

مطالعه توزیع تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای با استفاده از پرستون سه لوله

اکبر صفرزاده^{۱*}، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

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

* اردبیل، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی

Safarzadeh@uma.ac.ir

چکیده- در تحقیق حاضر ضمن مرور روش‌های موجود، ابزاری کارآمد به نام ابزار سه لوله با فرکانس اندازه‌گیری ۸۵ هرتز، برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای طراحی و ساخته شده است. مزیت اصلی این روش نیاز نداشتن به استقرار حسگر در امتداد جریان موضعی است. این ابزار برای اندازه‌گیری توزیع دقیق تنش برشی بستر پیرامون تک آبشکن مستقیم در بستر تخت و صلب استفاده شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تحقیقات موجود مقایسه شده است. بیشینه تشدید تنش برشی موضعی بستر در محدودهٔ دماغه، الگوی توزیع در امتداد بخش بیرونی لایهٔ برشی، نحوهٔ توزیع و میزان تشدید تنش عمومی در مجرای اصلی کانال و همچنین محدوده شروع آبستتگی در جریان نزدیک شوندهٔ ناشی از تشدید عمومی تنش برشی، همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود و همچنین شبیه‌سازی‌های دقیق عددی دارد.

کلیدواژگان: تنش برشی بستر، ابزار سه لوله‌ای، مبدل فشار، آبشکن، لایه برشی.

۱- مقدمه

دیواره است که به سه روش مختلف تقسیم میشود. در روش سیم داغ و فیلم داغ، یک المان کوچک با حساسیت دمایی بالا در نزدیکی بستر نصب می‌شود و اساس کار بر تناسب تنش برشی بستر و انتقال حرارت استوار است. این روش با وجود داشتن سازوکاری نسبتاً ساده و پاسخ زمانی مناسب برای ثبت نوسانهای تنش برشی ناشی از جریان آشفته موضعی، به علت شکنندگی سنسور و مشکلات کالیبره‌سازی، محدودیت دارد. در حالتی که نقطه اندازه‌گیری ثابت بوده و هدف، بررسی تغییرات زمانی تنش با دقت و فرکانس بالا در نقاط خاص مانند

در مطالعات هیدرودینامیک رودخانه‌ها، تعیین تنش برشی بستر با استفاده از روش‌ها و ابزارهای مختلفی صورت می‌گیرد که در حالت کلی، بسته به سازوکار و نحوه تعیین، به دو دسته روش‌های مستقیم و غیر مستقیم تقسیم‌بندی میشوند. تقسیم بندی روش‌ها و نیز تکنیک‌های مورد استفاده در هر روش توسط صفرزاده و همکاران (۱۳۸۹) ارائه شده است. پر کاربردترین و معروف‌ترین ابزارها و روش‌های اندازه‌گیری تنش برشی موضعی، گروه روش‌های تشابه

تنش برشی بستر را می توان محاسبه کرد (Nezu and Rodi, 1986). روش برازش خطی بر تنش های رینولدز، ویژه جریان یکنواخت بوده و استفاده از آن برای جریان های غیر یکنواخت ممکن است به محاسبه نادرست تنش برشی بستر منجر شود. (Song and Chiew (1994) ضمن اندازه گیری پارامترهای آشفتگی جریان غیردائم در هر دو حالت گرادیان مثبت و منفی (جریان تند شونده و جریان کند شونده)، به اختلاف بزرگ ساختار آشفتگی و به ویژه توزیع تنش های رینولدز در جریان غیریکنواخت نسبت به حالت یکنواخت اشاره کرده است. Yang and Chow (2008) ضمن تأکید بر غیرخطی بودن توزیع قائم تنش رینولدز، بر اهمیت مؤلفه قائم سرعت در جریان های غیریکنواخت (نه به علت جریان های ثانویه بلکه به علت اختلاف شیب بستر کانال و سطح آب) و شار مومنتم حاصل از آن که بر توزیع تنش تأثیر می گذارد، اشاره کرده است.

Dey and Barbhuiya (2005) برای محاسبه تنش برشی بستر در جریان سه بعدی پیرامون کوله پل در دو حالت بستر صاف و بستر تغییر شکل یافته، از تنش های رینولدز نزدیک بستر - که با ابزار ADV اندازه گیری شده - استفاده کرده و تنش برشی بستر را با استفاده از سه مؤلفه تنش رینولدزی محاسبه کردند. پژوهشگرانی مانند Beheshti Vaghefi and Ghodsian and Ataei-Ashtiani (2010) (2008)، Duan (2009) و Duan et al. (2009) با اندازه گیری جریان با ADV، برای محاسبه تنش بستر در جریان پیرامون سازه های مختلف رودخانه ای از برون یابی خطی توزیع قائم تنش های رینولدز بر روی بستر یا از تنش رینولدز در نقطه نزدیکی بستر برای محاسبه تنش برشی بستر استفاده کرده اند. استفاده از روش تنش رینولدز برای محاسبه تنش برشی بستر در جریان های غیر یکنواخت، از جنبه های زیرقابل نقد است:

۱- در جریان های یکنواخت، توزیع خطی تنش رینولدز از

نقاط جدایی جریان یا محل اتصال مجدد در جریان های سه بعدی باشد، این ابزار مناسب است اما برای اهداف آزمایشگاهی با تعداد زیاد نقاط این روش مناسب نیست (Fernholz et al., 1996).

در روش حاصل ضرب عمق و شیب که اغلب برای جریان های یکنواخت استفاده می شود، تنش برشی متوسط پیرامون خیس با فرض تعادل بین نیروی برشی اعمال شده از جداره ها به توده سیال و مؤلفه وزن سیال در راستای حرکت تعیین می شود. در این روش، تنش برشی بین ذرات سیال (تنش رینولدز در جریان های آشفته) که در خلاف جهت تنش بستر است، در نظر گرفته نشده است. تنش برشی حاصل از این روش، مجموع تنش های بستر و جداره های کانال است و برای محاسبه تنش بستر باید سهم تنش جداره ها از تنش کل کم شود. نقص مهم این روش، اعمال شدن تأثیر جریان ثانویه و همچنین اعمال نشدن اثر تبادل مومنتم بین مجرای اصلی و سیلاب دشت در مقاطع مرکب برای محاسبه تنش برشی است (صفرزاده و همکاران، ۱۳۸۹).

روش پروفیل لگاریتمی سرعت نیز یکی از روش های اصلی در تعیین تنش برشی بستر در حالات بستر صاف و زبر است. البته به دلیل عدم قطعیت موجود در تعیین ارتفاع معادل زبری مصالح بستر و نیز تراز مبنا، این روش با مشکل همراه است. (Soon-Keat and Guoliang (2006) با مطالعه پارامتری تأثیر دو پارامتر بالا، تغییر شدید تنش برشی محاسباتی با این روش را - در صورتی که تراز مبنا فقط به اندازه ۵ میلی متر کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود - گزارش کرده اند.

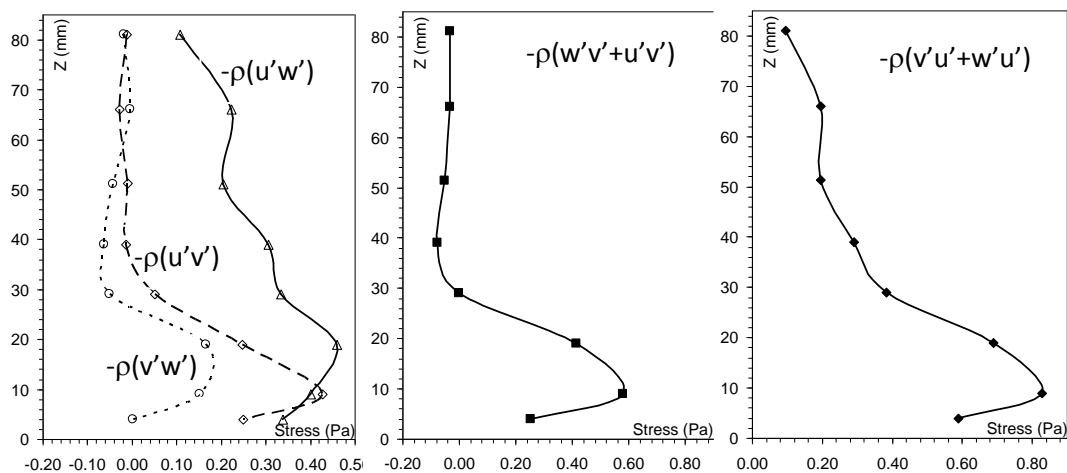
در جریان های توسعه یافته دو بعدی یکنواخت، توزیع قائم تنش رینولدز در محدوده $Z/h > 0.2$ خطی است. Z فاصله از کف کانال و h عمق جریان است. این نتیجه، مبنای روش دیگری برای محاسبه تنش برشی بستر است که در آن اگر رابطه خطی به سمت بستر برون یابی شود،

شکل ۱ توزیع قائم تنش‌های رینولدز را در ناحیه پرسرعت (محدوده بیرونی لایه برشی) پس از آبشکن مستقیم نشان می‌دهد (Safarzadeh et al., 2010). با توجه به این شکل، توزیع قائم هر سه مؤلفه تنش، کاملاً غیرخطی بوده و در نتیجه برازش خط راست و برون‌یابی بر روی بستر، به خطای بزرگی در محاسبه تنش برشی با این روش منجر می‌شود.

۳- استفاده از تنش رینولدز مربوط به یک نقطه نزدیک به بستر برای محاسبه تنش برشی بستر نادرست است. با توجه به شکل ۱ (همچنین در بیشتر پروفیل‌های قائم تنش رینولدز در جریان‌های سه‌بعدی)، گرادیان تنش‌های رینولدز در نزدیکی بستر شدید است، به طوری که تنش رینولدز در تراز ۱۰ میلی‌متری بستر برای مؤلفه $(-\rho \overline{u'v'})$ دو برابر مقدار آن در تراز ۴ میلی‌متری است. (Rowinski et al. (2006) در بررسی روش‌های مختلف تعیین تنش برشی بستر، به عدم کارایی روش تک نقطه‌ای تنش رینولدز در تعیین تنش برشی بستر در حالتی که ساختار جریان از حالت دو بعدی خارج شده، اشاره کرده‌اند.

طریق اندازه‌گیری با ابزار لیزری و همچنین با استفاده از روابط نظری اثبات شده و در نتیجه استفاده از برون‌یابی خطی برای محاسبه سرعت برشی بستر در جریان یکنواخت منطقی است. در جریان‌های سه‌بعدی (به‌ویژه جریان در اطراف موانع) برخلاف جریان یکنواخت، در بخش‌های مختلف میدان، مؤلفه‌های عرضی و قائم سرعت متوسط نیز قابل توجه بوده و از شار مومنت ناشی از مؤلفه‌های مزبور نمی‌توان صرف‌نظر کرد. (Yang and Chow (2008) به‌صورت نظری نشان دادند که در جریان‌های آشفته، تنش برشی کل برابر مجموع شار مومنت نوسان‌های سرعت (تنش‌های رینولدز) و شار مومنت مؤلفه‌های متوسط سرعت است. در جریان‌های یکنواخت دوبعدی مؤلفه قائم سرعت ناچیز بوده و بنابراین می‌توان از شار مومنت ناشی از جریان متوسط در برابر شار مومنت ناشی از نوسان‌های سرعت صرف‌نظر کرد.

۲- علاوه بر مطالب بالا، با توجه به غیریکنواختی شدید در جریان پیرامون بیشتر سازه‌های رودخانه‌ای، تنش‌های رینولدز توزیع کاملاً غیرخطی دارند. کار محققانی مانند Song and Chiew (1994) و Yang and Chow (2008) برای جریان غیریکنواخت در غیاب سازه ارائه شده است.



شکل ۱ توزیع قائم تنش‌های رینولدز در ناحیه لایه برشی بعد از تک آبشکن مستقیم (Safarzadeh et al., 2010)

در صورت استفاده از این روش این سؤال مطرح است که در چه ترازوی از بستر تنش‌های رینولدز باید اندازه‌گیری شود تا تنش برشی بستر به درستی محاسبه شود؟ برای نمونه (Duan (2009 و Duan et al. (2009 ضمن اندازه‌گیری جریان آشفته پیرامون تک‌آبشکن مستقیم با استفاده از ابزار ADV، تنش برشی بستر را با استفاده از تنش‌های رینولدز در فاصله یک سانتی‌متری بستر محاسبه کردند. با مقایسه نتایج ارائه شده در دو مقاله بالا دو نکته مهم قابل توجه است: ۱- افزایش عدد رینولدز و زبری بستر باعث کاهش میزان تشدید تنش بستر پیرامون آبشکن شده که این نتیجه منطقی نیست. ۲- پیشینه تشدید تنش در محدوده انتهایی جریان چرخشی رخ داده که با توجه به نتایج محققان قبلی در باره وقوع تنش بیشینه در اطراف دماغه آبشکن، این نتیجه نیز منطقی به نظر نمی‌رسد. علت وجود تناقض‌هایی آشکار در نتایج این محققان، ممکن است استفاده از تنش‌های رینولدز در یک نقطه نزدیک به بستر برای محاسبه تنش کف و همچنین خطای ابزار ADV در ثبت آشفتگی نزدیک بستر باشد. در بخش ارائه نتایج، توزیع تنش‌های برشی ارائه شده توسط این محققان با نتایج حاصل از تحقیق حاضر و نتایج معتبری که مورد استناد بیشتر محققان است، مقایسه شده است.

با توجه به معایب روش‌های بالا لزوم استفاده از روش یا ابزاری کارآمد برای اندازه‌گیری و مطالعه توزیع تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای حس می‌شود. ابزار مورد نظر، علاوه بر دقت کافی باید قابلیت جابجایی راحت به نقاط مختلف میدان برای اندازه‌گیری تنش برشی در محدوده نسبتاً وسیعی در اطراف سازه را داشته باشد تا بتوان علاوه بر مقادیر نقطه‌ای، الگوی توزیع تنش برشی را در پیرامون سازه‌ها نیز مطالعه کرد.

Preston, 1954 ابزار جدیدی را مبتنی بر روش فشار به نام لوله پرستون برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر (یا

ضریب اصطکاک پوسته‌ای) ارائه کرد. در این ابزار از دو لوله کم قطر که روی بستر کانال و در راستای جریان موضعی قرار می‌گیرند، برای اندازه‌گیری فشارهای کل (P_{total}) و فشار هیدرواستاتیک موضعی (P_{static}) استفاده شده و فشار هیدرودینامیک موضعی (ΔP) از طریق تفاضل دو فشار مزبور اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری فشار هیدرودینامیک موضعی و با استفاده از روابط کالیبره‌سازی خاص، فشار دینامیکی قابل تبدیل به تنش برشی محلی می‌شود. مزیت اصلی این روش، امکان انتقال به نقاط مختلف میدان برای اندازه‌گیری تنش موضعی است. جزئیات کامل این ابزار، نحوه ساخت و نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی بستر در جریان‌های یکنواخت در مقاله صفرزاده و همکاران (۱۳۸۹) آورده شده است.

نکته مهم در استفاده از این ابزار، لزوم استقرار دقیق لوله‌ها در راستای جریان موضعی است. در صورتی که راستای موضعی جریان نامشخص باشد (مانند جریان در لایه مرزی سه‌بعدی)، مقدار و راستای بردار تنش برشی را می‌توان با چرخاندن لوله‌ها تعیین کرد. در این حالت لوله‌ها باید به اندازه‌ای چرخانده شوند که بیشینه فشار هیدرودینامیک ثبت شود. در حالتی که راستای جریان‌های موضعی در میدان مورد مطالعه تغییر زیادی داشته باشد و هدف بررسی توزیع مکانی تنش باشد، لازم است مقادیر تنش در چندین نقطه از میدان اندازه‌گیری شود. در این حالت تعیین دقیق راستای موضعی جریان و استقرار لوله‌ها در آن راستا بسیار وقت‌گیر و مشکل بوده و علاوه بر آن ممکن است به علت تنظیم نادرست راستای لوله‌ها، خطا در اندازه‌گیری ایجاد شود.

Rajaratnam and Muralidhar (1968) با در نظر گرفتن این نکته، ضمن انجام آزمایش‌های متعدد به حساسیت کم ابزار دو لوله‌ای نسبت به راستای جریان اشاره کردند (مقدار تنش برشی در صورتی که لوله‌ها از حالت عادی تا

$$k_0 = \frac{P_3 - P_2}{P_1 - P_2} = \frac{K_3 - K_2}{K_1 - K_2} = f(\phi) \quad (2)$$

Preston, 1954 روابط کالیبرسازی زیر را برای تبدیل فشار هیدرودینامیک موضعی به تنش برشی ارائه کرده است:

$$\Delta P^+ = g(\tau_0^+) \quad \tau_0^+ = \frac{\tau_0 D_p^2}{4\rho\nu^2}, \quad \Delta P^+ = \frac{4\rho\nu^2}{D_p^2} \quad (3)$$

که در آن، D_p قطر بیرونی لوله، ρ و ν به ترتیب جرم مخصوص و لزجت سینماتیک آب و τ_0 تنش برشی موضعی بستر است. پارامترهای بی بعد ΔP^+ و τ_0^+ به ترتیب پارامترهای بی بعد تنش برشی و فشار هیدرودینامیکی موضعی است که از طریق تابع کالیبرسازی g به هم مرتبط می شوند. این تابع در مراجعی مانند صفرزاده و همکاران (۱۳۸۹) معرفی شده است. با استفاده از این رابطه، معادلات (۱) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$P_i = P_0 + K_i \frac{4\rho\nu^2}{D_p^2} g(\tau_0^+), \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

اگر دو مقدار فشار کل در لوله های کناری از هم کم شوند، داریم:

$$g(\tau_0^+) = \frac{(P_3 - P_1) D_p^2}{4\rho\nu^2} \frac{1}{K_3 - K_1} \quad (5)$$

در این رابطه در صورت معلوم بودن ضرایب کالیبرسازی، تابع بی بعد تنش برشی $g(\tau_0^+)$ مشخص می شود و بنابراین با استفاده از رابطه اصلی پرستون می توان مقدار تنش برشی را تعیین کرد.

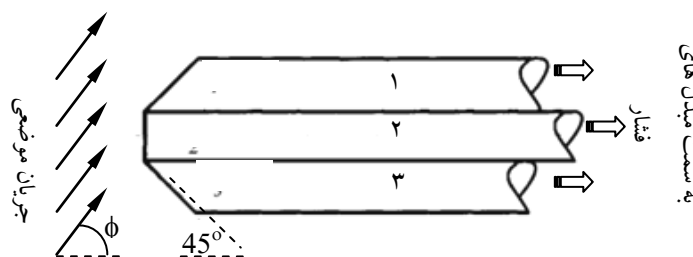
۲۰ درجه چرخانده شوند، تغییر چندانی نمی کند) و ابزار جدیدی را برای حل این مشکل معرفی کردند. در این ابزار از سه لوله برای ثبت فشار و در نهایت، اندازه گیری تنش برشی استفاده می شود. مزیت مهم این ابزار آن است که به چرخش لوله ها نیاز نبوده و در هر نقطه، ضمن تعیین راستای جریان موضعی توسط ابزار، تنش برشی موضعی نیز محاسبه می شود. در بخش بعدی با ارائه مبانی نظری، جزئیات عملکرد و ساخت این ابزار نیز ارائه می شود.

۲- مبانی نظری و جزئیات ابزار سه لوله ای

مطابق شکل ۲ در این ابزار سه لوله با قطر بیرونی یکسان وجود دارد که محور آنها در صفحه ای افقی واقع شده، به نحوی که دو لوله کناری دارای ورودی اریب با زاویه ۴۵ درجه و سر لوله میانی کاملاً تخت باشد. در صورتی که زاویه جریان موضعی نسبت به محور لوله میانی برابر ϕ باشد، فشار کل ثبت شده در هر لوله را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P_i = P_0 + K_i \Delta P, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

در این رابطه، P_0 و ΔP به ترتیب فشار کل و فشار دینامیک واقعی در لوله میانی برای حالت ($\phi=0$) و ضرایب K_1 ، K_2 و K_3 ضرایب کالیبرسازی است که فقط تابعی از زاویه جریان موضعی هستند. با استفاده از این روابط، پارامتر زیر را که باز هم تابعی از زاویه جریان است، می توان تعریف کرد:



شکل ۲ ابزار سه لوله ای ساخته شده برای اندازه گیری تنش برشی موضعی

اندازه‌گیری تنش برشی در نزدیکی سازه آبشکن، ابزارهای سه لوله‌ای برای اندازه‌گیری و مطالعه مقادیر موضعی و همچنین الگوی توزیع تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای انتخاب شد.

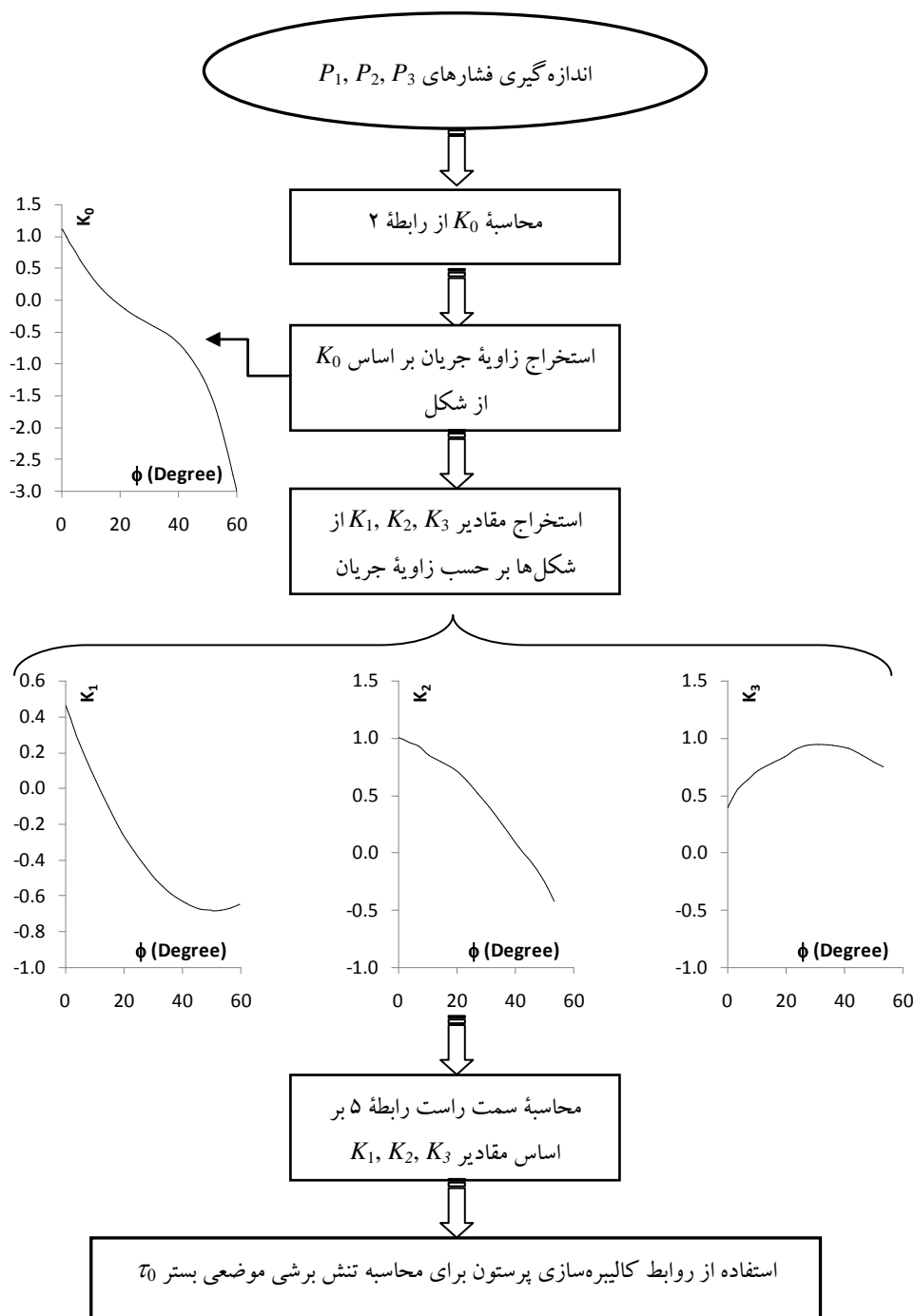
نمای سه‌بعدی همراه با جزئیات ابزار ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس توصیه محققان نسبت قطر داخلی (D_i) به قطر بیرونی (D_p) لوله‌ها باید بزرگتر از $0/6$ باشد. بنابراین از لوله برنجی با قطر بیرونی $3/1$ میلی‌متر و نسبت قطر داخلی به قطر بیرونی برابر $0/72$ استفاده شد. سه لوله مورد نظر به صورت جانبی متصل شده و از طریق یک بست در بالای بازوی قائم - که به صورت کاملاً موازی با خطوط جریانی طراحی و ساخته شده - به خط کش دیجیتال با دقت جابجایی قائم $0/01$ میلی‌متر متصل شده است. بست‌های مزبور از جنس استیل بوده و به نحوی طراحی و ساخته شد که علاوه بر حفظ دقیق بازوی قائم لوله‌ها به صورت عمود بر کف کانال، حداقل اغتشاش در محدوده اندازه‌گیری ایجاد شود. حسگرهای فشار از طریق شیلنگ سیلیکون به مبدل‌های فشار متصل می‌شوند. مهم‌ترین بخش ثبت داده در این ابزار، مبدل‌های فشار است. در تحقیق حاضر، بر اساس بررسی‌های دقیق در مورد محدوده و دقت فشار مورد نیاز، از مبدل فشار خازنی مدل Keller-41X، در محدوده $3-0$ کیلو پاسکال، دقت $0/1$ پاسکال و پاسخ زمانی 10 میلی‌ثانیه (فرکانس نمونه‌برداری 100 هرتز) استفاده شد. خروجی سنسورها از طریق بورد A/D به کامپیوتر منتقل و از طریق برنامه نوشته شده در نرم‌افزار Labview، سیگنال‌های دریافتی از سنسورها پس از فیلتر شدن و حذف داده‌های خطا دار به فشار تبدیل شده و به‌عنوان ورودی بخش محاسباتی (بر اساس الگوریتم ارائه شده در شکل ۳) به صورت سری زمانی و متوسط متحرک تنش برشی (برای کنترل پایا بودن سری‌های زمانی و تعیین مدت زمان مناسب برای همگرایی سری‌ها در هر نقطه) در هر نقطه تبدیل و ذخیره می‌شوند.

(Rajaratnam and Muralidhar, 1968) ضمن انجام آزمایش‌هایی متعدد، منحنی‌های ارائه شده در شکل ۳ را برای تعیین ضرایب کالیبره‌سازی در لوله‌هایی به قطر بیرونی 3 و قطر داخلی $1/8$ میلی‌متر ارائه کرده‌اند. در این شکل، علاوه بر منحنی‌های مزبور، الگوریتم محاسبه تنش برشی نیز ارائه شده است. این روش توسط راجاراتنام و همکاران برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های مختلف رودخانه‌ای مانند کوله پل، پایه پل و نیز تنش برشی بستر در میدان جریان ناشی از جت دیواره‌ای استفاده شده است (Rajaratnam and Pani, 1974). Ahmad and Rajaratnam and Nwachukwu, 1983 و (Rajaratnam, 2000).

Ahmad and Rajaratnam (2000) با استفاده از ابزار سه لوله‌ای توزیع تنش برشی بستر پیرامون کوله ذوزنقه‌ای را اندازه‌گیری کرده و به وقوع بیشینه تشدید تنشی برابر $3/5$ برابر تنش برشی جریان نزدیک شونده در گوشه بالادست کوله اشاره کرده‌اند. (Teruzi et al. (2009) جریان سه‌بعدی مشابه با هندسه آزمایش Ahmad and Rajaratnam (2000) را با روش گردابه‌های بزرگ مقیاس^۱ شبیه‌سازی کرده و نتایج حاصل از مدل‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این تحقیق بیشینه تشدید تنش حاصل از مدل‌سازی عددی همخوانی بسیار مناسبی با تنش در محل وقوع بیشینه در داده‌های آزمایشگاهی دارد. لازم است ذکر شود که در روش گردابه‌های بزرگ مقیاس، تنش برشی بستر با استفاده از داده‌های سرعت در محدوده زیر لایه لزوج استفاده شده و بنابراین تنش‌های برشی محاسبه شده با این روش، دقیق‌ترین است.

علاوه بر دقت مناسب این ابزار، با توجه به کوچک بودن حسگر آن در مقایسه با ابزارهای دیگری مانند سرعت‌سنج‌های ADV یا سرعت‌سنج‌های مغناطیسی، ابزار سه لوله‌ای ساخته شده، قابلیت اندازه‌گیری تنش برشی در نواحی بسیار نزدیک به سازه‌ها را نیز دارد. با توجه به عملکرد مناسب این ابزار و همچنین توانایی

1. Large Eddy Simulation (LES)



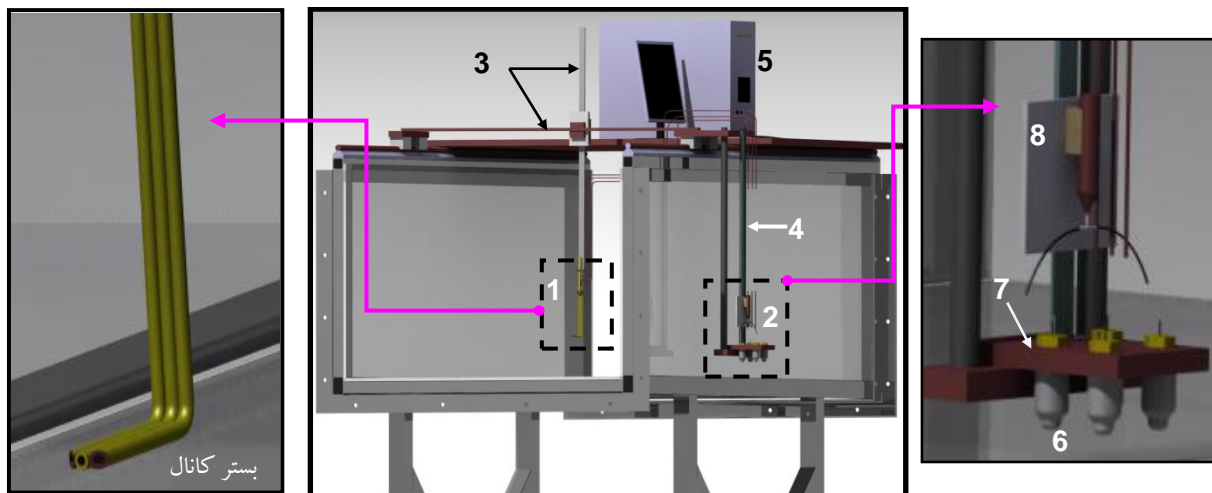
شکل ۳ الگوریتم اندازه گیری تنش برشی بستر با استفاده از ابزار سه لوله ای حسگر به همراه منحنی های کالیبره سازی

Rajaratnam and Muralidhar (1968)

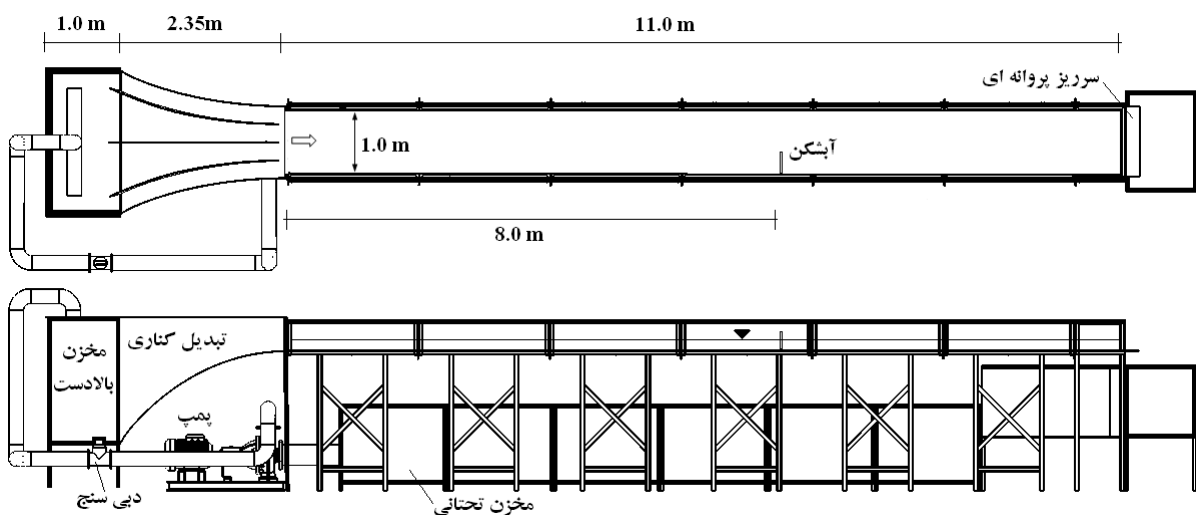
۳- جزئیات آزمایش

(شکل ۵). طول کل کانال برابر ۱۱ متر (بدون تبدیل های ابتدایی) بوده و در ورودی آن از تبدیل های کناری و تحتانی ملایم به طول ۲/۳۵ متر از مخزن بالادست به کانال اصلی استفاده شده است.

برای انجام تحقیق حاضر، فلوم آزمایشگاهی مستقیمی با مقطع مستطیلی با عرض $B=1m$ و ارتفاع $H=0.7m$ با بستر پلکسی گلاس با ضخامت ۲۰ میلی متر و جداره های شیشه ای با ضخامت ۱۰ میلی متر طراحی و ساخته شد



۱- مجموعه حسگرها و بست ۲- مجموعه مبدل‌های فشار و ابزار کالیبره‌سازی آنها ۳- خط‌کش دیجیتال و ریل عرضی با مقطع مستطیل
 ۴- بازوی جانبی نگهدارنده مبدل‌های فشار و ابزار کالیبره‌سازی آنها ۵- کامپیوتر و سیستم گردآوری داده‌ها ۶- مبدل‌های فشار
 ۷- صفحه نگهدارنده مبدل‌های فشار ۸- ابزار کالیبره‌سازی مبدل‌ها
 شکل ۴ نمای سه‌بعدی حسگر سه لوله‌ای به همراه ابزار کالیبره‌سازی و نحوه قرار گرفتن سنسورهای فشار



شکل ۵ فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

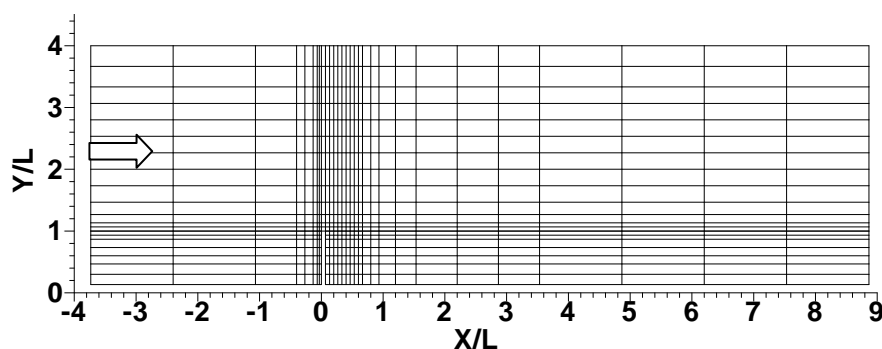
می‌کند. برقراری عمق مورد نظر در طول کانال با استفاده از سیستم سرریز پروانه‌ای خودکار در انتهای کانال صورت می‌گیرد. شیب طولی کانال در طول آزمایش برابر $0/00033$ تنظیم شده و از دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت $0/1\%$ تمام مقیاس برای اندازه‌گیری دبی ورودی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری عمق از عمق‌سنج

برای هدایت بهتر جریان، پره‌های هدایت غیر مستغرق بر روی تبدیل تحتانی نصب شده و همچنین در ورودی کانال از صفحه یونولیت شناور واقع بر سطح آب برای کاهش اغتشاش سطح آب استفاده شده است. برای تأمین آب از مخزن زیرین با ظرفیت ۱۳ متر مکعب استفاده شده و مجموعه پمپ و الکتروموتور با بیشینه دبی اسمی ۸۵ لیتر بر ثانیه آب را از مخازن زیرین به مخزن بالا پمپ

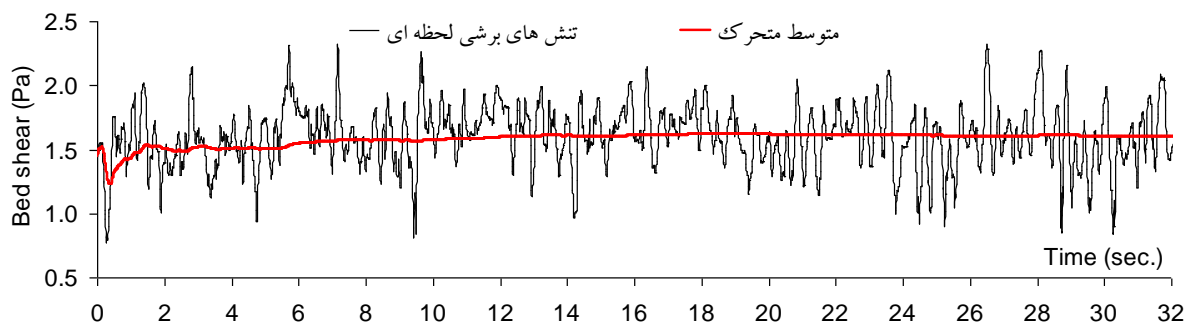
فرکانس واقعی اندازه‌گیری با در نظر گرفتن زمان تأخیر مربوط به ابزارهای انتقال فشار از حسگر به مبدل فشار و همچنین تأخیر تجهیزات انتقال اطلاعات، با توجه به فایل خروجی نرم افزار، برابر ۸۵ هرتز است. زمان اندازه‌گیری در هر نقطه با توجه به شدت اغتشاش‌های جریان متفاوت بوده و در هر نقطه با توجه به ترسیم میانگین متحرک تنش برشی لحظه‌ای، با در نظر گرفتن تمامی داده‌ها از لحظه شروع، توسط نرم افزار تهیه شده و زمان مناسب از نظر همگرایی سری‌های زمانی تعیین می‌شود. نمونه‌ای از سری‌های زمانی و متوسط متحرک آن در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، همگرایی سری زمانی به مقدار ثابت و در نتیجه، کفایت زمان اندازه‌گیری مشهود است.

با توجه به شکل‌گیری حباب‌های هوا در شیلنگ‌های رابط حسگرها و مبدل‌های فشار، برای جلوگیری از بروز خطا بر اثر تراکم‌پذیری هوای محبوس شده، در بازه‌های زمانی مشخصی لازم است این حباب‌ها تخلیه شده و بار دیگر کالیبره‌سازی فشارسنج‌ها انجام شود. برای اطمینان از صحت کالیبره‌سازی و تخلیه کامل حباب‌های هوا، نقطه‌ای به‌عنوان مرجع در بالادست دور و در میانه کانال (دور از تأثیر آبشکن) انتخاب شده و در هر مرحله، با اندازه‌گیری تنش در آن نقطه و اطمینان یافتن از یکسان بودن تنش با مراحل اندازه‌گیری قبلی، ابزار برای ادامه اندازه‌گیری به نقاط پیرامون آبشکن منتقل می‌شود.

دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. سازه مورد نظر، تک آبشکن مستقیمی با طول ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر از جنس پلکسی گلاس است. بر اساس آزمایش‌های اولیه‌ای که بدون وجود آبشکن انجام شد، با اندازه‌گیری پروفیل‌های قائم سرعت در طول میدان با استفاده از سرعت‌سنج سه‌بعدی، طول توسعه برابر ۸ متر تعیین شده (Safarzadeh et al., 2010) و بنابراین آبشکن در این فاصله از ورودی کانال نصب شده است. دبی ورودی به میدان برابر ۶۰ لیتر بر ثانیه بوده و عمق جریان در ورودی کانال برابر عمق عادی و برابر ۱۴۳ میلی‌متر با استفاده از سرریز انتهایی به میدان اعمال شد. آبشکن مورد نظر عمود بر دیواره سمت راست کانال بوده و در طول آزمایش همواره غیر مستغرق است. اندازه‌گیری تنش برشی بستر در محدوده وسیعی در پیرامون تک آبشکن و در نواحی بالادست و پایین دست آن انجام شد. شبکه اندازه‌گیری، همان طوری که در شکل ۶ نشان داده شده، چهار برابر طول آبشکن در ناحیه بالادست و نه برابر در ناحیه پایین دست گسترش داشته و در عرض کانال تا فاصله چهار برابر طول آبشکن به سمت دیواره مقابل، اندازه‌گیری تنش انجام شده است. در این شکل محورهای طولی و عرضی نسبت به طول آبشکن (L) بی‌بعد شده است. در مجموع، تنش برشی در ۶۳۷ نقطه از بستر کانال پیرامون آبشکن اندازه‌گیری شده است.



شکل ۶ شبکه‌بندی بستر کانال پیرامون تک آبشکن برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر با استفاده از ابزار سه لوله‌ای



شکل ۷ سری زمانی و منحنی تغییر متوسط متحرک تنش برشی اندازه گیری شده در دماغه آبشکن

۴- آزمایش و تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش اصلی

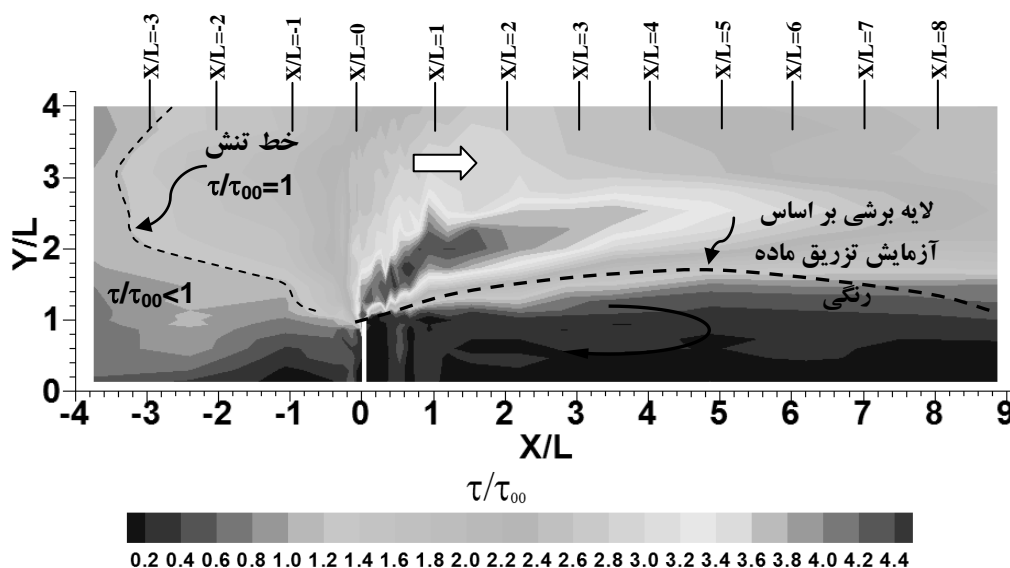
تنش برشی بستر (τ) در هر نقطه نسبت به مقدار تنش برشی متوسط جریان آزاد (τ_{00})، بی بعد شده و توزیع تنش در محدوده اندازه گیری شده در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم است ذکر شود که تنش برشی جریان آزاد بدون حضور آبشکن و در شرایط هیدرولیکی یکسان با آزمایش مورد نظر در مقطع توسعه یافته اندازه گیری شده است. بدین منظور تنش موضعی در ۱۰۰ نقطه در عرض مقطع توسعه یافته اندازه گیری شده و متوسط آنها به عنوان تنش برشی متوسط جریان آزاد در نظر گرفته شد. با توجه به این شکل، تأثیر آبشکن بر توزیع تنش برشی بستر تا اولین مقطع اندازه گیری (در فاصله چهار برابر طول آبشکن) قابل مشاهده بوده و در این مقطع، بیشینه تنش در فاصله ای حدود $2.5L$ از جداره سمت راست کانال رخ می دهد. در مقطع عرضی مزبور، تنش برشی بستر در امتداد جداره سمت راست کانال ناچیز است که علت آن گرادیان مثبت طولی فشار ناشی از وجود آبشکن و نقش آن در جدایی جریان نزدیک شونده زیرین است. با حرکت به سمت پایین دست و با افزایش انحنای خطوط جریان به سمت بخش میانی کانال، تنش برشی اعمال شده از طرف جریان نزدیک کف بر بستر کانال افزایش یافته و محل وقوع بیشینه تنش برشی به سمت نواحی میانی کانال جابجا می شود.

تا مقطع آبشکن ($X/L=0$) بیشینه تنش در امتداد خط برابر $Y/L=3$ بوده و در بالادست آبشکن بیشینه تنش به خط $Y/L=0.9$ منتقل می شود. تشدید تنش در منطقه قبل از آبشکن به صورت افزایش عمومی تنش ناشی از کاهش عرض عبوری جریان است، اما در محدوده اطراف آبشکن، تشدید موضعی سرعت جریان در دماغه آبشکن باعث افزایش تنش برشی اعمال شده به بستر کانال می شود. در محدوده بالادست آبشکن و در بخش بزرگی از ناحیه مزبور، تنش برشی بستر ناچیز است، اما در بالادست دماغه در امتداد خط $Y/L=0.9$ ، تنش برشی بستر به طور ناگهانی افزایش می یابد. افزایش تنش در این ناحیه ناشی از انحراف شدید عرضی جریان است. در محدوده مزبور جریان عرضی شدیدی به سمت میانه کانال شکل می گیرد که بر اساس اندازه گیری توسط سرعت سنج ADV ، اندازه مؤلفه عرضی سرعت در بالادست آبشکن، $1/2$ برابر سرعت متوسط جریان نزدیک شونده است. با گذشتن از مقطع آبشکن، منطقه تشدید تنش در پایین دست دماغه گسترش یافته و به صورت ناحیه ای به شکل خنجر توسعه می یابد. حداکثر تشدید تنش $4/42$ برابر تنش جریان نزدیک شونده بوده و محدوده وقوع آن از دماغه بالادست آبشکن شروع شده و تا فاصله ای در حدود یک برابر طول آبشکن به سمت پایین دست ادامه دارد؛ اما محدوده پر تنش - که نسبت به توزیع تنش نواحی پیرامونی تنش برشی آن قابل ملاحظه است - تا پنج

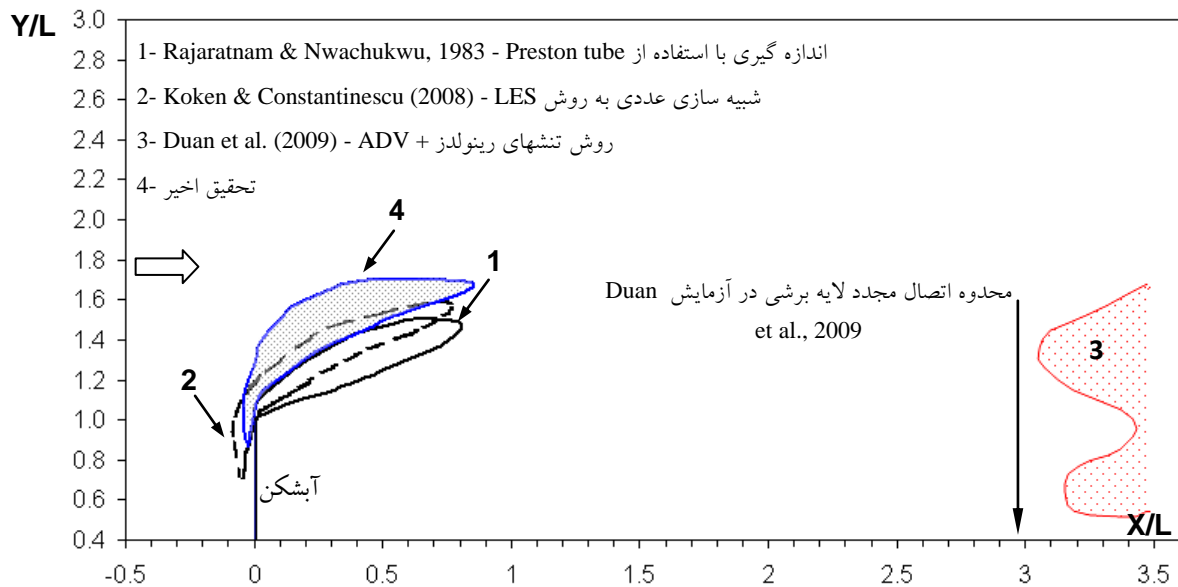
لایه برشی شکل گرفته و به صورت مماس بر آن به سمت پایین دست امتداد می‌یابد.

برای بررسی صحت کیفی نتایج، محدوده بیشینه تنش حاصل از اندازه‌گیری با ابزار سه لوله‌ای با نتایج محققان قبلی مقایسه و در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به این شکل، محدوده پر تنش در تحقیق حاضر همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی دقیق دارد. در این شکل، نتایج تنش برشی گزارش شده توسط Duan et al. (2009) که با استفاده از روش تنش رینولدز حاصل از اندازه‌گیری با ابزار ADV محاسبه شده نیز برای مقایسه ارائه شده است. توجه شود که در بیشتر مراجعی که تنش برشی را با روش تنش‌های رینولدز محاسبه کرده‌اند، نتایج فقط به صورت پروفیل‌های طولی یا عرضی تنش ارائه شده و منحنی‌های هم‌تراز در آنها نشان داده نشده است. این شکل به خوبی نشانگر نقص روش تنش‌های رینولدز در محاسبه تنش برشی بستر است، به طوری که وقوع محدوده پر تنش در انتهای ناحیه چرخشی نادرست تعیین شده است.

برابر طول آبشکن به سمت پایین دست توسعه یافته است. محققان قبلی از جمله Rajaratnam and Nwachukwu (1983)، Molinas et al. (1998)، Teruzi et al. (2009) نیز تشدید تنشی شبیه به مقدار تحقیق حاضر را در مطالعات آزمایشگاهی و عددی خود برای جریان پیرامون آبشکن و کوله پل با نسبت‌های هندسی و شرایط هیدرولیکی نزدیک به آزمایش انجام شده در تحقیق حاضر گزارش کرده‌اند. میزان تشدید عمومی تنش در مجرای اصلی کانال ۲/۷ برابر تنش برشی جریان نزدیک شونده بوده و تا مقطع عرضی $X/L=9$ تشدید عمومی تنش ادامه دارد. تشدید موضعی تنش از مقطع عرضی $X/L=2$ به سمت پایین دست تضعیف شده و در مقطع انتهایی، میزان تنش موضعی و عمومی بستر یکسان است. با توجه به این شکل، تنش برشی بستر در محدوده جریان چرخشی پشت آبشکن ناچیز بوده و با حرکت به سمت بخش میانی کانال به تدریج افزایش می‌یابد. حد فاصل ناحیه بیشینه تنش برشی موضعی و تنش برشی کم، بیانگر ناحیه لایه برشی محاط بر ناحیه چرخشی است. به بیان دیگر، محدوده بیشینه تنش برشی، در امتداد بخش بیرونی



شکل ۸ توزیع تنش برشی بی‌بعد شده در پیرامون تک آبشکن مستقیم



شکل ۹ مقایسه محدوده وقوع تنش برشی بیشینه در تحقیق حاضر با نتایج محققان قبلی

که در آن $\Lambda = \tau / \tau_{00}$ پارامتر بی بعد تشدید تنش بوده و ترم‌های اول و دوم سمت راست به ترتیب بیانگر تشدید تنش موضعی و ناشی از تنگ‌شدگی مقطع است. این پژوهشگران بر اساس مشخصات هیدرولیکی و هندسی جریان روابط زیر را برای تشدید موضعی و تشدید ناشی از تنگ‌شدگی مقطع پیرامون کوله پل ارائه کرده‌اند:

$$\Lambda_{cont} = \left(\frac{1}{M} \right) \left[1 + 5.46 \left(\frac{1}{M} \right)^{3.89} F_{app}^{1.74} \left(\frac{L}{y_{app}} \right)^{2.50} \right] \quad (7)$$

$$\Lambda'_{nose} = \left(\frac{1}{M^2} \right) \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_w} - 1, \quad (8)$$

$$\alpha_w = 1.485 F_{app}^{0.13} \left(\frac{L}{y_{app}} \right)^{0.06}$$

در این روابط، M نسبت بازشدگی در مقطع آبشکن $(M = (B - L) / B)$ ، F_{app} به ترتیب عمق و عدد فرود جریان نزدیک شونده است. α_w اختلاف زاویه بین راستای خطوط جریان نزدیک بستر و خط جریان نزدیک به سطح آب در محل دماغه است.

در شبیه‌سازی‌های عددی دقیق مانند مطالعات Koken and Sotiropoulos (2008) و Constantinescu

نادقیق بودن این روش با توجه به الگوی فرسایش بستر در آزمایش‌های بستر متحرک که توسط محققان مختلفی مانند Yasi (2006) گزارش شده، روشن است. توجه شود که در محدوده دماغه آبشکن، محل وقوع فرسایش موضعی دقیقاً منطبق بر محل بیشینه تنش برشی نبوده و در ناحیه‌ای بین محدوده حداکثر تنش و بخش بیرونی لایه اختلاطی رخ می‌دهد (Safarzadeh et al., 2010). علت عدم انطباق کامل نواحی بیشینه تنش در تحقیق حاضر و نتایج ارائه شده توسط محققین قبلی، اختلاف در شرایط هیدرولیکی بالادست و همچنین ناشی از تفاوت نسبت طول آبشکن به عرض کانال است.

۴-۲- مطالعه پارامتری

Molinas et al. (1998) تشدید تنش برشی پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای را به دو بخش تنش برشی موضعی و عمومی تقسیم کرده و روابط زیر را برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی بر میزان تشدید تنش استخراج کرده‌اند:

$$\Lambda = \Lambda'_{nose} + \Lambda_{cont} \quad (6)$$

با توجه به این شکل، نتایج تحقیق حاضر همخوانی بسیار خوبی با نتایج روابط نظری داشته و علاوه بر آن، میزان پراکندگی داده‌های تحقیق اخیر پیرامون خط همبستگی کامل، بسیار کمتر از داده‌های Rajaratnam and Nwachukwu (1983) است. این نکته نشانگر عملکرد بهتر ابزار ساخته شده نسبت به ابزار پرستون تیوب در اندازه‌گیری تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای نظیر آبشکن است.

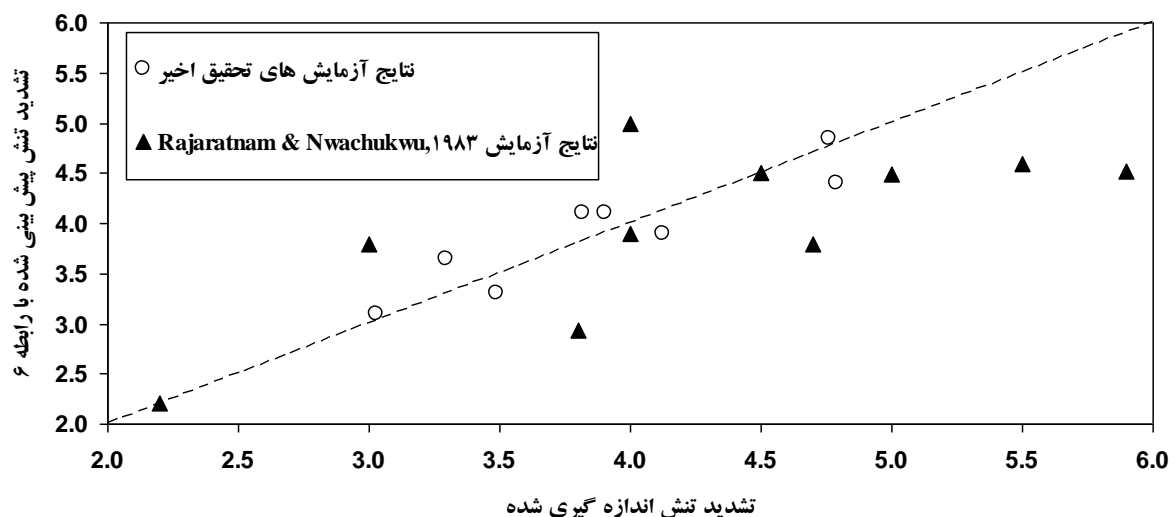
۴-۳- بررسی ارتباط توزیع تنش برشی بستر با پدیده وقوع آبشستگی

بیشتر مدل‌های انتقال رسوب مورد استفاده در مهندسی رودخانه، از روش نیروی کششی متوسط برای بررسی انتقال رسوب بستر و پیش‌بینی فرسایش استفاده می‌کنند. مصالح بستر زمانی جابجا می‌شوند که تنش برشی بستر، از مقدار حدی مشخصی فراتر رود. اگرچه تحقیق حاضر با فرض بستر صلب صورت گرفته، اما توزیع تنش برشی بستر تا حد زیادی می‌تواند در کسب درک کیفی از الگوی فرسایش میدان کارساز بوده و در حالت کلی می‌تواند محل آغاز حرکت بار بستر و همچنین محدوده وقوع آبشستگی موضعی را پیش‌بینی کند.

(2005) و Teruzi et al. (2009) که همگی بر اساس روش گردابه‌های بزرگ انجام شده، برای بررسی قابلیت مدل عددی خود در پیش‌بینی بیشینه تشدید تنش برشی حول آبشکن یا کوله پل به نتایج Molinas et al. (1998) استناد کرده‌اند.

با توجه به دقت بسیار بالای روش عددی گفته شده در پیش‌بینی تنش برشی بستر به سبب استفاده از اطلاعات جریان در بخش زیر لایه لُج، در تحقیق حاضر نیز به منظور بررسی جامع‌تر عملکرد ابزار ساخته شده، مطالعات پارامتری انجام و نتایج حاصل با نتایج محققان مزبور مقایسه شد.

تنش برشی بستر برای سه طول مختلف آبشکن (۱۲۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر) و برای سه عمق مختلف جریان ورودی (۱۴۳، ۱۶۰ و ۱۸۰ میلی‌متر) اندازه‌گیری و با استفاده از نتایج حاصل، نحوه تغییر بیشینه تشدید تنش نسبت به پارامترهای هندسی و هیدرولیکی تعیین و با روابط (۷) و (۸) و همچنین داده‌های آزمایشگاهی Rajaratnam and Nwachukwu (1983) مقایسه شده است. شکل ۱۰ مقایسه نتایج تحقیق حاضر را با نتایج محققان مزبور نشان می‌دهد.



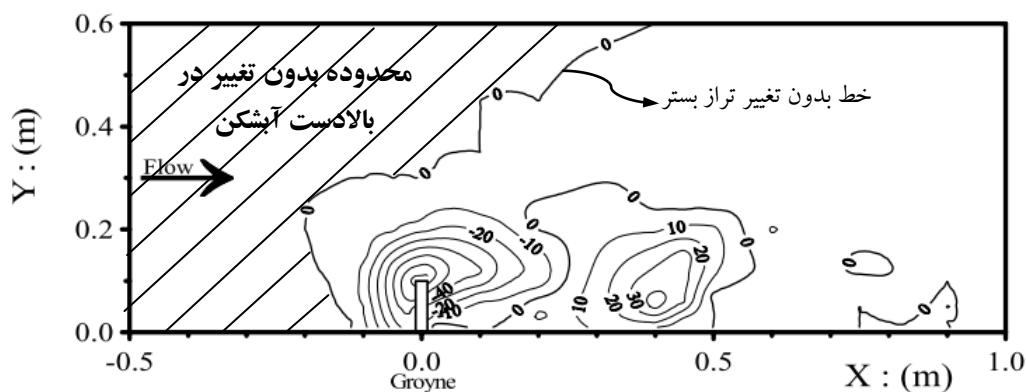
شکل ۱۰ مقایسه مقادیر تشدید تنش اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر با روابط نظری و داده‌های آزمایشگاهی موجود

بیشتر ناشی از جریان روبه پایین و ایجاد گردابه نعل اسبی بوده و در این ناحیه نمی‌توان وقوع آبستنگی موضعی را بر اساس توزیع تنش برشی تحلیل کرد.

تراز توپوگرافی صفر (خط بدون تغییر تراز بستر در شکل ۱۱) در بالادست آبشکن، مشابه الگوی تغییر تنش برشی در ناحیه قبل از آبشکن خط تنش ($\tau/\tau_{00}=1$) است. توجه شود که همچنان که در بخش طراحی آزمایش‌ها عنوان شد، در آزمایش تحقیق حاضر تنش برشی بستر در کل عرض کانال اندازه‌گیری نشده و اختلاف شکل خطوط مزبور در نیمه بدون آبشکن کانال، مربوط به این نکته است. در صورتی که قطر متوسط مصالح بستر به اندازه‌ای باشد که بر اساس معیار شیلدز $\tau_{00}=\tau_{xp}$ حاصل شود، می‌توان گفت که به ازای $\tau/\tau_{00}=\tau/\tau_{xp}<1$ ، ذرات رسوب بستر حرکت نکرده و در واقع ناحیه بالادست خط $\tau/\tau_{00}=1$ بدون تغییر خواهد ماند.

آب‌شستگی در محدوده مزبور ناشی از تشدید عمومی تنش برشی بستر بر اثر انحنای تدریجی خطوط جریان نزدیک شونده است و می‌توان گفت که تشدید تنش برشی عمومی اندازه‌گیری شده با این ابزار نیز دقت مناسبی دارد.

علاوه بر آن می‌توان با استفاده از نتایج حاصل از توزیع تنش، قطر مصالح و همچنین محدوده مورد نیاز برای پوشش محافظ ریپ رپ پیرامون دماغه را پیش‌بینی کرد. شکل ۱۱ الگوی فرسایش بستر پیرامون تک آبشکن مستقیم واقع در بستر متحرک را در یکی از آزمایش‌های (Yasi 2006) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این آزمایش در شرایط آب تمیز انجام شده و بنابراین الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری ایجاد شده، به صورت موضعی است. با توجه به این شکل، بیشترین فرسایش در محل دماغه رخ داده و چاله فرسایشی در بالادست آبشکن و همچنین در ناحیه پایین‌دست دماغه به سمت پایین‌دست گسترش یافته است. وقوع رسوب‌گذاری در داخل ناحیه چرخشی واقع در پایین‌دست آبشکن نیز مشهود است. مقایسه توزیع تنش برشی اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر (شکل ۸) با الگوی تغییر بستر گزارش شده توسط (Yasi 2006) نشان می‌دهد که توزیع محدوده بیشینه تنش برشی بستر همخوانی مناسبی با محدوده وقوع چاله فرسایشی در محل دماغه و پایین‌دست آبشکن دارد. علاوه بر آن وقوع رسوب‌گذاری در محل ناحیه چرخشی با توجه به مقدار ناچیز تنش برشی بستر در تحقیق حاضر همخوان است. در محل بالادست آبشکن، وقوع فرسایش،



شکل ۱۱ الگوی تغییر تراز بستر پیرامون تک آبشکن مستقیم در بستر متحرک در کار آزمایشگاهی (Yasi 2006)

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ضمن مرور کلی روش‌های رایج اندازه‌گیری تنش برشی بستر در مطالعات هیدرودینامیک رودخانه‌ها، ابزار سه لوله‌ای برای اندازه‌گیری این پارامتر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای ساخته شد و دقت آن در برآورد مقادیر کمی و الگوی کیفی تنش برشی پیرامون تک آبشکن مستقیم به‌عنوان سازه کلاسیک رودخانه‌ای ارزیابی شد.

بر اساس نتایج تحقیق حاضر، ابزار ساخته شده بدون محدودیت‌های روش‌هایی مانند روش تنش‌های رینولدز، می‌تواند تشدید موضعی پیرامون سازه، نحوه توسعه بیشینه تنش برشی موضعی به سمت پایین دست و در امتداد بخش بیرونی لایه برشی و همچنین تشدید عمومی تنش به سمت دیواره مقابل و بالادست آبشکن را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کند. بر اساس مطالعه پارامتری تأثیر طول آبشکن و همچنین تأثیر عمق جریان بالادست، بیشینه تشدید موضعی تنش، انطباق خوبی با روابط نظری و داده‌های آزمایشی محققان قبلی دارد. بر اساس توزیع تنش برشی بستر، الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری موضعی و همچنین نحوه گسترش تأثیر آبشکن بر تغییر تراز بستر در جریان نزدیک شونده به خوبی قابل پیش‌بینی است.

۶- فهرست علائم

D_i	قطر داخلی لوله
D_p	قطر بیرونی لوله
F_{app}	عدد فرود جریان نزدیک شونده
$g(\tau_0^+)$	تابع بی‌بعد تنش برشی
K_1, K_2 و K_3	ضرایب کالیبراسیون
L	طول آبشکن
M	نسبت بازشدگی در مقطع آبشکن
P_0	فشار کل در لوله میانی برای حالت ($\phi=0$)

فشار دینامیک واقعی در لوله میانی برای حالت $\phi=0$) ΔP

پارامتر بی‌بعد فشار هیدرودینامیکی موضعی ΔP^+

عمق جریان نزدیک شونده y_{app}

جرم مخصوص آب ρ

اختلاف زاویه بین راستای خطوط جریان نزدیک بستر α_w و خط جریان نزدیک به سطح آب در محل دماغه

زاویه جریان موضعی نسبت به محور لوله میانی ϕ

لزجت سینماتیک آب ν

تنش برشی موضعی بستر τ_0

تنش برشی متوسط جریان آزاد τ_{00}

تنش برشی بحرانی ذره τ_{cr}

تنش برشی بی‌بعد τ_0^+

پارامتر بی‌بعد تشدید تنش Λ

۷- منابع

صفرزاده، اکبر؛ صالحی نیشابوری، سید علی اکبر؛ زراتی، امیر رضا و قدسیان، مسعود (۱۳۸۹). "مطالعه توزیع تنش برشی جداره در جریان یکنواخت کانال با استفاده از ابزار دقیق و شبیه سازی عددی"، مجله هیدرولیک، دوره ۵، شماره ۱، صص. ۷۰-۵۱.

Ahmed, F. and Rajaratnam, N. (2000). "Observations on flow around bridge abutments", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 1, pp. 51-59.

Beheshti, A. A. and Ataei-Ashtiani, B. (2010). "Experimental study of three-dimensional flow field around a complex bridge pier", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 136, No. 2, pp. 143-154.

Dey, S. and Barbhuiya, A. (2005). "Turbulent flow field in a scour hole at a semicircular abutment", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 213-232.

Duan, J. (2009). "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 135, No. 10, pp. 803-811.

Duan, J.; He, L.; Fu, X. and Wang, Q. (2009). "Mean flow and turbulence around an experimental

- Rowinski, P. M.; Aberle J. and Mazurczyk, A. (2006). "Shear velocity estimation in hydraulic research", *Acta Geophysica Polonica*, Vol. 53, No. 4, pp. 567-583.
- Safarzadeh, A.; Salehi Neyshabouri, S.A.A.; Zarrati, A., R. and Ghodsian, M. (2010). "Experimental study of head shape effects on shear stress distribution around a single groyne". *Proceeding River flow 2010*. Braunschweig, Germany.
- Song., T. and Chiew, Y. M. (1994). "Vertical velocity distribution in steady non-uniform and unsteady open-channel flow", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 3, pp. 49-64.
- Teruzzi, A.; Ballio, F. and Armenio, V. (2009). "Turbulent stresses at the bottom surface near an abutment: laboratory-scale numerical experiment", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 2, pp. 106-117.
- Vaghefi, M. and Ghodsian, M. (2008). "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 2, pp.145-158.
- Yang, S. Q. and Chow, A. T. (2008). "Turbulence structures in non-uniform flows", *Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 1344-1351.
- Yasi, M. (2006). "Uncertainties in the simulation of bed evolution in recirculating flow area behind groynes", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 30, No. B1, pp. 69-83.
- Soon-Keat, T. and Guoliang Y. (2006). "Errors in the bed shear stress as estimated from vertical velocity profile", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 132, No. 5, pp. 490-497.
- spur dike", *Advance in Water Resources*, Vol. 132, No. 12, pp. 1717-1725.
- Fernholz, H. H.; Janke, G.; Schober, M.; Wanger, P. M. and Warnack D. (1996). "New developments and applications of skin friction measuring techniques". *Measurement Science and Technology*, Vol. 7, pp. 1396-1409.
- Koken, M. and Constantinescu, G. (2008). "An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel:1. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process", *Water Resources Research*. Vol. 44, No. 8, pp. 1-19.
- Molinas, A., Kheireldin, K. and Baosheng, W. (1998). "Shear stress around vertical wall abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 8, pp. 822-830.
- Nezu, L. and Rodi, W. (1986). "Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 5, pp. 335-355.
- Paik, J. and Sotiropoulos, F. (2005). "Coherent structure dynamics upstream of a long rectangular block at the side of a large aspect ratio channel", *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 11, pp. 332-346.
- Preston, J., H. (1954). "The determination of turbulent skin friction by means of Pitot tubes", *Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol. 58, No. 3, pp. 109-121.
- Rajaratnam, N.; Nwachukwu, B. (1983). "Erosion near groyne-like structures", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 21, No. 4, pp. 277-287.
- Rajaratnam, N. and Muralidhar, D. (1968). "Yaw probe used as Preston tube", *Technical Note, Aerospace Journal, Royal Aeronautics Society*, Vol. 72, pp. 1059-60.
- Rajaratnam, N. and Pani, B.S. (1974). "Three-dimensional turbulent wall jets", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 100, No. 1, pp. 69-83.