

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

## مطالعه آزمایشگاهی ضریب شزی در آبراه‌های با شکل بستر

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

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: کارشناس ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی؛ استادیار؛ و استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۰

### چکیده

تعیین شرایط هیدرولیکی جریان در کانال‌های با بستر رسوبی مستلزم داشتن اطلاع دقیق از مقاومت جریان و ضریب شزی است که برخلاف کانال‌های صلب، علاوه بر اندازه زبری، به شکل بستر نیز بستگی دارد. بررسی میزان تاثیر اندازه ذرات بر مقاومت ناشی از شکل بستر هدف این مطالعه است. شکل‌های بستر به صورت مصنوعی ساخته شدند و دو اندازه رسوبات (۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر) بر سطح آنها چسبانده شد. آزمایش‌ها تحت تاثیر شیب‌های مختلف و شرایط هیدرولیکی متفاوتی در یک فلووم مستقیم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که به طور کلی با افزایش شیب بستر و اندازه ذرات، مقاومت در مقابل جریان افزایش می‌یابد یا ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b$ )، ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) و ضریب شزی کل ( $C_b$ ) کاهش می‌یابند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به طور متوسط به ترتیب ۹۸ و ۹۳ درصد بیش از ضریب شزی کل ( $C_b$ ) و ۷۱ و ۶۵ درصد بیش از ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) است. علاوه بر این، ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به طور متوسط به ترتیب ۱۶ و ۱۷ درصد بیش از ضریب شزی کل ( $C_b$ ) است.

### واژه‌های کلیدی

تلماسه، شکل بستر، شکنج، ضریب شزی، مقاومت جریان

### مقدمه

هیدرولیکی و رسوبی موثر است (Bahrami

Yarahmadi &amp; Shafai Bejestan, 2011).

عوامل مختلفی بر ضریب‌های مقاومت جریان موثر هستند که باید به طور دقیق شناسایی و ارزیابی شوند. این عوامل عبارت‌اند از: زبری سطح بستر و بدنه، پوشش گیاهی، نامنظم بودن سطح مقطع آبراهه، نامنظمی مسیر آبراهه، آبشستگی و رسوبگذاری، وجود مانع در مسیر جریان، بار معلق و بار بستر، و شکل بستر (Bahrami Yarahmadi &

برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در مجاری باز، برآورد مقاومت جریان امری است مهم و ضروری که برای این منظور از روابط مانینگ، شزی و دارسی-ویسباخ استفاده می‌شود. در این روابط ضریب‌هایی مانند ضریب زبری مانینگ، ضریب شزی و ضریب دارسی-ویسباخ وجود دارند که به ضریب‌های مقاومت جریان معروف‌اند. تخمین صحیح و دقیق این ضریب‌ها در تخمین دقیق پارامترهای

فرسایش، ابتدا روند افزایشی و پس از آن کاهش و سپس افزایشی دارد. امید و همکاران (Omid *et al.*, 2010) با بررسی اثر حرکت بار بستر بر مقاومت در برابر جریان در کانال‌های با شکل بستر تلماسه مصنوعی نشان دادند که انتقال رسوبات با اندازه متوسط ۰/۵ میلی‌متر، ضریب اصطکاک را برای شکل‌های تلماسه صاف و زبر به ترتیب ۲۲ و ۲۴ درصد کاهش می‌دهد در صورتی که انتقال رسوبات با اندازه متوسط ۲/۸۴ میلی‌متر ضریب اصطکاک را برای شکل‌های تلماسه صاف و زبر به ترتیب ۳۲ و ۳۹ درصد کاهش می‌دهد. نصیری دهرخی و همکاران (Nasiri Dehsorkhi *et al.*, 2011) به بررسی تأثیر شکل‌های بستر و سواحل با پوشش گیاهی (ساقه‌های برنج) بر توزیع سرعت و ساختار جریان متلاطم پرداختند. نتایج تحقیقات این پژوهشگران نشان داد که با کاهش فاصله از دیوار با پوشش گیاهی، حداکثر سرعت در فاصله دورتر از سطح آب اتفاق می‌افتد، توزیع تنش رینولدزی بستگی به فاصله از دیوار دارد، و به طور کلی با کاهش فاصله از دیوار تنش رینولدزی کمتر می‌شود. چگنی و پندر (Chegini & Pender, 2012) با بررسی آزمایشگاهی بار بستر ریزدانه و شکل‌های بستر مربوط به آن در شرایط جریان یکنواخت نشان دادند که بار بستر و شکل‌های تشکیل شده مرتبط با آن، با افزایش شیب بستر و نسبت عمق آب به اندازه ذرات رسوبی، تغییر می‌کنند؛ و مقدار پارامتر بار بستر و شدت انتقال، با افزایش اندازه ذرات رسوب کاهش می‌یابد. کبیری و همکاران (Kabiri *et al.*, 2014) با بررسی جریان روی تلماسه‌های شنی نشان دادند که زبری سطح تلماسه نقش مهمی در توزیع سرعت ناحیه نزدیک بستر دارد ( $Z/H < 0.3$ ) که در آن  $Z$  ارتفاع تلماسه و  $H$  عمق جریان است)، اما هیچ

Shafai Bejestan, 2010). تاکنون مطالعات زیادی در مورد اثر عوامل مختلف بر ضریب زبری مانینگ و ضریب دارسی-ویسباخ صورت گرفته است اما تحقیقات در باره ضریب شزی اندک بوده است. علاوه بر این، تحقیقات در خصوص اثر شکل بستر بر ضریب‌های مقاومت جریان قابل توجه نیست.

رانگا راجو و سونی (Ranga-Raju & Soni, 1976) به پیش‌بینی هندسه شکنج‌ها و تلماسه‌ها در آبراهه‌ها و اثر آنها بر زبری هیدرولیکی پرداختند. آنها گزارش داده‌اند که خصوصیات هندسی شکل‌های بستر تأثیر معنی داری بر زبری هیدرولیکی دارد. کرباسی (Karbasi, 2005) اثر حرکت بار بستر بر مقاومت هیدرولیکی جریان در آبراهه‌های با شکل بستر را بررسی کرد و نشان داد که حرکت بار بستر با رسوبات به قطر ۰/۵ میلی‌متر باعث کاهش ۲۲ و ۲۴ درصد در مقاومت هیدرولیکی جریان به ترتیب در کانال‌های صاف و زبر می‌شود. طالب بیدختی و همکاران (Talebeydokhti *et al.*, 2006) تأثیر هندسه تلماسه‌ها را بر ضریب مقاومت در برابر جریان در یک کانال با بستر ماسه‌ای (تحت شرایط هیدرولیکی و رسوبی مختلف) بررسی کردند و نشان دادند که اثر مقاومت ناشی از شکل بستر ناچیز نیست به‌گونه‌ای که مقاومت ناشی از شکل بستر تلماسه حدود ۲۵ تا ۵۵ درصد از مقاومت کل را شامل می‌شود. اسماعیلی و همکاران (Esmaili *et al.*, 2009) با بررسی تأثیر شکل بستر تلماسه بر ضریب زبری در جریان غیرماندگار نشان دادند که جریان ورودی فرسایش قابل توجهی در ابتدای زمانی جریان و ابتدای مکانی بستر به وجود می‌آورد و سبب تغییر شکل بستر و افزایش زبری و بیشتر شدن مقاومت بستر در برابر جریان می‌شود. تغییر ضریب زبری مانینگ با گذشت زمان بر اساس شرایط

پوشش گیاهی دیوار (خومه) بر پارامترهای جریان آشفته پرداختند و نشان دادند که در تلماسه‌های با تاج مسطح، بر خلاف تلماسه‌های با تاج تیز، در هر دو حالت بود یا نبود پوشش گیاهی، پارامتر سرعت بعد از تاج مسطح مقادیر منفی به خود نمی‌گیرد و نیز اینکه تنش‌های رینولدز در حالت وجود نسبت به حالت نبود پوشش گیاهی بیشتر است که این موضوع را می‌توان به افزایش مقاومت جریان در حضور پوشش گیاهی نسبت داد. روشنی و همکاران (Roshani *et al.*, 2017) تأثیر تبدیل کاهش دهنده عرض بر ارتفاع شکل بستر شکنج را در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی کردند و نشان دادند که کاهش عرض کانال به کمک تبدیل‌ها نقش مؤثری بر ارتفاع شکنج‌ها دارد و می‌توان تا حد زیادی به کمک تغییر در زوایای تبدیل‌ها، حرکات رسوبات به پایین دست را کنترل کرد. این پژوهشگران همچنین گزارش دادند که به کمک این نوع تبدیل‌ها، انتقال رسوبات حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کم می‌شود زیرا این تبدیل‌ها مانند مانعی در حرکت رسوبات عمل می‌کنند. دقیق و همکاران (Daghigh *et al.*, 2017) با بررسی تشکیل و توسعه شکنج‌های رسوبی تحت امواج نشان دادند که با افزایش ارتفاع و پریود موج، ارتفاع و طول موج ریپل‌ها افزایش می‌یابد.

تاکنون در هیچ تحقیقی اثر شکل‌های بستر با اندازه رسوبات مختلف بر ضریب شزی بررسی نشده است به همین علت تحقیق حاضر با این هدف صورت گرفت. در این راستا شکل‌های بستر به صورت مصنوعی ساخته شدند و از رسوبات با اندازه‌های مختلف برای زبر کردن سطح آنها استفاده شد. آزمایش‌های این تحقیق در دبی‌ها و شیب‌های

تأثیری در توزیع سرعت در ناحیه جریان بیرونی ( $Z/H > 0.3$ ) ندارد. این محققان همچنین گزارش دادند با افزایش زبری سطح تلماسه‌های شنی، مقادیر حداکثر تنش‌های برشی رینولدز روی نواحی فرورفتگی، تاج و وجه بالادست افزایش می‌یابد. صمدی بروجنی و همکاران (Samadi-Boroujeni *et al.*, 2014) اثر دو نوع شکنج (موازی و پولکی) را بر ضریب زبری مانینگ بررسی کردند و نشان دادند که زبری شکل بستر شکنج در حالت موازی نزدیک به ۴۷ درصد و در حالت پولکی حدود ۴۳ درصد از زبری کل را تشکیل می‌دهد و نیز اینکه ضریب مانینگ در دو شکل مختلف موازی و پولکی شکنج‌ها، اختلاف معنی‌دار دارند و ضریب زبری مانینگ در شکل موازی نسبت به پولکی ۱۲/۳ درصد بیشتر است. کول و همکاران (Kwoll *et al.*, 2016) با بررسی ساختار و مقاومت در برابر جریان روی تلماسه‌ها نشان دادند که مقاومت در برابر جریان با کاهش شیب تلماسه کاهش می‌یابد؛ همچنین بر تلماسه‌های با شیب‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه تنش برشی به ترتیب ۸، ۳۳ و ۹۰ درصد کمتر است از بستر بدون شکل. قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2016) با بررسی توزیع سرعت و شدت آشفتگی در حضور تلماسه و پوشش گیاهی (ساقه برنج) در یک کانال مستطیلی روباز گزارش دادند که افزایش ارتفاع تاج تلماسه از ۴ به ۸ سانتی‌متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع ۴ سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال می‌دهد، و نیز اینکه با افزایش ارتفاع تاج تلماسه مقدار بیشینه تنش در فاصله دورتری از بستر اتفاق می‌افتد. داورپناه جزئی و همکاران (Davaranah-Jazi *et al.*, 2016) به بررسی اثر شکل‌های بستر شنی با تاج مسطح و

مختلف بستر اجرا شد. حذف می‌شوند ( $\theta=32^\circ$ ,  $\alpha=16.4^\circ$ ,  $\lambda/\Delta=5$ ). بنابراین پارامترهای بی‌بعد موثر بر بسترهای با شکل به قرار زیر است:

$$f\left(\frac{R}{\Delta}, S, Fr\right) = 0 \quad (3)$$

بدین ترتیب در بسترهای با شکل، مقادیر ضریب شزی کل ( $C_b$ ) و ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) تابعی از استغراق نسبی ( $\frac{R}{\Delta}$ )، عدد فرود جریان ( $Fr$ ) و شیب بستر ( $S$ ) هستند.

برای بسترهای بدون شکل نیز متغیرهای موثر در نظر گرفته شد و با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد استخراج گردید. پس از حذف پارامترهای ثابت، در نهایت پارامترهای بی‌بعد موثر بر بسترهای بدون شکل بستر به صورت زیر حاصل شدند:

$$f\left(\frac{R'}{d_{50}}, S, Fr\right) = 0 \quad (4)$$

بنابراین، در بسترهای بدون شکل بستر، مقادیر ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) تابعی از استغراق نسبی ( $\frac{R'}{d_{50}}$ )، عدد فرود جریان ( $Fr$ ) و شیب بستر ( $S$ ) است.

#### تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم مستقیم به طول ۱۲ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. این فلوم شیب‌پذیر است و دیوارهای شیشه‌ای دارد. در شکل ۱ (ب) پلان فلوم آزمایشگاهی به صورت شماتیک رسم شده است. دبی جریان با یک شیر فلکه تنظیم می‌شود که روی لوله

#### مواد و روش‌ها تحلیل ابعادی

متغیرهای مؤثر بر بستر با شکل به شرح زیر

است:

$$f(V, y, g, \rho_w, \mu, \rho_s, d_{50}, B, S, \lambda, \Delta, \alpha, \theta) = 0 \quad (1)$$

که در آن،

$V$  = سرعت متوسط جریان،  $y$  عمق متوسط جریان؛  
 $g$  = شتاب ثقل؛  $\rho_w$  = جرم مخصوص آب؛  $\mu$  = لزوجت  
 دینامیکی آب؛  $\rho_s$  = جرم مخصوص ذرات رسوب؛  
 $d_{50}$  = قطر متوسط ذرات رسوب؛  $B$  = عرض مجرا؛  
 $S$  = شیب بستر؛  $\lambda$  = طول شکل بستر؛  $\Delta$  = ارتفاع  
 شکل بستر؛  $\alpha$  = زاویه وجه بالادست شکل بستر  
 نسبت به افق؛  $\theta$  = زاویه وجه پایین دست شکل  
 بستر نسبت به افق.

با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد زیر استخراج گردید:

$$f\left(\frac{R}{\Delta}, \frac{\lambda}{\Delta}, \alpha, \theta, S, Fr, Re, G_s\right) = 0 \quad (2)$$

که در آن،

$R/\Delta$  = پارامتر استغراق نسبی؛  $\lambda/\Delta$  = نسبت طول به ارتفاع شکل بستر؛  $Fr$  = عدد فرود جریان؛  $Re$  = عدد رینولدز جریان و  $G_s$  = چگالی نسبی ذرات رسوب که برابر ۲/۶۵ است.

با توجه به متلاطم بودن جریان در تمام آزمایش‌ها، از پارامتر عدد رینولدز جریان صرف‌نظر می‌شود. در این تحقیق، مقادیر پارامترهای  $\lambda/\Delta$  و  $\alpha$  ثابت بودند از این رو این پارامترها نیز از رابطه فوق

ارتفاع حداکثر ۵ سانتی‌متر دارند. علاوه بر این، مقطع آنها مثلثی شکل با شیب ملایم طولانی در وجه بالادست و شیب تند کوتاه در وجه پایین دست است.

زاویه وجه پایین دست آنها تقریباً برابر با زاویه ایستایی ذرات رسوبی است (Simons & Richardson, 1966; Shafai Bajestan, 2008). از این رو در این تحقیق طول و ارتفاع هر شکل بستر به ترتیب برابر ۲۰ و ۴ سانتی‌متر و زاویه‌های وجه بالادست و پایین دست آن نسبت به افق به ترتیب برابر ۱۶/۴ و ۳۲ درجه انتخاب شد. پس از ساخت هر شکل بستر، رسوبات مورد نظر ( $d_{50}=0.51, 2.18$  mm) با چسب روی آنها چسبانده شد.

برای اجرای آزمایش‌های با شکل بستر، ۳۰ عدد شکل بستر ساخته شد که پشت سر هم و در طولی حدود ۶ متر در کف فلوم چسبانده شدند. فاصله کف پوشیده از شکل، از ابتدای فلوم برابر ۲ متر در نظر گرفته شد. در شکل ۱ (ج) نمای جانبی از بستر با شکل به صورت شماتیک رسم شده است.

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 برای آزمایش‌های با و بدون شکل بستر استفاده شد. در مجموع ۱۰۰ آزمایش اجرا شد.

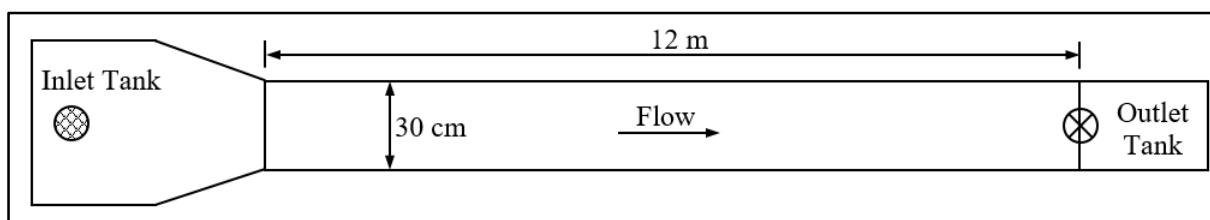
ورودی به فلوم نصب شده است. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی سنج اولتراسونیک (مدل Digi Sonic E+) استفاده شد. میزان دقت دستگاه به ازای سرعت‌های بزرگ‌تر و مساوی ۰/۵ متر بر ثانیه برابر  $\pm 1$  درصد میزان قرائت شده و برای سرعت‌های کوچک‌تر از ۰/۵ متر بر ثانیه معادل  $\pm 0.5$  سانتی‌متر بر ثانیه است. برای اندازه‌گیری عمق جریان، از یک عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد.

آزمایش‌های تحقیق حاضر به دو دسته بستر بدون شکل و بستر با شکل تقسیم شدند. در آزمایش‌های بدون شکل، از دو نوع دانه بندی یکنواخت رسوب با اندازه‌های متوسط ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر برای زیر کردن بستر استفاده شد. جنس رسوبات از ماسه و چگالی نسبی و انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) آنها به ترتیب برابر ۲/۶۵ و ۱/۲۵ بود. بستر فلوم به طول حدود ۶ متر با رسوبات گفته شده چسبانده شد. فاصله کف پوشیده از ذرات رسوبی از ابتدای فلوم برابر ۲ متر انتخاب شد.

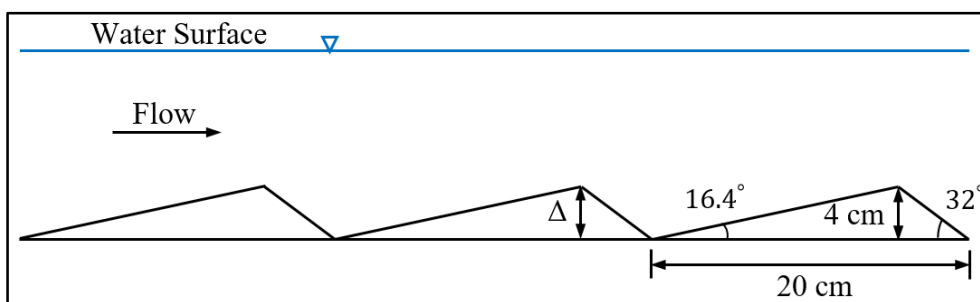
شکل‌های بستر شکنج و تلماسه دارای مقطعی مثلثی شکل با شیب ملایم طولانی در وجه بالادست و شیب تند کوتاه در وجه پایین دست هستند (Shafai Bajestan, 2008). بر این اساس، در این تحقیق هر شکل بستر به شکل مثلث و به صورت مصنوعی (با ورق P.V.C) ساخته شد. شکل‌های بستر شکنج طول موج کمتر از ۳۰ سانتی‌متر و



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- الف: تصویری از فلوم آزمایشگاهی، ب: پلان فلوم، ج: نمای جانبی از بستر با شکل

Fig. 1- Experimental setup a: photo of the experimental flume, b: plan view of the flume, b: side view of the bed form

### محاسبات

$$h_f = \left( y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) + \Delta Z \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $y_1$  و  $y_2$  به ترتیب عمق جریان در مقاطع ۱ و ۲،  $V_1$  و  $V_2$  به ترتیب سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۲ هستند.  $\Delta Z$  برابر اختلاف رقوم مقاطع ۱ و ۲ نسبت به سطح مبنا دلخواه است که با استفاده از رابطه  $\Delta Z = S L$  تعیین گردید ( $L$  فاصله مقاطع ۱ و ۲ از یکدیگر و  $S$  شیب بستر است). شیب خط انرژی  $(S_f)$ ، عدد رینولدز جریان  $(Re)$  و

برای پرداختن به محاسبات، دو مقطع ۱ و ۲ 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  $(y)$  در مقاطع ۱ و ۲ و میانگین‌گیری از آنها، مقادیر سطح مقطع جریان  $(A)$ ، محیط خیس شده  $(P)$ ، شعاع هیدرولیکی  $(R)$  و سرعت متوسط جریان  $(V)$  محاسبه شدند. افت انرژی بین مقاطع ۱ و ۲ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) برآورد شد (Dey, 2014):

$$\frac{1}{C_b^2} = \frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{C_b''^2} \quad (12)$$

### نتایج و بحث

در آبراهه‌های دارای شکل بستر، ضریب شزی کل شامل ضریب شزی مربوط به ذره و ضریب شزی مربوط به شکل بستر است. برای تعیین ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) که ناشی از اندازه ذرات رسوبی است، از بستر بدون شکل استفاده شد. در شکل ۲، روند تغییرات ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) برای آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است. محور عمودی شکل، ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) و محور افقی آن پارامتر بی‌بعد استغراق نسبی ( $R' / d_{50}$ ) را نشان می‌دهد.  $R'$  شعاع هیدرولیکی مربوط به ذره است که در بستر بدون شکل اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش استغراق نسبی، ضریب شزی افزایش پیدا کرده است. طبق رابطه ASCE، ( $\frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log(\frac{12R}{K_S})$ )، ضریب شزی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. علاوه بر این، شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش شیب بستر، ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) کاهش یافته است. محاسبات نشان داد که در بسترهای با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر، مقدار ضریب شزی در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۳، ۶، ۹ و ۱۱ درصد کمتر از ضریب شزی در شیب صفر است. علاوه بر این، در بسترهای با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر، مقدار ضریب شزی در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۳، ۶، ۸ و ۱۰ درصد کمتر از ضریب شزی در شیب صفر است.

ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ ( $f$ ) طبق روابط زیر محاسبه شدند.

$$S_f = \frac{h_f}{L} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{4VR}{v} \quad (7)$$

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

که در آنها،

$V$  = لزوجت سینماتیک آب؛ و  $g$  = شتاب ثقل است ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ).

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 (Farhoudi & Esmaeili Varaki, 2010):

$$f_w = 0.0026(\log(\frac{R_e}{f}))^2 - 0.0428 \log(\frac{R_e}{f}) + 0.1884 \quad (9)$$

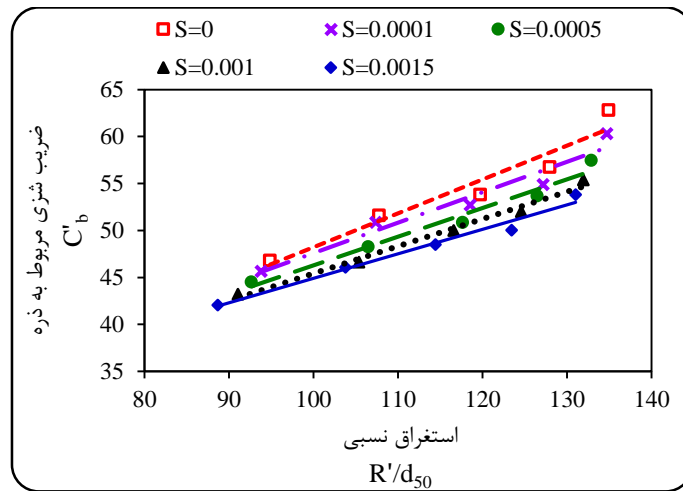
بنابراین، ضریب اصطکاک بستر ( $f_b$ ) و ضریب شزی بستر ( $C_b$ ) طبق روابط زیر محاسبه شدند.

$$f_b = f + \frac{2y}{B}(f - f_w) \quad (10)$$

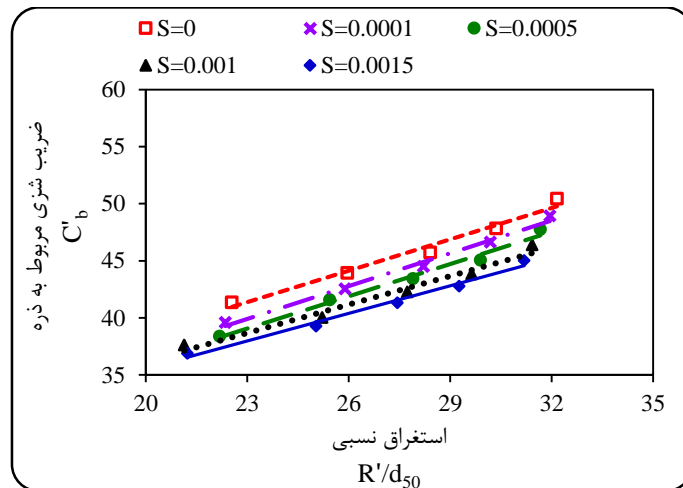
$$C_b = \sqrt{\frac{8g}{f_b}} \quad (11)$$

که در آن  $B$  = عرض فلوم.

برای آزمایش‌های بدون شکل بستر، طبق رابطه ۱۱ مقدار ضریب شزی مربوط به اندازه ذره ( $C_b'$ ) محاسبه شد. برای آزمایش‌های با شکل بستر نیز، طبق رابطه ۱۱ مقدار ضریب شزی کل ( $C_b$ ) محاسبه گردید. سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار ضریب شزی



الف) ۰/۵۱ میلی‌متر



ب) ۲/۱۸ میلی‌متر

شکل ۲- تغییرات ضریب شزی مربوط به ذره در برابر استغراق نسبی برای آزمایش‌های مختلف

Fig. 2- Variation of grain Chezy coefficient against relative submergence for various experiments

ضریب شزی کل ( $C_b$ ) در برابر عدد فرود جریان را برای بسترهای با اندازه ذرات مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان ضریب شزی کل افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ضریب شزی کل با ازدیاد شیب بستر همانند ضریب شزی مربوط به ذره دچار کاهش شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که روند تغییرات ضریب شزی در برابر شیب بستر برای بسترهای با و بدون شکل یکسان است. یانگ (Yang, 1996) می‌گوید روند تغییرات ضریب‌های زبری مانینگ و دارسی ویسباخ در برابر شیب بستر، در بسترهای پوشیده از

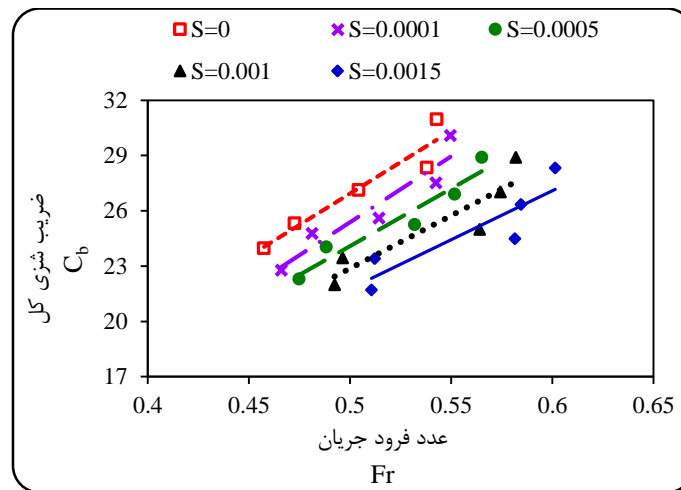
برای تعیین ضریب شزی کل ( $C_b$ ) و ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ )، از بستر با فرم استفاده شد. شکل‌های بستر شکنج و تلماسه در رژیم جریان پایینی، که در آن عدد فرود جریان کوچک‌تر از ۱ است، تشکیل می‌شوند (Shafai Bajestan, 2008; Julien, 2010). در این تحقیق مقادیر عدد فرود جریان در تمام آزمایش‌های مربوط به بستر با فرم در محدوده ۰/۴۳۵ تا ۰/۶ قرار داشت که نشان دهنده رژیم جریان پایین است.

ضریب شزی کل ( $C_b$ ) ناشی از اندازه ذرات رسوبی و اندازه شکل بستر است. شکل ۳ تغییرات

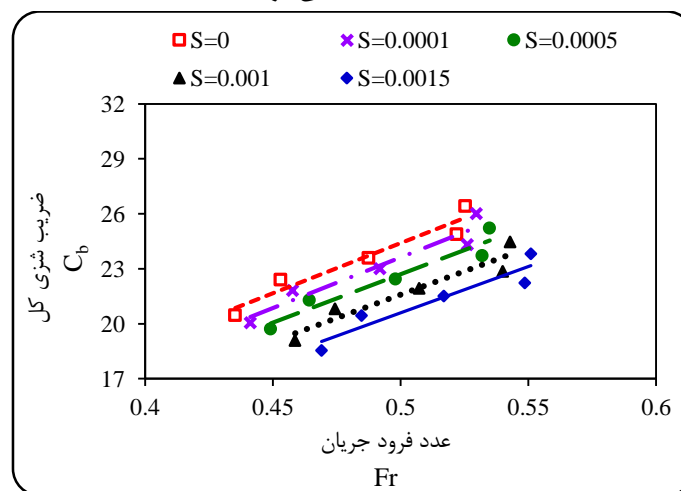


ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر، مقدار  $C_b$  در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۴، ۶، ۷ و ۸ درصد کمتر از مقدار  $C_b$  در شیب صفر است. علاوه بر این، در شیب‌های با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر، مقدار  $C_b$  در شیب‌های ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۲، ۵، ۷ و ۹/۵ درصد کمتر از مقدار  $C_b$  در شیب صفر است.

شکنج برعکس بسترهای پوشیده از تلماسه است، به‌گونه‌ای که در یک بستر پوشیده از شکنج با عمق جریان کم، ضرایب زبری مانینگ و دارسی ویسباخ با افزایش شیب افزایش پیدا می‌کنند ولی در یک بستر پوشیده از تلماسه با عمق جریان کم، با افزایش شیب عموماً کاهش می‌یابند. ضریب شزی با ضرایب مانینگ و دارسی ویسباخ رابطه عکس دارند. در تحقیق حاضر محاسبات نشان داد که در بسترهای با



الف) ۰/۵۱ میلی‌متر



ب) ۲/۱۸ میلی‌متر

شکل ۳- تغییرات ضریب شزی کل در برابر عدد فرود جریان برای آزمایش‌های مختلف

Fig. 3- Variation of total Chezy coefficient against Froude number for various experiments

گرفت که عدد فرود جریان و ضریب شزی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند.

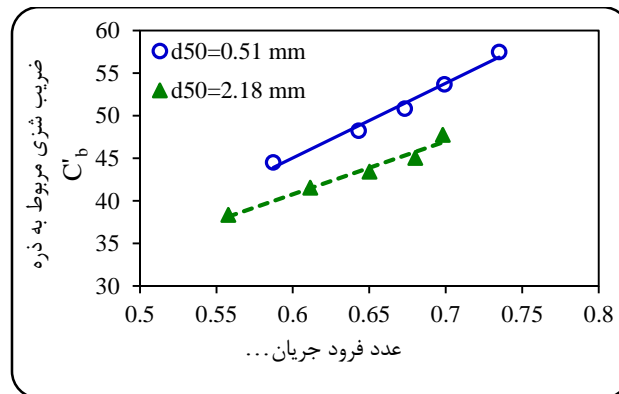
شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب روند تغییرات ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) و کل ( $C_b$ ) را در برابر استغراق نسبی ( $R/\Delta$ ) برای ذرات مختلف رسوبی (به ازای شیب ۰/۰۰۰۵) نشان می‌دهند. با دقیق شدن در شکل‌ها دیده می‌شود که با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات بستر،  $C_b''$  و  $C_b$  نیز همانند  $C_b'$  دچار کاهش شده‌اند. ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) تابعی از اندازه شکل‌های بستر است و در اثر اختلاف فشار بین جلو و عقب شکل بستر به وجود می‌آید (Shafai Bajestan, 2008). در این تحقیق، اندازه شکل‌های بستر ثابت بودند اما همان گونه که شکل ۵ نشان می‌دهد بزرگ‌تر شدن اندازه رسوبات تشکیل‌دهنده شکل بستر منجر به کاهش ضریب شزی شده است که دلیل آن اثر اندازه ذرات رسوبی بر ابعاد ناحیه جداشدگی پس از تاج شکل بستر و تلاطم پس از شکل بستر است. با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات رسوبی، ناحیه جداشدگی پس از تاج شکل بستر و همچنین تلاطم پس از آن افزایش می‌یابد که منجر به ازدیاد افت جریان و افزایش ضرایب مقاومت جریان (ضرایب مانینگ و دارسی ویسباخ) می‌گردد. ضریب شزی، از آنجا که با ضریب‌های مقاومت جریان رابطه عکس دارد، لذا کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در آبراهه‌های دارای شکل بستر نیز همانند بسترهای بدون فرم، هر چه اندازه ذرات رسوبی تشکیل دهنده شکل بستر بزرگ‌تر شود ضریب شزی کمتر می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد که مقدار  $C_b''$  در بسترهای رسوبی با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر به ازای شیب‌های صفر، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۱۴، ۱۲، ۱۲، ۱۵ و ۱۶/۴ درصد

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶، به بررسی اثر اندازه ذرات رسوبی بر ضریب شزی کل ( $C_b$ )، ذره ( $C_b'$ ) و شکل بستر ( $C_b''$ ) پرداخته شده است. مقادیر  $C_b'$  مربوط به بسترهای بدون شکل و مقادیر  $C_b$  و  $C_b''$  مربوط به بسترهای با شکل است. برای محاسبه مقادیر ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) از رابطه ۱۲ استفاده شد. شکل ۴ روند تغییرات ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) را در برابر عدد فرود جریان (به ازای شیب ۰/۰۰۰۵) نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات بستر ضریب شزی کاهش می‌یابد. بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات بستر باعث کاهش استغراق نسبی ( $\frac{R}{K_S}$ ) می‌شود. بنابراین طبق رابطه ASCE،  $(\frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log(\frac{12R}{K_S}))$ ، ضریب شزی مربوط به ذره کاهش می‌یابد (Mahmoodian Shooshtari, 2006). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات ضریب شزی در برابر اندازه ذرات رسوبی عکس ضرایب زبری مانینگ و دارسی ویسباخ است. محاسبات نشان می‌دهد مقدار ضریب شزی در بسترهای با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر به ازای شیب‌های صفر، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۱۸، ۱۹، ۱۸، ۱۸ و ۱۷ درصد بیشتر است از بسترهای رسوبی با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر.

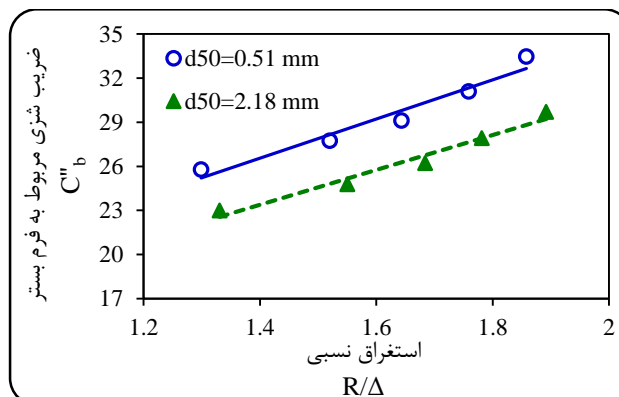
شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود جریان، ضریب شزی ( $C_b'$ ) افزایش یافته است. عدد فرود جریان طبق رابطه  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ ، که در آن  $V$  سرعت متوسط جریان و  $y$  عمق جریان است، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم و با عمق جریان رابطه عکس دارد. از طرفی، ضریب شزی نیز بر اساس رابطه شزی ( $V = C\sqrt{RS}$ )، با سرعت متوسط جریان رابطه مستقیم و با شعاع هیدرولیکی جریان رابطه عکس دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه

مطالعه آزمایشگاهی ضریب شزی در آبراهه‌های با شکل...

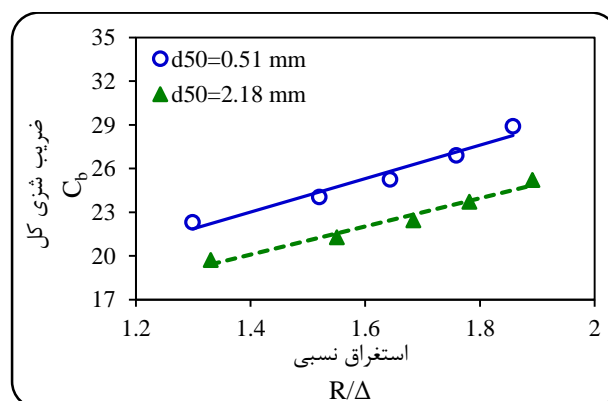
بیش از مقدار  $C_b''$  در بسترهای رسوبی با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر است. علاوه بر این، مقدار  $C_b$  در بسترهای رسوبی با ذرات ۰/۵۱ میلی‌متر به ازای شیب‌های صفر، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱۵ به‌طور متوسط به ترتیب ۱۵، ۱۳، ۱۳ و ۱۶ درصد بیش از بسترهای رسوبی با ذرات ۲/۱۸ میلی‌متر است.



شکل ۴- تغییرات ضریب شزی مربوط به ذره در برابر عدد فرود جریان برای شیب ۰/۰۰۰۵  
Fig. 4- Variation of grain Chezy coefficient against Froude number for slope of 0.0005



شکل ۵- تغییرات ضریب شزی مربوط به شکل بستر در برابر استغراق نسبی برای شیب ۰/۰۰۰۵  
Fig. 5- Variation of form Chezy coefficient against relative submergence for slope of 0.0005



شکل ۶- تغییرات ضریب شزی کل در برابر استغراق نسبی برای شیب ۰/۰۰۰۵  
Fig. 6- Variation of total Chezy coefficient against relative submergence for slope of 0.0005

ذرات رسوبی و اندازه شکل بستر است در حالی که ضریب شزی مربوط به شکل بستر فقط تابع اندازه شکل است (Shafai Bajestan, 2008). بنابراین، میزان زبری نسبی و عامل ایجاد مقاومت و افت جریان برای ضریب شزی کل بیشتر است از ضریب شزی مربوط به شکل بستر. از این رو مقدار ضریب شزی کل ( $C_b$ ) کمتر از مقدار ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) است. محاسبات نشان می‌دهد ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۹۸ و ۹۳ درصد بیش از ضریب شزی کل ( $C_b$ ) و ۷۱ و ۶۵ درصد بیشتر از ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) است. علاوه بر این، ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۶ و ۱۷ درصد بیش از ضریب شزی کل ( $C_b$ ) است.

شکل ۲ و رابطه ASCE نشان دادند که رابطه ضریب شزی و  $\frac{R}{K_S}$  مستقیم است. شکل‌های ۵ و ۶ نیز نشان می‌دهند که رابطه ضریب شزی و  $R/\Delta$  در آبراهه‌های پوشیده از شکل بستر مستقیم است یعنی با افزایش استغراق نسبی ( $R/\Delta$ )  $C_b$  و  $C_b''$  نیز افزایش می‌یابند.

در جدول ۱ مقادیر ضریب شزی کل ( $C_b$ )، ذره ( $C_b'$ ) و شکل بستر ( $C_b''$ ) برای آزمایش‌های مختلف ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که  $C_b$  و  $C_b'$  به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار هستند. بسترهای بدون شکل نسبت به بسترهای دارای شکل، زبری نسبی کمتری دارند و از این رو مقدار ضریب شزی در آنها ( $C_b'$ ) بیشتر است. در بسترهای دارای شکل، دو نوع ضریب شزی وجود دارد. یکی ضریب شزی کل ( $C_b$ ) و دیگری ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ). ضریب شزی کل ناشی از اندازه

جدول ۱- مقادیر ضریب شزی برای تمام آزمایش‌ها

Table 1- Chezy coefficient for all experiments

Q (lit/s)	S	d <sub>50</sub> =0.51 mm			d <sub>50</sub> =2.18 mm		
		C <sub>b</sub>	C <sub>b</sub> '	C <sub>b</sub> ''	C <sub>b</sub>	C <sub>b</sub> '	C <sub>b</sub> ''
10	0	23.964	46.782	27.903	20.468	41.344	23.557
15	0	25.332	51.616	29.074	22.409	43.934	26.054
20	0	27.122	53.824	31.400	23.590	45.726	27.538
25	0	28.338	56.740	32.709	24.885	47.820	29.142
30	0	30.973	62.816	35.602	26.429	50.415	31.035
10	0.0001	22.779	45.640	26.287	20.055	39.588	23.261
15	0.0001	24.786	50.858	28.385	21.816	42.535	25.414
20	0.0001	25.606	52.704	29.295	23.005	44.486	26.879
25	0.0001	27.521	54.877	31.810	24.311	46.639	28.488
30	0.0001	30.094	60.320	34.724	26.009	48.916	30.709
10	0.0005	22.307	44.511	25.778	19.722	38.377	22.990
15	0.0005	24.045	48.258	27.733	21.281	41.560	24.775
20	0.0005	25.262	50.836	29.111	22.442	43.424	26.214
25	0.0005	26.902	53.672	31.089	23.723	45.054	27.904
30	0.0005	28.910	57.466	33.451	25.217	47.736	29.700
10	0.001	21.988	43.230	25.539	19.092	37.609	22.159
15	0.001	23.452	46.635	27.132	20.816	40.018	24.373
20	0.001	24.997	49.998	28.864	21.934	42.277	25.657
25	0.001	27.034	52.011	31.645	22.852	43.835	26.778
30	0.001	28.900	55.379	33.878	24.459	46.390	28.784
10	0.0015	21.707	42.062	25.342	18.544	36.880	21.453
15	0.0015	23.412	46.066	27.184	20.445	39.284	23.943
20	0.0015	24.492	48.491	28.378	21.516	41.317	25.203
25	0.0015	26.347	50.043	30.990	22.232	42.767	26.026
30	0.0015	28.337	53.819	33.331	23.821	45.018	28.073

## نتیجه‌گیری

۱۲/۹ درصد گردید. بررسی‌ها همچنین نشان داد که در بسترهای دارای فرم، افزایش استغراق نسبی ( $R/\Delta$ ) منجر به ازدیاد  $C_b$  و  $C_b''$  می‌شود، به طوری که برای اندازه رسوب ۰/۵۱ میلی‌متر و به ازای شیب ۰/۰۰۱، با تغییر استغراق نسبی از ۱/۳ به ۱/۸۷۵ ضرایب فوق به ترتیب ۳۲/۱ و ۳۲/۱۶ درصد افزایش یافته‌اند. مقایسه مقادیر ضریب شزی همچنین نشان داد که در هر آزمایش  $C_b$  و  $C_b'$  به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار هستند. ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) برای ذرات با اندازه‌های ۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر به طور متوسط به ترتیب ۹۸ و ۹۳ درصد بیش از ضریب شزی کل ( $C_b$ ) و به طور متوسط به ترتیب ۷۱ و ۶۵ درصد بیش از ضریب شزی مربوط به شکل بستر ( $C_b''$ ) محاسبه شده است. به طور کلی نتایج بررسی‌ها حاکی از اهمیت برآورد دقیق ضریب شزی کل برای طراحی کانال‌های آبیاری با بستر ماسه‌ای است.

این تحقیق با هدف بررسی تاثیر اندازه ذرات تشکیل دهنده شکل بستر بر مقاومت جریان (ضریب شزی) به صورت آزمایشگاهی و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف، شیب‌های بستر متفاوت و دو اندازه رسوبی (۰/۵۱ و ۲/۱۸ میلی‌متر) اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضریب شزی مربوط به ذره ( $C_b'$ ) و ضریب شزی کل ( $C_b$ )، با افزایش شیب بستر کاهش می‌یابد به طوری که این مقادیر برای اندازه رسوب ۰/۵۱ میلی‌متر، با تغییر شیب از صفر به ۰/۰۱۵ به ترتیب ۱۱/۳۷ و ۸/۴۴ درصد کاهش می‌یابند. میزان درصد کاهش به اندازه ذرات رسوب نیز بستگی دارد به طوری که مقادیر فوق برای اندازه رسوب ۲/۱۸ میلی‌متر به ترتیب ۱۰/۴۵ و ۹/۵ درصد است. این نتایج نشان داد که افزایش اندازه ذرات رسوب از ۰/۵۱ به ۲/۱۸ میلی‌متر باعث کاهش ضرایب  $C_b$  و  $C_b''$ ،  $C_b'$  به میزان ۱۲، ۱۵/۱۴ و

## قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم به انجام رسیده است. بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود (SCU.WH98.31373).

## مراجع

- Bahrami Yarahmadi, M. & Shafai Bejestan, M. (2010). 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. & 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)
- Chegin, 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)
- Farhoudi, J., & Esmaili Varaki, M. (2010). *Erosion and Sedimentation*. University of Tehran Press, 317P. (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)
- 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.
- Karbasi, M. (2005). Investigation of the effect of bed load movement on hydraulic resistance of flow in the presence of bed forms (M. Sc. Thesis), Faculty of Agriculture, University of Tehran. (In Persian)
- 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.
- Mahmoodian Shooshtari, M. (2006). *Principles of flow in open Channel*. First volume, Shahid Chamran University of Ahvaz Press, 513P. (In Persian)
- 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.
- 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)
- Simons, D.B. & Richardson, E.V. (1966). Resistance to flow in alluvial channels. Geological survey Professional paper, 422-J.
- 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)
- Talebeydokhti, 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 Chezy Coefficient in Open Channels with Bed Forms

M. Heydari, 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: 3 August 2021, Accepted: 1 December 2021

### Extended Abstract

#### Introduction

Accurate estimation of flow resistance, such as Chezy coefficient, is important for calculating the hydraulic flow conditions and sediment transport in open channels. Chezy coefficient is affected by various factors: bed particles size, vegetation, irregularity of waterway cross-section, irregularity of waterway path, scour and sedimentation, presence of obstructions, suspended and bed load, and bed form (Bahrami Yarahmadi & Shafai Bejestan, 2010, 2011). Previous researches, Talebbeydokhti *et al.* (2006), Omid *et al.* (2010), Nasiri Dehsorkhi *et al.* (2011), Chegini & Pender (2012), Kabiri *et al.* (2014), and Kwooll *et al.* (2016), have shown that the bed forms can affect the hydraulic or sediment transport characteristics. However, there is a lack of study to investigate the effect of bed forms with different sediment sizes on the Chezy coefficient. Therefore, the present study aims to conduct experiments on a straight channel whose bed is covered with the artificial bed forms made from P.V.C sheet, and on its surface is glued sediment of different sizes in the range of 0.51 and 2.18 mm.

#### 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, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 were tested. Two series of experiments were carried out: plane bed or bed without form and bed covered with form. Each form was made in a triangular shape with a P.V.C sheet. The form's 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 each form was built, the desired sediment size was glued to their surface. This study used two types of uniform granulation with average sizes ( $d_{50}$ ) of 0.51 and 2.18 mm. The total number of experiments in the present study was 100. Since in alluvial rivers with bed form, the resistance Chezy coefficient includes the grain Chezy coefficient and the form Chezy coefficient. A formless bed, covered with the same sediment size, was tested to determine the grain Chezy coefficient ( $\check{C}_b$ ). The bed with the form was used to determine the total Chezy coefficient ( $C_b$ ) and the form Chezy coefficient ( $C_b''$ ). Ripple and dune form is formed in a lower flow regime, in which the Froude number of the flow is less than 1 (Shafai Bajestan, 2008). In this study, the Froude number values in all tests with bed form were 0.435 to 0.6, indicating a lower flow regime.

#### Results and discussion

Figure 2 show the variation of the grain Chezy coefficient ( $\check{C}_b$ ) against relative submergence ( $R'/d_{50}$ ) for various tests. This figure shows that, with increasing relative submergence,  $\check{C}_b$  increased.

Figure 3 shows the changes in the total Chezy coefficient ( $C_b$ ) against Froude number for sediment-covered substrates of 0.51 and 2.18 mm. It can be seen that as the Froude number increased, the total Chezy coefficient ( $C_b$ ) increased. In addition, increasing the longitudinal slope of the bed decreased  $C_b$ .

Figures 4, 5 and 6 illustrate the effect of sediment particles size on  $\acute{C}_b$ ,  $C_b''$ , and  $C_b$ . These figures show that  $\acute{C}_b$ ,  $C_b''$ , and  $C_b$  decreased with increasing particles size. In addition, Figures 5 and 6 show that with increasing  $R/\Delta$ , the total Chezy coefficient ( $C_b$ ) and the form Chezy coefficient ( $C_b''$ ) increased. Calculations showed that the value of  $C_b''$  in beds with a sediment size of 0.51 mm for slopes of 0, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 was, on average, 14, 12, 12, 15, and 16.4% more than 2.18 mm sedimentary beds, respectively. In addition, the value of  $C_b$  in beds with a sediment size of 0.51 mm for slopes of 0, 0.0001, 0.0005, 0.001, and 0.0015 was, on average, 15, 13, 13, 16, and 16.5% more than 2.18 mm sedimentary beds, respectively.

The results of Table 1 shows that the grain Chezy coefficient ( $\acute{C}_b$ ) for particles with sizes of 0.51 and 2.18 mm was, on average, 98 and 93% more than the total Chezy coefficient ( $C_b$ ), respectively. In addition, The form Chezy coefficient ( $C_b''$ ) for particles with sizes of 0.51 and 2.18 mm was, on average, 16 and 17% more than the total Chezy coefficient ( $C_b$ ), respectively.

### Conclusions

The results of this study shows that generally with increasing the bed slope and the bed particle size of movable bed sediment channel, the flow resistance increases or the total Chezy coefficient ( $C_b$ ), the form Chezy coefficient ( $C_b''$ ) and the grain Chezy coefficient ( $\acute{C}_b$ ) decreases. Increasing the bed particle size from 0.51 to 2.18 mm reduced the coefficients of  $\acute{C}_b$ ,  $C_b''$ , and  $C_b$  by 15.14, 12, and 12.9%, respectively. Moreover, the value of  $\acute{C}_b$ ,  $C_b''$ , and  $C_b$  in sedimentary beds with particles of 0.51 mm were, on average, 18, 14 and 15% more than sedimentary beds with particles of 2.18 mm, respectively.

Analysis of data have also show that in movable bed channel with bed form, the increase in relative submergence ( $R/\Delta$ ) leads to an increase in  $C_b''$  and  $C_b$ . So that for the sediment size of 0.51 mm and bed slope of 0.0001, with the change of relative submergence from 1.3 to 1.875, the above coefficients increased by 32.1 and 32.16%, respectively.

The grain Chezy coefficient ( $\acute{C}_b$ ) for particles with sizes of 0.51 and 2.18 mm was found, on average, 98 and 93% more than the total Chezy coefficient ( $C_b$ ), respectively, and was 71 and 65% more than the form Chezy coefficient ( $C_b''$ ), respectively.

**Keywords:** Bed form, Chezy coefficient, Dune, Resistance to flow, Ripple.