

بررسی آزمایشگاهی تأثیر رسوب‌گذاری بر ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی

علیرضا عسکری نژاد^۱، سید علی ایوب‌زاده^{۲*} و جمال محمودولی سامانی^۳

چکیده

همیشه دقت در اندازه‌گیری جریان آب یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آبی است. انتقال رسوبات بستر و جداره رودخانه‌های آبرفتی در حوضه‌های آبریز و ورود آن‌ها به درون کانال‌ها سبب می‌شود رسوبات در پشت سازه‌های اندازه‌گیری جریان آب قرار گرفته و روی عملکرد این سازه‌ها تأثیر گذارند. روابطی که تاکنون براساس نتایج آزمایشگاهی برای ضریب شدت جریان سرریزها ارائه شده، در شرایط بدون رسوب استخراج و توسعه داده شده است. در این پژوهش به بررسی تأثیر رسوب‌گذاری بر ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی پرداخته شد. تعداد ۲۸۸ مورد آزمایش با در نظر گرفتن شش زاویه راس سرریز (۷۵، ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه)، سه ارتفاع سرریز متناسب با هر زاویه، چهار تراز رسوب‌گذاری شامل بستر بدون رسوب، تراز رسوبات معادل یک سوم، دو سوم و برابر با ارتفاع سرریز و چهار شیب بستر جریان (۰، ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴ درصد) انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بین ضریب شدت جریان با زوایای سرریز، ترازهای رسوب‌گذاری و شیب بستر جریان رابطه مستقیم و با ارتفاع سرریز رابطه عکس وجود دارد. در نهایت رابطه بدون بعدی برای تعیین ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی در حالت‌های مختلف رسوب‌گذاری پیشنهاد شد. این رابطه دارای ضریب تبیین بالایی ($R^2=0/956$) است.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌گذاری، سرریز مثلثی، شیب بستر، ضریب شدت جریان.

ارجاع: عسکری نژاد ع. ایوب‌زاده س. ع. و محمودولی سامانی ج. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی تأثیر رسوب‌گذاری بر ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۸: ۱۱-۲۰.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسئول: ayyoub@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۳

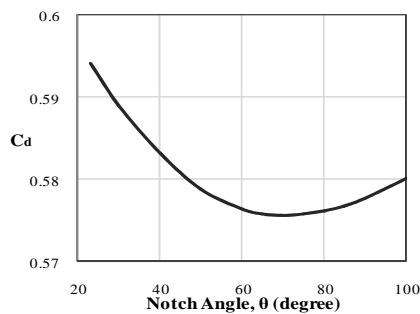
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۴

مقدمه

همچنین مقادیر C_d را بر اساس زاویه سرریز مطابق شکل ۱ ارائه نمود.

جدول ۱- تقسیم بندی و محدوده کاربرد سرریزهای لبه تیز مثلثی (باس، ۱۹۷۶)

سرریز با فشردگی جزئی	سرریز با فشردگی کامل
$\frac{H_d}{P} \leq 1.2$	$\frac{H_d}{P} \leq 0.4$
$\frac{H_d}{B} \leq 0.4$	$\frac{H_d}{B} \leq 0.2$
$0.05 \leq H_d \leq 0.6m$	$0.05 \leq H_d \leq 0.38m$
$P \geq 0.1m$	$P \geq 0.45m$
$B \geq 0.6m$	$B \geq 0.9m$



شکل ۱- رابطه مقادیر C_d با زاویه راس سرریز برای سرریزهای با فشردگی کامل (باس، ۱۹۷۶)

رانگاراچو و آسوا (۱۹۷۷) با بررسی انجام شده روی سرریز مثلثی ۹۰ درجه، با وارد کردن کمیت K_H در رابطه اصلی دبی جریان، اثرات کشش سطحی و لزجت را در نظر گرفتند که متناسب با مقادیر عدد رینولدز و وبر به صورت $W_e^{0.6} Re^{0.2}$ است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها هنگامی که مقدار مذکور از ۹۰۰ بیشتر شود اثر کشش سطحی و لزجت محسوس نیست. راسخ (۱۳۸۳) به بررسی اثر لزجت و کشش سطحی در سرریزهای مثلثی پرداخت. وی با استفاده از ۴ سرریز با زوایای ۳۱، ۶۲، ۹۳ و ۱۲۲ درجه، رابطه ضریب شدت جریان را به صورت زیر ارائه کرد:

$$C_d = K_H \left[0.58 + 6.7 \times 10^{-4} q + (10^{-4} q + 0.01) \left(\frac{H_d}{P} \right) \right] \quad (۴)$$

عابری فروتن (۱۳۸۲) با استفاده از خاک اره با مشخصات $d_{50} = 0.192 \text{ mm}$ و $s_g = 1.68$ (چگالی ذرات، d_{50} قطر متوسط ذرات و s_g انحراف معیار است) به عنوان مناسب‌ترین ماده رسوبی غیرچسبنده به بررسی تأثیر بار معلق بر ضریب شدت جریان سرریزهای مستطیلی پرداخت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های وی

حفظ و مدیریت منابع آبی مستلزم کاهش تلفات آب، افزایش بهره‌وری و توزیع مناسب آب است. یکی از مباحث اصلی در استفاده بهینه از منابع آبی، استفاده از وسایل اندازه‌گیری با دقت مناسب است (هرسچی، ۲۰۰۰). برای تعیین میزان جریان عبوری از مجاری طبیعی و مصنوعی روش‌های گوناگونی ارائه شده که در این میان، استفاده از سرریزها کاربرد بیشتری دارد. سرریزها از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌ها در سازه‌های آبی بوده و بنا به موارد کاربردشان دارای درجه اهمیت هستند. یکی از انواع سازه‌های سرریز، سرریزهای مثلثی بوده که با سطح مقطع به نسبت کوچک‌تر و حساسیت بیشتر نسبت به تغییر ارتفاع آب در اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها و حوضه‌های آبریز دارای کاربرد بیشتری هستند (چانسون، ۲۰۰۴). جریان آب در بسیاری از کانال‌ها و رودخانه‌ها بیشتر دارای رسوبات است. این رسوبات در اثر وقوع فرسایش بستر و جداره مجاری طبیعی و در برخی از موارد با سیلاب به حرکت در می‌آیند. انتقال و انباشته شدن رسوبات در بالادست محل نصب سازه‌های اندازه‌گیری جریان از جمله سرریزها سبب تغییر خصوصیات آب‌گذری سرریزها می‌شود (اوگدن و همکاران، ۲۰۱۱). رابطه کلی دبی جریان ارائه شده برای سرریزهای مثلثی به صورت زیر است (کلمنز و همکاران، ۲۰۰۱):

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_d^{2.5} \quad (۱)$$

در این معادله Q دبی جریان، C_d ضریب شدت جریان، g شتاب ثقل، θ زاویه سرریز و H_d عمق آب روی سرریز است. باس (۱۹۷۶) با وارد کردن کمیت K_H در مقدار عمق آب روی سرریز، اثرات خاصیت سیال را بر اساس رابطه زیر ارائه کرد:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_{de} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H_{de}^{2.5} \quad (۲)$$

$$H_{de} = H_d + K_h \quad (۳)$$

مقادیر K_h به صورت تابعی از زاویه سرریز هستند. باس (۱۹۷۶) سرریزهای لبه تیز مثلثی را به دو دسته با فشردگی کامل و جزئی تقسیم کرد که در جدول ۱ نحوه تقسیم‌بندی و محدوده‌های هر دسته نشان داده شده است (در این جدول P ارتفاع سرریز، B عرض کانال است).

متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر انجام شد. دیواره‌های فلوم مورد نظر از جنس شیشه که قابلیت مشاهده جریان از دو طرف را داشته و کف آن نیز فلزی بوده است. فلوم مذکور قابلیت شیب‌پذیری از ۰/۵- تا ۲/۵+ درصد را داشت. بر اساس شکل ۲ قسمت ورودی فلوم به طول ۱/۳۵ متر به سمت عرض ۰/۳ متر همگرا شده که این قسمت برای آرام ساختن جریان در ورودی فلوم آماده شده است. جریان آب که از پمپ سانتریفیوژ به قسمت ابتدایی فلوم جریان می‌یابد، در انتهای فلوم به مخزنی مکعب مستطیل شکل می‌ریزد که این مخزن از جداره کناری به مخزن دیگری متصل شده و آب را در یک سیستم بسته با پمپ سانتریفیوژ به ابتدای فلوم منتقل می‌کند. برای اندازه‌گیری دبی جریان، از یک دبی سنج مغناطیسی^۱ با دقت $\pm 5\%$ درصد روی بخش لوله رانش پمپ همراه با مقداری فاصله از آن برای عدم تأثیرپذیری از جریان متلاطم استفاده شد. برای اندازه‌گیری عمق آب نیز از یک عمق‌سنج^۲ با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد.

آنالیز ابعادی

ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی در حالت رسوب‌گذاری تابعی از پارامترهای مختلفی است که می‌توان آن را به صورت زیر نشان داد:

$$C_d = f(q, H, P, P_s, B, Q, r, m, S, g, S) \quad (5)$$

که در این معادله θ زاویه سرریز، H عمق آب روی سرریز، P ارتفاع راس معکوس تا کف سرریز، P_s ارتفاع رسوب‌گذاری، B عرض کانال، Q دبی جریان، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، σ کشش سطحی، g شتاب ثقل و S شیب بستر جریان است. بر اساس تئوری آنالیز ابعادی و قضیه باکینگهام و همچنین ترکیب کمیت‌های بدون بعد خواهیم داشت:

$$C_d = f(q, Re, W_e, \frac{H}{P}, \frac{P}{B}, \frac{P_s}{P}, S) \quad (6)$$

از آنجا که در آزمایش‌های انجام شده مقادیر عمق آب روی سرریز و عدد رینولدز از حداقل مجاز مربوط به تأثیرگذاری کشش سطحی و لزجت بیشتر بوده، از اعداد وبر و رینولدز صرف نظر می‌شود. همچنین به جای نسبت ارتفاع رسوب‌گذاری به ارتفاع سرریز (P_s/P) از کمیت

نشان می‌دهد که مقدار ضریب شدت جریان دارای بار معلق تحت بار آبی یکسان، نسبت به آب صاف بیشتر است. گوهری اسدی (۱۳۸۳) تأثیر بار معلق بر ضریب شدت جریان سرریز جانبی را بررسی کرد. بر اساس آنالیز ابعادی، ضریب شدت جریان سرریز جانبی در شرایط بار معلق (C_{ds}) به صورت تابعی از عدد فرود بالادست (F_{r1})، عمق نسبی (H_d/P) و غلظت جریان دارای بار معلق (X) به صورت زیر است:

$$C_{ds} = 0.7 - 0.061F_{r1} - 0.15\frac{H_d}{P} + 2 \times 10^{-5} X \quad (5)$$

دیزجی و محمودخانی (۱۳۸۸) نیز تأثیر بار معلق روی سرریز مثلثی ۶۰ و ۹۰ درجه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار ضریب شدت جریان در حالت بار معلق نسبت به حالت آب صاف کم شده است. اوگدن و همکاران (۲۰۱۱) با انجام آزمایش روی سرریز مثلثی ۱۴۰ درجه در حالت رسوب‌گذاری کامل پشت سرریز در شیب بستر جریان ۰، ۱، ۲، ۳ درصد، مشاهده کردند که مقدار ضریب شدت جریان در حالت رسوب‌گذاری کامل نسبت به حالت بدون رسوب افزایش چشم‌گیری داشته و همچنین شیب بستر جریان با ضریب شدت جریان رابطه مستقیم برقرار کرده است. بیشتر طراحان و مهندسين سرریزهای اندازه‌گیری جریان را بر اساس شرایط بدون رسوب طراحی می‌کنند و اثر پدیده رسوب‌گذاری پشت سرریز را در نظر نمی‌گیرند. حال آنکه امکان جداسازی کامل این رسوبات از آب وجود ندارد. در نتیجه با ته‌نشین شدن رسوبات در پشت سازه‌های اندازه‌گیری جریان، از دقت آن‌ها کم می‌شود (عسکری‌نژاد، ۱۳۹۲).

بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون فقط در یک پژوهش آن هم به صورت محدود (یک مورد آزمایش) توسط اوگدن و همکاران (۲۰۱۱) اثر رسوبات ته‌نشین شده پشت سرریز مثلثی بررسی شده است. در این پژوهش برای نخستین بار تأثیر پارامترهای مختلفی مانند تراز رسوب‌گذاری، زاویه سرریز، ارتفاع سرریز و شیب بستر جریان بر ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی (در ۲۸۸ مورد آزمایش) به صورت گسترده بررسی شده است (عسکری‌نژاد، ۱۳۹۲).

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس و در فلومی با مقطع مستطیل شکل به طول ۱۰

1- Electro Magnetic Flow meter

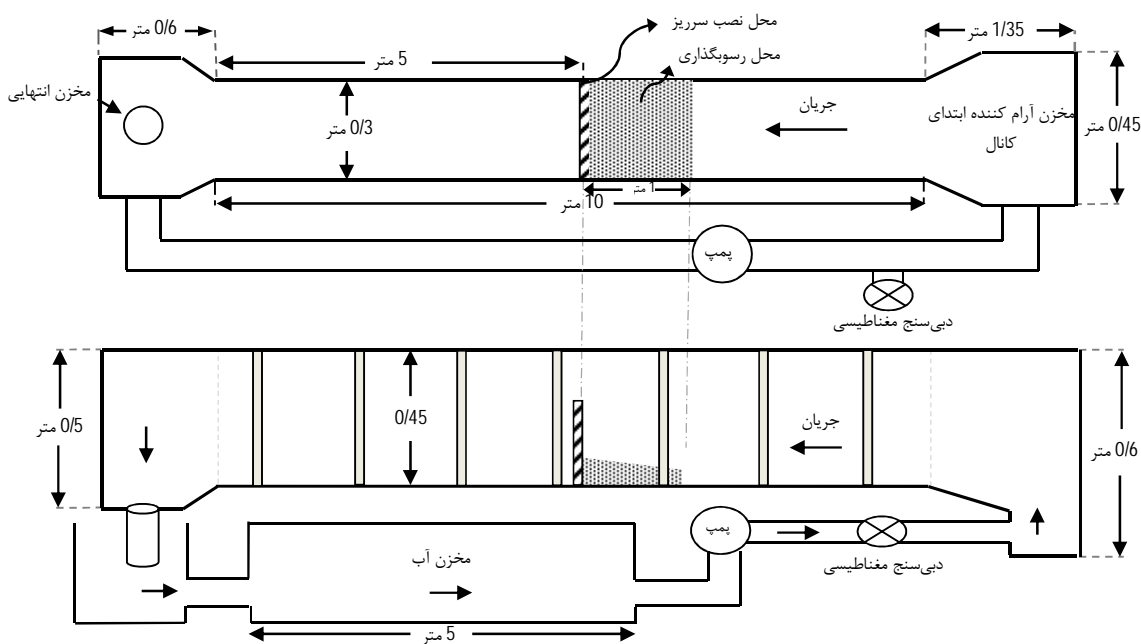
2- Point gauge

رسوب‌گذاری چهار حالت مختلف رسوب‌گذاری به ترتیب بستر بدون رسوب، معادل یک‌سوم، دو سوم و برابر با ارتفاع سرریز ($P_s^* = 0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1$) در هر یک از آزمایش‌ها ایجاد شد در شکل ۳ نحوه توزیع رسوبات در پشت سرریز به صورت شماتیک نشان داده شده است، کلیه این حالت‌ها با توجه به فرآیند رسوب‌گذاری در مقاطع زمانی مختلف در نظر گرفته شده است.

درجه رسوب‌گذاری (P_s^*) استفاده می‌شود. بنابراین معادله نهایی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C_d = f\left(q, \frac{H}{P}, \frac{P}{B}, P_s^*, S\right) \quad (7)$$

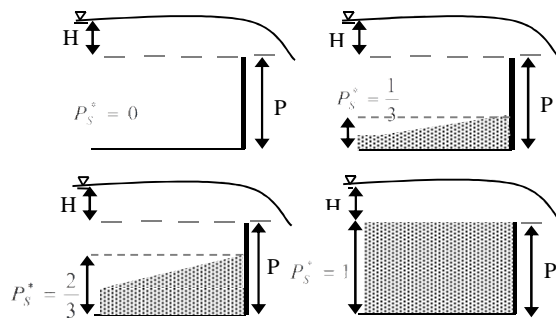
برای به دست آوردن رابطه نهایی ضریب شدت جریان تحت تأثیر رسوب‌گذاری، از ۶ زاویه سرریز به ترتیب ۷۵، ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه به همراه سه سرریز با ارتفاع متناسب با هر یک از زوایای راس سرریز (بر اساس جدول ۲) استفاده شد. برای شبیه‌سازی فرآیند



شکل ۲- پلان و پروفیل طولی فلوم مورد استفاده

جدول ۲- ابعاد سرریزهای مورد آزمایش

۱۴۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۰۵	۹۰	۷۵	$\theta(^{\circ})$
۱۲۰، ۲۰۶، ۲۹۶	۱۲۶، ۱۹۷، ۲۸۱	۱۲۱، ۱۸۶، ۲۶۵	۱۲۰، ۱۶۷، ۲۳۷	۱۰۵، ۱۵۵، ۲۰۲	۱۱۳، ۱۵۸، ۲۰۸	P(mm)



شکل ۳- نحوه توزیع رسوبات در پشت سرریز

(۱۸/۵ پاسکال)، قطر اندازه ذراتی که سبب عدم قرارگیری در آستانه حرکت ذره و ساکن ماندن می‌شود برابر با ۲ سانتی‌متر به دست آمد. مقدار عدد رینولدز ذره در آزمایش‌ها در شرایطی که بیشترین احتمال جابه‌جایی ذرات وجود داشت برابر با ۲۷۸۷ به دست آمد. با توجه به درشت بودن ذرات رسوبی مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها، پس از تهیه حجم زیادی از رسوبات با قطر درشت‌دانه از مصالح کارگاهی و همچنین ساخت دو الک دستی در آزمایشگاه به ترتیب با قطرهای ۲/۵ و ۲ سانتی‌متری مشبک، با عبور دادن رسوبات درشت دانه از الک ۲/۵ سانتی‌متری و سپس الک ۲ سانتی‌متری، آنچه که در روی الک ۲ سانتی‌متری باقی ماند به عنوان ذرات رسوبی استفاده شد.

کلیه آزمایش‌ها در چهار شیب بستر جریان (۰، ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴ درصد) انجام شد که در کل ۲۸۸ آزمایش و در مجموع ۳۳۲۲ داده عمق آب روی سرریز (H) و دبی معادل با آن از آزمایش‌ها به دست آمد. دامنه متغیرهای این پژوهش در جدول ۳ نشان داده شده است. برای انتخاب مصالح رسوبی با توجه به این نکته که رسوبات نباید در آستانه حرکت قرار گیرند تا شرایط کامل ته‌نشین شدن رسوب پشت سرریز برقرار شود، بر اساس نظریه شیلدز و منحنی آستانه حرکت ارائه شده از سوی ایشان، اندازه ذرات رسوبی که در شرایط سکون جریان باشند مشخص شد (شفاعی بجنستان، ۱۳۹۲). بر اساس نظریه شیلدز مقدار عدد شیلدز در شرایط آستانه حرکت برابر با ۰/۰۵۶ است. بنابراین با محاسبه مقدار تنش برشی جریان

جدول ۳- دامنه متغیرهای آزمایش

متغیر	$\theta(^{\circ})$	P(mm)	P_s (mm)	S(%)	Q(L/s)	H (mm)	τ (Pa)
دامنه تغییرات	۷۵-۱۴۰	۱۰۶-۲۹۶	۰-۲۹۶	۰-۲/۴	۰/۳-۱۶/۳	۲۱-۱۷۸	۰/۰۱-۱۸

نتایج و بحث

تأثیر زاویه سرریز (θ)

بستر جریان در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۴ با افزایش شیب بستر جریان از میزان درصد افزایش‌ها کاسته می‌شود به طوری که برای حالت‌های بدون رسوب و رسوب‌گذاری کامل این مقادیر به ۷/۱ و ۱۱ درصد می‌رسند. عدم مشاهده روند افزایشی یا کاهشی درصد اختلاف‌ها در ترازهای رسوب‌گذاری $P_s^* = \frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ به واسطه شکل توزیع رسوب و تلاطم جریان در پشت سرریز است که این شرایط در بستر جریان دو حالت دیگر به ثبات رسیده‌اند.

نمودارهای شکل ۴ تغییرات ضریب شدت جریان (C_d) را در مقابل نسبت عمق آب روی سرریز به ارتفاع سرریز (H/P) برای چهار تراز رسوب‌گذاری در زوایای راس سرریز ۷۵ الی ۱۴۰ درجه و در شیب بستر جریان صفر نشان می‌دهند. با توجه به این نمودارها با افزایش زاویه سرریز در تمامی حالت‌ها رسوب‌گذاری میزان ضریب شدت جریان افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار متوسط ضریب شدت جریان در زاویه ۱۴۰ درجه نسبت به زاویه ۷۵ درجه برای حالت‌های بدون رسوب و رسوب‌گذاری کامل به ترتیب برابر با ۸/۳ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به آنکه با افزایش زاویه رأس سرریز از میزان فشردگی حاصل از طراحی در قسمت ۷ شکل سرریز کم می‌شود، بنابراین سیال با اصطکاک کمتری از مجرای طراحی شده عبور می‌کند. برای دیگر شیب‌های بستر جریان (۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴ درصد) نمودارهای مذکور ترسیم شده که با توجه به مشاهده روند مستقیم تأثیرگذاری و به دلیل حجم بالای داده‌ها و نمودارهای ترسیم شده، مقادیر متوسط افزایش ضریب شدت جریان در زاویه ۱۴۰ درجه نسبت به ۷۵ درجه برای تمامی حالت‌های رسوب‌گذاری و شیب‌های

جدول ۴- مقادیر متوسط درصد افزایش ضریب شدت جریان زاویه ۱۴۰ درجه نسبت به ۷۵ درجه

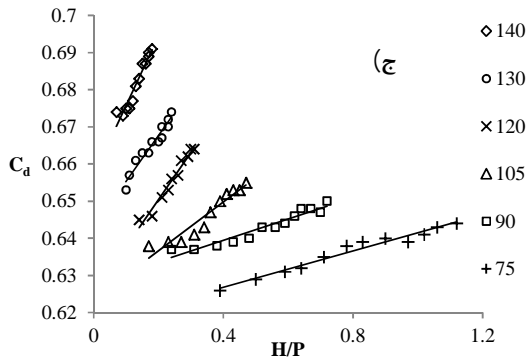
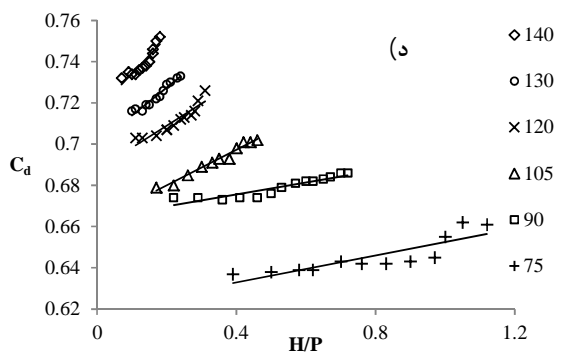
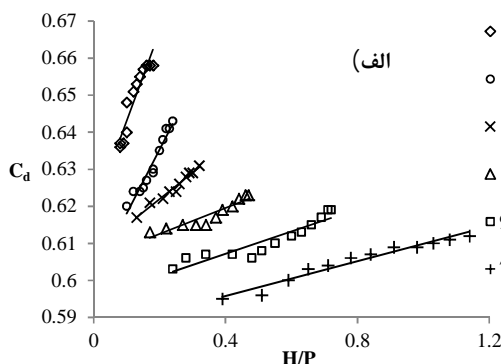
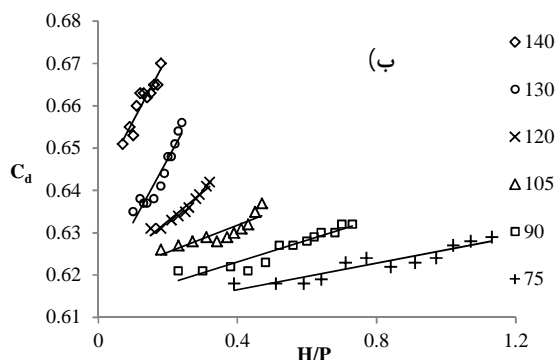
پارامتر	$P_s^* = 0$	$P_s^* = \frac{1}{3}$	$P_s^* = \frac{2}{3}$	$P_s^* = 1$
S=0	۸/۵	۸	۶/۱	۱۴
S=0.8%	۷/۸	۸	۷/۸	۱۳/۳
S=1.6%	۷/۴	۶/۵	۶/۳	۱۰/۸
S=2.4%	۷/۱	۷/۲	۷/۵	۱۱

تأثیر ارتفاع سرریز (P)

همان‌طور که گفته شد یکی از عوامل مؤثر در ضریب شدت جریان، ارتفاع سرریز است. با توجه به شکل ۵ که

کامل پشت سرریز، ارتفاع‌های مختلف سرریز تأثیری بر ضریب شدت جریان نمی‌گذارند. در بیشترین حالت تأثیرگذاری آزمایش شده، دیده شد که افزایش ارتفاع سرریز از نسبت بی‌بعد ارتفاع سرریز به عرض کانال (P/B) ۰/۳۵ به ۰/۶۸ سبب کاهش ۵/۶ درصدی در میزان ضریب شدت جریان در شرایط بستر بدون رسوب می‌شود.

تغییرات ضریب شدت جریان تحت تأثیر سه ارتفاع سرریز مختلف برای سرریز با زاویه ۹۰ درجه در شیب بستر جریان ۱/۶ درصد است، دیده می‌شود که ضریب شدت جریان با ارتفاع سرریز رابطه معکوس دارد. با افزایش تراز رسوب‌گذاری و ته‌نشینی بیشتر رسوبات در پشت سرریز براساس شکل ۵ از میزان اثرگذاری ارتفاع سرریز بر ضریب جریان کاسته شده به طوری که در حالت رسوب‌گذاری



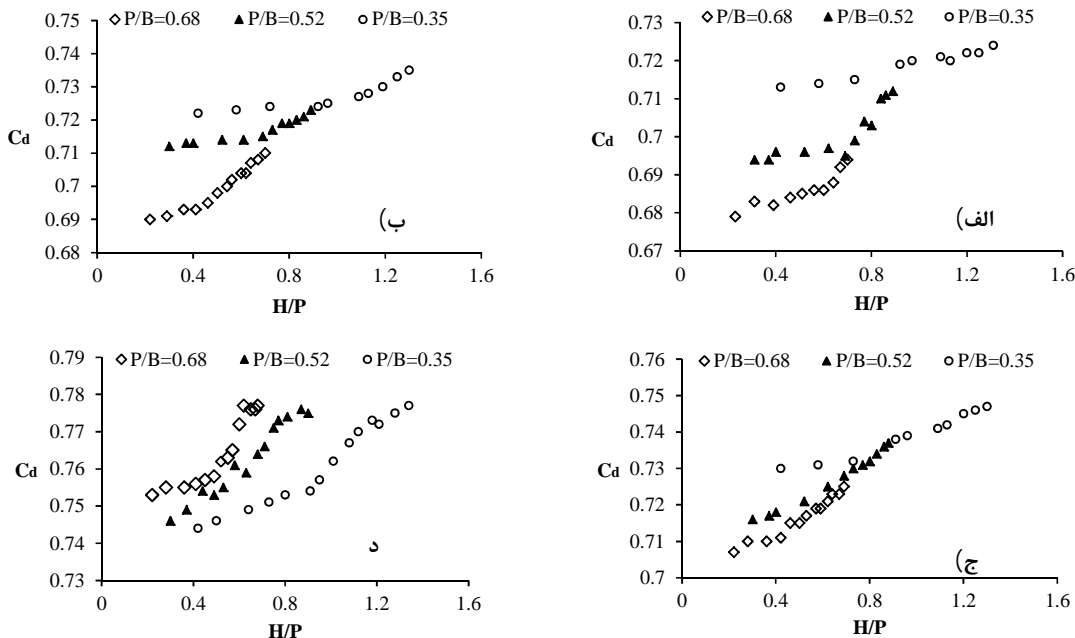
شکل ۴- تأثیر زاویه سرریز روی ضریب شدت جریان، $S=0$ ، (زاویه‌ها بر حسب درجه). الف) $P_s^* = 0$ ، ب) $P_s^* = \frac{1}{3}$ ، ج) $P_s^* = \frac{2}{3}$ و د) $P_s^* = 1$

$$P_s^* = 1$$

درجه به میزان ۱۵ درصد (از ۰/۷۶ به ۰/۸۸) سبب افزایش در ضریب شدت جریان نسبت به حالت بدون رسوب می‌شود. این میزان اثرگذاری در زاویه‌های ۷۵، ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰ و ۱۳۰ درجه به ترتیب برابر با ۰/۱۰، ۰/۱۱، ۰/۱۱ و ۱۲/۵ و ۱۳/۵ درصد است. از آنجا که در کلیه مجاری روباز از جمله حوضه‌های آبریز و شبکه‌های آبیاری برای اندازه‌گیری جریان عموماً بسته به ابعاد مجرا از سرریز با زاویه‌های بزرگ‌تر استفاده می‌شود بنابراین در نظر نگرفتن تأثیر رسوبات ته‌نشین شده پشت سرریز سبب خطای بسیار زیادی در اندازه‌گیری جریان آب می‌شود.

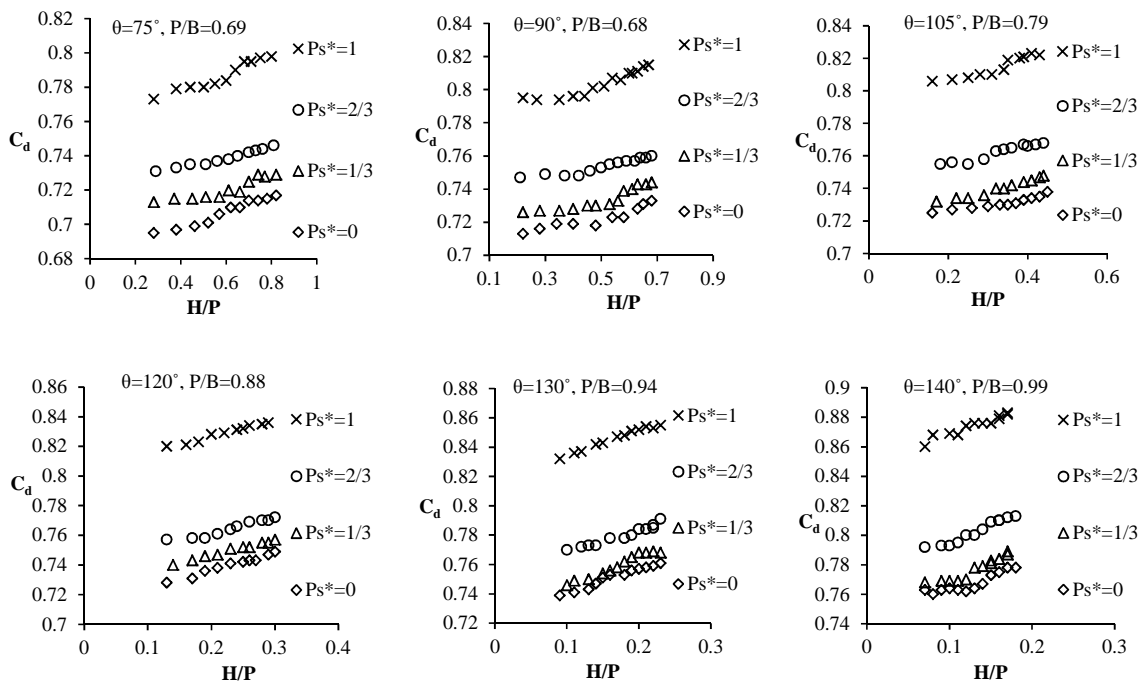
تأثیر تراز رسوب‌گذاری (P_s^*)

در شکل ۶ تغییرات ضریب شدت جریان نسبت به ترازهای رسوبی ته‌نشین شده در پشت سرریز در شیب بستر ۲/۴ درصد و زوایای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش ارتفاع رسوبات در پشت سرریز به ازای یک عمق ثابت آب روی سرریز سبب به افزایش ضریب شدت جریان می‌شود. مقدار حداکثری تأثیر رسوبات هنگامی است که پشت سرریز از رسوبات انباشته شده به طور کامل پر شود به طوری که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود این افزایش ضریب شدت جریان با زیاد شدن زاویه راس سرریز بیشتر بوده و در زاویه ۱۴۰



شکل ۵- تأثیر ارتفاع سرریز روی ضریب شدت جریان در حالت $\theta=90^\circ$ و $S=1.6\%$

$$P_s^* = 0 \text{ (الف)}, P_s^* = \frac{1}{3} \text{ (ب)}, P_s^* = \frac{2}{3} \text{ (ج)}, P_s^* = 1 \text{ (د)}$$



شکل ۶- تأثیر تراز رسوب‌گذاری روی ضریب شدت جریان در شیب بستر جریان ۲/۴ درصد ($S=2.4\%$)

مقابل شیب بستر جریان نشان می‌دهد. در این نمودار که مربوط به سرریز ۱۴۰ درجه است، نتایج اوگدن و همکاران مقایسه شده است. با توجه به شکل ۷، با افزایش شیب

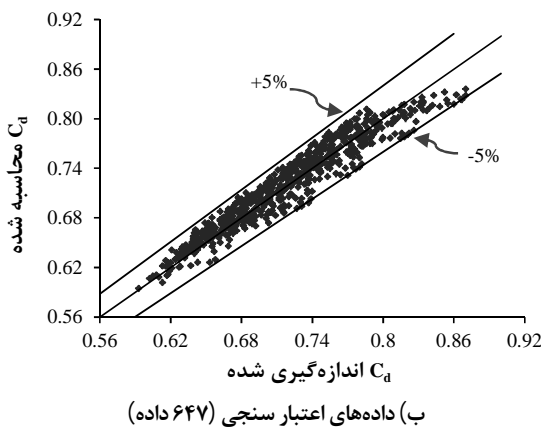
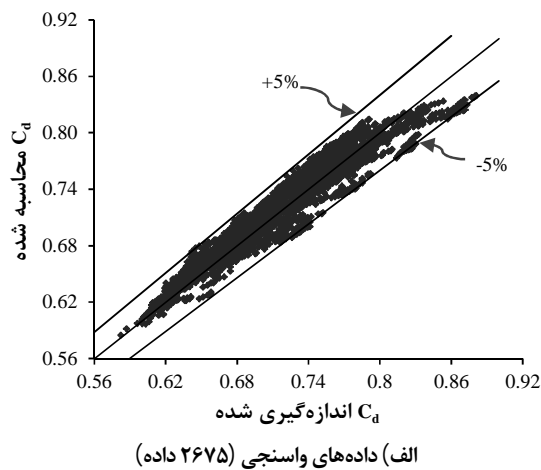
تأثیر شیب بستر جریان (S)

شکل ۷ متوسط تغییرات ضریب شدت جریان در حالت رسوب‌گذاری کامل نسبت به حالت بدون رسوب را در

درصد داده‌ها) با در نظر گرفتن سطوح خطا $\pm 5\%$ درصد نشان داده شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که رابطه پیشنهادی دارای دقت بالایی برای محاسبه ضریب شدت جریان است.

جدول ۵- دامنه اعتبار کمیت‌های رابطه پیشنهادی

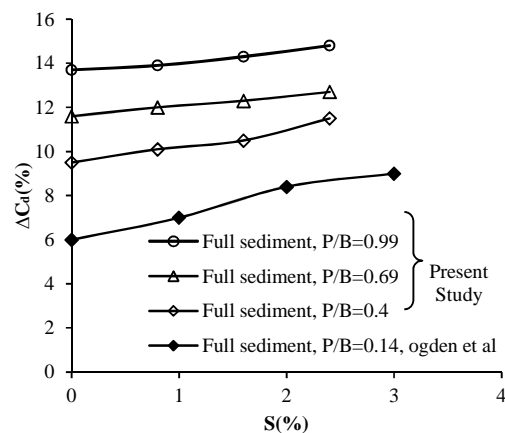
کمیت	$\theta(^{\circ})$	$\frac{H}{P}$	$\frac{P}{B}$	P_s^*	S
دامنه	-۱۴۰	-۱/۵۸	-۰/۹۹	-۱	-۰/۰۲۴
تغییرات	۷۵	۰/۰۷	۰/۳۵	۰	۰



شکل ۸- ضریب شدت جریان محاسبه شده از رابطه پیشنهادی در مقابل ضریب شدت جریان اندازه‌گیری شده

برای ارزیابی رابطه ارائه شده، تجزیه و تحلیل آماری رابطه فوق با استفاده از معیارهای آماری درصد میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) در جدول ۶ آورده شده است.

بستر جریان مقدار متوسط ضریب شدت جریان در آزمایش‌های این پژوهش و اوگدن و همکاران (۲۰۱۱) افزایش می‌یابد به طوری که این میزان افزایش در سرریز با نسبت ارتفاع سرریز به عرض کانال $(P/B) = 0.99$ در شیب بستر جریان $2/4$ درصد معادل $14/8$ درصد می‌شود. همچنین دیده می‌شود که با کاهش ارتفاع سرریز از میزان افزایش تغییرات ضریب شدت جریان کاسته شده که این امر با توجه به داشتن رابطه معکوس ارتفاع سرریز با ضریب شدت جریان در حالت بدون رسوب و همچنین عدم تأثیرگذاری ارتفاع سرریز در حالت رسوب‌گذاری کامل، رخ می‌دهد.



شکل ۷- تأثیر شیب بستر جریان بر تغییرات ضریب شدت جریان در حالت رسوب‌گذاری کامل نسبت به حالت بدون رسوب، $\theta = 140^{\circ}$

رابطه عمومی ضریب شدت جریان

با تحلیل آزمایش‌ها و برای ۸۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده (داده‌های واسنجی)، با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تشکیل رگرسیون غیرخطی رابطه نهایی ضریب شدت جریان در شرایط رسوب‌گذاری، بر اساس پارامترهای موثر را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد. دامنه تغییرات کمیت‌های رابطه مذکور نیز در جدول ۵ نشان داده شده است:

$$C_d = 0.533 + 0.001q + 0.064\left(\frac{H}{P}\right)^{0.5} + 5.2S - 0.07(1 - P_s^*)\left(\frac{P}{B}\right)^{0.5} \quad (8)$$

در شکل ۸ نمودارهای مقایسه‌ای بین مقادیر محاسبه شده ضریب شدت جریان از معادله (۸) و اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی (۲۰

می‌شوند در این پژوهش با توجه به دامنه داده‌های آزمایشگاهی، بر اساس پارامترهای مؤثر رابطه‌ای برای تعیین ضریب شدت جریان ارائه شد. این رابطه دارای ضریب تبیین بالایی ($R^2=0/956$) برای به‌دست آوردن ضریب شدت جریان است.

- از جمله محدودیت‌های این پژوهش، می‌توان به عرض کم فلوم آزمایشگاهی و ایجاد محدودیت در طراحی سرریزها و برقراری جریان با دبی‌های زیاد اشاره کرد.
- برای ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود تا تأثیر فرآیند رسوب‌گذاری در آبراهه‌های با نسبت عرض به عمق بالا با امکان افزایش دبی جریان بررسی شود. همچنین توصیه می‌شود تأثیر پدیده ته‌نشین شدن رسوبات در دیگر سازه‌های اندازه‌گیری جریان آب از جمله سرریزهای لبه تیز مستطیلی، لبه پهن و ... ارزیابی شده تا نتایج حاصل از آن سبب افزایش دقت در اندازه‌گیری جریان آب شود.

منابع

۱. دیزجی ن. و محمودخانی ا. م. ۱۳۸۸. بررسی تجربی تأثیر رسوبات بر ضریب تخلیه در سرریزهای مثلثی، مستطیلی، اوجی و روگذر در کانال باز. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری. ۳(۸): ۳۹-۵۰.
۲. راسخ ا. ۱۳۸۳. بررسی اثر لزجت و کشش سطحی در سرریزهای مثلثی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس. ۹۳ ص.
۳. شفاعی بجستان م. ۱۳۹۲. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. نشر دانشگاه شهید چمران اهواز، ویرایش دوم. ۵۴۹ ص.
۴. عابری فروتن ش. ۱۳۸۲. بررسی و ارزیابی رسوب‌شویی تحت فشار در سدهای مخزنی با استفاده از مدل فیزیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۲۴ ص.
۵. عسکری‌نژاد ع. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراز رسوب‌گذاری و زاویه سرریز روی ضریب شدت جریان سرریزهای مثلثی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۶۷ ص.

نوع داده	R ²	MAE(%)	RMSE
داده‌های واسنجی (۲۶۷۵)	۰/۹۵۶	۰/۳۰۶	۰/۰۱۵۱
داده‌های اعتبارسنجی (۶۴۷)	۰/۹۶۱	۰/۰۳۴	۰/۰۰۹۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای شناخت بهتر پدیده رسوب‌گذاری و تأثیرگذاری آن روی اندازه‌گیری جریان آب در سرریزهای مثلثی، اثر ترازهای رسوب‌گذاری، زوایای سرریز، شیب بستر جریان و ارتفاع سرریز روی ضریب شدت جریان بررسی شد. نتایج این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ضریب شدت جریان با افزایش زاویه سرریز روند افزایشی دارد. به طوری که در تمامی حالت‌های رسوب‌گذاری میزان ضریب شدت جریان افزایش می‌یابد. این امر به دلیل آن است که با زیاد شدن زاویه سرریز از فشردگی قسمت V شکل سرریز کم می‌شود و آب با اصطکاک کمتری از روی سرریز عبور می‌کند.
- ارتفاع سرریز تا زمانی که در پشت سرریز به طور کامل از رسوبات انباشته نشده باشد، رابطه معکوس با ضریب شدت جریان دارد. به طوری که با کاهش ارتفاع سرریز از حجم جریان‌های گردابی پشت سرریز کاسته شده و در نتیجه ضریب شدت جریان افزایش می‌یابد.
- هنگامی که رسوب‌گذاری به صورت کامل در پشت سرریز رخ می‌دهد، تأثیر ارتفاع سرریز غیر مؤثر بوده و برای تمامی ارتفاع‌های سرریز مربوط به یک زاویه خاص برابر با مقداری ثابت می‌شود.
- بیشترین افزایش ضریب شدت جریان با افزایش ته‌نشینی رسوبات در پشت سرریز هنگامی است که رسوب‌گذاری به صورت کامل انجام می‌شود. این امر به واسطه از بین رفتن تأثیر ارتفاع سرریز که به دلیل ایجاد جریان‌های گردابی سبب کاهش ضریب شدت جریان می‌شد.
- از آنجا که تأثیر رسوب‌گذاری پشت سرریزهای اندازه‌گیری جریان قابل صرف‌نظر کردن نیستند و سبب خطای زیادی در اندازه‌گیری جریان

۶. گوهری اسدی س. ۱۳۸۳. بررسی هیدرولیک جریان در رسوب شویی تحت فشار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۲۵ ص.
7. Bos M. G. 1976. Discharge Measurements Structures. Oxford and IBH Publishing Co. New Dehli, India. 365 p.
 8. Chanson H. 2004. Hydraulics of Open Channel Flow. Second Edition, Elsevier Ltd. University of Queensland, Australia. 650 p.
 9. Clemmens A. J. Wahl T. L. Bos M. G. and Replogle J. A. 2001. Water measurement with flumes and weirs. International Institute for Land Reclamation and Improvement, No57. 416 p.
 10. Herschy R. 1995. General purpose flow measurement equations for flumes and thin plate Weirs. Flow Measurements and Instrumentations. 6(4): 283-293.
 11. Ogden F. L. Crouch T. D. Pradhan N. A. and Kempema E. 2011. Laboratory investigation of sedimentation effects on V-notch weirs. Journal Hydraulic Div. ASCE. pp. 4820-4827.
 12. RangaRaju K. G. and Asawa G. L. 1977. A review of reservoir desiltation. International Journal of Sediment Research. 15: 321-342.