

تحلیل تنش برشی در کانال‌های روباز با مقطع مستطیلی به روش تعادل نیرو

بابک لشکرآرا^{1*}، منوچهر فتحی مقدم²

1- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول

2- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

* دزفول، صندوق پستی 64615-334

Babak_Lashkarara@yahoo.com

چکیده - تنش برشی یکی از مهمترین عوامل هیدرولیکی در مجاری روباز است. برای اندازه‌گیری تنش برشی از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. مطالعه حاضر با هدف اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در کانال‌های مستطیلی صاف ارائه شده است. در این راستا به منظور اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی کل در محیط مرطوب کانال‌های مستطیلی، شیوه‌ای نوین ارائه شد. در این راستا با ساخت فلومی با تجهیزات دقیق، نیروی کل برشی وارد بر محیط مرطوب با استفاده از سلول‌های حساس به بار دینامیکی اندازه‌گیری گردید. این سیستم اندازه‌گیری، فلوم لبه چاقویی نامیده شد. برای تفکیک تنش برشی موضعی در کف و جداره مجرا، از لوله پرستون با قطر خارجی 4 میلی‌متر مجهز به مبدل فشار تفاضلی استفاده شده است. برای تبدیل اختلاف فشار استاتیکی و دینامیکی قرائت شده در لوله پرستون به تنش برشی، از منحنی واسنجی پتل استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی به روش مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب دارای حداکثر 4 درصد و 8 درصد خطا نسبت به نتایج حاصل از معادله تنوریک می‌باشد.

کلیدواژگان: تنش برشی، لوله پرستون، مومتم، نیروسنج.

1- مقدمه

جداره مجاری روباز به وسیله محققان دیگر به اثبات رسیده است (خداشناس و همکاران 2008). نحوه توزیع تنش به عواملی مانند شکل سطح مقطع، ساختار جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی در زبری کانال بستگی دارد (گو و جولین 2005). تنش برشی برای تعیین مقاومت در برابر جریان که خود تعیین کننده دو پارامتر مهم عمق و سرعت آب در مجاری روباز است، نقش اساسی دارد. همچنین بمنظور تخمین میزان تغییرات در

تعیین میزان تنش برشی و همچنین نحوه توزیع آن بر روی بستر و جداره‌های مجاری روباز یکی از مهمترین مسائل هیدرولیک جریان است. ساختار جریان در مجاری روباز مستقیماً تحت تأثیر نحوه توزیع تنش برشی در محیط مرطوب قرار دارد. تعادل تنش برشی با مولفه افقی وزن سیال، منجر به ایجاد یکنواختی در جریان می‌شود. از طرفی غیریکنواختی توزیع این تنش بر روی بستر و

که در آن τ_w تنش برشی جداره (موضعی) بر حسب پاسکال، D_p قطر خارجی لوله پیتوت بر حسب متر، ρ جرم مخصوص آب، v لزجت سینماتیک و ΔP تفاضل فشار استاتیک و فشار در نقطه توقف در لوله پرستون است. مشکل اصلی این روش بدست آوردن معادله کالیبراسیون برای قطر لوله پرستون است. مطابق نظر پرستون (1954) قطر لوله مورد استفاده نباید بیشتر از $0/2$ ضخامت لایه مرزی باشد (شکل 1).

پتل (1965) با ایجاد تغییر در قطر لوله پرستون آزمایش‌های متعددی را انجام داد که سرآمد تحقیقات وی منجر به معرفی معادلات واسنجی پتل گردید. وی با معرفی پارامترهای بدون بعد $x^* = \log(\Delta P D_p^2 / 4\rho v^2)$ و $y^* = \log(\tau_w D_p^2 / 4\rho v^2)$ (1) اقدام نمود و روابط اصلاحی خود را بشرح زیر ارائه کرد:

$$\text{برای } 0 < y^* < 1.5 \text{ و } D^+ < 11.2$$

$$y^* = 0.5x^* + 0.037 \quad (2)$$

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

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

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

$$x^* = y^* + 2\log(1.95y^* + 4.1) \quad (4)$$

در روابط فوق D^+ از جنس عدد رینولدز بوده و از رابطه $u_* D_p / \nu$ بدست می‌آید. u_* سرعت برشی است و از رابطه $\sqrt{\tau_w / \rho}$ تعیین می‌شود. از آنجا که لوله پرستون برای تعیین تنش برشی جداره تحت شرایط با گرادیان صفر توصیه شده است، بر اساس اظهارات پتل (1965) اگر پارامتر گرادیان فشار $\Delta = (v / \rho u_*^3)(dp/dx)$ در محدوده $-0.007 < \Delta < 0.015$ قرار گیرد، کالیبراسیون لوله پرستون مناسب بوده و این وسیله قادر خواهد بود که با دقت 6% برای اندازه‌گیری تنش برشی استفاده شود (پتل، 1965).

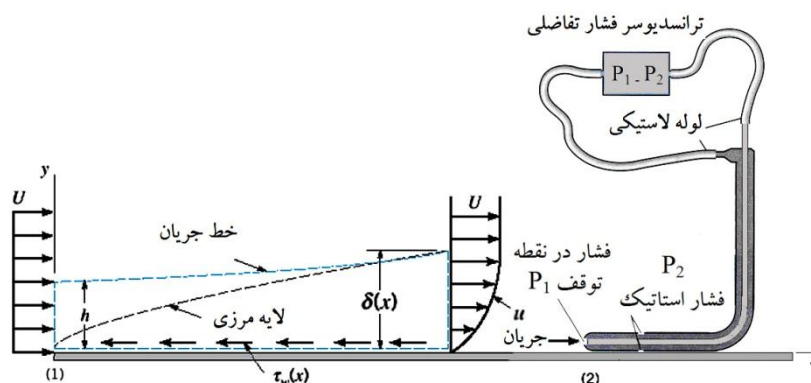
وضعیت ریخت‌شناسی رودخانه و طرح‌های حفاظت از دیواره‌های ساحلی و سیل بندها، آگاهی از میزان تنش برشی وارده بر روی محیط مرطوب رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا تحقیق حاضر به منظور بررسی آزمایشگاهی و تعیین متوسط سهم هر یک از تنش‌های برشی کف و جداره در یک مجرای مستطیلی با بستر صاف با روش مستقیم و مقایسه نتایج حاصل با روش غیر مستقیم و تئوریک ارائه 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. دانشمندانی مانند سززی، گانگیلت-کاتر، و مانینگ تحقیقات گسترده‌ای را در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان انجام دادند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر تحقیقات گذشته، پارامترهای مؤثر بر مقاومت هیدرولیکی جریان بر پایه استفاده از روش غیرمستقیم اندازه‌گیری شده است (مانینگ، 1891). در این میان کریوف (1965)، کارتتا و لتیوشر (1970)، گاش و روی (1970)، میر (1978)، نایت و مکدونالد (1979)، نایت (1981)، ناتاپالیوس و هادجی پانوس (1982)، نایت و دمیتریو (1983)، نایت و همکاران (1984)، سکین و همکاران (2006) و لشکرآرا و همکاران (2010) با استفاده از لوله پرستون نسبت به اندازه‌گیری تنش برشی جداره در کانال‌های مستطیلی اقدام نمودند.

نحوه عملکرد لوله پرستون کاملاً مشابه لوله پیتوت است؛ با این تفاوت که لوله پرستون کاملاً در مجاورت جداره مجرا مستقر می‌شود. پرستون (1954) در تحقیقات خود رابطه‌ای بین تنش برشی جدار و تفاضل فشار استاتیک و فشار در نقطه توقف¹ برقرار کرد و با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه (1) را استخراج نمود:

$$\log \frac{\tau_w D_p^2}{4\rho v^2} = 2.604 + \frac{7}{8} \log \left(\frac{\Delta P D_p^2}{4\rho v^2} \right) \quad (1)$$

1. Stagnation Point Pressure



شکل 1 نمایی از موقعیت نصب لوله پرستون نسبت به لایه مرزی

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho_g R S_f} = 0.01 \times \%SF_w \times \left(1 + \frac{B}{2H}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_g R S_f} = 1 - 0.01 \times \%SF_w \left(1 + \frac{2H}{B}\right) \quad (9)$$

گو و جولین (2005) پس از حل معادلات پیوستگی و مومنتم، متوسط تنش برشی بستر و جداره را در کانال‌های مستطیلی با بستر صاف تعیین نمودند. ایشان نخست بدون در نظر گرفتن جریان ثانویه و ثابت فرض نمودن لزجت گردابی تنش برشی بستر را بصورت سری زیر تقریب زدند.

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_g H S} = \frac{4}{\pi^2} \frac{B}{H} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{t^{2n-1} - 1}{(2n-1)^2} \quad (10)$$

که در آن $t = \exp(-\pi H/B)$ می‌باشد. متوسط تنش برشی جداره از رابطه (11) تقریب زده شد.

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho_g H S} = \frac{B}{2H} \left(1 - \frac{\bar{\tau}_b}{\rho_g H S}\right) \quad (11)$$

سپس با اعمال دو ضریب تجربی، اثرات جریان‌های ثانویه و لزجت گردابی را در محاسبات اعمال نمودند. نهایتاً متوسط تنش برشی کف و جداره‌ها با در نظر گرفتن تقریب دوم و اعمال فاکتورهای اصلاحی به منظور احتساب جریان‌های ثانویه از روابط (12) و (13) تخمین زده شد.

نایت و همکاران (1984) با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های متعدد بر روی یک کانال مستطیلی با بستر و جداره صاف، روابط حاکم بر تعیین تنش برشی متوسط جداره و کف و همچنین تخمین متوسط سرعت برشی بستر را پیشنهاد دادند. ایشان با استفاده از 43 داده آزمایشگاهی در محدوده $0.3 < B/H < 6$ و 12 داده در محدوده $6 < B/H < 15$ معادله تجربی خود را بصورت زیر بر اساس اصل انرژی ارائه کردند.

$$\log(\%SF_w) = -1.4026 \times \log(B/H + 3) + 2.6692 \quad (5)$$

که در آن SF_w درصد نیروی برشی فعال بر روی جداره در واحد طول کانال و B و H به ترتیب عرض و عمق کانال می‌باشند. از طرفی روابط زیر جهت تعیین تنش برشی جداره و کف پیشنهاد گردید:

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho_g H S_f} = 0.01 \times \%SF_w \times \left(\frac{B}{2H}\right) \quad (6)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_g H S_f} = 1 - 0.01 \times \%SF_w \quad (7)$$

که در روابط فوق $\bar{\tau}_w$ و $\bar{\tau}_b$ بترتیب متوسط تنش برشی جداره و کف، ρ دانسیته آب، g شتاب ثقل و S_f شیب خط انرژی می‌باشد. آنان معادلات خود را با اعمال اثر شعاع هیدرولیکی به جای عمق جریان بصورت زیر پیشنهاد دادند:

کمتر و دقت بیشتری برخوردار باشد، ضروری به نظر می‌رسد. هدف تحقیق حاضر معرفی روشی نوین برای تخمین تنش برشی است که بر اساس تبادل نیرو استوار بوده و قادر به اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی می‌باشد.

2- مواد و روشها

از آنجا که اندازه‌گیری تنش برشی در مجاری طبیعی کار دشواری است، لذا معادلات تجربی در فلوم‌های آزمایشگاهی مورد آزمون و تدقیق قرار می‌گیرند تا امکان استفاده از این معادلات در مجاری طبیعی فراهم شود. بنابراین تحقیق حاضر بمنظور بررسی آزمایشگاهی و تعیین میزان تنش برشی کل، کف و جداره در یک فلوم مستطیلی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به اجرا در آمد. فلوم مذکور از جنس پلکسی گلاس با بستر صاف به عرض 80 سانتی متر، طول 8/6 متر با شیب بستر 0/002 می‌باشد. بمنظور اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی وارده بر سطوح مرطوب کانال، طولی معادل یک متر از مابقی فلوم جدا گردید و با نصب یکسری ابزارآلات چاقویی شکل در آستانه حرکت قرار داده شد. در این حالت با نصب بخش جدا شده فلوم بر روی چهار لبه تیز چاقویی شکل، فلوم در آستانه سقوط قرار گرفت و بخش مذکور هر لحظه با اعمال کوچک‌ترین نیرویی تعادل خود را از دست داده و سقوط می‌کند، و این در حالی است که نیروسنج متصل به این بخش از فلوم مانع سقوط آن شده و حکم برقرار کننده تعادل را بازی می‌نماید. در حقیقت همین تعادل برقرار شده توسط نیروسنج دینامیکی¹ امکان ثبت مقدار نیروی درگ وارده از طرف سیال بر جداره‌های فلوم را فراهم می‌آورد. اجزای بخش متحرک فلوم لبه چاقویی در شکل 2 نمایش داده شده است.

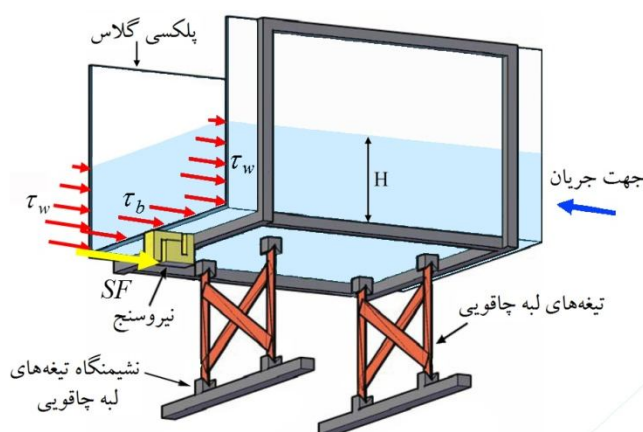
$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \exp\left(-\frac{\pi H}{B}\right) + \frac{\pi H}{4 B} \exp\left(-\frac{H}{B}\right) \quad (12)$$

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H S} = \frac{B}{2H} \left[1 - \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \exp\left(-\frac{\pi H}{B}\right) - \frac{\pi H}{4 B} \exp\left(-\frac{H}{B}\right) \right] \quad (13)$$

صفرزاده و همکاران (1389) به مطالعه پیرامون توزیع تنش برشی جداره در جریان یکنواخت کانال با استفاده از ابزار دقیق و شبیه‌سازی عددی پرداختند. آنان در تحقیقات خود از نوعی حسگر سوزنی برای تعیین تنش برشی کف استفاده کردند. در این ابزار برای ثبت نوسانات فشار از مبدل‌های فشار با دقت 0/1 پاسکال و فرکانس نمونه برداری 100 هرتز استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که تأثیر جریان ثانویه بر نحوه توزیع تنش برشی دیوارهای جانبی بسیار بیشتر از تنش کف کانال است. همچنین آنان نتیجه گرفتند که تنش بستر در نواحی میانی کانال بواسطه وجود نواحی متناوب کم سرعت-پرسرعت دارای توزیع نوسانی می‌باشد.

صفرزاده و صالحی نیشابوری (1391) با استفاده از لوله پرستون سه لوله نسبت به تعیین توزیع تنش برشی در اطراف سازه آبشکن با فرکانس 85 هرتز اقدام نمودند. مزیت اصلی این روش نیاز نداشتن به استقرار حسگر در امتداد جریان موضعی است. آنان با استفاده از این ابزار توزیع تنش برشی بستر پیرامون یک آبشکن منفرد مستقیم در بستر تخت و صلب را اندازه‌گیری نمودند. تحقیقات آنان نشان داد که بیشترین تشدید تنش برشی موضعی بستر در محدوده دماغه و الگوی توزیع در امتداد بخش بیرونی لایه برشی همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود و همچنین شبیه‌سازی عددی دارد.

بنابراین از آنجا که روش پرستون برای تخمین تنش برشی در بسترهای صاف هیدرولیکی دارای اعتبار بوده و علاوه بر واسنجی قطر لوله پرستون به گرادیان فشار نیز حساس است، لذا ارائه روش‌های نوین دیگری که از مشکلات



شکل 2 نمایی از فلوم لبه چاقویی و اجزا تشکیل دهنده سیستم اندازه‌گیری

شد. در این تحقیق برای کاهش خطای حاصل از کاربرد لوله پرستون در تعیین تنش برشی جداره، برای ثبت اختلاف فشار ΔP در لوله‌های پرستون از مبدل فشار تفاضلی با ظرفیت نهایی 200 میلی بار استفاده شد. این مبدل فشار قادر است تا تغییرات زمانی فشار وارده بر نقاط استاتیک و توقف لوله پرستون را با دقت 0/02 FS اندازه‌گیری کند. موقعیت نقاط استاتیک و توقف لوله پرستون در شکل 1 نمایش داده شده‌اند. فرکانس مورد استفاده بهنگام ثبت سیگنال‌های ارسالی از مبدل فشار تفاضلی 100 هرتز و مدت زمان هر یک از قرائت‌ها 20 ثانیه تعیین گردید. سیگنال‌های ارسالی از مبدل فشار مشابه حالت داده‌برداری بار دینامیکی توسط دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال، به کامپیوتر انتقال و سپس متوسط زمانی هر یک از سری سیگنال‌های ارسالی بعنوان متوسط اختلاف فشار ΔP محاسبه گردید.

در هر نسبت ظاهری B/H که در آن B عرض فلوم و H عمق جریان می‌باشد، مقدار تنش برشی موضعی بستر τ_b و تنش برشی موضعی جداره‌ها τ_w در اطراف محیط مرطوب با استفاده از لوله پرستون و معادلات واسنجی پتل (1965) تعیین شد. برای این منظور لوله پرستون در مجاورت جداره و بستر با استفاده از یک نشیمنگاه متحرک دو بعدی تغییر مکان یافت. فواصل این تغییر

نیروسنج مورد استفاده ساخت شرکت لورنز¹ و از نوع اس شکل² با قابلیت ثبت نیروی کششی و فشاری می‌باشد. دقت این نیروسنج معادل 0/03 FS³ با ظرفیت نهایی 10 کیلوگرم می‌باشد.

بر اساس نتایج آزمایش‌های اولیه، تناوب نوسان‌های نیروی برشی ثبت شده توسط نیروسنج دینامیک در مقطع متحرک فلوم لبه چاقویی کمتر از 10 ثانیه تثبیت گردید. لذا بمنظور حصول اطمینان از ثبت کلیه داده‌ها، فرکانس مورد استفاده بهنگام داده‌برداری 50 هرتز و مدت زمان هر یک از قرائت‌ها 20 ثانیه تعیین شد. سیگنال‌های ارسالی از نیروسنج دینامیکی توسط یک دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال⁴ 16 کاناله به کامپیوتر انتقال و سپس با استفاده از نرم‌افزار اسکوپ⁵ متوسط زمانی هر یک از سری سیگنال‌های ارسالی به عنوان متوسط بار دینامیکی وارده بر سیستم اندازه‌گیری، منظور گردید. از تقسیم مقدار نیروی ثبت شده بر محیط مرطوب، متوسط تنش برشی کل حاصل می‌شود.

به منظور تعیین نحوه توزیع و میزان تنش برشی در محیط مرطوب، از لوله پرستون با قطر خارجی 4 میلی‌متر استفاده

1. Lorenz
2. S-Beam
3. Full Scale
4. Data Acquisition
5. Scope

$10^{-3} \times 1/95$ برآورد گردید.

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، آزمایش‌ها تحت شرایط هیدرولیکی یکسان در دو دسته کلی، تحت عنوان اندازه‌گیری تنش برشی به روش مستقیم (تعادل نیرو یا ممتم) در بستر صاف و اندازه‌گیری تنش برشی به روش غیر مستقیم (انرژی) در بستر صاف نامگذاری گردید. به منظور اندازه‌گیری میزان تنش برشی کل وارده بر جداره مرطوب به روش مستقیم، تغییرات دینامیکی نیروی وارده بر محیط مرطوب در مقطع اندازه‌گیری KEF توسط نیروسنج نصب شده در زیر آن، حد فاصل بین بخش متحرک و ثابت فلوم اندازه‌گیری شد (شکل 2).

به‌منظور واسنجی سیستم سنجش نیرو در مقطع اندازه‌گیری KEF ابتدا با تغییر موقعیت دریچه انتهایی به‌منظور دستیابی به نسبت‌های B/H مورد نظر، در حالتی که آب درون فلوم ساکن است، مقدار بار مرده وارده بر بخش متحرک بدون اصطکاک فلوم اندازه‌گیری گردید. سپس با برقراری جریان درون فلوم با نسبت B/H متناظر با حالت سکون و حصول شرایط جریان یکنواخت، مقدار نیروی وارده بر محیط مرطوب از طریق نیرو سنج دینامیکی قرائت گردید. پس از کسر مقدار بار مرده از مجموع بار مرده و زنده، مقدار حاصل تحت عنوان نیروی کل برشی ملاک عمل قرار گرفت. بمنظور افزایش دقت اندازه‌گیری در هر یک از مراحل آزمایش (جریان آب در حال حرکت و ساکن) با اعمال وزنه‌های استاندارد به سیستم واسنجی تعبیه شده در زیر مقطع بخش متحرک کانال KEF، مقدار نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج مورد ارزیابی قرار گرفت. این عمل بطور متوسط بین 3 الی 5 بار، بسته به شرایط آزمایشگاهی، تکرار گردید و پس از تعیین ضریب اصلاحی، مقادیر خالص نیروی مشاهداتی در هر یک از قرائت‌ها محاسبه و متوسط مقادیر مذکور به عنوان نماینده نیروی برشی وارده بر سطح مرطوب ثبت شد. شکل 3 نمایش دهنده 4 تکرار از

مکان‌ها در مجاورت بستر 5 سانتی‌متر و در مجاورت جداره $2/5$ سانتی‌متر تعیین شد. از محاسبه سطح زیر منحنی توزیع عرضی تنش برشی موضعی در بستر و جداره‌ها، به تفکیک نیروی مالشی هر یک از آنها تعیین خواهد شد. از حاصل جمع جبری نیروهای مذکور، نیروی مالشی کل به روش غیر مستقیم حاصل می‌شود. موقعیت مکانی کلیه اندازه‌گیری‌های تنش برشی موضعی در فاصله $4/7$ متری از ابتدای کانال قرار دارد. دبی جریان عبوری با استفاده از یک سرریز مستطیلی کالیبره شده اندازه‌گیری خواهد شد.

3- نتایج آزمایشگاهی

هدف از تحقیق حاضر اندازه‌گیری توزیع تنش برشی در اطراف محیط مرطوب به روش مستقیم و مقایسه نتایج حاصل با روش غیرمستقیم می‌باشد. در این راستا با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی، تلاش شد تا با ایجاد تغییر در عمق جریان، آزمایش‌ها در نسبت‌های مختلف B/H و در محدوده $6/08$ تا $18/6$ به انجام رسند. عرض فلوم ثابت و معادل 80 سانتی‌متر و عمق جریان در محدوده $4/3$ تا $13/2$ سانتی‌متر تغییر داده شد. تمام اندازه‌گیری‌های عمقی توسط عمق سنج دیجیتالی با دقت $0/1$ میلی‌متر انجام گردید. محدوده تغییرات دبی بین $18/56$ الی $105/47$ لیتر بر ثانیه توسط سرریز مستطیلی اندازه‌گیری شد. بمنظور ایجاد شرایط جریان یکنواخت و حصول شیب هیدرولیکی معادل با شیب کف فلوم از یک دریچه در انتهای کانال استفاده شد. به منظور تعیین شیب هیدرولیکی، مقادیر عمق و سرعت جریان در مقاطع متوالی و به فاصله یک متر اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری سرعت از میکرومولینه مدل Nixon استفاده شد. پس از تعیین شیب هیدرولیکی بین مقاطع متوالی و ترسیم پروفیل آن، شیب هیدرولیکی میانگین تعیین شد. متوسط شیب هیدرولیکی در کلیه آزمایش‌ها معادل

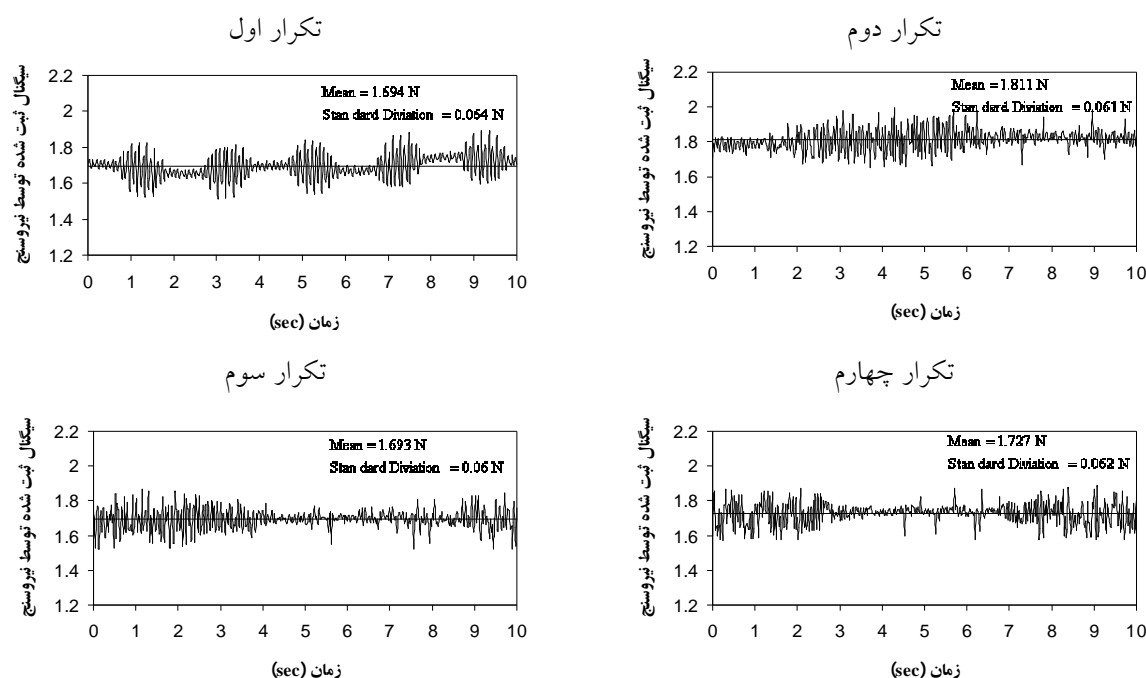
تغییرات اعمال شده در شرایط هیدرولیکی جریان و متوسط قرائت ΔP در لوله پرستون می‌باشد. به منظور تبدیل اختلاف فشار ΔP به تنش برشی از معادلات واسنجی پتل (1965) استفاده گردید که نتایج حاصل از معادلات مذکور تحت عنوان روش غیر مستقیم در جدول 2 خلاصه شده است. در طی استخراج این نتایج فرض شده است که حتی اگر نتایج حاصل از لوله پرستون در محدوده مجاز توصیه شده توسط محققان پیشین قرار نداشته باشد، می‌توان از برقراری تعادل بین تنش برشی حاصل از نیروی مالشی ثبت شده توسط نیروسنج دینامیکی از یکسو و نیروی مالشی حاصل از تنش برشی ثبت شده توسط لوله پرستون در محیط مرطوب از سوی دیگر، نسبت به تعیین ضریب اصلاحی نتایج لوله پرستون اقدام نمود. پس از تعیین ضریب واسنجی، نتایج اصلاح شده حاصل از لوله پرستون برای تعیین تنش برشی کف و جداره فلوم تحت عنوان روش غیر مستقیم در جدول 2 ارائه گردید.

سیگنال‌های دریافت شده از نیروسنج دینامیکی در نسبت $B/H=7/14$ است.

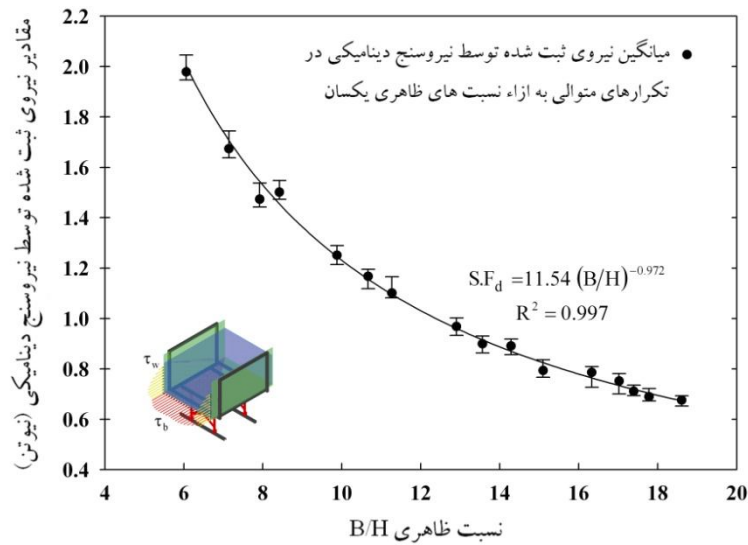
بمنظور ارزیابی نحوه اثر نسبت B/H بر روی نحوه تغییرات نیروی برشی، با تغییر در عمق جریان مراحل آزمایش‌های فوق تکرار گردید. پس از تجزیه و تحلیل آماری، مقادیر میانگین و انحراف از معیار نیروی برشی کل اندازه‌گیری شده در نسبت‌های B/H مشابه، محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل 4 نمایش دهنده مقادیر میانگین و تغییرات انحراف از معیار نیروهای ثبت شده به وسیله نیروسنج نصب شده بر روی مقطع متحرک کانال KEF در هر یک از نسبت‌های B/H می‌باشد. سپس با بهره‌گیری از معادلات رگرسیون توانی بهترین معادله از بین مقادیر مذکور برآزش داده شد (رابطه 14).

$$S.F_d = 11.54 \times (B/H)^{-0.972} \quad (14)$$

به منظور تعیین سهم تنش برشی بستر τ_b و دیواره‌ها τ_w ، با استفاده از لوله پرستون یکسری آزمایش‌های تکمیلی بطور همزمان با اندازه‌گیری نیروی برشی کل در مقطع متحرک فلوم KEF انجام شد. جدول 1 نشان دهنده نحوه



شکل 3 مقادیر سیگنال‌های دریافتی از نیروسنج در چهار تکرار مختلف در نسبت $B/H=7/14$



شکل 4 مقادیر میانگین و انحراف معیار نیروی ثبت شده توسط نیروسنج

نصب شده بر روی مقطع KEF در هر یک از نسبت‌های ظاهری B/H

جدول 1 نتایج مشاهدات آزمایشگاهی به روش‌های مستقیم و غیر مستقیم

عمق H(m)	نسبت ظاهری B/H	دبی Q(lit/s)	تنش برشی کل N/m ²	نیروی برشی کل N	متوسط فشار استاتیک و دینامیک در لوله پرستون mm H2O	
					متوسط بستر	متوسط جداره
0/132	6/06	105/47	1/833	1/950	27/81	21/47
0/112	7/14	82/57	1/603	1/642	23/48	19/04
0/101	7/92	69/47	1/570	1/574	23/32	16/75
0/095	8/42	64/32	1/498	1/483	21/86	16/49
0/081	9/88	50/55	1/337	1/286	19/27	13/48
0/075	10/67	45/43	1/306	1/240	19/02	11/45
0/071	11/27	41/48	1/094	1/030	15/32	10/21
0/062	12/90	33/52	1/064	0/983	14/81	9/48
0/059	13/56	30/61	0/966	0/887	13/15	9/03
0/056	14/29	28/31	0/907	0/827	12/25	8/14
0/053	15/09	26/09	0/863	0/782	11/57	7/52
0/049	16/33	23/03	0/845	0/759	11/34	6/78
0/047	17/02	21/60	0/837	0/748	11/21	6/55
0/046	17/39	20/61	0/823	0/734	10/98	6/42
0/045	17/78	19/92	0/751	0/668	9/81	6/37
0/043	18/60	18/56	0/733	0/649	9/59	5/64

جدول 2 تحلیل نتایج تعیین تنش برشی به روش های مستقیم و غیر مستقیم

نسبت ظاهری B/H	روش غیرمستقیم		روش مستقیم		درصد اختلاف		
	تنش برشی N/m ²		متوسط قرائت	تنش برشی N/m ²		روش غیرمستقیم	روش مستقیم با
	بستر τ_b	جداره τ_w	نیروسنج N	بستر τ_b	جداره τ_w	با معادله تئوری	معادله تئوری
6/06	1/930	1/539	1/996	1/975	1/575	3/42	1/15
7/14	1/664	1/385	1/691	1/714	1/427	4/18	1/30
7/92	1/654	1/238	1/490	1/566	1/173	-1/85	3/56
8/42	1/563	1/222	1/511	1/593	1/245	-2/03	-3/97
9/88	1/400	1/024	1/252	1/363	0/997	-3/78	-1/04
10/67	1/384	0/888	1/157	1/291	0/828	-8/12	-0/85
11/27	1/145	0/803	1/124	1/249	0/876	5/14	-3/49
12/90	1/112	0/753	0/968	1/095	0/741	-3/63	-2/06
13/56	1/002	0/721	0/897	1/014	0/730	1/75	0/61
14/29	0/942	0/659	0/888	1/011	0/707	3/44	-3/66
15/09	0/896	0/615	0/802	0/919	0/630	3/56	1/08
16/33	0/880	0/561	0/768	0/890	0/568	-1/29	-2/46
17/02	0/871	0/545	0/741	0/863	0/539	-4/09	-3/06
17/39	0/856	0/535	0/715	0/834	0/521	-4/29	-1/61
17/78	0/775	0/531	0/697	0/809	0/554	2/93	-1/25
18/60	0/760	0/478	0/673	0/788	0/495	1/30	-2/31

(معادله 15) مقایسه گردید. نتایج این مقایسه در جدول 2 نمایش داده شده‌اند.

$$S.F. = \gamma R S_f (B + 2H) \quad (15)$$

بررسی نتایج نشان می‌دهد که به ازاء $B/H < 8/5$ مقدار نیروی برشی کل حاصل از اندازه‌گیری مستقیم و غیر مستقیم بیشتر از مقدار حاصل از معادله تئوریک می‌باشد و این در حالیست که به ازاء $B/H > 8/5$ این روند نسبت معکوس به خود گرفته و این میزان اختلاف در روش مستقیم حداکثر 3/9 درصد و در روش غیر مستقیم 8/1 درصد می‌باشد.

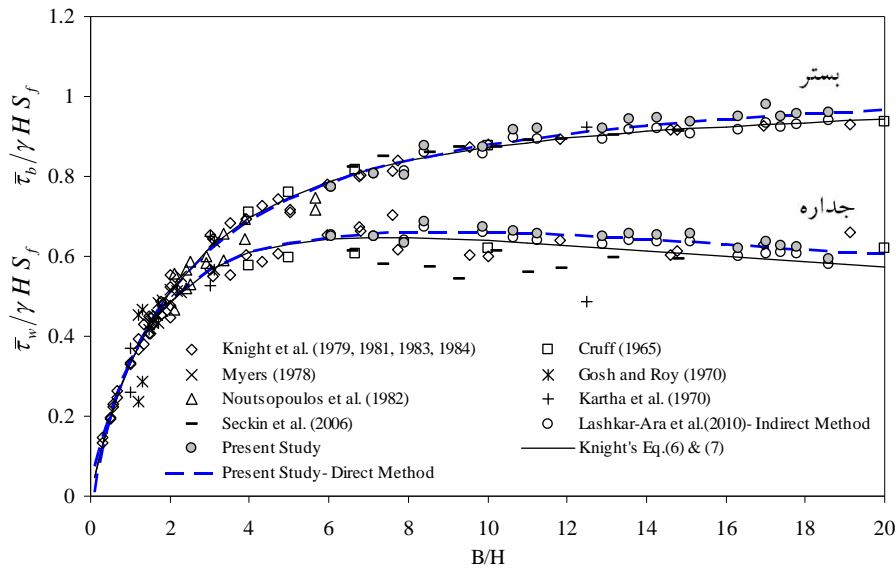
به منظور ارزیابی نتایج تحقیق حاضر از تحقیقات انجام شده توسط کریوف (1965)، کارتا و لتیوشر (1970)، گاش و روی (1970)، میر (1978)، نایت و مکدونالد (1979)، نایت (1981)، ناتاپالیوس و هادجی پانوس (1982)، نایت و دمتریو (1983)، نایت و همکاران

برای تعیین سهم تنش برشی متوسط وارده بر بستر و جداره به روش مستقیم بصورت زیر عمل گردید. ابتدا از مجموع حاصل ضرب متوسط تنش برشی بستر و جداره به ترتیب در عرض فلوم و دو برابر عمق جریان، مقدار نیروی برشی حاصل از روش لوله پرستون (غیر مستقیم) تعیین گردید. سپس با استفاده از روش وزنی، سهم مشارکت تنش برشی بستر و جداره در تولید این نیروی برشی تعیین شد. از حاصل ضرب سهم تنش برشی بستر و جداره به روش غیر مستقیم، در تنش برشی حاصل از نیروی مالشی ثبت شده توسط نیرو سنج، مقادیر تنش برشی بستر و جداره به روش مستقیم تعیین شد. نتایج در جدول 2 نمایش داده شده‌اند.

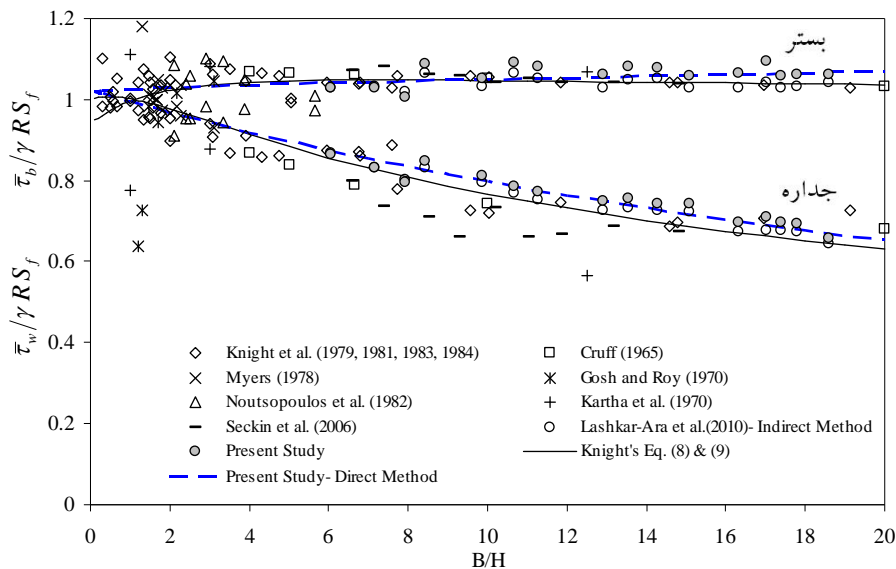
به منظور ارزیابی نتایج حاصل از تحقیق حاضر، نحوه تغییرات نیروی برشی کل اندازه‌گیری شده به روش مستقیم و غیر مستقیم با معادله تئوریک نیروی برشی

(1984)، سکین و همکاران (2006) و لشکرآرا و همکاران (2010) استفاده شده است. برای این منظور کلیه تنش‌های برشی بستر و جداره حاصل از اندازه‌گیری به روش‌های مستقیم و غیر مستقیم با استفاده از پارامترهای γHS_f و γRS_f بدون بعد

گردید و نتایج حاصل در مقایسه با نتایج محققان دیگر در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است. شکل 5 نشان می‌دهد که نتایج حاصل از روش مستقیم به ازای $B/H > 6$ هم در بستر و هم در جداره دارای مقادیر بیشتری نسبت به روش غیر مستقیم می‌باشد.



شکل 5 متوسط تنش برشی بدون بعد بستر $\bar{\tau}_b / \gamma H S_f$ و جداره $\bar{\tau}_w / \gamma H S_f$ در مقابل نسبت B/H



شکل 6 متوسط تنش برشی بدون بعد بستر $\bar{\tau}_b / \gamma R S_f$ و جداره $\bar{\tau}_w / \gamma R S_f$ در مقابل نسبت B/H

4- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از یک فلوم موسوم به فلوم لبه چاقویی، مقدار نیروی برشی کل وارده بر محیط مرطوب در کانال مستطیلی به روش تعادل نیرو (مستقیم) اندازه گیری شد. سپس با استفاده از روش لوله پرستون، نسبت به تفکیک سهم نیروی های وارده بر جداره ها و بستر اقدام شد و به واسطه آن سهم تنش برشی هریک محاسبه گردید. از ترکیب دو روش مستقیم و لوله پرستون، عملاً خطای حاصل از اثر قطر لوله پرستون بر مقادیر تنش برشی ثبت شده به حداقل مقدار خود کاهش یافت. تفاضل نتایج مقادیر تنش برشی به روش مستقیم و معادله تئوری تنش برشی از یکسو و تفاضل نتایج مشابه به روش غیر مستقیم و معادله تئوری تنش از سوی دیگر، ملاک ارزیابی این تحقیق قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که تنش برشی به دست آمده از روش مستقیم حداکثر 4 درصد و در روش غیر مستقیم حداکثر 8 درصد اختلاف نسبت به نتایج حاصل از معادله تئوریک را از خود نشان می دهد. لذا به استناد نتایج این تحقیق می توان چنین بیان نمود که روش مستقیم ارائه شده در این تحقیق از قابلیت و دقت مطلوب تری نسبت به روش غیر مستقیم برخوردار است، لذا می توان بهره گیری از فلوم لبه چاقویی را برای شرایطی که امکان استفاده از روش های غیر مستقیم به سادگی در آن میسر نیست توصیه کرد.

5- فهرست علائم

B	عرض فلوم
B/H	نسبت ظاهری
D_p	قطر خارجی لوله پیستون
H	عمق آب درون فلوم
SF_w	درصد نیروی برشی فعال بر روی جداره در واحد طول کانال
ΔP	تفاضل فشار استاتیک و فشار در نقطه توقف در لوله پرستون
τ_w	تنش برشی موضعی جداره

بررسی روند تغییرات $\bar{\tau}_w/\gamma RS_f$ در مقابل B/H در شکل 6 حاکی از آن است که برای نسبت های $B/H > 3$ مقادیر تنش برشی جداره حاصل از اندازه گیری به روش مستقیم بیش از روش غیر مستقیم می باشد.

بررسی روند تغییرات $\bar{\tau}_w/\gamma HS_f$ در مقابل B/H (شکل 5) حاکی از آن است که به ازاء نسبت های $B/H > 6$ مقادیر تنش برشی جداره به روش مستقیم نسبت به مقادیر نظیر حاصل از مطالعات نایت و همکاران (1984) بین 1 الی 5 درصد بیشتر است. این روند با افزایش B/H افزایش می یابد. بطور مشابه میزان تنش برشی بدون بعد بستر $\bar{\tau}_b/\gamma RS_f$ به ازای $B/H > 10$ بین 1 الی 3 درصد از مقادیر حاصل از مطالعات نایت و همکاران (1984) بیشتر می باشد.

روند تغییرات پارامتر $\bar{\tau}_b/\gamma RS_f$ برای نسبت های $20 < B/H < 8$ در اندازه گیری به روش مستقیم نسبت به روش غیر مستقیم بین 1 الی 3 درصد افزایش نشان می دهد. به ازای مقادیر $B/H < 2$ نسبت تنش برشی بدون بعد جداره و کف، مستقل از روش اندازه گیری بوده و هر دو دارای مقادیر یکسانی می باشند. تنش برشی بدون بعد بستر که با استفاده از شعاع هیدرولیکی بدون بعد شده اند، با افزایش $B/H > 2$ (در واقع با کاهش عمق جریان) روند افزایشی و سپس در مقدار $1/05$ تثبیت می شود که این موضوع بعلا کاهش اثر دیواره ها بر روی جریان می باشد.

از انطباق شکل های 5 و 6 می توان دریافت که به ازای $B/H > 10$ با وجود آنکه از لحاظ تئوریک کانال عریض محسوب می شود و عملاً نحوه اثر شعاع هیدرولیکی و عمق جریان می بایست به یکدیگر نزدیک باشد ولی مقایسه شکل های 4 و 5 نشان دهنده وجود اختلاف 14 درصدی در تنش برشی بدون بعد جداره و 16 درصدی در تنش برشی بدون بعد بستر می باشد که علت آنرا می توان به اثر جریان ثانویه و لزجت گردابه ای ارتباط داد.

Knight, D. W., and Macdonald, J. A., (1979). "Open channel flow with varying bed roughness". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 105, No. HY9, pp. 1167-1183.

Knight, D. W. (1981). "Boundary shear in smooth and rough channels". J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 107(7), pp. 839-851.

Knight, D. W., Demetriou, J. D., and Hamed, M.E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels". J. Hydraul. Eng., 110(4), pp. 405-422.

Lashkar-Ara, B., Fathi-Moghadam, M., Shafai-Bajestan, M. and Jael, A. (2010). "Boundary shear stress in smooth channels", International Journal of Food, Agriculture & Environment. Vol (8), Issue1, pp. 132-136.

Leighly, J. B. (1932). "Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams". Univ. of Calif. Publ. Geography, 6(1), pp. 1-22.

Manning, R. (1891). "On the flow of water in open channels and pipes". Trans. Inst. Civil Eng., Ireland, 20, pp. 161-207.

Myers, W. R. C. (1978). "Momentum transfer in a compound channel". J. Hydraul. Res., 16(2), pp. 139-150.

Noutsopoulos, G. C., and Hadjipanous, P. A. (1982). "Discussion of Boundary shear in smooth and rough channels by D. W. Knight". J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 108(6), pp. 809-812.

Patel, V.C. (1965). "Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients". J. Fluid Mech. 23, pp. 185-208.

Preston, J.H. (1954). "The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes". Journal of the Royal Aeronautical Society 58, pp. 109-121.

Seckin, G., Seckin, N. and Yurtal, R. (2006). "Boundary shear stress analysis in smooth rectangular channels". Canadian Journal of Civil Engineering. 33, pp. 336-342.

 τ_B

تنش برشی موضعی بستر

6- منابع

صفرزاده گندشمین، ا.، صالحی نیشابوری، ع.ا.، زراتی، ر.، قدسیان، م.، (1389). مطالعه توزیع تنش برشی جداره در جریان یکنواخت کانال با استفاده از ابزار دقیق و شبیه‌سازی عددی. مجله هیدرولیک، دوره 5، شماره 1، ص.ص. 51-70.

صفرزاده گندشمین، ا.، صالحی نیشابوری، ع.ا.، (1391). مطالعه توزیع تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای با استفاده از پرستون سه لوله. مجله هیدرولیک، دوره 7، شماره 2، ص.ص. 47-62.

Cruft, R. W. (1965). "Cross-channel transfer of linear momentum in smooth rectangular channels". Water-Supply Paper, 1592-B, U.S. Geological Survey, Center, Miss., B1-B26.

Ghosh, S. N., and Roy, N. (1970). "Boundary shear distribution in open channel flow". J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 96(4), pp. 967-994.

Guo, J. and Julien, P.Y. (2005). "Shear Stress in smooth rectangular open-channel flows". J. Hydraul. Eng., 125(3), pp. 30-37

Kartha, V. C., and Leutheusser, H. J. (1970). "Distribution of tractive force in open-channels". J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 96(7), pp. 1469-1483

Khodashenas S.R., Abderrezzak, K.K. and Paquier, A. (2008). "Boundary shear stress in open channel flow : A comparison among six methods". Journal of Hydraulic Reserch, 146(5), pp. 598-609

Knight, D. W., and Macdonald, J. A., (1979). "Hydraulic resistance of artificial strip roughness". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 105, No. HY6, pp. 675-690.