

# Experimental Study of the Effect of Bed Forms on Darcy-Weisbach Friction Coefficient in the Straight Open Channels


Mostafa Heydari<sup>1</sup>, Mohammad Bahrami Yarahmadi<sup>2\*</sup>, Mahmood Shafai Bejestan<sup>3</sup>

1- M.Sc. in Civil Engineering (Water & Hydraulic Structures), Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\* [m.bahrami@scu.ac.ir](mailto:m.bahrami@scu.ac.ir)

Received: 26 July 2021, Accepted: 19 September 2021  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** One of the most important parameters in the hydraulic engineering is the flow resistance coefficient, e.g. Darcy-Wiesbach, in alluvial rivers; in which is divided into two categories: grain resistance and form resistance. The grain resistance is a function of the bed sediment size; while the form resistance is a function of the bed form geometry. Ripple and dune are among the most common forms formed in alluvial rivers that are triangular in shape (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010). The effect of the bed form on the flow resistance have been studied by few researchers such as: Talebbeydokhti et al. (2006), Omid et al. (2010), Nasiri Dehsorkhi et al. (2011), Chegini and Pender (2012), Kabiri et al. (2014), and Kwoil et al. (2016). However, the effect of roughened bed form, bed form covered with artificial roughness of different sizes, on the Darcy-Wiesbach friction coefficient has received little attraction. Therefore, it is the main goal of the present study to experimentally analyze this issue by considering different flow rates and different bed slopes. In this study, sediments with sizes of 0.51 and 2.18 mm were used to rough the surface of the bed forms.

**Methodology:** The experiments were performed in a sloping straight flume (manufactured by Armfield, UK). The length and width of the flume respectively were 12 and 0.3 m. In this study, flow rates of 10, 15, 20, 25, and 30 l/s and bed slopes of 0, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 were examined.

The present study experiments were divided into two categories: bed without form and bed with form. Each form was made by P.V.C sheet in a triangular shape. The bed form length and height were equal to 20 and 4 cm, respectively, and the angles of its upstream and downstream to the horizon were selected as 16.4 and 32 degrees, respectively. After making each form, the desired sediments were glued on their surface. In this study, two types of uniform granulation with average sizes ( $d_{50}$ ) of 0.51 and 2.18 mm were used. The total number of experiments in the present study was 100.

**Results and Discussion:** Ripple and dune form are usually being developed in lower flow regime, in which the Froude number is less than 1 (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010). In this study, the Froude number values in all tests with bed form were from 0.435 to 0.6, indicating a lower flow regime.

The results indicated that as the Froude number increased, the total Darcy-Wiesbach's

coefficient ( $f_b$ ) decreased for sediment-covered with sand sizes of 0.51 and 2.18 mm. In addition, increasing the longitudinal slope of the bed, causes the  $f_b$  to increase.

The results also showed that with increasing relative submergence rate, the total Darcy-Wiesbach's coefficient decreased due to the relative roughness reduction for the slope of 0.0001. In addition, it is concluded that  $f_b$  increased with increasing particle size. Calculations showed that the value of  $f_b$  in beds with a sediment size of 2.18 mm for slopes of 0, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 on average 32.8, 28.8, 28.46, 33.8, and 35.9% are more than the bed covered with 0.5 mm sediment size, respectively.

The analysis of results indicated that the grain Darcy-Weisbach's coefficient ( $f'_b$ ) for particles with sizes of 0.51 and 2.18 mm are on average 25.45 and 26.8% of the total friction coefficient ( $f_b$ ), respectively. In addition, from Darcy-Weisbach's coefficient ( $f''_b$ ) for particles with sizes of 0.51 and 2.18 mm is on average 74.55 and 73.2% of the total friction coefficient ( $f_b$ ), respectively. According to the results, it can be seen that the value of  $f''_b$  for particles with a size of 0.51 and 2.18 mm on average is 193.6 and 173.4% more than  $f'_b$ , respectively.

**Conclusion:** The results showed that with increasing the particle size of the bed, the total Darcy-Wiesbach's coefficient ( $f_b$ ) and the grain Darcy-Wiesbach's coefficient ( $f'_b$ ) increased. The value of  $f_b$  in sedimentary beds with a size of 2.18 mm is on average 32% higher than sedimentary beds with a size of 0.5 mm. Meanwhile, the value of the form Darcy-Wiesbach's coefficient ( $f''_b$ ) for particles with a size of 0.51 and 2.18 mm on average is 193.6 and 173.4% more than  $f'_b$ , respectively.

**Keywords:** Bed form, Ripple, Dune, Darcy-Weisbach friction coefficient.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# مطالعه آزمایشگاهی اثر فرم‌های بستر بر ضریب اصطکاک داری ویسباخ در مجاری روباز مستقیم

مصطفی حیدری<sup>۱</sup>، محمد بهرامی یاراحمدی<sup>۲\*</sup>، محمود شفاعی بجزستان<sup>۳</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۲- استادیار گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- ۳- استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*m.bahrami@scu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** تشکیل فرم‌های بستر در رودخانه‌های آبرفتی سبب تغییر مقاومت در برابر جریان و ضریب اصطکاک داری ویسباخ می‌گردد. فرم‌های بستر ریپل و دیون از جمله متداولترین فرم‌های بستر تشکیل شونده در رودخانه‌های آبرفتی هستند که به شکل مثلث می‌باشند و در رژیم جریان پایین (عدد فرود کوچکتر از ۱) تشکیل می‌شوند. مطالعات زیادی در گذشته در رابطه با عوامل موثر بر ضریب اصطکاک داری ویسباخ صورت گرفته است، ولی تحقیقات اندکی در رابطه با اثر فرم‌های بستر با اندازه رسوبات متفاوت بر ضریب اصطکاک داری ویسباخ انجام شده است. لذا در این تحقیق از رسوبات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر برای زبر کردن سطح فرم‌های بستر استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه ذرات بستر ضریب اصطکاک داری ویسباخ کل ( $f_B$ ) و ضریب اصطکاک داری ویسباخ مربوط به ذره ( $f_B^d$ ) افزایش یافتند. مقدار  $f_B$  در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط ۳۲ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵ میلی‌متر بود. در ضمن، مقدار ضریب اصطکاک داری ویسباخ مربوط به ذره ( $f_B^d$ ) برای ذرات با اندازه ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر بطور متوسط به ترتیب ۲۵/۴۵ و ۲۶/۸ درصد ضریب اصطکاک داری ویسباخ کل ( $f_B$ ) بود.

**کلید واژگان:** فرم بستر، ریپل، دیون، ضریب اصطکاک داری ویسباخ.

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوع‌ها در هیدرولیک تعیین مقاومت در برابر جریان در رودخانه‌های آبرفتی است. ضریب اصطکاک داری ویسباخ یکی از ضریب‌های مقاومت در برابر جریان در رودخانه‌ها می‌باشد. برآورد درست این ضریب می‌تواند به برآورد دقیق شرایط هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها کمک کند. مقاومت در برابر جریان در رودخانه‌های آبرفتی به دو دسته مقاومت ذره و مقاومت شکل بستر تقسیم می‌شود. مقاومت ذره تابعی از اندازه رسوب‌های بستر است اما مقاومت فرم بستر تابع ویژگی‌های هندسی و شکل بستر می‌باشد. شکل‌های بستر در رودخانه‌های آبرفتی در اثر حرکت بار بستر به وجود می‌آیند. ریپل، دیون، آنتی دیون، سرسره و استخر انواع مختلف شکل

بستر به شمار می‌آیند که هرکدام از آنها در شرایط هیدرولیکی و رسوبی خاصی در رودخانه تشکیل می‌شوند (Shafai, 2010; Julien, 2008; Bajestan, 2008). در رابطه با بررسی تأثیر اندازه ذرات رسوبی بر ضریب اصطکاک داری ویسباخ (مقاومت ذره) تحقیقات زیادی در گذشته صورت گرفته است که در این زمینه می‌توان به تحقیقات Hey (1979), Madrid-Aris (1992), Bathurst (2002), Afzalimehr and Anctil (1998), Romero et al. (2010) و Recking et al. (2008) در خارج از کشور و Motie et al. (2005) و Bahrami (2010a,b) در داخل کشور اشاره کرد. در رابطه با شکل‌های بستر نیز تحقیقات Ranga-Raju and

بررسی تأثیر شکل‌های بستر و ساحل‌های با پوشش گیاهی (ساقه‌های برنج) بر پراکنش سرعت و ساختار جریان متلاطم پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله از دیوار با پوشش گیاهی، بیشینه سرعت در فاصله دورتر از سطح آب رخ داد. پراکنش تنش رینولدزی بستگی به فاصله از دیوار داشت، به طور کلی با کاهش فاصله از دیوار تنش رینولدزی کمتر شد. (Chegini and Pender (2012) به بررسی آزمایشگاهی بار بستر ریزدانه و شکل‌های بستر مربوط به آن در شرایط جریان یکنواخت پرداختند. نتایج نشان داد که بار بستر و شکل‌های تشکیل شده مرتبط با آن، با افزایش شیب بستر و نسبت عمق آب به اندازه ذرات رسوبی تغییر می‌کنند. میزان فراسنجه بار بستر و شدت انتقال، با افزایش اندازه ذرات رسوب کاهش یافت. Kabiri et al. (2014) به بررسی جریان بر روی تلماسه‌های شنی پرداختند. نتایج نشان داد که زبری سطح تلماسه نقش مهمی در پراکنش سرعت ناحیه نزدیک بستر دارد ( $Z/H < 0.3$ ) که در آن ارتفاع تلماسه و  $H$  عمق جریان می‌باشد) اما هیچ تأثیری در پراکنش سرعت در ناحیه جریان بیرونی ( $Z/H > 0.3$ ) ندارد. با افزایش زبری سطح تلماسه‌های شنی، میزان‌های بیشینه تنش‌های برشی رینولدز روی ناحیه‌های فرورفتگی، تاج و وجه بالادست افزایش یافت. (Samadi-Boroujeni et al. (2014 اثر دو نوع شکنج (موازی و پولکی) را بر روی ضریب زبری مانینگ بررسی کردند. نتایج نشان داد که زبری شکل شکنج در حالت موازی حدود ۴۷ درصد و در حالت پولکی حدود ۴۳ درصد از زبری کل را تشکیل داد. Kwoil et al. (2016) به بررسی ساختار و مقاومت در برابر جریان بر روی تلماسه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر جریان با کاهش شیب تلماسه کاهش یافت. بر تلماسه‌های با شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه تنش برشی به ترتیب ۸، ۳۳ و ۹۰ درصد بیشتر از بستر بدون شکل بود. (Ghasemi et al. (2016 به بررسی پراکنش سرعت و شدت آشفتگی در حضور تلماسه و پوشش گیاهی (ساقه برنج) در یک آبراهه مستطیلی روباز پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع تاج تلماسه از ۴ به ۸ سانتی‌متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع ۴

(Soni (1976) به بررسی هندسه ریپل‌ها و دیون‌ها در آبراهه‌ها پرداختند. آنان بیان کردند که ویژگی‌های هندسی شکل‌های بستر تأثیر معنی داری بر زبری هیدرولیکی دارد. تأثیر حرکت بار بستر بر مقاومت هیدرولیکی جریان در آبراهه‌های با شکل بستر، توسط Karbasi (2005) بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی وی نشان داد که حرکت بار بستر با رسوب‌های به قطر ۰/۵ میلی‌متر باعث کاهش ۲۲ و ۲۴ درصدی مقاومت هیدرولیکی جریان به ترتیب در آبراهه‌های صاف و زبر گردید. میزان کاهش زبری با افزایش قطر ذرات رسوبی افزایش یافت. (Talebbeydokhti et al. (2006 تأثیر هندسه تلماسه‌ها بر ضریب مقاومت در برابر جریان را در یک کانال با بستر ماسه‌ای (تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی مختلف) بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که تأثیر مقاومت ناشی از شکل بستر ناچیز نبود، به گونه‌ای که مقاومت ناشی از شکل بستر تلماسه حدود ۲۵ تا ۵۵ درصد از مقاومت کل را شامل می‌شد. Jafari Meanaii and Keshavarzi (2007) پراکنش تنش برشی رینولدز و تغییرپذیری‌های انرژی جنبشی بر روی ریپل‌های مصنوعی را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که میزان تنش برشی از لحاظ میزان در فاصله بین دو ریپل آغاز به افزایش نموده و در ابتدای شیب وجه بالادست ریپل دوم، به بیشترین میزان خود رسید. (Esmaili et al. (2009 به بررسی تأثیر شکل بستر تلماسه بر روی ضریب زبری در جریان ناماندگار پرداختند. نتایج نشان داد که روند تغییر ضریب مقاومت بستر ( $n$ ) با گذشت زمان بنابر شرایط فرسایش، در آغاز روند افزایشی داشت پس از آن کاهش و بار دیگر افزایش یافت. (Omid et al. (2010 به بررسی تأثیر حرکت بار بستر بر مقاومت در برابر جریان در آبراهه‌های آبرفتی دارای شکل بستر تلماسه پرداختند. نتایج نشان داد که انتقال رسوب‌های با اندازه میانگین ۰/۵ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای شکل صاف و زبر به ترتیب ۲۲ و ۲۴ درصد کاهش داد در صورتی که انتقال رسوب‌های با اندازه میانگین ۲/۸۴ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای شکل صاف و زبر به ترتیب ۳۲ و ۳۹ درصد کاهش داد. (Nasiri Dehsorkhi et al. (2011

فلوم یک دریچه برای تنظیم عمق جریان قرار داشت. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی سنج فراصوتی (مدل Digi Sonic E+) استفاده شد. میزان دقت دستگاه به ازای سرعت‌های بزرگ‌تر و برابر ۰/۵ متر بر ثانیه برابر  $\pm 1\%$  میزان خوانش شده و برای سرعت‌های کوچک‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه معادل  $\pm 0.5\%$  میزان خوانش شده بود. دبی جریان توسط یک شیر فلکه که بر روی لوله ورودی به فلوم نصب شده بود، تنظیم می‌شد. در این تحقیق از دبی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه و شیب‌های بستر ۰، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ استفاده شد. برای اندازه‌گیری عمق جریان، از یک عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد.

آزمایش‌های این تحقیق به دو دسته بستر بدون شکل و بستر با شکل تقسیم شد. شکل‌های بستر ریپل و دیون دارای طول موج کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع بیشینه ۵ سانتی‌متر می‌باشند. افزون بر این، مقطع آنها مثلثی شکل با شیب ملایم طولانی در وجه بالادست و شیب تند کوتاه در وجه پایین‌دست هستند. زاویه وجه پایین دست آنها تا حدودی برابر با زاویه ایستایی ذرات رسوبی می‌باشد (Simons and Richardson, 1966; Shafai Bajestan, 2008). بر این مبنای، در این تحقیق هر شکل بستر به شکل مثلث و به صورت مصنوعی (با ورق P.V.C) ساخته شد. طول و ارتفاع هر شکل بستر به ترتیب برابر ۲۰ و ۴ سانتی‌متر و زوایای وجه بالادست و پایین دست آن نسبت به افق به ترتیب برابر ۱۶/۴ و ۳۲ درجه گزینش شد. پس از ساخت هر شکل بستر، رسوب‌های مورد نظر توسط چسب بر روی آنها چسبانده شد. در این تحقیق از دو نوع دانه بندی یکنواخت با اندازه‌های میانگین (d<sub>50</sub>) ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر استفاده شد. جنس رسوب‌ها از ماسه و چگالی نسبی آنها برابر ۲/۶۵ بود. در آزمایش‌های بدون شکل بستر نیز از رسوب‌های با دانه بندی‌های فوق‌الذکر برای زبر کردن بستر استفاده شد. در مجموع شمار کل آزمایش‌های تحقیق برابر ۱۰۰ عدد بود.

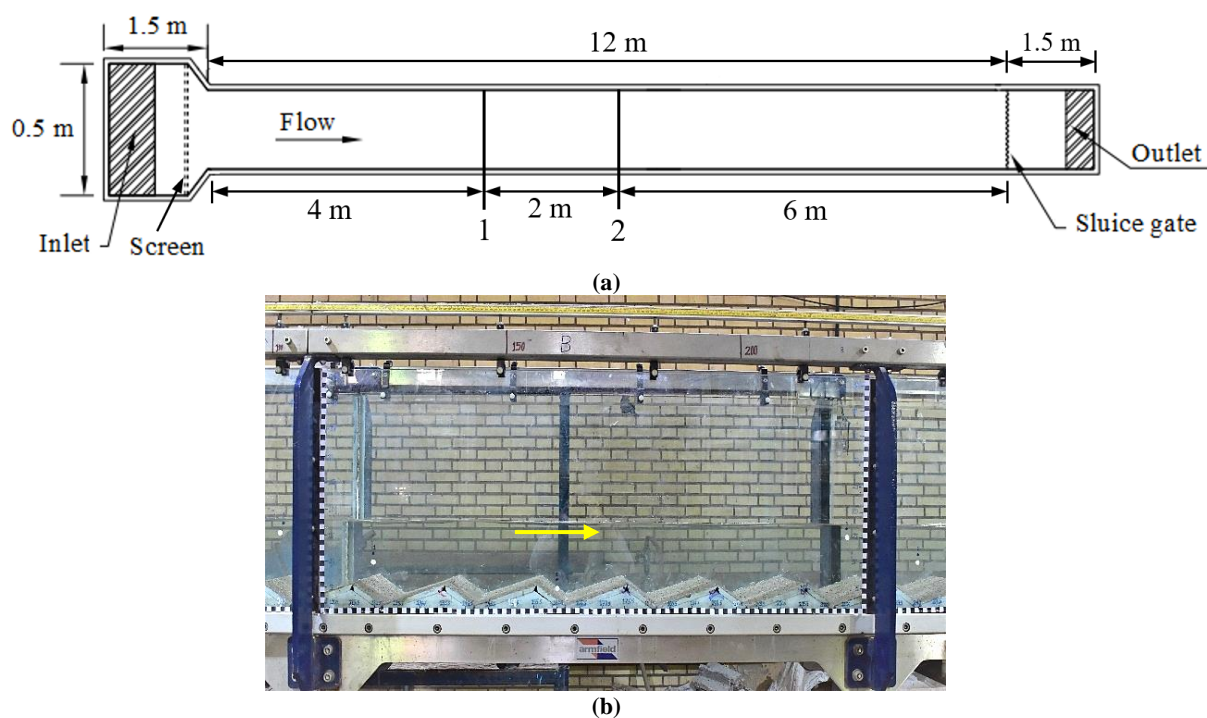
در جدول ۱ میزان‌های فراسنجه‌های هیدرولیکی آزمایش‌های مختلف ارائه شده است.

سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال داد. با افزایش ارتفاع تاج تلماسه میزان بیشینه تنش در فاصله دورتری از بستر رخ داد. (Davarpanah-Jazi et al. (2016) به بررسی اثرگذاری‌های شکل‌های بستر شنی با تاج مسطح و پوشش گیاهی دیوار (خومه) بر فراسنجه‌های جریان آشفته پرداختند. نتایج نشان داد که در تلماسه‌های با تاج مسطح بر خلاف تلماسه‌های با تاج تیز، در هر دو حالت با و بدون پوشش گیاهی، فراسنجه سرعت پس از تاج مسطح میزان‌های منفی به خود نمی‌گیرد. تنش‌های رینولدز در حالت با پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی بیشتر بود. (Roshani et al. (2017) تأثیر تبدیل کاهش دهنده عرض بر ارتفاع شکل بستر ریپل را در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش عرض آبراهه به کمک تبدیل‌ها نقش موثری بر ارتفاع ریپل‌ها داشته و می‌توان تا حد زیادی به کمک تغییر در زاویه‌های تبدیل‌ها، حرکت‌های رسوب‌های به پایین دست را کنترل کرد. (Daghighi et al. (2017) به بررسی تشکیل و توسعه ریپل‌های رسوبی تحت امواج پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و پیوند موج، بر ارتفاع و طول موج ریپل‌ها افزوده شد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که تحقیقات اندکی بر روی ضریب اصطکاک داریسی ویسباخ در آبراهه‌های پوشیده از شکل‌های بستر مصنوعی با اندازه رسوبات متفاوت انجام گرفته است. لذا این تحقیق با این هدف و به ازای دبی‌ها و شیب‌های مختلف انجام شد. در این تحقیق از رسوب‌های با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر برای زبر کردن سطح فرم‌های بستر استفاده شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز و در یک فلوم مستقیم شیب پذیر (ساخته شده توسط شرکت آرمفیلد انگلستان) انجام شد. جنس دیوارهای فلوم از شیشه و طول و عرض فلوم به ترتیب برابر ۱۲ و ۰/۳ متر بود (شکل ۱). در ابتدای فلوم، یک توری مشبک برای استهلاک انرژی مازاد جریان نصب شده بود. در انتهای



**Fig. 1** Experimental setup (a) plan view of the experimental flume. (b) side view of the bed form used in experiments.  
 شکل ۱ (a) طرح و نقشه فلوم آزمایشگاهی. (b) نمای جانبی از بستر با شکل در فلوم.

جدول ۱ میزان‌های فراسنجه‌های هیدرولیکی آزمایش‌های مختلف

Table 1 Hydraulic parameters values for various experiments

$Q$ (lit/s)	$S$	$d_{50}=0.51\text{ mm}$				$d_{50}=2.18\text{ mm}$			
		Without form		With form		Without form		With form	
		$Y$ (cm)	$Fr$	$Y$ (cm)	$Fr$	$Y$ (cm)	$Fr$	$Y$ (cm)	$Fr$
10	0	7.14	0.56	8.15	0.46	7.31	0.54	8.43	0.44
15	0	8.68	0.62	10.45	0.47	9.09	0.58	10.75	0.45
20	0	10.30	0.64	12.13	0.50	10.55	0.62	12.40	0.49
25	0	11.55	0.68	13.48	0.54	11.85	0.65	13.75	0.52
30	0	12.72	0.70	15.13	0.54	13.17	0.67	15.46	0.53
10	0.0001	7.03	0.57	8.05	0.47	7.22	0.55	8.35	0.44
15	0.0001	8.63	0.63	10.33	0.48	9.05	0.59	10.68	0.46
20	0.0001	10.13	0.66	11.97	0.51	10.43	0.63	12.33	0.49
25	0.0001	11.43	0.69	13.40	0.54	11.73	0.66	13.68	0.53
30	0.0001	12.68	0.71	15.00	0.55	13.00	0.68	15.38	0.53
10	0.0005	6.90	0.59	7.95	0.47	7.14	0.56	8.25	0.45
15	0.0005	8.51	0.64	10.23	0.49	8.80	0.61	10.58	0.46
20	0.0005	10.00	0.67	11.70	0.53	10.24	0.65	12.23	0.50
25	0.0005	11.32	0.70	13.25	0.55	11.53	0.68	13.58	0.53
30	0.0005	12.36	0.73	14.73	0.57	12.79	0.70	15.28	0.53
10	0.001	6.73	0.61	7.76	0.49	6.65	0.62	8.14	0.46
15	0.001	8.38	0.66	10.12	0.50	8.68	0.62	10.43	0.47
20	0.001	9.85	0.69	11.25	0.56	10.13	0.66	12.08	0.51
25	0.001	11.03	0.73	12.90	0.57	11.35	0.70	13.44	0.54
30	0.001	12.20	0.75	14.44	0.58	12.61	0.71	15.13	0.54
10	0.0015	6.48	0.65	7.58	0.51	6.70	0.61	8.02	0.47
15	0.0015	8.18	0.68	9.91	0.52	8.58	0.64	10.28	0.48
20	0.0015	9.55	0.72	11.03	0.58	9.95	0.68	11.93	0.52
25	0.0015	10.85	0.74	12.75	0.59	11.10	0.72	13.30	0.54
30	0.0015	12.05	0.76	14.13	0.60	12.44	0.73	14.98	0.55

در فلوم‌های آزمایشگاهی با دیواره صاف، هنگامی که عرض فلوم از ۵ برابر عمق جریان کمتر باشد مقاومت دیواره جانبی با مقاومت بستر متفاوت خواهد بود. ضریب اصطکاک دیواره ( $f_w$ ) برای فلوم‌های با دیواره صاف را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد (Farhoudi and Esmaeili Varaki, 2010):

$$f_w = 0.0026(\log\left(\frac{Re}{f}\right))^2 - 0.0428 \log\left(\frac{Re}{f}\right) + 0.1884 \quad (5)$$

بنابراین ضریب اصطکاک بستر ( $f_b$ ) طبق رابطه زیر محاسبه شد.

$$f_b = f + \frac{2y}{B}(f - f_w) \quad (6)$$

که در آن  $B$  عرض فلوم می‌باشد.

برای آزمایش‌های بدون شکل بستر، طبق رابطه (۶) میزان ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ مربوط به اندازه ذره ( $f_b$ ) محاسبه شد. برای آزمایش‌های با شکل بستر نیز، برابر رابطه (۶) میزان ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ کل ( $f_b$ ) محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ مربوط به شکل بستر ( $f_b''$ ) محاسبه شد.

$$f_b'' = f_b - f_b \quad (7)$$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بستر بدون شکل

در این بخش تأثیر فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان و همچنین اندازه ذرات بستر بر ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ مربوط به ذره ( $f_b$ ) بررسی شده است. در شکل ۲ تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ مربوط به ذره در برابر استغراق نسبی ( $v/d_{50}$ ) برای بسترهای پوشیده از رسوب‌های با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر نشان داده شده است. محور عمودی شکل، ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ مربوط به ذره ( $f_b$ ) و محور افقی آن فراسنجه بی‌بعد استغراق نسبی ( $v/d_{50}$ ) را نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که، با افزایش استغراق نسبی ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ کاهش یافت. رابطه Keulegan برای بستر زیر به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{V}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{R}{K_S}\right) + 6.25 \quad (8)$$

در این تحقیق و برای انجام آزمایش‌های با شکل بستر، ۳۰ عدد شکل بستر ساخته شد که به صورت پشت سر هم و در طولی حدود ۶ متر در کف فلوم چسبانده شدند. فاصله کف پوشیده از شکل ریپل، از ابتدای فلوم برابر ۲ متر در نظر گرفته شد. در شکل ۱ نمای جانبی از بستر با نوع شکل نشان داده شده است. در آزمایش‌های بدون نوع شکل نیز، فاصله کف پوشیده از ذرات رسوبی از ابتدای فلوم برابر ۲ متر و طول آن برابر ۶ متر در نظر گرفته شد.

#### ۲-۱- روش انجام محاسبات

برای انجام محاسبات دو مقطع ۱ و ۲ که فاصله آنها از یکدیگر ( $L$ ) حدود ۲ متر بود، در نظر گرفته شد (شکل ۱). فاصله مقطع ۱ از ابتدای بستر پوشیده از رسوب، ۲ متر بود. با اندازه‌گیری عمق جریان ( $y$ ) در مقطع‌های ۱ و ۲ و میانگین‌گیری از آنها، میزان‌های سطح مقطع جریان ( $A$ )، محیط خیس شده ( $P$ )، شعاع هیدرولیکی ( $R$ ) و سرعت میانگین جریان ( $V$ ) محاسبه شدند. افت انرژی بین مقطع‌های ۱ و ۲ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$h_f = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right) + \Delta Z \quad (1)$$

در رابطه بالا  $y_1$  و  $y_2$  به ترتیب عمق جریان در مقطع‌های ۱ و ۲،  $V_1$  و  $V_2$  به ترتیب سرعت میانگین جریان در مقطع‌های ۱ و ۲ می‌باشند.  $\Delta Z$  برابر اختلاف رقوم مقطع‌های ۱ و ۲ نسبت به سطح مبنا دلخواه می‌باشد که با استفاده از رابطه  $\Delta Z = S L$  (فاصله مقاطع ۱ و ۲ از یکدیگر و  $S$  شیب بستر می‌باشد) تعیین شد. شیب خط انرژی ( $S_f$ )، عدد رینولدز جریان ( $Re$ ) و ضریب اصطکاک دارسی و سیسباخ ( $f$ ) طبق رابطه‌های زیر محاسبه شدند.

$$S_f = \frac{h_f}{L} \quad (2)$$

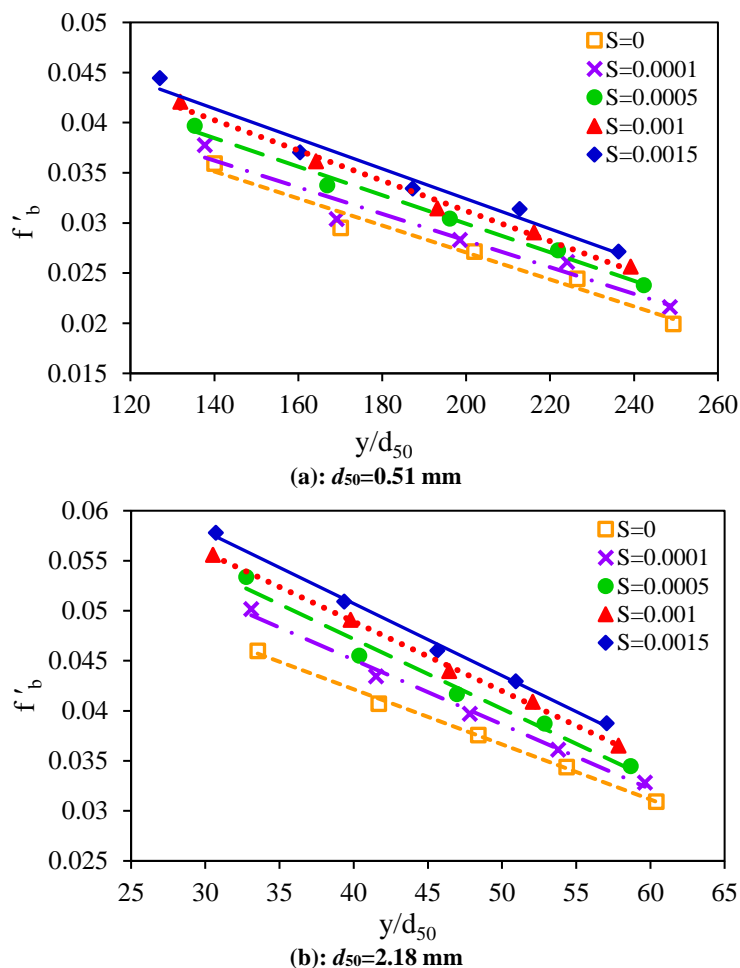
$$Re = \frac{4VR}{\nu} \quad (3)$$

$$f = \frac{8RgS_f}{V^2} \quad (4)$$

در رابطه‌های بالا  $\nu$  لزوجت سینماتیک آب و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد.

است که این نتیجه به دلیل رابطه مستقیم شیب بستر و ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ (برابر رابطه (۴) و رابطه  $\left(\frac{V}{U_*} = \frac{V}{\sqrt{gRS}} = \sqrt{\frac{8}{f}}\right)$  می‌باشد. محاسبه‌ها نشان داد که در بسترهای با رسوب‌های ۰/۵۱ میلی‌متر، میزان ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور میانگین به ترتیب ۵/۵۴، ۱۳/۶۴، ۲۰/۶۳ و ۲۷/۴۴ درصد بیش از ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در شیب صفر بود. افزون بر این در بسترهای با رسوب‌های ۲/۱۸ میلی‌متر، میزان ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور میانگین به ترتیب ۶/۵۵، ۱۲/۵۸، ۱۹/۱ و ۲۴/۷۳ درصد بیش از ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در شیب صفر بود.

که در آن  $V$  سرعت میانگین جریان،  $U_*$  سرعت برشی جریان،  $R$  شعاع هیدرولیکی جریان و  $K_s$  اندازه زبری‌های بستر می‌باشد. با افزایش دبی جریان، عمق جریان و در نتیجه استغراق نسبی  $\left(\frac{y}{d_{50}}, \frac{R}{d_{50}}\right)$  افزایش می‌یابد. بنابراین طبق رابطه (۸) نیز افزایش می‌یابد. با افزایش  $\frac{V}{U_*}$  طبق رابطه  $\frac{V}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}}$  ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کاهش می‌یابد. Bahrami Yarahmadi and Shafai Bejestan (2010a,b) نیز نشان دادند که ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ رسوب‌های با شکل‌های مختلف (طبیعی به نسبت گرد گوشه، ذرات شکسته تیز گوشه و ذرات مصنوعی کروی کامل) رابطه عکس با استغراق نسبی دارد. از دیگر نتایج شکل ۲ این است که، افزایش شیب بستر منجر به ازدیاد ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ ( $f_b$ ) شده



**Fig. 2** Variation of grain Darcy-Weisbach friction factor against relative submergence for beds with grains various sizes  
**شکل ۲** تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره در برابر استغراق نسبی برای بسترهای رسوبی با اندازه‌های مختلف



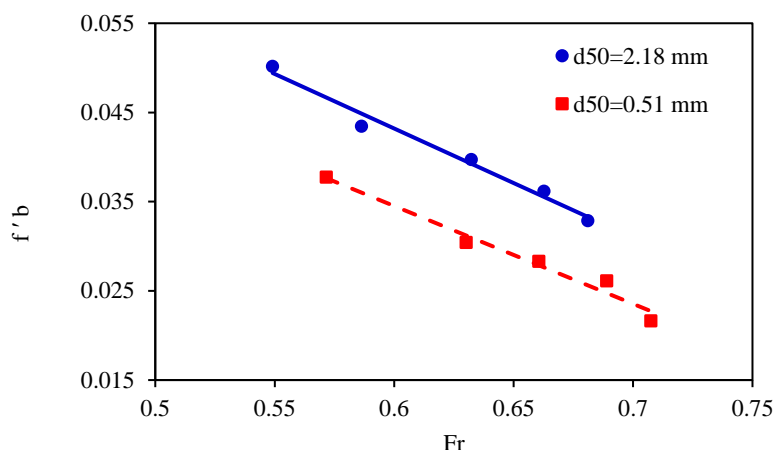


Fig. 3 Variation of grain Darcy-Weisbach friction factor against Froude number for slope of 0.0001

شکل ۳ تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره در برابر عدد فرود جریان برای شیب ۰/۰۰۰۱

دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدد فرود جریان و ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ با یکدیگر رابطه عکس دارند. (Afzalimehr and Anctil, 1998) در برابر جریان در رودخانه‌های با بستر سنگریزه را مورد بررسی قرار دادند نیز رابطه بین ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ و عدد فرود جریان را بصورت معکوس معرفی کردند.

### ۳-۲- بستر با شکل

شکل بستر ریپل و دیون در رژیم جریان پایینی، که در آن عدد فرود جریان کوچک‌تر از ۱ می‌باشد، تشکیل می‌شود (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010). در این تحقیق میزان‌های عدد فرود جریان در همه آزمایش‌های مربوط به بستر با شکل در محدوده ۰/۴۳۵ الی ۰/۶ قرار داشت که نشان دهنده رژیم جریان پایین می‌باشد. با دقت در شکل ۴ ملاحظه می‌کنید که داده‌های به‌دست آمده از پژوهش، طبق معیار (Garde and Albertson, 1959) در محدوده ریپل و دیون قرار دارند. مطالب یاد شده نشان می‌دهد که شرایط هیدرولیکی گزینش شده برای آزمایش‌های این تحقیق، با شرایط هیدرولیکی تشکیل شکل بستر ریپل و دیون همخوانی دارد.

شکل ۵ تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل ( $f_b$ ) در برابر عدد فرود جریان را برای بسترهای پوشیده از رسوب‌های با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر

شکل ۳ روند تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره ( $f_b$ ) در برابر عدد فرود جریان را به عنوان نمونه برای شیب ۰/۰۰۰۱ نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان داد که، با افزایش اندازه ذرات بستر ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ افزایش یافت. بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات بستر ( $K_s$ ) باعث کاهش استغراق نسبی ( $\frac{R}{K_s}$ ) می‌شود. بنابراین طبق رابطه (۸) و  $\frac{V}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}}$  ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره افزایش می‌یابد. این نتیجه همسو با نتایج تحقیقات (Motie et al., 2005) و (Bahrami Yarahmadi and Shafai Bejestan, 2010ab) می‌باشد. محاسبه‌ها نشان داد که میزان ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر به ازای شیب‌های ۰، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور میانگین به ترتیب ۴۰/۱۲، ۴۱/۳۴، ۳۸/۶۴، ۳۸/۲ و ۳۷ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵۱ میلی‌متر بود.

از دیگر نتایج شکل ۳ این است که، با افزایش عدد فرود جریان ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ ( $f_b$ ) دچار کاهش شد. عدد فرود جریان طبق رابطه  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ ، که در آن  $V$  سرعت متوسط جریان و  $y$  عمق جریان می‌باشد، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم و با عمق جریان رابطه عکس دارد. از طرفی ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ بر اساس رابطه (۴)، با عمق (یا شعاع هیدرولیکی) جریان رابطه مستقیم و با سرعت متوسط جریان رابطه عکس

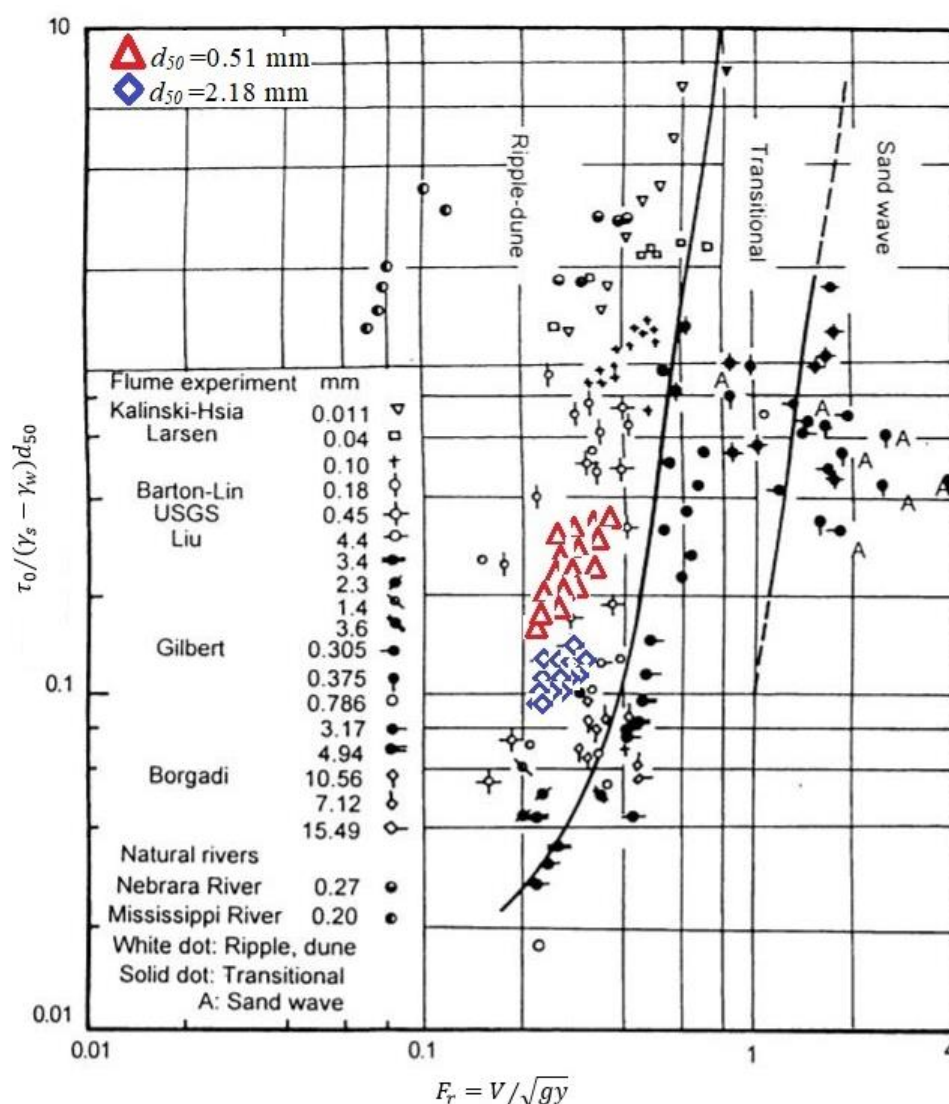
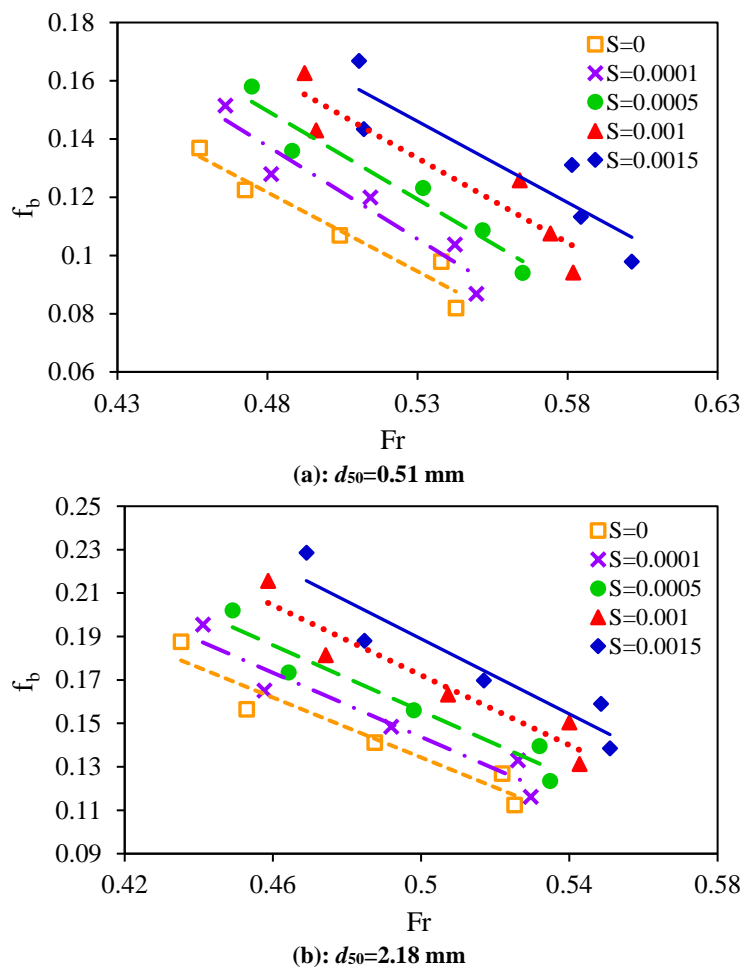


Fig. 4 Evaluating results of this study based on criteria of Garde and Albertson (Chien and Wan, 1999)  
شکل ۴ بررسی نتایج به‌دست آمده از پژوهش طبق روش گارد و آلبرتسون (Chien and Wan, 1999)

نشان داد که در بسترهای رسوبی با اندازه  $0.51$  میلی‌متر، میزان  $f_b$  در شیب‌های  $0.0001$ ،  $0.0005$ ،  $0.001$  و  $0.015$  به‌طور میانگین به‌ترتیب  $7/85$ ،  $13/48$ ،  $15/58$  و  $19/35$  درصد بیش از  $f_b$  در شیب صفر بود. افزون بر این در بسترهای رسوبی با اندازه  $2/18$  میلی‌متر، میزان  $f_b$  در شیب‌های  $0.0001$ ،  $0.0005$ ،  $0.001$  و  $0.015$  به‌طور میانگین به‌ترتیب  $4/57$ ،  $9/8$ ،  $16/37$  و  $22/1$  درصد بیش از  $f_b$  در شیب صفر بود.

شکل ۶ روند تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک داری و سیساک کل ( $f_b$ ) در برابر استغراق نسبی ( $\frac{y}{\Delta}$ ) را به‌عنوان نمونه برای شیب  $0.0001$  نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش میزان استغراق نسبی، ضریب اصطکاک

نشان می‌دهد. با دقت در شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد فرود جریان، ضریب اصطکاک داری و سیساک کل ( $f_b$ ) هم‌مانند ضریب اصطکاک داری و سیساک مربوط به ذره ( $f_b'$ ) کاهش یافت. در ضمن افزایش شیب طولی بستر سبب افزایش  $f_b$  شد. (Yang 1996) اظهار داشت روند تغییرپذیری‌های مقاومت جریان در برابر شیب بستر، در بسترهای پوشیده از ریپل برعکس بسترهای پوشیده از دیون می‌باشد. به‌گونه‌ای که در یک بستر پوشیده از ریپل با عمق جریان کم، مقاومت در برابر جریان با افزایش شیب افزایش پیدا می‌کند ولی در یک بستر پوشیده از دیون با عمق جریان کم، مقاومت در برابر جریان به‌طور کلی با افزایش شیب کاهش می‌یابد. در این تحقیق محاسبه‌ها



**Fig. 5** Variation of total Darcy-Weisbach friction factor against Froude number for beds with grains various sizes  
 شکل ۵ تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل در برابر عدد فرود جریان برای بسترهای رسوبی با اندازه‌های مختلف

ویسباخ مربوط به شکل بستر ثابت می‌باشد. ضریب اصطکاک مربوط به ذره تابعی از اندازه ذرات بستر است. با افزایش اندازه ذرات بستر، طبق رابطه‌های تجربی Henderson  $(0.041d_{50}^{\frac{1}{6}})$  و Strickler  $(0.0474d_{50}^{\frac{1}{6}})$  و Hager  $(0.048d_{50}^{\frac{1}{6}})$  ضریب اصطکاک مربوط به ذره افزایش می‌یابد. در ضمن همان‌گونه که پیشتر توضیح داده شد، طبق رابطه Keulegan برای بستر زبر  $(\frac{8}{f} = \frac{v}{u_*})$  با افزایش اندازه ذرات بستر  $(K_s)$  استغراق نسبی کاهش می‌یابد (یا زبری نسبی افزایش می‌یابد) لذا ضریب اصطکاک مربوط به ذره افزایش پیدا می‌کند (Mahmoodian Shoostari, 2006). بنابراین در هر شیب بستر و به ازای شرایط هیدرولیکی یکسان، با بزرگتر شدن اندازه ذرات بستر ضریب اصطکاک مربوط به ذره  $(f_b)$  و در نتیجه ضریب اصطکاک کل  $(f_b)$  افزایش

اصطکاک دارسی ویسباخ کل به دلیل کاهش زبری نسبی دچار کاهش شد. در دیگر شیب‌های بستر نیز ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل و استغراق نسبی رابطه عکس با یکدیگر داشتند. افزون بر این، شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات بستر  $f_b$  افزایش یافت. در بسترهای دارای شکل بستر، ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل  $(f_b)$  به دو ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره  $(f_b)$  و مربوط به شکل بستر  $(f_b'')$  تقسیم می‌شود. ضریب اصطکاک مربوط به شکل بستر تابعی از اندازه شکل‌های بستر می‌باشد و در نتیجه اختلاف فشار بین جلو و عقب شکل بستر بوجود می‌آید (Shafai Bajestan, 2008). با توجه به ثابت بودن اندازه شکل‌های بستر در این تحقیق لذا در هر شیب بستر و به ازای شرایط هیدرولیکی یکسان، میزان ضریب اصطکاک دارسی

ترتیب ۳۲/۸، ۲۸/۸، ۲۸/۴۶، ۳۳/۸ و ۳۵/۹ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵ میلی‌متر بود.

می‌یابد. محاسبه‌ها نشان داد که میزان  $f_b$  در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر به ازای شیب‌های ۰، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱، و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به

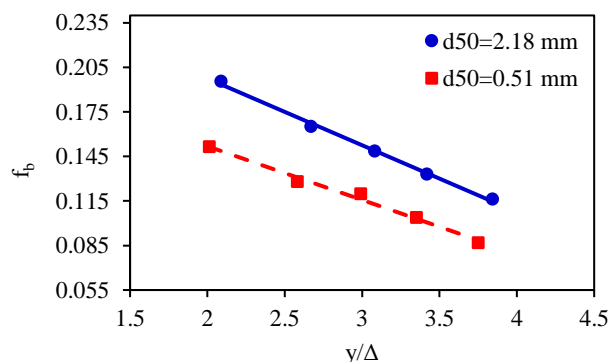


Fig. 6 Variation of total Darcy-Weisbach friction factor against relative submergence for slope of 0.0001

شکل ۶ تغییرپذیری‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسیاخ کل در برابر استغراق نسبی برای شیب ۰/۰۰۰۱

جدول ۲ میزان‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسیاخ برای بسترهای رسوبی با اندازه‌های مختلف

Table 2 Darcy-Weisbach friction factor for beds with grains various sizes

$Q$ (lit/s)	$S$	$d_{50}=0.51$ mm			$d_{50}=2.18$ mm		
		$f_b$	$\hat{f}_b$	$f''_b$	$f_b$	$\hat{f}_b$	$f''_b$
10	0	0.137	0.036	0.101	0.188	0.046	0.142
15	0	0.122	0.030	0.093	0.157	0.041	0.116
20	0	0.107	0.027	0.080	0.141	0.038	0.104
25	0	0.098	0.024	0.073	0.127	0.034	0.093
30	0	0.082	0.020	0.062	0.113	0.031	0.082
10	0.0001	0.152	0.038	0.114	0.195	0.050	0.145
15	0.0001	0.128	0.030	0.098	0.165	0.043	0.122
20	0.0001	0.120	0.028	0.092	0.149	0.040	0.109
25	0.0001	0.104	0.026	0.078	0.133	0.036	0.097
30	0.0001	0.087	0.022	0.065	0.116	0.033	0.083
10	0.0005	0.158	0.040	0.118	0.202	0.053	0.149
15	0.0005	0.136	0.034	0.102	0.174	0.046	0.128
20	0.0005	0.123	0.030	0.093	0.156	0.042	0.114
25	0.0005	0.109	0.027	0.081	0.140	0.039	0.101
30	0.0005	0.094	0.024	0.070	0.124	0.034	0.089
10	0.001	0.163	0.042	0.121	0.216	0.056	0.160
15	0.001	0.143	0.036	0.107	0.181	0.049	0.132
20	0.001	0.126	0.031	0.094	0.163	0.044	0.119
25	0.001	0.108	0.029	0.078	0.151	0.041	0.110
30	0.001	0.094	0.026	0.068	0.131	0.037	0.095
10	0.0015	0.167	0.044	0.122	0.229	0.058	0.171
15	0.0015	0.143	0.037	0.106	0.188	0.051	0.137
20	0.0015	0.131	0.033	0.098	0.170	0.046	0.124
25	0.0015	0.113	0.031	0.082	0.159	0.043	0.116
30	0.0015	0.098	0.027	0.071	0.138	0.039	0.100

### ۳-۳- مقایسه ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ بسترهای با و بدون شکل

میزان‌های ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل  $(f_b)$ ، ذره  $(f'_b)$  و شکل بستر  $(f''_b)$  برای آزمایش‌های مربوط به بسترهای پوشیده از رسوب‌های با اندازه ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر در جدول ۲ ارائه شده است. میزان‌های  $f'_b$  مربوط به بسترهای بدون شکل می‌باشد در صورتی که مقادیر  $f_b$  و  $f''_b$  مربوط به بسترهای با شکل است. برای محاسبه مقادیر ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به فرم بستر  $(f''_b)$  از رابطه (۷) استفاده شد. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک مربوط به ذره  $(f'_b)$  برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور متوسط به ترتیب ۲۵/۴۵ و ۲۶/۸ درصد ضریب اصطکاک کل  $(f_b)$  است. افزون بر این ضریب اصطکاک مربوط به فرم بستر  $(f''_b)$  برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور میانگین به ترتیب ۷۴/۵۵ و ۷۳/۲ درصد ضریب اصطکاک کل  $(f_b)$  است. در رژیم جریان پایینی که فرم‌های بستر ریپل و دیون تشکیل می‌شوند، مقاومت ناشی از شکل بستر غالب است اما در رژیم جریان بالایی مقاومت ناشی از زبری ذرات غالب می‌باشد (Shafai, Bajestan, 2008; Julien, 2010). امید و همکاران (۲۰۱۰) در نتایج بررسی‌های خود اظهار داشتند که در بسترهای پوشیده از دیون صاف، ۷۳ درصد مقاومت به دلیل مقاومت در برابر شکل و ۲۷ درصد باقی‌مانده به دلیل مقاومت ذره است. در این تحقیق با توجه به نتایج می‌توان دریافت که میزان  $f''_b$  برای ذرات با اندازه ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور میانگین به ترتیب ۱۹۳/۶ و ۱۷۳/۴ درصد بیش از  $f_b$  می‌باشد.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر فرم‌های بستر با اندازه رسوب‌های متفاوت (۰/۵ و ۲/۱۸ میلی‌متر) بر ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ، تحت دبی‌ها و شیب‌های مختلف بستر پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده به قرار زیر است:  
الف. ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل  $(f_b)$  و ضریب

اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره  $(f'_b)$  با افزایش عدد فرود جریان کاهش و با ازدیاد شیب بستر افزایش یافتند.  
ب. با افزایش استغراق نسبی  $(\frac{y}{\Delta})$ ، ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل  $(f_b)$  کاهش یافت.  
پ. با ازدیاد اندازه رسوب‌های بستر،  $f_b$  و  $f'_b$  افزایش یافتند. محاسبات نشان داد که مقدار  $f_b$  در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور میانگین ۳۲ درصد بیش از بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵ میلی‌متر بود.  
ت. ضریب اصطکاک مربوط به ذره  $(f'_b)$  برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور میانگین به ترتیب ۲۵/۴۵ و ۲۶/۸ درصد ضریب اصطکاک کل  $(f_b)$  بود.  
ث. ضریب اصطکاک مربوط به شکل بستر  $(f''_b)$  برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور میانگین به ترتیب ۷۴/۵۵ و ۷۳/۲ درصد ضریب اصطکاک کل  $(f_b)$  بود.  
ج. مقدار  $f''_b$  برای ذرات با اندازه ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور میانگین به ترتیب ۱۹۳/۶ و ۱۷۳/۴ درصد بیش از  $f_b$  بود.

### ۵- فهرست نشانه‌ها

$d_{50}$	اندازه میانگین ذرات بستر (mm)
Fr	عدد فرود جریان
$f_b$	ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ کل
$f'_b$	ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به ذره
$f''_b$	ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ مربوط به شکل بستر
Q	دبی جریان (Lit/s)
R	شعاع هیدرولیکی جریان (m)
S	شیب طولی بستر
V	سرعت میانگین جریان (m/s)
y	عمق میانگین جریان (m)
$\Delta$	ارتفاع شکل بستر (m)

### ۶- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم

- Farhoudi, J. and Esmaili Varaki, M. (2010). *Erosion and Sedimentation*. University of Tehran Press, 317P. (in Persian)
- Ghasemi, M., Heidarpour, M. and Tabatabaei S.H. (2016). Investigation of distribution of velocity and turbulence intensity in presence of dunes and vegetation in a rectangular open channel. *Journal of Hydraulics*, 10(3), 1-14. (in Persian)
- Hey, R.D. (1979). Flow resistance in gravel-bed rivers. *Journal of The Hydraulics Division*, 105(4), 365-379.
- Jafari Meanaii, S. and Keshavarzi, E. (2007). Investigation of stress and kinetic energy on ripples in the bed of open channels. 6th Iranian Hydraulic Conference, September 4-13, Shahrekord University. (in Persian)
- Julien, P.Y. (2010). *Erosion and sedimentation*. 2nd edition, Cambridge University Press, 390 p.
- Kabiri, F., Afzalimehr, H., Smart, G. and Rousseau, A.N. (2014). Flow over gravel dunes. *British Journal of Applied Science & Technology*, 4(6), 905-911.
- Karbasi, M. (2005). Investigation of the effect of bed load movement on hydraulic resistance of flow in the presence of bed forms, Master Thesis in Water Structures Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran. (in Persian)
- Kwoll, E., Venditti, J.G., Bradley, R.W. and Winter, C. (2016). Flow structure and resistance over subaqueous high- and low-angle dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121, 545-564.
- Madrid-Aris, M. (1992). *Hidráulica de Ríos con Gran Pendiente*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso, Chile.
- Mahmoodian Shooshtari, M. (2006). *Principles of flow in open Channel*. 1st volume. Shahid Chamran University of Ahvaz Press, 513 p. (in Persian)
- Motie, M., Sanei, M. and Tabatabaei, M. (2005). Experimental study of the relationship between roughness coefficient and particle diameter size in rivers with steep slopes. 5th Iranian Hydraulics Conference, Kerman. (in Persian)
- Nasiri Dehsorkhi, E., Afzalimehr, H. and Singh, V. P. (2011). Effect of bed forms and vegetated banks on velocity distributions and turbulent flow structure. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(6), 495-507.
- انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود (SCU.WH98.31373).

## ۷- منابع

- Afzalimehr, H. and Anctil, F. (1998). Estimation of gravel-bed river flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(10), 1054-1058.
- Bahrami Yarahmadi, M. and Shafai Bejestan, M. (2010a). Effect of shape of sediment particles at the bed of open channel on friction coefficient. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 33(1), 1-13. (in Persian)
- Bahrami Yarahmadi, M. and Shafai Bejestan, M. (2010b). Experimental study of the effects of channel bed coarse sediments on flow resistance coefficient. *Journal of Water and Soil*, 20.1(2), 143-156. (in Persian)
- Bathurst, J.C. (2002). At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *Journal of Hydrology*, 269(1-2), 11-26.
- Chegini, A.H.N. and Pender, G. (2012). Determination of small size bed load sediment transport and its related bed form under different uniform flow conditions. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 8(4), 158-167.
- Chien, N. and Wan, Z. (1999). *Mechanics of sediment transport*. ASCE Press, 913 p.
- Daghighi, H., karami Khaniki, A. and Ali Akbari Bidokhti, A. (2017). Evaluation of sandy bed ripples geometry using physical model and correcting existed practical relations factors. *Iranian Journal of Marine Technology*, 4(1), 64-74. (in Persian)
- Davarpanah-Jazi, S., Kabiri-Samani, A.R. and Afzalimehr, H. (2016). Effects of straight-crested gravel bed-forms and vegetated banks on turbulent flow characteristics. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(2), 103-115. (in Persian)
- Esmaili, K., Kashefipour, S.M. and Shafae Bajestan, M. (2009). The effect of bed form on roughness coefficient in unsteady flows using a combined numerical and laboratory method. *Journal of Water and Soil*, 23(3), 136-144. (in Persian)

on the effect of the parallel and flake ripple bed forms on the Manning roughness coefficient. *Journal of Hydraulics*, 8(4), 55-65. (in Persian)

Shafai Bajestan, M. (2008). *Basic theory and practice of hydraulics of sediment transport*. 2nd ed., Shahid Chamran University of Ahvaz Press. 549 p. (in Persian).

Simons, D.B. and Richardson, E.V. (1966). *Resistance to Flow in Alluvial Channels*. Geological survey Professional paper, 422-J., Washington.

Talebbeydokhti, N., Hekmatzadeh, A.A. and Rakhshandehroo, G.R. (2006). Experimental modeling of dune bed form in a sand-bed channel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 30(B4), 503-516.

Yang, C.T. (1996). *Sediment transport: Theory and practice*. McGraw-Hill, 396 p.

Omid, M.H., Karbasi, M. and Farhoudi, J. (2010). Effects of bed-load movement on flow resistance over bed forms. *Sadhana*, 35(6), 681-691.

Ranga-Raju, K.G. and Soni, J.P. (1976). Geometry of ripples and dunes in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, 14(3), 241-249.

Reking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P. and Champagne, J.Y. (2008). Bed-load transport flume experiments on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1302-1310.

Romero, M., Revollo, N. and Molina, J. (2010). Flow resistance in steep mountain rivers in Bolivia. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5), 702-707.

Roshani, E., Hossienzade Dalir, A., Farsadizade, D. and Salmasi, F. (2017). Study of width reduced transition effects on ripple bed form height in various hydraulic conditions. *Journal of Water and Soil*, 31(1), 28-39. (in Persian)

Samadi-Boroujeni, H., Maleki, P., Fattahi-Nafchi, R. and Ketabdari, M.J. (2014). Experimental study

