

بررسی اثر شکل ذرات سنگریزه‌ای بر ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌های کوهستانی

محمد همتی* و وفا مصطفی**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. تلفن: ۳۱۹۴۲۴۱۷ (۰۴۴)،

پیم‌نگار: m.hemmati@urmia.ac.ir

** به ترتیب: استادیار؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۹

چکیده

روابط مقاومت جریان از مولفه‌های کلاسیک آنالیز هیدرولیکی رودخانه است که برای روندیابی سیل، پیش‌بینی عمق و سرعت سیلاب‌های طرح، برآورد ظرفیت سیلاب آبراهه و پیش‌بینی غیرمستقیم دبی‌های سیلاب از طریق روش شیب - مساحت، مورد نیاز خواهد بود. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اثر شکل ذرات و شیب بستر آبراهه بر ضریب زبری مانینگ پرداخته شده است. برای رسیدن به این هدف، از دو نوع سنگریزه طبیعی نسبتاً گردگوشه و شکسته تیزگوشه با اندازه‌های متوسط ۳/۸، ۴/۶، ۶/۵۳ و ۸ سانتی‌متر و چهار شیب ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد در شرایط مختلف هیدرولیکی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سنگریزه و شیب بستر آبراهه و کاهش استغراق نسبی مقدار ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که به‌طور متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ سنگریزه‌های تیزگوشه در شیب‌های ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد به ترتیب در حدود ۲/۷، ۳/۷، ۳/۸ و ۵/۹ درصد بیشتر از مقدار آن در سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گردگوشه است. اختلاف بین مقادیر ضریب زبری مانینگ در ذرات تیزگوشه و طبیعی نسبتاً گردگوشه با کاهش استغراق نسبی و افزایش شیب تند، اثر شکل ذرات بر ضریب زبری مانینگ در شیب‌های تند و استغراق نسبی کم (زبری در مقیاس بزرگ) قابل توجه است.

واژه‌های کلیدی

تیزگوشه، رودخانه‌های کوهستانی، سنگریزه، ضریب زبری مانینگ، فاکتور شکل

مقدمه

(2003). بر اساس طبقه‌بندی باتورست و همکاران (Bathurst et al., 1981)، اگر استغراق نسبی d/D_{84} که در آن d عمق جریان و D_{84} شاخص مواد بستر است) کمتر از ۱/۲، بین ۱/۲ تا ۴، و بیشتر از ۴ باشد زبری به ترتیب در مقیاس بزرگ، متوسط و کوچک قرار می‌گیرد. مدلسازی مقاومت جریان با زبری‌های در مقیاس بزرگ و متوسط چالش برانگیز است زیرا تلاطم جریان تحت تأثیر عناصر بزرگ بستر قرار دارد (Rickenmann & Recking, 2011). کاهش استغراق نسبی (d/D_{84}) موجب افزایش ضریب زبری مانینگ و ضریب دارسی - ویسباخ می‌شود (Bathurst, 1985; Ferguson, 2007). به‌طور کلی، تعیین

با وجود مطالعات گسترده درباره هیدرولیک آبراهه‌ها و مجاری روباز، تحقیقات در زمینه تعیین مقاومت جریان در رودخانه‌های کوهستانی، در مقایسه با آبراهه‌های با شیب ملایم، اندک است. آبراهه‌های کوهستانی با این مشخصه‌ها قابل تشخیص‌اند: شیب تند، عمق کم جریان، بزرگ بودن اندازه مصالح بستر و کوچک بودن استغراق نسبی (R/K_s) که در آن R شعاع هیدرولیکی و K_s اندازه زبری بستر است. مواد بستر آبراهه‌های کوهستانی در محدوده سنگریزه (۲ تا ۶۴ میلی‌متر) تا تخته‌سنگ (بیشتر از ۲۵۶ میلی‌متر) قرار می‌گیرند (Aberle & Smart,)

بستر از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۳۹ متغیر بوده است. رابطه ۱ بیانگر این است که با افزایش شیب خط انرژی و کاهش شعاع هیدرولیکی، ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد.

$$n = 0.39 \times S_f^{0.38} \times R^{-0.16} \quad (1)$$

که در آن،

n = ضریب زبری مانینگ؛ S_f = شیب خط انرژی؛ و R = شعاع هیدرولیکی بر حسب فوت.

باتورست (Bathurst, 2002) می‌گوید روابط موجود در منابع مختلف برای پیش‌بینی مقاومت جریان در رودخانه‌های کوهستانی به‌طور معمول به دو دلیل عمده دارای $\pm 30\%$ درصد خطاست. یکی اینکه اکثر روابط محتوای تجربی دارند که از داده‌های میدانی یا فلوم استخراج شده‌اند. با این حال هنوز داده‌های موجود برای تبعیت از یک رابطه عمومی مورد قبول در تمام محدوده شرایط جریان، ناکافی است. شرایط جریان سیلابی (که مورد توجه خاص مهندسان است) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌طور مناسب ارائه نشده است و کاربرد معادلات مقاومت جریان تجربی برای جریان‌های بالا نامشخص است. دیگر اینکه به‌طور معمول روابط از برآزش مجموعه داده‌ها برای مکان‌های مختلف استخراج می‌شود.

نتایج بررسی‌های کیم و همکاران (Kim et al., 2010) نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان (از ۴۰ تا ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه) ضریب زبری در رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای کاهش می‌یابد؛ اما افزایش دبی جریان از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه، تأثیر معنی‌داری در کاهش ضریب زبری ندارد. این محققان همچنین گزارش داده‌اند که با افزایش عمق آب، ضریب زبری کاهش می‌یابد. ریکمن و رکنینگ (Rickenmann & Recking, 2011) با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های میدانی رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای گزارش داده‌اند که مقاومت جریان با افزایش استغراق نسبی کاهش می‌یابد. این محققان

مقاومت جریان نیازمند تعیین پارامتر زبری است. محققان به توسعه شاخصی از زبری مواد (d_c) توجه کرده‌اند که برای محاسبه مقاومت جریان در نظر گرفته شده است. اندازه ذره (d_c) در توزیع عمودی زبری‌ها یا توزیع آنها در طول جریان اطلاعاتی نمی‌دهد (Aberle et al., 1999; Aberle & Smart, 2003). مقاومت جریان در شرایط استغراق نسبی کم، بیشتر تحت تأثیر تراکم و نحوه قرارگیری هندسی عناصر زبری است؛ به‌طوری‌که زبری هیدرولیکی برای سطوح سنگریزه درشت و تخته‌سنگ‌ها، با وجود یکسان بودن اندازه پارامتر زبری (d_c)، متفاوت است (Aberle & Smart, 2003).

در آبراهه‌های کوهستانی، عناصر زبری بزرگ منبعی فیزیکی از مقاومت در برابر جریان محسوب می‌گردد. به‌علت افزایش و کاهش سرعت در اطراف تخته‌سنگ‌ها و جریان‌های بحرانی و فوق بحرانی ریزشی از آبشارها، تلاطم جریان در این نوع آبراهه‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه آن کل مقاومت جریان به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (Zimmermann, 2010). تلاطم جریان باعث افزایش مقاومت کل جریان در آبراهه‌های با شیب بزرگ‌تر از ۱ درصد می‌شود (Bathurst, 1985; Palt, 2001; Nitsche, 2012). رید و هیکین (Reid & Hickin, 2008) نشان دادند که برای آبراهه‌های با شیب بستر در محدوده ۱/۹ تا ۷/۵ درصد، مقاومت جریان ناشی از زبری‌های بزرگ حدود ۹۰ درصد مقاومت کل جریان آبراهه را تشکیل می‌دهد. زیمرمن (Zimmermann, 2010) گزارش داده است که به واسطه شکل و نیروی پسای ریزشی^۱ در اطراف عناصر زبری بزرگ، بخش اصلی انرژی جریان در آبراهه‌های تند مستهلک می‌شود. جارت (Jarrett, 1984) با استفاده از داده‌های ۲۱ رودخانه با شیب بستر تند در کلرادو، فرمولی جهت تخمین ضریب زبری مانینگ ارائه داد (رابطه ۱)؛ در این مطالعه، اندازه مواد بستری رودخانه‌ها (D_{84}) در محدوده ۰/۳ تا ۲/۶ فوت (۹ تا ۸۰ سانتی‌متر) و شیب

می‌شود و اثر شکل ذرات رسوبی در اندازه‌های کوچک‌تر، قابل توجه‌تر است. حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2014) در آزمایشگاه به بررسی مقاومت جریان در یک فلوم با شیب تند پرداختند و از پنج شیب بستر (۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ درصد) و چهار اندازه مصالح بستر (با قطر متوسط d_{50}) برابر با ۸، ۱۸، ۲۲ و ۳۴ میلی‌متر) در شرایط مختلف هیدرولیکی در یک کانال به طول ۱۵ متر و عرض ۱/۳ متر استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش شیب خط انرژی و اندازه مواد بستر، ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد.

در خصوص ضرایب مقاومت جریان، بررسی‌ها فراوان اما بیشتر آنها مربوط به آبراهه‌های با شیب ملایم است و مطالعات در زمینه رودخانه‌های با شیب تند اندک است. به‌ویژه در زمینه اثر شکل ذرات سنگریزه بر ضریب زبری جریان در رودخانه‌های کوهستانی مطالعه‌ای صورت نگرفته است. تحقیق حاضر در نظر دارد به بررسی آزمایشگاهی تاثیر شیب بستر، عدد فرود ذره، شکل ذرات سنگریزه، اندازه ذرات و استغراق نسبی بر ضریب زبری مانینگ بپردازد.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

برای استخراج پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب زبری مانینگ در تحقیق حاضر، از آنالیز ابعادی استفاده می‌شود؛ متغیرهای مؤثر بر ضریب زبری عبارت‌اند از (رابطه ۳):

$$n = f(\rho, g, \mu, V, Q, R, \gamma, B, d_{50}, S_0, SF, \rho_s, \sigma_s) \quad (3)$$

که در آن،

n = ضریب زبری مانینگ؛ p = چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ g = شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)؛ u = لزجت دینامیکی آب (نیوتن.ثانیه بر مترمربع)؛ V = سرعت

همچنین با ارزیابی فرمول‌های موجود پیش‌بینی مقاومت جریان می‌گویند فرمولی که فرگوسن (Ferguson, 2007) ارائه داده است مطابقت بیشتری با نتایج تحقیق آنها دارد. مطالعه پراکاش (Prakash, 2014) چارچوبی برای پیش‌بینی فاکتور اصطکاکی دارسی-ویسباخ و درک مدل‌های مقاومت جریان در رودخانه‌های با بستر سنگریزه‌ای در مقیاس جهانی فراهم می‌کند. آنها با استفاده از ۷۰۶ داده اندازه‌گیری شده در ۱۰۰ رودخانه دنیا که در آن اندازه ذرات بستر در محدوده ۷ تا ۴۷۰ میلی‌متر و شیب طولی بستر در محدوده ۰/۰۰۰۱۷ تا ۰/۰۸۱ (در محدوده شیب ملایم تا تند) است، ضریب دارسی - ویسباخ (f) را به صورت تابعی از استغراق نسبی ($\frac{d}{D_{84}}$) مطابق رابطه ۲ ارائه دادند:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = [2.5(\frac{d}{D_{84}})^{2.1}]/[1 + (\frac{d}{D_{84}})^2] \quad (2)$$

که در آن،

$$f = \text{ضریب دارسی - ویسباخ؛ و } \frac{d}{D_{84}} = \text{استغراق نسبی.}$$

بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2011) با بررسی اثر شکل ذرات رسوبی بر ضریب زبری مانینگ در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۲۵ سانتی‌متر، طول ۱۰ متر و شیب کف ۰/۰۰۰۵، از سه نوع شن با شکل‌های تیزگوشه، طبیعی گردگوشه و تصنعی کروی شکل در اندازه‌های متفاوت (۱۱، ۱۶، ۲۱ و ۲۷ میلی‌متر) و در شرایط مختلف هیدرولیکی استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که متوسط ضریب زبری مانینگ برای آبراهه با شیب ملایم در ذرات تیزگوشه شن در حدود ۶/۲ درصد بیشتر از ذرات شن نسبتاً گردگوشه می‌باشد. این محققان همچنین اعلام کردند که با بزرگ‌تر شدن اندازه رسوب بستر، ضریب زبری مانینگ رسوب با شکل‌های مختلف به یکدیگر نزدیک

$$n = f(S_0, SF, \frac{R}{d_{50}}, F_g) \quad (5)$$

که در آن،

$$F_g = \frac{v}{\sqrt{g(S_0 - 1)d_{50}}} \quad (6)$$

در روابط فوق،

F_g = با عدد فرود ذره؛ V = سرعت جریان؛ و G_s = چگالی ویژه ذرات سنگریزه برابر با ۲/۶۵ که از ادغام سه گروه بدون بعد $(\frac{y}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, F_r)$ به دست آمد.

تجهیزات آزمایشگاهی

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی و در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر فرهودی، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، اجرا شد. طول مفید فلوم ۸ متر و عرض آن ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در بالادست آن یک مخزن آرام‌کننده جریان وجود دارد. در بالادست ورودی کانال (که شیب‌پذیر نیز هست) از صفحات مشبک برای آرام کردن جریان ورودی به فلوم استفاده گردید. برای اندازه‌گیری دبی جریان در پایین دست فلوم از سرریز مثلی با زاویه قائم و برای تنظیم شیب بستر از الکتروموتور و یا اهرم دستی استفاده شد که در زیر فلوم قرار دارد. شکل ۱، شماتیکی از مدل فیزیکی به کار گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

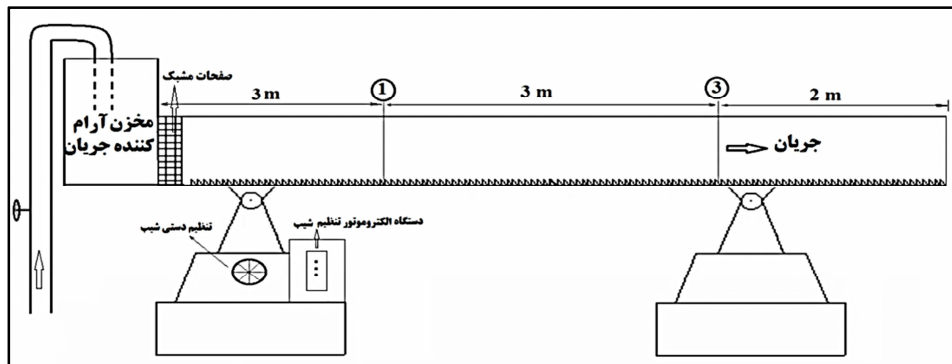
متوسط جریان (متر بر ثانیه)؛ Q = دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)؛ R = شعاع هیدرولیکی جریان (متر)؛ y = عمق جریان (متر)؛ B = عرض کانال (متر)؛ d_{50} = قطر متوسط سنگریزه (متر)؛ S_0 = شیب کف کانال؛ SF = شکل ذرات سنگریزه؛ p_s = چگالی ذرات سنگریزه (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ و o_s = انحراف معیار ذرات سنگریزه. با استفاده از تئوری پای باکینگهام و انتخاب متغیرهای تکراری ρ ، y و V رابطه بی بعد ۴ استخراج می‌شود:

$$n = f(S_0, SF, \frac{R}{d_{50}}, \frac{y}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_s, F_r, R_e) \quad (4)$$

که در آن،

F_r و R_e = به ترتیب عدد فرود و رینولدز جریان.

با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌ها جریان متلاطم زبر بود (عدد رینولدز برشی در محدوده ۱۹۵۵ تا ۷۴۰۱ بود)، از عدد رینولدز صرف نظر می‌شود. همچنین با توجه به یکنواخت بودن دانه‌بندی سنگریزه‌ها، $(\sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} < 1.3)$ ، از اثر انحراف معیار ذرات نیز صرف نظر می‌شود (Shafai-Bejestan, 2013). بنابراین در تحقیق حاضر سعی شد تا اثر شکل ذرات (SF)، استغراق نسبی (R/d_{50}) ، عدد فرود ذره (F_g) و شیب بستر (S_0) در شرایط مختلف هیدرولیکی بر مقدار ضریب زبری مانینگ (n) بررسی گردد (رابطه ۵):



شکل ۱- شماتیک فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات آن

هستند، استفاده گردید. استغراق نسبی در تحقیق حاضر در محدوده زبری با مقیاس متوسط و بزرگ قرار دارد (رابطه ۷):

$$0.85 \leq \frac{y}{d_{50}} \leq 3.7 \quad (7)$$

که در آن،

y = عمق متوسط جریان (متر)؛ و d_{50} = قطر متوسط سنگریزه (متر) است. عمق جریان در محدوده ۵/۶ تا ۱۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، هرچند برخی محققان اشاره می‌کنند که در مدلسازی سرریزها عمق آب روی سرریز نباید کمتر از ۶ سانتی‌متر باشد (Shafai-Bejestan, 2012)، اما در مطالعات مختلف دیده شده که عمق آب در برخی مطالعات آزمایشگاهی در رودخانه‌های کوهستانی حتی کمتر از ۵ سانتی‌متر است؛ مثلاً عمق آب در مطالعات حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2014) در محدوده ۱/۴ تا ۵/۹ سانتی‌متر قرار دارد. علاوه بر آن، طبیعت جریان در رودخانه‌های کوهستانی طوری است که عمق جریان کم و از نظر اندازه قابل مقایسه با اندازه مواد بستری است. از این رو لازم است شرایط آزمایشگاهی نیز مشابه شرایط میدانی انتخاب شود. تعداد کل آزمایش‌ها در تحقیق حاضر ۹۶ است. برای محاسبه ضریب مانینگ از رابطه مانینگ مطابق رابطه ۸ استفاده شد:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

که در آن،

S_f = شیب خط انرژی که از حاصل جمع شیب بستر (S_0) و شیب خط انرژی مخصوص (S_E)، ($S_f = S_0 + S_E$) محاسبه می‌شود. شیب خط انرژی مخصوص از اختلاف انرژی مخصوص بین مقاطع ۱ و ۳ در طول ΔL محاسبه می‌شود (رابطه ۹):

برای قرائت تراز سطح آب در آزمایش‌ها، یک دستگاه عمق‌سنج مکانیکی^۱ با دقت ۰/۱ میلی‌متر به کار گرفته شد. سرعت جریان در نقاط مختلف عمق آب و در مقاطع مختلف با استفاده از سرعت‌سنج الکترومغناطیسی ALEC (ACM2-RS) ساخت کشور ژاپن با دقت ± 2 درصد یا ± 0.5 سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. همچنین، برای بالا بردن دقت و کنترل بیشتر، از سرعت متوسط مقطع استفاده شد که از رابطه پیوستگی قابل محاسبه است.

نحوه اجرای آزمایش‌ها

بعد از تنظیم شیب بستر، سنگریزه‌ها با اندازه و شکل مورد نظر در تمام طول کانال (۸ متری) گسترانده شدند و بعد از تنظیم و تثبیت دبی جریان، داده‌ها از جمله عمق آب و سرعت جریان در مقاطع ۱، ۲ و ۳ (شکل ۱) اندازه‌گیری شد (مقطع ۲ در وسط مقاطع ۱ و ۳ واقع است). فاصله مقاطع ۱، ۲ و ۳ از ابتدای فلوم به ترتیب ۳، ۴/۵ و ۶ متر است. با توجه به عمق آب در کانال، سرعت جریان در نقاط مختلف (۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ عمق آب از سطح آب) اندازه‌گیری و متوسط آنها برای تحلیل نتایج به کار گرفته شد. بعد از اتمام آزمایش و ثبت داده‌ها، با تغییر دادن دبی جریان مراحل اندازه‌گیری داده‌ها برای تمامی شرایط هیدرولیکی از سر گرفته شد. بعد از اتمام کلیه آزمایش‌های مربوط به یک اندازه و شکل سنگریزه، با تغییر دادن شیب بستر، آزمایش برای تمامی شرایط هیدرولیکی ادامه داده شد.

برای حذف اثر نحوه چیدمان ذرات بر مقاومت جریان، سعی گردید از تغییر چیدمان در شیب‌های مختلف بستر خودداری شود. در تحقیق حاضر از سه اندازه سنگریزه (۳/۸، ۴/۶۶ و ۶/۵۳ سانتی‌متر) با دو شکل تیز گوشه و طبیعی (نسبتاً گرد گوشه) (شکل ۲)، چهار دبی جریان (۱۰، ۱۷، ۲۴ و ۳۱ لیتر بر ثانیه) و چهار شیب بستر (۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد) که در محدوده شیب‌های تند

که در آن،

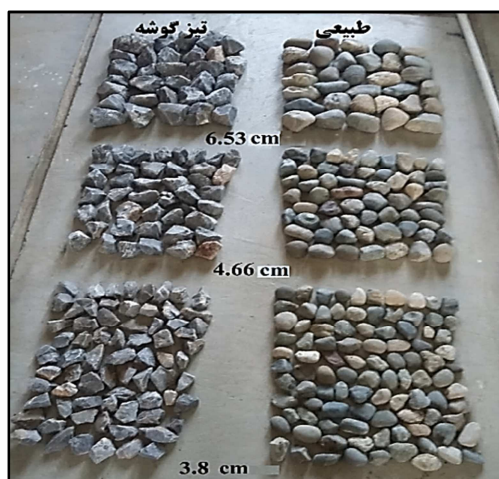
$$S_E = \frac{(E_1 - E_3)}{\Delta L} \quad (9)$$

E_1 و E_3 = انرژی مخصوص به ترتیب در مقاطع ۱ و ۳ (متر)؛

ΔL = فاصله مقاطع ۱ و ۳ (برابر با ۳ متر)؛ و y و V =

به ترتیب عمق و سرعت متوسط جریان.

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$



شکل ۲- سنگریزه‌های مورد استفاده در این تحقیق

نتایج و بحث

تأثیر شیب بستر آبراهه و شکل سنگریزه بر ضریب

زبری مانینگ

(2014) نیز حاکی از افزایش ضریب زبری مانینگ با افزایش شیب خط انرژی است. از شکل‌های ۳ تا ۵ همچنین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه، نسبت به سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه، زیادتر است. به سخنی دیگر، در شرایط یکسان از نظر اندازه مواد، دبی جریان و شیب بستر، ضریب زبری مانینگ در ذرات سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه بیشتر است تا در ذرات سنگریزه‌های نسبتاً گرد گوشه (طبیعی) (شکل ۳). دلیل موضوع آن است که جدایی خطوط جریان در این حالت در سنگریزه شکسته تیز گوشه، نسبت به سنگریزه طبیعی گرد گوشه، سریعتر شکل می‌گیرد و اندازه ناحیه جادشدگی جریان (اندازه جریان دنباله) در پشت سنگریزه‌های تیز گوشه بزرگتر است تا در سنگریزه‌های طبیعی. از این رو، اختلاف فشار بین بخش جلو و بخش عقب ذره شکسته تیز گوشه بیشتر از اختلاف فشار بین بخش جلو و بخش عقب ذره طبیعی

برای بررسی اثر شیب بستر آبراهه بر ضریب زبری مانینگ چهار شیب ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد، که در محدوده شیب‌های تند قرار دارند، در نظر گرفته شد؛ نتایج بررسی‌ها در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش شیب بستر ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش شیب بستر، سرعت جریان افزایش و در نتیجه در یک دبی ثابت عمق جریان و یا شعاع هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به طوری که عمق آب در برخی موارد قابل مقایسه با اندازه مواد بستری است. در این شرایط، اثر سنگریزه بر جریان بیشتر خواهد شد و باعث افت بیشتر انرژی و افزایش ضریب زبری مانینگ می‌گردد. نتایج بررسی‌های جارت (Jarrett, 1984) و حبیبی و همکاران (Habibi et al.,

نتایج محاسبات در جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش شیب بستر، اختلاف بین مقادیر ضریب زبری مانینگ در ذرات شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه زیاد می‌شود به گونه‌ای که متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ سنگریزه‌های تیز گوشه در شیب‌های ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد به ترتیب در حدود ۲/۷، ۳/۷، ۳/۸ و ۵/۹ درصد بیشتر از مقدار آن در سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه است. همچنین، نتایج بررسی‌ها بیانگر افزایش درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ با کاهش اندازه مواد سنگریزه است که در این حالت ضریب زبری مانینگ ذرات شکسته تیز گوشه در اندازه‌های ۶/۵۳، ۴/۶۶ و ۳/۸ سانتی‌متر در حدود ۳/۲، ۴/۳ و ۴/۶ درصد بیشتر از ضریب زبری مانینگ ذرات نسبتاً گرد گوشه است. این تغییرات، در مقایسه با تغییرات آن در شیب‌های مختلف بستر، کمتر است. نتایج بررسی‌های بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2011) نشان می‌دهد که در شیب ۰/۰۵ درصد بستر، به‌طور متوسط ضریب زبری شن شکسته تیز گوشه در حدود ۶/۲ درصد بیشتر است تا در ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه. یادآوری می‌شود که مقادیر جدول ۱ مربوط به متوسط ضریب زبری مانینگ در تمامی شرایط هیدرولیکی است.

نسبتاً گرد گوشه خواهد بود که این امر باعث افزایش نیروی پسای فشاری و در نتیجه افزایش نیروی پسای کل، یا افت انرژی، خواهد شد (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2011). در شکل ۵ مشاهده می‌گردد که متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های تیز گوشه در شیب ۰/۴ درصد از ۰/۰۱۹۹۹ به ۰/۰۲۵۶۵ در شیب ۱ درصد افزایش می‌یابد که این امر نشان‌دهنده افزایش ۲۸/۳ درصدی متوسط مقدار ضریب زبری با افزایش شیب است. برای سنگریزه‌های طبیعی، افزایش شیب باعث افزایش ۲۴/۳ درصدی ضریب زبری می‌شود. از این رو می‌توان گفت که اثر شکل ذرات بر مقدار ضریب زبری مانینگ با افزایش شیب بستر قابل توجه است. برای محاسبه درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه از رابطه ۱۱ استفاده شد:

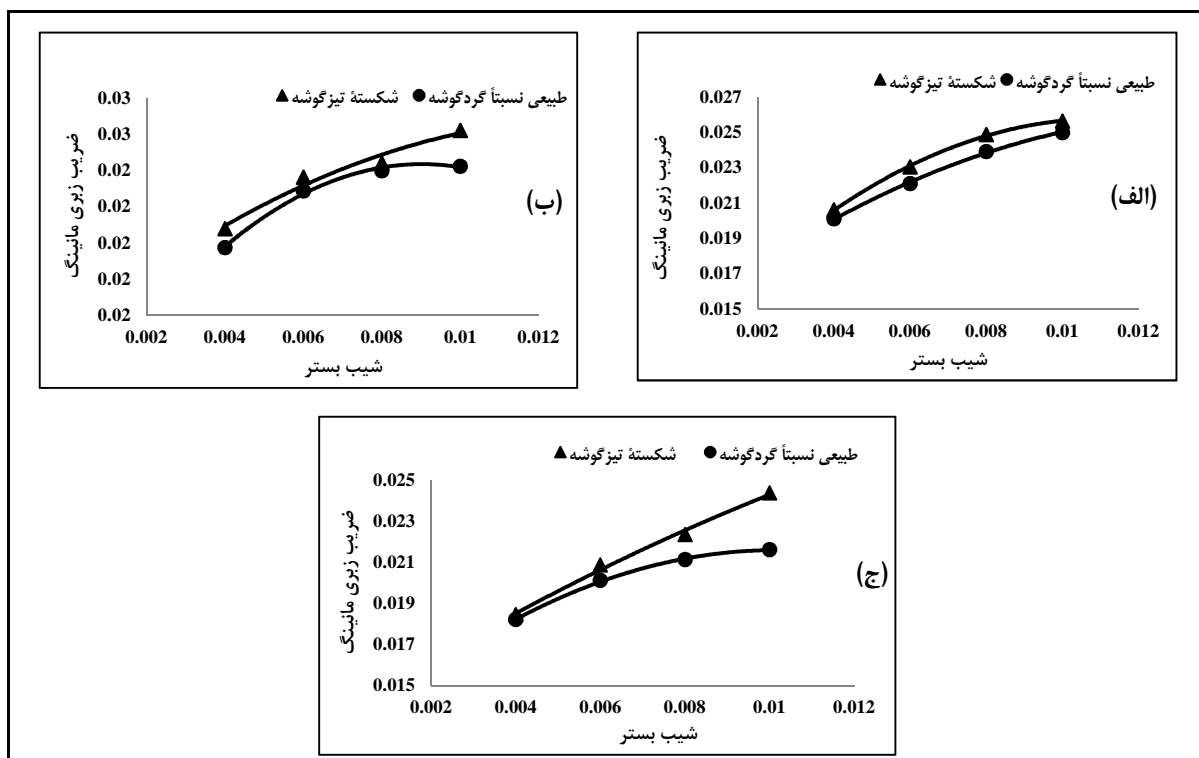
$$D = \frac{n_s - n_n}{n_s} \times 100 \quad (11)$$

که در آن،

D = درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ سنگریزه تیز گوشه نسبت به سنگریزه طبیعی نسبتاً گرد گوشه؛ n_s و n_n = به ترتیب ضریب زبری مانینگ مواد بستری تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه.

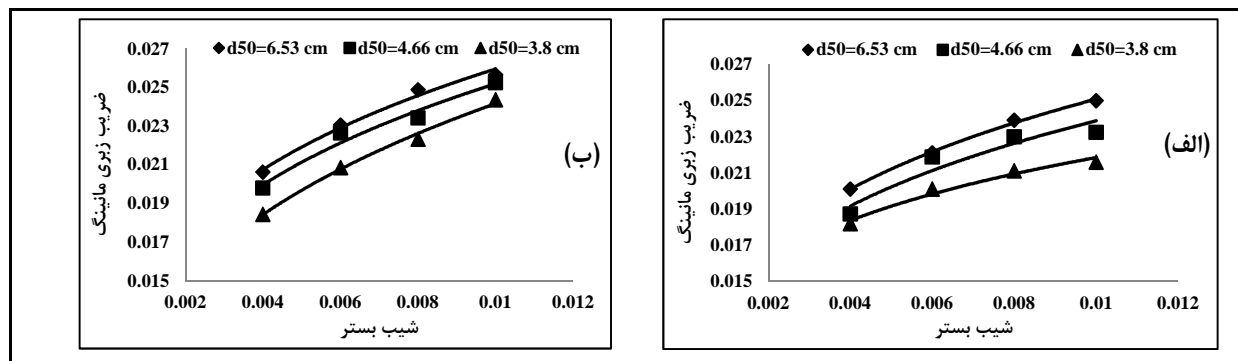
جدول ۱- متوسط درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ مواد بستری تیز گوشه نسبت به مواد طبیعی نسبتاً گرد گوشه

قطر متوسط سنگریزه (سانتی‌متر)	شیب بستر (درصد)			
	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱
متوسط	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱
۳/۸	۲/۲	۴/۲	۴/۱	۷/۸
۴/۶۶	۳/۹	۳/۴	۲/۹	۶/۹
۶/۵۳	۱/۹	۳/۵	۴/۳	۳/۱
متوسط	۲/۷	۳/۷	۳/۸	۵/۹



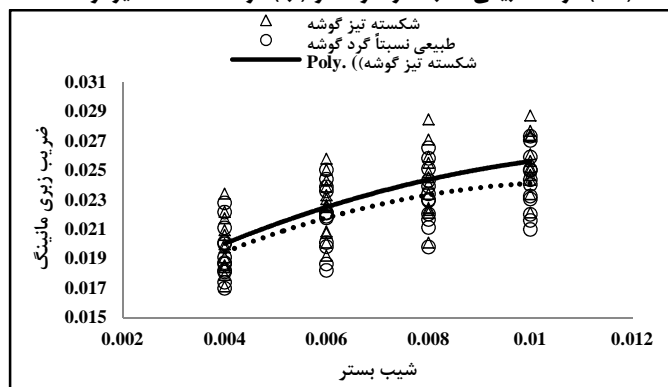
شکل ۳- تغییرات ضریب زبری مایننگ در مقابل شیب بستر به ازای دبی ثابت ۲۴ لیتر در ثانیه برای:

(الف) $d_{50}=۶/۵۳$ cm, (ب) $d_{50}=۴/۶۶$ cm و (ج) $d_{50}=۳/۸$ cm



شکل ۴- تغییرات ضریب زبری مایننگ در مقابل شیب بستر به ازای دبی ثابت ۲۴ لیتر در ثانیه برای:

(الف) ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه و (ب) ذرات شکسته تیز گوشه

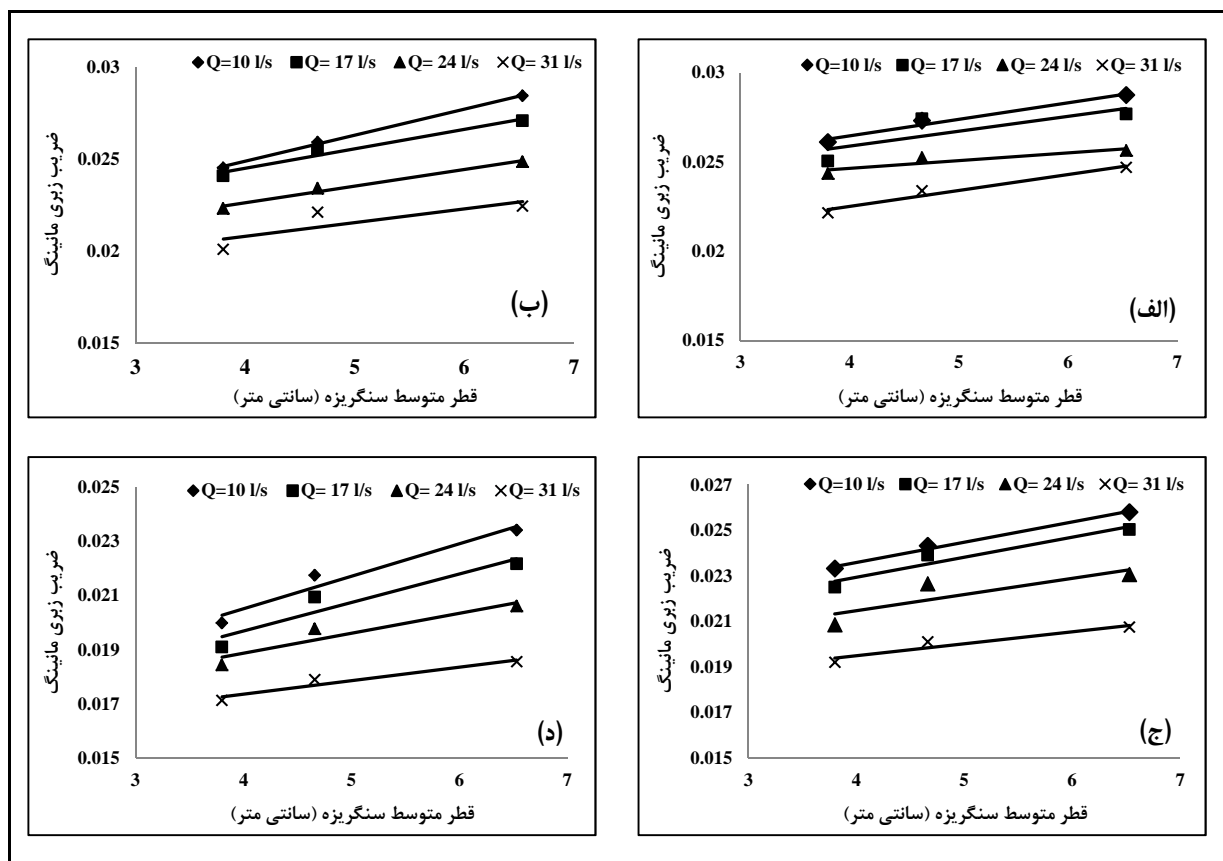


شکل ۵- تغییرات ضریب زبری مایننگ در مقابل شیب بستر برای ذرات شکسته تیز گوشه و ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه

تاثیر اندازه سنگریزه بر ضریب زبری مانینگ

نتایج بررسی تاثیر اندازه سنگریزه بر مقدار ضریب زبری مانینگ در شرایط مختلف هیدرولیکی برای نوع شکسته تیز گوشه در شکل ۶ و برای نوع نسبتاً گرد گوشه (طبیعی) در شکل ۷ ارائه شده است. وجود سنگریزه در بستر کانال، صرف نظر از شکل آن، باعث اعمال نیروهای پسای اصطکاکی و فشاری از طرف سیال بر بستر می‌گردد که با بزرگ شدن اندازه

سنگریزه‌ها مقدار این نیروها نیز افزایش می‌یابد (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2011). دلیل این موضوع آن است که با بزرگ شدن اندازه ذرات، سطحی از مواد بستر که در مقابل جریان قرار می‌گیرد افزایش می‌یابد. در نتیجه نیروهای فشاری و اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد که باعث افت بیشتر انرژی جریان و افزایش ضریب زبری مانینگ می‌شود.

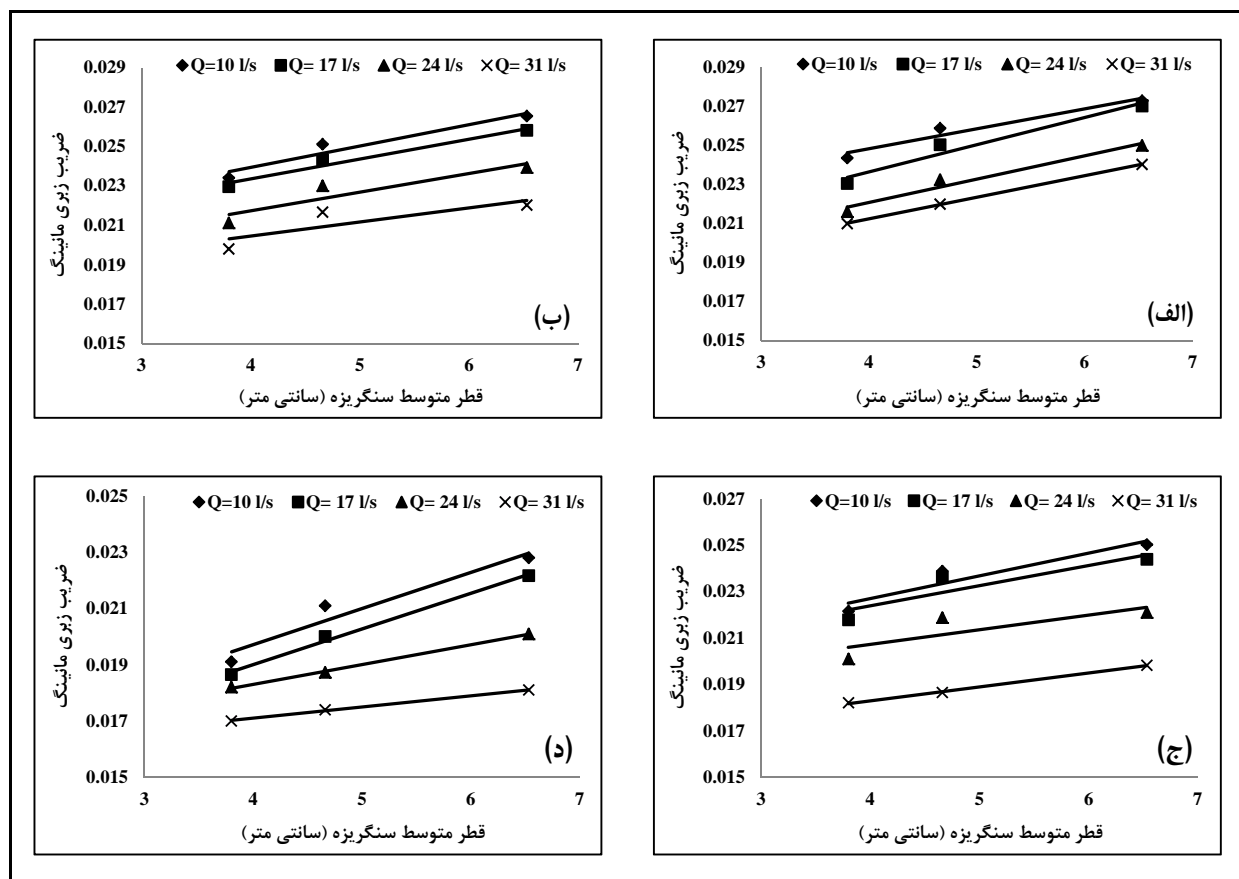


شکل ۶- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر اندازه سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه برای شیب‌های: (الف) ۱ درصد، (ب) ۰/۸ درصد، (ج) ۰/۶ درصد و (د) ۰/۴ درصد

ذرات به صورت خطی افزایش می‌یابد؛ این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیقات بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2011) برای بستر با شیب ملایم همخوانی دارد. متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ در تمامی شیب‌های بستر و

از طرفی، افت فشار ایجاد شده در ناحیه جداشدگی جریان در پشت سنگریزه‌ها توازن بین نیروهای بالادست و پایین دست را از بین می‌برد که این امر در افزایش نیروی پسای فشاری بسیار مؤثر است. مقدار ضریب زبری مانینگ با افزایش اندازه

شرایط هیدرولیکی در سنگریزه شکسته تیز گوشه با اندازه ۶/۵۳ سانتی‌متر در حدود ۱۰/۳ درصد بیشتر از مقدار آن برای سنگریزه ۳/۸ سانتی‌متری است؛ در حالی که این مقدار برای سنگریزه طبیعی نسبتاً گرد گوشه حدود ۱۱/۶ درصد است (جدول ۲).



شکل ۷- تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر اندازه سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه برای شیب‌های: (الف) ۱ درصد، (ب) ۰/۸ درصد، (ج) ۰/۶ درصد و (د) ۰/۴ درصد

جدول ۲- متوسط درصد اختلاف ضریب زبری مانینگ بزرگ‌ترین ذره (۶/۵۳ سانتی‌متری) نسبت به کوچک‌ترین آن (۳/۸ سانتی‌متری)

شکل ذره	شیب بستر (درصد)			
	متوسط	۱	۰/۸	۰/۶
تیز گوشه	۱۱/۹	۹/۳	۱۱/۵	۸/۵
طبیعی	۱۲/۳	۹/۹	۱۱/۲	۱۲/۹
متوسط	۱۲/۲	۹/۶	۱۱/۳	۱۰/۷

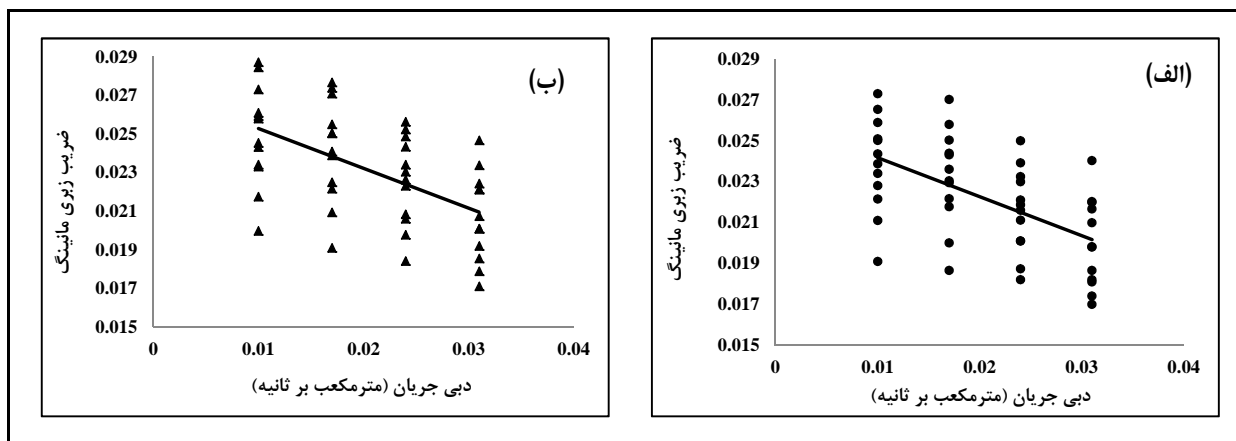
تأثیر دبی جریان بر ضریب زبری مانینگ نتایج بررسی تأثیر دبی جریان بر ضریب زبری مانینگ برای تمامی داده‌های تحقیق حاضر در شکل ۸، نشان‌دهنده کاهش مقدار ضریب زبری مانینگ با افزایش دبی جریان است که با نتایج به دست آمده از تحقیقات کیم و همکاران (Kim et al., 2010) همخوانی دارد. با افزایش دبی، سرعت جریان افزایش می‌یابد (پروفیل سرعت ضخیم می‌شود)، نقاط جدایی جریان

افزایش دبی جریان است که با نتایج به دست آمده از تحقیقات کیم و همکاران (Kim et al., 2010) همخوانی دارد. با افزایش دبی، سرعت جریان افزایش می‌یابد (پروفیل سرعت ضخیم می‌شود)، نقاط جدایی جریان

سنگریزه‌های تیز گوشه بیشتر است زیرا اختلاف فشار در دو طرف سنگریزه‌های تیز گوشه نسبت به سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه بیشتر است.

به‌طور متوسط، مقدار ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه (شکل ۸- الف) از ۰/۰۲۴۲ در دبی ۱۰ لیتر در ثانیه به ۰/۰۲۰۲ در دبی ۳۱ لیتر در ثانیه کاهش می‌یابد. به سخی دیگر با افزایش دبی، متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های طبیعی ۱۶/۶ درصد کاهش می‌یابد که این مقدار برای ذرات شکسته تیز گوشه ۱۷ درصد است. در اینجا مشاهده می‌شود که تأثیر دبی در کاهش مقدار ضریب زبری مانینگ به شکل سنگریزه‌ها بستگی ندارد.

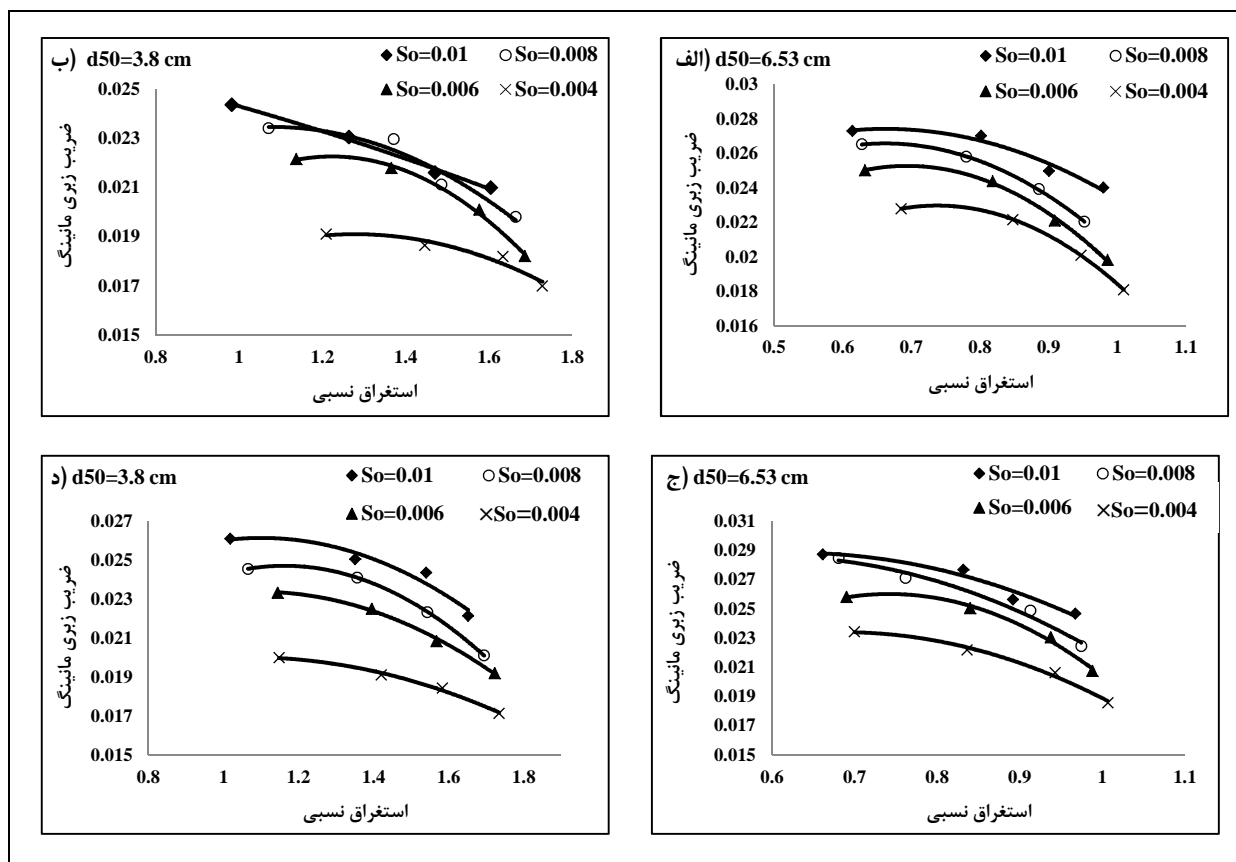
روی سطح سنگریزه‌ها دیرتر شکل می‌گیرد و ابعاد ناحیه جداولگی جریان کاهش می‌یابد که بر اثر آن نیروی پسای فشاری و در نتیجه ضریب زبری مانینگ کاهش می‌یابد (Bahrami-Yarahmadi & Shafai-Bejestan, 2011). در حالت عادی، پروفیل سرعت رو به جلو (تحدب رو به پایین دست) و گرادیان سرعت منظم است که در صورت وجود سنگریزه در بستر، یک سرعت منفی به دلیل برگشت جریان آب در اثر برخورد به سنگریزه‌ها و همچنین نیروی فشار اصطکاکی به وجود می‌آید. این تغییر سرعت روی زیر لایه پایینی (لایه روی سنگریزه‌ها) طوری است که ابتدا سرعت جریان کاهش یافته و صفر می‌شود و سپس منفی شده و پروفیل سرعت را متناسب با جریان روی سنگریزه‌ها تغییر می‌دهد؛ این تغییرات در



شکل ۸ - تغییرات ضریب زبری مانینگ در برابر دبی جریان (الف) ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه و (ب) ذرات شکسته تیز گوشه

هیدرولیکی از نظر اندازه قابل مقایسه با اندازه سنگریزه است و در شیب‌های تند حتی مقدار آن کمتر از اندازه سنگریزه نیز می‌شود. با کاهش شعاع هیدرولیکی و یا عمق آب، تلاطم جریان در اطراف سنگریزه‌ها زیاد می‌شود که این امر به افزایش نیروی پسای فشاری و افزایش ضریب زبری مانینگ می‌انجامد (Rickenmann & Recking, 2011; Zimmermann, 2010). این روند برای تمامی شیب‌های بستر یکسان است (شکل ۹).

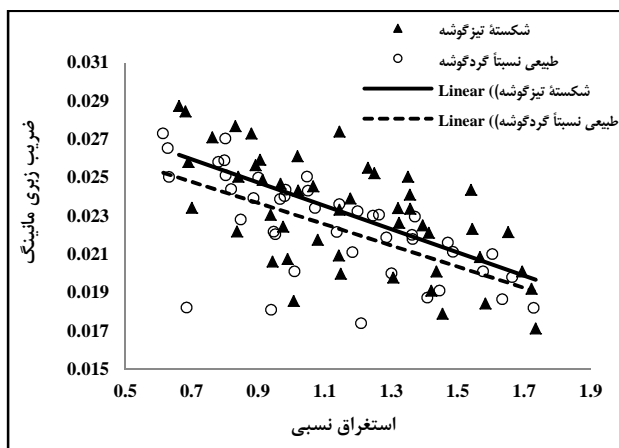
اثر استغراق نسبی (R/d_{50}) بر ضریب زبری مانینگ شکل ۹ نتایج بررسی‌های اثر استغراق نسبی بر مقدار ضریب زبری مانینگ را در شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار استغراق نسبی، مقدار ضریب زبری مانینگ کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در سنگریزه‌هایی با یک اندازه ثابت، با کاهش استغراق نسبی، مقدار شعاع هیدرولیکی جریان کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که شعاع



شکل ۹- اثر استغراق نسبی بر ضریب زبری مانینگ برای: (الف و ب) ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه و (ج و د) ذرات شکسته تیزگوشه

گردگوشه در نسبت‌های پایین استغراق بیشتر است تا در نسبت‌های بالا (شکل ۱۰). متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ در ذرات شکسته تیزگوشه برای کمترین و بیشترین مقدار استغراق نسبی به ترتیب برابر با ۰/۰۲۶۴۸ و ۰/۰۱۹۶ است که نشان‌دهنده کاهش ۲۵/۸ درصدی مقدار متوسط ضریب زبری مانینگ با افزایش استغراق نسبی است. برای ذرات طبیعی نسبتاً گردگوشه، افزایش استغراق نسبی باعث کاهش ۲۵/۲ درصدی ضریب زبری مانینگ می‌شود. به بیان دیگر، اثر استغراق نسبی بر ضریب زبری به شکل ذرات سنگریزه بستگی ندارد.

شکل ۱۰ نتایج بررسی‌های ضریب زبری مانینگ کلیه اندازه‌های سنگریزه‌های شکسته تیزگوشه و طبیعی نسبتاً گردگوشه را در شیب‌ها و شرایط مختلف هیدرولیکی نشان می‌دهد. با اینکه افزایش استغراق نسبی باعث کاهش ضریب زبری مانینگ در هر دو شکل سنگریزه می‌شود، اما نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مقدار ضریب زبری مانینگ در مقابل استغراق نسبی برای سنگریزه شکسته تیزگوشه بیشتر است تا در سنگریزه طبیعی نسبتاً گردگوشه. اختلاف در مقدار ضریب زبری مانینگ بین ذرات شکسته تیزگوشه و طبیعی نسبتاً

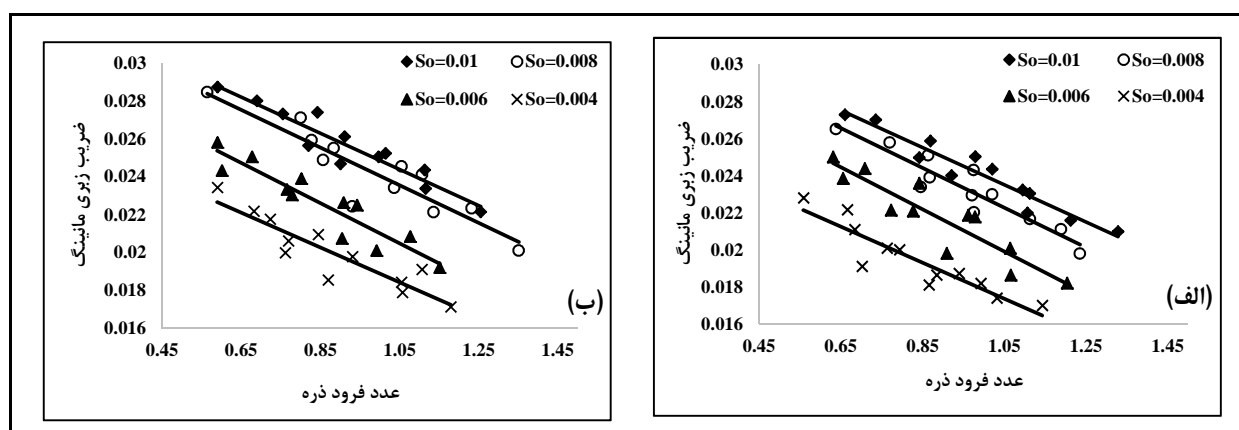


شکل ۱۰- تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل استغراق نسبی برای ذرات شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه

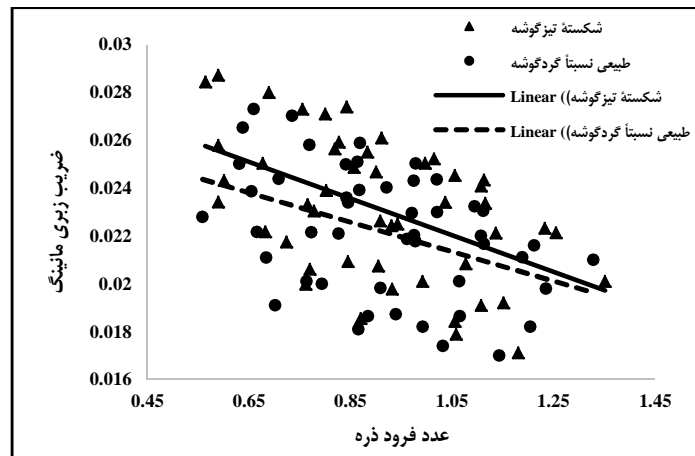
سرعت جریان و کاهش اندازه سنگریزه، مقدار آن افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش سرعت جریان و کاهش اندازه سنگریزه، ابعاد ناحیه جداسازی جریان کاهش می‌یابد که در اثر آن نیروی پسای فشاری و در نتیجه ضریب زبری مانینگ کاهش خواهد یافت. همچنین، شکل ۱۲ نشان می‌دهد که مقدار ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه بیشتر از ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه است که با افزایش عدد فرود ذره این اختلاف کاهش می‌یابد.

اثر عدد فرود ذره (F_g) بر ضریب زبری مانینگ

نتایج بررسی تأثیر عدد فرود ذره (F_g) بر ضریب زبری مانینگ برای سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه در شکل ۱۱ ارائه شده است. در اینجا مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود ذره، مقدار ضریب زبری مانینگ در هر دو نوع سنگریزه طبیعی نسبتاً گرد گوشه (شکل ۱۱- الف) و شکسته تیز گوشه (شکل ۱۱- ب) کاهش می‌یابد. یادآوری می‌شود که عدد فرود ذره با سرعت جریان رابطه مستقیم و با مجذور اندازه ذره رسوبی رابطه عکس دارد؛ از این رو با افزایش



شکل ۱۱- اثر عدد فرود ذره بر ضریب زبری مانینگ برای: (الف) ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه و (ب) ذرات شکسته تیز گوشه



شکل ۱۲- تغییرات ضریب زبری مانینگ در مقابل عدد فرود ذره برای ذرات شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه

نتیجه‌گیری

- متوسط ضریب زبری مانینگ ذرات شکسته تیز گوشه در اندازه‌های ۶/۵۳، ۴/۶۶ و ۳/۸ سانتی‌متر در حدود ۳/۲، ۴/۳ و ۴/۶ درصد بیشتر از ضریب زبری مانینگ ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه است.

- افزایش استغراق نسبی باعث کاهش ۲۵/۸ درصدی ضریب زبری مانینگ در ذرات شکسته تیز گوشه و کاهش ۲۵/۲ درصدی در ذرات طبیعی نسبتاً گرد گوشه می‌شود.

- متوسط ضریب زبری مانینگ با افزایش دبی جریان در محدوده ۱۰ تا ۳۱ لیتر در ثانیه، برای ذرات شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه در حدود ۱۷ درصد کاهش می‌یابد.

- با افزایش شیب بستر از ۰/۴ تا ۱ درصد، متوسط ضریب زبری مانینگ در ذرات شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه به ترتیب ۲۸/۳ و ۲۴/۳ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش عدد فرود ذره، مقدار ضریب زبری مانینگ کاهش می‌یابد. اثر شکل ذرات بر ضریب زبری مانینگ در شیب‌های تند و استغراق‌های نسبی کم (زبری با مقیاس بزرگ) قابل توجه است.

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی اثر شیب بستر، استغراق نسبی، عدد فرود ذره، اندازه سنگریزه و به‌ویژه شکل ذرات سنگریزه بسیار درشت بر ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌های کوهستانی است. برای رسیدن به این هدف از ۳ اندازه سنگریزه، ۲ نوع شکل شکسته تیز گوشه و طبیعی نسبتاً گرد گوشه و چهار شیب در محدوده شیب‌های تند و چهار دبی جریان استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که:

- ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه بیشتر از ضریب زبری مانینگ در سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه است که با افزایش شیب بستر، کاهش استغراق نسبی و کاهش اندازه ذرات سنگریزه، اختلاف آن زیاد می‌شود.

- متوسط مقدار ضریب زبری مانینگ سنگریزه‌های شکسته تیز گوشه در شیب‌های ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد به ترتیب در حدود ۲/۷، ۳/۷، ۳/۸ و ۵/۹ درصد بیشتر از مقدار آن در سنگریزه‌های طبیعی نسبتاً گرد گوشه است.

مراجع

Aberle, J. and Smart, G. M. 2003. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. J. Hydraul. Res. 41(3): 259-269.

- Aberle, J., Dittrich, A. and Nestmann, F. 1999. Estimation of gravel bed river flow resistance. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 125(12):1315-1319.
- Bahrami-Yarahmadi, M. and Shafai-Bejestan, M. 2011. Experimental investigation of the effect of sediment particle shapes on Manning's coefficient. *J. Water Soil*. 25(1): 51-60. (in Persian)
- Bathurst, J. C. 1985. Flow resistance estimation in mountain rivers. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 111(4): 625-643.
- Bathurst, J. C. 2002. At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *J. Hydrol*. 269(1-2): 11-26.
- Bathurst, J. C., Li, R. H. and Simons, D. B. 1981. Resistance equation for large-scale roughness. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 107(12): 1593-1613.
- Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resour. Res*. 43(5):1-12.
- Habibi, M., Namaee, M. R. and Saneie, M. 2014. An experimental investigation to calculate flow resistance in a steep river. *KSCE J. Civil Eng*. 18(4): 1176-1184.
- Jarrett, R. D. 1984. Hydraulics of high gradient streams. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 110(11): 1519-1539.
- Kim, J. S., Lee, C. J., Kim, W. and Kim, Y. J. 2010. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Sci. Eng*. 3(2): 217-232.
- Nitsche, M. 2012. Macro-roughness, flow resistance and sediment transport in steep mountain streams. Ph. D. Thesis. University of Leipzig. Zurich. German.
- Palt, S. M. 2001. Sediment transport processes in the Himalayan Karakoram and its importance for hydro power plants. Ph. D. Thesis. University of Karlsruhe. Karlsruhe. German.
- Prakash, H. 2014. Prediction of flow resistance in gravel bed river. *Int. J. Eng. Tech. Res. (IJETR)*. 2(4): 155-159.
- Reid, D. E. and Hickin, E. J. 2008. Flow resistance in steep mountain streams. *Earth Surf. Proc. Land*. 33(14): 2211-2240.
- Rickenmann, D. and Recking, A. 2011. Evaluation of flow resistance in gravel-bed streams through a large field data set. *Water Resour. Res*. 47(7): 1-22.
- Shafai-Bejestan, M. 2013. *Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport (2nd Ed.)*. Shahid Chamran University Press. Ahvaz. Iran. (in Persian)
- Shafai-Bejestan, M. 2012. *Basic Concepts and Applications of Physical-Hydraulic Modeling*. Shahid Chamran University of Ahvaz Press. Ahvaz. Iran. (in Persian)
- Zimmermann, A. 2010. Flow resistance in steep streams: an experimental study. *Water Resour. Res*. 46(9):1-18.

Investigation on the Effect of Gravel Particles Shape on Manning's Roughness Coefficient in Mountain Rivers

M. Hemmati* and V. Mostafa

* Corresponding Author: Assistant professor, Water Engineering Department of Agriculture Faculty, Urmia University, Urmia, Iran. Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

Received: 10 November 2015, Accepted: 9 March 2016

Flow resistance equations are a classical component of river hydraulic analysis, required for such applications as flood routing, prediction of flow depths and velocities in the design of floods conveyance structures, channel flood capacity estimation and the indirect estimation of flood discharges by the slope-area technique. In this research the effect of particle shape and bed slope of channel on Manning's roughness coefficient have been investigated experimentally. To achieve this aim, two types of gravels (natural and crushed shapes) with three average gravel sizes (3.8, 4.66 and 6.53 cm), four bed slopes (0.004, 0.006, 0.008 and 0.01) were used under different hydraulic conditions. The results showed that as the gravel size and bed slope increases or the relative submergence decreases, the Manning's roughness coefficient (n) increases. Moreover, the results revealed that the average value of Manning's roughness coefficient (n) of crushed gravels were by 2.7, 3.7, 3.8 and 5.9 percent more than natural gravels in the bed slopes of 0.004, 0.006, 0.008 and 0.01, respectively. Also, the difference between the values of Manning's roughness coefficients (n) for crushed and natural particles increased by decreasing relative submergence and increasing bed slope. In other words, the effect of particle shape on Manning's roughness coefficient is applicable in steep slopes and low relative submergences (large-scale roughness).

Keywords: Crushed, Gravel, Manning's Roughness Coefficient, Mountain Rivers, Shape Factor