

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ارتفاع فرم بستر دیون بر ضریب زبری مانینگ

مرضیه بادزن چین^۱، محمد بهرامی یاراحمدی^{۲*} و محمود شفاعی بجستان^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی؛ گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۲- نگارنده مسئول: 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
- تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۴

چکیده

معادله مانینگ معروفترین معادله تعیین مقاومت جریان در جریان‌های ماندگار و یکنواخت است. میزان مقاومت جریان در مجاری باز علاوه بر اندازه ذرات رسوبی به نوع فرم بستر و خصوصیات هندسی آن بستگی دارد. روابط متعددی برای تعیین زبری اندازه ذره وجود دارد ولی تعیین میزان زبری فرم بستر کمتر بررسی شده است. مروری بر تحقیقات نشان می‌دهد که در زمینه اثر ارتفاع فرم بستر دیون بر ضریب زبری مانینگ تاکنون مطالعه نشده است. در تحقیق حاضر به بررسی اثر فرم‌های با ارتفاع ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و طول ثابت ۲۵ سانتی‌متر بر ضریب زبری مانینگ در یک فلوم مستقیم با ۵ دبی و ۵ شیب بستر پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع فرم بستر و پارامتر (Δ/λ) ، ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد. ضریب زبری مانینگ دیون‌های با ارتفاع ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر به‌طور متوسط به ترتیب ۱۶، ۳۱ و ۵۵ درصد بیش از ضریب زبری مانینگ فرم بستر با ارتفاع ۱ سانتی‌متر است.

واژه‌های کلیدی

ارتفاع فرم بستر، دیون، ضریب زبری مانینگ، مقاومت جریان، رودخانه ابرفتی

مقدمه

$n =$ ضریب زبری مانینگ؛ $R =$ شعاع هیدرولیکی جریان؛ و $S =$ شیب بستر. دقت استفاده از معادله مانینگ به تعیین صحیح ضریب زبری مانینگ بستگی دارد. عوامل مختلفی بر ضریب زبری مانینگ موثر هستند مانند پارامترهای هیدرولیکی جریان، زبری سطح بستر و دیواره آبراهه، قوسی یا مستقیم بودن مسیر آبراهه، نامنظمی سطح مقطع آبراهه، پوشش گیاهی، خصوصیات رسوبات بستر، بار معلق و بستر آبراهه، و تشکیل فرم بستر در

برای تعیین مقاومت جریان در جریان‌های ماندگار از معادله مانینگ به‌طور وسیعی استفاده می‌شود. علاوه بر این، برای طراحی کانال‌های با جداره صلب و همچنین برای تعیین منحنی دبی اشل در رودخانه‌ها از این معادله استفاده می‌شود.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن،

کانال با بستر ماسه‌ای (تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی مختلف) بررسی کردند و نشان دادند که تأثیر مقاومت ناشی از فرم بستر ناچیز نیست، به گونه‌ای که مقاومت ناشی از فرم بستر دیون حدود ۲۵ تا ۵۵ درصد از مقاومت کل را شامل می‌شود. جعفری میانایی و کشاورزی (Jafari Meanaii & Keshavarzi, 2007) پراکنش تنش برشی رینولدز و تغییرپذیری‌های انرژی جنبشی روی ریپل‌های مصنوعی را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که تنش برشی از لحاظ میزان در فاصله بین دو ریپل آغاز به افزایش می‌کند و در ابتدای شیب وجه بالادست ریپل دوم، به بیشترین میزان خود می‌رسد. اسماعیلی و همکاران (Esmaili et al., 2009) با بررسی تأثیر فرم بستر دیون بر ضریب زبری در جریان غیرماندگار نشان دادند که روند تغییر ضریب مقاومت بستر (n) با گذشت زمان بر اساس شرایط فرسایش، در آغاز روند افزایشی دارد و پس از آن کاهش و بار دیگر افزایش می‌یابد. امید و همکاران (Omid et al., 2010) به بررسی تأثیر حرکت بار بستر بر مقاومت در برابر جریان در آبراهه‌های آبرفتی دارای فرم بستر دیون پرداختند و نشان دادند که انتقال رسوب‌های با اندازه میانگین ۰/۵ میلی‌متر، ضریب اصطکاک را برای فرم‌های بستر صاف و زبر به ترتیب ۲۲ و ۲۴ درصد کاهش می‌دهد در حالی که انتقال رسوب‌های با اندازه میانگین ۲/۸۴ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای فرم‌های بستر صاف و زبر به ترتیب ۳۲ و ۳۹ درصد کاهش می‌دهد. افضل‌مهر و همکاران (Afzalimehr et al., 2010) ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در رودخانه‌های شنی با فرم بستر را مطالعه کردند و دریافتند که بخش عمده‌ای از ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ در رودخانه‌های شنی به علت ضریب شکل فرم بستر

کف آبراهه. برای تعیین ضریب زبری مانینگ لازم است عوامل مورد اشاره را در نظر گرفت، وگرنه تخمین ضریب زبری مانینگ دقیق نخواهد بود (Bahrami Yarahmadi & Shafai Bajestan, 2011).

در بستر آبراهه‌های آبرفتی و در اثر انتقال رسوبات در بستر، فرم‌های بستر (ریپل، دیون، آنتی دیون، سرسره و استخر) تشکیل می‌شود. تشکیل فرم‌های بستر در کف آبراهه، پارامترهای هیدرولیکی جریان و مقاومت جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. فرم‌های بستر باعث افزایش مقاومت جریان می‌شود اما میزان افزایش مقاومت جریان در اثر تشکیل فرم بستر به نوع فرم بستر، شکل، اندازه، هندسه و فاصله فرم بستر بستگی دارد. در فرم‌های بستر ریپل و دیون، که در اعداد فرود کوچک‌تر از یک تشکیل می‌شوند، جریان جدا شده از تاج آنها عامل اصلی مقاومت قابل توجه جریان است. میزان مقاومت جریان در فرم‌های بستر آنتی دیون، که در اعداد فرود بزرگ‌تر از یک ایجاد می‌شوند، از فرم‌های بستر ریپل و دیون کمتر است. میزان مقاومت جریان در سرسره و استخر، که در شیب‌های تند با سرعت جریان بالا و غلظت رسوب زیاد رخ می‌دهند، بیش از میزان مقاومت جریان در آنتی دیون‌هاست (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010; Dey, 2014).

در گذشته، تحقیقاتی روی فرم‌های بستر در داخل و خارج از کشور شده است. رانگاراچو و سونی (Ranga-Raju & Soni, 1976) با بررسی هندسه ریپل‌ها و دیون‌ها در آبراهه‌ها می‌گویند ویژگی‌های هندسی شکل‌های بستر تأثیر معنی داری بر زبری هیدرولیکی دارد. طالب بیدختی و همکاران (Talebbeydokhti et al., 2006) تأثیر هندسه دیون‌ها را بر ضریب مقاومت در برابر جریان در یک

حدود ۴۷ درصد و در حالت پولکی حدود ۴۳ درصد از زبری کل را تشکیل می‌دهد. کول و همکاران (Kwoll *et al.*, 2016) با بررسی ساختار و مقاومت در برابر جریان روی دیون‌ها نشان دادند که مقاومت در برابر جریان با کاهش شیب دیون کاهش می‌یابد. برای دیون‌های با شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه تنش برشی به ترتیب ۸، ۳۳ و ۹۰ درصد بیشتر از بستر بدون فرم است. قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2016) به بررسی پراکنش سرعت و شدت آشفتگی در حضور دیون و پوشش گیاهی (ساقه برنج) در آبراه‌های مستطیلی روباز پرداختند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد که افزایش ارتفاع تاج دیون از ۴ به ۸ سانتی‌متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج دیون با ارتفاع ۴ سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال می‌دهد. با افزایش ارتفاع تاج دیون، میزان بیشینه تنش در فاصله‌ای دورتر از بستر رخ می‌دهد. داورپناه جزئی و همکاران (Davaranah-Jazi *et al.*, 2016) اثر دیون‌های شنی با تاج مسطح و پوشش گیاهی در دیواره (گیاه خومه) را بر پارامترهای جریان آشفته مطالعه کردند و نشان دادند که در دیون‌های با تاج مسطح بر خلاف دیون‌های با تاج تیز، در هر دو حالت با و بدون پوشش گیاهی، پارامتر سرعت پس از تاج مسطح میزان‌های منفی به خود نمی‌گیرد. تنش‌های رینولدز در حالت با پوشش گیاهی نسبت به حالت بدون پوشش گیاهی بیشتر است. روشنی و همکاران (Roshani *et al.*, 2017) با بررسی تأثیر تبدیل کاهش دهنده عرض بر ارتفاع فرم بستر ریپل در شرایط هیدرولیکی مختلف نشان دادند که کاهش عرض آبراه به کمک تبدیل‌ها نقش موثری بر ارتفاع ریپل‌ها دارد و می‌توان تا حد زیادی به کمک تغییر در زاویه‌های تبدیل‌ها، حرکت رسوب‌ها به

است؛ تطابقی منطقی بین روش‌های کیولگان و پارامتر شیلدز برای تخمین ضریب اصطکاک ناشی از فرم بستر وجود دارد. نصیری دهرسخی و همکاران (Nasiri Dehsorkhi *et al.*, 2011) با بررسی تأثیر فرم‌های بستر و ساحل‌های با پوشش گیاهی (ساقه‌های برنج) بر توزیع سرعت و ساختار جریان متلاطم نشان دادند که با کاهش فاصله از دیوار با پوشش گیاهی، بیشینه سرعت در فاصله دورتر از سطح آب رخ می‌دهد. پراکنش تنش رینولدزی بستگی به فاصله از دیوار دارد و به طور کلی با کاهش فاصله از دیوار، مقدار تنش رینولدزی کمتر خواهد شد. چگنی و پندر (Chegini & Pender, 2012) به بررسی آزمایشگاهی بار بستر ریزدانه و فرم‌های بستر مربوط به آن در شرایط جریان یکنواخت پرداختند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که بار بستر و فرم‌های تشکیل شده مرتبط با آن، با افزایش شیب بستر و نسبت عمق آب به اندازه ذرات رسوبی تغییر می‌کنند. میزان پارامتر بار بستر و شدت انتقال با افزایش اندازه ذرات رسوب کاهش می‌یابد. کبیری و همکاران (Kabiri *et al.*, 2014) با بررسی جریان روی دیون‌های شنی نشان دادند که زبری سطح دیون نقش مهمی در پراکنش سرعت ناحیه نزدیک بستر ($Z/H < 0.3$) که در آن Z ارتفاع تلماسه و H عمق جریان است) دارد اما هیچ تأثیری در پراکنش سرعت در ناحیه جریان بیرونی ($Z/H > 0.3$) ندارد. با افزایش زبری سطح دیون‌های شنی، مقادیر بیشینه تنش‌های برشی رینولدز روی ناحیه‌های فرورفتگی، تاج و وجه بالادست افزایش می‌یابد. صمدی بروجنی و همکاران (Samadi-Boroujeni *et al.*, 2014) اثر دو نوع ریپل (موازی و پولکی) را بر ضریب زبری مانینگ بررسی کردند و نشان دادند که زبری شکل ریپل در حالت موازی

پذیر پرداخته شده است. مطالعات و بررسی‌های منابع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون در این زمینه تحقیقی نشده است. آزمایش‌های این تحقیق با ۵ دبی و ۵ شیب مختلف بستر اجرا و مقادیر ضریب زبری مانینگ برای فرم‌های با ارتفاع‌های مختلف (تحت دبی‌ها و شیب‌های مختلف بستر) محاسبه و تجزیه و تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

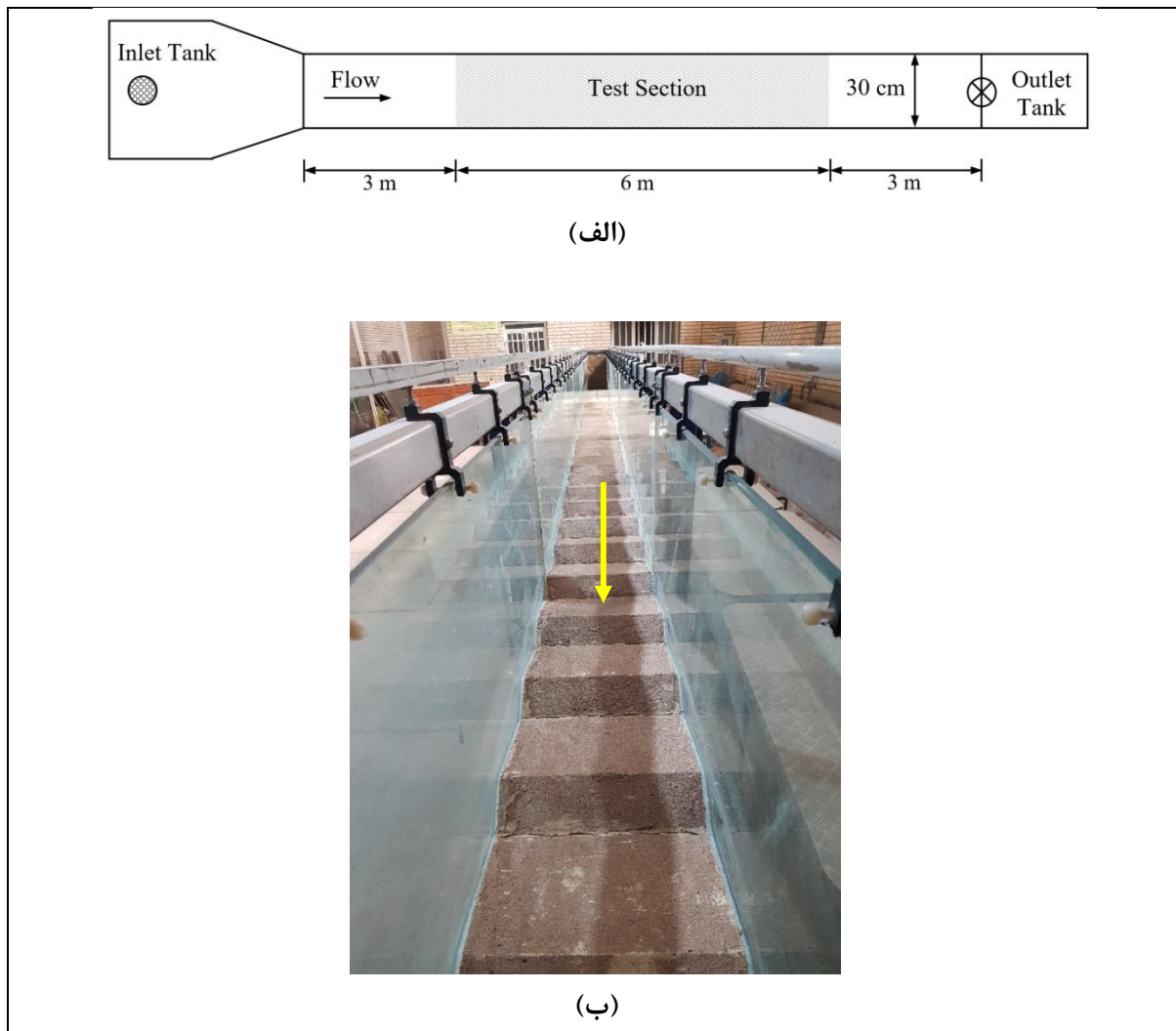
امکانات آزمایشگاهی

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

در انتهای 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 ± 1 درصد میزان خوانش شش‌ده و بیست‌ده و سرعت‌های کوچک‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه معادل ± 5 درصد میزان خوانش شده بود. دبی جریان توسط یک شیر فلکه تنظیم می‌شد که روی لوله ورودی به فلوم نصب شده بود. در این تحقیق از دبی‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه و شیب‌های بستر صفر، 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.

پایین‌دست را کنترل کرد. دقیق و همکاران (Daghigh *et al.*, 2017) با بررسی تشکیل و توسعه ریپل‌های رسوبی تحت امواج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و پرریود موج، بر ارتفاع و طول موج ریپل‌ها افزوده می‌شود. اخروی و گوهری (Okhravi & Gohari, 2020) فاکتور اصطکاکی ناشی از فرم بستر را در رودخانه‌های درشت‌دانه در حضور لایه سپر تحقیق کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که فاکتور اصطکاک مستقل از توزیع اندازه ذرات تشکیل دهنده بستر و حداکثر اندازه آنهاست و پارامتر اصلی کنترل کننده آن شیب خط انرژی است. فاکتور اصطکاک ناشی از فرم بستر ۴۰ درصد از فاکتور اصطکاک کل به دست آمد. حیدری و همکاران (Heydari *et al.*, 2022a,b) به بررسی آزمایشگاهی اثر فرم‌های بستر با اندازه رسوبات مختلف بر مقاومت جریان و تنش برشی بستر پرداختند. آنها در این تحقیق از فرم‌هایی به طول و ارتفاع ۲۰ و ۴ سانتی‌متر استفاده کردند. علاوه بر این، در این تحقیق از رسوبات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر برای زبر کردن سطح فرم‌های بستر مصنوعی استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ضریب اصطکاک کل و تنش برشی کل در بسترهای رسوبی با اندازه ۲/۱۸ میلی‌متر به طور متوسط ۳۲ و ۲۲ درصد بیشتر است تا در بسترهای رسوبی با اندازه ۰/۵ میلی‌متر.

خصوصیات هندسی فرم‌های بستر بر ضریب زبری مانینگ موثر است و باعث افزایش آن می‌شود اما میزان افزایش آن در فرم‌های مختلف و همچنین در شرایط هیدرولیکی گوناگون متفاوت خواهد بود. در تحقیق حاضر به بررسی اثر ۴ ارتفاع مختلف فرم بستر دیون (ارتفاع‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر) بر ضریب زبری مانینگ در یک فلوم مستقیم شیب



شکل ۱- الف: پلان فلوم آزمایشگاهی ، ب: تصویری از فرم‌های بستر دیون در کف فلوم

Fig. 1- Experimental setup a: plan view of the experimental flume, b: a photo of the dune bed forms in the flume floor

شد. برای زبر کردن سطح فرم‌های بستر از رسوبات با اندازه متوسط $0/45$ میلی‌متر استفاده شد. رسوبات با استفاده از چسب آهن روی فرم‌های سیمانی چسبانده شدند. طول و عرض هر فرم بستر به ترتیب برابر 25 و 30 سانتی‌متر و زاویه وجه پایین‌دست آن برابر 32 درجه انتخاب شد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر ارتفاع فرم بستر دیون بر ضریب زبری مانینگ از فرم‌های با ارتفاع 1 ، 2 ، 3 و 4 سانتی‌متر استفاده شد. برای هر ارتفاع فرم بستر، 24 فرم بستر سیمانی ساخته شد. در آزمایش‌های مربوط به هر ارتفاع فرم بستر، فرم‌های سیمانی در طولی معادل 6

فرم‌های بستر ریپل و دیون به شکل مثلث نامتقارن هستند به گونه‌ای که شیب وجه بالادست مثلث ملایم و شیب وجه پایین‌دست آن تند و برابر زاویه ایستایی رسوبات بستر ($32^\circ \approx$ است Shafai Bajestan, 2008; Dey, 2014). فرم‌های بستر ریپل دارای طول موج کمتر از 30 سانتی‌متر و ارتفاع حداکثر 5 سانتی‌متر هستند. البته طول موج فرم بستر دیون می‌تواند بزرگ‌تر از ریپل باشد (Simons & Richardson, 1966; Shafai Bajestan, 2008). در این تحقیق فرم بستر دیون به شکل مثلث نامتقارن و با استفاده از ملات ماسه سیمان درست

متر و در کف فلوم ایجاد شدند. فاصله ابتدای بستر مجموع آزمایش‌های اجرا شده در این تحقیق برابر پوشیده از فرم، از ابتدای فلوم ۳ متر انتخاب شد. ۱۰۰ آزمایش بود.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های مختلف

Table 1-Results of various experiments

Q (lit/s)	S_0	Δ (cm)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	F_r	S_f	n_b
۱۰	.	۱	۷/۹۸	۷	۰/۴۱۷۷	۰/۴۷۶۲	۰/۴۷۴۸	۰/۰۰۳۶	۰/۰۲۴۴
۱۸	.	۱	۱۰/۵	۹/۳	۰/۵۷۱۴	۰/۶۴۵۲	۰/۵۵۹۰	۰/۰۰۳۷	۰/۰۲۱۳
۲۰	.	۱	۱۱/۱۵	۱۰	۰/۵۹۷۹	۰/۶۶۶۷	۰/۵۶۱۸	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۰۶
۲۵	.	۱	۱۲/۱۷	۱۰/۷	۰/۶۸۴۷	۰/۷۷۸۸	۰/۶۰۲۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۲۰۱
۲۹	.	۱	۱۳/۷	۱۲/۵۵	۰/۷۰۵۶	۰/۷۷۰۳	۰/۶۰۲۰	۰/۰۰۳۳	۰/۰۱۸۳
۱۰	۰/۰۰۰۱	۱	۷/۸۳	۶/۹۵	۰/۴۲۵۷	۰/۴۷۹۶	۰/۴۸۸۵	۰/۰۰۳۳	۰/۰۲۲۴
۱۵	۰/۰۰۰۱	۱	۹/۵۵	۸/۵۵	۰/۵۲۳۶	۰/۵۸۴۸	۰/۵۳۶۷	۰/۰۰۳۴	۰/۰۲۰۹
۱۸	۰/۰۰۰۱	۱	۱۰/۴۳	۹/۳۵	۰/۵۷۵۳	۰/۶۴۱۷	۰/۵۶۴۶	۰/۰۰۳۴	۰/۰۲۰۱
۲۵	۰/۰۰۰۱	۱	۱۲/۲	۱۰/۹۵	۰/۶۸۳۱	۰/۷۶۱۰	۰/۶۱۶۸	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۸۳
۲۹	۰/۰۰۰۱	۱	۱۳/۵۵	۱۲/۴۵	۰/۷۱۳۴	۰/۷۷۶۴	۰/۶۰۶۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۱۷۷
۱۰	۰/۰۰۰۵	۱	۷/۶	۶/۷۵	۰/۴۳۸۶	۰/۴۹۳۸	۰/۵۰۸۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۲۲۰
۱۵	۰/۰۰۰۵	۱	۹/۳	۸/۳۵	۰/۵۳۷۶	۰/۵۶۸۸	۰/۵۶۹۳	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۹۸
۲۰	۰/۰۰۰۵	۱	۱۰/۵	۹/۳	۰/۶۳۴۹	۰/۷۱۶۸	۰/۶۱۵۰	۰/۰۰۳۷	۰/۰۱۸۹
۲۵	۰/۰۰۰۵	۱	۱۲/۱	۱۱	۰/۶۸۸۷	۰/۷۵۷۶	۰/۶۲۴۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۷۹
۲۹	۰/۰۰۰۵	۱	۱۳/۲۵	۱۲/۳	۰/۷۲۹۶	۰/۷۸۵۹	۰/۶۱۵۴	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۶۹
۱۰	۰/۰۰۱۰	۱	۷/۳	۶/۵	۰/۴۵۶۶	۰/۵۱۲۸	۰/۵۵۶۷	۰/۰۰۳۶	۰/۰۲۰۳
۱۵	۰/۰۰۱۰	۱	۹	۸/۱	۰/۵۵۵۶	۰/۶۱۷۳	۰/۶۰۳۳	۰/۰۰۳۷	۰/۰۱۹۰
۱۸	۰/۰۰۱۰	۱	۹/۷	۸/۶	۰/۶۱۸۶	۰/۶۹۷۷	۰/۶۵۴۲	۰/۰۰۳۸	۰/۰۱۷۹
۲۵	۰/۰۰۱۰	۱	۱۱/۷	۱۰/۸	۰/۷۱۲۳	۰/۷۷۱۶	۰/۶۳۷۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۱۶۸
۲۹	۰/۰۰۱۰	۱	۱۲/۹	۱۲/۰۵	۰/۷۴۹۴	۰/۸۰۲۲	۰/۶۴۷۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۱۶۱
۱۰	۰/۰۰۱۵	۱	۷	۶/۳۷	۰/۴۷۶۲	۰/۵۲۳۳	۰/۵۹۳۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۸۳
۱۵	۰/۰۰۱۵	۱	۸/۴۷	۷/۴۲	۰/۵۹۰۳	۰/۶۷۳۸	۰/۶۶۱۶	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۸۱
۲۵	۰/۰۰۱۵	۱	۱۱/۴۵	۱۰/۶۷	۰/۷۲۷۸	۰/۷۸۱۰	۰/۶۷۷۸	۰/۰۰۳۴	۰/۰۱۵۸
۲۹	۰/۰۰۱۵	۱	۱۲/۴	۱۱/۶۷	۰/۷۷۹۶	۰/۸۲۸۳	۰/۶۸۱۹	۰/۰۰۳۲	۰/۰۱۵۰
۱۰	.	۲	۷/۸۷	۷/۱	۰/۴۲۳۵	۰/۴۵۹۵	۰/۴۸۳۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۷۱
۱۲/۵	.	۲	۸/۵۷	۷/۷	۰/۴۸۶۲	۰/۵۴۱۱	۰/۵۲۵۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۲۵۵
۲۰	.	۲	۱۰/۸۵	۹/۸	۰/۶۱۴۴	۰/۶۸۰۳	۰/۵۸۳۴	۰/۰۰۴۹	۰/۰۲۴۰
۲۸	.	۲	۱۲/۹	۱۱/۸	۰/۷۲۳۵	۰/۷۹۱۰	۰/۵۹۷۴	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۲۹
۳۰	.	۲	۱۳/۵	۱۲/۶	۰/۷۴۰۷	۰/۷۹۳۷	۰/۵۸۹۲	۰/۰۰۳۹	۰/۰۲۰۹
۱۰	۰/۰۰۰۱	۲	۷/۶۲	۶/۹	۰/۴۳۷۴	۰/۴۸۳۱	۰/۴۹۱۴	۰/۰۰۴۱	۰/۰۲۵۵
۱۲/۵	۰/۰۰۰۱	۲	۸/۵۹	۷/۸	۰/۴۸۵۱	۰/۵۳۱۴	۰/۵۳۶۸	۰/۰۰۴۴	۰/۰۲۴۰
۲۰	۰/۰۰۰۱	۲	۱۰/۵۷	۹/۵	۰/۶۳۰۷	۰/۷۰۱۸	۰/۶۰۳۹	۰/۰۰۴۸	۰/۰۲۲۷
۲۵	۰/۰۰۰۱	۲	۱۱/۲۷	۹/۹	۰/۷۳۹۴	۰/۸۴۱۸	۰/۶۰۲۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۲۰
۳۰	۰/۰۰۰۱	۲	۱۳/۴۲	۱۲/۵	۰/۷۴۵۲	۰/۸۰۰۰	۰/۶۰۴۳	۰/۰۰۴۰	۰/۰۲۰۶

ادامه جدول ۱- نتایج آزمایش های مختلف
Table 1-Results of various experiments

Q (lit/s)	S_0	Δ (cm)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	F_r	S_f	n_b
۱۰	۰/۰۰۰۵	۲	۷/۴۵	۶/۸	۰/۴۴۷۴	۰/۴۹۰۲	۰/۵۰۸۰	۰/۰۰۴۱	۰/۰۲۴۳
۱۲/۵	۰/۰۰۰۵	۲	۸/۴	۷/۶۲	۰/۴۹۶۰	۰/۵۴۶۸	۰/۵۵۶۳	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۳۵
۱۵	۰/۰۰۰۵	۲	۹/۲۵	۸/۵	۰/۵۴۰۵	۰/۵۸۸۲	۰/۵۶۷۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۲۲۶
۲۵	۰/۰۰۰۵	۲	۱۱/۹۳	۱۱/۱	۰/۶۹۸۵	۰/۷۵۰۸	۰/۶۰۹۳	۰/۰۰۴۱	۰/۰۲۰۵
۳۰	۰/۰۰۰۵	۲	۱۳/۲۵	۱۲/۴۲	۰/۷۵۴۷	۰/۸۰۵۲	۰/۶۱۶۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۹۹
۱۰	۰/۰۰۱۰	۲	۷/۱۷	۶/۶	۰/۴۶۴۹	۰/۵۰۵۱	۰/۵۲۱۳	۰/۰۰۴۰	۰/۰۲۳۲
۱۲/۵	۰/۰۰۱۰	۲	۷/۹۷	۷/۲	۰/۵۲۲۸	۰/۵۷۸۷	۰/۵۷۴۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۲۹
۱۵	۰/۰۰۱۰	۲	۸/۷	۷/۸۵	۰/۵۷۴۷	۰/۶۳۶۹	۰/۵۹۶۲	۰/۰۰۴۷	۰/۰۲۲۴
۲۵	۰/۰۰۱۰	۲	۱۱/۴۲	۱۰/۶۴	۰/۷۲۹۲	۰/۷۸۳۲	۰/۶۲۰۶	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۹۶
۳۰	۰/۰۰۱۰	۲	۱۳/۰۲	۱۲/۳	۰/۷۶۸۰	۰/۸۱۳۰	۰/۶۳۳۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۹۰
۱۰	۰/۰۰۱۵	۲	۷/۱	۶/۵۷	۰/۴۶۹۵	۰/۵۰۷۴	۰/۵۶۲۵	۰/۰۰۴۲	۰/۰۲۲۰
۱۲/۵	۰/۰۰۱۵	۲	۷/۷۵	۷/۰۵	۰/۵۳۷۴	۰/۵۹۱۰	۰/۶۱۰۷	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۱۳
۱۵	۰/۰۰۱۵	۲	۸/۴۵	۷/۷	۰/۵۹۱۷	۰/۶۴۹۴	۰/۶۲۷۵	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۰۷
۲۸	۰/۰۰۱۵	۲	۱۲/۱۹	۱۱/۵	۰/۷۶۵۷	۰/۸۱۱۶	۰/۶۷۰۲	۰/۰۰۴۱	۰/۰۱۸۲
۳۰	۰/۰۰۱۵	۲	۱۲/۶۵	۱۲	۰/۷۹۰۵	۰/۸۳۳۳	۰/۶۶۷۳	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۷۷
۱۰	.	۳	۸/۲	۶/۷۵	۰/۴۰۶۵	۰/۴۹۳۸	۰/۴۷۹۳	۰/۰۰۵۲	۰/۰۱۹۹
۱۵	.	۳	۹/۸۳	۸/۰۵	۰/۵۰۸۶	۰/۶۲۱۱	۰/۵۴۰۹	۰/۰۰۵۷	۰/۰۲۷۹
۱۸	.	۳	۱۰/۶۵	۸/۶۵	۰/۵۶۳۴	۰/۶۹۳۶	۰/۵۶۳۰	۰/۰۰۵۸	۰/۰۲۷۴
۲۵	.	۳	۱۲/۹	۱۰/۹	۰/۶۴۶۰	۰/۷۶۴۵	۰/۶۰۲۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۲۵۶
۳۱	.	۳	۱۴/۲۸	۱۲/۳۵	۰/۷۲۳۶	۰/۸۳۶۷	۰/۶۱۶۶	۰/۰۰۵۲	۰/۰۲۳۶
۱۰	۰/۰۰۰۱	۳	۸/۲	۶/۷۵	۰/۴۰۶۵	۰/۴۹۳۸	۰/۴۹۸۱	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۸۹
۱۵	۰/۰۰۰۱	۳	۹/۷۵	۸	۰/۵۱۲۸	۰/۶۲۵۰	۰/۵۵۸۴	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۶۷
۱۸	۰/۰۰۰۱	۳	۱۰/۵	۸/۴	۰/۵۷۱۴	۰/۷۱۴۳	۰/۵۹۲۴	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۶۰
۲۵	۰/۰۰۰۱	۳	۱۲/۶۵	۱۰/۶۵	۰/۶۵۸۸	۰/۷۸۲۵	۰/۶۲۸۲	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۳۹
۳۱	۰/۰۰۰۱	۳	۱۴/۲	۱۲/۳۲	۰/۷۲۲۷	۰/۸۳۸۷	۰/۶۲۳۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۲۳۱
۱۰	۰/۰۰۰۵	۳	۷/۹۵	۶/۶۷	۰/۴۱۹۳	۰/۴۹۹۸	۰/۵۰۸۰	۰/۰۰۵۰	۰/۰۲۷۲
۱۵	۰/۰۰۰۵	۳	۹/۵۵	۷/۸۹	۰/۵۲۳۶	۰/۶۳۳۷	۰/۵۷۲۱	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۵۸
۱۸	۰/۰۰۰۵	۳	۱۰/۴	۸/۵۵	۰/۵۷۶۹	۰/۷۰۱۸	۰/۶۰۵۸	۰/۰۰۵۷	۰/۰۲۴۸
۲۵	۰/۰۰۰۵	۳	۱۲/۴۲	۱۰/۴۷	۰/۶۷۱۰	۰/۷۹۵۹	۰/۶۲۸۲	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۳۹
۳۱	۰/۰۰۰۵	۳	۱۳/۸۷	۱۲/۱۷	۰/۷۴۵۰	۰/۸۴۹۱	۰/۶۲۹۸	۰/۰۰۵۰	۰/۰۲۱۹
۱۰	۰/۰۰۱۰	۳	۷/۸	۶/۶۳	۰/۴۲۷۴	۰/۵۰۲۸	۰/۵۲۸۷	۰/۰۰۵۱	۰/۰۲۶۱
۱۵	۰/۰۰۱۰	۳	۹/۴	۷/۸	۰/۵۳۱۹	۰/۶۴۱۰	۰/۵۹۴۲	۰/۰۰۵۷	۰/۰۲۵۲
۱۸	۰/۰۰۱۰	۳	۱۰/۳	۸/۴۵	۰/۵۸۲۵	۰/۷۱۰۱	۰/۶۳۴۱	۰/۰۰۶۰	۰/۰۲۴۳
۲۵	۰/۰۰۱۰	۳	۱۲/۰۵	۱۰/۲	۰/۶۹۱۶	۰/۸۱۷۰	۰/۶۳۲۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۲۳۴
۳۱	۰/۰۰۱۰	۳	۱۳/۷۶	۱۲/۳	۰/۷۵۱۰	۰/۸۴۰۱	۰/۶۵۰۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۲۰۸
۱۰	۰/۰۰۱۵	۳	۷/۶۵	۶/۵۵	۰/۴۳۵۷	۰/۵۰۸۹	۰/۵۶۸۵	۰/۰۰۵۲	۰/۰۲۴۴
۱۵	۰/۰۰۱۵	۳	۹/۲	۷/۶۵	۰/۵۴۳۵	۰/۶۵۳۶	۰/۶۱۶۸	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۴۴

ادامه جدول ۱- نتایج آزمایش‌های مختلف

Table 1-Results of various experiments

Q (lit/s)	S_o	Δ (cm)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	u_1 (m/s)	u_2 (m/s)	F_r	S_f	n_b
۲۰	۰/۰۰۱۵	۳	۱۰/۴	۸/۴۵	۰/۶۴۱۰	۰/۷۸۹۰	۰/۶۸۰۲	۰/۰۰۵۹	۰/۰۲۲۱
۲۹	۰/۰۰۱۵	۳	۱۳/۰۳	۱۱/۵	۰/۴۷۱۹	۰/۸۴۰۶	۰/۶۶۳۸	۰/۰۰۵۲	۰/۰۲۱۵
۳۱	۰/۰۰۱۵	۳	۱۳/۴۵	۱۱/۹۵	۰/۷۶۸۳	۰/۸۶۴۷	۰/۶۸۷۹	۰/۰۰۵۰	۰/۰۲۰۲
۱۰	.	۴	۸/۳۵	۶/۸۴	۰/۳۹۹۲	۰/۴۸۷۳	۰/۴۱۴۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۳۶۱
۱۵	.	۴	۱۰/۱۳	۸/۴۷	۰/۴۹۳۶	۰/۵۹۰۳	۰/۴۶۸۵	۰/۰۰۵۵	۰/۰۳۲۶
۱۸	.	۴	۱۰/۹۶	۹/۲۴	۰/۵۴۷۴	۰/۶۴۹۴	۰/۴۹۷۷	۰/۰۰۵۴	۰/۰۳۰۴
۲۵	.	۴	۱۳	۱۱/۹۴	۰/۶۴۱۰	۰/۷۶۱۷	۰/۵۲۷۶	۰/۰۰۵۹	۰/۰۳۰۵
۲۹	.	۴	۱۳/۹۵	۱۱/۹۹	۰/۶۹۳۰	۰/۸۰۶۲	۰/۵۳۳۹	۰/۰۰۵۴	۰/۰۲۸۸
۱۰	۰/۰۰۰۱	۴	۸/۳	۶/۹۸	۰/۴۰۱۶	۰/۴۷۷۶	۰/۴۱۹۸	۰/۰۰۴۹	۰/۰۳۳۶
۱۵	۰/۰۰۰۱	۴	۱۰/۰۷	۸/۴۳	۰/۴۹۵۶	۰/۵۹۳۱	۰/۴۷۱۹	۰/۰۰۵۵	۰/۰۳۲۳
۱۸	۰/۰۰۰۱	۴	۱۰/۸۷	۹/۱۸	۰/۵۵۲۰	۰/۶۵۳۶	۰/۵۰۱۰	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۹۹
۲۵	۰/۰۰۰۱	۴	۱۲/۸	۱۰/۹۳	۰/۶۵۱۰	۰/۷۶۲۴	۰/۵۲۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۸۷
۲۹	۰/۰۰۰۱	۴	۱۳/۹۵	۱۲/۱۳	۰/۶۹۳۰	۰/۷۹۶۹	۰/۵۳۶۱	۰/۰۰۵۲	۰/۰۲۷۹
۱۰	۰/۰۰۰۵	۴	۸/۱۸	۷	۰/۴۰۷۵	۰/۴۷۶۲	۰/۴۳۲۵	۰/۰۰۴۸	۰/۰۳۱۹
۱۵	۰/۰۰۰۵	۴	۹/۹	۸/۴	۰/۵۰۵۱	۰/۵۹۵۲	۰/۴۸۶۵	۰/۰۰۵۴	۰/۰۳۰۷
۱۸	۰/۰۰۰۵	۴	۱۰/۶۳	۹	۰/۵۶۴۴	۰/۶۶۶۷	۰/۵۱۱۱	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۹۳
۲۵	۰/۰۰۰۵	۴	۱۲/۴۵	۱۰/۴۵	۰/۶۶۹۳	۰/۷۹۷۴	۰/۵۴۶۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۲۸۴
۲۹	۰/۰۰۰۵	۴	۱۳/۶۲	۱۱/۹	۰/۷۰۹۷	۰/۸۱۲۳	۰/۵۴۷۶	۰/۰۰۵۰	۰/۰۲۸۶
۱۰	۰/۰۰۱۰	۴	۸/۰۵	۷	۰/۴۱۴۱	۰/۴۷۶۲	۰/۴۴۸۳	۰/۰۰۴۸	۰/۰۳۰۶
۱۲/۵	۰/۰۰۱۰	۴	۸/۷	۷/۲	۰/۴۷۸۹	۰/۵۷۸۷	۰/۵۰۱۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۳۰۳
۱۵	۰/۰۰۱۰	۴	۹/۷۵	۸/۴	۰/۵۱۲۸	۰/۵۹۲۵	۰/۴۹۷۳	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۹۸
۱۸	۰/۰۰۱۰	۴	۱۰/۶۵	۹/۲۵	۰/۵۶۳۴	۰/۶۴۸۶	۰/۵۲۶۵	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۸۱
۲۹	۰/۰۰۱۰	۴	۱۳/۴۵	۱۱/۳	۰/۷۱۸۷	۰/۸۵۵۵	۰/۶۲۰۱	۰/۰۰۶۲	۰/۰۲۶۰
۱۰	۰/۰۰۱۵	۴	۷/۸۶	۷/۰۸	۰/۴۲۴۱	۰/۴۷۰۸	۰/۴۵۹۱	۰/۰۰۴۳	۰/۰۲۸۱
۱۵	۰/۰۰۱۵	۴	۹/۴۵	۸/۳	۰/۵۲۹۱	۰/۶۰۲۴	۰/۵۱۲۵	۰/۰۰۵۱	۰/۰۲۷۹
۱۸	۰/۰۰۱۵	۴	۱۰/۳	۹/۱۷	۰/۵۸۲۵	۰/۶۵۴۳	۰/۵۳۸۲	۰/۰۰۴۸	۰/۰۲۶۰
۲۹	۰/۰۰۱۵	۴	۱۳/۲	۱۲	۰/۷۳۲۳	۰/۸۰۵۶	۰/۵۷۶۸	۰/۰۰۴۶	۰/۰۲۳۷

محاسبات

(A)، محیط خیس شده (P)، شعاع هیدرولیکی (R) و

سرعت متوسط جریان (U) محاسبه شدند. افت انرژی بین مقاطع ۱ و ۲ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$h_f = \left(y_1 + \frac{U_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{U_2^2}{2g} \right) + \Delta Z \quad (2)$$

در رابطه فوق، y_1 و y_2 به ترتیب عمق جریان در مقاطع ۱ و ۲، U_1 و U_2 به ترتیب سرعت متوسط

برای محاسبات دو مقطع ۱ و ۲ روی بستر پوشیده از فرم در نظر گرفته شد که فاصله آنها از یکدیگر (L) حدود ۲ متر بود. فاصله مقطع ۱ از ابتدای بستر پوشیده از رسوب، ۲ متر بود. با اندازه‌گیری عمق جریان (v) در مقاطع ۱ و ۲ و میانگین‌گیری از آنها، مقادیر سطح مقطع جریان

بنابراین، ضریب اصطکاک بستر (f_b) و ضریب زبری مانینگ (n_b) طبق روابط زیر محاسبه شدند (Julien, 2010):

$$f_b = f + \frac{2y}{B}(f - f_w) \quad (7)$$

$$R_b = \left(\frac{f_b}{f}\right) R \quad (8)$$

$$n_b = \frac{R_b^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}}{U} \quad (9)$$

که در آن B عرض فلوم است.

آنالیز ابعادی

متغیرهای مؤثر بر ضریب زبری مانینگ در

مجاری با فرم بستر دیون به صورت زیر است:

$$n_b = f(V, y, g, \rho_w, \mu, \rho_s, d_{50}, B, S_f, \lambda, \Delta, \alpha, \theta) \quad (10)$$

که در آن،

n_b = ضریب زبری مانینگ، ρ_w جرم مخصوص آب، μ = لزوجت دینامیکی آب، ρ_s = جرم مخصوص ذرات رسوب، d_{50} = قطر متوسط ذرات رسوب، λ = طول فرم بستر، Δ = ارتفاع فرم بستر، α = زاویه وجه بالادست فرم بستر نسبت به افق و θ = زاویه وجه پایین دست فرم بستر نسبت به افق است. در شکل ۲ متغیرهای مربوط به فرم بستر دیون نشان داده شده است.

جریان در مقاطع ۱ و ۲ هستند. ΔZ برابر اختلاف رقوم مقاطع ۱ و ۲ نسبت به سطح مبنا دلخواه است که با استفاده از رابطه $\Delta Z = S L$ (فاصله مقاطع ۱ و ۲ از یکدیگر و S شیب بستر است) تعیین گردید. شیب خط انرژی (S_f)، عدد رینولدز جریان (Re) و ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ (f) طبق روابط زیر محاسبه شدند.

$$S_f = \frac{h_f}{L} \quad (3)$$

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

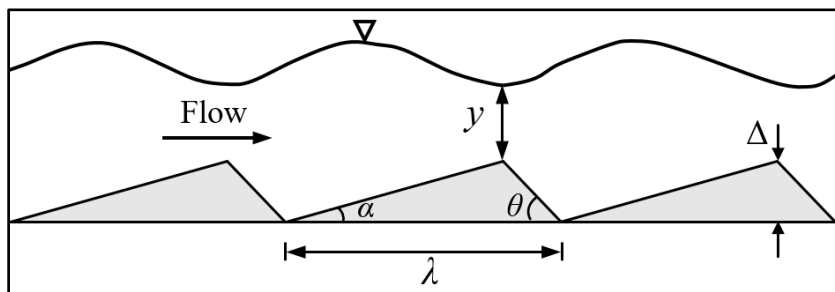
$$f = \frac{8RGS_f}{U^2} \quad (5)$$

که در آنها،

ν = لزوجت سینماتیک آب و g = شتاب ثقل ($g=9.81 \text{ m/s}^2$). در جدول ۱ نتایج آزمایش‌های مختلف ارائه شده است.

در فلوم‌های آزمایشگاهی با دیواره صاف، زمانی 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 (Julien, 2010):

$$f_w = 0.0026 \left(\log\left(\frac{Re}{f}\right)\right)^2 - 0.0428 \log\left(\frac{Re}{f}\right) + 0.1884 \quad (6)$$



شکل ۲- نمای جانبی از فرم بستر دیون و متغیرهای آن

Fig. 2- Side view of the dune bed form and its variables

$$n_b = f\left(\frac{y}{\Delta}, \frac{\Delta}{\lambda}, \alpha, \theta, S_f, F_r, Re, G_s\right) \quad (11)$$

با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد زیر استخراج شد: در رابطه فوق، G_s چگالی نسبی ذرات رسوبی

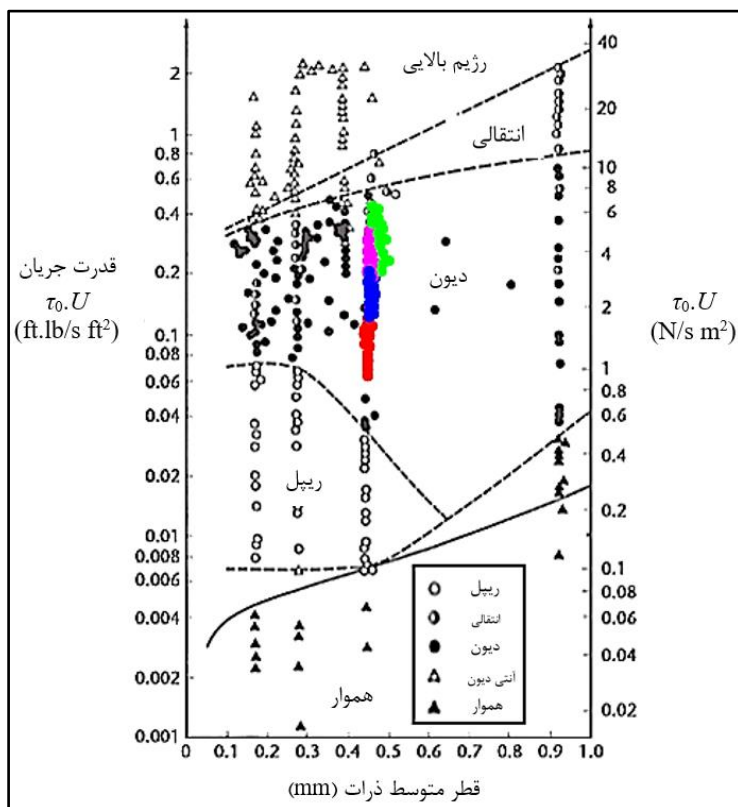
پوشیده از فرم بستر دیون به قرار زیر است:

$$n_b = f\left(\frac{y}{\Delta}, \frac{\Delta}{\lambda}, S_f, F_r\right) \quad (12)$$

نتایج و بحث

در آزمایش‌های تحقیق حاضر، عدد فرود جریان در محدوده ۰/۴۴ تا ۰/۷ قرار دارد. فرم بستر دیون در رژیم جریان پایینی، که در آن عدد فرود جریان کوچک‌تر از ۱ است، تشکیل می‌شوند (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010) در شکل ۳ معیار سایمونز و ریچاردسون (Simons & Richardson, 1966) برای پیش بینی فرم بستر نشان داده شده است. در این شکل داده‌های حاصل از تحقیق حاضر نشان داده شده‌اند. با دقت کردن در شکل دیده می‌شود که داده‌ها در محدوده فرم بستر دیون قرار گرفته‌اند.

است که با توجه به اینکه در این تحقیق از ماسه برای ذرات رسوبی استفاده شده است، این پارامتر ثابت است ($G_s=2.65$). عدد رینولدز در جریان‌های متلاطم تاثیر ناچیزی دارد، از این رو از پارامتر Re نیز صرف نظر می‌شود. F_r عدد فرود جریان است که پارامتر موثری است. θ پارامتری ثابت در این مطالعه است ($\theta=32^\circ$) از این رو این پارامتر نیز از رابطه فوق حذف می‌شود. $\frac{y}{\Delta}$ پارامتر استغراق نسبی جریان است که از تقسیم عمق جریان بر ارتفاع فرم بستر محاسبه می‌گردد. $\frac{\Delta}{\lambda}$ از تقسیم ارتفاع به طول فرم بستر محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه پارامتر α تابعی از نسبت ارتفاع فرم بستر به طول آن است از این پارامتر نیز به علت آنکه پارامتر $\frac{\Delta}{\lambda}$ در رابطه نهایی وجود دارد، صرف نظر می‌شود. بنابراین پارامترهای بی‌بعد موثر بر ضریب مانینگ در مجاری

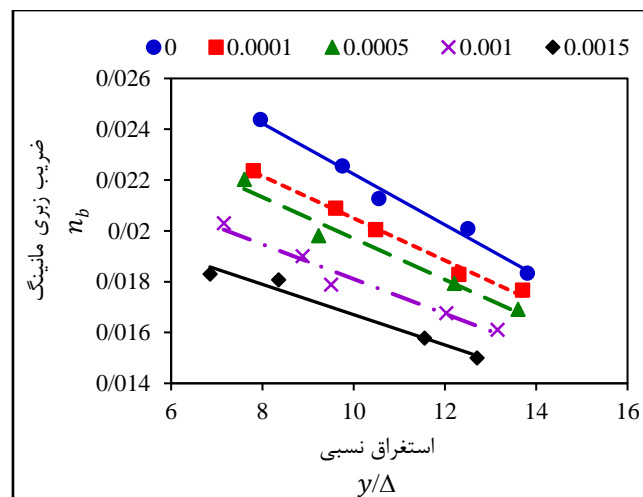


شکل ۳- بررسی داده‌های پژوهش حاضر طبق روش سایمونز و ریچاردسون (۱۹۶۶)

Fig. 3- Evaluating data of this study based on criteria of Simons and Richardson (1966)

برابر جریان ابتدا افزایش و سپس با افزایش بیشتر عمق کاهش می‌یابد. حیدری (Heydari, 2020) می‌گوید که ضریب زبری مانینگ در بسترهای پوشیده از فرم ریپل با افزایش استغراق نسبی، کاهش می‌یابد. بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (Bahrami Yarahmadi & Shafai Bejestan, 2011) دریافتند که ضریب زبری مانینگ در بسترهای رسوبی مسطح با شکل‌های مختلف (طبیعی به نسبت گرد گوشه، ذرات شکسته تیز گوشه و ذرات مصنوعی کروی کامل) رابطه عکس با استغراق نسبی دارد. محاسبات نشان داد که در بستر با فرم یک سانتی‌متر، مقدار ضریب زبری مانینگ در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به طور متوسط به ترتیب ۶/۳۸، ۹/۸۹، ۱۵/۰۸ و ۲۰/۸۵ درصد کمتر از ضریب زبری مانینگ در شیب صفر است.

در شکل ۴ تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر استغراق نسبی (نسبت عمق به ارتفاع فرم بستر) برای فرم‌های با ارتفاع ۱ سانتی‌متر (به عنوان نمونه) نشان شده است. محور افقی شکل، پارامتر بدون بعد استغراق نسبی ($\frac{y}{\Delta}$) و محور عمودی آن ضریب زبری مانینگ (n_b) است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در اثر افزایش پارامتر استغراق نسبی ($\frac{y}{\Delta}$) و شیب بستر، میزان ضریب زبری مانینگ کاهش می‌یابد. در آزمایش‌های مربوط به دیون‌های با ارتفاع ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر نیز چنین نتایج مشابهی حاصل شد. یانگ (Yang, 1996) می‌گوید در یک بستر دیون عموماً با افزایش شیب، مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. این محقق می‌افزاید که در بسترهای ریپل یا دیون با افزایش عمق جریان، مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد ولی در یک بستر آنتی دیون با افزایش عمق جریان، مقاومت در



شکل ۴- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر استغراق نسبی برای بستر با فرم ۱ سانتی‌متر

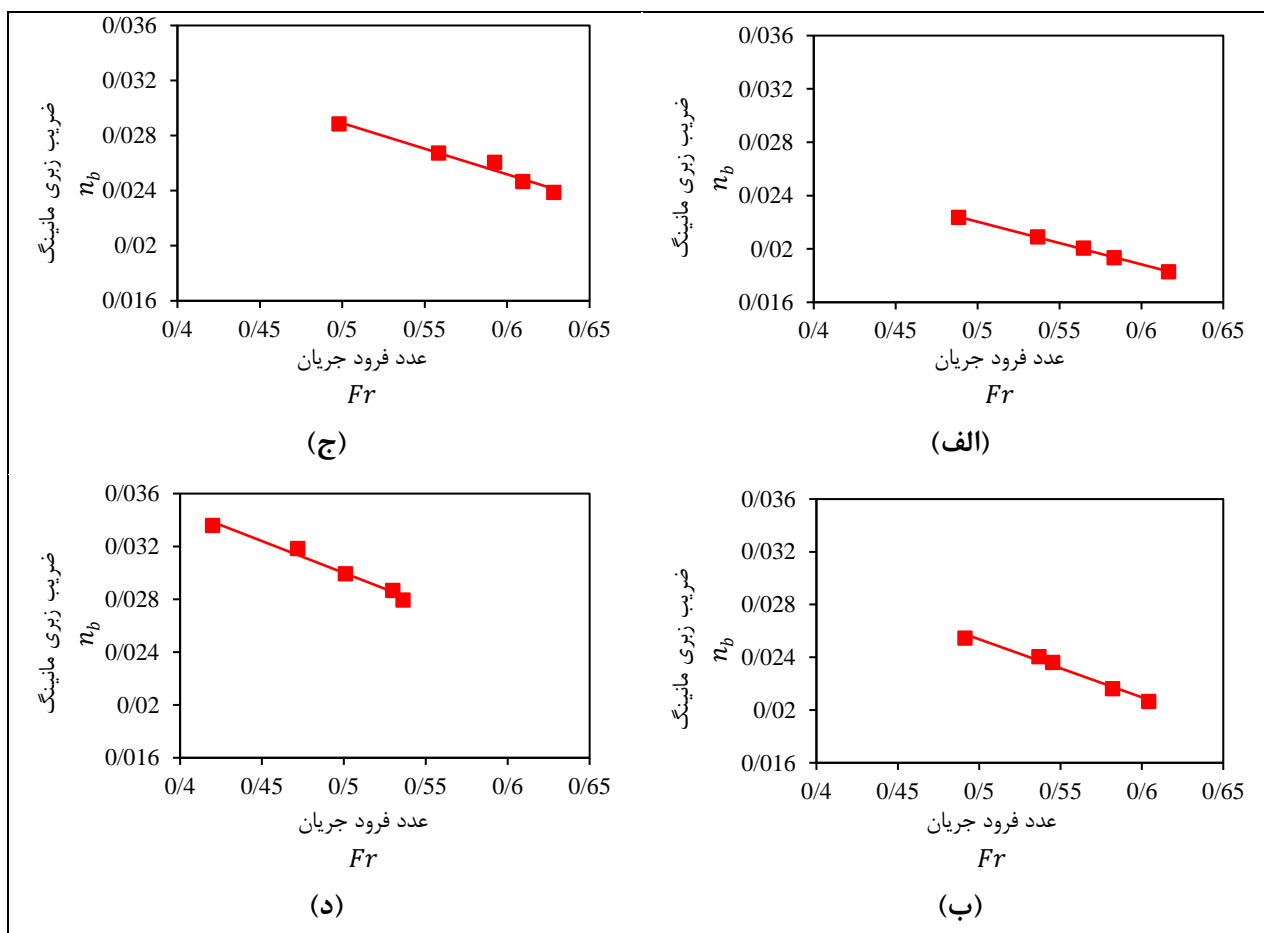
Fig. 4- Variation of Manning's roughness coefficient against relative submergence for bed form with a height of 1 cm

کاهش می‌یابد. عدد فرود جریان طبق رابطه $Fr = \frac{V}{\sqrt{g\Delta}}$ ، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم و با عمق جریان رابطه عکس دارد. از طرفی، ضریب زبری مانینگ بر اساس رابطه (۹)، با عمق (یا شعاع هیدرولیکی) جریان رابطه مستقیم و با سرعت

در شکل ۵ تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر عدد فرود جریان به ازای شیب ۰/۰۰۰۱ برای دیون‌های با ارتفاع مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در اثر افزایش عدد فرود جریان میزان ضریب زبری مانینگ

و آنکتیل (Afzalimehr & Anctil, 1998) که مقاومت در برابر جریان را در رودخانه‌های با بستر سنگریزه (بسترهای بدون فرم بستر) بررسی کردند، رابطه بین ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ و عدد فرود جریان را به صورت معکوس معرفی کردند.

متوسط جریان رابطه عکس دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عدد فرود جریان و ضریب زبری مانینگ با یکدیگر رابطه عکس دارند. نتایج تحقیقات حیدری (Heydari, 2020) روی فرم‌های بستر ریپل نیز نشان می‌دهد که رابطه ضریب زبری مانینگ و عدد فرود جریان به صورت معکوس است. افضل‌مهر



شکل ۵- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر عدد فرود جریان برای فرم‌های با ارتفاع الف) ۱ سانتی‌متر، ب) ۲ سانتی‌متر، ج) ۳ سانتی‌متر و د) ۴ سانتی‌متر

Fig. 5- Variation of Manning's roughness coefficient against Froude number for bed forms with height of a) 1 cm, b) 2 cm, c) 3 cm, and d) 4 cm.

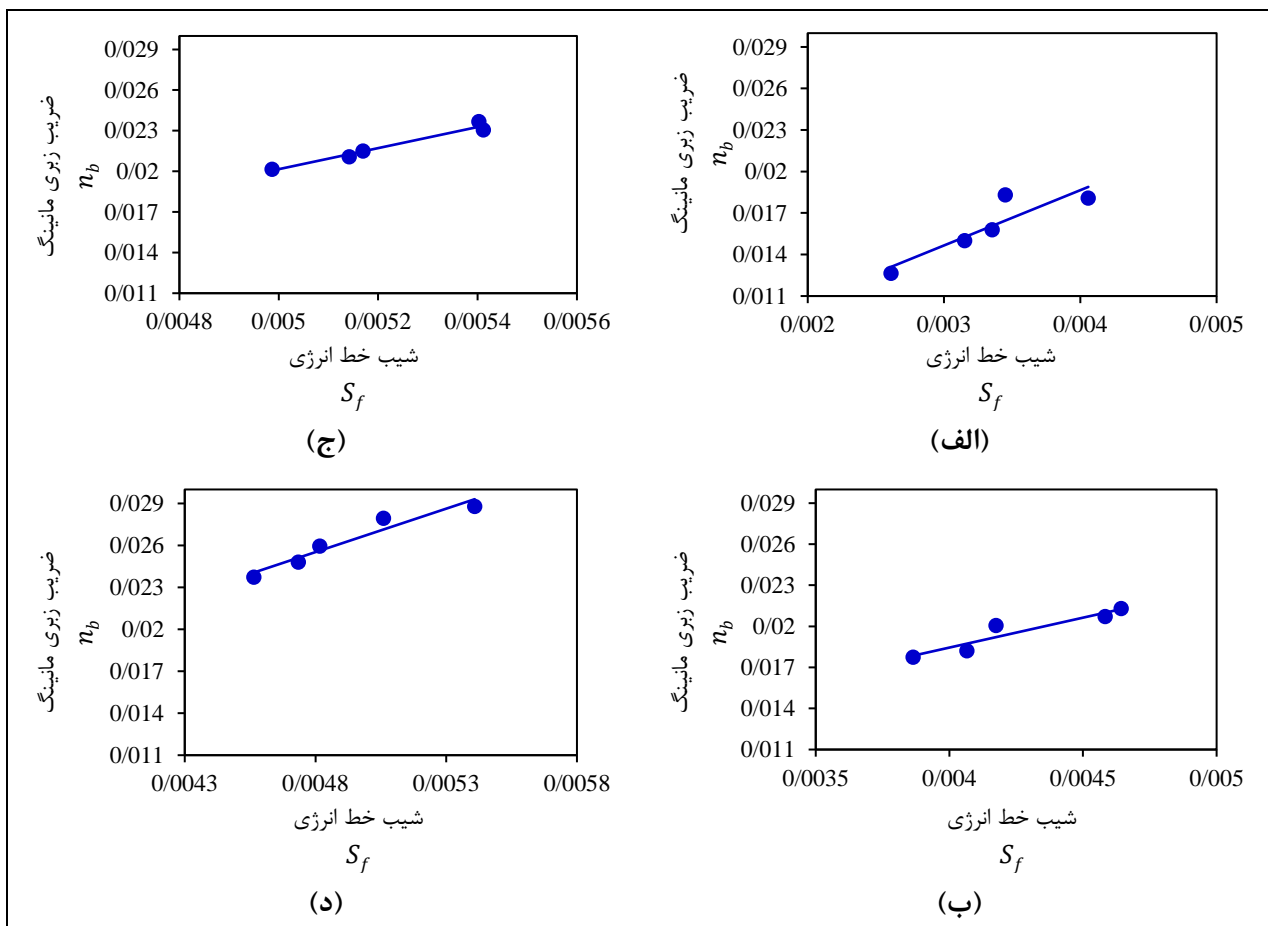
شیب خط انرژی در بسترهای متشکل از فرم‌های با اندازه‌های مختلف، به صورت مستقیم است یعنی با افزایش شیب خط انرژی ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد. در تحقیق صورت گرفته روی ضریب

در شکل ۶ تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر شیب خط انرژی به ازای شیب ۰/۰۱۵ برای دیون-های با ارتفاع مختلف ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که رابطه بین ضریب زبری مانینگ و

شیب‌های بستر (صفر، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱۵) نیز رابطه ضریب زبری مانینگ و پارامتر Δ/λ به صورت مستقیم به دست آمد. محاسبات نشان می‌دهد که برای شیب بستر ۰/۰۰۰۱، ضریب زبری مانینگ دیون‌های با Δ/λ برابر ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶ در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه به طور متوسط ۱۴، ۲۹ و ۵۰ درصد، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه به طور متوسط ۱۳، ۲۸ و ۵۵ درصد، در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه به طور متوسط ۲۱، ۳۱ و ۵۷ درصد و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه به طور متوسط ۱۹، ۳۳ و ۵۸ درصد بیش از ضریب زبری مانینگ دیون با Δ/λ برابر ۰/۰۴ است.

زبری مانینگ در رودخانه کلرادو توسط جارت (Jarret, 1984) گفته شده است ضریب زبری مانینگ با شیب خط انرژی رابطه مستقیم دارد.

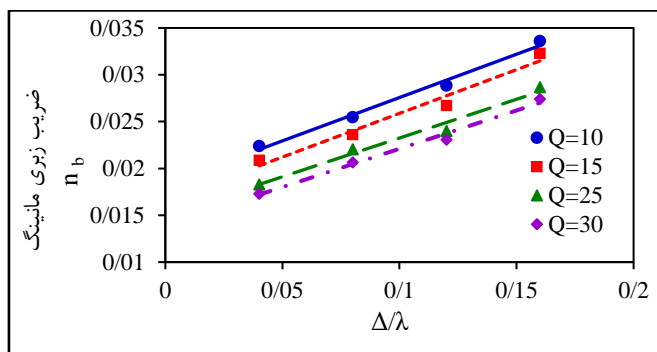
شکل ۷ تغییرات ضریب زبری مانینگ را در برابر پارامتر Δ/λ برای شیب بستر ۰/۰۰۰۱ نشان می‌دهد. با دقت کردن در این شکل دیده می‌شود که به ازای هر دبی، با افزایش Δ/λ ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد. علت افزایش ضریب زبری مانینگ، افزایش میزان جداشدگی جریان در پایین دست فرم بستر در اثر افزایش Δ/λ است. چون افزایش Δ/λ در اثر افزایش ارتفاع آن ایجاد شده است. در دیگر



شکل ۶- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر شیب خط انرژی برای فرم‌های با ارتفاع الف) ۱ سانتی‌متر، ب) ۲ سانتی‌متر،

ج) ۳ سانتی‌متر و د) ۴ سانتی‌متر

Fig. 6- Variation of Manning's roughness coefficient against energy grade line for bed forms with height of a) 1 cm, b) 2 cm, c) 3 cm, and d) 4 cm.



شکل ۷- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر Δ/λ به ازای شیب بستر ۰/۰۰۰۱

Fig. 7- Variation of Manning's roughness coefficient against Δ/λ for bed slope of 0.0001.

۱۲/۵۶، ۲۹/۲۹ و ۵۴/۰۴ درصد، در شیب ۰/۰۰۱ به‌طور متوسط ۱۹/۰۱، ۳۲/۹۸ و ۶۰/۷۸ درصد و در شیب ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط ۱۹/۱۰، ۳۵/۶۹ و ۶۰/۲۴ درصد بیش از ضریب زبری مانینگ دیون با ارتفاع ۱ سانتی‌متر است (شکل ۹).

در بسترهای پوشیده از فرم بستر، ضریب زبری مانینگ کل (n_b) به دو ضریب زبری مانینگ مربوط به ذره (n'_b) و مربوط به فرم بستر (n''_b) تقسیم می‌شود. ضریب زبری مانینگ مربوط به فرم بستر دیون تابعی از اندازه فرم بستر است و در نتیجه اختلاف فشار بین جلو و عقب فرم بستر به‌وجود می‌آید. ضریب زبری مانینگ مربوط به ذره تابعی از اندازه ذرات رسوبی بستر است و می‌توان آن را با استفاده از رابطه استریکلر (۱۹۲۳) تعیین کرد (Shafai Bajestan, 2008):

$$n'_b = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (13)$$

در رابطه فوق d_{50} اندازه متوسط ذرات رسوبی بستر بر حسب متر است. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر $d_{50} = 0.45$ mm است مقدار n'_b برابر ۰/۰۱۳۱ محاسبه می‌شود.

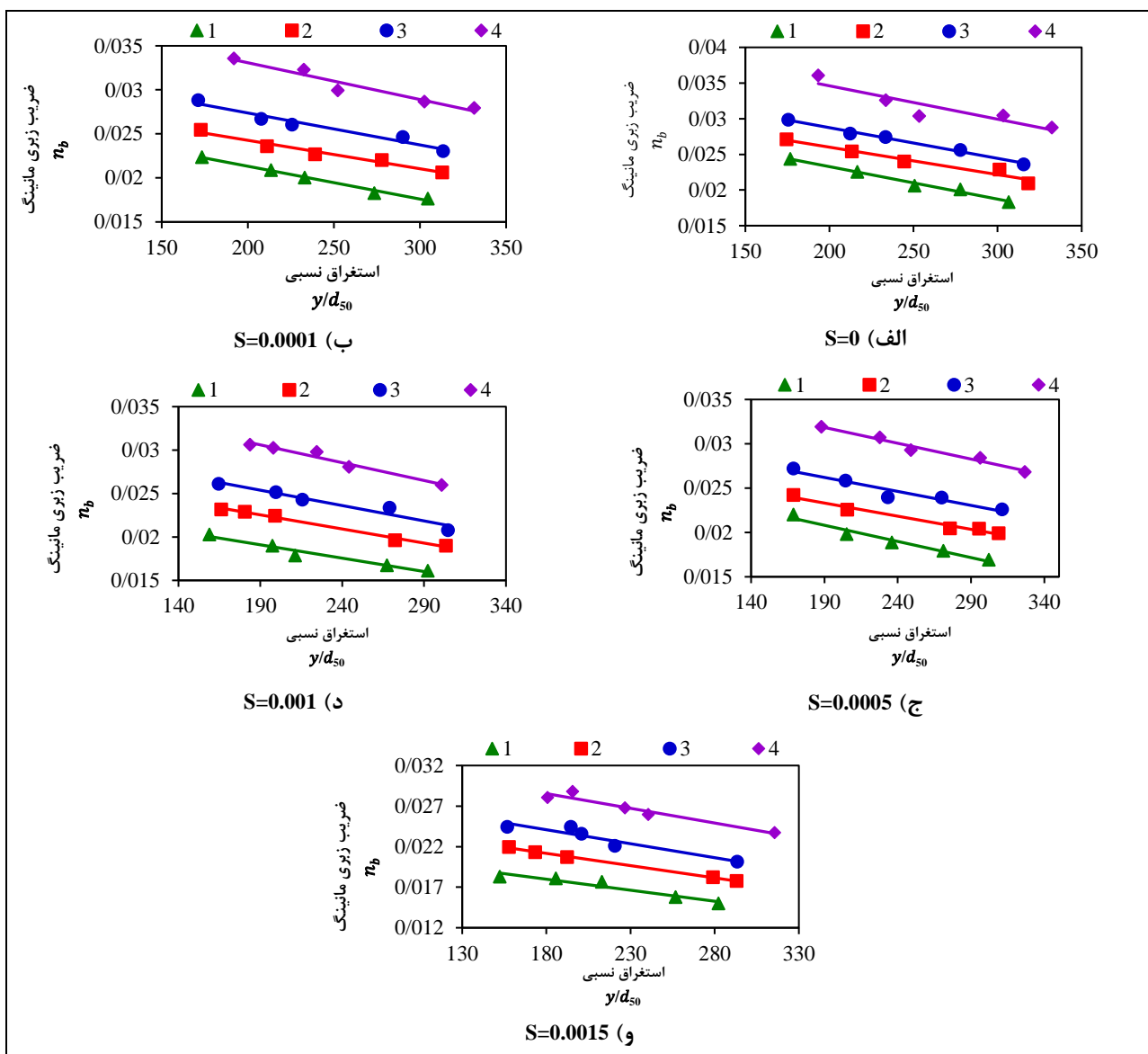
محاسبات نشان می‌دهد که ضریب زبری مانینگ مربوط به فرم بستر (n''_b) برای بسترهای پوشیده از دیون‌های به ارتفاع ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر، به‌طور

شکل ۸ تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر استغراق نسبی ($\frac{y}{d_{50}}$) نسبت عمق جریان به متوسط قطر ذرات رسوبی را برای آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. با دقت کردن در شکل دیده می‌شود که در همه شیب‌ها با افزایش ارتفاع فرم بستر، ضریب زبری مانینگ افزایش یافته است. ضریب زبری مانینگ در بسترهای پوشیده از فرم بستر تابعی از اندازه ذرات رسوبی و همچنین هندسه و اندازه فرم بستر است (Shafai Bajestan, 2008). در این تحقیق، اندازه ذرات رسوبی ثابت و برابر ۰/۴۵ میلی‌متر است اما اندازه فرم‌های بستر متفاوت است. بنابراین، ضریب زبری مانینگ ناشی از اندازه ذرات بستر در فرم‌های با ارتفاع مختلف یکسان است. ضریب زبری مانینگ ناشی از هندسه فرم بستر در اثر جداشدگی جریان در پایین دست فرم بستر و در نتیجه اختلاف فشار بین جلو و عقب فرم بستر ایجاد می‌شود. با افزایش ارتفاع فرم بستر، اختلاف فشار بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان مقاومت جریان و ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد.

محاسبات نشان می‌دهد که ضریب زبری مانینگ دیون‌های با ارتفاع ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر در شیب صفر به‌طور متوسط ۱۳/۵۶، ۲۶/۸۸ و ۴۹/۳۳ درصد، در شیب ۰/۰۰۰۱ به‌طور متوسط ۱۵/۳۰، ۳۰/۲۸ و ۵۳/۵۶ درصد، در شیب ۰/۰۰۰۵ به‌طور متوسط

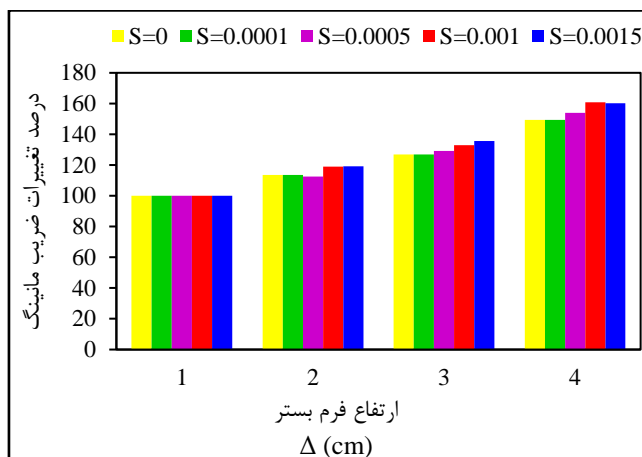
سانتی‌متر دریافتند که n_b'' در ریپل‌های موازی حدود ۴۷ درصد و در ریپل‌های پولکی حدود ۴۳ درصد از ضریب زبری مانینگ کل را تشکیل می‌دهد. حیدری (Heydari, 2020) با تحقیق روی ریپل‌های به ارتفاع ۴ سانتی‌متر دریافت که n_b'' ریپل‌های متشکل از رسوبات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۵۲/۲۵ و ۵۱/۱۴ درصد از ضریب زبری مانینگ کل است.

متوسط به‌ترتیب ۳۰/۷، ۴۰/۱۷، ۴۶/۴۵ و ۵۳/۳۵ درصد از ضریب زبری مانینگ کل (n_b) است. طالب بیدختی و همکاران (Talebeydokhti *et al.*, 2006) می‌گویند در بسترهای پوشیده از دیون، n_b'' ۲۵ تا ۵۵ درصد از ضریب زبری مانینگ کل (n_b) است. صمدی بروجنی و همکاران (Samadi-Boroujeni *et al.*, 2014) با تحقیق روی فرم‌های بستر ریپل به طول ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳



شکل ۸- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر استغراق نسبی برای آزمایش‌های مختلف

Fig. 8- Variation of Manning's roughness coefficient against relative submergence for various experiments



شکل ۹- درصد تغییرات ضریب زبری مانینگ فرم‌های با ارتفاع مختلف

Fig. 9- Percentage of variation of Manning's roughness coefficient due to bed forms with different heights

علاوه بر این، با افزایش ارتفاع فرم بستر دیون، ضریب زبری مانینگ افزایش یافت. محاسبات نشان داد که ضریب زبری مانینگ دیون‌های با ارتفاع ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۶، ۳۱ و ۵۵ درصد بیش از فرم بستر با ارتفاع ۱ سانتی‌متر است. علاوه بر این، ضریب زبری مانینگ مربوط به فرم بستر (n_b'') برای بسترهای پوشیده از دیون‌های با ارتفاع ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر، به‌طور متوسط به ترتیب ۳۰/۷، ۴۰/۱۷، ۴۶/۴۵ و ۵۳/۳۵ درصد از ضریب زبری مانینگ کل است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر فرم‌های بستر دیون با ارتفاع‌های مختلف بر ضریب زبری مانینگ پرداخته شده است. برای این منظور فرم‌های بستر دیون به‌صورت تصنعی و با ارتفاع‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر ساخته و در بستر یک فلوم مستقیم چسبانده شدند. آزمایش‌ها به ازای دبی‌ها و شیب‌های مختلف بستر اجرا شد. نتایج نشان داد که روند تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر عدد فرود جریان و پارامتر استغراق نسبی ($\frac{V}{\Delta}$) کاهش می‌یابد و در برابر شیب خط انرژی و پارامتر $\frac{\Delta}{\lambda}$ افزایش می‌یابد.

قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود (SCU.WH1400.31373).

مراجع

- Afzalimehr, H. & Anctil, F. (1998). Estimation of gravel-bed river flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124 (10), 1054-1058.
- Afzalimehr, H., Singh, V.P. & Fazel Najafabadi, E. (2010). Determination of form friction factor. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(3), 237-243.

- Bahrami Yarahmadi, M. & Shafai Bejestan, M. (2011). Experimental study of the effect of sediment particles shape on Manning's coefficient. *Journal of Water and Soil*, 25(1), 51-60. (In Persian)
- Chegini, A.H.N. & 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.
- Daghigh, H., karami Khaniki, A. & 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. & 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)
- Dey, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 687P.
- Esmaili, K., Kashefipour, S.M. & Shafaie 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)
- Ghasemi, M., Heidarpour, M. & 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)
- Heydari, M. (2020). Experimental investigation of the effect of the ripple bed form on flow resistance coefficient in straight reaches. Master's thesis, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Persian)
- Heydari, M., Bahrami Yarahmadi, M. & Shafai Bejestan, M. (2022a). Experimental study of the effect of bed forms on Darcy-Weisbach friction coefficient in the straight open channels. *Journal of Hydraulics*, 17(1), 35-49. (in Persian)
- Heydari, M., Bahrami Yarahmadi, M. & Shafai Bejestan, M. (2022b). Experimental study of the effect of bed forms with different sediment sizes on bed shear stress. *Journal of Water and Soil Science (JWSS)*. (in Persian)
- Jafari Meanaii, S. & 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)
- Jarret R. D. (1984). Hydraulics of high gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1519- 1539.
- Julien, P.Y. (2010). *Erosion and sedimentation*. 2nd edition, Cambridge University Press, 390P.
- Kabiri, F., Afzalimehr, H., Smart, G. & Rousseau, A.N. (2014). Flow over gravel dunes. *British Journal of Applied Science & Technology*, 4(6), 905-911.
- Kwoll, E., Venditti, J.G., Bradley, R.W. & Winter, C. (2016). Flow structure and resistance over subaqueous high- and low-angle dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121, 545-564.
- Nasiri Dehsorkhi, E., Afzalimehr, H. & 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.
- Okhravi, S. & Gohari, S. (2020). Form friction factor of armored riverbeds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47(11). <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0103>.
- Omid, M.H., Karbasi, M. & Farhoudi, J. (2010). Effects of bed-load movement on flow resistance over bed forms. *Sadhana*, 35(6), 681-691.
- Ranga-Raju, K.G. & Soni, J.P. (1976). Geometry of ripples and dunes in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, 14(3), 241-249.

- Roshani, E., Hossienzade Dalir, A., Farsadizade, D. & 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. & Ketabdari, M.J. (2014). Experimental study 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*. Second edition, Shahid Chamran University of Ahvaz Press. 549P. (In Persian)
- Simons, D.B. & Richardson, E.V. (1966). Resistance to flow in alluvial channels. Geological survey Professional paper, 422-J.
- Talebbeydokhti, N., Hekmatzadeh, A.A. & 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, 396P.

Experimental Study of The Effect of the Dune Bed form Height on Manning's Roughness Coefficient

M. Badzanchin, M. Bahrami Yarahmadi* and M. Shafai Bejestan

* Corresponding Author: Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.bahrami@scu.ac.ir

Received: 4 September 2022, Accepted: 6 October 2022

Extended Abstract

Introduction

Manning's equation is the most popular equation to determine the flow resistance in the steady and uniform flows. The amount of flow resistance in alluvial rivers depends on the type of bed form and its geometrical characteristics. In ripple and dune bed forms, which are formed at Froude numbers less than one (lower flow regime), the flow separation from their crest is the main factor of flow resistance (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010). The effect of bed form on 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), Samadi-Boroujeni et al. (2014), Kwooll et al. (2016), and Heydari (2020). However, no research has been observed regarding the effect of the dune bed form height on Manning's roughness coefficient. Therefore, the main goal of the present study is to investigate the effect of dunes with different height of 1, 2, 3, and 4 cm on Manning's roughness coefficient in a straight flume under different discharges and bed slopes.

Methodology

The experiments were performed in a straight flume of 12 m in length and 0.30 m wide (Figure 1). In this study, different flow discharge of 10, 15, 20, 25, and 30 l/s and different bed slopes of 0.00001, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 were tested. Each dune was made in an asymmetric triangular shape with cement-sand mortar. The dune's height was equal to 1, 2, 3, and 4 cm, and the its length was selected as 25 cm. After each dune was built, the sediment with average size (d_{50}) of 0.45 mm was glued to its surface. The total number of experiments in the present study was 100. Dune bed form dimensions were in lower flow regime. All the experiments were carried out at lower flow regime with, the Froude number values ranged from 0.44 to 0.7.

Results and discussion

Figure 4 shows the variation of the Manning's roughness coefficient against relative submergence (y/Δ) for dunes with a height of 1 cm. This figure shows that, with increasing relative submergence and bed slope, Manning's roughness coefficient decreased.

Figure 5 shows the changes in the Manning's roughness coefficient against Froude number for dunes with different heights (slope of 0.0001). It can be seen that as the Froude number increased, the Manning's roughness coefficient decreased.

Figure 7 illustrates the effect of Δ/λ on the Manning's roughness coefficient. This figure shows that the Manning's roughness coefficient increased with increasing Δ/λ . Calculations showed that the Manning's roughness coefficient in dunes with $\Delta/\lambda = 0.08, 0.12,$ and 0.16 was, on average, 17, 30, and 55% more than dune with $\Delta/\lambda = 0.04$, respectively.

Figure 8 shows the effect of the dune bed form height on the Manning's roughness coefficient. By increasing bed form height, Manning's roughness coefficient increased.

Calculations showed that the Manning's roughness coefficient in dunes with height of 2, 3, and 4 cm was, on average, 16, 31, and 55% more than dune with a height of 1 cm, respectively.

Conclusions

The results of this study shows that with increasing the Froude number and the relative submergence (y/Δ), the flow resistance or Manning's roughness coefficient decreases. Moreover, the increase in the Δ/λ and the bed form height leads to an increase in Manning's roughness coefficient. Calculations showed that the Manning's roughness coefficient in dunes with height of 2, 3, and 4 cm was, on average, 16, 31, and 55% more than dune with a height of 1 cm, respectively. In addition, the form Manning's roughness coefficient (n_b'') for dunes with heights of 1, 2, 3, and 4 cm is, on average, 30.7, 40.2, 46.5, and 53.4% of the total Manning's roughness coefficient (n_b), respectively.

Keywords: Bed form height, Dune, Manning's roughness coefficient, Flow resistance, Alluvial river.