

تنش برشی در کانال ذوزنقه ای صاف

آرش جاعل^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲، محمود بینا^۳، مهدی قمشی^۴ و بابک لشکرآرا^۵

* نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشکده ی مهندسی علوم آب arashjael60@yahoo.com

۳و۲- دانشیار گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استاد گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۵- استادیار، دانشگاه تکنولوژی جندی شاپور، دزفول

تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۱۶

تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۲۱

چکیده

تنش برشی یکی از مهمترین موارد تحقیق را در مهندسی هیدرولیک به خود اختصاص می دهد؛ زیرا مستقیماً بر ساختار جریان تأثیر می گذارد. در این تحقیق برای مطالعه ی تنش برشی در بستر و جداره ی کانال ذوزنقه ای چندین سری آزمایش در کانال ذوزنقه ای با شیب جدار ۱ به ۱ و در حالت صاف انجام گردید. از پرستون تیوپ برای اندازه گیری تنش برشی استفاده گردید. روابط موجود برای تعیین تنش برشی مورد ارزیابی قرار گرفت و روابطی برای تنش برشی در کانال ذوزنقه ای در حالت صاف با شیب جانبی ۱ به ۱ ارائه شده است. هم چنین تأثیر پارامتر نسبت ظاهری بر مقدار تنش برشی بی بعد مورد ارزیابی قرار گرفته است. درصد نیروی برشی دیوار (SF_w %) نسبت به کل نیروی برشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نشان داده شد که با افزایش نسبت ظاهری مقدار نیروی برشی دیوار کاهش می یابد.

کلید واژه ها: پرستون تیوپ، تنش برشی، درصد نیروی برشی دیوار، کانال ذوزنقه ای، نسبت ظاهری

مقدمه

منظور از فلوم های آزمایشگاهی در مطالعه ی این موضوع استفاده زیادی می شود. جدا کردن تنش برشی دیوار و یا بستر کانال از تنش برشی کل اهمیت زیادی دارد. در مواردی نظیر حمل و انتقال رسوبات، طراحی ریپ رپ و طراحی کانال های پایدار آگاهی از تنش برشی دیوار اهمیت بسیار دارد. مقطع ذوزنقه ای معمول ترین شکل برای کانال های آبیاری می باشد. با وجود این نسبت به تحقیقاتی که برای تعیین تنش برشی مرزی در کانال های مستطیلی صورت گرفته است (نایت و همکاران، ۱۹۸۴ و ۱۹۹۴؛ و سکین، ۲۰۰۶ و لشکر آرا و همکاران، ۲۰۱۰) تحقیقات به مراتب کمتری

یکی از مهمترین مسائل در کانال های باز تعیین تنش برشی مرزی است. به طوری که ساختار جریان مستقیماً توسط توزیع تنش در کانال ها شکل می گیرد. بنابراین تنش برشی مرزی به عنوان پارامتری اساسی در مطالعه ی فرایندهایی هم چون تلاطم و حمل رسوبات اهمیت می یابد. مطالعات متعددی بصورت تئوریک (جنو و جولین؛ ۲۰۰۵)، آزمایشگاهی (نایت و همکاران؛ ۱۹۸۴ و ۱۹۹۴) و عددی (دی کاکوئیری و همکاران؛ ۲۰۰۸) در مورد تنش برشی و توزیع آن صورت گرفته است؛ تعیین تنش برشی در عمل بسیار مشکل است به همین

که $\bar{\tau}_w$ و $\bar{\tau}_b$ بترتیب تنش برشی متوسط در دیوار و بستر می باشند. ρ جرم حجمی سیال است ، g شتاب ثقل و s شیب خط انرژی می باشد.

پراساد و منسن (۲۰۰۲) عبارتی تحلیلی برای محاسبه ی درصد نیروی برشی وارد بر دیوار در کانال دوزنقه ای با زبری یکنواخت ارائه دادند. آنان اثرات جریان ثانویه را نادیده گرفتند.

$$\%SF_w = \begin{cases} 25 \left(4 - \frac{b}{h} \right) & \frac{b}{h} \leq 2 \\ \frac{100}{b/h} & \frac{b}{h} \geq 2 \end{cases} \quad (۴)$$

جئو و جولین (۲۰۰۵) با حل معادلات مومنتم و پیوستگی و با در نظر گرفتن اثرات جریان های ثانویه رابطه های تحلیلی زیر را برای تعیین تنش برشی بستر و دیوار در کانال صاف مستطیلی ارائه دادند:

(۵)

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g h s} = \frac{4}{\pi} \text{Arctg} \left[\exp \left(\frac{-\pi h}{b} \right) \right] + \frac{\pi h}{4 b} \exp \left(-\frac{h}{b} \right)$$

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g h s} = \frac{b}{2h} \left(1 - \frac{\bar{\tau}_b}{\rho g h s} \right) \quad (۶)$$

یانگ و لیم (۱۹۹۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵) روشی تحلیلی برای محاسبه ی تنش برشی بستر و دیوار در کانال دوزنقه ای ارائه دادند. آنان از مقایسه ی $\frac{b}{h}$ و $\frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta}$ برای تعیین عریض بودن و یا باریک بودن کانال استفاده کردند بدین ترتیب :

چنان چه $\frac{b}{h} \geq 2 \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta}$ باشد کانال

عریض و کم عمق بوده و از معادلات زیر برای تعیین تنش برشی در حالت صاف استفاده می شود:

در کانال های دوزنقه ای صورت گرفته است (گش و ری، ۱۹۷۰؛ تامیناگا و همکاران، ۱۹۸۹ و پراساد و منسن، ۲۰۰۲).

تحقیقات در کانال های غیر مستطیلی اندک است؛ بنابراین هدف این تحقیق تعیین درصد نیروی برشی روی دیوار در کانال دوزنقه ای با شیب جداره ی ۴۵ درجه است. یک سری معادله ی رگرسیون غیر خطی برای تعیین میزان درصد نیروی برشی جدار و تنش برشی در کانال های دوزنقه ای صاف ارائه گردیده است.

تئوری و پیشینه

نایت و همکاران (۱۹۹۴) با استفاده از ۴۳ سری اطلاعات هیدرولیکی با محدوده ی $6 < b/h < 30$ معادله ی بی بعد زیر را برای کانال های دوزنقه ای و مستطیلی با زبری همگن به دست آوردند:

(۱)

$$\%SF_w = \exp[-3.23 \times \log(b/h + 3) + 6.146]$$

که $\%SF_w$ ، درصد نیروی وارد بر جداره ی کانال می باشد. b عرض کانال و h عمق جریان می باشد. آنان از ۱۲ سری اطلاعات هیدرولیکی با محدوده ی $6 < b/h < 15$ برای صحت سنجی معادله ی پیشنهادی استفاده کردند. آنان با استفاده از اصل انرژی مقدار تنش برشی متوسط وارد بر دیوار و بستر را به صورت زیر بیان کردند:

(۲)

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g h s} = 0.01 \times \%SF_w \times \left(\frac{b}{2h} \right)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g h s} = 1 - 0.01 \times \%SF_w \quad (۳)$$

همکاران، ۱۹۹۶) و غیرمستقیم (چاو، ۱۹۵۹؛ پرستون، ۱۹۵۴؛ پورتر و همکاران، ۲۰۰۰ و بوکلمن و همکاران، ۲۰۰۸) تقسیم بندی کرد. از بین انواع روش های اندازه گیری تنش برشی، از تیوپ پرستون میتوان به عنوان متداول ترین روش اندازه گیری تنش برشی نام برد. تیوپ پرستون در حقیقت شکل اصلاح شده ی لوله ی پیتو است که توسط پرستون (۱۹۵۴) برای اندازه گیری تنش برشی بصورت غیر مستقیم ابداع شده و بر روی دیوار و یا بستر قرار می گیرد. پاتل (۱۹۶۵) معادله ی کالیبراسیون زیر را ارائه داد.

$$\text{اگر } y^* = 0.5x^* + 0.037 \quad y^* < 1.5 \quad (14)$$

$$\text{اگر } 1.5 < y^* < 3.5$$

$$y^* = 0.8287 - 1.1381x^* + 0.1437x^{*2} - 0.0060x^{*3} \quad (15)$$

$$\text{اگر } 3.5 < y^* < 5.3$$

$$x^* = y^* + 2 \log(1.95 y^* + 4.1) \quad (16)$$

که x^* و y^* توسط معادلات (۱۷) و (۱۸) محاسبه می شوند.

$$x^* = \log_{10} \left(\frac{\Delta P d^2}{4 \rho v^2} \right) \quad (17)$$

$$y^* = \log_{10} \left(\frac{\tau_0 d^2}{4 \rho v^2} \right) \quad (18)$$

بدین ترتیب ابتدا x^* محاسبه می شده و سپس y^* محاسبه می گردد. در صورت احراز صحت فرض مقدار y^* مورد قبول قرار می گیرد. در روابط (۱۷) و (۱۸)، d : قطر خارجی لوله ی پرستون، τ_0 : تنش برشی مرزی، ρ : جرم حجمی

$$\frac{\overline{\tau_b}}{\rho g h s} = 1 + \frac{h}{b} \frac{1}{\tan \beta} - \psi \frac{h}{b} \frac{1}{\sin \beta} \quad (7)$$

$$\frac{\overline{\tau_w}}{\rho g h s} = \frac{1}{2} \psi \quad (8)$$

که β زاویه دیوار جانبی با سطح افق می باشد و ψ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\psi^3 + \frac{2h}{b \sin \beta} \psi - 2 \left(1 + \frac{h}{b} \frac{1}{\tan \beta} \right) = 0 \quad (9)$$

چنان چه $\frac{b}{h} < 2 \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta}$ باشد کانال عمیق

و باریک بوده و از معادلات زیر برای تعیین تنش برشی در حالت صاف استفاده می شود:

$$\frac{\overline{\tau_b}}{\rho g h s} = \frac{b}{4h} \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\overline{\tau_w}}{\rho g h s} = \frac{b}{4h \psi^2} \varepsilon \quad (11)$$

که ε و ψ از رابطه های زیر به دست می آیند:

$$\varepsilon = \frac{\sin \beta}{\psi - \cos \beta} \quad (12)$$

$$\left(\frac{1}{\psi} \right)^3 + \frac{b \sin \beta}{2h} \left[\frac{4h}{b \tan \beta} \left(1 + \frac{h}{b} \frac{1}{\tan \beta} \right) + 1 \right] \times \left(\frac{1}{\psi} \right) - 2 \left(1 + \frac{h}{b} \frac{1}{\tan \beta} \right) = 0 \quad (13)$$

روش اندازه گیری تنش برشی

روش های اندازه گیری تنش برشی را می توان به دو دسته روش های مستقیم (وینتر، ۱۹۷۷؛ فرنهولز

توسط سرریز و عمق آب توسط خط کش های نصب شده در کانال اندازه گیری می گردد. عدد رینولدز جریان در آزمایش ها بین ۶۲۱۱ تا ۱۰۳۶۰۹ متغیر است؛ بنابراین جریان در محدوده ی جریان متلاطم می باشد. هم چنین استفاده از پلاکسی گلاس شرط هیدرولیکی صاف را برای دیوار و بستر تضمین می کند. با وجود این با در نظر گرفتن ارتفاع معادل زبری برابر با $10^{-3} \times 1/5$ میلیمتر برای پلاکسی گلاس (تایت، ۱۹۸۱) حداکثر عدد رینولدز برشی برابر با ۰/۰۶۸ به دست می آید. بنابراین می توان اطمینان داشت که آزمایش ها در شرایط صاف هیدرولیکی انجام گرفته اند.

پرستون تیوپ برای اندازه گیری فشار دینامیک و استاتیک بصورت موضعی و تبدیل تفاوت فشار به تنش برشی موضعی طبق قانون پاتل به کار برده شد. قطر خارجی پرستون تیوپ برابر با ۴ میلیمتری باشد. تیوپ بر روی کالسکه ای در بالای کانال نصب شده است و بصورت عمود بر بستر و جداره ی قرار گرفته است. فاصله اندازه گیری ها در بستر برابر با ۲ سانتیمتر می باشد. در جداره ی حداکثر فاصله اندازه گیری تنش برشی موضعی برابر با ۲ سانتیمتر می باشد. برای دبی مشخص عمق آب توسط خط کش های مدرج در نقاط مختلف کانال اندازه گیری می شود.

فشار استاتیک و دینامیک با استفاده از ترانسسمیتر تفاضلی فشار (مدل Dwy-PT616) با محدوده ی فشار ± 76 میلیمتر آب و دقت ۰/۲۵٪ و پایداری ۱٪ انجام گرفته است. یک تبدیل کننده ی سیگنال آنالوگ به داده های دیجیتال (مدل RL-PAXP) برای تولید داده های قابل اطمینان برای کامپیوتر و نرم افزار اکتساب^۱ داده استفاده شده است. از فرکانس ۱۰ نمونه در ثانیه و مدت زمان ۳۰ ثانیه برای به دست آوردن داده ها در هر آزمایش

سیال، ΔP : اختلاف فشار استاتیک و دینامیک و U : لزجت کینماتیک سیال می باشد. طریقه استفاده از معادله ی پاتل بدین صورت است که بعد از محاسبه ی x^* و به تبع آن، y^* می بایست y^* در محدوده ی مورد نظر برای شرط کاربرد قرار گیرد.

کالیبراسیون تیوپ پرستون و مسائل مربوط به دقت آن در شرایط مختلف جریان مانند جریان در لوله ها و کانال ها و یا جریان های با گرادیان فشار معکوس باعث شده است معادلات مختلفی برای کالیبراسیون پرستون ابداع گردد (کساب، ۱۹۹۳ و زاگارولا و همکاران، ۲۰۰۱) با این وجود معادله ی پاتل به عنوان مشهورترین معادله ی برای تعیین تنش برشی موضعی مورد استفاده قرار می گیرد (تایت و همکاران، ۱۹۹۴ و لشکرآرا و همکاران، ۲۰۱۰).

مواد و روش ها

در این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات جریان بر تنش برشی مرزی در کانال دوزنقه ای چندین سری آزمایش صورت گرفته است. پرستون تیوپ برای اندازه گیری تنش برشی محلی و هم چنین تعیین نیروی برشی استفاده شده است. برای اندازه گیری تنش برشی در محیط خیس شده ی کانال چندین سری آزمایش صورت گرفت. کانال مورد آزمایش دارای مقطع دوزنقه با سطح صاف هیدرولیکی از جنس پلاکسی گلاس به طول ۸/۳ متر و عرض کلی ۰/۸ متر (عرض بستر ۰/۲ متر) و شیب جانبی با $Z=1$ می باشد. به دلیل محدود بودن دبی حداکثر عمق آب در آزمایش ها برابر با ۲۰ سانتیمتر می باشد. شیب فلوم در تمام آزمایش ها ثابت و برابر با ۰/۰۰۲ می باشد. دبی جریان توسط تانک با هد ثابت تهیه می شود. شرایط جریان ماندگار و یکنواخت و کاملاً متلاطم می باشد. دبی

اندازه گیری تنش برشی، اندازه گیری گردید و با استفاده از روش خطوط همسرعت دبی کانال دوزنقه ای به دست آمد. عمق جریان از ۲/۵ تا ۱۹ سانتیمتر با استفاده از عمق سنج با دقت ± 0.1 میلیمتر قرائت گردید.

در شکل (۱) تصویر فلوم آزمایشگاهی به همراه تیوپ پرستون نشان داده شده است. در این تحقیق از ۳۶ سری اطلاعات هیدرولیکی استفاده شده است. در جدول (۱) خصوصیات آماری پارامترهای مختلف آورده شده است.

استفاده شده است. متوسط زمانی داده های جمع آوری شده به عنوان مقدار متوسط تفاضل فشار برای آنالیز تنش برشی در بستر و دیوار در نظر گرفته شد. از معادلات کالیبراسیون پاتل برای تبدیل قرائت های فشار به تنش برشی مرزی استفاده گردید. با رسم تنش برشی در نقاط مختلف برای هر آزمایش منحنی به دست می آید که مساحت زیر آن برای تعیین نیروی برشی متوسط در بستر و یا دیوار در نظر گرفته شد. به منظور کنترل صحت اندازه گیری دبی جریان توسط سرریز لبه تیز پایین دست، سرعت از طریق پروب میکرومولینه نوع Nixon و در مقطع



شکل (۱) - فلوم آزمایشگاهی و تیوپ پرستون

جدول (۱) خصوصیات آماری داده های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل

پارامتر	تعداد	میانگین	میانه	محدوده ی تغییرات	کمینه	بیشینه
b/h	۳۶	۲/۱۲۴۵	۲/۰۰	۱۲/۲۰	۰/۳	۱۲/۵۰
$\frac{\tau_b}{\rho g h s}$	۳۶	۰/۶۶۱۹	۰/۶۵۷۸	۰/۵۲	۰/۴۱	۰/۹۴
$\frac{\tau_w}{\rho g h s}$	۳۶	۰/۵۸۸۰	۰/۵۸۷۸	۱/۶۴	۰/۴۱	۱/۰۹۵

جدول (۲) تنش های برشی متوسط بی بعد اندازه گیری شده در بستر و دیوار

$\frac{b}{h}$	$\%SF_w$	$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g h s}$	$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g h s}$
۱/۰۰	۷۰/۱۶	۰/۵۹۶۲	۰/۵۰۹۷
۱/۱۶	۶۴/۹۳	۰/۶۹۱۴	۰/۵۳۳۴
۱/۳۰	۷۸/۹۸	۰/۶۲۴۶	۰/۹۷۷۹
۱/۴۰	۶۶/۸۹	۰/۴۸۶۴	۰/۴۹۱۳
۲/۲۶	۵۳/۹۰	۰/۵۵۱۰	۰/۵۱۵۴
۳/۰۹	۵۷/۴۰	۰/۴۱۳۳	۰/۵۸۸۲
۴/۴۸	۵۰/۴۷	۰/۶۴۴۷	۱/۰۹۵۱
۷/۵۹	۲۳/۵۱	۰/۹۳۸۳	۰/۸۱۶۹

نتایج و بحث

با استفاده از معادله ی کالیبراسیون پاتل برای اندازه گیری فشار تیوپ پرستون در این آزمایش تنش برشی محلی برای بستر و دیوار ها در عمق های مختلف با گرادیان هیدرولیکی ثابت و برابر با 2×10^{-3} اندازه گیری گردید. سپس با استفاده از میانگین گیری وزنی، تنش برشی متوسط در دیوار و بستر کانال دوزنقه ای شکل به دست آمد. در جدول (۲) مقادیر تنش متوسط بی بعد شده در بستر و دیوار به همراه مقادیر $\%SF_w$ ارائه شده است. در شکل (۲) درصد نیروی برشی دیوار در مقابل نسبت ظاهری (b/h) به همراه مقایسه با سایر تحقیقات نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود اکثر داده های اندازه گیری شده در محدوده ی ضریب اطمینان ۹۰٪ قرار می گیرند که نشان دهنده دقت آزمایش ها می باشد.

با استفاده از رگرسیون گیری غیر خطی رابطه ی زیر برای محاسبه ی درصد نیروی برشی دیوار ($\%SF_w$) برحسب نسبت ظاهری (b/h) با توجه به داده های اندازه گیری شده در این تحقیق و دیگر محققان ارائه شده است.

(۱۷)

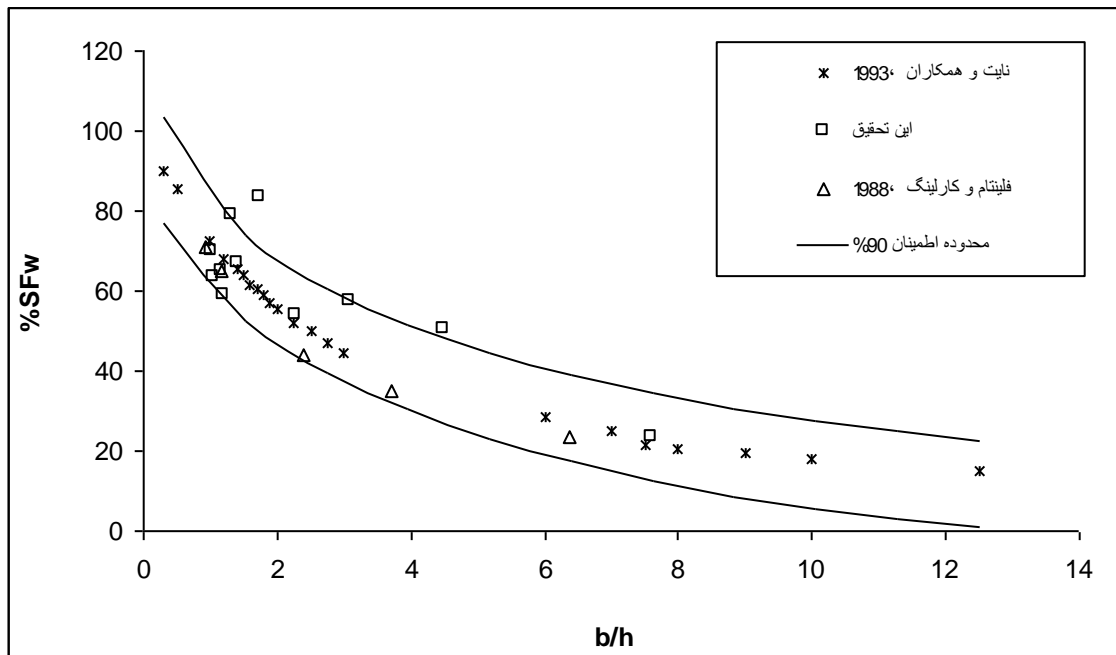
$$\%SF_w = 80.2035 \times 0.88251 \left(\frac{b}{h}\right) \times \left(\frac{b}{h}\right)^{-0.13581}$$

$$(RMSE=3/86, R^2=0/9)$$

هم چنین معادله ی پراساد و مانسون (۲۰۰۲) می تواند بصورت زیر تصحیح شود:

(۱۸)

$$\%SF_w = \left\{ \begin{array}{l} 18.87 \left(4.85 - \frac{b}{h} \right) \quad \frac{b}{h} \leq 2 \\ \frac{1}{0.01554 + 0.00078 \times (b/h)^{1.753378}} \quad \frac{b}{h} > 2 \end{array} \right\}$$

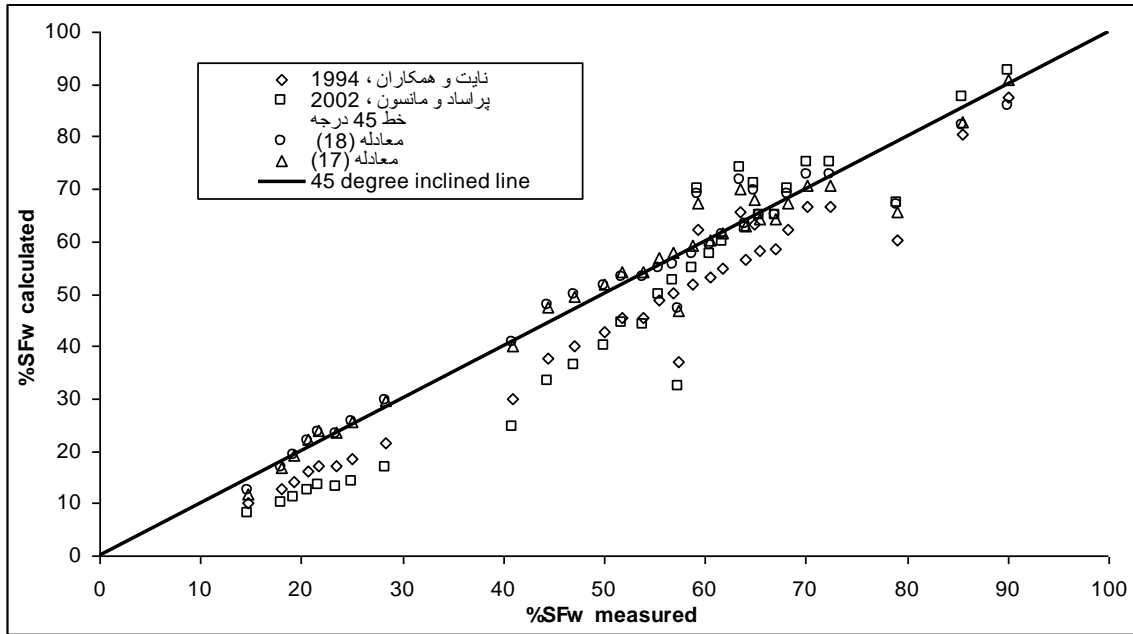


شکل (۲) ارزیابی دقت انجام آزمایش ها در تخمین SF_w در این تحقیق با آزمایش ها دیگر محققان

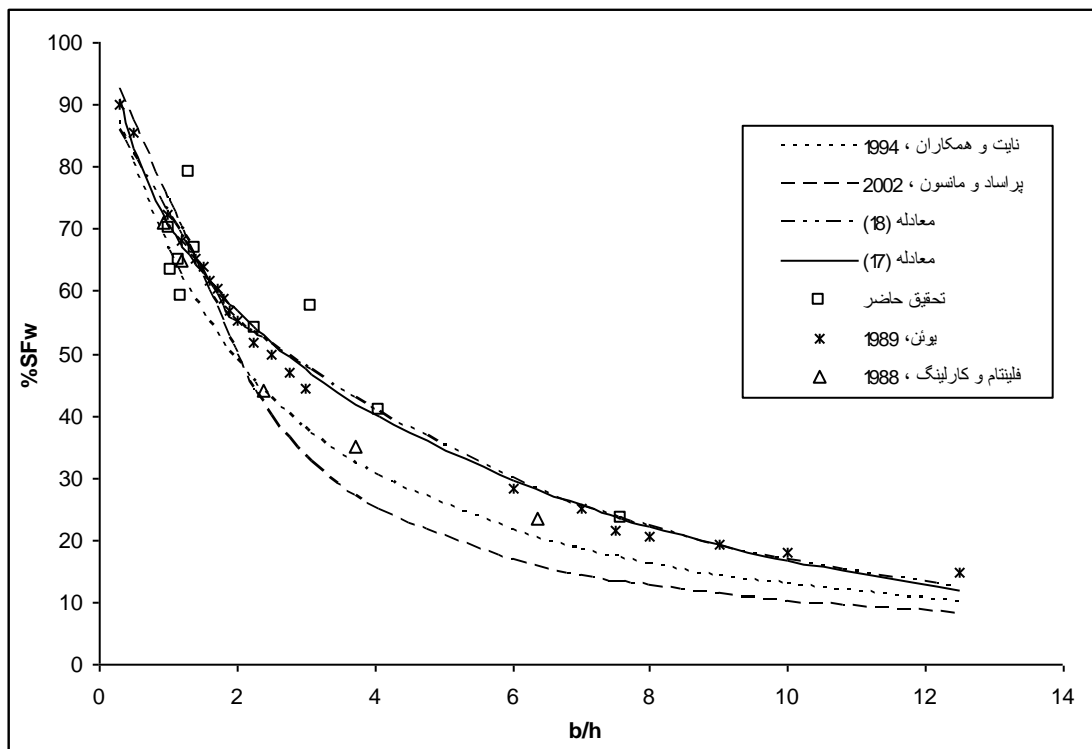
است. همانطور که ملاحظه می شود در نسبت ظاهری ۱ حدود ۶۲٪ نیروی وارده بر جدار کانال بر دیوار وارد می شود با افزایش نسبت ظاهری مقدار آن بصورت غیر خطی کاهش می یابد و پس از گذشتن از نسبت ظاهری ۱۰ شیب تغییرات آن حدود ۲٪ و ناچیز می گردد. در نسبت ظاهری ۱۰ درصد ۱۸٪ می باشد. هم چنین در نسبت ظاهری حدود ۲/۵ مقادیر نیروی وارد بر بستر و دیوار یکسان می باشد.

در شکل (۳) مقادیر SF_w اندازه گیری شده در مقابل مقادیر محاسبه ی شده به روش های مختلف ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود معادله ی پراساد و مانسون (۲۰۰۲) تا SF_w حدود ۶۰ درصد مقادیر پایین تری نسبت به مقدار واقعی اندازه گیری شده SF_w نشان می دهند اما از SF_w حدود ۶۰ درصد به بالا دقت رابطه مذکور بهبود می یابد اما تخمین بالاتری از مقدار تنش برشی ارائه می دهد.

در شکل (۴) تأثیر نسبت ظاهری بر SF_w در کانال دوزنقه ای صاف با شیب جداره ی $Z=1$ ترسیم شده



شکل (۳) مقایسه ی مقادیر %SFw اندازه گیری شده در مقابل مقادیر اندازه گیری شده به روش های مختلف



شکل (۴) تأثیر نسبت ظاهری بر %SFw

همانطور که مشاهده می شود معادله ی پراساد و مانسون (۲۰۰۲) به ازای نسبت ظاهری بزرگتر از ۲ تخمین پایین تری از درصد نیروی برشی وارد بر دیوار ارائه می دهد و دارای دقت پایین تری نسبت به دیگر روابط می باشد. در اینجا معادله ی (۱۷) به دلیل داشتن دقت بالاتر نسبت به دیگر روابط پیشنهاد می شود. در ادامه تحقیقات پیشین اعداد بی بعد تنش برشی اندازه گیری شده در بستر و دیوار توسط نایت و همکاران (۱۹۹۳) [بر گرفته از پایان نامه یوئن، ۱۹۸۹] و فلینتام و کارلینگ (۱۹۸۸) با داده های این تحقیق مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۵) محدوده ی اطمینان ۹۵٪ در اندازه گیری تنش برشی بستر نشان داده شده است. در شکل (۶) ملاحظه می شود که سهم تنش برشی متوسط بستر به تنش برشی متوسط در مقطع که از معادله ی انرژی به دست می آید، از حدود ۰/۴۳ در نسبت ظاهری برابر با ۰/۳ تا حدود ۰/۹۲ در نسبت ظاهری برابر با ۱۲/۵ تغییر می کند

معادله ی پیشنهادی برای تخمین تنش برشی متوسط بستر و دیوار به ازای نسبت های ظاهری

موجود می باشد، به صورت زیر ارائه می گردد:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = 0.545 \left(\frac{b}{h} \right)^{0.222} \quad (19)$$

(برای $0.3 \leq \frac{b}{h} \leq 12.5$ ،

$$RMSE = 0.07499, R^2 = 0.76$$

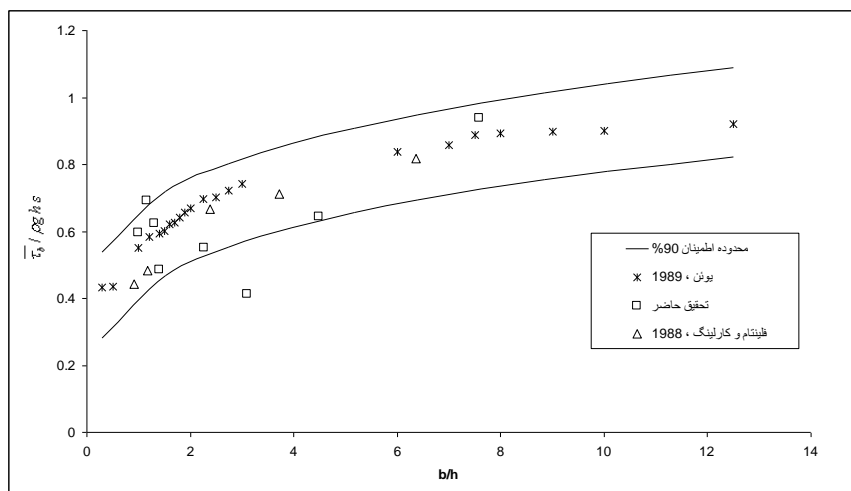
هم چنین می توان از معادله ی (۲۰) برای محاسبه ی تنش برشی بستر در نسبت های ظاهری مختلف استفاده کرد:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = 1 - 0.00621 \times \%SF_w \quad (20)$$

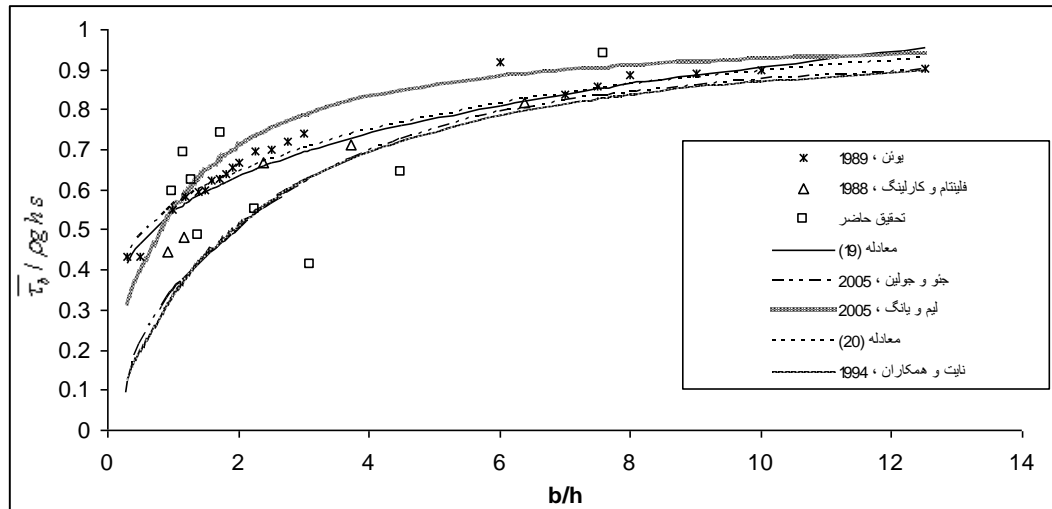
$$(RMSE=0.012, R^2=0.78)$$

ه $\%SF_w$ از معادله ی (۱۷) به دست می آید.

در شکل (۶) و جدول (۳) نتایج روابط پیشنهاد شده با معادله ی نایت و همکاران (۱۹۹۴)، جئو و جولین (۲۰۰۵) و لیم و یانگ (۲۰۰۵) مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل (۵) محدوده ی اطمینان ۹۰٪ در داده های موجود در اندازه گیری تنش برشی بستر



شکل (۶) بررسی و مقایسه ی تغییرات تنش برشی بی بعد بستر در مقابل نسبت ظاهری به روش های مختلف

در شکل (۷) محدوده ی اطمینان ۹۰٪ برای داده های بی بعد تنش برشی دیوار ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود تنش برشی بی بعد دیوار از حدود ۰/۴ در نسبت ظاهری ۰/۳ به حدود ۰/۷ در نسبت ظاهری ۱۲/۵ می رسد. با استفاده از رگرسیون گیری غیر خطی رابطه ی (۲۱) برای تخمین تنش برشی دیوار به دست آمد.

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g h s} = \frac{0.73018 \times \left(\frac{b}{h}\right)}{0.5070 + \left(\frac{b}{h}\right)} \quad (21)$$

$$\text{برای } 0.3 \leq \frac{b}{d} \leq 12.5$$

$$RMSE = 0.076 \quad R^2 = 0.64$$

هم چنین می توان از معادله ی (۲۲) تنش برشی بی بعد در دیوار را به دست آورد:

همانطور که ملاحظه می شود:

۱- با افزایش نسبت ظاهری، تنش برشی بی بعد بستر (که از تقسیم تنش برشی به دست آمده در بستر توسط پرستون تیوپ به تنش برشی به دست آمده از روش انرژی، یا به عبارت دیگر: $\bar{\tau}_b / \rho g h s$ به دست می آید) بصورت غیر خطی افزایش می یابد. با افزایش نسبت ظاهری نرخ رشد تنش برشی بی بعد در بستر کاهش می یابد.

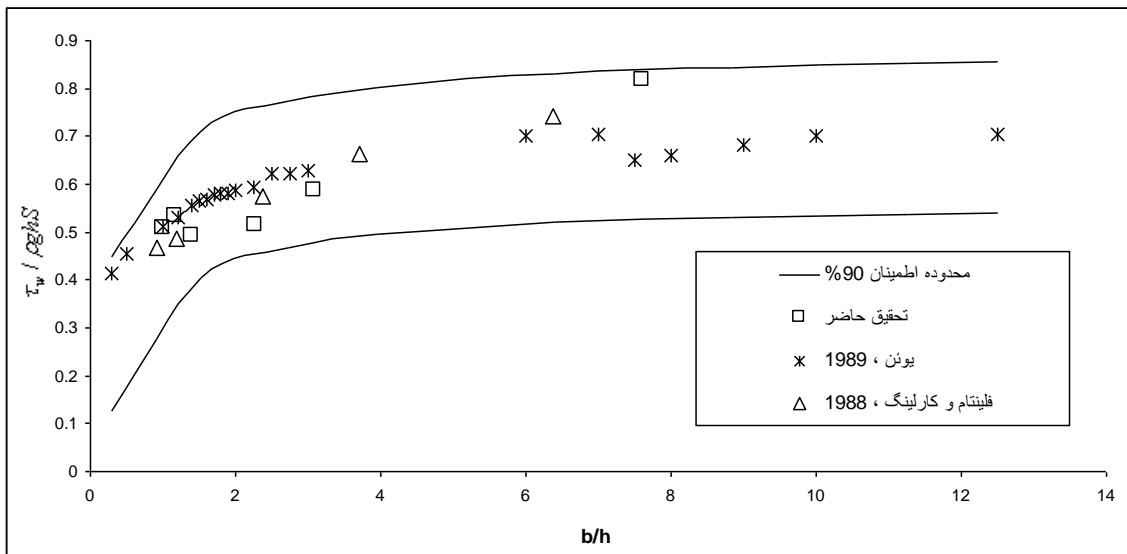
۲- معادلات نایت و همکاران (۱۹۹۴) و جئو و جولین (۲۰۰۵) در نسبت های ظاهری مختلف تخمین پایین تری از تنش برشی بی بعد بستر ارائه می دهند. هم چنین با افزایش نسبت ظاهری دقت معادلات جئو جولین (۲۰۰۵) و نایت و همکاران (۱۹۹۴) بهبود می یابد. دلیل این امر ممکن است این باشد که با افزایش نسبت ظاهری سطح جریان به حالت مستطیلی نزدیکتر گشته و از این رو شرایط استخراج معادلات نزدیکتر می گردد.

(۲۲)

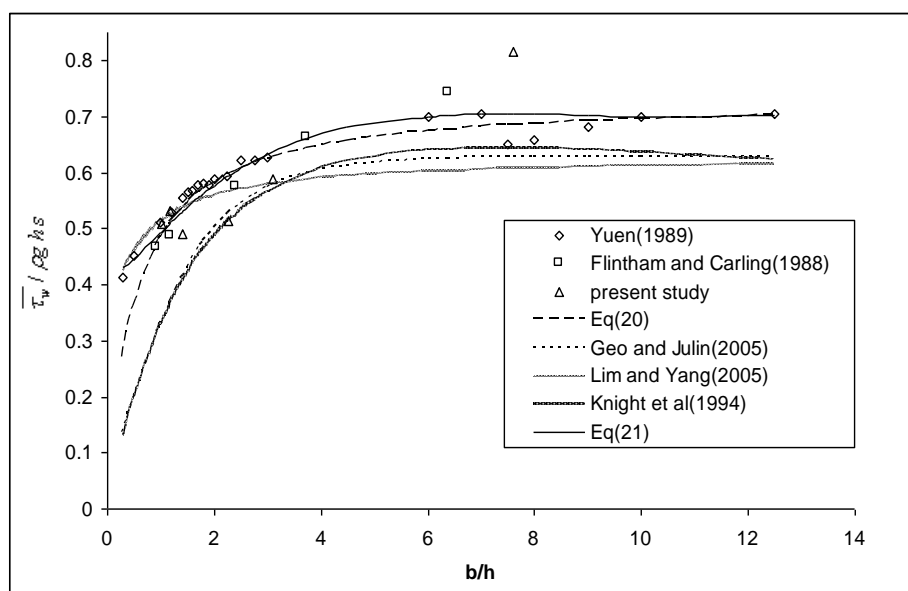
(RMSE=0.033 و $R^2=0.86$)

که SF_w % از رابطه ی (۱۷) به دست می آید.

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g h s} = \frac{0.00378 + 0.00331 \times \left(\frac{b}{h}\right)}{1 + 0.01796 \times \left(\frac{b}{h}\right) - 0.00293 \times \left(\frac{b}{h}\right)^2} \times \% SF_w$$



شکل (۷) محدوده ی اطمینان ۹۰٪ برای داده های بی بعد تنش برشی دیوار



شکل (۸) ارزیابی گرافیکی تأثیر نسبت ظاهری بر دقت روش های مختلف در تنش برشی بی بعد دیوار

جدول (۳) ارزیابی آماری دقت روابط مختلف در تعیین تنش برشی بستر و دیوار

معادله ی	پارامتری بعد				معادله ی	پارامتری بعد			
	%Err _{Ave}	%Err _{Max}	%Err _{Min}	RMSE		%Err _{Ave}	%Err _{Max}	%Err _{Min}	RMSE
نایت وهمکاران(۱۹۹۴)	۳۱/۰۰	۷۷/۴۳	۳/۰۶	۰/۳۶۷	نایت وهمکاران(۱۹۹۴)	۲۱/۳۰	۶۷/۴۶	۰/۱۴	۰/۲۷۵
جئو و جولین(۲۰۰۵)	۲۳/۲۰	۷۸/۵۷	۱/۶۲	۰/۲۸۸	جئو و جولین(۲۰۰۵)	۲۲/۵۲	۷۷/۰۸	۱/۷۱	۰/۲۹۱
لیم و یانگ(۲۰۰۵)	۱۱/۸۷	۹۱/۲۸	۰/۷۴	۰/۱۹۹	لیم و یانگ(۲۰۰۵)	۱۱/۰۳	۷۳/۰۱	۰/۳۴	۰/۱۸۴
این تحقیق، Eq(19)	۸/۴۴	۶۹/۴۲	۰/۶۶	۰/۱۴۷	این تحقیق، Eq(21)	۹/۴۷	۷۲/۳۸	۰/۱۹	۰/۱۷۹
این تحقیق، Eq(20)	۸/۱۷	۷۱/۷۱	۰/۲۰	۰/۱۵۳	این تحقیق، Eq(22)	۸/۰۱	۷۲/۷۲	۰/۱۰	۰/۱۶۵

متوسط درصد خطای نسبی و %Err_{Max} و %Err

Min بترتیب حداکثر و حداقل درصد خطای نسبی می باشد.

(۲۱)

$$\% E_{rr} = \left| \frac{\bar{\tau}_{predicted} - \bar{\tau}_{measured}}{\bar{\tau}_{measured}} \right| \times 100$$

(۲۲)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{\tau}_{predicted} - \bar{\tau}_{measured}}{\bar{\tau}_{measured}} \right)^2}$$

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق را می توان بصورت زیر نوشت:

۱- با توجه به این نکته که

تحقیقات کم تری در کانال های دوزنقه

ای نسبت به کانال های مستطیلی تاکنون

انجام گرفته است، آزمایش های

آزمایشگاهی برای تعیین تنش برشی بستر

و دیوار و درصد نیروی برشی دیوار به کل

نیروی برشی (%SF_w) در کانال دوزنقه ای

با شیب جداره ی ۱:۱ و در حالت صاف با

همان طور که مشاهده می شود :

۱- همانند تنش برشی بی بعد بستر با

افزایش نسبت ظاهری، تنش برشی بی بعد

دیوار (که از تقسیم تنش برشی به دست آمده

در دیوار توسط پرستون تیوپ به تنش برشی به

دست آمده از روش انرژی، یا به عبارت دیگر:

$\tau_w / \rho g h S$ به دست می آید) بصورت غیر

خطی افزایش می یابد و با افزایش نسبت

ظاهری نرخ رشد تنش برشی بی بعد در

دیوار کاهش می یابد. هم چنین نرخ رشد تنش

برشی دیوار کمتر از رشد تنش برشی بستر در

نسبت های ظاهری مختلف می باشد. ۲- تنش

برشی بی بعد در معادلات نایت و

همکاران(۱۹۹۴) جئو و جولین(۲۰۰۵) و لیم و

یانگ(۲۰۰۵) تخمین پایین تری از مقدار تنش

برشی دیوار در کانال دوزنقه ای ارائه می دهند.

برای ارزیابی دقت معادلات در تخمین تنش

برشی بستر و دیوار از معیارهای درصد خطای

نسبی بین اندازه گیری و پیش بینی شده توسط

رابطه ی مورد نظر (رابطه ی ۲۱) و RMSE

(رابطه ی ۲۲) استفاده شده است. هرچه مقدار

این دو پارامتر به صفر نزدیک تر باشد دقت

رابطه بیشتر است. در جدول (۳) %Err_{Ave}

این است که علاوه بر سادگی، از دقت بالاتری نسبت به دیگر معادلات موجود برخوردار می باشند.

علائم:

b=	عرض بستر کانال
g=	شتاب ثقل
h=	عمق آب
s=	شیب خط انرژی
%SF _w =	درصد نیروی وارد بر دیوار به کل نیروی وارد بر محیط خیس شده کانال
ρ	جرم حجمی سیال
τ_b	متوسط تنش برشی وارد بر بستر
τ_w	متوسط تنش برشی وارد بر دیوار
$\tau_b / \rho g h s$	تنش برشی بستر بدون بعد
$\tau_w / \rho g h s$	تنش برشی دیوار بدون بعد
=	معادله ی فشار بی بعد در معادله ی پاتل
$x^* = \log_{10} \left(\frac{\Delta P d^2}{4 \rho v^2} \right)$	
=	
$y^* = \log_{10} \left(\frac{\tau_0 d^2}{4 \rho v^2} \right)$	معادله ی تنش برشی بی بعد در معادله ی پاتل
d=	قطر خارجی لوله ی پرستون
τ_0	تنش برشی مرزی در معادله ی کالیبراسیون پاتل
= ΔP	اختلاف فشار استاتیک و دینامیک در معادله ی کالیبراسیون پاتل
= v	لزجت کینماتیک سیال
R ² =	ضریب همبستگی پیرسون
%Err=	درصد خطای نسبی
RMSE=	جذر میانگین مربعات خطا

جریان ماندگار و یکنواخت صورت گرفت . مقایسه ی نتایج به دست آمده با نتایج دیگر محققان نشان دهنده ی دقت قابل قبول آزمایش ها می باشد.

۲- نسبت ظاهری تأثیر قابل ملاحظه ای بر درصد نیروی برشی داشته و رابطه ای غیر خطی با آن نشان می دهد . هم چنین با افزایش نسبت ظاهری مقدار درصد نیروی برشی دیوار کاهش می یابد. چنانکه در نسبت ظاهری برابر ۲/۵ ، درصد نیروی برشی وارد بر دیوار و بستر یکسان می گردند. و در نسبت ظاهری بزرگتر از ۱۰ تأثیر نسبت ظاهری بر کاهش درصد نیروی برشی دیوار به کل نیروی برشی ناچیز می شود. در نسبت ظاهری ۱۰ درصد نیروی برشی وارد بر دیوار به کل نیروی برشی حدوداً برابر با ۱۸٪ می باشد.

۳- نسبت ظاهری تأثیر قابل ملاحظه ای بر تنش برشی بستر و دیوار دارد. نتایج نشان می دهد که با افزایش نسبت ظاهری تنش برشی در بستر و دیوار بصورت رابطه ای غیر خطی افزایش می یابد.

۴- برای تخمین درصد نیروی وارد به دیوار به کل نیروی برشی استفاده از معادله ی (۱۷) به دلیل دقت بالا توصیه می گردد. همبستگی مستقیم تنش برشی با نسبت ظاهری از مزایای معادلات (۱۹) و (۲۱) می باشد. با وجود این در نسبت های ظاهری مختلف توصیه می شود برای تعیین تنش برشی بستر از معادله ی (۲۰) و برای تعیین تنش برشی دیوار از معادله ی (۲۲) استفاده گردد. از مزایای این روابط

منابع:

- 1- Bockelmann-Evans, B.N. Davies, R. and Falconer, R.A. (2008) Measuring bed shear stress along vegetated river beds using FST-hemispheres. *J. of Environmental Management* 88:627-637
- 2- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. MacGraw-Hill.
- 3- DE CACQUERAY, N., HARGREAVES, D. M., MORVAN, H. (2008). A computational study of shear stress in smooth rectangular channels. *J. Hydraul. Res.* 0(0), 1–8.
- 4- Einstein, H.A. (1942). Formulas for the transportation of bedload. *Trans., ASCE* 107, 561–597.
- 5- Fernholz, H. H., G. Jankle, M. Schober, P.M. Wagner, and D. Warnack. (1996). New developments and applications of skin friction measuring techniques. *Meas. Sci. Technol.* 7:1396-1409.
- 6- Flinham, T.P., Carling, P.A. (1988). The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely rough channels. In: W.R. White (ed.), *Proceedings Internations Conference River Regime*, Wiley, New York, 267–286.
- 7- Ghosh, S. N. and Roy, N. (1970). Boundary shear distribution in open channel flow. *J. Hydraul. Div. ASCE* 96(4):967-994.
- 8- Guo, J. and Julien, P.Y. (2005). Shear stress in smooth rectangular open channel flows. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 125(3):30-37.
- 9- Haritonidis, J. H. (1989). The measurement of wall shear stress, P. 229-261. In M. Gad-et-Hak [ed.], *Advances in fluid mechanics measurements*. Springer. <http://www.flowdata.bham.ac.uk/yuen/data.shtml>
- 10- Kassab, S.Z. (1993) A preston tube calibration chart. *Rev. Sci. Instrum.* 64(1):253-256
- 11- Khodashenas, S. A., Abderrezzak, K.E. and Paquier, A. (2008). Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods. *J. Hydraul. Research* 46(5):598-609.
- 12- Knight, D. W. (1981). Boundary shear in smooth and rough channels. *J. Hydraul. Div., ASCE*, 107(7):839-851.
- 13- Knight, D. W., Demetriou, J. D. and Homed, M.E. (1984). Boundary shear in smooth rectangular channels. *Agric. Water Manage.* 110(4): 405-422.

- 14- Knight, D.W., Yuen, K.W.H. and Alhamid, A.A.I., (1994) .Boundary shear stress distributions in open channel flow, in *Physical Mechanisms of Mixing and Transport in the Environment*, (Eds K. Beven, P. Chatwin & J. Millbank), J. Wiley, Chapter 4, 51-87. [B]
- 15- Lashkar-Ara,B., Fathi-Moghadam,M., Shafai-Bajestan,M., Jael.A., (2010) Boundary shear stresses in smooth channels. *J. Food, Agriculture & Environment* Vol.8 (1): 132-136
- 16- Patel, V.C. (1965). Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients. *J. Fluid Mech.* 23:185-208.
- 17- Porter, E. T., L. P. Sanford, and S.E . Suttles.(2000) Gypsum dissolution is not a universal integrator of 'water motion'.*Limnol. Oceanogr.* 45:145-158.
- 18- Preston, J.H. (1954). The determination of turbulent skin friction by means of Pitot tubes. *Journal of the Royal Aeronautical Society* 58: 109-121.
- 19- Ramana Prasad, B.V., Russell Manson, J. (2002). Discussion of a geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels. *J. Hydraul. Res.* 40(4), 537–539.
- 20- Seckin, G., Seckin, N. and Yurtal, R. G. 2006. Boundary shear stress analysis in smooth rectangular channels. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33:336-342.
- 21- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., Nakagawa, H. (1989). Threedimensional turbulent structure in straight open channel flows. *J. Hydraul. Res.* 27(11), 149–173.
- 22- Winter, K. G. (1977). An outline of the techniques available for the measurement of skin friction in turbulent boundary layers. *Prog. Aerospace Sci.* 18:1-57
- 23- Yang, S.Q., Lim, S.Y. (1997). Mechanism of energy transportation and turbulent flow in a 3d channel. *J. Hydraul. Engng.* 123(8), 684–692.
- 24- Yang, S.Q., Lim, S.Y. (2002). Discussion on a geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels. *J. Hydraul. Res.* 40(3), 535–542.
- 25- Yang, S.Q., Lim, S.Y. (2005). Boundary shear stress distributions in trapezoidal channels. *J. Hydraul. Res.* 43(1), 98–102.
- 26- Zagarola, M.V. Williams, D. R and Smits, A.J. (2001). Calibration of the preston probe for high Reynolds number flows. *J. of Measurement Science And Technology.* 12:495-501

