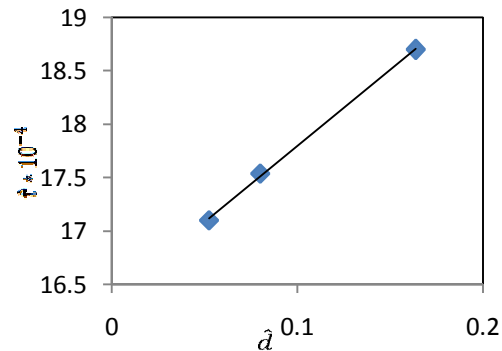
- [1] Padmanabham, G., and Gowda, B. H. L. (1991). "Mean and turbulence characteristics of a class of three-dimensional wall jets-Part 1: Mean flow characteristics -Part 2. Turbulence characteristics." J. Fluids Eng., 113, 620-634.
- [2] Sforza, P. M., and Herbst, G. (1970). "A study of three-dimensional incompressible, turbulent wall jets." AIAA J., 8(2), 276-283
- [3] Rajaratnam, N., and Pani, B. S. (1974). "Three-dimensional turbulent wall jets." J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 100(1), 69-83.
- [4] Law, A. W.-K., and Herlina, (2002). "An experimental study on turbulent circular wall jets", J. Hyd. Eng. 128 (2) 161-174.
- [5] Ead, S. A., and Rajaratnam, N. (2004). "Plane Turbulent Wall Jets on Rough Boundaries with Limited Tailwater." J. Eng. Mech., 130(10), 1245-1250.
- [6] Rajaratnam, N. (1976). Turbulent jets, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- [7] Dey, S., and Sarkar, A. (2008). "Characteristics of Turbulent Flow in Submerged Jumps on Rough Beds" JOURNAL OF ENGINEERING MECH-

پژوهش نیز مؤید همین مطلب است. البته همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، منحنی $\hat{\tau} = \tau/\rho U^2$ در مقابل $\hat{x} = x/d$ برای زبری‌های مختلف تقریباً مشابه است.



شکل (۹) توزیع افقی تنش برشی برای قطرهای مختلف مصالح بستر

شکل ۱۰ روند افزایش تنش برشی بی‌بعد شده بستر را نسبت به افزایش قطر بی‌بعد شده مصالح بستر نشان می‌دهد (که در آن و d_{50} قطر متوسط مصالح و d قطر نازل جت است).



شکل (۱۰) روند افزایشی تنش برشی بی‌بعد شده بستر نسبت به افزایش قطر بی‌بعد شده

۴- نتیجه‌گیری

تنش رینولدز uw^+ در نزدیکی بستر، مقداری مثبت دارد و ناگهان تغییر جهت داده و منفی شده که علت آن جریان برگشتی در محدوده نزدیک جت است.

- [12] Maslov, V. P., Mineev, B. I., Secundov, A. N. and Vorobiev, A. N., (2001), "An experimental study of three-dimensional wall jets" AIAA paper -0449
- [13] Dey, S and Raikar, R. (2007) "Characteristics of Loose Rough Boundary Streams at Near-Threshold". JHE Vol. 133, Number 3
- [14] Law, A. W.-K., and Herlina, (2002) . "Measurements of turbulent mass transport of a circular wall jet", International Journal of Heat and Mass Transfer 45 , 4899–4905
- [15] Dey, S, and Barbhuiya, A. K., (2004). "Turbulent flow measurement by the ADV in the vicinity of a rectangular cross-section cylinder placed at a channel sidewall" Flow Measurement and Instrumentation 15, 221–237.
- ANICS 134(1)_49-59.
- [8] Newman, B. G, Patel, R. P, Savage, S. B, Tjio, H. K, (1972) "Three dimensional wall jet originating from a circular orifice", Aeronaut. Quart. 23 188–200.
- [9] Davis, M. R. and Winarto, H., (1980), "Jet diffusion from a circular nozzle above a solid plane", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 101, pp.201-221
- [10] Eriksson J. G, Jahansson B. and Lofdahl L., (1991), "Flow visualization and turbulence measurements in a three-dimensional plane turbulent wall jet" , First European Fluid Mechanics Conference, England
- [11] Abrahamsson, H., Johansson, B., and Lofdahl, L. (1997). "The turbulence field of a fully developed three-dimensional wall jet." Internal Rep. No. 97/1, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers Univ. of Technology, Go'teborg, Sweden.

Effects of Bed Roughness on Turbulent Characteristics of a Three-Dimensional Wall Jets

A. Shojaeizadeh¹, M. Ghodsian², A.A. Salehi Neyshaboori^{3*}, A. Safarzadeh⁴

1- MSc Student, Hydraulic Engineering Department, Tarbiat Modares University

2- Prof. Hydraulic Engineering, Tarbiat Modares University

3- Prof. Hydraulic Engineering, Tarbiat Modares University

4- Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

salehi@modares.ac.ir

Abstract:

In this paper the experimental study of the flow pattern around a round wall jet has been carried out to investigate the effect of the bed roughness on the turbulence characteristics, including Reynolds stress and turbulence intensities. Measurements were conducted using the three-dimensional velocimeter, ADV and time series of the velocity components are used to investigate the variation of the turbulent flow parameters along the measuring domain. The results showed that by increasing the bed roughness, the streamwise and vertical turbulence intensities increase by downstream distance and for a specific bed roughness the streamwise turbulence intensity is higher than the vertical one. Furthermore, by going downstream from the jet entrance the bed shear stress reduces and by increasing the bed roughness, the bed shear stress has an increasing trend along the jet centerline. Location of the maximum bed shear stress does not change by changing the bed roughness.

Keywords: Wall jet, Roughness, Turbulent characteristics, ADV, Shear stress