

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی آزمایشگاهی اثر شکل بستر شکنج در دو حالت موازی و پولکی بر ضریب زبری مانینگ

حسین صمدی بروجنی^{1*}، پری ملکی²، روح‌اله فتاحی نافچی³، محمدجواد کتابداری⁴

1- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد

3- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

4- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*شهرکرد، صندوق پستی 115

Samadi153@yahoo.com

چکیده - تخمین مقاومت در برابر جریان در برنامه‌ییزی، طراحی و بهره‌برداری پروژه‌های منابع آب شامل انتقال آب و بطور خاص سیستم‌های رودخانه‌ای نقش مهمی ایفا می‌کند. شکل‌های مختلف بستر همچون شکنج اثرات بارزی بر کل زبری دارند. در این مقاله به منظور بررسی تأثیر دو نوع شکل بستر شکنج بر ضریب مانینگ آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. روابطی براساس ویژگی‌های هندسی شکنج و شرایط جریان به کمک نرم‌افزار SPSS استخراج شد. همچنین مشاهده شد که زبری شکل بستر شکنج در حالت موازی قریب 47% و در حالت پولکی حدود 43% از زبری کل را تشکیل می‌دهد؛ لذا در مطالعات مهندسی رودخانه نمی‌توان از اثر شکل بستر صرف‌نظر کرد. همچنین نتایج نشان داد ضریب مانینگ در دو شکل مختلف موازی و پولکی شکنج‌ها، اختلاف معنی‌دار داشته و ضریب زبری مانینگ در شکل موازی نسبت به پولکی 12/3 درصد بیشتر بود.

کلیدواژگان: شکل بستر، شکنج، ضریب مانینگ، مقاومت جریان، مهندسی رودخانه.

1- مقدمه

از مسائل مهم بنیادی در مهندسی رودخانه داشتن دانش کافی در مورد مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های آبرفتی است. برای محاسبه دبی، سرعت و عمق جریان در کانال‌های طبیعی و نیز برآورد سیل و رسوب ارزیابی مقاومت جریان مهم و ضروری است. برای تعیین مقاومت جریان در مجاری روباز از روابط مانینگ، شزی و داریسی -

ویسباخ استفاده می‌شود که در این روابط پارامترهایی مانند ضریب زبری مانینگ، ضریب زبری شزی و ضریب زبری داریسی - ویسباخ وجود دارد. هر سه این ضرایب به نوعی ضریب مقاومت جریان هستند که در معادلات حاکم بر جریان در رودخانه‌ها کاربرد فراوانی دارند. در حقیقت تخمین درست این ضرایب می‌تواند به برآورد دقیق‌تر شرایط جریان کمک کند (بهرامی‌یاراحمدی و شفافی

بیجستان، 1390).

مقارن یا نامتقارن گسترش می‌یابد. شکل 2 الگوی شکل - گیری شکنج ها را نشان می‌دهد (Chien and Wan, 1999).

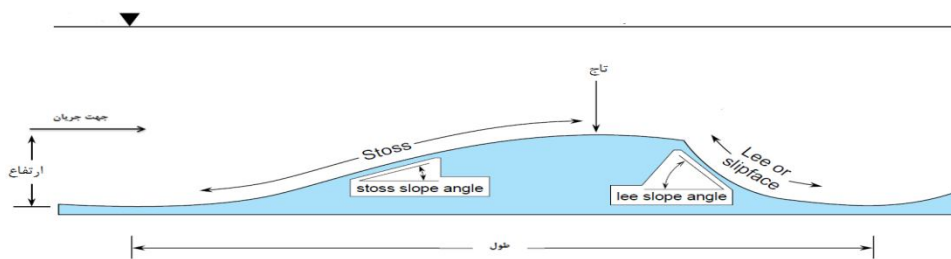
بس در سال 1993 (به نقل از (Joep et al (1999)، رابطه‌ای تجربی بین متوسط اندازه ذره (D_{50}) و طول شکنج تعیین نمود که به صورت رابطه (1) می‌باشد:

$$L = 75.5 \log(D_{50}) + 197 \quad (1)$$

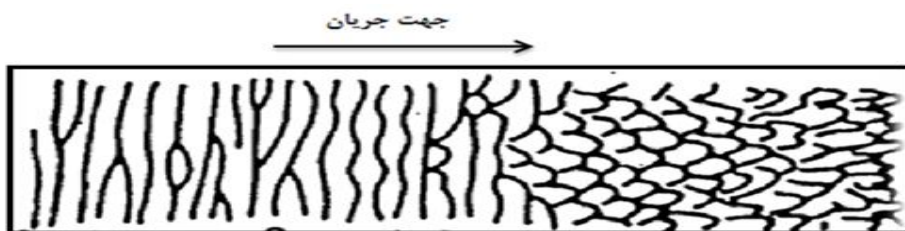
که در آن D_{50} متوسط اندازه ذره بر حسب میلی‌متر و L طول ریپل بر حسب میلی‌متر است (Joep et al., 1999).

شکنج‌ها در رسوب‌های با اندازه کوچکتر از 0/7 میلی‌متر و بزرگتر از 0/15 میلی‌متر شکل می‌گیرند. این نوع شکل بستر در رسوب‌های درشت‌تر از 0/7 میلی‌متر تشکیل نمی‌شود، چرا که شرط لازم برای شکل‌گیری شکنج‌ها این است که جریان از نظر هیدرولیکی صاف است ($R_e^* = \frac{u_* D}{\nu} < 10$) باشد. R_e^* رینولدز برشی، U^* سرعت برشی، D قطر متوسط ذرات و ν لزجت سینماتیک آب است.

تراز سطح آب، مخصوصاً در هنگام سیل از پارامترهای مهم در تعیین سیل دشت رودخانه‌ها و طراحی سازه‌های کنترل سیل، سدهای انحرافی، نیروگاه‌های برقایی، پل‌ها و غیره می‌باشد. این پارامتر (تراز سطح آب) ارتباط نزدیکی با مقاومت شکل‌های بستر رسوبی فرسایش‌پذیر در برابر جریان آب دارد. اثر متقابل بین جریان آب و بستر فرسایش‌پذیر که همراه با پدیده انتقال رسوب است، باعث ایجاد انواع شکل‌های بستر می‌شود. ابتدا در یک تنش برشی مشخص، شکل بستر شکنج یا پشته کوچک بر روی بستر تشکیل می‌شود و سپس با افزایش تنش برشی و سرعت، به ترتیب شکل بسترهای تلماسه، پاد تلماسه - های شسته شونده، بستر هموار، موج‌های ایستاده، پاد تلماسه و شوت و استخر بر روی بستر شکل می‌گیرند (شفاعی بیجستان، 1387). شکل 1 نمای شماتیکی از شکل بستر شکنج را نشان می‌دهد. به تدریج با گذشت زمان و افزایش سرعت، شکل پلان شکنج‌ها از خطوط موازی به منحنی و سپس به الگویی مانند پولک‌های ماهی، بصورت



شکل 1 نمای شماتیکی از شکنج و مشخصات آن



شکل 2 الگوی توسعه شکل شکنج (Chien and Wan, 1999)

شکنج‌ها طول موجی کمتر از 30 سانتی‌متر و ارتفاعی تقریباً کمتر از 3 سانتی‌متر دارند و در سرعت‌های بسیار کمتر از سرعت متوسط جریان به سمت پایین‌دست مهاجرت می‌کنند و به صورت چشمگیری با افزایش در انتقال رسوب، ارتفاع، طول موج و سرعت مهاجرت آن‌ها افزایش می‌یابد (Carling, 1999).

این شکل‌های بستر مقاومتی اضافه در برابر جریان آب تولید می‌کنند که به آن مقاومت شکل بستر می‌گویند. بنابراین مقاومت کل از دو بخش تشکیل شده است که عبارتند از: مقاومت ذره که ناشی از اندازه ذره رسوبات است و زبری شکل که ناشی از شکل‌های بستر است. زبری شکل تابعی از ابعاد هندسی شکل بستر و عمق آب است. بنابراین در کارهای آبی پیش‌بینی دقیق ابعاد شکل بستر ضروری می‌باشد. همچنین با پیش‌بینی دقیق ابعاد شکل بستر می‌توان از بروز مشکلات احتمالی کشتیرانی در رودخانه‌ها و یا کارهای انحراف آب جلوگیری کرد. محققان زیادی از روش‌های مختلفی استفاده کرده‌اند تا ابعاد شکل بستر را محاسبه کنند، اما نتایج آنها تفاوت زیادی با یکدیگر و با مشاهدات طبیعی دارند. تفاوت شرایط آزمایشگاه و طبیعت، عدم وجود یک روش قابل اعتماد برای تخمین ابعاد شکل بستر، کمبود اطلاعات درباره تلاطم در برخورد جریان آب به بستر و تعدد پارامترهای مؤثر در پدیده انتقال رسوب از علل اصلی تفاوت در نتایج می‌باشند. بنابراین پیچیدگی این پدیده، نیاز به تحقیقات بیشتر را نشان می‌دهد.

مفهوم مقاومت جریان به صورت علمی‌تر در سال 1965 توسط راس مورد بررسی قرار گرفت. دانشمندان دیگری نظیر شزی، گانگالیه، کاتر و مانینگ تحقیقات گسترده‌ای را در رابطه با مقاومت هیدرولیکی در برابر جریان انجام دادند (Yen, 2002). با توجه به اینکه بیشتر جریان‌ها در آبراه‌های روباز متلاطم هستند، مناسبترین فرمول برای استفاده عملی، فرمول مانینگ است، زیرا فرمول مانینگ

ساده بوده و بوسیله تجربیات زیادی تأیید شده است. ولی باید به این نکته توجه داشت که این فرمول محدودیت‌هایی نیز دارد. زیرا در شرایطی که عدد رینولدز غالب است، قادر به ارائه دقیق مقاومت نخواهد بود. با توجه به اینکه این فرمول برای جریان کاملاً زبر مناسب است و تعداد زیادی از جریان‌های آبراهه‌های روباز در حد متلاطم زبر می‌باشند، مناسبترین فرمول برای استفاده عملی فرمول مانینگ است.

مطالعات زیادی در رابطه با اثر قطر ذرات بستر بر ضریب مانینگ انجام شده و روابط زیادی استخراج شده است. استریکلر (1923) رابطه تغییرات ضریب مانینگ با اندازه دانه‌های رسوب را به صورت رابطه (2) تعریف کرد (شفاعی بجستان، 1387):

$$n = \frac{D_{50}^{(1/6)}}{21.1} \quad (2)$$

که در آن D_{50} قطر متوسط ذرات رسوب بر حسب متر است.

باید توجه داشت که معادله فوق از تحقیق در یک فلوم کوچک آزمایشگاهی با ماسه یکنواخت بدست آمده که به سادگی قابل تعمیم به رودخانه‌های طبیعی با مصالح بستر غیر یکنواخت نخواهد بود.

میر-پیتر و مولر (1948) با در نظر گرفتن مخلوطی از ماسه درشت، فرمول استریکلر را به صورت رابطه (3) تغییر دادند:

$$n = \frac{D_{90}^{(1/6)}}{26} \quad (3)$$

که در آن D_{90} قطر ذراتی است که 90 درصد مخلوط از آن کوچکترند و بر حسب اینچ است (شفاعی بجستان، 1387).

مقاومت ذره قسمتی از مقاومت جریان است که در اثر نیروی رانش سطحی به وجود می‌آید، در حالی که مقاومت شکل در اثر اختلاف فشار بین سطح جلو و سطح انتهایی شکل بستر به وجود می‌آید. این مقاومت

صرفاً به دلیل تشکیل شکل بستر و ایجاد جداشدگی خطوط جریان به وجود می‌آید. در نتیجه در رودخانه‌های آبرفتی مقدار شعاع هیدرولیکی وزبری مانینگ را می‌توان به صورت روابط (4) و (5) نوشت (Yen, 2002):

$$R=R'+R'' \quad (4)$$

$$n=n'+n'' \quad (5)$$

که در آن R' و n' عبارتند از شعاع هیدرولیکی و زبری مانینگ ناشی از زبری ذره و R'' و n'' عبارتند از شعاع هیدرولیکی و زبری مانینگ ناشی از شکل بستر.

(Talebeydokhti et al., 2006) با بررسی ساختار جریان بر روی تلماسه‌ها عنوان کردند که تأثیر مقاومت بستر بر مقاومت کل ناچیز نخواهد بود. آنها اظهار کردند که این مقاومت حدود 25 تا 55 درصد از کل زبری را شامل می‌شود.

اثر حرکت بار بستر بر مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان در آبراهه‌های با کف شکل‌دار، توسط کرباسی (1384) مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات وی در یک کانال آزمایشگاهی شیب پذیر به عرض 0/25 متر، طول 12 متر و کف ساخته شده از شکل‌های مصنوعی در دو حالت صاف و زبر انجام گرفت. وی از دو نوع رسوب شامل ماسه ریز یکنواخت به قطر 0/5 میلی‌متر و شن ریز به قطر 2/84 میلی‌متر استفاده کرد. نتایج آزمایشگاهی وی نشان داد که حرکت بار بستر با ذرات ریز دانه به قطر 0/5 میلی‌متر می‌تواند موجب کاهش 22 و 24 درصدی مقاومت هیدرولیکی به ترتیب در کانال‌های صاف و زبر شود. میزان کاهش زبری با افزایش قطر افزایش می‌یابد. در توجیه این کاهش می‌توان گفت که ورود ذرات به ناحیه چرخشی بین شکل‌های بستر باعث شکسته شدن گردابه‌ها و احتمالاً کاهش سرعت منفی در بین شکل‌های بستر می‌شود که نتیجه آن کاهش مقاومت در مقابل جریان است.

در مورد اثر شکل بستر تلماسه بر خصوصیات هیدرولیکی

جریان تاکنون کارهای زیادی انجام شده است. محققانی همچون آلن، فردسو، رودکیوی، رانجارانو، سونی تحقیقات زیادی را بر روی هندسه تلماسه و توابع توزیع سرعت براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام داده‌اند. هارمز و همکاران (1982)، از طریق نمودار ارتباط بین سرعت و اندازه ذرات نشان دادند که در اندازه ذره 0/5 میلی‌متر، شکل‌گیری ریپل فقط در سرعت بالاتر از حدود 0/2 متر بر ثانیه آغاز می‌شود و در زیر این سرعت هیچ ذره‌ای تکان نمی‌خورد (به نقل از عطار، 1387).

در رابطه با اثر شیب بر ضریب زبری مانینگ در سال 2003 هسل و جتن و گوانفو آزمایش‌هایی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در شیب‌های تند انجام دادند. آنها مشاهده کردند که برای زمین‌های قابل فرسایش کشاورزی یک افزایش خطی در n وجود دارد، ولی در زمین‌های غیر قابل فرسایش (جنگلی)، مقدار n ثابت می‌ماند (Afzalimehr and Anctil, 1998).

با توجه به مطالب گفته شده اهمیت مقاومت در مقابل جریان بیش از پیش نمایان است. در این تحقیق با ساخت شکل بستر مصنوعی (شکنج)، در فلوم آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های مربوطه تلاش شده است تا در حد توان و امکانات آزمایشگاه، تأثیر شکل بستر شکنج بر مقاومت در مقابل جریان نشان داده شود.

2- روش تحقیق

2-1- فلوم آزمایشگاهی

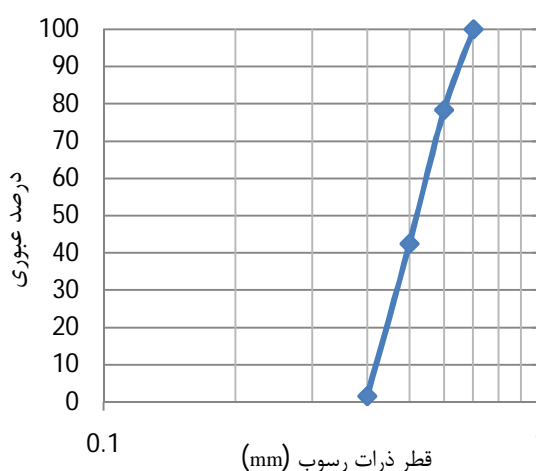
در این پژوهش با ساخت شکنج‌های مصنوعی به صورت متناوب در طول یک فلوم آزمایشگاهی با طول 12 متر، عرض 40 سانتی‌متر و ارتفاع 40 سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد، 48 مورد آزمایش صورت گرفت. فلوم دارای کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای است که شیب پذیر بوده و امکان تغییر شیب کف به کمک جک‌های هیدرولیکی فراهم می‌باشد. در

درجه در نظر گرفته شد. بسترهای مصنوعی در قاب‌های فلزی گالوانیزه به عرض 39/5 سانتی‌متر و به طول 5 متر، به کمک اشلی با زاویه 32 درجه (پایین‌دست) و 8 درجه (بالادست) و به طول 30 سانتی‌متر (طول موج شکنج)، با استفاده از پودر سیمان سفید و پودر سنگ ساخته شدند. برای اینکه دانه‌بندی شکنج‌ها حفظ شود بعد از خشک شدن آنها، با استفاده از چسب‌های مخصوص در تمام سطوح ساخته شده، رسوبات پاشیده شد و تمام سطوح شکنج‌ها با رسوبات دانه‌بندی شده پوشش داده شدند. توجه به اهداف تحقیق، همچنین به منظور مقایسه شکل-های بستر با حالت بدون شکل بستر، بستر صافی با رسوبات مورد استفاده در ساخت شکنج‌ها، ساخته شد. نظر به اینکه هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر دو نوع شکل بستر شکنج (یعنی موازی و پولکی) بر تنش برشی بستر و مقایسه آنها با بستر مسطح است، لذا تمام پارامترهای فیزیکی مانند ارتفاع و زاویه ایستایی مواد بستر و طول موج شکنج‌ها در تمام آزمایش‌ها ثابت فرض شد. بر این اساس، دو شکل مختلف شکل بستر شامل شکنج موازی و شکنج پولکی در بستر فلوم ایجاد شد و برای انجام آزمایشات بعدی، شکل بستر ثابت گردید. شکل 4 نمایشی از شکنج‌های ساخته شده در فلوم را نشان می‌دهد.

2-2- برنامه‌ریزی و نحوه انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها لازم است تا ابتدا شیب و دبی‌هایی مناسبی که در آنها شکل بستر شکنجی اتفاق می‌افتد، تعیین شود. بدین منظور به کمک روش‌هایی از جمله روش‌های آلبرتسون (به نقل از چین، 1999)، هیل (به نقل از چین، 1999)، عطاءاله (1968) (به نقل از شفاعی، 1387) و سایر روش‌های آزمایشگاهی، با اشتراک‌گیری محدوده مناسب از روش‌ها، دبی و شیب مناسب برای انجام آزمایش‌ها تعیین شد. جدول 1 حدود کمینه و بیشینه از دبی، شیب و سرعت در روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

انتهای مخزن فلوم یک سرریز مثلثی قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌کند. با توجه به مطالعات سایمونز و ریچاردسون (1966) که قطر متوسط ذرات شکنج باید کمتر از 0/7 میلی‌متر باشد، در این تحقیق رسوبات مورد استفاده دارای قطر متوسط 0/52 میلی‌متر با ضریب دانه‌بندی $C_D = 1/58$ و ضریب انحنا $C_u = 1/05$ بود. در شکل 3 نمودار دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل 3 منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد آزمایش

ضرایب دانه‌بندی و انحنا به صورت روابط (6) و (7) تعریف می‌شوند:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (7)$$

در روابط فوق، C_D ضریب دانه‌بندی، C_u مقدار ضریب انحنا و D_{30}, D_{10}, D_{60} قطر متوسط ذراتی هستند که به ترتیب 30، 10، 60 درصد ذرات از آن کوچکترند.

همچنین براساس مطالعات قبلی (چین و همکاران، 1999) در این تحقیق طول موج شکنج‌ها برابر 30 سانتی‌متر و ارتفاع آنها 3 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مقدار زاویه ایستایی برای ذرات با قطر متوسط 0/52 میلی‌متر برابر 32 درجه اندازه‌گیری شد، لذا شیب وجه پایین‌دست شکنج‌ها برابر 32 درجه و شیب وجه بالادست آنها ملایم و برابر 8



شکل 4 نمایی از شکنج‌های پولکی و موازی در کف فلوم آزمایشگاهی و موقعیت سرعت‌سنج ADV

جدول 1 حدود مناسب از دبی، شیب و سرعت برای تشکیل بستر شکنج

محدوده شیب		محدوده سرعت (m/s)		محدوده دبی (l/s)		نام روش
پیشینه	کمینه	پیشینه	کمینه	پیشینه	کمینه	
0/02	0/0002	0/786	0/134	50	10	آلبرتسون
0/0009	0/0001	0/25	0/089	50	10	هیل
0/0008	0/0001	0/234	0/089	50	10	سایمونز و ریچاردسون
0/0007	0/0001	0/208	0/089	50	10	انگلوند و هانسن
0/1	0/0001	1	0/1	50	10	عطاءاله
0/001	0/0005	0/321	0/167	50	10	مطالعات آزمایشگاهی دیگران

نقطه در هر مقطع اندازه‌گیری شد. بنابراین در هر آزمایش، اندازه‌گیری سرعت جریان در 108 نقطه انجام شد. در شکنج‌های پولکی نیز اندازه‌گیری‌های مشابه انجام شد، با این تفاوت که در هر ایستگاه در دو مقطع (قسمت گودی و بعد از گودی شکنج) انجام گرفت. همچنین به منظور مقایسه تأثیر شکل بستر شکنج با بستر صاف و هموار در شیب و دبی‌های مذکور، 16 مورد آزمایش بر روی بستر صاف با دانه‌بندی مشابه انجام شد. همچنین به منظور مشاهده تأثیر مقاومت شکل بستر با حالت بدون شکل بستر، 16 مورد آزمایش نیز بر روی بستر مسطح (بدون شکل بستر) انجام شد.

2-3- کنترل محدوده هیدرولیکی تشکیل شکل بستر

همانگونه که گفته شد در این تحقیق از شکل بستر شکنج ثابت استفاده شد و ابعاد و هندسه شکل بستر بر اساس نتایج تحقیقات دیگران انتخاب شد. بدیهی است شرایط هیدرولیکی ایجاد شده در فلوم می‌باید به گونه‌ای تنظیم

آزمایش‌ها در 4 شیب 0/0005، 0/001، 0/002 و 0/003 و در 4 دبی 10، 20، 30 و 40 لیتر در ثانیه انجام شد. تعداد کل آزمایش‌ها 48 مورد بود. در هر آزمایش عمق متوسط جریان با استفاده از یک عمق‌سنج مجهز به کولیس با دقت 0/01 سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سرعت جریان به کمک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV که دارای دقت اندازه‌گیری ± 1 میلی‌متر بر ثانیه بود، انجام گرفت. در این اندازه‌گیری از فرکانس 200 هرتز استفاده شد و مدت اندازه‌گیری سرعت جریان در هر نقطه حداقل 2 دقیقه بود. در شکنج‌های موازی اندازه‌گیری سرعت در سه ایستگاه در مسیر جریان (نواحی ابتدایی، میانی و انتهایی جریان) و در هر ایستگاه در سه مقطع (قبل، روی و بعد از شکنج) انجام گرفت. بدین ترتیب در هر آزمایش اندازه‌گیری سرعت در 9 مقطع جریان انجام گرفت. در هر مقطع اندازه‌گیری سرعت در 3 نقطه در عرض فلوم (به فواصل 5، 20 و 35 سانتی‌متر از جدار فلوم) و 4 نقطه در امتداد عمق جریان انجام گرفت. یعنی به طور متوسط 12

استفاده شد:

$$\frac{u^*}{u} = n \cdot \frac{\sqrt{g}}{R^{\frac{1}{6}}} \quad (10)$$

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} \cdot S_f^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (11)$$

$$n' = \frac{D_{50}^{\frac{1}{6}}}{21/\tau} \quad (12)$$

$$n'' = n - n' \quad (13)$$

که در این روابط n ضریب زبری مانینگ، n' زبری ناشی از ذره، n'' زبری ناشی از شکل ذره، R شعاع هیدرولیکی، S_f شیب خط انرژی، v سرعت متوسط جریان و u^* سرعت برشی است.

4-2- تجزیه و تحلیل نتایج

عوامل متغیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها، شامل عمق جریان در مقاطع مختلف، 4 شیب متغیر و 4 دبی متغیر بود. لذا در سه نوع بستر، تعداد کل آزمایش‌ها در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی 48 مورد شد. پس از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل آزمایشگاهی، نتایج به صورت نمودار نشان داده شد. برای اندازه‌گیری ضریب مانینگ مربوط به زبری ذرات از معادله استریکلر استفاده شد که مقدار آن برابر 0/013 بدست آمد. با توجه به محاسبات انجام شده، جریان در تمامی آزمایش‌ها زیر بحرانی و متلاطم است. با توجه به بررسی نمودارهای بدست آمده نتایج در جدول‌های 2 و 3 ارائه شده است. در شکل‌های 5 و 6 تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل مقدار دبی در شیب‌های 0/0005، 0/001، 0/002 و 0/003 ترسیم شده است. با توجه به این شکل روند کاهشی مقدار زبری (n) با افزایش دبی در تمام شیب‌ها مشاهده می‌شود. به طوری که در دبی 10 لیتر در ثانیه بیشترین مقدار زبری و در دبی 40 لیتر در ثانیه کمترین میزان زبری مشاهده می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که در یک دبی ثابت با افزایش شیب، مقدار زبری (n) نیز افزایش یافته است.

شود که با شرایط تشکیل شکل بستر شکنج همخوانی لازم را داشته باشد. لذا براساس داده‌های برداشت شده، نقاط مربوط به نتایج این تحقیق بر روی نمودارهای تشخیص نوع شکل بستر پیاده‌سازی شد.

- آنالیز ابعادی

به منظور تعیین گروه‌های بی‌بعد و نتیجه‌گیری مناسب از یافته‌های تحقیق، انجام آنالیز ابعادی ضروری است. پارامترهای مؤثر در جریان بر روی شکل بستر شکنج مطابق رابطه (8) می‌باشد:

$$f(\rho_w, \rho_s, g, \gamma, v, u^*, \mu, h, L, n, D_{50}) = 0 \quad (8)$$

که در آن ρ_w جرم مخصوص آب، ρ_s جرم مخصوص رسوب، g شتاب گرانشی زمین، γ عمق جریان، v سرعت جریان، μ لزجت دینامیکی آب، h ارتفاع شکنج، l طول موج شکنج، n زبری جدار، V سرعت متوسط جریان و u^* سرعت برشی می‌باشد. u^* از طریق تنش برشی جریان $(u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}})$ تعیین می‌شود.

قابل ذکر است که چون آزمایش‌ها در زمانی انجام شد که تعادل برقرار می‌گردید، لذا پارامتر زمان از محاسبات حذف شد. همچنین عرض کانال در تمام آزمایش‌ها ثابت بوده، بنابراین قابل صرف‌نظر است. آب ورودی به کانال فاقد مواد معلق است، بنابراین پارامتر Q_s نیز قابل چشم‌پوشی است.

بعد از آرایش پارامترهای بدون بعد به روش باکینگهام عوامل مؤثر در شکنج‌ها در قالب گروه‌های بی‌بعد به صورت رابطه (9) بدست آمد:

$$f\left(\frac{D50}{y}, \frac{h}{y}, \frac{L}{y}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, n, \frac{u}{u^*}, Re, Fr^2\right) = 0 \quad (9)$$

که در آن Fr عدد فرود و Re عدد رینولدز است.

- محاسبه ضریب زبری مانینگ

به منظور محاسبه ضریب زبری مانینگ و زبری ذره از رابطه مانینگ و رابطه استریکلر با روابط (10) تا (13)

جدول 2 نتایج محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان برای بستر موازی

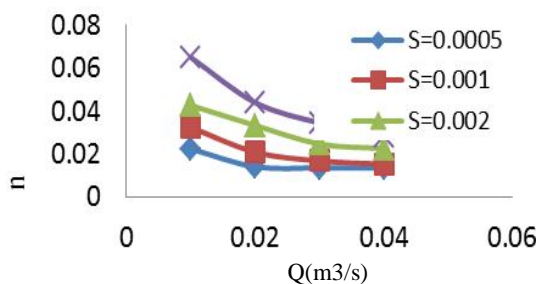
نام آزمایش	S	Q(m ³ /s)	D ₅₀ (mm)	V (m/s)	y(cm)	n'	n	n''=n-n'
S1Q1	0/0005	0/01	0/52	0/192	13	0/013	0/02137	0/00837
S1Q2	0/0005	0/02	0/52	0/316	15/8	0/013	0/014008	0/001008
S1Q3	0/0005	0/03	0/52	0/341	22	0/013	0/014063	0/001063
S1Q4	0/0005	0/04	0/52	0/417	24	0/013	0/013252	0/000252
S2Q1	0/001	0/01	0/52	0/149	16/8	0/013	0/043089	0/030089
S2Q2	0/001	0/02	0/52	0/278	18	0/013	0/023658	0/010658
S2Q3	0/001	0/03	0/52	0/357	21	0/013	0/019385	0/006385
S2Q4	0/001	0/04	0/52	0/417	24	0/013	0/017328	0/004328
S3Q1	0/002	0/01	0/52	0/154	16/2	0/013	0/057985	0/044985
S3Q2	0/002	0/02	0/52	0/270	18/5	0/013	0/034717	0/021717
S3Q3	0/002	0/03	0/52	0/341	22	0/013	0/029153	0/016153
S3Q4	0/002	0/04	0/52	0/407	24/6	0/013	0/025305	0/012305
S4Q1	0/003	0/01	0/52	0/149	16/8	0/013	0/074632	0/061632
S4Q2	0/003	0/02	0/52	0/263	19	0/013	0/044071	0/031071
S4Q3	0/003	0/03	0/52	0/349	21/5	0/013	0/034638	0/021638
S4Q4	0/003	0/04	0/52	0/424	23/6	0/013	0/029361	0/016361

جدول 3 نتایج محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان برای بستر پولکی

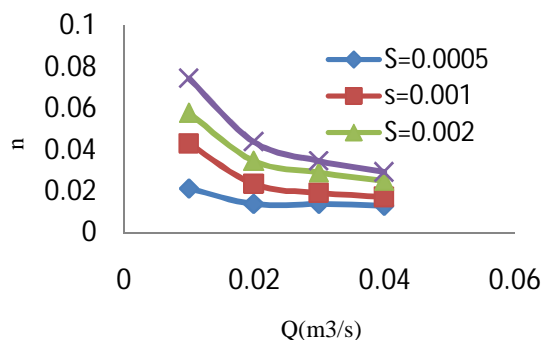
نام آزمایش	S	Q(m ³ /s)	D ₅₀ (mm)	V (m/s)	y(cm)	n'	n	n''
S1Q1	0/0005	0/01	0/52	0/01	13/5	0/013	0/02253	0/00953
S1Q2	0/0005	0/02	0/52	0/313	16	0/013	0/014252	0/001252
S1Q3	0/0005	0/03	0/52	0/357	21	0/013	0/013707	0/000707
S1Q4	0/0005	0/04	0/52	0/357	28	0/013	0/013648	0/000649
S2Q1	0/001	0/01	0/52	0/182	13/7	0/013	0/032523	0/019523
S2Q2	0/001	0/02	0/52	0/303	16/5	0/013	0/021021	0/008021
S2Q3	0/001	0/03	0/52	0/395	19	0/013	0/016963	0/003963
S2Q4	0/001	0/04	0/52	0/455	22	0/013	0/015461	0/002461
S3Q1	0/002	0/01	0/52	0/192	13	0/013	0/042739	0/029739
S3Q2	0/002	0/02	0/52	0/278	18	0/013	0/033458	0/020458
S3Q3	0/002	0/03	0/52	0/385	19/5	0/013	0/024839	0/011839
S3Q4	0/002	0/04	0/52	0/442	22/6	0/013	0/022652	0/009652
S4Q1	0/003	0/01	0/52	0/164	15/2	0/013	0/065066	0/052066
S4Q2	0/003	0/02	0/52	0/263	19	0/013	0/044071	0/031071
S4Q3	0/003	0/03	0/52	0/349	21/5	0/013	0/034638	0/021638

بستگی ندارد، بلکه به عوامل دیگری نظیر دبی، عمق جریان، شکل ذرات، پوشش گیاهی و شکل بستر نیز وابسته می‌باشد. برای بدست آوردن روابط مقاومت جریان در حضور شکل بستر شکنج و تأثیر زبری بستر بر زبری کل با توجه به آنالیز ابعادی انجام شده، نمودار شکل‌های 9 و 10 رسم شد.

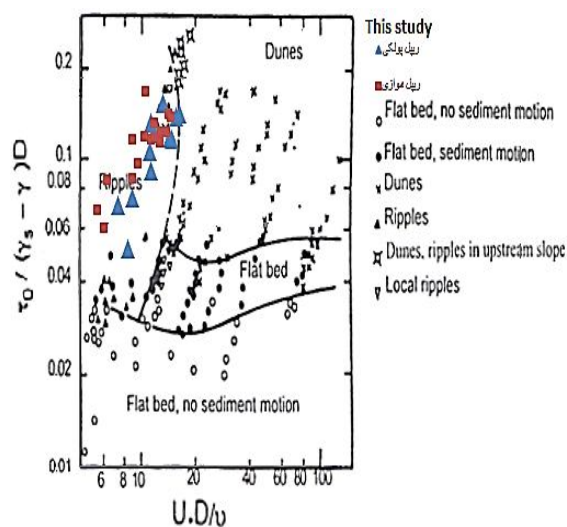
در این نمودار h ارتفاع شکنج و d عمق جریان بر حسب متر، n'' زبری شکل بستر و n زبری کل می‌باشند. با توجه به این نمودار می‌توان استنباط کرد که در بستر با فرم بستر ریپل‌های موازی نزدیک 47 درصد و در بستر با شکل بستر شکنج پولکی نزدیک 43 درصد از زبری کل را زبری شکل بستر تشکیل می‌دهد، لذا در کارهای طراحی نمی‌توان از اثر شکل بستر صرف‌نظر کرد.



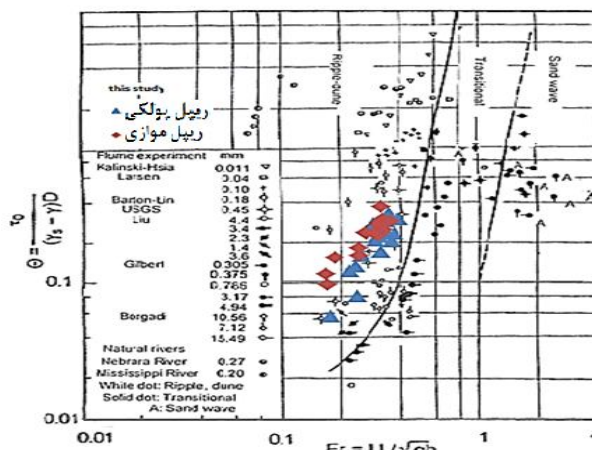
شکل 7 تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل دبی در بستر پولکی



شکل 8 تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل دبی در بستر موازی



شکل 5 مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی (Chien and Wan 1999)



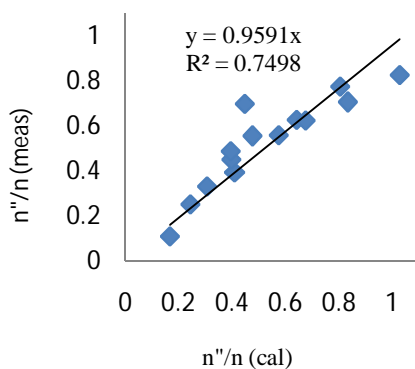
شکل 6 مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با روش گارد و آلبرتسون (1996)

بر اساس این نمودارها می‌توان این‌گونه استنباط کرد که با افزایش مقدار دبی، عمق و سرعت جریان افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت عدد رینولدز بزرگتر می‌شود در نتیجه نقطه جدایی روی سطح ذره دیرتر اتفاق می‌افتد، پس منطقه جداشدگی تشکیل شده کوچکتر شده و در نتیجه نیروی درگ کاهش می‌یابد و در نهایت مقدار زبری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش‌ها بر روی شکل 7 و 8 نشان می‌دهد که زبری مانینگ تنها به اندازه ذرات

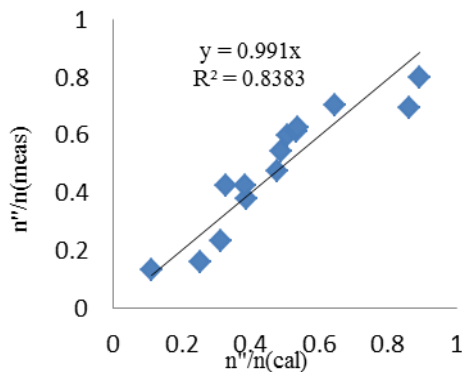
محاسباتی و اندازه‌گیری شده از رابطه (16) استفاده شد:

$$\text{درصد اختلاف} = \left(\frac{n''/n(\text{meas}) - n''/n(\text{cal})}{n''/n(\text{meas})} \right) * 100 \quad (16)$$

متوسط خطای بدست آمده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، به ترتیب برای بسترهای موازی و پولکی و 14 و 16 درصد بدست آمد. شکل‌های 11 و 12 نمودار n''/n محاسباتی و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.



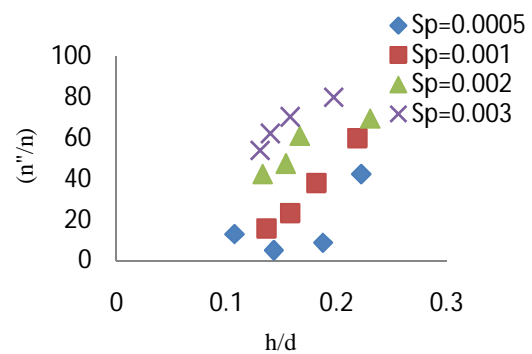
شکل 11 نمودار تغییرات مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده n''/n در بستر موازی



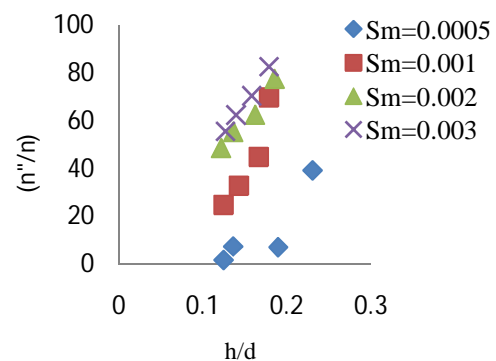
شکل 12 نمودار تغییرات مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده n''/n در بستر پولکی

3- نتیجه‌گیری

از مهمترین پارامترهایی که در مطالعات و طراحی کانال‌های باز و سازه‌های مرتبط با آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد، پارامتر مقاومت جریان است. افزایش دقت در تخمین ضریب مذکور تأثیر مستقیم در تعیین دبی سیستم



شکل 9 نمودار تغییرات درصد n''/n در مقابل h/d در بستر پولکی



شکل 10 نمودار تغییرات درصد n''/n در مقابل h/d در بستر موازی

طالب بیدختی و همکاران (2006)، نیز با بررسی ساختار جریان بر روی تلماسه‌ها عنوان کردند که تأثیر مقاومت بستر بر مقاومت کل ناچیز نخواهد بود. آنها اظهار کردند که این مقاومت حدود 25 تا 55 درصد از کل زبری را شامل می‌شود. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، روابط (14) و (15) به ترتیب برای بسترهای موازی و پولکی، به کمک نرم‌افزار SPSS بین پارامترهای جریان و خصوصیات شکنج برای شیب‌های آزمایش شده بدست آمد:

$$(n''/n) = 1589.3 (h/d)^{1.710} (S)^{0.757} \quad R^2 = 0.853 \quad (14)$$

$$(n''/n) = 417 (h/d)^{1.4567} (S)^{0.651} \quad R^2 = 0.867 \quad (15)$$

در این روابط h ارتفاع شکنج و d عمق جریان بر حسب متر است. برای اندازه‌گیری درصد مقدار خطای n''/n

5- منابع

بهرامی یاراحمدی، م. و شفافی بجستان، م. (1390). "بررسی آزمایشگاهی اثر شکل ذرات رسوبی بستر بر ضریب زبری مانینگ"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 25، شماره 1، ص.ص. 51-60.

شفافی بجستان، م. (1387). مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران.

عطار، ش. (1387). "تأثیر شکل بستر شنی بر توزیع‌های سرعت جریان و تنش برشی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

کرباسی، م. (1384). "بررسی اثر حرکت بار بستر بر مقاومت هیدرولیکی جریان در حضور فرم‌های بستر"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

Afzalimehr, H. and Ancil, F. (1998). "Estimation of gravel-bed river flow resistance", Journal of Hydraulic Engineering 124(10), pp. 1054-1058.

Carling, P. A. (1999). "Subaqueous gravel dunes", Journal of Sedimentary Research, 69(3), pp. 534-545.

Chien, N. and Wan, Z. (1999). "Mechanics of sediment transport reston", VA: ASCE Press. 913: pp. 195-245.

Joep, A. Storms Remke, L. Vandam and Suzanne, F. Leclair. (1999). "Preservation of cross-sets due to migration of current ripples over aggrading and non- aggrading beds: comparison of experimental data with theory", Journal of International Association of Sedimentologists, 46(1), pp. 189-200.

Simons, D. B. and Richardson, E. V. (1966). "Resistance to flow in alluvial channels", USGS Professional, 422-61.

Talebeydokhti, N. Hekmatzadeh, A.A and Rakhshandehroo, G.R. (2006). "Experimental modeling of dune bed form in a sand-bed channel", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering. 30(4), pp. 503-516.

Yen, B. C. (2002). "Open channel flow resistance", Journal of Hydraulic Engineering, 128 (1), pp. 20-39.

و توجیه اقتصادی آن دارد. با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق استنباط می‌شود که شکل‌های بستر اثرات قابل توجهی بر مقاومت جریان دارند، همان‌گونه که مشاهده شد شکل بستر شکنج با وجود اینکه کوچکترین شکل بستر را از نظر ابعادی در بین دیگر شکل‌ها نظیر تلماسه و شوت و استخر دارد، ولی نتایج نشان داد که شکنج‌ها تا حد زیادی می‌توانند مقاومت در مقابل جریان را تحت تأثیر خود قرار دهند. در این تحقیق شکل بستر شکنج در حالت موازی 47 درصد و شکنج‌های پولکی متقارن و نامتقارن 43 درصد از مقاومت کل را به خود اختصاص دادند. لذا ضریب زبری مانینگ در حالت پولکی کمتر از حالتی است که شکنج‌ها به شکل خطوط موازی و منحنی و در مراحل ابتدایی شکل‌گیری خود هستند، بطوری که ضریب زبری مانینگ در حالت پولکی 12/3 درصد کمتر از حالت موازی است.

4- فهرست علائم

d	عمق جریان
g	شتاب گرانشی زمین
h	ارتفاع شکنج
l	طول موج شکنج
n	زبری جدار
n'	ضریب زبری ناشی از ذرات
n''	ضریب زبری شکل بستر
R	شعاع هیدرولیکی
S_f	شیب خط انرژی
u^*	سرعت برشی
V	سرعت متوسط جریان
v	سرعت جریان
y	عمق جریان
ρ_w	جرم مخصوص آب
ρ_s	جرم مخصوص رسوب
τ	تنش برشی کل
τ'	تنش برشی ذرات
τ''	تنش برشی ناشی از شکل بستر
μ	لزجت آب