

مطالعه توزیع تنش برشی جداره در جریان یکنواخت کانال با استفاده از ابزار دقیق و شبیه‌سازی عددی

اکبر صفرزاده گندشمین^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، امیر رضا زراتی^۳، مسعود قدسیان^۴

۱- دانشجوی دکتری عمران هیدرولیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد سازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- استاد هیدرولیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

Salehi@modares.ac.ir

چکیده- در این تحقیق، برای بررسی نحوه توزیع عرضی تنش برشی بستر در کانال باز با مقطع مستطیلی برای جریان یکنواخت در حالت بستر صلب، نوعی حسگر سوزنی با دقت بسیار بالا ساخته شده و پس از واسنجی، آن برای اندازه‌گیری تنش برشی کف در شرایط مختلف جریان استفاده شده است. در این ابزار برای ثبت دقیق نوسانهای فشار از مبدل‌های فشار خازنی با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ پاسکال و فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز استفاده شده و صحت‌سنجی نتایج از طریق مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی موجود و نیز نتایج شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت انجام شده است. نتایج حاصله نشان‌دهنده دقت بسیار بالای ابزار ساخته شده در اندازه‌گیری تنش برشی بستر برای جریان یکنواخت است. بر اساس نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر، مشخص شد که تأثیر جریان ثانویه بر نحوه توزیع تنش برشی دیوارهای جانبی بسیار بیشتر از تنش کف کانال است. همچنین مشخص شد که تنش بستر در نواحی میانی کانال به دلیل وجود نواحی متناوب کم سرعت-پرسرعت، نوعی توزیع نوسانی دارد.

کلید واژگان: تنش برشی جداره، حسگر سوزنی، آشفتگی، سنسور فشار، شبیه‌سازی عددی، مدل فلوئنت.

۱- مقدمه

گرما و جرم و اندرکنش جریان با مرزهای میدان است. مطالعات هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان در مجاری باز، شاخه مهمی از مکانیک سیالات بوده و از دیرباز مورد توجه محققان و مهندسان بوده است. ایده اصلی در

بیشتر جریانها در طبیعت آشفته بوده و یکی از مباحث پایه‌ای مهم در مکانیک سیالات، شناخت ماهیت و ساختار آشفتگی و نیز پدیده‌های ناشی از آن مانند انتقال ممتنم،

در بیشتر مطالعات میدان‌های جریان دارای مرز دیواره، تنش برشی یکی از پارامترهای مهمی است که باید تعیین شود. تعیین دقیق این پارامتر از دیدگاه کاربردی و نیز نقش آن در تعیین توزیع سرعت، بحث فرسایش و رسوبگذاری و نیز پارامترهای آشفتگی اهمیت خاصی دارد. از طرفی نوعی اندرکنش قوی بین تنش برشی بستر و ساختار جریان آشفته وجود دارد و لذا تعیین دقیق این پارامتر، مستلزم شناخت دقیق ساختار جریان است.

تعیین تنش برشی بستر با استفاده از روشها و ابزارهای مختلفی صورت می‌گیرد که در حالت کلی بر اساس سازوکار و نحوه تعیین، به دو دسته کلی روشهای مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل ۱ تقسیم‌بندی کلی روشها و نیز فنون مورد استفاده در هر روش نشان داده شده است. در روش مستقیم، تنش اعمالی از طرف جریان به جداره به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شده و در حقیقت، کمیت اندازه‌گیری شده، همان نیروی برشی یا تنش برشی است. این روش، خود به دو دسته کلی روشهای تعادل نیرو (بر مبنای اندازه‌گیری نیروی اعمالی بر سطح از طرف جریان) و روشهای اندود سطحی (بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات مشخصه‌های سطحی مواد اندود به‌کار رفته در اثر عبور جریان نزدیک بستر) تقسیم‌بندی می‌شوند.

از میان ابزارهای مرتبط با روش تعادل نیرو، می‌توان به ابزار المان شناور در کف کانال اشاره کرد (Winter, 1977). این ابزار برای اندازه‌گیری تنش برشی موضعی مناسب نبوده و کالیبره‌سازی و نصب درست سیستم مکانیکی آن بسیار مشکل است. دو ابزار تداخل سنجی غشای روغنی و غشای کریستال مایع، جزو روشهای اندود سطحی بوده و مزیت آنها نیاز نداشتن به کالیبره‌سازی بوده و در مقابل، به‌دلیل نیاز به مرئی‌سازی

تشریح جریان در کانال‌های باز از تئوری عمومی لایه مرزی در حالت آشفته بر روی یک صفحه تخت اقتباس شده، اما با وجود تشابه زیاد بین جریان لایه مرزی دوبعدی و جریان در کانال باز، تفاوت‌های اساسی بین این دو جریان وجود دارد. مهمترین تفاوت‌ها، ناشی از تأثیر دیواره‌ها و نیز سطح آزاد در شکل‌گیری جریانهای ثانویه در کانال‌های باز است. با ورود جریان به کانال با بستر صلب، گرادیان شدید سرعت در نزدیکی کف ایجاد می‌شود که با تنش‌های اصطکاکی شدید (τ_0) بین ذرات سیال و بستر صلب همراه است. لایه مرزی ایجاد شده در بالادست میدان به سمت سطح آب رشد کرده و در نقطه‌ای معین با فاصله L از ورودی، به توسعه یافتگی کامل می‌رسد (Kirkgoz and Ardiçlioglu, 1997).

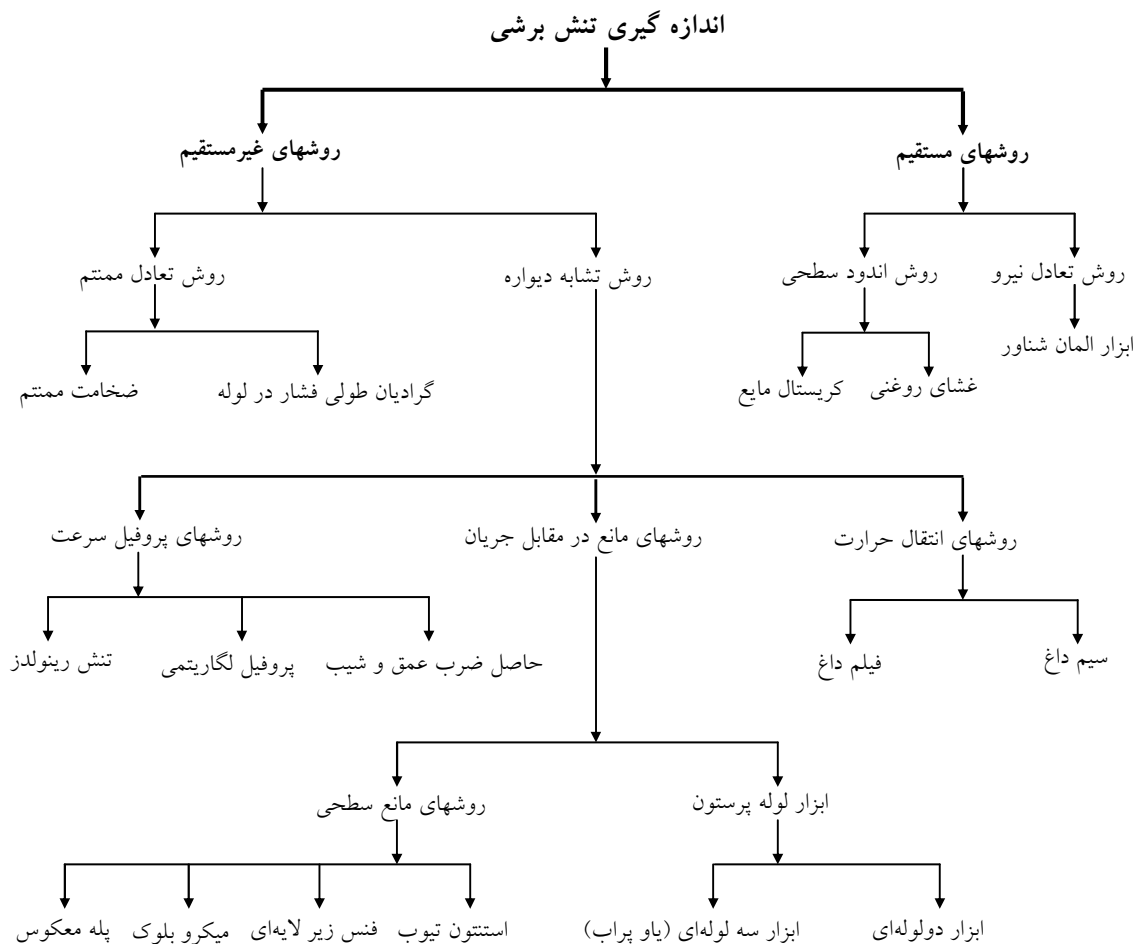
در این ناحیه بر اساس پارامترهای کنترل‌کننده نحوه توزیع سرعت، لایه مرزی از دو ناحیه مشخص تشکیل شده است: ناحیه داخلی و ناحیه بیرونی. در ناحیه داخلی، عوامل کنترل‌کننده توزیع سرعت عبارتند از: تنش برشی کف کانال (τ_0)، فاصله از کف (z) و لزجت سینماتیکی سیال (ν). در ناحیه کاملاً آشفته داخلی، مقیاس طولی مشخصه به‌صورت $z^+ = \frac{zu_*}{\nu}$ در نظر گرفته شده که در آن $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ سرعت برشی بستر بوده و توزیع لگاریتمی سرعت یا قانون جداره به‌صورت زیر توصیف می‌شود (Nezu and Nakagawa, 1993):

$$\frac{u}{u_*} = A \ln z^+ + B \quad (1)$$

که در آن $A = \frac{1}{\kappa}$ و $\kappa = 0.41$ ثابت فون کارمن، B مقداری ثابت وابسته به شرایط دیواره و u سرعت متوسط زمانی در هر نقطه از میدان است (Kirkgoz and Ardiçlioglu, 1997).

روش اول برای تعیین تنش برشی موضعی قابل کاربرد نبوده و اگر سطح خیس شده در طول بازه ثابت نباشد، استفاده از این روش با مشکل همراه است. استفاده از روش دوم نیز برای مقاطع هندسی پیچیده، با مشکل همراه است. یکی از روشهای معروف و کارآمد در تعیین تنش برشی، روش اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی بستر و محاسبه تنش دیواره از طریق آن است.

برای ثبت اطلاعات و نیز احتمال معیوب شدن سطح (لکه‌دار شدن ماده مورد استفاده توسط مواد و املاح موجود در آب)، محدودیت‌هایی دارد (Fernholz et al., 1996). روشهای غیر مستقیم بر استفاده از فرضیهایی در باره شرایط جریان حاکم وایسته بوده و به دو دسته کلی روشهای تعادل ممتم و روشهای تشابه دیواره تقسیم‌بندی می‌شوند. از میان روشهای تعادل مومتتم می‌توان به استفاده از مفاهیم گرادیان طولی فشار و ضخامت مومتتم در کانال اشاره کرد (Haritionidis, 1989).



شکل ۱ تقسیم‌بندی روشها و ابزارهای مختلف اندازه‌گیری تنش برشی جداره (Fernholz et al., 1996)

این روش به روش پروفیل سرعت معروف بوده و از سه روش مختلف در آن استفاده می‌شود: ۱- حاصل ضرب شیب- عمق (Chow, 1959)، ۲- اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی بستر و درونیابی پروفیل سرعت (Wilcock, 1996) و ۳- تنش رینولدز نزدیک بستر (Roussinova et al., 2008).

از میان دیگر روشهای غیر مستقیم می‌توان به روش سیم داغ و فیلم داغ اشاره کرد که از فیلم داغ در مطالعات کانال باز استفاده می‌شود (Fernholz et al., 1996). در این روش تغییر دمای ایجاد شده در قطعه حساس نصب شده در کف کانال بر اثر تنش برشی اعمالی، با استفاده از روابط خاص کالیبراسازی به تنش برشی تبدیل می‌شود. روش مزبور در عین داشتن سازوکاری نسبتاً ساده و ارائه داده‌هایی با فرکانس بالا، به دلیل فرض قانون جداره، شکنندگی سنسور و مشکلات کالیبراسازی، محدودیتهایی دارد.

روش مانع در مقابل جریان، یکی از روشهای معروف در خانواده تشابه دیواره است که تمامی روشهای موجود در این دسته، بر فرض توزیع لگاریتمی سرعت استوارند. اساس کار روشهای این گروه، استفاده از مانع کوچکی در مقابل جریان نزدیک بستر برای ایجاد اختلاف فشار ناشی از وجود مانع مزبور و برقراری رابطه‌ای منطقی بین اختلاف فشار و تنش برشی کف با فرض توزیع لگاریتمی سرعت در داخل لایه مرزی است. ابزارهای موجود در این گروه به پراب‌های فشار معروف بوده و اغلب برای اندازه‌گیری تنش برشی محلی به کار می‌روند.

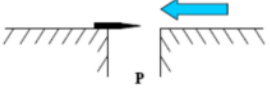
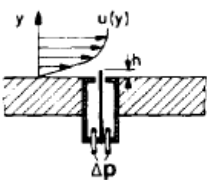
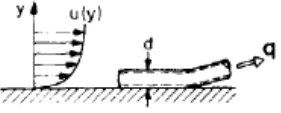
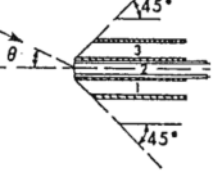
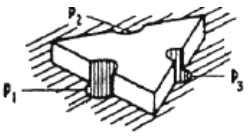
روش فشار برای اندازه‌گیری تنش برشی در مطالعات آزمایشگاهی و صحرائی جریان در کانال‌های باز، به طور گسترده‌ای توسط محققان مختلف استفاده شده که می‌توان به مطالعات (Knigh et al., 1984) و (Ackerman and Hoover, 2001) اشاره کرد. در جدول ۱، ابزارهای مختلفی از خانواده روش فشار ارائه شده و ضمن بیان اساس عملکرد هر یک، مزایا و معایب آنها بررسی شده است.

بررسی ابزارهای مختلف این دسته نشان می‌دهد که در حالت جریانهای یکنواخت، روش لوله پرستون به دلیل سادگی، کم هزینه بودن و نیز قابلیت جابه‌جایی ساده به نقاط مختلف بسترکانال برای ثبت مقادیر متوسط و نوسانی تنش برشی بستر نسبت به روشهای دیگر، از قابلیت بیشتری برخوردار بوده و در صورت انتخاب درست سیستم ثبت نوسانهای فشار، می‌توان از این ابزار برای مطالعات جریانهای یکنواخت استفاده کرد. بر اساس مرور انجام شده، در بیشتر ابزارهای ساخته شده به این روش، برای اندازه‌گیری تنش برشی در کانال باز، دقت سنسورهای فشار مورد استفاده پایین است که این در نواحی حساس میدان مانند نواحی وقوع جریانهای ثانویه، بر دقت نتایج به شدت تأثیر می‌گذارد.

برای نمونه می‌توان به یگانه تحقیق انجام شده در داخل کشور توسط (Mohammadi 2008) اشاره کرد که در آن از پیرومتر معمولی برای ثبت فشار استفاده شده که به طور طبیعی دقت اندازه‌گیری فشار دینامیکی (به ویژه مقادیر لحظه‌ای) در این ابزار کمتر از سنسورهای فشار الکترونیکی با پاسخ زمانی پایین و فرکانس نمونه‌برداری بالا است.

علاوه بر آن در تحقیقات گذشته، مقادیر موضعی تنش برشی با توزیع مکانی کافی با هدف تحلیل دقیق روند تغییرات این پارامتر در عرض کانال انجام نشده و لازم است ضمن اندازه‌گیری دقیق آن به تحلیل هیدرودینامیکی مسأله پرداخته شود.

جدول ۱ پراب‌های فشار مختلف برای اندازه‌گیری تنش برشی موضعی (Fernholz et al., 1996)

عنوان	روش اندازه‌گیری	مزایا/معایب	شکل ابزار
Stanton gauge	استفاده از یک ورودی فشار هیدرواستاتیک و یک تیغه نوک تیز در بالای ورودی هیدرواستاتیک برای ثبت فشار کل و تبدیل فشار هیدرودینامیک حاصل از تفاضل فشار کل و هیدرو استاتیک به تنش برشی موضعی	ساختمان ساده و کم هزینه حساسیت بالا به راستای درست جریان فرض قانون جداره و نیاز به اطلاعات کافی از شرایط لایه مرزی، اندازه‌گیری فقط در نقطه نصب شده، کالیبره‌سازی مشکل	
Sub-layer fence	اندازه‌گیری اختلاف فشار دو طرف یک صفحه بسیار کوچک در زیر لایه لزج و تبدیل آن به تنش برشی موضعی	ساختمان ساده و کم هزینه کالیبره‌سازی مشکل، حساسیت بالا به راستای درست جریان، فرض قانون جداره و نیاز به داشتن اطلاعات کافی از شرایط لایه مرزی، اندازه‌گیری فقط در نقطه نصب شده	
Preston tube	استفاده از یک لوله به صورت لوله پیتو برای ثبت فشار کل و یک لوله یا ورودی دیواره دیگر برای فشار هیدرواستاتیک و تبدیل فشار هیدرودینامیک حاصل از تفاضل فشار کل و هیدرو استاتیک به تنش برشی موضعی با استفاده از روابط کالیبره‌سازی	ساختمان ساده و کم هزینه، قابلیت جابجایی به نقاط مختلف میدان و اندازه‌گیری در نقطه دلخواه، قابل تبدیل به سرعت‌سنج فرض قانون جداره و نیاز به داشتن اطلاعات کافی از شرایط لایه مرزی	
Yaw probe	استفاده از یک لوله میانی با ورودی تخت و دو لوله کناری با ورودی اریب (معمولاً ۴۵ درجه) برای ثبت فشار کل در سه راستا و استفاده از آنها برای تعیین مقدار و نیز راستای تنش برشی محلی	ساختمان ساده و کم هزینه نیاز نداشتن به نصب در راستای مؤلفه اصلی جریان، ارائه مقدار و راستای تنش برشی به‌طور همزمان، قابل تبدیل به سرعت‌سنج فرض قانون جداره	
Small block	تلفیقی از دو ابزار Preston tube و Yaw probe. با این تفاوت که به ایجاد اختلال در میدان جریان محلی نیاز نبوده و در کف کانال، فشار کل را در سه پورت واقع در سه یال یک مثلث به‌عنوان مانع ثبت می‌کند.	نصب در زیر لایه لزج با ایجاد کمترین اختلال در جریان محلی، ارائه مقدار و راستای بردار تنش برشی به‌طور همزمان فرض قانون جداره، ساخت نسبتاً مشکل، اندازه‌گیری فقط در نقطه نصب شده	

کالیبره‌سازی و صحت‌سنجی ابزار مزبور، مطالعات هیدرودینامیکی بر روی محدوده وسیعی از شرایط مختلف جریان یکنواخت در یک کانال بزرگ آزمایشگاهی با بستر صاف و صلب برای مطالعه نحوه توزیع تنش برشی بستر، نقش جریان ثانویه در توزیع

در تحقیق حاضر، جزئیات ساخت نوعی ابزار سوزنی دقیق و حساس برای اندازه‌گیری مقادیر موضعی تنش برشی جداره تشریح شده است. این ابزار از نظر دقت و نیز فرکانس نمونه‌برداری منحصر به فرد بوده و برای اولین بار در کشور تهیه و به‌کار برده شده است. پس از

قطرهای مختلف - که نسبت قطر داخلی به قطر بیرونی تمامی آنها حدود ۰/۶ بود - تابع g را به صورت زیر تعیین کرد:

$$\log\left(\frac{\tau_0 D_p^2}{4\rho v^2}\right) = -1.39 + \frac{7}{8} \log\left(\frac{\Delta P D_p}{4\rho v^2}\right) \quad (4)$$

در ادامه تحقیقات در این زمینه (Patel 1965) با آزمایشهای متعدد، رابطه پرستون را اصلاح کرده و ضمن معرفی سه پارامتر مؤثر در حالت بستر صاف به صورت زیر، به این نتیجه رسید که به جای یک معادله باید از سه معادله در سه محدوده مشخص استفاده شود:

$$X^* = \log\left(\frac{\tau_0 D_p^2}{4\rho v^2}\right), \quad Z^* = \log\left(\frac{\Delta P D_p}{4\rho v^2}\right), \quad D^+ = \frac{u_* D_p}{\nu} \quad (5)$$

روابط ارائه شده و محدوده کاربرد آنها به صورت زیر است:

$$(a) Z^* = 0.037 + 0.5X^* \text{ if } (0 < Z^* < 1.5 \ \& \ D^+ < 11.2)$$

$$(b) Z^* = 0.8287 - 0.1381X^* + 0.1437X^{*2} -$$

$$0.0060X^{*3} \text{ if } (1.5 < Z^* < 3.5 \ \& \ 11.2 < D^+ < 110)$$

$$(c) X^* = Z^* + 2 \log(1.95Z^* + 4.10) \text{ if}$$

$$(3.5 < Z^* < 5.3 \ \& \ 110 < D^+ < 1600)$$

رابطه سوم ارائه شده توسط پاتل، صریح نیست و لذا در تحقیق حاضر برای استفاده از این رابطه در نرم افزار تهیه شده، به شکل صریح زیر تغییر داده شد:

$$(c) Z^* = 0.3578X^{*1.3285} \quad (7)$$

$$\text{if } (3.5 < Z^* < 5.3 \ \& \ 110 < D^+ < 1600)$$

در این مقاله از روابط کالیبره سازی بالا استفاده شده و صحت این روابط با استفاده از مدل عددی بررسی شده است. جزئیات طراحی و ساخت این ابزار شامل قطر لوله ها، مبدل فشار، نرم افزار جمع آوری و ثبت داده ها و سایر جزئیات در بخش های بعدی ارائه خواهد شد.

عرضی تنش برشی، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مقایسه نتایج با مدل های تحلیلی و تجربی موجود و نیز نتایج شبیه سازی عددی انجام شده است.

در ادامه ضمن بیان مفاهیم پایه ای و جزئیات این ابزار، روش ساخت و سازوکار خاص جابه جایی و نیز نرم افزار مدیریت اطلاعات طراحی شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس ارائه شده است.

۲- مفاهیم پایه ای و روابط کالیبره سازی لوله

پرستون

همان طور که در بخش قبل گفته شد، یکی از روشهای اندازه گیری تنش برشی، استفاده از لوله پرستون است. در این ابزار با اندازه گیری فشار کل و فشار هیدرواستاتیک، فشار هیدرودینامیکی نزدیک دیواره محاسبه و با فرض برقراری قانون جداره در لایه مرزی آشفته بر روی بستر صاف و صلب، بدون توجه به ضرایب ثابت معادله (۱)، فشار هیدرودینامیکی و تنش جداره از معادلات زیر استخراج می شود (Preston, 1954):

با در نظر گرفتن رابطه بین فشار هیدرودینامیکی و سرعت جریان به شکل $\Delta P = 0.5\rho u^2$ معادله (۱) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta P = \left(\frac{\tau_0}{2}\right) \left(A \log \frac{Z}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} + B\right)^2 \quad (2)$$

پرستون با در نظر گرفتن وسط لوله به عنوان محل انجام محاسبات ($z = D_p/2$) - که در آن قطر بیرونی لوله است - معادله فوق را بی بعد کرده و رابطه زیر را بین پارامترهای اثر گذار در مساله ارائه کرد:

$$\frac{\Delta P D_p}{4\rho v^2} = g\left(\frac{\tau_0 D_p^2}{4\rho v^2}\right) \quad (3)$$

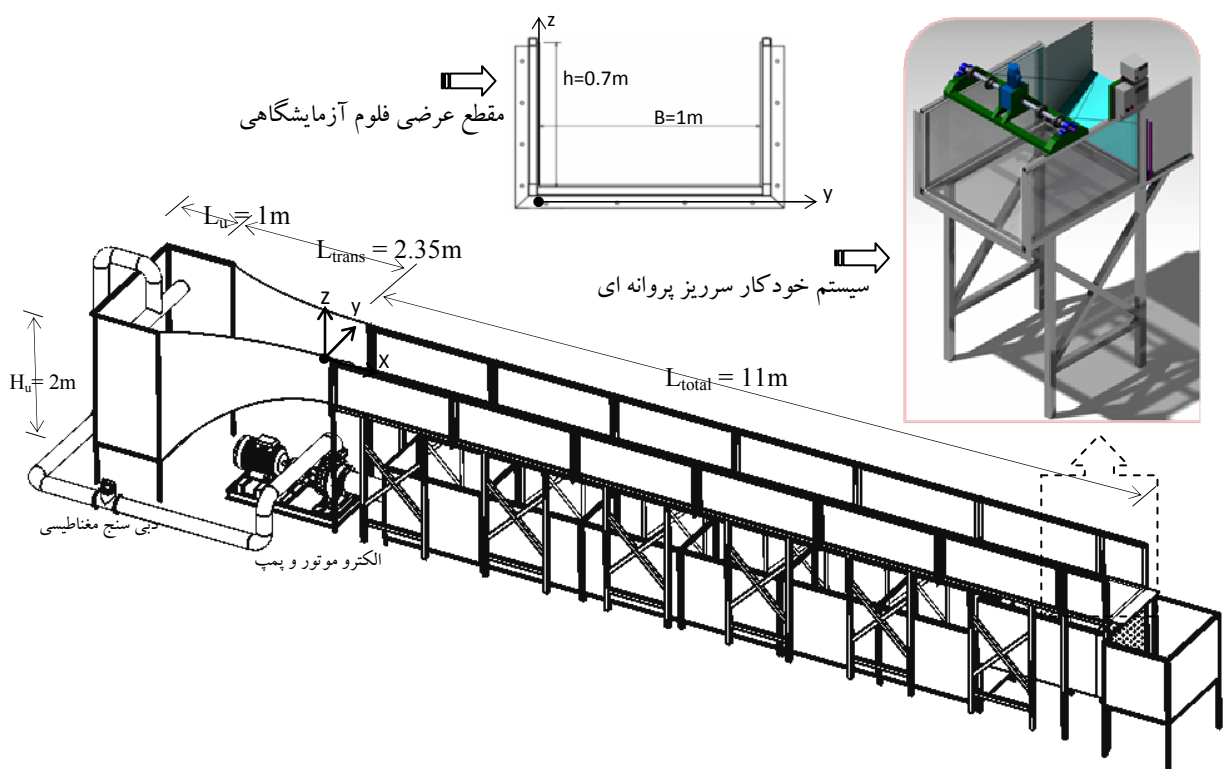
برای اولین بار (Preston 1954) با انجام آزمایشهای مختلفی در تونل باد، ضمن به کارگیری لوله هایی با

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

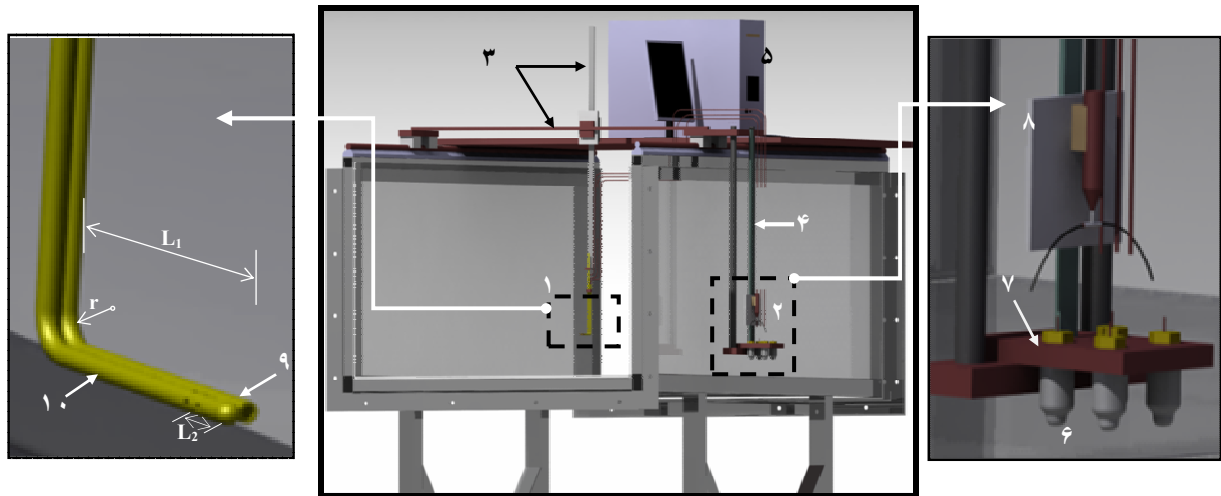
۳-۱- فلوم مستقیم

برای انجام تحقیق، فلوم آزمایشگاهی مستقیمی با مقطع مستطیلی با عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۷ متر با بستری از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۲۰ میلی‌متر و جدارهای شیشه‌ای با ضخامت ۱۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. شکل ۲ نمای سه‌بعدی فلوم مورد نظر را نشان می‌دهد. طول کل کانال برابر ۱۱ متر (بدون تبدیل‌های ابتدایی) بوده و در ورودی آن از تبدیل‌های کناری و تحتانی با طول ۲/۳۵ متر از مخزن بالادست به کانال اصلی استفاده شده است. به منظور استهلاک مناسب اغتشاشهای جریان ورودی به سیستم، عرض و عمق مخزن بالادست برابر ۲ متر انتخاب شده و منحنی‌های تبدیل مورد نظر بر اساس روابط ارائه شده توسط (Vittal and Chiranjeevi (1983

استخراج شده است. برای تأمین آب مورد نیاز از مخزن تحتانی با ظرفیت ۱۳ متر مکعب استفاده شده و مجموعه پمپ و الکتروموتور با حداکثر دبی اسمی ۸۵ لیتر بر ثانیه آب را از مخازن زیرین به مخزن بالادست پمپ می‌کنند. تنظیم عمق مورد نظر در طول کانال با استفاده از سیستم سرریز پروانه‌ای خودکار در انتهای کانال صورت می‌گیرد. در این سیستم، ارتفاع سرریز با دقت ۰/۵ میلی‌متر به صورت خودکار تنظیم و عمق مورد نظر به میدان اعمال می‌شود. شیب طولی کانال در طول آزمایش برابر مقدار ثابت ۰/۰۰۰۳۳ تنظیم شده و از دبی سنج الکترومغناطیسی با دقت ۰/۱٪ برای اندازه‌گیری دبی ورودی سیستم استفاده شده است.



شکل ۲ فلوم آزمایشگاهی و سیستم خودکار سرریز پروانه‌ای



شکل ۳ نمای سه بعدی پرآب آزمایشگاهی همراه ابزار کالیبره سازی و نحوه قرارگیری سنسورهای فشار

(۱) مجموعه پرآب‌ها و بست مخصوص (۲) مجموعه سنسورهای فشار و ابزار کالیبره سازی آنها (۳) خطکش دیجیتال و ریل عرضی با مقطع مستطیلی (۴) بازوی جانبی نگهدارنده سنسورهای فشار و ابزار کالیبره سازی آنها (۵) کامپیوتر و سیستم جمع‌آوری داده‌ها (۶) سنسورهای فشار (۷) صفحه نگهدارنده سنسورهای فشار (۸) ابزار کالیبره سازی سنسورها (۹) پورت فشار کل (۱۰) پورت فشار هیدرواستاتیک

Sutradi and Ching (2001) با بررسی تأثیر قطر لوله حسگر بر منحنی‌های کالیبره‌سازی لوله پرستون به این نتیجه رسیدند که اگر قطر بیرونی لوله فشار کل برابر $3/23$ میلی‌متر انتخاب شود، نتایج حاصل برای تنش برشی، بهترین همخوانی را با نتایج حاصل از روش پروفیل سرعت برداشت شده با ابزار LDA دارد. با توجه به نکات مزبور و نیز با توجه به لوله‌های موجود در بازار، از لوله برنجی با قطر بیرونی $3/1$ میلی‌متر و نسبت قطر داخلی به قطر بیرونی برابر $0/72$ استفاده شد. بر اساس توصیه‌های انجمن مهندسين مکانیک امریکا (ASME)، طول کل بازوی افقی (L_1)، 25 برابر قطر بیرونی (۸ سانتی‌متر)، فاصله اولین سوراخ پورت هیدرواستاتیک تا دماغه (L_2) 8 برابر قطر ($2/5$ سانتی‌متر)، و شعاع داخلی خم بین بازوی افقی و قائم (r) 3 برابر قطر (۱ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد (Braembussche, 2004). لوله‌های

۲-۳- جزئیات ساخت و نرم‌افزار کنترل حسگرها

ابزار ساخته شده برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر کانال شامل پنج قسمت اصلی زیر است: ۱- مجموعه لوله‌ها (حسگرها) و بست‌های نگهدارنده، ۲- خطکش دیجیتال و ریل عرضی، ۳- سنسورهای فشار، صفحه نگهدارنده سنسورها و بازوی جانبی، ۴- سیستم کالیبره‌سازی سنسورها و ۵- بخش جمع‌آوری داده‌ها و نرم‌افزار کنترل و پردازش اطلاعات. نمای سه‌بعدی و جزئیات ابزار ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. اصلی‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در این ابزار، حسگرها و سنسورهای فشار است. قطر پورت دینامیکی، ابعاد قسمتهای افقی و قائم لوله‌ها، شعاع خم لوله‌ها و نیز موقعیت سوراخ‌های پورت هیدرواستاتیک، جزو جزئیات اصلی حسگرها محسوب می‌شود. براساس توصیه محققان نسبت قطر داخلی (D_i) به قطر بیرونی (D_p) لوله‌ها باید از $0/6$ بیشتر باشد (Preston, 1954).

که با وجود تنظیم شیب طولی کانال برابر $0/00033$ ، به دلیل خطاهای نصب و نیز تغییر شکل‌های موضعی ناشی از وزن آب، شیب موضعی هر قطعه از کانال با شیب کلی کانال اندکی متفاوت است. از طرفی بر اساس تحقیقات (Knight (1984)، مقدار تنش برشی کف در کانال باز، به شیب خط انرژی و ضریب مقطع (نسبت عرض به عمق) وابسته است. لذا برای انجام محاسبات تنش برشی، تصمیم گرفته شد که به جای شیب سطح آب (S) از شیب خط انرژی (S_f) استفاده شود. بدین منظور در هر آزمایش، در سه نقطه از محدوده مورد نظر، عمق جریان، تراز کف نسبت به نقطه بالادست و نیز عرض سطح آب اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه $Z+H_0+u^2/2g$ انرژی جریان در هر مقطع محاسبه شده و با تقسیم اختلاف انرژی دو مقطع بر فاصله آنها، شیب خط انرژی قابل محاسبه شده است. در این رابطه، Z تراز کف کانال در هر نقطه، H_0 عمق جریان در اولین مقطع بالادست بازه و u سرعت متوسط جریان در هر مقطع (با توجه به تغییرات نسبی عرض مقاطع) است. مقادیر محاسباتی متوسط شیب خط انرژی برای حالت‌های مختلف جریان در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول، H عمق جریان ورودی، Q دبی جریان، B/H ضریب نمود مقطع و سایر پارامترها مانند تعریف‌های قبلی است.

اندازه‌گیری‌ها در محدوده کاملاً توسعه یافته جریان انجام شده است. بدین منظور، طول مورد نیاز برای توسعه یافتگی جریان (L) از رابطه زیر محاسبه شده (Kirkgoz and Ardiclioglu, 1997) و با در نظر گرفتن این نکته که به دلیل تشکیل پروفیل M_2 بر روی سرریز انتهایی، مقطع اندازه‌گیری باید کمترین تأثیر را از سرریز بپذیرد، در تمامی آزمایشها، مقطع عرضی مورد نظر، در فاصله ۸ متری از ورودی کانال انتخاب شده است:

فشار کل و فشار هیدرواستاتیک به صورت جانبی به یکدیگر متصل شده و از طریق یک بست مخصوص در بالای بازوی قائم که به صورت کاملاً خطوط جریانی طراحی و ساخته شده به یک خط‌کش دیجیتال با دقت جابه‌جایی قائم برابر $0/01$ میلی‌متر متصل شده است. حسگرهای فشار هیدرواستاتیک و فشار کل از طریق شیلنگ سیلیکون به سنسورهای فشار متصل می‌شوند. مهمترین قسمت ابزار، سنسورهای فشار است. در این تحقیق پس از بررسی دقیق در زمینه محدوده و دقت فشار مورد نیاز، از سنسور خازنی Keller-41X در محدوده ۳-۰ کیلو پاسکال، دقت $0/1$ پاسکال و پاسخ زمانی ۱۰ میلی‌ثانیه (فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز) استفاده شد. خروجی سنسورها از طریق مبدل A/D به کامپیوتر منتقل و از طریق برنامه‌ای در نرم‌افزار Labview، سیگنال‌های دریافتی از سنسورها پس از فیلتر کردن و حذف داده‌های خطادار، به فشار تبدیل شده و به عنوان ورودی بخش محاسباتی متکی بر روابط پاتل و معادلات ۷ و ۸ به صورت سری زمانی و متوسط متحرک تنش برشی در هر نقطه تبدیل و ذخیره می‌شوند.

۴- طراحی آزمایشها

همانطور که گفته شد، هدف از تحقیق حاضر، ساخت و صحت‌سنجی و به‌کارگیری ابزار با دقت بالا برای مطالعه توزیع تنش برشی جداره‌ها در حالت جریان یکنواخت با بستر صلب کانال باز است. بدین منظور در کانال مورد نظر، با ثابت نگاه داشتن شیب و از طریق سرریز انتهایی میدان، عمق‌های نرمال متناظر با دبی‌های مختلف را می‌توان به میدان اعمال کرد. جدول ۲ جزئیات هیدرولیکی آزمایشهای مختلف را نشان می‌دهد. نکته مهمی که در طول آزمایشهای اولیه روشن شد، آن است

۵- شبیه‌سازی عددی

بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته توسط محققان، به دلیل ناهمگنی تشنه‌های قائم رینولدز در نواحی نزدیک جداره‌های مجاری بسته و کانال‌های باز، علاوه بر مؤلفه اصلی جریان، جریان‌های ثانویه‌ای نیز در داخل مقطع تشکیل می‌شود. هر چند قدرت جریان‌های ثانویه ناشی از آشفتگی، کمتر از ۵٪ قدرت جریان اصلی است، اما به علت انتقال ممتد طولی جریان به سمت لایه‌های تحتانی توسط سلول‌های چرخشی، چنین جریان‌هایی نقش مهمی را در توزیع عرضی تنش برشی و انتقال رسوب در کانال‌ها ایفا می‌کنند (Nezu and Nakagawa, 1993). لذا شبیه‌سازی دقیق جریان و بررسی اندرکنش ساختار جریان داخل کانال و نحوه توزیع تنش برشی، نیازمند استفاده از مدل‌های مناسبی است که توانایی شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه را داشته باشند.

$$L = 76 - 0.0001 \frac{Re}{Fr} \quad (8)$$

اندازه‌گیری تنش برشی با اکثر روش‌های گفته شده، اغلب پر دردسر و بسیار وقت‌گیر است، به طوری که در ابزار ساخته شده، با توجه به دقت سنسورهای فشار باید کل طول شلنگ رابط بین پرآب‌ها و سنسورهای فشار، کاملاً خالی از حباب هوا باشد. بر اساس تجربیات حاصله، لازم است شلنگ‌ها در فواصل زمانی یک‌ساعته هواگیری شده و پس از کالیبره‌سازی سنسورها، اندازه‌گیری‌های جدید انجام شود. با توجه به مشکلات گفته شده، در تمامی آزمایش‌های جدول ۲، اندازه‌گیری سری زمانی تنش برشی وسط کانال (سری اول) انجام شده و تنها برای آزمایش U60 اندازه‌گیری توزیع عرضی تنش برشی در نقاطی به فواصل ۱ سانتی‌متری در عرض کانال (سری دوم) انجام شده است. هدف از آزمایش‌های گروه اول صحت‌سنجی ابزار و هدف از آزمایش‌های گروه دوم، بررسی دقیق توزیع عرضی تنش برشی بستر و تحلیل هیدرودینامیکی مسأله برای بررسی ارتباط ساختار جریان با نحوه توزیع عرضی تنش است.

جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی شرایط مختلف جریان یکنواخت در آزمایش‌های مورد نظر

Run	Q (m ³ /s)	H (m)	U(m/s)	B/H	S _f	R (m)	Re
U30	۰/۰۳	۰/۰۹۱	۰/۳۲۹	۱۰/۹۹	۰/۰۰۰۲۸۷	۰/۰۷۷	۳۰۰۰۰
U35	۰/۰۳۵	۰/۱۰۱	۰/۳۴۶	۹/۹۰۰	۰/۰۰۰۲۸۵	۰/۰۸۴	۳۵۰۰۰
U40	۰/۰۴۰	۰/۱۱۱	۰/۳۶۰	۹/۰۱۰	۰/۰۰۰۲۸۵	۰/۰۹۰	۴۰۰۰۰
U45	۰/۰۴۵	۰/۱۱۸	۰/۳۸۱	۸/۴۷۰	۰/۰۰۰۲۸۷	۰/۰۹۵	۴۵۰۰۰
U50	۰/۰۵۰	۰/۱۲۷	۰/۳۹۳	۷/۸۷۰	۰/۰۰۰۲۸۸	۰/۱۰۱	۵۰۰۰۰
U55	۰/۰۵۵	۰/۱۳۵	۰/۴۰۷	۷/۴۱۰	۰/۰۰۰۲۹۸	۰/۱۰۶	۵۵۰۰۰
U60	۰/۰۶۰	۰/۱۴۳	۰/۴۱۹	۶/۹۹۰	۰/۰۰۰۳۰۵	۰/۱۱۱	۶۰۰۰۰
U65	۰/۰۶۵	۰/۱۵۰	۰/۴۳۳	۶/۶۷۰	۰/۰۰۰۳۰۸	۰/۱۱۵	۶۵۰۰۰
U70	۰/۰۷۰	۰/۱۵۸	۰/۴۴۳	۶/۳۳۰	۰/۰۰۰۳۰۴	۰/۱۲۰	۷۰۰۰۰
U75	۰/۰۷۵	۰/۱۶۶	۰/۴۵۱	۶/۰۲۰	۰/۰۰۰۳۰۵	۰/۱۲۴	۷۵۰۰۰

لازم است ذکر شود که شبیه‌سازی عددی فقط برای آزمایش U60 انجام شده است. بدین منظور، هندسه کانال در نرم‌افزار گمیت^۱ تهیه شده و با توجه به مدل آشفتگی مورد استفاده و با رعایت ضوابط مربوط به فاصله اولین گره از دیواره (Safarzadeh et al., 2004)، شبکه‌بندی میدان با استفاده از ۱۵۰۰۰۰ گره محاسباتی انجام شده است. لازم است ذکر شود که مطالعات مربوط به عدم وابستگی حل به شبکه‌بندی میدان صورت گرفته و مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های با پروفیل‌های سرعت برداشت شده در مقطع توسعه یافته، نشان داد که استفاده از ۱۰۰۰۰۰ گره محاسباتی برای پیش‌بینی کامل میدان کافی نیست و از طرفی افزایش تعداد گره‌ها از ۱۵۰۰۰۰ به ۲۰۰۰۰۰ گره، تغییر چندانی در نتایج محاسبات ایجاد نمی‌کند. لذا تعداد ۱۵۰۰۰۰ گره برای شبیه‌سازی پدیده، کافی و مناسب تشخیص داده شد.

شرایط مرزی مورد استفاده به صورت سرعت ورودی در مرز ورودی بالادست میدان (دبی ورودی بر سطح مقطع جریان تقسیم شده و سرعت متوسط حاصل به عنوان سرعت ورودی به مدل معرفی شده است)، جریان توسعه یافته در خروجی میدان، مرز تقارن در سطح آب و مرز دیواره در کف و جداره‌ها است. در مورد شرط مرزی مورد استفاده برای سطح آب، همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، بحث سطح آزاد اهمیت خاصی داشته و این مطلب از دو جنبه قابل بررسی است:

الف: تغییرات آن در طول میدان و اثر موضعی آن ناشی از تغییرات عمق بر پارامترهای جریان
ب: شرط مرزی پارامترهای آشفتگی در سطح آب و اثر آن بر ساختار آشفتگی داخل جریان

بررسی مطالعات عددی در این زمینه که توسط محققانی مانند (Younis and Cokljat, 1995) گزارش شده، نشان می‌دهد که مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز به خوبی الگوی جریانهای چرخشی داخل مقطع کانالهای باز با مقطع مستطیلی و نیز مقاطع مرکب را مدل‌سازی می‌کند.

در این تحقیق، به منظور بررسی قابلیت ابزار ساخته شده و نیز تحلیل هیدرودینامیکی میدان، از نرم‌افزار هیدرودینامیک محاسباتی فلوئنت استفاده شده است. فلوئنت نوعی نرم‌افزار تحلیل سه‌بعدی جریان است که از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس در تحلیل جریان در حالت‌های لایه‌ای و آشسته با مدل‌های مختلف آشفتگی و نیز روش گردابه‌های بزرگ استفاده می‌کند. حل میدان جریان بر اساس انفصال معادلات به روش حجم محدود انجام شده و روش‌های مختلف انفصال جمله‌های انتقال معادلات توسط کاربر قابل انتخاب است. در این تحقیق از نسخه ۶/۳/۲۶ این نرم‌افزار استفاده شده است. برای مدل‌سازی دقیق جریان سه‌بعدی با قابلیت مدل‌سازی جریانهای ثانویه ناشی از آشفتگی، مدل‌سازی تنش‌های رینولدز با استفاده از مدل آشفتگی هفت معادله‌ای RSM انجام شده است. در این مدل، شکل تانسوری معادلات انتقال تنشهای رینولدز به صورت زیر است (Fluent Inc., 1993):

$$u_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

که در آن P_{ij} تانسور تولید، Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش، D_{ij} تانسور پخش‌شدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف است. کاربرد این مدل به دلیل پیچیدگی معادلات ریاضی بسیار پرهزینه است، اما دقت بسیار بالایی در حل مسائل پیچیده هیدرودینامیکی، به‌ویژه در میدانهای جریان با آشفتگی ناهمگن و غیر ایزوتروپ نظیر جریانهای ثانویه ناشی از آشفتگی از خود نشان داده است (Younis and Cokljat, 1995).

برای برقراری ارتباط بین نواحی نزدیک دیواره و داخل میدان، از تابع دیواره استاندارد استفاده و حل میدان جریان تا رسیدن مقادیر باقیمانده‌های بدون بعد حل سیستم معادلات به مقدار 10^{-5} ادامه داده شده است. برای شبیه‌سازی از کامپیوتر چهار هسته‌ای (Core 2 Quad) با قدرت پردازش $2/4$ گیگا هرتز استفاده شده و به دلیل پردازش موازی، زمان اجرا کمتر از ۲ ساعت است.

۶- ارائه نتایج

در این بخش به منظور صحت‌سنجی ابزار ساخته شده و نیز بررسی نحوه توزیع عرضی تنش برشی در جریان یکنواخت کانال باز، روند تغییرات مقدار متوسط تنش برشی خط مرکزی کانال، نحوه توزیع عرضی تنش برشی، سهم تنش برشی کف و جداره از تنش کل در طی آزمایش‌های مختلف تعیین و با نتایج مدل‌های تحلیلی موجود و نیز شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. برای صحت‌سنجی ابزار، از داده‌های آزمایش‌های گروه اول برای مقادیر تنش برشی در خط میانی کانال استفاده شده و در ادامه، توزیع عرضی تنش با استفاده از داده‌های آزمایش گروه دوم بحث شده است.

۶-۱- روند تغییرات مقدار متوسط تنش برشی

خط مرکزی نسبت به ضریب نمود مقطع

همانطور که در بخش ۴ گفته شد، Knight et al. (1984) پارامترهای مؤثر بر تنش برشی کف را شیب خط انرژی و ضریب نمود مقطع معرفی کرده است. اگرچه تحقیقات بعدی نشان داد که علاوه بر این دو پارامتر، عوامل دیگری مانند ساختار جریانهای ثانویه نیز مؤثرند می باشند (Guo and Julien, 2005)؛ اما با توجه به اینکه در کانال باز عریض، سلول‌های جریان ثانویه اغلب به کناره‌های

در مورد بخش "الف" با توجه به اینکه تغییرات سطح آب در طول میدان بسیار ناچیز بوده و جریان یکنواخت با شیب طولی ثابت در میدان حاکم است، در عمل نیازی به مدل‌سازی روند تغییرات سطح آب و نقش آن بر روی پارامترهای میدان جریان وجود ندارد (Rodi, 1978). در مورد حالت "ب" باید توجه داشت که از دیدگاه ساختار آشفتگی، به خلاف مجاری بسته، سطح آزاد در کانال‌های باز، باعث محدود شدن جابه‌جایی قائم گردابه‌های آشفتگی شده و علاوه بر آن، امواج سطحی ایجاد شده در کانال باز، ساختار آشفتگی جریان را در نزدیکی سطح آب تحت تأثیر قرار می‌دهد. (Nezu and Rodi, 1986) با بررسی تأثیر عدد فرود جریان بر ساختار آشفتگی و به‌ویژه ساختار جریان در نزدیک سطح آب، عنوان کرده‌اند که شدت‌های آشفتگی و نیز تنش‌های رینولدز، فقط در حالتی که جریان به سمت بحرانی متمایل باشد ($Fr > 1$) از توزیع عمومی فاصله گرفته و اثر سطح آزاد نظیر امواج سطحی اهمیت پیدا می‌کنند. اندازه‌گیری‌های دقیق صورت گرفته توسط محققانی مانند Hunt (1984) نشان داد که تأثیر سطح آزاد بر ساختار آشفتگی، به ناحیه نزدیک سطح آب ($0.9 < z/h < 1.0$) محدود است.

در تحقیقی که توسط Shi et al. (2000) در زمینه بررسی تأثیر سطح آزاد بر ساختار آشفتگی جریان در کانال باز برای محدوده‌های بالای عدد رینولدز و عدد فرود انجام شده، به این نکته اشاره شده که نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش گردابه‌های بزرگ و با در نظر گرفتن تغییرات سطح آب، تفاوت چندانی با نتایج مدل‌سازی‌های قبلی با فرض سطح آب ثابت ندارد. لذا با توجه به موارد بالا، در شبیه‌سازی مورد نظر می‌توان از شرط مرزی تقارن برای سطح آب با اطمینان کامل استفاده کرد.

توجه به شکل مزبور، روند تغییرات تنش برشی خط مرکزی نسبت به ضریب نمود مقطع، انطباق بسیار خوبی با معادله ۱۰ دارد. از نظر مقداری، نتایج اندازه‌گیری‌ها، برای ضریب نمود بزرگ، بیشتر از نتایج گزارش شده توسط Knight et al. (1984) است. در مجموع، اختلاف متوسط نتایج اندازه‌گیری نسبت به رابطه ۱۰، حدود ۶/۷۴ درصد، حداکثر اختلاف برابر ۹/۳٪ و حداقل آن برابر ۰/۵۴٪ است.

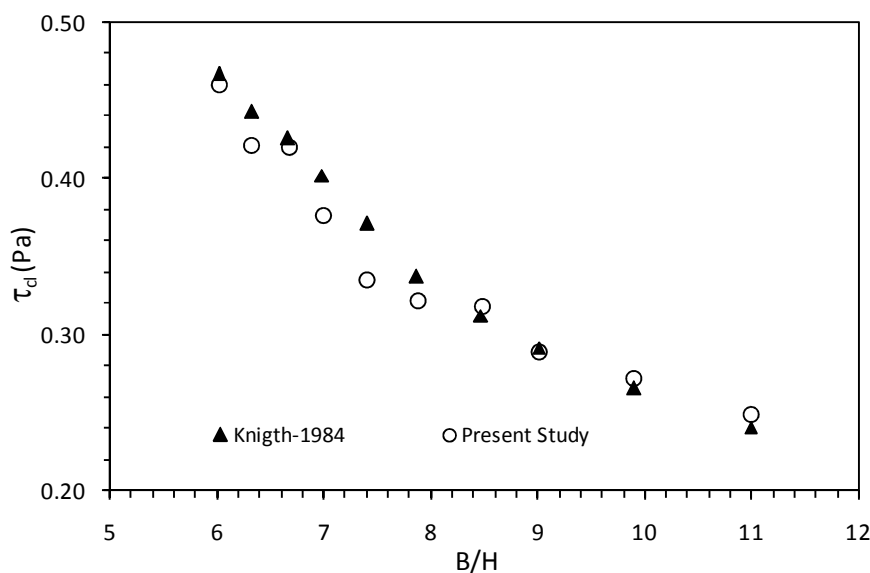
۶-۲- توزیع عرضی تنش برشی بستر

سری زمانی تغییرات تنش برشی در نقاط مختلف عرضی کانال، به فواصل ۱ سانتی‌متری از هم در آزمایش U60 اندازه‌گیری شده و پروفیل عرضی حاصل از مقادیر متوسط تنش برشی هر نقطه همراه با نتایج مدل‌سازی عددی در شکل ۵- الف ارائه شده است.

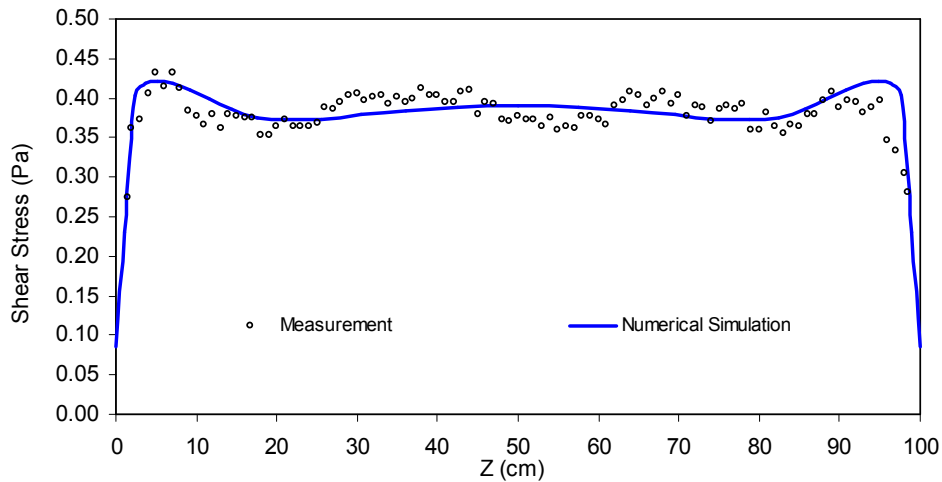
مقطع محدود بوده و تأثیر چندانی بر ساختار جریان خط میانی ندارند، برای بررسی ارتباط تنش برشی میانه کانال با مشخصات هیدرولیکی و هندسی میدان، رابطه Knight et al. (1984) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{\bar{\tau}_{cl}}{\rho g H S_f} = 1.025 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{B}{3H}\right)^{0.85}\right) \right] \quad (10)$$

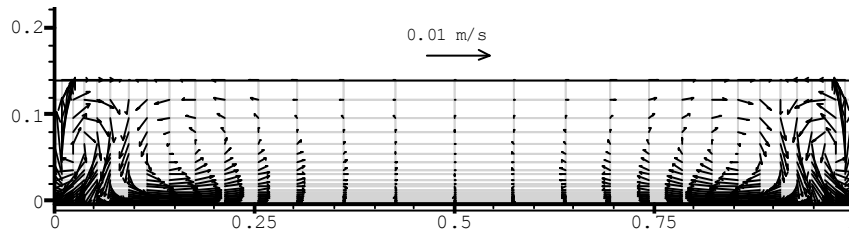
که در آن، $\bar{\tau}_{cl}$ مقدار متوسط تنش برشی خط مرکزی و سایر پارامترها مانند قبل است. مقدار تنش برشی خط مرکزی کانال در مقطع عرضی $X=8m$ برای تمامی آزمایشهای جدول ۲، از روی سری‌های زمانی ثبت شده، محاسبه شده و روند تغییرات آن نسبت به ضریب نمود مقطع در شکل ۴ نشان داده شده است. برای بررسی صحت نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های، مقدار تنش برشی خط میانی گروه آزمایشهای مزبور از معادله ۱۰ نیز محاسبه شده و همراه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی با استفاده از ابزار سوزنی نشان داده شده است.



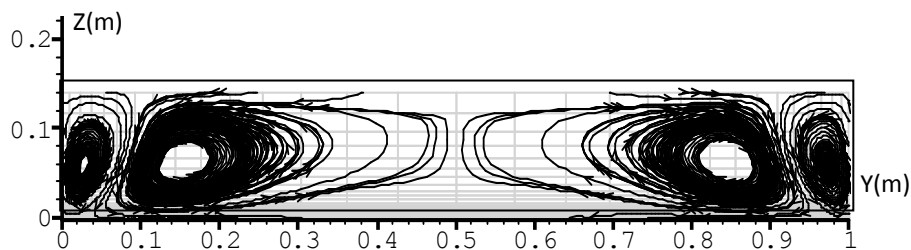
شکل ۴ روند تغییرات تنش برشی خط مرکزی کانال نسبت به ضریب نمود مقطع و مقایسه با نتایج نایت و همکاران (۱۹۸۴)



(الف)



(ب)



شکل ۵ توزیع عرضی تنش برشی بستر و ارتباط آن با ساختار سه بعدی جریان در جریان یکنواخت کانال باز (الف) مقایسه توزیع تنش برشی اندازه گیری شده و محاسبه شده، (ب) بردارهای جریان ثانویه، (ج) خطوط جریان

است، به طوری که متوسط اختلاف مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده برابر ۶/۶ درصد است. نکته دیگری که در داده های اندازه گیری شده در این شکل مشهود است، رفتار نوسانی توزیع تنش در نواحی میانی کانال است. این پدیده با نواحی متناوب کم سرعت-پرسرعت در نزدیکی

لازم است ذکر شود که اولین نقطه اندازه گیری از طرف جداره های کناری با توجه به ابعاد دستگاه، در فاصله ۱/۵ سانتی متری از دیواره ها قرار دارد. با توجه به شکل مزبور، انطباق نتایج حاصل از اندازه گیری با ابزار ساخته شده و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی بسیار خوب

رخداد حداکثر در نزدیکی دیواره‌ها، ناشی از تشکیل دو سلول جریان ثانویه با جهت‌های چرخش مخالف در کنار هر یک از دیواره‌های جانبی است. الگوی بردارهای جریان ثانویه و سلول‌های چرخشی مربوط، حاصل از شبیه‌سازی عددی، در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج ارائه شده است. با توجه به شکل‌های مزبور، سلول‌های چرخشی جریان ثانویه در فاصله‌ای در حدود ۷ سانتی‌متری از جدارها با یکدیگر برخورد کرده و نوعی جریان روبه پایین قوی در محل تلاقی آنها شکل می‌گیرد. علاوه بر مؤلفه شدید قائم ایجاد شده در محل تلاقی سلول‌ها، مؤلفه عرضی جریان‌های ثانویه مزبور در نزدیکی کف نیز شدید بوده و باعث انتقال هسته پرسرعت جریان به سمت لایه‌های زیرین و در نتیجه تشدید گرادیان قائم سرعت و افزایش تنش برشی کف می‌شوند. با توجه به نتایج حاصل از این بخش، ارتباط متقابل ساختار جریان داخل میدان و توزیع تنش برشی بستر کاملاً آشکار است.

۶-۳- بررسی نسبت متوسط تنش برشی کف و جدارها به تنش برشی کل مقطع

تعیین سهم تنش بستر و جدارها از تنش برشی کل اعمالی به پیرامون تر شده مقطع، در مطالعات هیدرولیک کانال باز، مباحث انتقال رسوب و بررسی پایداری جداره‌های رودخانه کاربرد داشته و بدین منظور محققان مختلف، بر اساس ایده‌ها و روشهای مختلف، میزان مشارکت بستر و جداره‌های کانال را مطالعه و روابط مختلفی را ارائه کرده‌اند. براساس بررسی‌های Khodashenas et al. (2008)، از بین شش روش مختلف تعیین سهم تنش بستر از تنش کل در کانال باز با مقطع مستطیلی و بستر صاف، روش اصلاح شده Guo and Julien (2005) انطباق بهتری را نسبت به سایر روشها با نتایج آزمایشگاهی دارد. (Guo and Julien (2005) با

بستر ارتباط دارد. این نکته در اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط محققان قبلی به دلیل فاصله زیاد نقاط اندازه‌گیری، گزارش نشده و در این تحقیق برای اولین بار به دلیل استفاده از سنسورهای فشار بسیار دقیق و نیز تعداد بیشتر نقاط اندازه‌گیری در عرض به دست آمده است. لازم است ذکر شود که وجود نواحی متناوب کم سرعت-پر سرعت و نقش آن در نحوه توزیع عرضی تنش برشی بستر توسط محققانی مانند Albeirak (2008) نیز با استفاده از ابزار اندازه‌گیری ADVP گزارش شده است. ایشان به ارتباط مستقیم توزیع سرعت مزبور با ساختار نوسانی تنش برشی بستر اشاره کرده است. پیش‌بینی عددی ساختار نوسانی ذکر شده، نیازمند استفاده از روشهای شبیه‌سازی نظیر گردابه‌های بزرگ مقیاس^۲ یا روش شبیه‌سازی مستقیم^۳ است.

عدم تقارن در توزیع عرضی تنش برشی در نتایج اندازه‌گیری‌ها (به‌ویژه در نواحی نزدیک به جداره‌ها) دیده می‌شود که این پدیده توسط محققان قبلی مانند، Knight (1984) نیز گزارش شده است.

از نظر کمی، حداکثر مقدار تنش برشی در کف کانال، در موقعیت $0/07B$ نزدیک به دیواره‌های جانبی اتفاق می‌افتد. پس از نقطه حداکثر، به سمت خط میانی کانال، مقدار تنش برشی با روند مشخصی کاهش پیدا کرده و در محدوده $0/25B$ بار دیگر روند افزایشی به خود می‌گیرد. نتایج مدل عددی، حفظ روند افزایشی را تا خط مرکزی کانال نشان می‌دهد، در حالی که نتایج حاصل از شبیه‌سازی، کاهش مجدد تنش برشی را در محدوده $0/45B$ تا $0/65B$ نشان می‌دهد.

2. LES
3. DNS

که در آنها، P_w و P_b به ترتیب پیرامون تر شده بستر و دیواره‌های جانبی است.

در این تحقیق، برای نتایج آزمایش U60، مقدار متوسط تنش برشی بستر و جداره از روی داده‌های اندازه‌گیری شده و با استفاده از روابط زیر محاسبه شده است:

$$\bar{\tau}_b = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\tau_i + \tau_{i+1}}{2} \right) \times (Y_{i+1} - Y_i)}{B} \quad (18)$$

$$\bar{\tau}_w = \frac{(\rho g H S - \bar{\tau}_b B)}{2H} \quad (19)$$

نتیجه محاسبات مبتنی بر مقادیر آزمایشگاهی، دو مدل تحلیلی و نیز مدل Knight and Sterling (2000) برای سهم تنش برشی بستر و کناره‌ها به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳، نسبت حاصل از اندازه‌گیری تحقیق حاضر بسیار نزدیک به نسبت حاصل از رابطه Knight and Sterling (2000) بوده و در مدل تحلیلی Guo and Julien (2005) با اعمال تأثیر جریان ثانویه، نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی کل کاهش یافته و به مقدار اندازه‌گیری شده تحقیق حاضر نزدیک‌تر می‌شود.

Guo and Julien (2005) نشان دادند که اعمال تأثیر جریان ثانویه در معادلات مربوط به نسبت تنش‌ها (هر دو ناحیه بستر و کناره) باعث بهبود نتایج پیش‌بینی نسبت به نتایج آزمایشگاهی می‌شود.

با حذف اثر این پارامتر، مقادیر پیش‌بینی شده تنش برشی جداره کمتر از مقادیر آزمایشگاهی بوده (جدول ۴) و نکته مهمتر این است که تأثیر آن بر کناره‌ها بسیار بیشتر از کف است، به طوری که متوسط خطای مدل اول (بدون در نظر گرفتن جریان ثانویه) نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برای بستر برابر ۵/۶٪ (دست بالا) و برای جداره‌ها ۱۷٪ (دست پایین) است.

استفاده از روش نگاشت همدیس و حل معادلات دوبعدی جریان آشفته یکنواخت، سه جمله نقل، جریان ثانویه و برش مبادله شده در مرز فرضی بین نواحی تحت تأثیر بستر و کف را مهمترین پارامترهای مؤثر بر نسبت مقدار متوسط تنش برشی بستر ($\bar{\tau}_b$) و کناره‌ها ($\bar{\tau}_w$) به تنش برشی کل ($\rho g H S$) معرفی کرده‌اند. این محققان روابط زیر را برای تعیین میزان سهم تنش برشی کف و کناره‌ها از تنش برشی کل ارائه کرده‌اند:

با صرف نظر کردن از اثر جریان ثانویه و فرض لزجت گردابه ای هموزن (مدل تحلیلی اول) داریم:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = \frac{4}{\pi H} \int_0^h \left(\tan^{-1} \exp\left(-\frac{\pi y}{B}\right) \right) dy \quad (11)$$

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H S} = \frac{B}{2H} \left(1 - \frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} \right) \quad (12)$$

با اعمال اثر جریان ثانویه و فرض لزجت گردابه‌ای غیر هموزن (مدل اصلاح شده) داریم:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = \frac{4}{\pi} \left(\tan^{-1} \exp\left(-\frac{\pi H}{B}\right) \right) + \frac{\pi H}{4 B} \exp\left(-\frac{\pi y}{B}\right) \quad (13)$$

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H S} = \frac{B}{2H} \left(1 - \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \exp\left(-\frac{\pi H}{B}\right) - \frac{\pi H}{4 B} \exp\left(-\frac{H}{B}\right) \right) \quad (14)$$

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، روابط زیر بر اساس درصد نیروی برشی اعمالی بر جداره‌ها ($\%SF_w$)، برای توصیف نسبت متوسط تنش برشی بستر و جداره‌ها به تنش کل مقطع ارائه شده است (Knight and Sterling, 2000):

$$\%SF_w = C_{cf} \exp \left[-3.23 \log \left(\frac{P_b}{P_w C_2} + 1 \right) + 4.6052 \right] \quad (15)$$

$$C_2 = 1.50, \quad C_{cf} = 1 \text{ for } \frac{P_b}{P_w} < 6.546,$$

$$C_{cf} = 0.5875 \left(\frac{P_b}{P_w} \right)^{0.28471} \text{ for } \frac{P_b}{P_w} > 6.546$$

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H S} = 0.01 \%SF_w * \frac{P_b}{P_w} \quad (16)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = 1 - 0.01 \%SF_w \quad (17)$$

جدول ۳ نسبت تنش برشی کف به تنش کل پیرامون تر شده در آزمایش U60

مدل نایت (۲۰۰۰)	مدل اصلاح شده	مدل تحلیلی اول	اندازه‌گیری تحقیق حاضر		
			$\bar{\tau}_b$	ρgHS	$\left(\frac{\bar{\tau}_b}{\rho gHS}\right)_{exp}$
$\left(\frac{\bar{\tau}_b}{\rho gHS}\right)_3$	$\left(\frac{\bar{\tau}_b}{\rho gHS}\right)_2$	$\left(\frac{\bar{\tau}_b}{\rho gHS}\right)_1$	0.379	0.462	0.82
0.81	0.80	0.84			

جدول ۴ نسبت تنش برشی کناره به تنش کل پیرامون تر شده در آزمایش U60

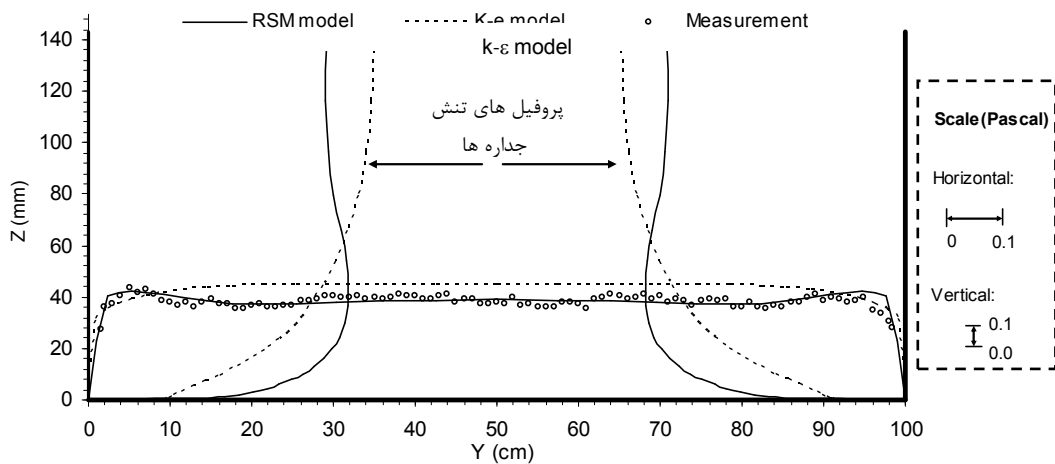
مدل نایت (۲۰۰۰)	مدل اصلاح شده	مدل تحلیلی اول	اندازه‌گیری تحقیق حاضر		
			$\bar{\tau}_w$	ρgHS	$\left(\frac{\bar{\tau}_w}{\rho gHS}\right)_{exp}$
$\left(\frac{\bar{\tau}_w}{\rho gHS}\right)_3$	$\left(\frac{\bar{\tau}_w}{\rho gHS}\right)_2$	$\left(\frac{\bar{\tau}_w}{\rho gHS}\right)_1$	0.29	0.462	0.62
0.64	0.67	0.56			

آزمایشگاهی و مدل تنش رینولدز است و ۲- حداکثر مقدار تنش برشی دیواره با استفاده از مدل تنش رینولدز از سطح آب دور شده و در ۴ سانتی‌متری بستر (0.28 H) اتفاق می‌افتد. نسبت مقادیر متوسط تنش برشی بستر و تنش دیواره‌ها به تنش برشی کل برای دو مدل آشفتگی مورد نظر محاسبه شده و همراه با نتایج آزمایشگاهی در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به جدول مزبور، تأثیر اعمال جریان ثانویه در بهبود نتایج شبیه‌سازی عددی (در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی) به‌خوبی دیده می‌شود، مشابه مدل تحلیلی (Guo and Julien (2005)، با اعمال اثر جریان ثانویه، نسبت تنش بستر به تنش کل کاهش یافته و در مقابل، نسبت تنش جداره به تنش کل افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که نسبت تنش برشی بستر به اندازه ۲ درصد کاهش یافته، اما نسبت تنش برشی جداره به اندازه ۱۱ درصد افزایش می‌یابد و این نکته به‌خوبی نشانگر تأثیر بیشتر جریان ثانویه بر توزیع تنش جداره نسبت به تنش کف است.

برای بررسی هیدرودینامیکی این نکته، شبیه‌سازی عددی مسأله در دو حالت اعمال و حذف اثر جریان ثانویه بر شکل‌گیری میدان جریان صورت گرفت. بدین منظور از دو مدل آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ و مدل تنش رینولدز (RSM) استفاده شد. مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ به‌دلیل فرض لزجت گردابه‌ای ایزوتروپ، توانایی شبیه‌سازی جریانهای ثانویه ناشی از آشفتگی را ندارد (Wilcox, 1994)، اما همان‌طورکه در بخش ۶-۲ نشان داده شد، مدل تنش رینولدز ساختار جریانهای ثانویه داخل مقطع را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند.

لازم است ذکر شود که تمامی شرایط شبیه‌سازی شامل شبکه‌بندی، شرایط مرزی و سایر تنظیمات مدل در هر دو حالت یکسان است. نتایج شبیه‌سازی‌ها همراه با نتایج آزمایشگاهی به‌صورت توزیع عرضی تنش بستر و توزیع قائم تنش جداره‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. دو نکته روشن در این شکل وجود دارد: ۱- مقادیر تنش برشی بستر در حالت مدل دو معادله‌ای بزرگتر از نتایج



شکل ۶ نحوه توزیع تنشهای برشی عرضی و عمقی تنشهای برشی بستر و کناره‌ها با استفاده از دو مدل آشفتگی k-ε و RSM

جدول ۵ نسبت تنش برشی کف و جداره به تنش کل در آزمایش U60 با استفاده از مدل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی

تنش برشی دیواره		تنش برشی بستر		پارامتر روش
$\left(\frac{\overline{\tau_w}}{\rho g H S}\right)$	$\overline{\tau_w}$	$\left(\frac{\overline{\tau_b}}{\rho g H S}\right)$	$\overline{\tau_b}$	
0.560	0.286	0.840	0.428	مدل آشفتگی k-ε (بدون جریان ثانویه)
0.620	0.289	0.820	0.380	مدل آشفتگی RSM (با جریان ثانویه)
0.620	0.290	0.820	0.379	نتایج آزمایشگاهی

شبيه‌سازی عددی نرم‌افزار فلوئنت مقایسه شد. ابزار مزبور به دلیل استفاده از سنسورهایی با دقت بالا و نیز فرکانس نمونه‌برداری مناسب، ضمن اندازه‌گیری دقیق پارامترهای مزبور، روند توزیع عرضی تنش بستر را به خوبی مشخص کرد؛ به طوری که در نواحی نزدیک به جداره‌های جانبی، به علت تأثیر جریان ثانویه، مقدار و محل حداکثر تنش برشی اندازه‌گیری شده در این ناحیه توسط حسگر سوزنی، همخوانی بسیار خوبی را با نتایج مدل عددی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری و مقایسه آن با شبيه‌سازی عددی در تحقیق حاضر، مشخص شد که تأثیر جریانهای ثانویه بر تنش دیواره‌های جانبی بسیار بیشتر از تنش کف کانال است. به علاوه به دلیل

علت این پدیده را می‌توان با توجه به شکل ۵-ب چنین تحلیل کرد که دیواره‌های کانال در کل عمق جریان، تحت تأثیر سلول‌های جریان ثانویه قرار دارند؛ در حالی که نواحی از بستر که تحت تأثیر جریان ثانویه است، فقط محدود به گوشه‌های مقطع بوده و قسمتهای زیادی از نواحی مرکزی بستر، تأثیر چندانی از جریان ثانویه نمی‌گیرند.

۷- نتیجه‌گیری

با ساخت ابزار دقیق اندازه‌گیری تنش برشی، مقدار تنش برشی خط مرکزی بستر و نیز توزیع عرضی تنش برشی بستر تعیین شده و با نتایج مدل‌های تحلیلی و نتایج

R	شعاع هیدرولیکی	وجود نواحی متناوب کم سرعت-پر سرعت در نزدیکی
Re	عدد رینولدز	بستر، تنش برشی در نواحی میانی کانال توزیع نوسانی
S	شیب طولی سطح آب	دارد. به دلیل استفاده از مدل آشفتگی متوسط زمانی،
S _f	شیب خط انرژی	پیش‌بینی ساختار نوسانی با این روش امکان‌پذیر نیست،
%SF _w	درصد سهم بستر از تنش کل مقطع	اما داده‌های برداشت شده، مرجع مناسبی برای
U	سرعت متوسط جریان	صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی در آینده با روشهایی
u*	سرعت برشی بستر	مانند گردابه‌های بزرگ محسوب می‌شود.
X	امتداد طولی	
X*	پارامتری بعد تنش موضعی در رابطه پاتل	
Y	امتداد عرضی	
Z	امتداد قائم	
Z*	پارامتری بعد فشار هیدرودینامیکی در رابطه پاتل	
Z ⁺	مقیاس مشخصه طول در ناحیه داخلی لایه مرزی	
ΔP	فشار هیدرودینامیک موضعی	
Φ _{ij}	تانسور فشار-گرانش	
α	ضریب مومتم	
ε _{ij}	تانسور اتلاف	
η	تابع بیانگر شکل مقطع عرضی کانال	
κ	ثابت فن-کارمن	
ν	لزجت سینماتیکی سیال	
ρ	چگالی سیال	
τ ₀	تنش برشی بستر	
$\frac{\tau_{cl}}{\tau_b}$	تنش برشی در خط میانی بستر	
$\frac{\tau_b}{\tau_w}$	مقدار میانگین تنش برشی بستر	
$\frac{\tau_w}{\tau_w}$	مقدار میانگین تنش برشی جداره کناری	

۹- فهرست علائم

A	ضریب توزیع لگاریتمی سرعت
B	مقدار ثابت در معادله توزیع لگاریتمی سرعت
B/H	ضریب نمود مقطع
C	ضریب شزی
C ₂	ضریب معادله
C _{cf}	ضریب معادله
D ⁺	قطر بیرونی بی بعد شده لوله حسگر
D _i	قطر داخلی لوله حسگر
D _{ij}	تانسور پخش
DNS	شبیه‌سازی عددی مستقیم
D _p	قطر بیرونی لوله حسگر
f	ضریب اصطکاک داریسی- وایسباخ
Fr	عدد فرود
g	شتاب ثقل
H ₀	عمق جریان
K	زبری نسبی
k	انرژی جنبشی آشفتگی
k _s	ارتفاع معادل زبری بستر
L	طول توسعه یافتگی جریان
LES	سازشبه‌سازی گردابه‌های بزرگ
N	میزان نایکنواختی پروفیل و پلان کانال
n	ضریب مانینگ
P _b	پیرامون تر شده بستر
P _{ij}	تانسور تولید
P _w	پیرامون تر شده دیواره‌های جانبی
Q	دبی جریان

۱۰- منابع

- Ackerman, J., D. and Hoover, T., M. (2001). "Measurement of local bed shear stress in streams using a preston- static tube", *Limon. Oceanogr.* 46(8), pp. 2080-2087.
- Albeirak, I. (2008). "An experimental study of coherent structures, secondary currents and surface boils and their interrelation in open-channel flow", PhD thesis, EPFL, Swiss.
- Battsworth, D., R., Elston, S., J. and Jones T. V. (2000). "Skin friction measurement on reflective surfaces using nematic liquid crystal", *Exp. Fluids*, 28(1), pp. 64-73.

- Rodi, W. and Leschziner A. (1978). "Calculation of strongly curved open channel flow", *J. of the Hydraulic Div.*, 105(HY10) pp. 1297-1314.
- Patel, V., C. (1965). "Calibration of the preston tube and limitations on its use in pressure gradient", *J. Fluid Mech.*, 23(1), pp. 185-208.
- Preston, J., H. (1954). "The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes", *J. the Royal Aeronautical Society*, 58(3) pp. 55-70.
- Rouse, H. (1965). "Critical analysis of open channel resistance", *J. of the Hydraulic Div.* 91(HY4), pp. 1-25.
- Roussinova, V., Biswas, N. and Balachandar, R. (2008). "Revisiting turbulence in smooth uniform open channel", *J. Hydraulic Res.*, 46(1), pp. 36-48.
- Safarzadeh, A., Salehi Neyshabouri, S.A.A. and Barkdoll, B. (2004). "3D numerical investigation of turbulent flow through lateral intake in open channel", *Proc. CFD2004 Conf.*, Ottawa, Canada.
- Shi, J., Thomas, T., G. and Williams, J.J.R. (2000). "Free surface effects in open channel flow at moderate Froude and Reynolds numbers", *J. Hydraulic Res.*, 38(6), pp. 465-473.
- Sutradi and Ching, C., Y. (2001). "Effect of tube diameter on preston tube calibration curves for the measurement of wall shear stress", *Exper. Therm. Fluid Scie.*, 24(4), pp. 93-97
- Vittal N. and Chiranjeevi, V. (1983). "Open channel transitions: rational method of design", *J. Hydraulic Eng.*, 109(1), pp. 99-115.
- Wilcock, P. R., (1996). "Estimating local bed shear stress from velocity observations", *Water Resource Res.* 32(4), pp. 3361-3366.
- Wilcox, D., C. (1994). "Simulation of transition with a two-equation turbulence model", *AIAA J.*, 32(2), pp. 247-255.
- Winter, K. G. (1977). "An outline of the techniques available for the measurement of skin friction in turbulent boundary layer", *Prog. Aerospace Sci.* 18(5), pp. 2080-2087.
- Younis, B. A. and Cokljat, D. (1995). "Second-Order closure study of open-channel flows", *J. Hydraulic Eng.*, 121(2), pp. 94-107.
- Braembussche, R. A. (2004). "Pressure measurements; Introduction to measurement techniques", *Technical Rep.*, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium.
- Chow, V., T. (1959). "Open channel hydraulics." McGraw-Hill.
- Fernholz, H., H., Janke, G., Schober, M., Wanger, P., M., and Warnack D. (1996). "New developments and applications of skin friction measuring techniques", *Meas. Sci. Technol.* 7, pp. 1396-1409.
- Fluent Inc. (1993). "FLUENT user's guide", Fluent, New Hampshire.
- Guo, J. and Julien, P., Y. (2005). "Shear stress in smooth rectangular open-channel flows", *J. Hydraulic Eng.*, 131(1), pp. 30-37.
- Haritionidis J., H. (1989). "The measurement of wall shear stress", *Advances in Fluid Mechanics Measurements*, Springer, 23(2), pp. 229-261.
- Khatua, K., K. and Patra, K., C. (2007). "Boundary shear stress distribution in meandering compound channel flow", *Proc. 5th Australian Stream Management Conference*, Thurgoona, New South Wales.
- Khodashenas, S., R., Abderrazzak, K., E., K., and Paquier, A. (2008). "Boundary shear stress in open channel flow: a comparison among six methods", *J. Hydraulic Res.*, 46(5), pp. 598-609.
- Kirkgoz, M. and Ardicioglu, M. (1997). "Velocity profiles of developing and developed open channel flows", *J. Hydraulic Eng.*, 123(12), pp. 1099-1105.
- Knight, D. W., Demetriou, J., D., and Homed, M., E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels", *J. Hydraulic Eng.*, 110(4), pp. 405-422.
- Knight, D.W. and Sterling, M. (2000). "Boundary shear in circular pipes running partially full", *J. Hydraulic Eng.*, 126(4), pp. 263-275.
- Mohammadi, M., A. (2008). "Boundary shear stress around piers", *American J. Applied Science*, 5(11), pp. 1547-1551.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in open channel flows", *Balkema Publisher*, Rotterdam, Netherlands.