

تعیین آزمایشگاهی تنش برشی متوسط در کانال‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای صاف به روش مستقیم

منوچهر فتحی مقدم^۱، بابک لشکرآرا^{۲*} و آرش جاعل^۳

۱- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران-آب دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۳- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۲۵

چکیده

تحقیق حاضر با هدف اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در کانال‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای با بستر صاف هیدرولیکی ارائه گردیده است. در این راستا به منظور اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی کل در محیط مرطوب کانال‌های روباز شیوه‌ای نوین ارائه گردید. در این راستا با ساخت فلوم با ادوات ویژه، نیروی کل برشی وارده بر محیط مرطوب با استفاده از سلول‌های حساس به بار دینامیک اندازه‌گیری گردید. سیستم اندازه‌گیری مذکور فلوم لبه چاقویی نامیده شد که بر اساس جذب ممتنم قادر به اندازه‌گیری نیروی برشی وارده بر جداره فلوم می‌باشد. جهت تعیین تغییرات تنش برشی موضعی در کانال‌های با مقطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای از لوله پرستون با قطر خارجی ۴ میلی‌متر مجهز به سلول‌های حساس به فشار دینامیک استفاده گردید. برای تبدیل اختلاف فشار استاتیک و دینامیک قرائت شده در لوله پرستون به تنش برشی از منحنی واسنجی پتل استفاده شد. برای تفکیک تنش برشی بستر و جداره از روش ترکیبی فلوم لبه چاقویی-لوله پرستون استفاده شد. مزیت این روش در آن است که حساسیت قطر لوله پرستون در معادله‌های محاسبه تنش برشی به حداقل مقدار ممکن کاهش خواهد یافت. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی به روش مستقیم و غیر مستقیم حاکی از برتری نتایج روش مستقیم می‌باشد. در این مقاله منحنی‌های تنش برشی بستر و جداره در مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای صاف با شیب جداره ۱، ۱/۵ و ۲ ارائه شدند.

کلید واژه‌ها: تنش برشی، لوله پرستون، روش مستقیم، جذب ممتنم.

Laboratory Determination of Average Shear Stress in Smooth Rectangular and Trapezoidal Open Channels by Direct Method

M. Fathi-Moghadam¹, B. Lashkar-Ara^{2*} and A. Jael³

1- Professor, Water and Science Engineering Department, Shahid Chamran University of, Ahvaz, Iran.

2* - Assistant Professor of Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, PO Box 19395-3697, Tehran, Iran

Received : 14 April 2015

Accepted: 3 October 2015

Abstract

Aim of this study is to measure shear stress in smooth rectangular and trapezoidal open channels. A new approach is presented to measure direct shear on wet perimeter of open channels. A water flume with a section on a frictionless support (called knife edge flume) along with a system of load cell was used to measure total force on the wet perimeter. The local boundary shear stress in rectangular and trapezoidal cross sections was measured using a 4mm diameter Preston tube connected to a differential pressure transducer and a data acquisition system. The calibration curves proposed by Patel were used to convert the pressure readings to shear stress. Local and total shear measurements were used to differentiate the channel wall and bed shear forces. This method allows minimizing of the error as result of the Preston tube diameter. Comparison of the results confirmed advantage of the momentum method over the energy method in term of accuracy. Results are presented for smooth rectangular and trapezoidal channel cross sections with side slopes of 1, 1.5, and 2.

Keywords: Shear stress, Preston tube, Direct method, Momentum absorption.

مقدمه

تعیین میزان تنش برشی و همچنین نحوه اثر آن روی بستر و جداره‌های مجاری روباز یکی از مهمترین مسائل هیدرولیک جریان می‌باشد. ساختار جریان در مجاری روباز مستقیماً تحت تأثیر نحوه توزیع تنش برشی در محیط مرطوب قرار دارد. تعادل جریان‌های یکنواخت به واسطه وجود تنش برشی روی محیط مرطوب کانال و در راستای مسیر حرکت جریان می‌باشد. از طرفی غیر یکنواختی توزیع این تنش بر روی بستر و جداره مجاری روباز توسط محققین دیگر به اثبات رسیده است (خداشناس و همکاران^۱، ۲۰۰۸). نحوه توزیع تنش به عواملی نظیر شکل سطح مقطع، ساختار جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی در زبری کانال بستگی دارد (گو و جولین^۲، ۲۰۰۵). توزیع تنش برشی در محاسبه افت انرژی، حمل رسوب و تخمین میزان فرسایش حائز اهمیت است. همچنین به‌منظور تخمین میزان تغییرات در وضعیت مورفولوژی رودخانه و همچنین در طرح‌های حفاظت از دیواره‌های ساحلی و سیل بندها، آگاهی از نحوه توزیع تنش برشی بر روی محیط مرطوب رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار 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 نظیر سزی، گانگلیت-کاتر، و مانینگ تحقیقات گسترده‌ای را در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان انجام دادند (مانینگ^۳، ۱۸۹۱). بررسی نتایج نشان می‌دهد که در اکثر تحقیقات گذشته، پارامترهای مؤثر بر مقاومت هیدرولیکی جریان بر پایه استفاده از روش غیر مستقیم اندازه‌گیری شده است.

لیگلی^۴ (۱۹۳۲) با استفاده از روش تطبیقی (نگاشت) مطالعه توزیع تنش برشی مرزی در جریان کانال‌های روباز را در مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد مطالعه قرار داد. بر اساس این مطالعات، در غیاب جریان‌های ثانویه، نقش تنش برشی مرزی در بستر باید با مؤلفه وزن در راستای جریان متعادل شود. از سال ۱۹۶۰ به بعد مطالعات تجربی متعددی توسط کروف^۵ (۱۹۶۵)، گاش و روی^۶ (۱۹۷۰)، کارتا و لوفیسر^۷ (۱۹۷۰)، مایرز^۸ (۱۹۷۸)، نایت و مک دونالد^۹ (۱۹۷۹)، نایت^{۱۰} (۱۹۸۱)، نات سوپالوس و حاجیه پنس^{۱۱} (۱۹۸۲)، نایت و همکاران^{۱۲} (۱۹۸۴)، هو^{۱۳} (۱۹۸۵)، گو و جولین^{۱۴} (۲۰۰۵)، سکین و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۶)، لشکرآرا و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۰) و برخی محققین دیگر گزارش شده است.

پرستون^{۱۶} (۱۹۵۴) با معرفی لوله پرستون و بهره‌گیری از فشار دینامیکی در ناحیه نزدیک دیوار اقدام به تعیین تنش برشی نمود. از آنجا که این وسیله شکل اصلاح شده لوله پیتوت می‌باشد، می‌توان از آن برای تعیین سرعت موضعی نیز استفاده نمود. نحوه عملکرد لوله پرستون کاملاً مشابه لوله پیتوت می‌باشد با این تفاوت که لوله پرستون کاملاً در مجاورت جداره مجرا مستقر می‌گردد. با این وجود طبق مطالعات محققین، لوله پرستون به عنوان وسیله‌ای برای تعیین تنش برشی موضعی استفاده شده است. مشکل اصلی در استفاده از لوله پرستون، یافتن معادله‌ای مناسب برای واسنجی قطر لوله آن می‌باشد. دقت در طراحی این وسیله، شرایط هیدرولیکی محل کاربرد آن و دقت شخص انجام دهنده آزمایش، در صحت نتایج نقش به‌سزایی ایفا می‌کند.

پرستون (۱۹۵۴) یک نسبت بدون بعد بین تفاضل فشار لوله پرستون (تفاوت بین فشارهای استاتیک و دینامیک) و تنش برشی مرزی را با استفاده از تحلیل ابعادی به‌صورت رابطه (۱) استخراج نمود:

$$\log \frac{\tau_0 D_p^2}{4\rho v^2} = 2.604 + \frac{7}{8} \log \left(\frac{\Delta P D_p^2}{4\rho v^2} \right) \quad (1)$$

که در آن τ_0 : تنش برشی مرزی مکانی (موضعی) بر حسب پاسکال، D_p : قطر خارجی لوله پرستون بر حسب متر، ρ : جرم مخصوص آب، v : لزوجت سینماتیک و ΔP : فشار تفاضلی لوله پرستون می‌باشد.

پتل^{۱۷} (۱۹۶۵) با ایجاد تغییر در قطر لوله پرستون آزمایش‌های متعددی را انجام داد که سرآمد تحقیقات وی منجر به معرفی معادله‌های واسنجی پتل گردید. وی با معرفی پارامترهای بدون بعد $y^* = \log \left(\frac{\tau_w D_p^2}{4\rho v^2} \right)$ و $x^* = \log \left(\frac{\Delta P D_p^2}{4\rho v^2} \right)$ نسبت به اصلاح رابطه (۱) اقدام نمود و روابط اصلاحی خود را به‌شرح زیر ارائه کرد:

$$\text{برای } 1/5 < y^* < 11/2 \text{ و } 0 < x^* < 11/2 \quad D^+$$

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

$$\text{برای } 3/5 < y^* < 11/5 \text{ و } 11/2 < D^+ < 110$$

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

$$\text{برای } 5/8 < y^* < 3/5 \text{ و } 160 < D^+ < 110$$

15 - Lashkar-Ara et al.

16 - Preston

17 - Patel

1 - Khodashenas et al.

2 - Guo, and Julien

3 - Manning

4 - Leighly

5 - Cruff

6 - Ghosh and Roy

7 - Kartha and Leutheusser

8 - Myers

9 - Knight and Macdonald

10 - Knight

11 - Noutsopoulos and Hadjipanous

12 - Knight et al.

13 - Hu

14 - Seckin et al.

هیدرولیکی به جای عمق جریان به صورت زیر پیشنهاد دادند:

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

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g R S_f} = 1 - 0.01 \times \% SF_w \left(1 + \frac{2H}{B}\right) \quad (10)$$

گو و جولین (۲۰۰۵) پس از حل معادله‌های 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 به صورت سری زیر تقریب زدند:

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S} = \frac{4}{\pi^2} \frac{B}{H} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{t^{2n-1} - 1}{(2n-1)^2} \quad (11)$$

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

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

سپس با اعمال دو ضریب تجربی، اثر 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 (۱۳) و (۱۴) تخمین زده شد:

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

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

با توجه به منابع کتابخانه‌ای ارائه شده می‌توان چنین اظهار داشت که نتایج تنش برشی حاصل از لوله پرستون می‌تواند علاوه بر قطر لوله و گرادیان فشار تحت اثر عواملی هم‌چون جریان‌های ثانوی، لزوجت گردابه‌ای نیز قرار گیرد. لذا ضرورت استفاده از روش‌های مستقیم برای کاهش اثر عوامل فوق‌الذکر بر نتایج ضروری به نظر می‌رسد. هدف تحقیق حاضر معرفی روشی نوین برای تخمین تنش برشی است که بر اساس جذب ممنت استوار بوده و قادر به اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در انواع مجاری

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

در روابط فوق D^+ عدد رینولدز لوله پرستون نام دارد و از رابطه $u_* D_p / \nu$ به دست می‌آید. u_* سرعت برشی می‌باشد و از رابطه $\sqrt{\tau_w / \rho}$ تعیین می‌شود. از آنجایی که لوله پرستون برای تعیین تنش برشی جداره تحت شرایط با گرادیان صفر توصیه شده است، بر اساس اظهارات پتل (۱۹۶۵) اگر پارامتر گرادیان فشار $\Delta = \left(\nu / \rho u_*^3\right) (dp/dx)$ در محدوده $0.15 < \Delta < 0.07$ قرار گیرد، واستیجی لوله پرستون مناسب بوده و این وسیله قادر خواهد بود که با دقت شش درصد نسبت به اندازه‌گیری تنش برشی مورد استفاده قرار گیرد (پتل، ۱۹۶۵).
بچرت (۱۹۹۵) معادله زیر را ارائه داد که در محدوده $2/5 < x^* < 9$ معتبر است.

$$\tau^+ = \left[28.44 \Delta p^{+2} + 6.61 \times 10^{-6} \Delta p^{+3.5}\right]^{0.25} \quad (5)$$

که در این معادله مقدار پارامتر $\tau^+ = \tau_o D_p^2 / \rho V^2$ و $\Delta p^+ = \Delta p D_p^2 / \rho V^2$ می‌باشد.

نایت و همکاران (۱۹۸۴) با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های متعدد 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. آنها با استفاده از ۴۳ داده آزمایشگاهی در محدوده $0.3 < B/H < 6$ و ۱۲ داده در محدوده $15 < B/H < 6$ معادله تجربی خود را به صورت زیر بر اساس اصل بقای انرژی ارائه کردند:

$$\log(\% SF_w) = -1.4026 \times \log\left(\frac{B}{H} + 3\right) + 2.669 \quad (6)$$

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

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H S_f} = 0.01 \times \% SF_w \times \left(\frac{B}{2H}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S_f} = 1 - 0.01 \times \% SF_w \quad (8)$$

که در روابط فوق $\bar{\tau}_b$ و $\bar{\tau}_w$ به ترتیب متوسط تنش برشی جداره و کف، ρ : جرم مخصوص آب، g : شتاب ثقل و S_f : شیب خط انرژی می‌باشد. آنان معادله‌های خود را با اعمال اثر شعاع

مقدار حاصله به‌عنوان نماینده نیروی برشی وارده بر سطح مرطوب در آن مرحله از آزمایش ثبت و ملاک محاسبه قرار گرفت. به منظور تعیین نحوه توزیع و میزان تنش برشی در محیط مرطوب از لوله پرستون استفاده گردید. برای انتخاب قطر لوله پرستون از مطالعات سوتاردی و چینگ^۲ (۲۰۰۱) بهره گرفته شد. سوتاردی و چینگ (۲۰۰۱) با تحلیل حساسیت قطر لوله پرستون نشان دادند که در شرایطی که نسبت قطر لوله پرستون به ضخامت لایه مرزی 0.48 بوده و گرادیان فشاری نیز صفر باشد، قطر لوله $3/23$ میلی‌متر می‌تواند حداقل اختلاف را در تعیین ضریب مقاومت جریان محاسبه شده توسط معادله‌های بچرت (۱۹۹۵) و پتل (۱۹۶۵) به‌همراه داشته باشد. لذا با استناد به مطالعه مذکور و شرایط هیدرولیکی حاکم، انتخاب قطر لوله چهار میلی‌متر می‌تواند نسبت قطر لوله پرستون به ضخامت لایه مرزی را به 0.46 محدود نماید.

در این تحقیق برای افزایش دقت داده برداری تغییرات فشارهای دینامیک و استاتیک ΔP از سلول‌های حساس به تغییرات فشار دینامیک استفاده شده است. این سلول‌ها قادرند تا تغییرات زمانی فشار وارده بر لوله‌های استاتیک و دینامیک پرستون را اندازه‌گیری نمایند. پس از تعیین تنش برشی موضعی در محدوده جداره‌ها و بستر، با استفاده از روش ترسیمی پروفیل مربوط به توزیع تنش برشی موضعی به‌دست می‌آید. سطح زیر منحنی نمایشگر متوسط نیروی برشی کل به روش غیر مستقیم می‌باشد.

سپس با اعمال تغییر در شیب جداره فلوم شرایط تکرار عملیات فوق‌الذکر در کانال‌های دوزنقه‌ای با عرض کف 20 سانتی‌متر و شیب جداره $1/5$ ، 1 و 2 نیز تکرار گردید. کلیه اندازه‌گیری‌ها در فاصله $4/7$ متری از ابتدای کانال به انجام رسید. دبی جریان عبوری با استفاده از یک سرریز مستطیلی اندازه‌گیری گردید. برای تعیین سهم تنش برشی متوسط وارده بر بستر و جداره به روش مستقیم به‌صورت 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 گردید. در طی استخراج این نتایج فرض شده است که حتی اگر نتایج حاصل از لوله پرستون در محدوده مجاز توصیه شده 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.

منشوری می‌باشد. همچنین تعیین میزان سهم هر یک از تنش‌های برشی کف و جداره در مجاری مستطیلی و دوزنقه‌ای با بستر صاف هیدرولیکی از جمله اهداف تحقیق حاضر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام اهداف تحقیق حاضر به‌منظور اندازه‌گیری مستقیم نیروی برشی و تعیین میزان سهم هر یک از تنش‌های برشی کف و جداره از یک فلوم آزمایشگاهی با بستر صاف به عرض 80 سانتی‌متر و طول $8/6$ متر که در شیب 0.02 تنظیم شده است استفاده گردید. به منظور اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی وارده بر سطوح مرطوب کانال، طولی معادل یک متر از مابقی فلوم جدا گردید و با نصب یکسری ابزارآلات به شیوه خاصی 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 که گویی هر لحظه با اعمال کوچک‌ترین نیرویی تعادل خود را از دست داده و سقوط می‌نماید، و این در حالی است که نیرو سنج 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 دینامیکی امکان ثبت مقدار متمم وارده از طرف سیال را بر جداره‌های فلوم فراهم می‌آورد (شکل ۱). این فلوم بنام فلوم لبه چاقویی^۱ نامیده شد. سیگنال‌های ارسالی از سلول‌های حساس به بار دینامیک توسط یک‌دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال 16 کاناله به کامپیوتر انتقال و سپس با استفاده از نرم افزار Scope متوسط زمانی هر یک از سری سیگنال‌های ارسالی به‌عنوان 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 واسنجی سیستم سنجش نیرو در مقطع اندازه‌گیری (K.E.F.) 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 این میزان، مقدار حاصله تحت عنوان نیروی کل برشی ملاک عمل قرار گرفت. به منظور 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 (K.E.F.)، مقدار نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج مورد ارزیابی قرار گرفت. این عمل به‌طور متوسط بین سه الی پنج بار بسته به شرایط آزمایشگاهی تکرار گردید و پس از تعیین ضریب اصلاحی، مقادیر خالص نیروی مشاهداتی در هر یک از قرائت‌ها محاسبه و پس از متوسط‌گیری،

ریشه میانگین مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (16)$$

ضریب وزن باقیمانده

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (17)$$

ضریب تعیین

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

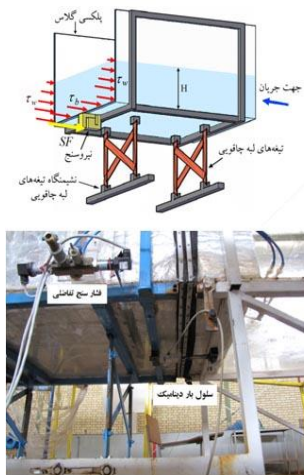
که در این روابط O : نشانگر پارامتر مشاهده شده، P : نشانگر پارامتر پیش‌بینی شده و \bar{O} : متوسط پارامترهای مشاهداتی و n : تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

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 گزارش گردید. سپس به منظور ارزیابی نتایج، نحوه تغییرات نیروی برشی کل اندازه‌گیری شده به روش مستقیم و غیر مستقیم با معادله تئوریک نیروی برشی (رابطه ۱۵) مقایسه گردید.

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

برای استخراج روابط حاکم بر چگونگی تغییرات تنش برشی بدون بعد بستر $\bar{t}_b / \gamma H S_f$ و جداره $\bar{t}_w / \gamma H S_f$ و درصد نیروی برشی وارده بر جدارهها ($\%SF_w$) در مقابل تغییرات نسبت ظاهری (B/H) از نرم افزار SPSS استفاده گردید.

پس از تعیین شکل عمومی روابط حاکم بر آهنگ تغییرات پارامترهای مورد آزمون، لازم است تا از دقت تخمین روابط پیشنهادی اطلاع حاصل شود. برای این منظور با تجزیه و تحلیل آماری و استفاده از توابع خطای معرفی شده در روابط (۱۶) الی (۱۸)، نتایج حاصل از روابط پیشنهادی در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی ارزیابی شدند:



شکل ۱- نمایی از فلوم لبه چاقویی و اجزای تشکیل دهنده سیستم اندازه‌گیری

نتایج و بحث

هدف از تحقیق حاضر اندازه‌گیری توزیع تنش برشی در پیرامون محیط مرطوب به روش مستقیم و معرفی معادله‌های متوسط تنش برشی بستر و جداره در اطراف محیط مرطوب کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب جداره ۱، ۱/۵ و ۲ می‌باشد. برای این منظور با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی، عمق جریان در محدوده ۲/۷ الی ۱۴/۵ سانتی‌متر تغییر داده شد. لذا با این تغییرات امکان اندازه‌گیری توزیع متوسط تنش برشی در اطراف محیط مرطوب کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای در نسبت‌های مختلف B/H در محدوده بین ۱ الی ۱۸/۶ فراهم گردید. میزان دبی جریان در طی مراحل مختلف آزمون‌ها در محدوده ۱/۶۲ الی ۹۹/۰۵ لیتر بر ثانیه تغییر داده شد. به‌منظور ایجاد شرایط جریان یکنواخت و حصول شیب هیدرولیکی معادل با شیب کف فلوم از یک دریچه در انتهای کانال استفاده گردید. سپس با رسم پروفیل سطح آب، شیب هیدرولیکی معادل $10^{-3} \times 1/95$ برآورد گردید. به منظور ارزیابی نحوه اثر نسبت B/H بر روی نحوه تغییرات نیروی برشی، مقادیر نیروی ثبت شده توسط نیروسنج ثبت گردید. فرکانس مورد استفاده به هنگام داده برداری ۵۰ هرتز و مدت زمان هر یک از قرائت‌ها ۲۰ ثانیه تعیین گردید. به‌منظور تعیین سهم تنش برشی

دیواره‌ها و بستر فلوم یکسری آزمایش‌های تکمیلی به‌طور همزمان با اندازه‌گیری نیروی برشی کل در مقطع متحرک فلوم لبه چاقویی، با استفاده از لوله پرستون صورت پذیرفت. در این راستا در هر یک از مراحل آزمایش‌های انجام شده برای تعیین نیروی برشی کل، مقادیر اختلاف فشار دینامیک و استاتیک در لوله پرستون توسط فشار سنج تفاضلی در کل محیط مرطوب قرائت گردید. فرکانس مورد استفاده به‌هنگام ثبت سیگنال‌های ارسالی از فشار سنج تفاضلی ۱۰۰ هرتز و مدت زمان هر یک از قرائت‌ها ۲۰ ثانیه تعیین گردید. به‌منظور افزایش دقت در نحوه توزیع تنش برشی کف و جداره موقعیت نصب لوله پرستون در کف طی فواصل ۲/۵ الی ۵ سانتی‌متر و در جداره ۲ سانتی‌متر تغییر مکان یافت. به‌منظور تبدیل اختلاف فشار استاتیک و دینامیک به تنش برشی از منحنی واسنجی پتل استفاده شد.

سپس نتایج نیروی برشی کل اندازه‌گیری شده به روش مستقیم و غیر مستقیم با معادله تئوریک نیروی برشی مقایسه گردید. نتایج این مقایسه به تفکیک در کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱، ۱/۵ و ۲ در جدول‌های (۱) الی (۴) ارائه گردیده است.

جدول ۱- نتایج آزمایشگاهی تفکیک تنش برشی بستر و جداره در کانال مستطیلی

نسبت B/H	متوسط تنش برشی کل (N/m^2)	روش غیر مستقیم		روش مستقیم		درصد اختلاف روش مستقیم با معادله تئوریک	درصد اختلاف روش غیر مستقیم با معادله تئوریک	
		بستر	جداره	متوسط تنش برشی				
				متوسط قرائت نیرو سنج (N)	بستر			جداره
۶/۰۶	۱/۸۹۸	۱/۹۳	۱/۵۳۹	۱/۹۹۶	۱/۹۰۸	۱/۵۲۱	-۳/۴۲	-۱/۱۵
۷/۱۴	۱/۶۷۳	۱/۶۶۴	۱/۳۸۵	۱/۶۹۱	۱/۶۴۳	۱/۳۶۷	-۴/۱۸	-۱/۳
۷/۹۲	۱/۵۴۲	۱/۶۵۴	۱/۳۳۸	۱/۴۹	۱/۵۹۵	۱/۱۹۴	۱/۸۵	-۳/۵۶
۸/۴۲	۱/۴۶۸	۱/۵۶۳	۱/۲۲۲	۱/۵۱۱	۱/۶۲۵	۱/۲۷	۲/۰۳	۳/۹۷
۹/۸۸	۱/۲۸۸	۱/۴	۱/۰۲۴	۱/۲۵۲	۱/۴۱۵	۱/۰۳۵	۳/۷۸	۱/۰۴
۱۰/۶۷	۱/۲۰۸	۱/۳۸۴	۰/۸۸۸	۱/۱۵۷	۱/۳۹۶	۰/۸۹۵	۸/۱۲	۰/۸۵
۱۱/۳۷	۱/۱۵۳	۱/۱۴۵	۰/۸۰۳	۱/۱۲۴	۱/۱۸۵	۰/۸۳۱	-۵/۱۴	۳/۴۹
۱۲/۹	۱/۰۲۶	۱/۱۱۲	۰/۷۵۳	۰/۹۶۸	۱/۱۳۵	۰/۷۶۸	۳/۶۳	۲/۰۶
۱۳/۵۶	۰/۹۸۳	۱/۰۰۲	۰/۷۲۱	۰/۸۹۷	۰/۹۹۶	۰/۷۱۷	-۱/۷۵	-۰/۶۱
۱۴/۲۹	۰/۹۳۹	۰/۹۴۲	۰/۶۵۹	۰/۸۸۸	۰/۹۷۶	۰/۶۸۳	-۳/۴۴	۳/۶۶
۱۵/۰۹	۰/۸۹۵	۰/۸۹۶	۰/۶۱۵	۰/۸۰۲	۰/۸۸۶	۰/۶۰۸	-۳/۵۶	-۱/۰۸
۱۶/۳۳	۰/۸۳۵	۰/۸۸	۰/۵۶۱	۰/۷۶۸	۰/۹۰۲	۰/۵۷۵	۱/۲۹	۲/۴۶
۱۷/۰۲	۰/۸۰۴	۰/۸۷۱	۰/۵۴۵	۰/۷۴۱	۰/۸۹۸	۰/۵۶۱	۴/۰۹	۳/۰۶
۱۷/۳۹	۰/۷۸۹	۰/۸۵۶	۰/۵۳۵	۰/۷۱۵	۰/۸۷	۰/۵۴۴	۴/۲۹	۱/۶۱
۱۷/۷۸	۰/۷۷۳	۰/۷۷۵	۰/۵۳۱	۰/۶۹۷	۰/۷۸۵	۰/۵۳۸	-۲/۹۳	۱/۲۵
۱۸/۶	۰/۷۴۲	۰/۷۶	۰/۴۷۸	۰/۶۷۳	۰/۷۷۸	۰/۴۸۹	-۱/۳	۲/۳۱

جدول ۲- نتایج آزمایشگاهی تفکیک تنش برشی بستر و جداره در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱

نسبت B/H	متوسط تنش برشی کل (N/m ²)	روش غیر مستقیم		روش مستقیم		درصد اختلاف روش مستقیم با معادله تئوریک	درصد اختلاف روش غیر مستقیم با معادله تئوریک
		بستر	جداره	متوسط تنش برشی			
				متوسط قرائت نیرو سنج (N)	متوسط تنش برشی		
۱	۱/۹۹۳	۲/۱۱۹	۱/۹۷۳	۱/۵۳۱	۲/۱۳۱	۱/۹۸۴	-۰/۵۵
۱/۰۴	۱/۹۳۴	۲/۲۵۶	۱/۹۲۵	۱/۴۸۷	۲/۳۳۷	۱/۹۹۴	۳/۵۹
۱/۱۶	۱/۷۸۶	۱/۹۷	۱/۷۸۸	۱/۲۱۱	۱/۹۴۱	۱/۷۶۲	-۱/۴۴
۱/۲	۱/۷۴	۱/۹۸۸	۱/۷۲۲	۱/۱۸۹	۲/۰۲۳	۱/۷۵۲	۱/۷۵
۱/۳	۱/۶۳۷	۱/۹۲۴	۱/۶۱۲	۱/۰۶	۱/۹۶۳	۱/۶۴۴	۲
۱/۴	۱/۵۵۲	۱/۶۱۹	۱/۴۵۳	۰/۹۴۹	۱/۶۳۸	۱/۴۷	-۲/۸۲
۱/۷۵	۱/۳۱۳	۱/۴۱۲	۱/۲۷۵	۰/۶۹۷	۱/۴۳۲	۱/۲۹۳	۱/۴۲
۱/۲۶	۱/۰۸۳	۱/۱۸۸	۱/۰۴۳	۰/۴۷۹	۱/۱۶۸	۱/۰۲۵	-۱/۷۱
۳/۰۹	۰/۸۵۵	۰/۹۰۳	۰/۷۸	۰/۳۲۸	۰/۹۰۵	۰/۷۸۲	-۱/۲۳
۴/۴۸	۰/۶۴	۰/۶۶۹	۰/۵۷۳	۰/۲۰۴	۰/۶۵۴	۰/۵۶	-۲/۲۷
۶/۴۵	۰/۴۷۶	۰/۵۱۴	۰/۴۱۳	۰/۱۳۸	۰/۵۱۸	۰/۴۱۶	-۰/۷۸

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی تفکیک تنش برشی بستر و جداره در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱/۵

نسبت B/H	متوسط تنش برشی کل (N/m ²)	روش غیر مستقیم		روش مستقیم		درصد اختلاف روش مستقیم با معادله تئوریک	درصد اختلاف روش غیر مستقیم با معادله تئوریک
		بستر	جداره	متوسط تنش برشی			
				متوسط قرائت نیرو سنج (N)	متوسط تنش برشی		
37/1	۱/۶۱	۱/۹۹۳	۱/۷۱۴	۱/۲۰۹	۲/۰۶	۱/۷۷۲	۳/۳۶
۱/۵۱	۱/۴۹۱	۱/۷۴۷	۱/۶۳۹	۱/۰۴۵	۱/۸۰۷	۱/۶۹۶	۳/۴۴
۱/۶۷	۱/۳۷۸	۱/۶۲۹	۱/۴۱۳	۰/۸۹۲	۱/۶۶۶	۱/۴۴۶	۲/۳
۱/۸۲	۱/۲۸۵	۱/۵۲۸	۱/۳۷۷	۰/۷۸۷	۱/۵۷۲	۱/۴۱۶	۲/۸۵
۲/۲۱	۱/۱۰۵	۱/۳۲۹	۱/۱۵۶	۰/۵۷۱	۱/۳۰۴	۱/۱۳۴	-۱/۹۱
۳/۲۵	۰/۸۱۶	۰/۹۸۱	۰/۷۹۷	۰/۳۳۶	۰/۹۵۶	۰/۷۷۷	-۲/۵
۳/۹۱	۰/۷۰۴	۰/۸۲۴	۰/۶۷۸	۰/۲۶۱	۰/۷۹۵	۰/۶۵۵	-۳/۵۱
۷/۳۴	۰/۴۲۱	۰/۴۷۸	۰/۳۷۵	۰/۱۲۹	۰/۴۹۱	۰/۳۸۶	۲/۷۸

جدول ۴- نتایج آزمایشگاهی تفکیک تنش برشی بستر و جداره در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۲

نسبت B/H	متوسط تنش برشی کل (N/m ²)	روش غیر مستقیم		روش مستقیم		درصد اختلاف روش مستقیم با معادله تئوریک	درصد اختلاف روش غیر مستقیم با معادله تئوریک
		بستر	جداره	متوسط تنش برشی			
				متوسط قرائت نیرو سنج (N)	متوسط تنش برشی		
۱/۴	۱/۵۸۳	۲/۰۲۹	۱/۸۰۳	۱/۲۸۴	۱/۹۶	۱/۷۴۲	-۳/۳۸
۱/۵۵	۱/۴۵۴	۱/۹۶	۱/۶۲۱	۱/۰۶۲	۱/۸۴۲	۱/۵۲۳	-۶
۱/۵۶	۱/۴۴۵	۱/۷۹۹	۱/۶۰۳	۱/۰۲۸	۱/۶۵۷	۱/۴۷۷	-۷/۸۹
۱/۶۹	۱/۳۵۲	۱/۷۵۷	۱/۴۴۲	۰/۹۵۱	۱/۶۹۸	۱/۳۹۴	-۳/۳۳
۱/۸۹	۱/۲۳۹	۱/۵۳۶	۱/۲۹۷	۰/۷۹۴	۱/۴۶۱	۱/۲۳۳	-۴/۹۲
۲/۲۷	۱/۰۶۸	۱/۳۷۷	۱/۲۰۵	۰/۶۶۴	۱/۴۳۹	۱/۲۵۹	۴/۵۱
۲/۵۳	۰/۹۷۷	۱/۲۶۴	۱/۰۴۵	۰/۵۲۶	۱/۲۳	۱/۰۱۷	-۲/۷۴
۲/۹۹	۰/۸۵۵	۱/۱۳۳	۰/۹۲۱	۰/۴۰۱	۱/۰۶۵	۰/۸۶۵	-۶/۰۴
۳/۳۳	۰/۷۸۴	۱/۰۱۱	۰/۸۵۹	۰/۳۹۶	۱/۰۹	۰/۹۲۷	۷/۸۶
۴/۵۷	۰/۶۰۸	۰/۷۴۱	۰/۶۰۸	۰/۲۵۹	۰/۷۹۸	۰/۶۵۵	۷/۶۹
۶/۱۱	۰/۴۸	۰/۵۸۷	۰/۴۸	۰/۱۷۳	۰/۶۱۱	۰/۵	۴/۰۵
۷/۳۳	۰/۴۱۳	۰/۴۹۴	۰/۳۸۵	۰/۱۴۲	۰/۵۲۸	۰/۴۱۲	۶/۸۴
۸/۴۷	۰/۳۶۵	۰/۴۲۵	۰/۳۴۵	۰/۱۰۷	۰/۴۰۷	۰/۳۳	-۴/۲

فتحی مقدم و همکاران: تعیین آزمایشگاهی تنش برشی متوسط در کانال‌های...

$$\bar{\tau}_w = \frac{a + b(B/H)}{\gamma HS \left[1 + c(B/H) + d(B/H)^d \right]} \quad (20)$$

$$\%SF_w = a(B/H + 3)^b \quad (21)$$

برای ارزیابی نتایج حاصل از تخمین روابط پیشنهادی با استفاده از روابط (۱۶) الی (۱۸) نسبت به تجزیه و تحلیل آماری روابط (۱۹) الی (۲۱) اقدام گردید و توابع خطای ضریب وزن باقیمانده، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین محاسبه و در جدول‌های (۵) الی (۷) نمایش خلاصه شده‌اند.

نتایج حاکی از آن است که روابط پیشنهادی برای تخمین تنش برشی بدون بعد بستر $(\bar{\tau}_b/\gamma HS_f)$ و جداره $(\bar{\tau}_w/\gamma HS_f)$ و درصد نیروی برشی وارده بر جداره‌ها $(\%SF_w)$ تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهند.

نتایج مندرج در شکل (۲) نشان می‌دهد که نیروی برشی بدون بعد بستر $(\bar{\tau}_b/\gamma HS_f)$ با افزایش (B/H) افزایش می‌یابد و این در حالی است که از بررسی شکل (۳) می‌توان دریافت که نیروی برشی بدون بعد جداره $(\bar{\tau}_w/\gamma HS_f)$ با افزایش (B/H) ابتدا دارای روند افزایشی و سپس روند کاهشی بخود می‌گیرد و علت این امر در تغییرات شعاع هیدرولیکی نسبت به B/H نهفته است.

مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی به روش غیر مستقیم در مقابل با معادله تئوریک از یک سو و مقایسه نتایج تنش برشی به روش مستقیم با معادله تئوریک از سوی دیگر در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب جداره ۱، ۱/۵ و ۲ نشان می‌دهد (جدول‌های ۱ الی ۴) که حداکثر اختلاف در تخمین تنش برشی کل به روش غیر مستقیم نسبت به معادله تئوریک حداکثر ۱۸/۱۹ درصد در کانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای با شیب جانبی $Z=2$ و حداقل خطا معادل ۰/۹۱ درصد در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی $Z=1$ محقق شده است. این در حالی است که در روش مستقیم این میزان خطا حداکثر ۷/۸۶ درصد در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی $Z=2$ و حداقل خطا معادل ۰/۲۲ درصد در $Z=1$ مشاهده شده است.

به منظور دست‌یابی به معادله‌های حاکم بر تغییرات تنش برشی بدون بعد بستر $(\bar{\tau}_b/\gamma HS_f)$ و جداره $(\bar{\tau}_w/\gamma HS_f)$ و درصد نیروی برشی وارده بر جداره‌ها $(\%SF_w)$ از معادله‌های رگرسیون غیر خطی استفاده گردید و بهترین منحنی مطابق با روابط (۱۹) الی (۲۱) از بین مشاهدات آزمایشگاهی بر حسب تابعی از نسبت ظاهری (B/H) برازش داده شد. برای تعیین ضرائب از نرم افزار SPSS استفاده شد و نتایج در جدول‌های (۵) الی (۷) خلاصه شده‌اند.

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\gamma HS} = \frac{a.b + c(B/H)^d}{b + (B/H)^d} \quad (19)$$

جدول ۵- ضرائب رابطه (۱۹) و توابع آماری مربوطه

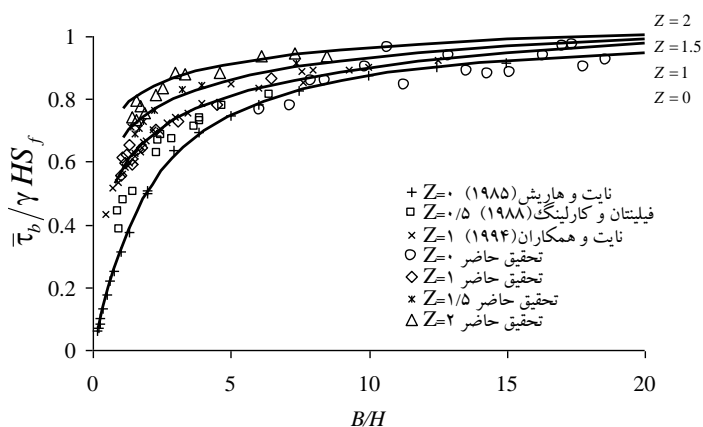
ضرائب	Z = ۰	Z = ۱	Z = ۱/۵	Z = ۲
a	۱/۰۵	-۰/۱۴۷۵	-۰/۵۹۳۴	-۲/۱۴۰۹
b	۰/۴۲۸۷	-۰/۹۶۹۴	-۰/۵۱۲۶	۰/۱۶۳۱
c	-۰/۰۰۲۹	۱/۲۵۴۹	۱/۳۱۲۵	۱/۲۳۴۳
d	-۱/۰۹۲	-۰/۴۵۵۲	-۰/۳۱۲۲	۰/۲۷۱۲
ضریب وزن باقیمانده	-۰/۰۱۴	-۰/۰۱۳۹	-۰/۰۰۳۳	-۰/۰۲۶۵
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۳۹	۰/۰۲۵۱	۰/۰۱۷۵	۰/۰۳۵۹
ضریب تعیین	۰/۹۹۲	۰/۹۸۶	۰/۹۹۶	۰/۹۷۲

جدول ۶- ضرائب رابطه (۲۰) و توابع آماری مربوطه

ضرائب	Z=۰	Z=۱	Z=۱/۵	Z=۲
a	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۲۲	-۰/۰۰۸۵	-۰/۰۱۹۱
b	۰/۶۰۶۲	۱/۸۱۵۲	۱/۹۰۷۴	۲/۹۶۰۲
c	۰/۶۸۳	۱/۷۷۲۱	۲/۳۴۵۵	۳/۶۰۶۶
d	۰/۰۱۵	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۸۵
ضریب وزن باقیمانده	-۰/۰۱۲۵	-۰/۰۰۴۹	-۰/۰۰۳۹	-۰/۰۲۵۶
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۲	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۴۴	۰/۰۳۰۲
ضریب تعیین	۰/۹۹۱	۰/۹۸۹	۰/۹۸۳	۰/۹۶۶

جدول ۷- ضرائب رابطه (۲۱) و توابع آماری مربوطه

ضرائب	Z=۰	Z=۱	Z=۱/۵	Z=۲
a	۴۷۸/۵	۳۵۲/۹	۳۳۵	۲۹۷/۴
b	-۱/۴۰۶	-۱/۱۵۱	-۱/۰۵۹	-۰/۹۴۰۴
ضریب وزن باقیمانده	-۰/۰۱۴۳	-۰/۰۱۱۲	-۰/۰۱۶۵	-۰/۰۳۶۲
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۲۲۴	۰/۰۱۶۳	۰/۰۳۴	۰/۰۴۱۲
ضریب تعیین	۰/۹۸۴	۰/۹۷۲	۰/۹۶۹	۰/۹۸۱



شکل ۲- مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مطالعات محققین دیگر در تعیین تنش برشی

بدون بعد بستر $\bar{\tau}_b / \gamma HS_f$

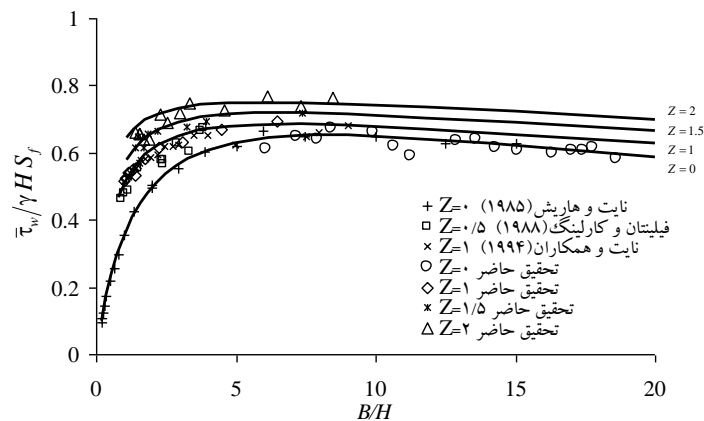
(۱۹۸۵) و نایت و همکاران (۱۹۹۴) در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده‌اند.

لازم به ذکر است که کلیه مطالعات یاد شده به روش غیر مستقیم انجام شده است. پراکندگی نقاط حاصل از مطالعه پیشین در اطراف منحنی برازش شده از بین نتایج تحقیق حاضر، گویای همسو بودن کیفی نتایج تحقیق حاضر می‌باشد.

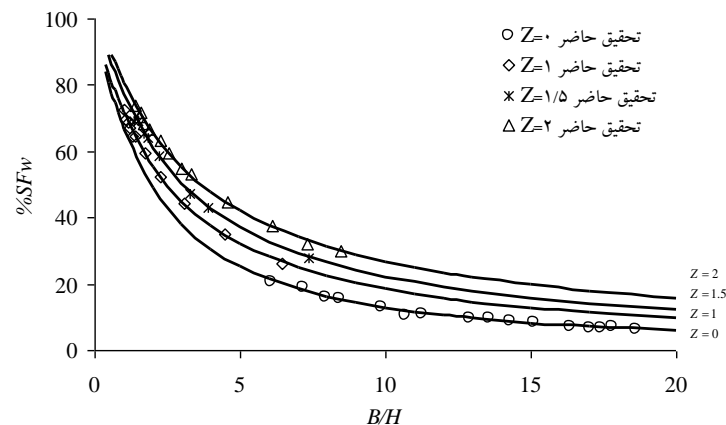
از مقایسه منحنی‌های شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که درصد سهم نیروی برشی ($\%SF_w$) با افزایش (B/H) کاهش و با افزایش شیب جداره افزایش می‌یابد.

برای مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات محققین دیگر، کلیه تنش‌های برشی بستر و جداره حاصل از اندازه‌گیری به روش‌های مستقیم با استفاده از پارامتر (γHS_f) بدون بعد گردید و نتایج حاصل در مقایسه با نتایج نایت و هاریش

فتحی مقدم و همکاران: تعیین آزمایشگاهی تنش برشی متوسط در کانال‌های...



شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مطالعات محققین دیگر در تعیین تنش برشی بدون بعد جداره $(\bar{\tau}_w / \gamma HS_f)$



شکل ۴- درصد نیروی برشی کل وارده بر جداره‌ها در مقابل نسبت (B/H)

جدول ۸- مقایسه نتایج روابط (۱۹) و (۲۰) با محققین قبلی

توابع خطا		نام محقق
ضریب وزن باقیمانده	ریشه میانگین مربعات خطا	
-۰/۰۵۳	۰/۰۶۳۱	نایت و هاریش (۱۹۸۵)
-۰/۰۳۹	۰/۰۴۱۲	نایت و همکاران (۱۹۹۴)

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تنش برشی در جداره کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱، ۱/۵ و ۲ به روش مستقیم اندازه‌گیری گردید. برای این منظور از یک فلوم موسوم به فلوم لبه چاقویی استفاده شد. به منظور تفکیک سهم تنش برشی جداره‌ها از بستر کانال‌های فوق‌الذکر از روش ترکیبی فلوم لبه چاقویی-لوله پرستون بهره‌گیری شد. در این رویکرد میزان نیروی برشی وارده به کل محیط مرطوب کانال با سطح مقطع‌های مختلف به روش

به‌منظور بررسی کمی، مقایسه‌ای بین نتایج روابط (۱۹) و (۲۰) با مطالعات نایت و هاریش (۱۹۸۵) و نایت و همکاران (۱۹۹۴) صورت پذیرفت که خلاصه مقایسه آماری مذکور در جدول ۸ ارائه شده است. از بررسی نتایج مندرج در جدول (۸) می‌توان دریافت که نتایج حاصل از روش مستقیم با نتایج حاصل از نایت و هاریش (۱۹۸۵) و نایت و همکاران (۱۹۹۴) تطابق مطلوبی نشان می‌دهد.

سادگی میسر نمی‌باشد می‌توان بهره‌گیری از فلوم لبه چاقویی را توصیه نمود.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله نگارندگان این تحقیق از دانشگاه شهیدچمران اهواز و دانشگاه صنعتی جندی شاپور و همچنین سازمان آب و برق خوزستان به پاس تهیه امکانات آزمایشگاهی، حمایت و تامین منابع مالی کمال تشکر را دارند.

مستقیم ثبت شده و سهم جداره‌ها و کف توسط لوله پرستون تفکیک گردید. مزیت این روش در آن است که حساسیت قطر لوله پرستون در معادله‌های محاسبه تنش برشی به حداقل مقدار ممکن کاهش خواهد یافت. نتایج ارائه شده در این تحقیق امکان طراحی کانال‌های پایدار را در شیب‌های جداره مختلف تسهیل نموده است. از طرفی به استناد نتایج این تحقیق می‌توان چنین بیان نمود که روش مستقیم اندازه‌گیری تنش برشی توسط فلوم لبه چاقویی از قابلیت و دقت مطلوبی نسبت به روش غیر مستقیم برخوردار است. لذا در مواردی که امکان استفاده از روش‌های غیر مستقیم به

منابع

- 1- Bechert, D.W. 1995. Calibration of Preston tubes, The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 34 (1): 205-206.
- 2- Cruff, 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.
- 3- Flintham, T.P. and P.A. Carling, 1988. The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely roughened channels. International Conference on River Regime, W.P. White (Ed.). John Wiley and Sons, PP. 267- 287.
- 4- Ghosh, S.N., and N. Roy, 1970. Boundary shear distribution in open channel flow. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 96(4): 967-994.
- 5- Hu, C. H. 1985. The effect of the width/depth ratio and side-wall roughness on velocity profile and resistance in rectangular open-channels. M.Sc Thesis, Tsinghua University, Beijing.
- 6- Guo, J. and P.Y. Julien. 2005. Shear Stress in smooth rectangular open-channel flows. Journal of Hydraulic Engineering, 125(3): 30-37.
- 7- Kartha, V.C, and H.J. Leutheusser. 1970. Distribution of tractive force in open channels. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 96 (HY7): 469-1483.
- 8- Khodashenas S.R., Abderrezzak, K.K. and A. Paquier, 2008. Boundary shear stress in open channel flow : A comparison among six methods. Journal of Hydraulic Research, 146(5): 598-609.
- 9- Knight, D.W. and J.A. Macdonald. 1979. Hydraulic resistance of artificial strip roughness. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 105 (HY6): 675-690
- 10- Knight, D.W., Demetriou, J.D. and M.E. Homed, 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. Agricultural Water Management, 110(4): 405-422.
- 11- Knight D.W. and S.P. Harish 1985. Boundary Shear in Smooth Rectangular Ducts. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 111(1), 29-47.
- 12- Knight, D.W. 1981. Boundary shear in smooth and rough channels. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 107(7): 839-851.
- 13- Knight, D.W., Yuen, K.W.H. and A.A.I. Alhamid. 1994. Boundary shear stress distributions in open channel flow, in Physical Mechanisms of Mixing and Transport in the Environment, (Eds K. Beven, P. Chatwin and J. Millbank), J. Wiley, Chapter 4, 51-87.
- 14- Lashkar-Ara, B., Fathi-Moghadam, M., Shafai-Bajestan, M. and A. Jael. 2010. Boundary shear stress in smooth channels. International Journal of Food, Agriculture and Environment, (8):1
- 15- Leighly, J.B. 1932. Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams. University of California Publications in Geography, 6(1): 1-22.
- 16- Manning, R. 1891. On the flow of water in open channels and pipes. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 20: 161-207.

- 17- Myers, W.R.C. 1978. Momentum transfer in a compound channel. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2): 139–150.
- 18- Noutsopoulos, G.C. and P.A. Hadjipanos. 1982. Discussion of boundary shear in smooth and rough channels by D. W. Knight. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 108(6): 809–812.
- 19- Preston, J.H. 1954. The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 58: 109-121.
- 20- Patel, V.C. 1965. Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients". *Journal of Fluid Mechanics*, 23: 185-208.
- 21- Seckin, G., Seckin, N. and R. Yurtal. 2006. Boundary shear stress analysis in smooth rectangular channels, *Canadian Journal of Civil Engineering*. 33: 336-342.
- 22- Sutardi and C.Y. Ching. 2001. Effect of tube diameter on Preston tube calibration curves for the measurement of wall shear stress. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24: 93-97.