

## اثر قطر لوله پرستون در دقت تخمین مقاومت هیدرولیکی جریان در کانال‌های مستطیلی صاف

معصومه فتاحی<sup>۱</sup>، بابک لشکرآرا<sup>۲\*</sup> و محمد ذاکر مشفق<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۲\* - نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول. Lashkarara@jsu.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۳

### چکیده

در این مقاله به بررسی اثر قطر لوله پرستون در تخمین تنش برشی جداره لایه مرزی تحت اثر گرادیان فشار صفر پرداخته شده است. برای این منظور از چهار لوله پرستون با قطرهای خارجی ۳/۲، ۳/۹، ۴/۷، ۶/۳ میلی‌متر که متناظر با پارامتر نسبی قطر لوله پرستون به ضخامت لایه مرزی ( $D_p/\delta$ ) معادل با ۰/۰۳۹، ۰/۰۴۷، ۰/۰۵۷، ۰/۰۷۶ می‌باشد، استفاده شده است. اندازه‌گیری اختلاف فشار نقطه استاتیک و کل در لوله پرستون توسط ترانسدیوسر فشار تفاضلی با دقت ۰/۲ درصد مقیاس اصلی صورت گرفته است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش برشی در محدوده عدد رینولدز  $10^4 \times 6/4$  الی  $10^4 \times 39/87$  با استفاده از معادله‌های واسنجی پتل و بچرت نشان دادند که قطر لوله پرستون در تخمین تنش برشی تأثیر به‌سزایی دارد و هر دو روش واسنجی پتل و بچرت به قطر لوله پرستون حساس می‌باشند. حداکثر میزان اختلاف در اندازه‌گیری تنش برشی به‌دست آمده از قطرهای مختلف با استفاده از معادله‌های واسنجی پتل حدود ۹ درصد می‌باشد. این در حالی است که میزان اختلاف مقادیر نظیر توسط معادله واسنجی بچرت تا حدود ۱۴ درصد از خود افزایش نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های واسنجی پتل و بچرت نشان داد که به‌هنگام استفاده از قطر لوله پرستون معادل ۳/۹ میلی‌متر میزان اختلاف نتایج این دو روش از کمترین اختلاف ممکن برخوردارند. کلید واژه‌ها: لوله پرستون، پتل، بچرت، لایه مرزی، اصطکاک پوسته‌ای.

### Effect of Preston Tube Diameter to Accurate Estimation of Flow Resistance in Smooth Rectangular Open Channel

M. Fatahi<sup>1</sup>, B. Lashkar-Ara<sup>2\*</sup> and M. Zakermoshfegh<sup>3</sup>

- 1- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
- 2\* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
- 3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Received: 3 March 2016

Accepted: 10 July 2016

### Abstract

In this paper, the effect of tube diameter ( $D_p$ ) in measurement of shear stress ( $\tau_b$ ) of the boundary layer wall was investigated under a zero pressure gradient. For this purpose, four different tubes with outside diameters of 3.2, 3.9, 4.7 and 6.3 mm were used which are corresponded to  $D_p/\delta$  of 0.039, 0.047, 0.057 and 0.076, respectively. Measurement of the pressure difference of static point and total in Preston tube was implemented using a differential pressure transducer with accuracy of 0.2 percent of the original scale. The results of the shear stress measurements around Reynolds numbers from  $6.4 \times 10^4$  to  $39.87 \times 10^4$  using Patel and Bechert calibration equations showed that the Preston tube diameter has a significant impact on the shear stress estimation and both equations are sensitive to the tube diameter. The maximum value of difference in the shear stress measurements  $\tau_b$  of different tubes using Patel calibration is about 9%, while the Bechert calibration gives a maximum difference of approximately 14%.

Comparing results obtained from both Patel and Bechert calibration equations showed that variation in result of the two equations is minimum when the diameter Preston tube is 3.9 mm.

**Keywords:** Preston tube, Patel, Bechert, Boundary layer, Skin friction.

در نواحی زیر لایه لزج، لایه انتقالی و لایه لگاریتمی متلاطم، سیال وجود جریان آزاد خارج از لایه مرزی را درک نکرده و لذا مقیاس سرعت مناسب در آن‌ها نمی‌تواند سرعت جریان آزاد باشد. در این نواحی مقیاس سرعت دیگری موسوم به سرعت برشی بستر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (1)$$

که  $\tau_w$ : تنش برشی دیوار و  $\rho$ : جرم واحد حجم آب است. برای اندازه‌گیری تنش برشی جداره روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم بندی نمود. در روش مستقیم هیچ فرضی درباره شرایط جریان نمی‌شود. روش‌های مستقیم معمولاً به صورت مکانیکی بر اساس سنسور شناور و یا با استفاده از مواد شیمیایی انجام می‌پذیرند. روش شیمیایی بر اساس تغییر رنگ مواد پوشش کف و بدنه کانال استوار هستند.

بزرگ‌ترین مشکل این روش مقدار سطح بسیار کوچک و مقدار تنش بسیار کم و خطاهای فنی حاصل از آن است که اندازه‌گیری عملی با آن را بسیار محدود ساخته است. در روش‌های غیر مستقیم فرضیه‌های برای شرایط جریان اعمال می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش لوله پرستون، روش لوله استنتون، روش سیم داغ و روش گرادیان سرعت نزدیک دیوار اشاره نمود.

کلارز<sup>۴</sup> (۱۹۵۴) بر اساس قانون لگاریتمی پروفیل سرعت نموداری برای تعیین تنش برشی بستر ارائه داد. روش نمودار کلارز (۱۹۵۴) تنها هنگامی مناسب است که عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ‌تر از ۱۵۰۰ باشد (چنگ و همکاران<sup>۵</sup>، ۱۹۹۵). کلز<sup>۶</sup> (۱۹۵۶) در تحقیقات خود روی پروفیل سرعت نشان داد که در لایه‌های مرزی با شیب صفر یا معکوس، انحراف لایه خارجی از قانون لگاریتمی را می‌توان از طریق تابع برخاستگی محاسبه نمود.

پرستون<sup>۷</sup> در سال (۱۹۵۴) با اصلاح لوله پیتوت 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.

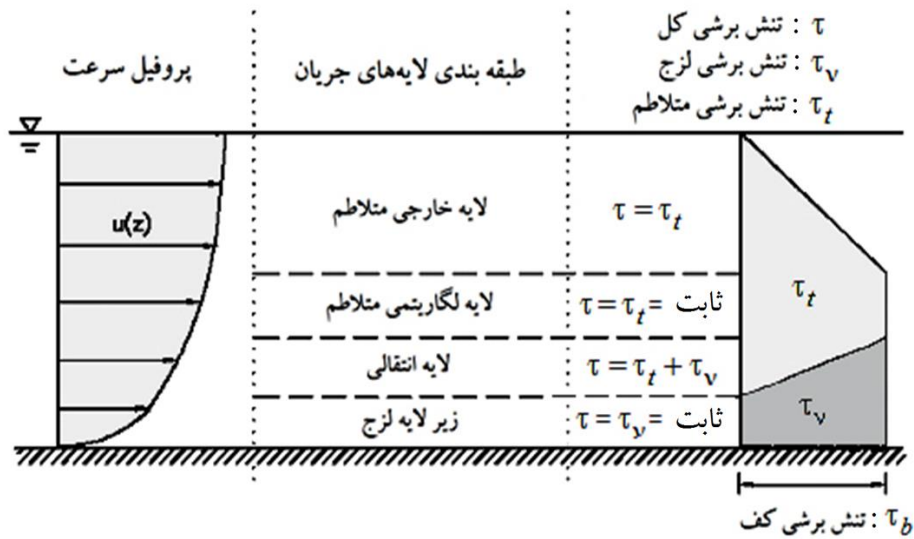
#### مقدمه

تنش برشی و سرعت برشی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در علوم هیدرولیک و مهندسی رودخانه می‌باشند. تنش در سیالات از تأثیر نیرو وارد بر سطح و یا تأثیر توام گرادیان سرعت و لزجت سیال حاصل می‌شود. از دیدگاه لزجت، جریان سیال را می‌توان به دو ناحیه تقسیم نمود. ناحیه اول که در آن لزجت از اهمیت کمی برخوردار بوده و سیال در این ناحیه شرایط سیال ایده آل را دارا می‌باشد. ناحیه دوم ناحیه‌ای است که در آن لزجت سیال دارای اهمیت است و در این ناحیه لایه مرزی تشکیل می‌شود. به تعبیر پرائنتل<sup>۱</sup> (۱۹۰۴)، تنش برشی به دلیل وجود لایه مرزی شکل می‌گیرد. تئوری لایه مرزی پرائنتل علت وجود نیروی مقاوم در مدل سیال ایده‌آل را توجیه می‌نماید (به نقل از سنگل و سیمبالا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶). از نقطه نظر علمی لایه‌های مختلف جریان را می‌توان مطابق شکل (۱) از پایین به بالا به شرح زیر طبقه‌بندی نمود. لایه نازکی که دقیقاً در بالای بستر قرار دارد تحت عنوان زیر لایه لزج یا زیر لایه برشی نامیده می‌شود. در این لایه تلاطم وجود نداشته و جریان آرام است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که تنش برشی لزج در این لایه ثابت است. ضخامت تئوریک این لایه برابر با  $11.6 \nu/u^*$  می‌باشد و حدوداً  $0.1$  تا  $1$  درصد ضخامت لایه مرزی متلاطم را تشکیل می‌دهد. بالاتر از این لایه جریان متلاطم است. لایه دوم تحت عنوان لایه انتقالی نام دارد که به آن لایه موقت نیز می‌گویند. در این لایه لزجت و تلاطم هر دو از درجه اهمیت بالایی برخوردارند. به دلیل طبیعت انتقالی این لایه در بسیاری از منابع از این لایه نامی برده نشده است. لایه سوم تحت عنوان لایه لگاریتمی متلاطم یا لایه برشی اینرسی نامگذاری شده است. تنش برشی لزج در این لایه ناچیز است (لیو<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱). بر اساس اندازه‌گیری‌ها، فرض می‌شود که تنش برشی متلاطم ثابت و برابر با تنش برشی کف می‌باشد.

در این لایه نظریه طول اختلاط پرائنتل و پروفیل لگاریتمی سرعت قابل کاربرد است. معمولاً از سطح جامد تا انتهای لایه برشی اینرسی حدود  $10$  تا  $20$  درصد ضخامت لایه مرزی را شامل می‌شود. لایه چهارم لایه خارجی متلاطم نامیده می‌شود. این لایه کاملاً تحت تأثیر جریان آزاد خارج از لایه مرزی بوده و حدود  $80$  الی  $90$  درصد ناحیه جریان را تشکیل می‌دهد. وجود گردابه‌های بزرگ در این ناحیه منجر به اختلاط قوی جریان و ثبات سرعت در این لایه می‌شود. در شکل (۱) ضخامت لایه‌ها بدون مقیاس نمایش داده شده‌اند.

4 - Clauser  
5 - Ching et al.  
6 - Coles  
7 - Preston

1 - Prandtl  
2 Çengel and Cimbala  
3 - Liu



شکل ۱- طبقه بندی نواحی مختلف جریان (لیو، ۲۰۰۱؛ فتاحی، ۱۳۹۴)

برای  $0 < y^* < 1.5$  و  $D^+ < 11.2$

$$y^* = 0.5x^* + 0.037 \quad (۳)$$

برای  $1.5 < y^* < 3.5$  و  $11.2 < D^+ < 110$

$$y^* = 0.8287 - 0.138x^* + 0.143x^{*2} - 0.006x^{*3} \quad (۴)$$

برای  $3.5 < y^* < 5.8$  و  $110 < D^+ < 1600$

$$x^* = y^* + 2 \log(1.95 y^* + 4.1) \quad (۵)$$

در روابط فوق  $D^+$ : از جنس عدد رینولدز بوده و از رابطه  $u_* D_p / \nu$  به دست می آید.  $u_*$ : سرعت برشی می باشد و از رابطه  $\sqrt{\tau_w / \rho}$  تعیین می شود.

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  $\Delta = (\nu / \rho u_*^3) (dp/dx)$  در محدوده مقادیر  $-0.007 < \Delta < 0.015$  قرار گیرد، واسنجی لوله پرستون مناسب بوده و این وسیله قادر خواهد بود که با دقت ۶ درصد نسبت به اندازه گیری تنش برشی مورد استفاده قرار گیرد (پتل، ۱۹۶۵). معادله های واسنجی پتل (۱۹۶۵) برای عدد رینولدز لوله حداکثر ۱۶۰۰ معتبر است و برای جریان با عدد رینولدز بزرگ کاربرد ندارد. این عامل باعث محدودیت اندازه لوله پرستون می شود. همچنین این معادله ها به هم پیوسته نیستند. بنابراین

با این وجود طبق مطالعات محققین، لوله پرستون به عنوان وسیله ای برای تعیین تنش برشی موضعی استفاده شده است. مشکل اصلی در استفاده از لوله پرستون یافتن معادله ای مناسب برای واسنجی قطر لوله آن می باشد. دقت در طراحی این وسیله، شرایط هیدرولیکی محل کاربرد آن و دقت شخص انجام دهنده آزمایش در صحت نتایج نقش به سزایی ایفا می کند.

پرستون (۱۹۵۴) در تحقیقات خود رابطه ای بین تنش برشی جدار و تفاضل فشار استاتیک و فشار در نقطه سکون برقرار نمود و با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه (۲) را استخراج نمود:

$$\log \frac{\tau_w D_p^2}{4 \rho \nu^2} = 2.604 + \frac{7}{8} \log \left( \frac{\Delta P_p D_p^2}{4 \rho \nu^2} \right) \quad (۲)$$

که در آن  $\tau_w$ : تنش برشی جداره (موضعی) بر حسب پاسکال،  $D_p$ : قطر خارجی لوله پیتوت بر حسب متر،  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $\nu$ : لزجت سینماتیک و  $\Delta P_p$ : تفاضل فشار استاتیک و فشار کل در نقطه توقف در لوله پرستون می باشد. مطابق نظر پرستون (۱۹۵۴) قطر لوله مورد استفاده نباید بیشتر از ۰/۱ ضخامت لایه مرزی باشد. پتل (۱۹۶۵) با ایجاد تغییر در قطر لوله پرستون آزمایش های متعددی را انجام داد که سرآمد تحقیقات وی منجر به معرفی معادله های واسنجی پتل (۱۹۶۵) گردید. وی با معرفی دو پارامتر بدون بعد  $x^* = \log(\Delta P_p D_p^2 / 4 \rho \nu^2)$  و  $y^* = \log(\tau_w D_p^2 / 4 \rho \nu^2)$  نسبت به اصلاح معادله (۲) اقدام نمود و روابط اصلاحی خود را به شرح زیر ارائه کرد:

$$x^* = y^* + 2 \log(1.813y^* + 4.743) \quad (9)$$

$$x^* = y^* + 2 \log(1.802y^* + 4.991) \quad (10)$$

سوتاردی و چینگ<sup>۸</sup> (۲۰۰۱) با تحلیل حساسیت قطر لوله پرستون نشان دادند که در شرایطی که نسبت قطر لوله پرستون به ضخامت لایه مرزی ۰/۰۴۸ بوده و گرادیان فشاری نیز صفر باشد، قطر لوله ۳/۲۳ میلی‌متر می‌تواند حداقل اختلاف را در تعیین ضریب مقاومت جریان محاسبه شده توسط معادله‌های بچرت و پتل به‌همراه داشته باشد.

صفرزاده و صالحی نیشابوری (۱۳۹۱) با استفاده از لوله پرستون سه لوله نسبت به تعیین توزیع تنش برشی در اطراف سازه آبشکن با فرکانس ۸۵ 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 حداکثر 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.

لشکرآرا و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۰) با استفاده از روش غیر مستقیم و با بهره‌گیری از لوله پرستون نسبت به اندازه‌گیری تنش برشی متوسط بستر و جداره در کانال‌های مستطیلی اقدام نمودند. لشکرآرا و فتحی‌مقدم (۱۳۹۴) با استفاده از ابزاری نوین تحت عنوان فلوم لبه چاقویی نسبت به اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در کانال‌های مستطیلی صاف اقدام نمودند. این سیستم اندازه‌گیری بر پایه تعادل نیرو استوار است و آنان برای تفکیک تنش برشی موضعی در کف و جداره مجرا از لوله پرستون با قطر خارجی ۴ میلی‌متر استفاده نمودند. در این تحقیق میزان اختلاف فشار استاتیکی و کل اندازه‌گیری شده توسط ترانسیدوسر فشار با استفاده از منحنی واسنجی پتل به تنش برشی تبدیل شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان تنش برشی حاصل از روش تعادل نیرو و روش غیر مستقیم به ترتیب دارای حداکثر ۴ درصد و ۸ درصد خطا نسبت به نتایج حاصل از معادله تئوریک حاصل از شیب بستر فلوم می‌باشد.

بنابراین از آنجایی که روش پرستون و مطالعات انجام شده در حاشیه آن برای تخمین تنش برشی در بسترهای صاف هیدرولیکی علاوه بر قطر لوله پرستون به گرادیان فشار نیز حساس است، لذا تحلیل حساسیت قطر لوله پرستون در تخمین تنش برشی جداره ضروری به نظر می‌رسد. هدف تحقیق حاضر نیز بررسی اثر قطر لوله پرستون در تخمین مقاومت هیدرولیکی جریان تحت اثر

برادشو و وانگ<sup>۱</sup> (۱۹۷۲) معادله‌های پتل (۱۹۶۵) را تصحیح کردند (به نقل از زاگارولا و همکاران<sup>۲</sup> ۲۰۰۱).

لوله پرستون برای جریان‌های فوق صوت نیز استفاده می‌شود. آن<sup>۳</sup> (۱۹۷۳) و برادشو و یوونسورث<sup>۴</sup> (۱۹۷۴) معادله‌هایی برای منحنی واسنجی در جریان‌های فوق صوت و زیر صوت ارائه دادند. برتلرود<sup>۵</sup> (۱۹۷۶) (به نقل از کساب<sup>۶</sup>، ۱۹۹۳) یک معادله واسنجی برای لوله پرستون بر اساس مطالعات خویش به صورت زیر ارائه نمود:

$$\frac{\Delta P_p}{\tau_w} = 87.77 \log_{10} d^* - 51.93 \quad 50 < d^* < 1000 \quad (6)$$

و

$$\frac{\Delta P_p}{\tau_w} = 38.85 \log_{10} \left( \frac{\Delta P_p D_p^2}{\rho v^2} \right) - 111.92 \quad (7)$$

$$2.5 \times 10^5 < \frac{\Delta P_p D_p^2}{\rho v^2} < 2.1 \times 10^8$$

که  $\tau_w = \rho u^*$  و  $d^* = u^* D_p / \nu$  می‌باشد.

بچرت<sup>۷</sup> (۱۹۹۵) معادله زیر را ارائه داد که در محدوده  $2.5 < x^* < 9.0$  معتبر است:

$$\tau^+ = \left[ 28.44 (\Delta p^+)^2 + 6.61 \times 10^{-6} (\Delta p^+)^{3.5} \right]^{1/4} \quad (8)$$

که در آن  $\tau^+$ : تنش برشی نرمال شده بدون بعد و  $\Delta p^+$ : مقدار اختلاف فشار نرمال شده بدون بعد می‌باشند که به ترتیب از روابط  $\tau_0 D_p^2 / \rho V^2$  و  $\Delta P_p D_p^2 / \rho V^2$  به‌دست می‌آیند.

زاگارولا و همکاران (۲۰۰۱) به واسنجی لوله پرستون برای جریان با اعداد رینولدز بالا پرداختند. آنان در تحقیقات خود معادله‌های واسنجی جدیدی را برای لوله پرستون اصلاح شده و غیر اصلاح شده در محدوده  $6.4 < x^* < 11.3$  و  $4.3 < y^* < 8.7$  ارائه نمودند. بر اساس این تحقیقات، تنش برشی دیوار به شرطی که فاصله مقیاس لایه داخلی تا دیوار برابر با قطر لوله باشد در محدوده حداکثر خطای ۸ درصد قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج این تحقیق رابطه (۹) برای لوله پرستون معمولی و رابطه (۱۰) برای لوله پرستون اصلاح شده بشرح زیر ارائه گردید:

- 1 - Bradshaw and Wong
- 2 - Zagarola et al.
- 3 - Allen
- 4 - Bradshaw and Unsworth
- 5 - Bertelrud
- 6 - Kassab
- 7 - Bechert

8 - Sutardi and Ching

9 - Lashkar-Ara et al.

در کلیه یازده ایستگاه با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) قابل تعیین می‌باشند:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.382}{\text{Re}_x^{1/5}} \quad (11)$$

$$C_f = \frac{2\tau_b}{\rho U^2} \quad (12)$$

که در آن  $\delta$ : ضخامت زیر لایه ورقه‌ای،  $x$ : فاصله ایستگاه از ابتدای فلوم،  $\text{Re}_x$ : رینولدز طولی،  $\tau_b$ : تنش برشی بستر،  $\rho$ : جرم مخصوص سیال،  $U$ : سرعت سیال و  $C_f$ : ضریب اصطکاک کف کانال می‌باشد.

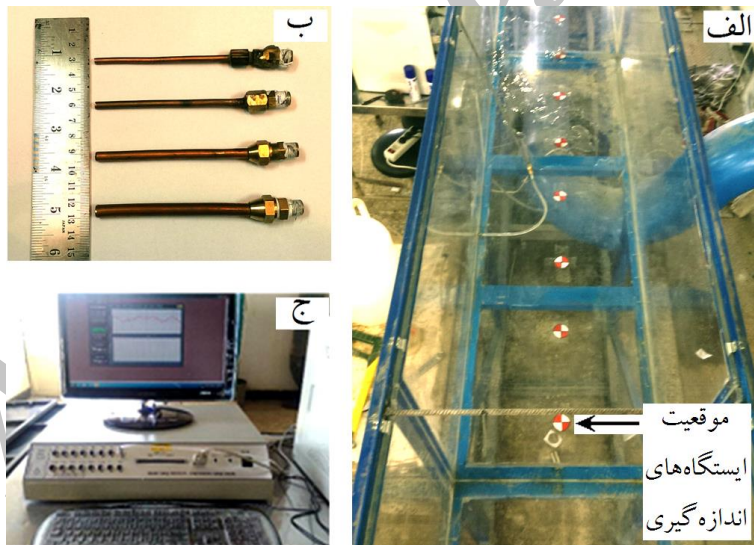
سپس میزان تنش برشی در مرکز کانال ( $\tau_b$ ) توسط لوله پرستون به قطرهای ۳/۲، ۳/۹، ۴/۷ و ۶/۳ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. مقادیر اختلاف فشار استاتیک و کل در نسبت‌های ظاهری  $B/H$  های مختلف توسط یک دستگاه ترانسیدوسر فشار تفاضلی با ظرفیت ۲۰۰ میلی‌بار و فرکانس ۵۰ هرتز اندازه‌گیری و نتایج مربوطه گزارش گردید.

گردایان فشار صفر و تحلیل حساسیت این قطر لوله بر معادله‌های واسنجی پتل و بچرت می‌باشد.

### روش تحقیق

در تحقیق حاضر به منظور تحلیل حساسیت قطر لوله پرستون در تخمین ضریب مقاومت هیدرولیکی جریان از یک فلوم با طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور استفاده شد. برای اندازه‌گیری ضریب مقاومت هیدرولیکی در بستر کانال از چهار لوله با قطرهای خارجی مختلف ۳/۲، ۳/۹، ۴/۷، ۶/۳ میلی‌متر از آلیاژ مس استفاده گردید. برای حصول اطمینان از توسعه لایه مرزی ۱۱ ایستگاه اندازه‌گیری به فواصل ۳۰ سانتی‌متر در طول فلوم تعیین شد. موقعیت ایستگاه‌های مذکور در شکل (۲-الف) و لوله‌های مسی با قطرهای مختلف در شکل (۲-ب) نشان داده شده‌اند.

با استفاده از معادله انتگرال تکانه برای جریان با شیب فشار صفر و استفاده از قانون یک هفتم پراتل برای مدل‌سازی نمایه سرعت در جریان متلاطم بر روی صفحات تخت و صاف، مقادیر ضخامت لایه مرزی و ضریب اصطکاک جداره در مرکز کف فلوم

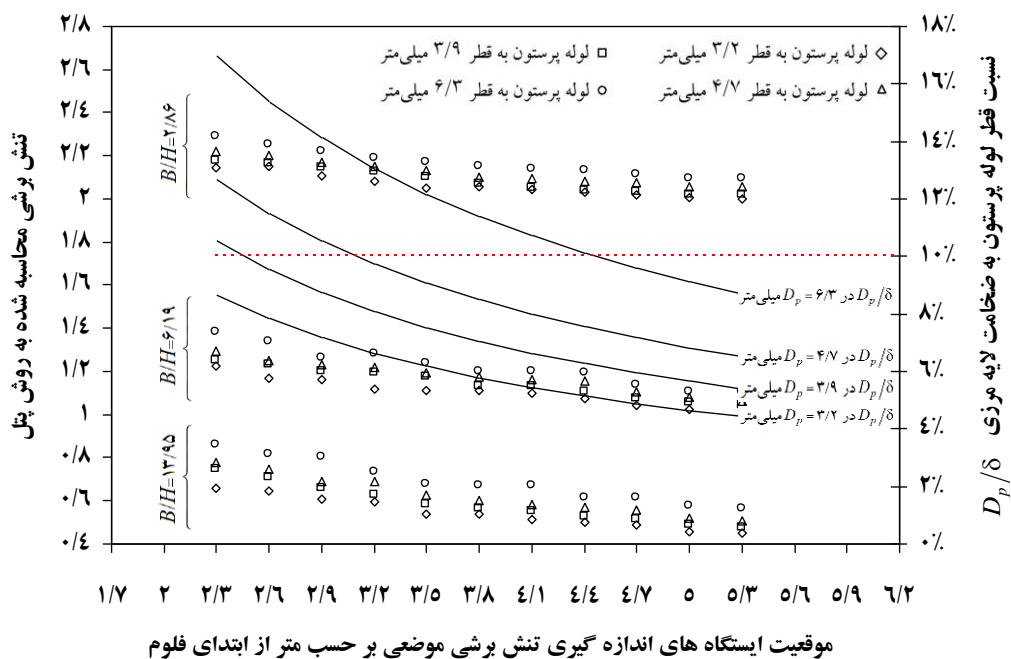


شکل ۲- نمایی از تجهیزات مورد استفاده شامل الف) فلوم و مقاطع مورد استفاده در کف کانال برای تشخیص توسعه لایه مرزی ب) انواع لوله پرستون مورد استفاده ج) ثبت کننده‌ی داده

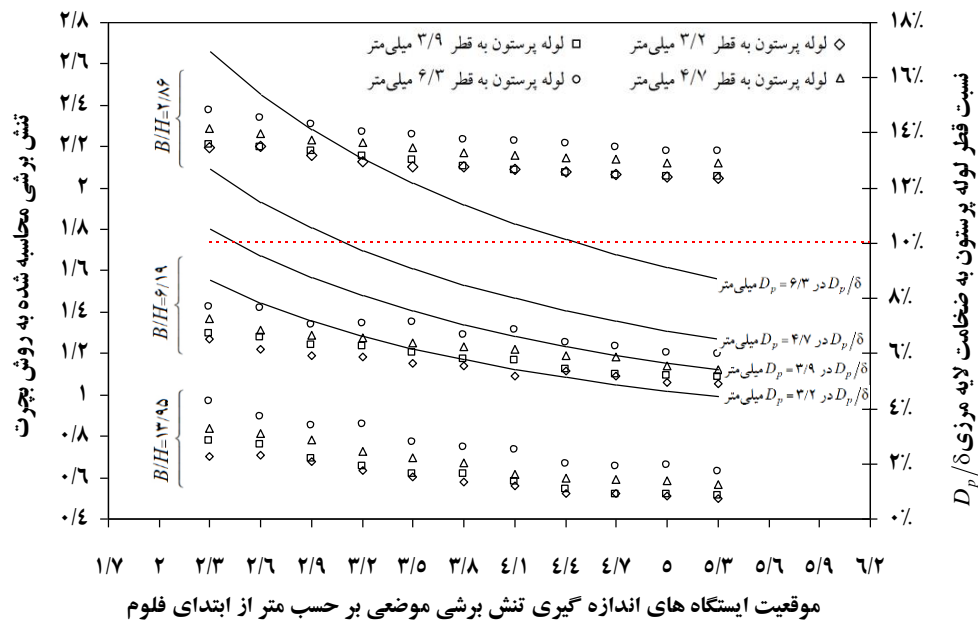
نسبی  $D_p/\delta$  در هر یک از یازده ایستگاه اندازه‌گیری به ازای تغییر در قطر لوله پرستون و نسبت ظاهری  $B/H$  محاسبه گردید. نمونه‌ای از بررسی‌های صورت گرفته در نسبت‌های ظاهری  $2/86$ ،  $6/19$  و  $13/95$  در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. بررسی نتایج در کلیه نسبت‌های ظاهری حاکی از آن است که در چهار ایستگاه اندازه‌گیری انتهایی، به طور قطع شرط مورد نظر پرستون در خصوص جای‌گیری قطر لوله پرستون در ضخامت ۱۰ درصدی لایه مرزی تضمین خواهد شد. لذا متوسط تنش‌های برشی حاصل از چهار ایستگاه آخر به‌عنوان مبنای مقایسه نتایج تنش برشی حاصل از معادله‌های واسنجی پتل و بچرت قرار گرفت. بررسی نتایج حاصل از اختلاف مقادیر محاسباتی تنش برشی بستر در کلیه قطرهای مختلف لوله پرستون مورد استفاده در تحقیق، به ازای تغییر در میزان نسبت ظاهری در جدول (۱) خلاصه شده است.

### نتایج و بحث

کلیه اندازه‌گیری‌ها در محدوده دبی جریان بین  $11/06$  الی  $102/38$  لیتر بر ثانیه انجام گردید. تغییرات دبی منجر به مشاهده نسبت‌های ظاهری بین  $2/86$  الی  $13/95$  شد. در هر یک از نسبت‌های ظاهری مشاهده شده، مقادیر اختلاف فشار استاتیک و کل لوله پرستون با استفاده از هر یک از چهار قطر مختلف، در تمامی یازده ایستگاه نشانه گذاری شده، اندازه‌گیری و ثبت گردید. سپس با بهره‌گیری از معادله‌های واسنجی پتل و بچرت، تنش برشی موضعی محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. اعداد رینولدز در کلیه مراحل آزمایش در محدوده‌ای بین  $11/6 \times 10^4$  الی  $39/87 \times 10^4$  تغییر نمود و این امر گویای آن است که شرایط جریان متلاطم بر فضای تحقیق حاکم است. به‌منظور تأمین شرایط توصیه شده توسط پرستون (۱۹۵۴) در خصوص نسبت قطر لوله  $D_p$  به ضخامت لایه مرزی ( $\delta$ )، مقادیر



شکل ۳- مقادیر تنش برشی حاصل از به‌کارگیری معادله‌های واسنجی پتل در نسبت‌های ظاهری مختلف



شکل ۴- مقادیر تنش برشی حاصل از به کارگیری معادله بچرت در نسبت های ظاهری مختلف

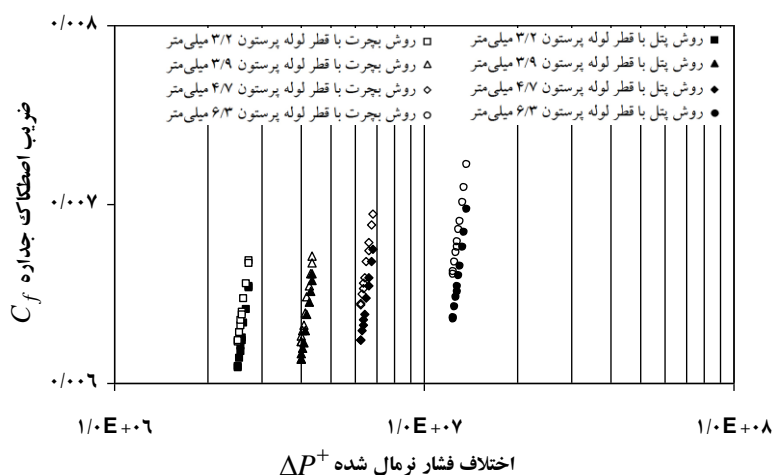
جدول ۱- میانگین اختلاف مقادیر تنش برشی موضعی محاسباتی در نقاط منطبق بر محور مرکزی کف کانال ( $\tau_b$ ) با استفاده از معادله های واسنجی پتل و بچرت در نسبت های ظاهری مختلف

متوسط اختلاف در تنش ( $\tau_b$ ) (درصد)	$D_p u^* / \nu$	$D_p / \delta$	قطر لوله (میلی متر)	نسبت ظاهری B/H
۴/۶۹	۱۱۳/۳۳	۰/۰۴۴	۳/۲	۲/۸۶
۳/۰۲	۱۳۸/۱۲	۰/۰۵۴	۳/۹	
۶/۶۲	۱۶۶/۴۵	۰/۰۶۵	۴/۷	
۸/۳۱	۲۲۳/۱۲	۰/۰۸۷	۶/۳	
۴/۵۵	۸۷/۲۹	۰/۰۴۱	۳/۲	۶/۱۹
۳/۰۶	۱۰۶/۴	۰/۰۵	۳/۹	
۵/۷۳	۱۲۸/۲۲	۰/۰۶۱	۴/۷	
۸/۳۲	۱۷۱/۸۷	۰/۰۸۲	۶/۳	
۵/۰۰	۷۵/۴۶	۰/۰۴	۳/۲	۸/۹۶
۲/۹۶	۹۱/۹۶	۰/۰۴۹	۳/۹	
۶/۵۹	۱۱۰/۸۳	۰/۰۵۹	۴/۷	
۸/۵۰	۱۴۸/۵۶	۰/۰۷۹	۶/۳	
۴/۱۱	۶۲/۵۳	۰/۰۳۹	۳/۲	۱۳/۹۵
۱/۹۵	۷۶/۲۱	۰/۰۴۷	۳/۹	
۴/۷۴	۹۱/۸۴	۰/۰۵۷	۴/۷	
۵/۷۸	۱۲۳/۱۱	۰/۰۷۶	۶/۳	

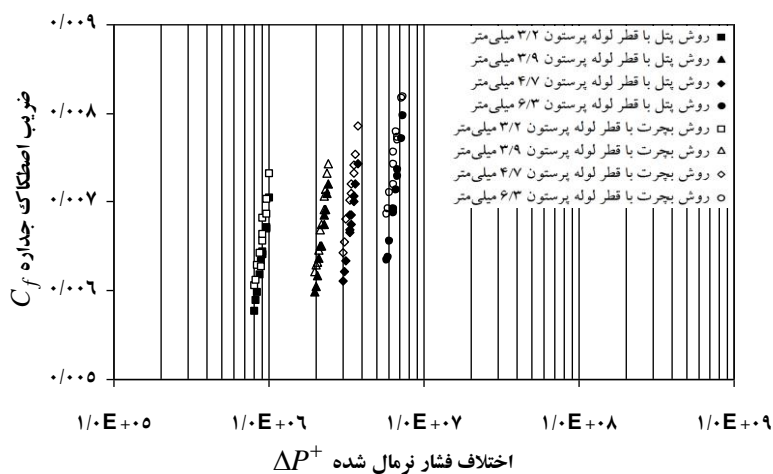
مقادیر ضریب اصطکاک جداره ( $C_f$ ) محاسبه شده توسط روش واسنجی پتل و معادله واسنجی بچرت در مقابل مقدار اختلاف فشار نرمال شده بدون بعد ( $\Delta P^+$ ) در نسبت های ظاهری ۲/۸۶، ۶/۱۹، ۸/۹۶ و ۱۳/۹۵ به وسیله هر یک از چهار قطر لوله پرستون اندازه گیری گردید. نتایج به ترتیب در شکل های (۵) الی (۸) نمایش داده شده اند.

مقادیر مندرج در جدول (۱) گویای آن است که نتایج حاصل از به کارگیری قطر لوله ۳/۹ میلی متر، کمترین اختلاف را در مقدار متوسط تنش برشی حاصل از به کارگیری معادله های واسنجی پتل و معادله واسنجی بچرت دارد. برای همه قطر ها مقدار تنش برشی به دست آمده در معادله واسنجی بچرت بیشتر از معادله های واسنجی پتل می باشد.

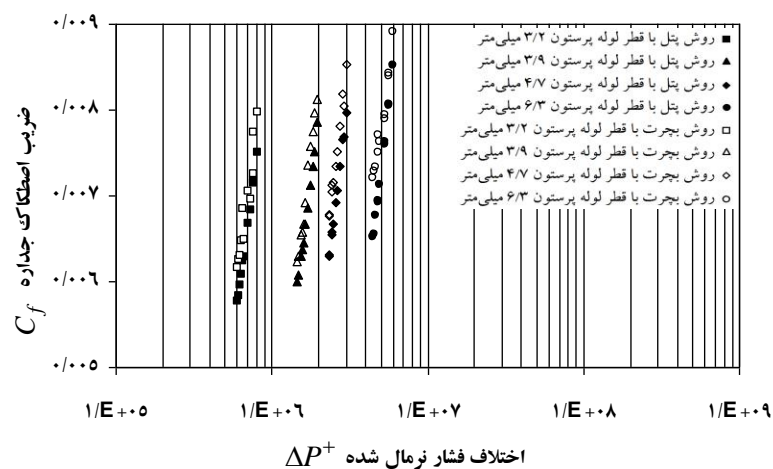
فناحی و همکاران: اثر قطر لوله پرستون در دقت تخمین مقاومت هیدرولیکی...



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک جداره در مقابل مقدار اختلاف فشار نرمال شده در نسبت ظاهری ۲/۸۶

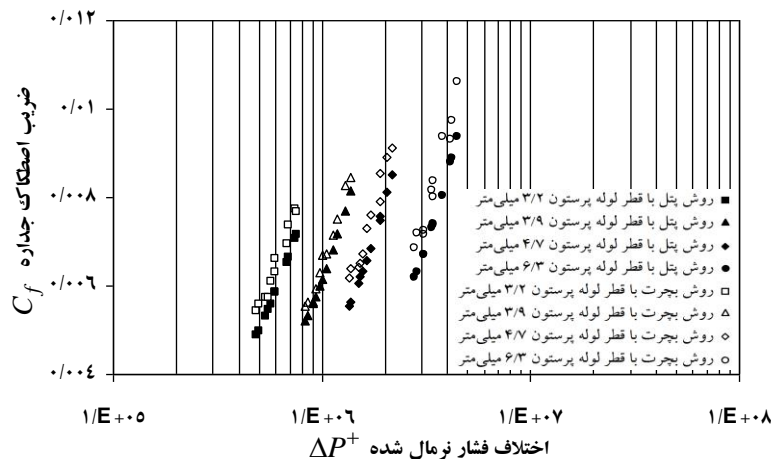


شکل ۶- تغییرات ضریب اصطکاک جداره در مقابل مقدار اختلاف فشار نرمال شده در نسبت ظاهری ۶/۱۹



شکل ۷- تغییرات ضریب اصطکاک جداره در مقابل مقدار اختلاف فشار نرمال شده در نسبت ظاهری ۸/۹۶





شکل ۸- تغییرات ضریب اصطکاک جداره در مقابل مقدار اختلاف فشار نرمال شده در نسبت ظاهری ۱۳/۹۵

تخمین تنش برشی جداره اقدام شد. با تحلیل نتایج به دست آمده از چهار قطر لوله متفاوت در چهار نسبت ظاهری مختلف و ۱۱ ایستگاه اندازه گیری، مشخص گردید که هر دو روش واسنجی پتل و بچرت به قطر لوله پرستون مورد استفاده حساس می باشند. حداکثر میزان اختلاف در اندازه گیری تنش برشی به دست آمده از لوله پرستون با قطرهای مختلف با استفاده از معادله های واسنجی پتل حدود ۹ درصد می باشد در حالی که این میزان اختلاف توسط معادله واسنجی بچرت تا حدود ۱۴ درصد افزایش نشان می دهد. ذکر این نکته ضروری است که نتایج این تحقیق نشان داد که روش واسنجی پتل نسبت به روش بچرت از حساسیت کمتری نسبت به قطر لوله پرستون برخوردار است. همچنین بررسی ها نشان داد که کمترین اختلاف بین نتایج روش های واسنجی پتل و بچرت در تخمین تنش برشی بستر به هنگام استفاده از لوله پرستون با قطر خارجی ۳/۹ میلی متر محقق می گردد. این موضوع بیانگر آن است که لوله پرستون با قطر خارجی ۳/۹ میلی متر از سازگاری مناسبی با شرایط روش های واسنجی پتل و بچرت برخوردار است. لذا می توان این قطر را به عنوان قطر بهینه لوله پرستون معرفی نمود.

### تقدیر و تشکر

بدینوسیله نگارندگان این پژوهش از دانشگاه صنعتی جندی شاپور به پاس تامین منابع مالی و تدارک امکان استفاده از آزمایشگاه مدل های هیدرولیکی و مهندسی رودخانه تقدیر و تشکر می نمایند.

مقایسه نتایج شکل های (۵) الی (۸) گویای آن است که در مجموع با افزایش نسبت ظاهری، ضریب اصطکاک جداره محاسبه شده توسط کلیه لوله های پرستون با قطرهای مختلف، افزایش می یابد. از طرفی مقایسه کیفی نتایج حاصل از معادله های واسنجی پتل و معادله واسنجی بچرت گویای آن است که ضریب اصطکاک جداره محاسبه شده توسط این دو روش های در قطر لوله پرستون ۳/۹ میلی متر در مقایسه با دیگر قطرها از اختلاف نسبی کمتری برخوردارند.

بیشترین اختلاف در مقادیر تنش برشی موضعی بستر بین نتایج منحنی واسنجی پتل و معادله واسنجی بچرت در قطر ۶/۳ به دست آمده است. مقدار ضریب مقاومت پوسته ای ( $C_f$ ) حاصل از هر دو روش واسنجی پتل و بچرت به هنگام استفاده از لوله پرستون با قطر خارجی ۳/۹ میلی متر به یکدیگر خیلی نزدیک می باشند. این مطلب گویای آن است که با استفاده از لوله پرستون با قطر ۳/۹ میلی متر، می توان تنش برشی موضعی را با کمترین خطای موجود تقریب زد. همچنین در معادله واسنجی بچرت میانگین اختلاف تنش برشی ( $\tau_b$ ) بین بزرگ ترین و کوچک ترین قطر به طور متوسط حدود ۱۴ درصد و در روش پتل میانگین اختلاف تنش برشی ( $\tau_b$ ) بین بزرگ ترین و کوچک ترین قطر حدود ۹ درصد می باشد که نشان دهنده این است که روش پتل حساسیت کمتری به قطر لوله پرستون از خود نشان می دهد. لذا بر این اساس توصیه می شود که برای تعیین توزیع تنش برشی از نتایج منحنی واسنجی پتل استفاده شود.

### نتیجه گیری

در این تحقیق با بهره گیری از نتایج آزمایشگاهی نسبت به تعیین قطر بهینه لوله پرستون و مناسب ترین روش واسنجی نتایج

## منابع

- ۱- صفرزاده گندشمین، ا. و ع.ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۹۱. مطالعه توزیع تنش برشی بستر پیرامون سازه‌های رودخانه‌ای با استفاده از پرستون سه لوله. مجله هیدرولیک، ۷ (۳): ۴۲-۴۷.
- ۲- فتاحی، م. ۱۳۹۴. تحلیل حساسیت قطر لوله پرستون جهت تخمین توزیع عرضی تنش برشی جریان در کانال‌های مستطیلی صاف. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور.
- ۳- لشکرآرا، ب. و م. فتحی مقدم. ۱۳۹۳. تحلیل تنش برشی در کانال‌های روباز با مقطع مستطیلی به روش تعادل نیرو. مجله هیدرولیک، ۹ (۳): ۴۳-۳۳.
- 4- Allen, J.M. 1973. Evaluation of Preston tube calibration equations in supersonic flow. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 11: 1461-1462.
- 5- Bechert, D.W. 1995. Calibration of Preston tube. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 34(1): 205-206.
- 6- Bradshaw, P. and F.Y.F. Wong, 1972. The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer. Journal of Fluid Mechanics, 52: 113-135.
- 7- Bradshaw, P. and K. Unsworth. 1974. Comment on Evaluation of Preston tube calibration equations in supersonic flow: American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 12:1293-1296.
- 8- Çengel, Y.A. and J.M. Cimbala. 2006. Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications. Mc Graw Hill.
- 9- Ching, C. Djenidi, Y. and L. Antonia. 1995. Low-Reynolds-number effects in a turbulent boundary. Experimental in Fluid, 19(1): 61-68.
- 10- Clauser, F.H. 1954. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients. Journal of the Aeronautical Sciences, 21: 91-108.
- 11- Coles, D. 1956. The law of the wake in the turbulent boundary layer. Journal of Fluid Mechanics, 1:191-226.
- 12- Kassab, S. Z. 1993. A Preston tube calibration chart. Review of Scientific Instruments, 64(1): 253-256.
- 13- 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): 343-347.
- 14- Liu, Z. 2001 Sediment transport. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik. Aalborg Universitet.
- 15- Patel, V.C. 1965. Calibration of the Preston Tube and limitations on its use in pressure gradients. Journal of Fluid Mechanics, 23: 185-208.
- 16- Preston, J.H. 1954. The determination of turbulent skin friction by means of Pitot tubes. Journal of The Royal Aeronautical Society, 58: 109-121.
- 17- 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.
- 18- Zagarola, M.V., Williams, D. R. and A.J. Smits. 2001. Calibration of the Preston probe for high Reynolds number flows. Measurement Science and Technology, 12(4): 495-501.