



## تحلیل تنش برشی در کانال‌های نیم سهموی

سیاوش حیدری ارجلو<sup>۱</sup> و منوچهر فتحی مقدم<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز fathi49@gmail.com

پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۲۲

بازنگری: ۱۳۹۶/۶/۱۹

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۷

### چکیده

پیش‌بینی دقیق توزیع تنش برشی مرزی در کانال‌های روباز در بسیاری از مسائل مهندسی نظیر طراحی کانال‌های پایدار، محاسبات مربوط به افت انرژی و رسوب‌گذاری در کانال‌ها حائز اهمیت می‌باشد. مطالعه‌های حاضر به بررسی چگونگی توزیع تنش برشی در کانال‌های نیم سهموی به دو روش انرژی و مومنتم و تغییرات آن در شرایط مختلف هیدرولیکی پرداخته است. برای تعیین تغییرات تنش برشی موضعی به روش انرژی از لوله پرستون با قطر خارجی چهار میلی‌متر مجهز به سلول‌های حساس به فشار دینامیک استفاده گردید. برای تبدیل فشار قرائت شده به تنش برشی از منحنی کالیبراسیون پتل استفاده شد. برای اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی کل به روش مومنتم از روش فلوم لبه چاقویی استفاده شد. در نهایت روابطی برای تخمین تنش برشی در جدارهای صاف و زبر در کانال‌های نیم سهموی ارائه گردید. نتایج نشان دهنده این موضوع می‌باشد که تنش برشی جداره کانال در شرایط بستر صاف و زبر به ترتیب به‌طور متوسط ۳/۷ درصد و ۴/۶ درصد بیش از تنش بستر می‌باشد. هم‌چنین اندازه‌گیری تنش برشی جداره و بستر به روش مومنتم در شرایط جداره صاف و زبر به‌طور متوسط مقادیر تنش برشی را ۲/۷ درصد و ۵/۸۵ درصد بیش از روش انرژی نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: کانال‌های روباز، لوله پرستون، روش مومنتم.

### مقدمه

به دلیل طول زیاد کانال‌های آبیاری درجه دو، سه و چهار در سطح شبکه‌های آبیاری، انتخاب نحوه اجرای کانال از دیدگاه ساخت در محل و یا نصب آن به‌صورت پیش ساخته و نیز نوع و شکل کانال در این‌گونه موارد بسیار اهمیت دارد. به سبب مشکلات موجود در اجرای کانال‌های آبیاری به‌صورت درجا از جمله اشغال سطح زیاد اراضی، کمبود مصالح قرضه مناسب، احتمال برخورد با عوارض متعدد و ... استفاده از کانال‌های پیش ساخته یکی از گزینه‌های قابل رقابت با کانال‌های درجا می‌باشد. از دیدگاه نظری، مؤثرترین مقطع هیدرولیکی (مقطع بهینه) و اقتصادی برای کانال‌های پوشش شده و غیرفرسایشی که در آن‌ها آب صاف جریان دارد، مقطع نیم دایره می‌باشد (Mahmodian, 2006). یکی از مسائل مهم در مهندسی هیدرولیک مجاری روباز، داشتن دانش کافی در خصوص میزان تنش برشی و مقاومت هیدرولیکی ایجاد شده در برابر جریان است. متوسط تنش‌های برشی کانال‌های روباز را می‌توان با حل معادله‌های پیوستگی و مومنتم تعیین نمود. تنش برشی که در سیالات از تأثیر نیروی وارد بر سطح و یا تأثیر توأم گرادیان سرعت و لزجت سیال حاصل می‌شود به دلیل تأثیر مستقیم بر ساختار جریان، می‌توان اظهار داشت تنش برشی و یا سرعت برشی از مهمترین پارامترهای

اصلی در مطالعه جریان‌های متلاطم، حمل رسوب، هیدرولیک محیط زیست و ساماندهی رودخانه‌ها می‌باشند (Lashkar-Ara et al., 2010). تعادل تنش برشی با مؤلفه افقی وزن سیال، منجر به ایجاد یکنواختی در جریان می‌شود، از طرفی غیریکنواختی توزیع این تنش روی بستر و جداره مجاری روباز به وسیله محققان دیگر به اثبات رسیده است (Khodashenas et al., 2008). نحوه توزیع تنش برشی به عواملی مانند شکل سطح مقطع، ساختار جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی در زبری کانال بستگی دارد (Guo and Julien, 2005). نسبت به سایر مقاطع هیدرولیکی رایج در کانال‌های آبیاری مطالعاتی در مورد تنش برشی و سایر مشخصات هیدرولیکی کانال‌های نیم سهموی انجام پذیرفته است. لذا تحقیق حاضر به منظور بررسی آزمایشگاهی و تعیین میزان و نحوه توزیع تنش‌های برشی مرزی در یک مجرای نیم سهموی، تعیین متوسط سهم تنش برشی بستر و جداره‌ها و تغییرات آن در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شده است. تاریخچه تحقیقات انجام شده در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان، به قرن چهارم قبل از میلاد و کشور یونان باز می‌گردد. دانشمندی مانند شزی، گانگلیت-کاتر و ماینینگ تحقیقات گسترده‌ای را در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان انجام داده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر

سرعت‌های نقطه‌ای در جریانی با عرض نامحدود با لایه برشی، توسط تعریف زیر حاصل می‌شود:

$$V^2 = \frac{8\tau_o}{\rho f} = \frac{8u_*^2}{f} \quad (1)$$

که در آن  $\tau_o$  تنش برش مرزی،  $\rho$  چگالی سیال،  $u_*$  سرعت برشی و  $f$  ضریب دارسی ویسباخ می‌باشد. معادله فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (2)$$

نسبت  $\frac{V}{u_*}$  از طریق ضریب مقاومت با معادله‌هایی که پروفیل

سرعت را تشریح می‌کنند، تعیین می‌شود. Keulegan (1938) با بررسی قوانین حاکم بر جریان متلاطم در مجاری روباز بیان نمود که در هر لایه برشی (لایه مرزی)، سرعت در نزدیک مرز بیشتر متأثر از مرز می‌باشد و با دور شدن از جدار کمتر تغییر می‌کند. جریان در ناحیه جدار (داخلی)، از طریق شرایط جدار که توسط تنش برشی مرزی و زبری آن بیان می‌شود، توصیف می‌شود. اگر برای بیان زبری جدار از یک پارامتر طولی مثلاً ارتفاع متوسط زبری استفاده شود (Ks)، در نتیجه سرعت متوسط  $V$  در این ناحیه تابعی از تنش برشی جدار  $\tau_o$ ، پارامتر زبری Ks، فاصله از جدار  $y$  و ویژگی‌های سیال  $\rho$  و  $\mu$  می‌باشند که با کاربرد تحلیل ابعادی سه پارامتری بعد حاصل می‌شود. از معادله‌های حرکت برای یک سیال غیر قابل تراکم مشهود است که نسبت  $\frac{\tau_o}{\rho}$ ، کمیتی است که توزیع سرعت را تعیین می‌کند. با توجه به اینکه این نسبت دارای واحد مربع سرعت می‌باشد، بنابراین برای بررسی خصوصیات سرعت، این نسبت به شکل زیر به کار می‌رود:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (3)$$

که به آن سرعت برشی گفته می‌شود. نحوه عملکرد لوله پرستون کاملاً مشابه لوله پیتوت است، با این تفاوت که لوله پرستون کاملاً در مجاورت جداره مجرا مستقر می‌شود (Lashkar-Ara et al., 2010). Preston (1954) در تحقیقات خود رابطه‌ای بین تنش برشی جدار و تفاضل فشار استاتیک و فشار در نقطه سکون برقرار کرد و با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه (۴) را استخراج نمود:

$$\log \frac{\tau_o d^2}{4\rho v^2} = 2.604 + \frac{7}{8} \log \left( \frac{\Delta P d^2}{4\rho v^2} \right) \quad (4)$$

تحقیقات گذشته، پارامترهای مؤثر بر مقاومت هیدرولیکی جریان بر پایه استفاده از روش غیرمستقیم اندازه‌گیری شده است (Lashkar-Ara et al., 2010). در این میان Cruft (1965); Roy و Ghosh (1970); Leutheusser و Kartha (1970); Myers (1978); Knight (1981); Knight et al (1982); Hadjipanios و Noutsopoulos (1984); Seckin et al. (2006) و Lashkar-Ara و Fathi-Moghadam (2014) و Jael et al (2009); Fahti- و Arman Moghadam et al (2016) با استفاده از لوله پرستون نسبت به اندازه‌گیری تنش برشی جداره در کانال‌های مستطیلی اقدام نموده‌اند. Leighly (1932) با استفاده از روش تطبیقی (نگاشت) (Conformal Mapping) مطالعه توزیع تنش برشی مرزی در جریان کانال‌های روباز را در مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد مطالعه قرار داد. بر اساس مطالعه‌های ایشان، در غیاب جریان‌های ثانویه، نقش تنش برشی مرزی در بستر باید با مولفه وزن در راستای جریان متعادل شود. Chiu و Chiu (1986) در خصوص اثر متقابل بین جریان‌های اولیه و ثانویه، توزیع

تنش برشی، خصوصیات کانال (از جمله زبری، شیب و مشخصات هندسی) و دیگر پارامترهای وابسته در مجاری روباز تحقیقاتی انجام دادند. هم‌چنین توزیع تنش برشی مرزی می‌تواند توسط تعدادی از مدل‌های عددی مانند مدل تنش جبری که توسط Naot و Rodi (1982) معرفی شد تخمین زده شود. بحث تئوریک مقاومت جریان، برخاسته از قوانین مقاومت برای لایه‌های مرزی و کاربرد موفق آن در لوله‌ها می‌باشد. در جریان کانال‌ها، اصطکاک در مرز، از لایه برشی که شباهت‌های زیادی به لایه مرزی دارد شکل گرفته است. بنابراین معادله‌های مقاومت کانال متمایل به مبانی تئوری لایه مرزی می‌باشند. در واقع این تئوری بدون اصلاح و تعدیل در کانال‌های باز قابل کاربرد نمی‌باشد. اما کاربرد اصولی این تئوری، اطلاعات سودمندی را در توسعه تئوریک مقاومت جریان کانال‌ها فراهم می‌کند. در یک جمله مفهوم اصلی تئوری لایه مرزی این است که با توجه به پارامترهای مختلف مقاومت جریان، می‌توان سرعت متوسط را کمی نمود. مقاومت جریان رابطه‌ای تنگاتنگ با تئوری لایه مرزی دارد و هر نوع درک آن در سایه این تئوری قابل توسعه و پیشرفت می‌باشد. بنابراین در روی بستر مجاری روباز براساس آن جریان نیروئی را به بستر اعمال می‌کند و بستر طبق قانون عمل و عکس‌العمل نیوتن، نیروی مساوی و مخالفی را به جریان اعمال می‌کند، که به آن مقاومت جریان گفته می‌شود (Khodashenas et al., 2008). با توجه به اینکه سرعت متوسط را می‌توان به صورت تابعی از پارامترهای متعدد مقاومت جریان بیان نمود، پس ضریب مقاومت جریان عبارت ساده‌ای از این تابع می‌باشد. بنابراین سرعت متوسط از انتگرال‌گیری

دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفته است. با توجه به امکانات آزمایشگاهی، فلومی به طول ۸/۳ متر، عرض ۸۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر انتخاب گردید. بر طبق توصیه Lane و Carlson (1953) و به منظور عدم تأثیرگذاری شرایط مرزی بالادست و پایین دست بر خصوصیات جریان در محل اندازه گیری، می بایست اندازه گیری خصوصیات جریان در محدوده 2/3L از ابتدای فلوم انجام گیرد (که L طول فلوم می باشد) (شکل ۱). از این رو طول ۸/۳ متر به سه قسمت شامل ۴/۱ متر کانال بالادست، یک متر فلوم لبه چاقویی (محدوده اندازه گیری) و ۳/۲ متر کانال پایین دست با مقطع نیم سهموی تقسیم بندی شد. مقطع نیم سهموی با استفاده از ورق فلزی دو میلی متر ساخته و به منظور حداقل کردن میزان زبری و شبیه سازی جدار صاف چندین نوبت رنگ آمیزی گردید و در فلوم مستطیلی موجود قرار داده شد. به منظور اندازه گیری مستقیم تنش برشی وارده بر سطح مرطوب کانال، طولی معادل یک متر از مابقی فلوم نیم سهموی جدا گردید و روی یک قسمت متحرک که روی یکسری ابزارآلات چاقویی شکل در آستانه حرکت قرار دارد قرار گرفت. این محدوده یک متری از فلوم به گونه ای طراحی شده است که روی چهار لبه تیز چاقویی شکل در آستانه حرکت قرار دارد و بخش مذکور هر لحظه با اعمال کوچک ترین نیرویی تعادل خود را از دست داده و سقوط خواهد کرد و این در حالی است که نیروسنج متصل به این بخش از فلوم مانع از سقوط شده و حکم برقرار کننده تعادل را بازی می نماید (Lashkar-Ara et al., 2010). در این تحقیق به منظور تعیین نحوه توزیع و مقدار تنش برشی موضعی در محیط خیس شده از لوله پرستون با قطر خارجی چهار میلی متر استفاده شد. برای افزایش دقت داده برداری تغییرات فشارهای کل و استاتیک از دو سلول حساس به تغییرات فشار دینامیک با ظرفیت صفر تا 100 میلی بار استفاده شد. این سلول ها قادرند تا تغییرات زمانی فشار استاتیک و کل وارده بر لوله های پرستون را اندازه گیری نمایند. به منظور ثبت داده ها از یک دستگاه جمع آوری داده استفاده گردید. برای تبدیل تفاضل فشار قرائت شده به تنش برشی از روابط واسنجی پتل استفاده گردید. کلیه اندازه گیری ها در ۵/۱ متری از ابتدای کانال و انتهای قسمت متحرک کانال انجام شد. دبی جریان عبوری با استفاده از یک عدد سرریز مستطیلی اندازه گیری شد، سپس با استفاده از سطح مقطع جریان عبوری، سرعت متوسط از این روش محاسبه گردید. عمق جریان در محدوده ۸ سانتی متر تا ۴۰ سانتی متر می باشد. محدوده تغییرات دبی بین ۴ الی ۶۰ لیتر بر ثانیه می باشد. زبری جداره فلوم در دو زبری ۱/۰۱ و ۱/۵ میلی متر و جداره صاف مقایسه گردید. به منظور ایجاد شرایط جریان یکنواخت و حصول شیب هیدرولیکی معادل شیب کف فلوم معادل ۰/۰۰۲ از یک دریچه در انتهای کانال استفاده گردید. در دبی و عمق های مختلف، مقادیر تنش برشی موضعی بستر  $\tau_b$  و تنش برشی موضعی جداره  $\tau_w$  در اطراف محیط خیس شده با استفاده از لوله پرستون و معادله های

که  $\tau_o$  تنش برشی مرزی موضعی بر حسب پاسکال،  $\rho$  چرم مخصوص سیال،  $\nu$  لزجت سینماتیک،  $\Delta P$  تفاوت فشار استاتیک و دینامیک و  $d$  قطر خارجی لوله پیتوت بر حسب متر است. مشکل اصلی این روش به دست آوردن معادله کالیبراسیون برای قطر لوله پرستون است. مطابق نظر Preston (1954) قطر لوله مورد استفاده نباید بیشتر از ۰/۲ ضخامت لایه مرزی باشد. Patel (1965) با ایجاد تغییر در قطر لوله پرستون آزمایش های متعددی را انجام داد که سرآمد تحقیقات وی منجر به معرفی معادله های واسنجی پتل گردید. وی با معرفی پارامترهای بی بعد  $y^* = \log(\tau_o d^2 / 4\rho\nu^2)$  و  $x^* = \log(\Delta P d^2 / 4\rho\nu^2)$  به اصلاح معادله (۴) اقدام نمود و روابط اصلاحی خود را به شرح زیر ارائه کرد:

$$\text{برای } y^* < 1.5 \text{ و } o < D^+ < 11.2:$$

$$y^* = 0.5x^* + 0.037 \quad (5)$$

$$\text{برای } 1.5 < y^* < 3.5 \text{ و } 11.2 < D^+ < 110:$$

$$y^* = 0.8287 - 0.1381x^* + 0.1437x^{*2} - 0.006x^{*3} \quad (6)$$

$$\text{برای } 3.5 < y^* < 5.8 \text{ و } 110 < D^+ < 1600:$$

$$x^* = y^* + 2\log(1.95y^* + 4.1) \quad (7)$$

در روابط فوق  $D^+$  رینولدز لوله بوده و از رابطه  $u_* d / \nu$  به دست می آید. از آنجا که لوله پرستون برای تعیین تنش برشی جداره تحت شرایط با گرادیان صفر توصیه شده است، براساس اظهارات Patel (1965)، اگر پارامتر گرادیان فشار  $\Delta = (\nu / \rho u_*^3) (dp/dx)$  در محدوده  $0.007 < \Delta < 0.015$  قرار گیرد، کالیبراسیون لوله پرستون مناسب بوده و این وسیله قادر خواهد بود که با دقت شش درصد برای اندازه گیری تنش برشی استفاده شود (Patel, 1965). با عنایت به موارد اشاره شده می توان نوآوری این تحقیق را در کمبود اطلاعات در کانال های نیم سهموی نسبت به سایر مقاطع هیدرولیکی، اندازه گیری تنش برشی با استفاده از روش مومنتم و تعیین ضریب اصلاحی لوله پرستون و تلاش برای تعیین این موارد دانست.

### مواد و روش ها

برای سنجش تنش برشی وارده بر بستر و جداره کانال، با تغییراتی که توسط Lashkar-Ara et al. (2010) در روش ارائه شده توسط Fathi-Moghadam (1998) تحت عنوان میز لبه چاقویی (Knife Edge Table) انجام شد و منتج به ابداع شیوه جدیدی تحت عنوان فلوم لبه چاقویی شده بودند استفاده گردید. آزمایش های این تحقیق در آزمایشگاه مدل های هیدرولیکی

دارای مقدار ناچیزی بوده و م‌توان آنرا از معادله‌ها حذف نمود. ولی این پارامتر در شرایط بستر زبر دارای مقادیر مختلفی خواهد بود و به همین دلیل در معادله‌ها منظور شده است. حذف پارامتر عدد رینولدز در شرایط بستر زبر به دلیل ناچیز بودن تأثیر لزوجت در مقابل زبری بلامانع است. از طرفی با توجه به اینکه کلیه آزمایش‌ها در شرایط جریان زبر بحرانی به انجام خواهد رسید لذا می‌توان بسته به نوع زبری بستر به صورت زیر طبقه‌بندی نمود (Lashkar-Ara et al., 2010).

$$\frac{\tau}{\gamma S_f} = f\left(\text{Re}, \frac{A}{T.y}\right) \quad Fr < 1 \quad \text{در شرایط بستر صاف} \quad (10)$$

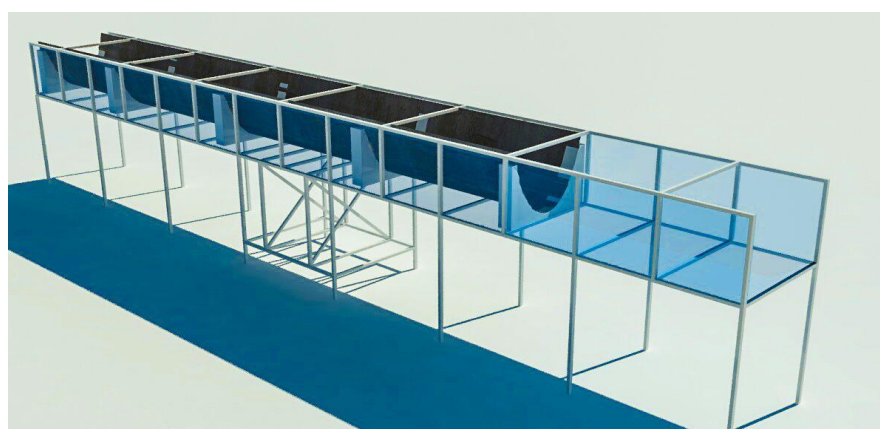
$$\frac{\tau}{\gamma S_f} = g\left(Fr, \frac{K_s}{y}, \frac{A}{T.y}\right) \quad Fr < 1 \quad \text{در شرایط بستر زبر} \quad (11)$$

کالیبراسیون پتل اندازه‌گیری شد. فواصل اندازه‌گیری و تغییر مکان لوله پرستون در مجاورت بستر و جداره پنج سانتی‌متر تعیین شد. برای تعیین پارامترهای مؤثر در شرایط مختلف هیدرولیکی و با استفاده از قضیه  $\pi$  باکینگهام پارامترهای مؤثر در دو حالت شرایط بستر صاف و زبر به دست آمد:

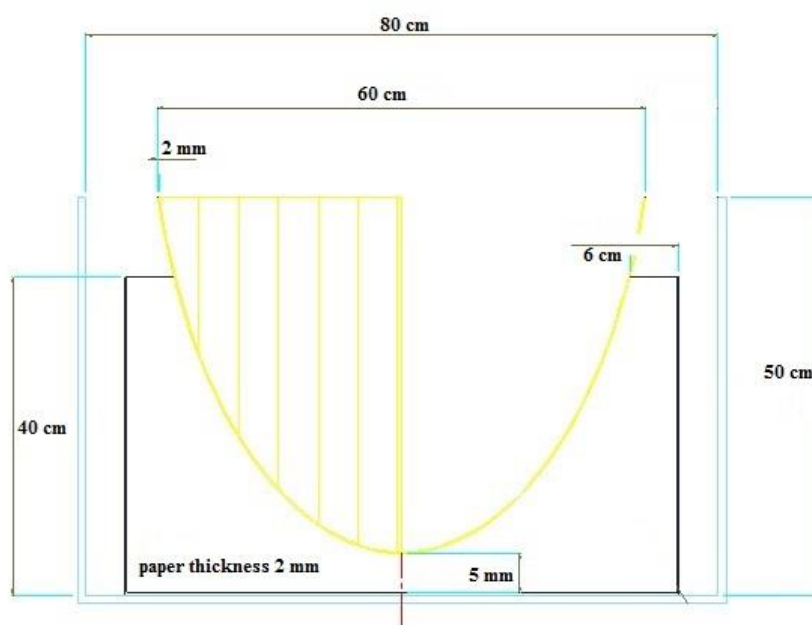
$$f\left(\frac{\tau}{\gamma S_f}, \frac{v}{V_y}, \frac{K_s}{y}, \frac{gy}{V^2}, \frac{A}{T.y}\right) = 0 \quad (8)$$

$$f\left(\frac{\tau}{\gamma S_f}, \text{Re}, Fr, \frac{K_s}{y}, \frac{A}{T.y}\right) = 0 \quad (9)$$

از آنجایی که مقرر شد آزمایش‌ها در شرایط بستر صاف و بستر زبر هیدرولیکی به اجرا درآیند، لذا در شرایط بستر صاف پارامتر  $K_s/y$



(A)



(B)

Fig. 1- A) Schematic figure of knife edge flume B) Geometry of haly parabolic flume

شکل ۱- (A): شماتیک فلوم لبه چاقویی - (B): مشخصات هندسی فلوم نیم سهموی

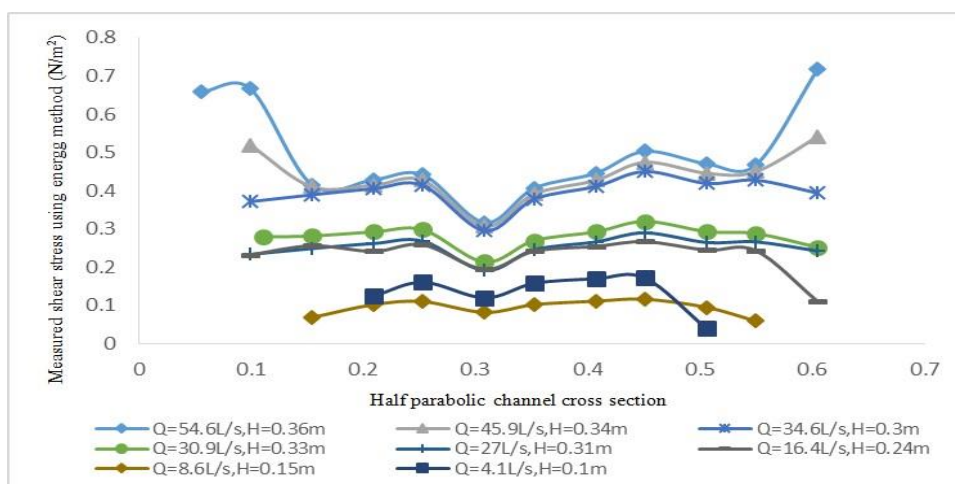


Fig. 2- Local shear stress distribution in channel cross section for different hydraulic conditions  
 شکل ۲- توزیع تنش برشی موضعی در مقطع عرضی در شرایط مختلف هیدرولیکی

متر (۱۵ سانتی‌متر) از مقطع عرضی به‌عنوان بستر کانال و تنش‌برشی این محدوده تحت عنوان تنش برشی موضعی بستر و محدوده‌های باقی‌مانده تحت عنوان تنش‌برشی جداره کانال در نظر گرفته شدند.

هم‌زمان با اندازه‌گیری تنش‌برشی به روش انرژی، برای سنجش تنش‌برشی به روش مومنتم، نیروی وارده بر محیط مرطوب در مقطع اندازه‌گیری فلوم لبه چاقویی توسط نیروسنج نصب شده در زیر بخش متحرک فلوم نیز اندازه‌گیری می‌شد. برای این منظور، ابتدا با استفاده از دریچه نصب شده در انتهای فلوم و به‌منظور دستیابی به عمق‌های مورد نظر، در حالتی که آب درون فلوم ساکن است، مقدار نیروی وارده بر سیستم توسط نیروسنج اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با برقراری جریان درون کانال با نسبت عمق‌های معادل با حالت بررسی شده توسط بار مرده (حالت سکون و بدون حرکت جریان) و پس از دستیابی به شرایط جریان یکنواخت، مقدار نیروی وارده بر محیط مرطوب از طریق نیروسنج دینامیکی ثبت می‌گردید. پس از کسر مقدار بار مرده از این مقدار، مقدار حاصله تحت عنوان نیروی کل برشی وارده بر محیط مرطوب در نظر گرفته می‌شود. از تقسیم نیروی اندازه‌گیری شده بر سطح مقطع جریان عبوری مقدار تنش‌برشی کل وارده بر محیط خیس شده به روش مومنتم به‌دست خواهد آمد. در جداول (۲) و (۳) خلاصه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در جداره صاف و زبر به دو روش مومنتم (روش مستقیم) و روش انرژی (روش غیرمستقیم لوله پرستون) ارائه شده است. با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته در حالت جداره صاف، تنش‌برشی موضعی تابعی از عدد رینولدز و نسبت مساحت به حاصل ضرب عرض سطح آب در عمق جریان می‌باشد. با توجه به مقادیر نسبت یاد شده که همگی زیر یک می‌باشند و به‌منظور تعیین رابطه‌ای با ضریب همبستگی بیشتر، از پارامتر  $\ln(Re)$  در فرمول و محاسبات استفاده خواهد شد. با

### نتایج آزمایشگاهی

به‌منظور استفاده از روش انرژی، به‌دست آوردن شیب خط انرژی از ملزومات این روش می‌باشد. برای ایجاد جریان یکنواخت و اجتناب از جریان متغیر تدریجی، دریچه تنظیم سطح آب در انتهای کانال بگونه‌ای تنظیم می‌شد که تأثیر افت ناگهانی سطح آب به دلیل وجود شیب بستر حذف شود. بدین منظور در کلیه آزمایش‌ها، قرائت عمق جریان در نقاطی به فواصل یک متر از ابتدای کانال تا انتهای آن و با استفاده از خط‌کش انجام می‌شد. هر زمان که عمق جریان در سرتاسر کانال برابر می‌شد، عمل تنظیم و بسته شدن دریچه انتهایی متوقف می‌گردید. با این روش شیب خط انرژی معادل شیب سطح آب می‌گردید. همان‌گونه که اشاره شد، شیب کف کانال در کلیه آزمایش‌ها برابر با  $0.002$  می‌باشد. به‌منظور تفکیک تنش‌برشی جداره‌ها و بستر کانال با توجه به شرایط آزمایشگاهی موجود و براساس نحوه تغییرات تنش‌برشی در مقطع عرضی، محدوده مربوط به جداره‌ها و بستر تفکیک و میانگین‌گیری برای تعیین متوسط تنش‌برشی کف و جداره‌ها انجام شد. در این مرحله از آزمایش‌ها و به‌منظور تفکیک تنش‌برشی موضعی جداره و بستر در مقطع عرضی مورد آزمایش، به بررسی تغییرات توزیع تنش‌برشی موضعی اندازه‌گیری شده به روش لوله پرستون در مقطع عرضی پرداخته شد. به‌منظور تعیین تنش‌برشی موضعی جداره در شرایط مختلف آزمایش، ابتدا تفاضل فشار کل و استاتیک حاصل از لوله پرستون قرائت گردید و سپس با استفاده از منحنی کالیبراسیون پاتل تنش‌برشی موضعی در هر نقطه از مقطع عرضی محاسبه گردید. مطابق شکل (۲) در محدوده عرض  $0.25$  الی  $0.4$  متر از مقطع عرضی شاهد تغییرات افت ناگهانی در مقدار تنش‌برشی اندازه‌گیری شده در دی‌ها و اعماق مختلف هستیم. براین اساس، این محدوده از مقطع عرضی که تقریباً بدون شیب جانبی می‌باشد به‌عنوان منطقه مربوط به بستر در نظر گرفته شد. به بیان دیگر محدوده بین  $0.25$  تا  $0.4$

هستند. برای جداره زبر و با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته، پارامترهای مؤثر مشخص گردید. براین اساس به جای پارامتر بی بعد عدد رینولدز، عدد فرود تأثیرگذار می‌باشد و در محاسبات در نظر گرفته خواهد شد. همچنین عدد بی بعد ارتفاع زبری بر عمق جریان نیز دیگر پارامتر تأثیرگذار در جداره‌های زبر می‌باشد که در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از نرم‌افزار آماری دیتافیت و تحلیل آماری انجام شده بین پارامترهای یاد شده، معادله‌های (۱۰) و (۱۱) برای تنش برشی دیوار و بستر برای جداره‌های زبر به دست آمد:

$$\frac{\tau_w}{\gamma y S_f} = -0.24 \left( \frac{A}{T.y} \right) + 1.0014 \left( \frac{K_s}{y} \right) + 1.0026 Fr \quad (10)$$

$$\frac{\tau_b}{\gamma y S_f} = -0.252 \left( \frac{A}{T.y} \right) + 4.371 \left( \frac{K_s}{y} \right) + 0.938 Fr \quad (11)$$

در شکل (۴)، ضریب همبستگی  $R^2=0.97$  حاکی از دقت و وجود حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و معادله‌های (۱۰) و (۱۱) دارد که نتایج تحلیل آماری فرمول‌های استخراج شده برای جداره و بستر در جدول (۳) ارائه شده است.

استفاده از نرم‌افزار آماری دیتافیت (DataFit9) و تحلیل انجام شده بین پارامترهای یاد شده، معادله‌های (۸) و (۹) برای تنش برشی دیوار و بستر برای جداره‌های صاف به دست آمد (جدول ۱):

$$\frac{\tau_w}{\gamma y S_f} = -14.738 + 8.309 \left( \frac{A}{T.y} \right)^{-1} + 0.263 \ln(\text{Re}) \quad (8)$$

$$\frac{\tau_b}{\gamma y S_f} = -14.734 + 8.41 \left( \frac{A}{T.y} \right)^{-1} + 0.249 \ln(\text{Re}) \quad (9)$$

در روابط فوق  $\tau_w$  و  $\tau_b$  به ترتیب تنش برشی موضعی جداره و بستر،  $\gamma$  وزن مخصوص سیال،  $y$  عمق جریان،  $T$  عرض سطح آب و  $\text{Re}$  عدد رینولدز می‌باشد. معادله‌های استخراج شده حاصل تحلیل آماری بین ۸۰ درصد نتایج آزمایشگاهی و صحت‌سنجی معادله‌های یاد شده با ۲۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی باقی‌مانده، در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به ضریب همبستگی  $R^2=0.98$  بین نتایج خروجی معادله‌های ارائه شده و داده‌های مشاهداتی می‌توان بیان کرد که نتایج از دقت بالا و حداقل انحراف بین نتایج آزمایشگاهی و معادله‌های (۸) و (۹) برخوردار

جدول ۱ - خلاصه نتایج حاصل از تحقیق حاضر در جداره و کف صاف

Table 1- Summary of results in this study for smooth wall and bed

Momentum method				Energy method		depth	Discharge
Bed shear	Wall shear	correction coefficient	Total shear	Shear bed	Wall shear		
0.548	0.561	0.99	0.2604	0.5533	0.5662	0.2251	0.0546
0.472	0.492	1.020	0.2827	0.4631	0.4824	0.2119	0.0493
0.429	0.446	1.020	0.3320	0.4201	0.4370	0.1980	0.0459
0.387	0.439	1.025	0.2310	0.3777	0.4271	0.2000	0.0401
0.364	0.375	1.027	0.2694	0.3549	0.3650	0.1811	0.0346
0.340	0.357	1.031	0.3140	0.3300	0.3462	0.1670	0.0309
0.335	0.344	1.029	0.3414	0.3257	0.3342	0.1538	0.0270
0.319	0.334	1.025	0.3166	0.3113	0.3260	0.1350	0.0201
0.245	0.246	1.029	0.2397	0.2383	0.2390	0.120	0.0164
0.173	0.176	1.036	0.1613	0.1672	0.1697	0.1026	0.0086
0.130	0.134	1.049	0.1335	0.1244	0.1282	0.1849	0.0041

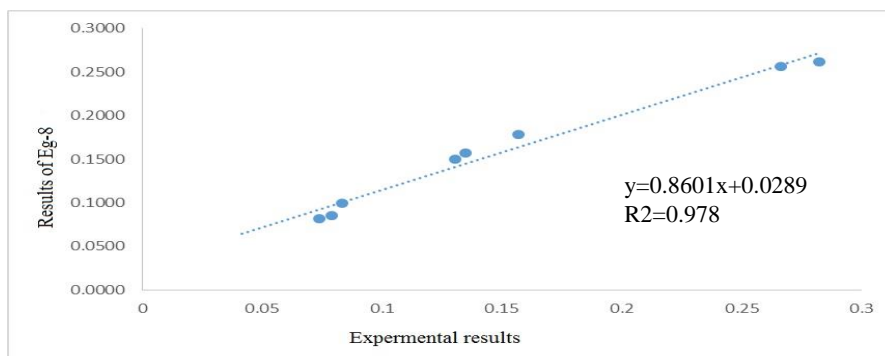
جدول ۲- خلاصه نتایج حاصل از تحقیق حاضر در بستر و جداره زبر  
Table 1-Summary of results in this study bur rough wall and bed

Momentum method			Energy method		Relative roughness	
Bed shear	Wall shear	correction coefficient	Total shear	Shear bed		Wall shear
0.235	0.188	1.004	0.2096	0.2341	0.1876	0.0137
0.302	0.308	1.024	0.3265	0.2951	0.3006	0.0108
0.351	0.371	1.028	0.3679	0.3418	0.3611	0.0081
0.406	0.410	1.071	0.4097	0.3788	0.3825	0.0075
0.395	0.415	1.037	0.4085	0.3806	0.3999	0.0065
0.397	0.415	1.037	0.4099	0.3825	0.4005	0.0061
0.472	0.492	1.063	0.4865	0.4456	0.4635	0.0060
0.475	0.506	1.044	0.2708	0.4552	0.4846	0.0050
0.523	0.537	1.074	0.3262	0.4874	0.4998	0.0048
0.550	0.559	1.081	0.3347	0.5086	0.5176	0.0046
0.559	0.594	1.085	0.2592	0.5150	0.5474	0.0042
0.600	0.620	1.079	0.3312	0.5557	0.5747	0.0041
0.311	0.327	1.014	0.1356	0.3071	0.3224	0.0190
0.368	0.392	1.034	0.1918	0.3563	0.3793	0.0143
0.401	0.410	1.071	0.3044	0.3747	0.3831	0.0114
0.439	0.449	1.068	0.4471	0.4114	0.4205	0.0111
0.459	0.489	1.094	0.4799	0.4198	0.4472	0.0097
0.484	0.513	1.085	0.5046	0.4457	0.4729	0.0092
0.535	0.562	1.087	0.5544	0.4926	0.5169	0.0089
0.561	0.589	1.095	0.3302	0.5122	0.5378	0.0075

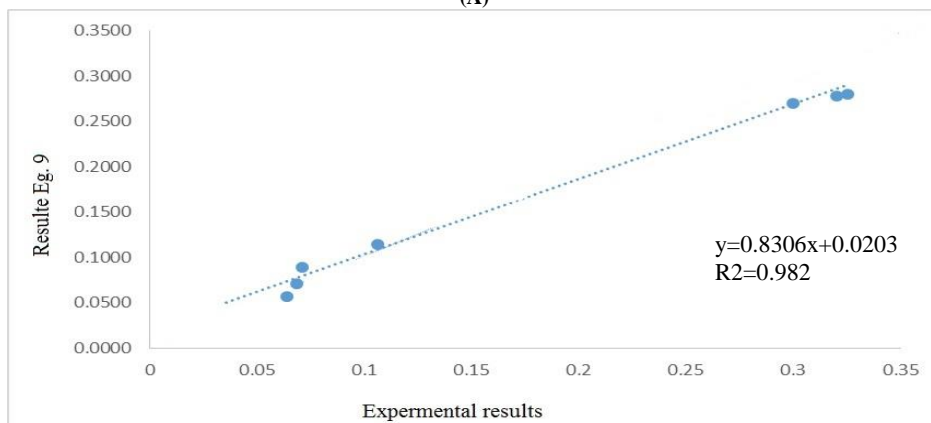
جدول ۳- نتایج تحلیل آماری و خروجی نرم افزار دیتا فیت

Table 3- Statistical results and out put of data fit

explanation	Standard deviator	Total residual	Average residual	Total square of regression	R <sup>2</sup>
Equation 8	0.0255075	-5.61*10 <sup>-14</sup>	-1.6*10 <sup>-15</sup>	0.02016	0.9304
Equation 9	0.0269345	-3.52*10 <sup>-14</sup>	-1.00*10 <sup>-15</sup>	0.02248	0.9206
Equation 10	0.031245	-0.0017599	-2.9*10 <sup>-5</sup>	0.055648	0.9477
Equation 11	0.030478	-0.0003453	-5.7*10 <sup>-6</sup>	0.052925	0.9468

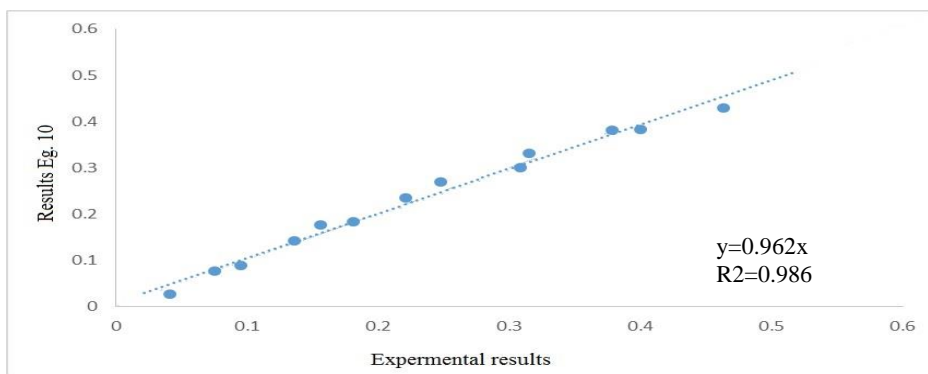


(A)

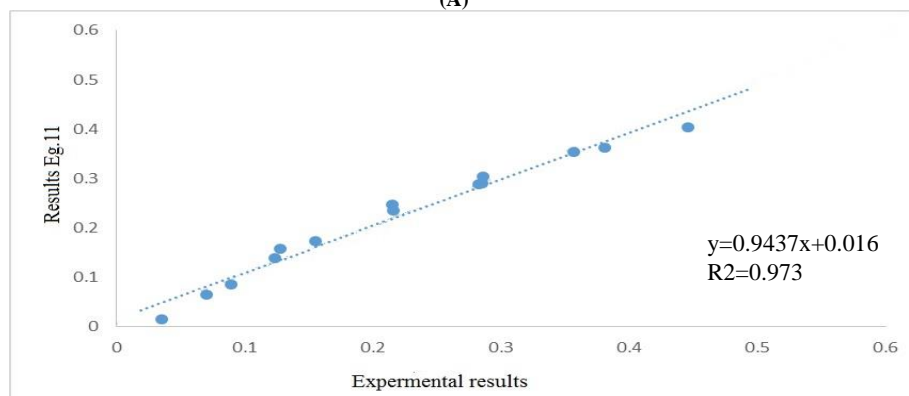


(B)

Fig. 3- Verifying dimensionless wall shear (A) and bed shear (B) for smooth surface  
شکل ۳- صحت سنجی معادله‌ها برای جداره صاف برای تنش برشی بی بعد جداره کانال (A) - بستر کانال (B)



(A)



(B)

Fig. 4- Verifying local dimensionless shear of rough wall (A) and rough bed (B)  
شکل ۴- صحت سنجی معادله‌ها برای جداره زبر برای تنش برشی موضعی بی بعد جداره کانال (A) - بستر کانال (B)



می‌دهد که مقادیر حاصل از اندازه‌گیری به روش مومنتم در بسترهای زبر هیدرولیکی نیز نسبت به روش انرژی از مقادیر بیشتری برخوردار است.

به منظور بررسی و مقایسه کلی نتایج تحقیق حاضر، شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. با بررسی شکل‌های مذکور مشخص است که تنش‌برشی بی بعد اندازه‌گیری شده به روش مومنتم بیشتر از داده‌های برداشت شده به روش انرژی می‌باشد. همچنین با افزایش عدد فرود و سرعت جریان، ضمن افزایش مقدار تنش‌برشی، اختلاف اعداد قرائت شده در دو روش مومنتم و انرژی افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع می‌تواند تأثیر افزایش دبی، سرعت جریان، جریان‌های ثانویه قوی‌تر و به تبع آن نیروی درگ بیشتر به بدنه خیس شده فلوم و قرائت نیروی مذکور توسط نیروسنج تلقی نمود. همچنین بررسی تغییرات نسبت بی بعد سرعت برشی به متوسط سرعت جریان در مقابل نسبت بی بعد سطح مقطع جریان به حاصلضرب عرض سطح آب در عمق جریان در شکل (۷) ارائه شده است. با افزایش نسبت بی بعد سطح مقطع جریان به حاصلضرب عرض سطح آب در عمق جریان میزان سرعت برشی در شرایط مختلف زبری کانال کاهش می‌یابد. افزایش میزان زبری جداره نیز موجب افزایش میزان سرعت برشی جریان می‌گردد.

در ادامه، معادله‌های معرفی شده در تحقیق حاضر برای تعیین متوسط تنش‌برشی موضعی بی بعد بستر و جداره در شرایط بستر صاف و زبر هیدرولیکی از نقطه نظر نحوه عملکرد روش مومنتم در مقابل روش انرژی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور با بهره‌گیری از نرم‌افزار تحلیلگر آمار دیتافیت، پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط روش مومنتم در مقابل روش انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری انجام شده شامل تعیین مقادیر توابع خطا در جدول (۴) خلاصه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تنش‌برشی موضعی بی بعد بستر و جداره حاصل از به‌کارگیری روش مومنتم در مقایسه با روش انرژی دارای ضریب وزن باقی‌مانده منفی بوده و این بدان معنی است که مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مومنتم از روش انرژی بیشتر بوده و به نوعی موید برتری مقادیر حاصل از اندازه‌گیری به روش مومنتم در مقابل اندازه‌گیری به روش انرژی است. مشابه روش یاد شده برای بستر صاف هیدرولیکی، کلیه عملیات و تحلیل‌های آماری لازم برای ارزیابی نتایج حاصل از عملکرد اندازه‌گیری به روش مومنتم در مقابل روش انرژی برای اندازه‌گیری تنش‌برشی بی بعد در بسترهای زبر هیدرولیکی به اجرا درآمد. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری انجام شده و توابع خطای مربوطه در جدول (۵) خلاصه شده است. مقایسه نتایج حاصل از ضریب وزن باقی‌مانده همانند بستر صاف هیدرولیکی نشان

جدول ۴- توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج به روش مومنتم در مقابل انرژی در بستر صاف

**Table 4- Result of error for comparison of energy and momentum method for smooth bed**

CRM	SD	R2	RMSE	Skew	Parameter
-0.01	0.002	0.998	1.2734	-0.147	$\tau_w / \gamma S_f$
-0.01	0.0018	0.998	1.2391	-0.203	$\tau_b / \gamma S_f$

جدول ۵- توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج به روش مومنتم در مقابل انرژی در بستر زبر

**Table 5- Results error for comparison of energy and momentum method for rough bed**

CRM	SD	R2	RMSE	Skew	Parameter
-0.0104	0.011	0.935	1.2393	0.048	$\tau_w / \gamma S_f$
-0.0102	0.002	0.993	1.2651	0.164	$\tau_b / \gamma S_f$

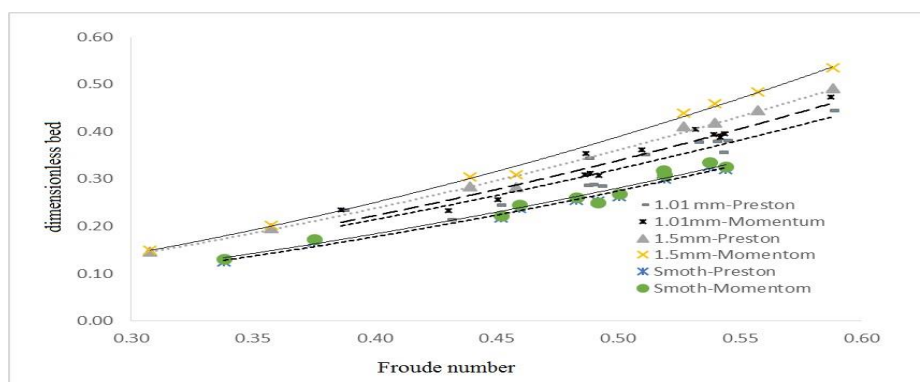


Fig. 5- Variation of dimensionless bed shear with Froude number for smooth and rough bed with energy and momentum methods

شکل ۵ - تغییرات تنش برشی بی بعد بستر در مقابل عدد فرود در بسترهای صاف و زبر به روش‌های مومنتم و انرژی

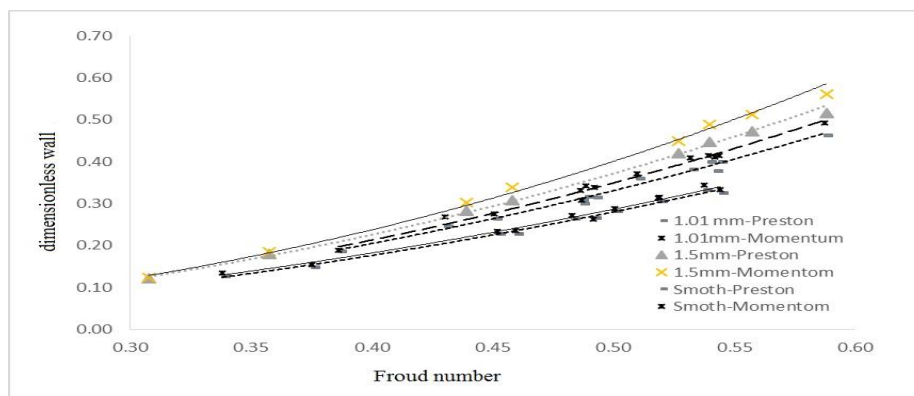
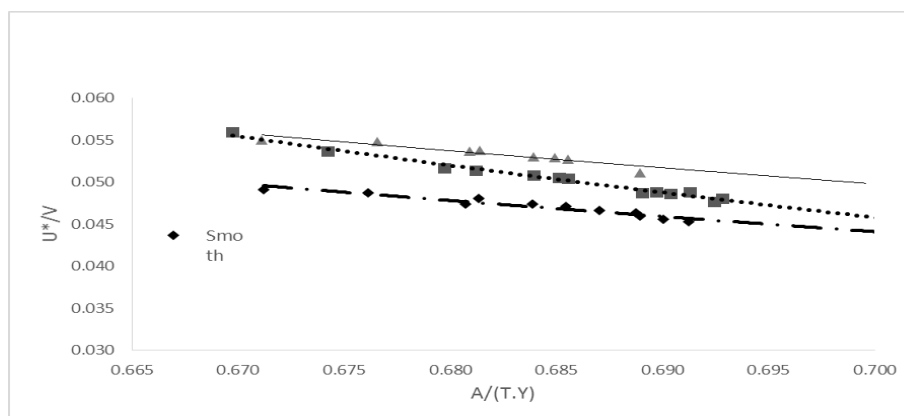


Fig. 6- Variation of dimensionless wall shear with Froude number for smooth and rough wall with energy and momentum methods

شکل ۶- تغییرات تنش برشی بی بعد جداره در مقابل عدد فرود در بسترهای صاف و زیر به روش های مومنتم و انرژی



(Fig 7- Variation of dimensionless shear velocity versus  $A/(T.y)$ )

شکل ۷- تغییرات نسبت بی بعد سرعت برشی به سرعت متوسط در مقابل  $A/(T.y)$

تنش برشی در این محدوده بیش از بستر می‌باشد. با افزایش عدد فرود جریان تفاوت بین مقادیر تنش برشی موضعی بی بعد بستر و جداره بیشتر شد. این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیر افزایش حجم جریان عبوری که منتج به افزایش سرعت جریان و در نتیجه جریان‌های ثانویه بیشتر و قوی‌تری تشکیل می‌گردد که تفاوت میزان تنش‌ها در دو محدوده را سبب خواهد شد. افزایش نسبت بی بعد سطح مقطع جریان به حاصلضرب عرض سطح آب در عمق جریان، سبب کاهش میزان تنش برشی و سرعت برشی گردید. در واقع با افزایش دبی و حجم جریان عبوری که سبب افزایش عمق جریان و عرض سطح آب می‌گردد سبب کاهش نسبت بی بعد سطح مقطع جریان به حاصلضرب عرض سطح آب در عمق جریان خواهد شد و کاهش این نسبت که بر اثر افزایش دبی اتفاق افتاده است سبب افزایش مقدار تنش برشی و سرعت برشی می‌گردد.

### تقدیر و تشکر

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت پذیرفته است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

### نتیجه گیری

نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر برای تعیین تنش برشی جداره و کف برای کانال‌های نیم سهموی با نسبت‌های  $0.1 \leq A/(T.y) \leq 0.6$  به دست آمده است. معادله‌های معرفی شده در تحقیق حاضر برای تعیین متوسط تنش برشی موضعی بدون بعد در جداره‌ها و بستر در دو حالت جداره صاف و جداره زیر براساس ضریب همبستگی بالای ۹۷ درصد دارای حداقل خطا می‌باشند. همچنین با افزایش عدد فرود جریان، تنش برشی بی بعد بستر و جداره به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. همچنین تنش برشی بی بعد جداره‌ها بیش از بستر اندازه‌گیری گردید. زیرا با توجه به شکل مقطع عرضی و شیب نسبتاً زیاد دیواره‌های جانبی و تأثیر جریان‌های ثانویه در این محدوده از مقطع عرضی، مقدار تنش برشی دیواره‌ها بیش از بستر به دست آمد. منشاء اصلی جریان‌های ثانویه که یکی از دلایل تقویت مقدار تنش برشی می‌باشد، به دلیل تفاوت تنش برشی ناشی از تغییرات سرعت جریان در داخل لایه‌های مختلف سیال است که به وجود می‌آید. با توجه به شکل مقطع عرضی و تغییرات سرعت جریان در محدوده نزدیک به جداره‌ها و سطح جریان،

### References

- 1- Arman, A., Fathi-Moghadam, M. 2013. 'Study of Shear Stress Distribution in a Compound Rectangular Section', *Irrigation Sciences and Engineering*, 36(3), pp. 55-66.(in Persian).
- 2- Chiu, C.L. and Chiou, J.D., 1986. Structure of 3-D flow in rectangular open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(11), pp.1050-1067.
- 3- Cruff, R.W., 1965. *Cross-channel transfer of linear momentum in smooth rectangular channels* (No. 1592-B). USGPO,.
- 4- Jael, A., Fathi-Moghadam, M., Bina, M., Ghomeshi, M., Lashkarara, B. 2009. 'Shear stress in smooth trapezoidal channel', *Irrigation Sciences and Engineering*, 33(1), pp. 77-91. (in Persian).
- 5- Lashkarara, B., Fathi-Moghadam, M., Mohammad Vali Samani, H. 2010. 'Wall and bed shear stress in smooth rectangular channels', *Irrigation Sciences and Engineering*, 33(2), pp. 43-52. (in Persian).
- 6- Lashkar-Ara, B., Fathi-Moghadam, M. 2014. 'Analysis of Shear Stress in Rectangular Open Channels Using Force Balance Method', *Journal of Hydraulics*, 9(3), pp. 33-44. (in Persian).
- 7- Fathi-Moghadam, M., LashkarAra, B., Jael, A. 2016. 'Laboratory Determination of Average Shear Stress in Smooth Rectangular and Trapezoidal Open Channels by Direct Method', *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), pp. 35-46.
- 8- Mahmodian SHoshtari M., 2006. *Principal of open channel flow* Shahid Chamran University of Ahvaz Publications. (in Persian).
- 9- Fathi-Moghadam, M., 1998. *Momentum absorption in non-rigid, non-submerged, tall vegetation along rivers.*, Ph.D. thesis university of Waterloo, Canada.
- 10- Ghosh, S.N. and Roy, N., 1970. Boundary shear distribution in open channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*. 96(4), pp. 967-994.
- 11- Guo, J. and Julien, P.Y., 2005. Shear stress in smooth rectangular open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), pp.30-37.
- 12- Kartha, V.C. and Leutheusser, H.J., 1970. Distribution of tractive force in open channels. *Journal of the Hydraulics Division*. 96(7), pp. 1469-1483.
- 13- Keulegan, G.H., 1938. *Laws of turbulent flow in open channels* (Vol. 21, pp. 707-741). US: National Bureau of Standards.
- 14- Khodashenas, S.R., Abderrezzak, K.E.K. and Paquier, A., 2008. Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), pp.598-609.
- 15- Knight, D.W., 1981. Boundary shear in smooth and rough channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(7), pp.839-851.
- 16- Knight, D.W., Demetriou, J.D. and Hamed, M.E., 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(4), pp.405-422.
- 17- Lane, E.W. and Carlson, E.J., 1953, September. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials. In *Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention* (pp. 37-48). ASCE.
- 18- Lashkar-Ara, B., Fathi-Moghadam, M., Shafai-Bajestan, M. and Jael, A., 2010. Boundary shear stresses in smooth channels. *Journal of Food, Agriculture and Enviroment*, 8, pp.132-136.
- 19- Leighly, J.B., 1932. *Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams* (Vol. 6, No. 1-9). University of California Press.

- 
- 20-Myers, W.R.C., 1978. Momentum transfer in a compound channel. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), pp.139-150.
- 21- Naot, D. and Rodi, W., 1982. Calculation of secondary currents in channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(8), pp.948-968.
- 22-Noutsopoulos, G.C. and Hadjipanos, P.A., 1982. Boundary shear in smooth and rough channels-discussion. *Journal. Hydraul. Division., Am. Soc. Civ. Eng.*, 108(6), pp. 809–812.
- 23-Patel, V.C., 1965. Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients. *Journal of Fluid Mechanics*, 23(1), pp.185-208.
- 24-Preston, J., 1954. The determination of turbulent skin friction by means of Pitot tubes. *The Aeronautical Journal*, 58(518), pp.109-121.
- 25-Seckin, G., Seckin, N. and Yurtal, R., 2006. Boundary shear stress analysis in smooth rectangular channels. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(3), pp.336-342.