

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر عملکرد هیدرولیکی

سرریزهای استوانه‌ای در شرایط جریان آزاد

نسترن پورنعمت‌اللهی^۱، مهدی اسمعیلی ورکی^{۲*}، امیر ملک‌پور^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان
۲. استادیار، گروه مهندسی آب و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان
۳. استادیار، گروه مهندسی آب و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۲/۸)

چکیده

سرریزهای استوانه‌ای یکی از سازه‌های متداول برای اندازه‌گیری جریان و کنترل سطح آب در کانال‌های انتقال آب و رودخانه‌ها می‌باشند. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی متعددی بر مشخصات جریان عبوری از این سرریزها تأثیرگذار است. در تحقیق حاضر اثر زبری سطح سرریز استوانه‌ای و رسوب‌گذاری بالادست آن بر ضریب دبی سرریز، توزیع فشار و افت انرژی در شرایط پایاب آزاد به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در شرایط عدم تغییر تراز کف کانال و در تراز دوسوم ارتفاع سرریز در ۳ قطر از سرریز استوانه‌ای، اعمال چهار زبری و دامنه وسیعی از دبی جریان انجام شد. مقایسه نتایج حاصل از بررسی تأثیر زبری و ترازهای مختلف کف کانال بالادست بر ضریب دبی سرریز نشان داد که در کلیه سرریزهای مورد مطالعه، در محدوده دبی حداقل تا حداکثر با افزایش زبری از PVC به ۴/۵ میلی‌متر مقدار ضریب دبی سرریز به‌طور متوسط ۸ درصد کاهش و با افزایش تراز رسوب‌گذاری از صفر تا دوسوم ارتفاع سرریز، مقدار ضریب دبی سرریز ۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز افزایش زبری به ۴/۵ میلی‌متر منجر به کاهش ۳ تا ۷ درصدی ضریب دبی سرریز می‌شود. با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر مقدار ضریب دبی ۵ درصد افزایش و افت انرژی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در کلیه سرریزها با افزایش زبری مقدار افت انرژی تقریباً ۱۴ درصد افزایش و با افزایش تراز رسوب‌گذاری به دوسوم ارتفاع سرریز، مقدار آن ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. بررسی نتایج حاکی از آن است که روند تغییرات فشار در طول سرریز در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، مشابه با روند تغییرات آن در شرایط بدون رسوب است اما مقدار آن با افزایش سطح رسوب‌گذاری، کاهش می‌یابد. علاوه بر این تأثیر زبری بر روی مقادیر فشار در نیمه پایین‌دست سرریز بیشتر از نیمه بالادست آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز استوانه‌ای، ضریب دبی سرریز، زبری، توزیع فشار، افت انرژی

مقدمه

سرریزها از قدیمی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی ساخت بشر می‌باشند که در ابعاد، اشکال و کاربردهای متفاوت جهت اندازه‌گیری، کنترل دبی و تنظیم سطح آب در سامانه‌های آبیاری و رودخانه استفاده می‌شوند. سرریزهای استوانه‌ای یکی از انواع سرریزهای لبه پهن بوده که برای کنترل سطح آب در رودخانه‌ها، کانال‌های انتقال آب و فاضلاب کاربرد زیادی دارند. بررسی الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای نشان داده است که انحنای سازه و شکل آن نقش مهمی بر عملکرد هیدرولیکی آن دارد. از مزایای سرریزهای استوانه‌ای و تاج دایره‌ای نسبت به

سایر سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان آب، می‌توان به پایداری الگوی جریان ریزشی، راحتی عبور اجسام شناور از روی آن‌ها، سادگی طراحی، ضریب دبی بالا و از همه مهم‌تر قابلیت طراحی در مقیاس بزرگ و هزینه‌ی اجرا و بهره‌برداری کمتر اشاره کرد (Beygipour and Bina, 2005).

در طول قرن نوزدهم اولین مطالعات بر روی سرریزها به‌وسیله Bazin (1898) در فرانسه انجام شد و تحقیقات بعدی در این زمینه توسط Creager (1917) و Rehbok (1929) صورت گرفت. Jaeger (1956) نوسان‌های فشار بر روی تاج سرریزهای تاج دایره‌ای را مطالعه نمود و به این نتیجه رسید که معادله فشار روی تاج سرریز به هد نسبی کل، عمق جریان روی تاج سرریز و انحنای جریان بستگی دارد. Escande and Sananes (1959) ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای با شیب دیوار

* نویسنده مسئول : esmaeili.varaki@yahoo.com

ضریب دبی سرریز با کاهش قطر سرریز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زبری موجب کاهش قابل توجهی در ضریب دبی سرریز می‌شود.

Esmaili *et al.* (2010) با آزمایش روی مدل‌های مختلف سرریز استوانه‌ای، مقادیر فشار و سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل فلوئنت مقایسه کردند. مقایسه نتایج حاکی از تطابق مناسب الگوی جریان بین مدل فیزیکی و عددی بود. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که محل تشکیل عمق بحرانی قبل از تاج سرریز و جدایش جریان از روی سرریز در ناحیه انتهایی آن صورت می‌گیرد. Masoudian and Gharahgezlou (2013)، در بررسی مشخصات جریان عبوری از سرریزهای استوانه‌ای در کانال‌های کوچک آزمایشگاهی بیان نمودند که ضریب دبی سرریز با افزایش پارامترهای هد نسبی، عدد رینولدز و عدد وبر، افزایش می‌یابد.

Parilcova (2012) تأثیر زبری روی سرریز لبه پهن را در شرایط آزمایشگاهی بررسی نموده و بیان داشتند زبری مربوط به تاج سرریز از زبری مربوط به شیب پایین دست تأثیری بیشتری روی ضریب دبی سرریز دارد. همچنین با افزایش نسبت عمق بحرانی بر اندازه زبری معادل، ضریب دبی سرریز افزایش می‌یابد. Shabanlou and Khorami (2013) مشخصات هیدرولیکی سرریزهای استوانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که افت نسبی انرژی با افزایش هد آب بالادست، کاهش می‌یابد.

یکی از مشکلات بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری، رسوب‌گذاری در طول کانال‌ها و در نزدیکی سازه‌های موجود در شبکه می‌باشد که در نتیجه عملکرد هیدرولیکی آن‌ها را دچار تغییر خواهد کرد. Dizji and Mahmoudkhani (2009) با بررسی تأثیر رسوبات بر ضریب دبی سرریزهای مثلثی، مستطیلی، اوجی و روگذر پی بردند در مقایسه با آب زلال، رسوبات معلق سبب کاهش ضریب دبی می‌شوند که این اثر روی ضریب دبی سرریز، در دبی‌ها و شیب کف ملایم‌تر، نمایان‌تر بوده و مستقل از نوع سرریز به کار گرفته می‌باشد. Dastorani and Nasrabadi (2012) با بررسی اثر تنشینی رسوبات در پشت سرریز اوجی بر شرایط جریان، نشان دادند که با افزایش رسوبات پشت سرریز، مقدار ضریب دبی سرریز از ۲/۲۵ در شرایط بدون رسوب، به ۱/۶۹ در حالت پر بودن مخزن کاهش و سرعت جریان در پای پنجه سرریز افزایش می‌یابد. Asgarinezhad (2013) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر تراز رسوب‌گذاری و شیب بستر جریان بر روی ضریب دبی سرریزهای مثلثی دریافت که

بالادست عمود بر کف و شیب دیوار پایین دست ۴۵ درجه را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مکش در زیر جریان ریزشی باعث جلوگیری از جدایی جریان شده و ضریب دبی سرریز را به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. Sarginson (1972) با مطالعات خود به این نتیجه رسید که ضریب دبی سرریز تابعی از نسبت ارتفاع آب روی سرریز به شعاع سرریز است و با افزایش این نسبت، ضریب دبی سرریز افزایش می‌یابد. Bos (1976) رابطه دبی- اشل در سرریزهای تاج‌دایره‌ای را به دست آورد و اختلاف اساسی بین سرریزهای تاج‌دایره‌ای و سرریزهای لبه‌پهن را ناشی از انحنا خطوط جریان روی تاج آن‌ها دانست. وی معتقد بود که از انحنا خطوط جریان در سرریزهای تاج‌دایره‌ای نمی‌توان صرف‌نظر کرد و بیان داشت که ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای عموماً بزرگ‌تر از سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی است.

Ramamurthy *et al.* (1992) با استفاده از معادله مومنوم توانستند انحراف ناشی از فشار هیدرو استاتیک روی تاج سرریز را به صورت تقریبی برآورد نمایند. Ramamurthy and Vo (1993a) از رابطه Dressler (1978) مربوط به نیمرخ‌های سرعت بر روی سرریز استوانه‌ای شکل استفاده کردند و با فرض جریان یکنواخت و دائمی، توانستند معادله توزیع سرعت روی تاج سرریزهای تاج‌دایره‌ای را استخراج کنند. Ramamurthy and Vo (1993b) و Chanson and Montes (1998)، با مطالعه اثرات تغییر شیب دیوار بالادست و پایین دست سرریزهای تاج‌دایره‌ای بر ضریب دبی سرریز، به این نتیجه رسیدند که تغییر شیب دیوار بالادست تأثیری بر ضریب دبی سرریز ندارد اما افزایش شیب دیوار پایین دست موجب افزایش ضریب دبی سرریز می‌شود. Beygipour and Bina (2005)، هیدرولیک جریان را در سرریزهای تاج دایره‌ای و استوانه‌ای را مورد بررسی قرار داد و بیان نمود که ضریب دبی سرریز با افزایش هد آبی پشت سرریز افزایش می‌یابد. Heidarpour and chamani (2006) با استفاده از تابع جریان در اطراف سرریزهای استوانه‌ای توزیع سرعت روی تاج را تعیین و یک مدل ریاضی برای تعیین ضریب دبی سرریز در سرریزهای دایره‌ای ارائه کردند. Heidarpour *et al.* (2008) تئوری جریان پتانسیل را در نیمه بالایی سرریز استوانه‌ای برای تعیین توزیع سرعت روی تاج سرریز بکار بردند. آن‌ها همچنین یک ضریب تصحیح برای توزیع فشار بر روی تاج سرریز تاج‌دایره‌ای ارائه کردند. Othman *et al.* (2010) اثر سه اندازه مختلف زبری و قطرهای مختلف یک سرریز استوانه‌ای در شرایط عبور جریان از روی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که

استوانه‌ای ارائه نمود:

$$Q_w = C_{dw} b_w \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g H_w^3} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، هد کل بالادست H_w ، عرض کانال b_w ، شتاب ثقل g ، دبی عبوری Q_w و ضریب دبی سرریز C_{dw} می‌باشد. اگر فرض شود طرف دوم معادله (۲) به‌عنوان ضریب دبی

سرریز تلقی گردد، رابطه (۲) به‌صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$C_{dw} = f_3(Fr, Re, We_e, \frac{S}{P}, \frac{H_w}{H_1}, \frac{b_w}{H_1}, \frac{\varepsilon}{H_1}, \delta, S_0) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن Re ، We_e و Fr به ترتیب عددهای رینولدز، وبر و فرود می‌باشند. با توجه به آن‌که در تحقیق حاضر هد جریان روی تاج سرریزها از ۳ سانتی‌متر بیشتر و جریان در فلوم آزمایشگاهی آشفته بود، از تأثیر نیروهای کشش سطحی و لزجت صرف‌نظر شد. همچنین با حذف اثر ضریب فشردگی به دلیل عدم وجود فشردگی در سرریز مورد مطالعه، ثابت بودن شیب و عرض کانال، رابطه‌ی (۴) به‌صورت معادله زیر خلاصه گردید:

$$C_{dw} = f(Fr, \frac{H_w}{H_1}, \frac{S}{P}, \frac{\varepsilon}{H_1}, \frac{S_0}{P}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این تحقیق معادله (۵) به‌عنوان رابطه پایه‌ای برای انجام آزمایش‌ها به کار گرفته شد.

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

به‌منظور نیل به اهداف موردنظر در پژوهش حاضر، مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در فلوم با سیستم بازچرخانی به طول ۱۵/۸ متر، عرض ۰/۸۸ متر و عمق ۱ متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف فلزی است، انجام شد. به‌منظور تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژی که قادر بود دبی سیستم را تا ۷۰ لیتر بر ثانیه تأمین نماید، استفاده گردید. جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن اندازه‌گیری بالادست شده که در انتهای آن سرریز مثلثی جهت اندازه‌گیری دبی جریان قرار داشت. سپس جریان با عبور از سرریز وارد مخزن آرام‌کننده پایین‌دست شده و در ادامه مجدداً وارد کانال می‌گردید. جهت کاهش تلاطم جریان ورودی به کانال و ممانعت از شکل‌گیری جریان‌های عرضی در ورودی کانال، از صفحات مستقیم‌ساز جریان استفاده شد. جهت اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به سرریز استوانه‌ای محل نصب آن ۵ متر بعد از ورودی انتخاب گردید. در شکل‌های (۱) و (۲) نمایی از طرح کلی فلوم آزمایشگاهی و تصاویری از آن آورده شده است.

در هر یک از ارتفاع‌های سرریز با افزایش ترازهای رسوب‌گذاری، ضریب دبی افزایش می‌یابد. Shafaattalab et al. (2015) با بررسی تأثیر ارتفاع رسوب‌گذاری بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلان کنگره‌ای پی بردند با افزایش تراز بستر بالادست سرریز به ۹۰ درصد، ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای کاهش می‌یابد.

یکی از مسائلی که می‌تواند هیدرولیک جریان عبوری از روی سرریزهای استوانه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد، زبری بدنه سرریز می‌باشد. از آنجایی که در اجرای سرریزهای تاج دایره‌ای از مصالح ساختمانی مختلف با زبری‌های متفاوت استفاده می‌شود، لذا شناخت خصوصیات زبری و تأثیر آن بر هیدرولیک جریان، در عمل و در بهره‌برداری از این سرریزها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. علاوه بر این یکی از مسائل رایج در بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری، رسوب‌گذاری در مجاورت سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب می‌باشد که عملکرد این سازه‌ها را دچار مشکل می‌کند. لذا ضروریست که به این موضوع در مرحله طرح توجه ویژه شود و از آنجایی که شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای در بهره‌برداری بهینه و کاربرد بهتر از آن حائز اهمیت است، از این رو هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری در شرایط پایاب آزاد بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای استوانه‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

عوامل مؤثر بر دبی عبوری از سرریزها تابعی از خصوصیات هندسی سرریز و کانال، مشخصه‌های سینماتیکی و دینامیکی جریان بوده که آن‌ها را می‌توان به صورت معادله زیر نوشت:

$$Q_w = f_1(V, H_1, H_w, b_w, \mu, g, S_0, P, \rho, \delta, \sigma, \varepsilon, S) \quad \text{رابطه (۱)}$$

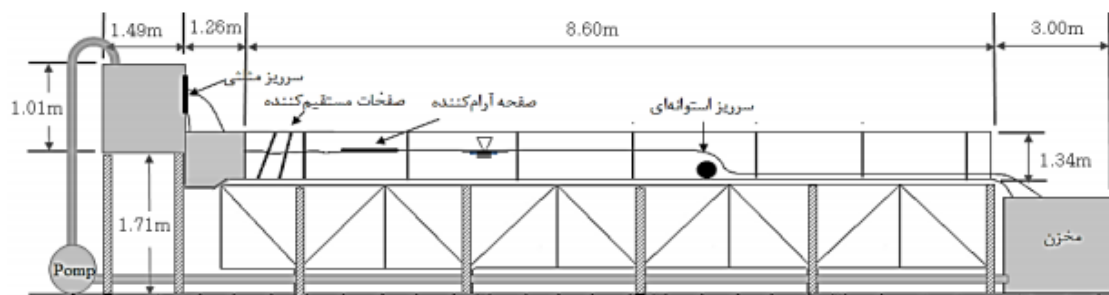
که در آن، عمق آب در بالادست سرریز H_1 ، هد کل بالادست H_w ، عرض کانال b_w ، لزجت دینامیکی سیال μ ، شتاب ثقل g ، شیب کانال S_0 ، دبی عبوری Q_w ، ارتفاع سازه P ، جرم مخصوص سیال ρ ، ضریب فشردگی δ ، ارتفاع زبری ε ، ارتفاع رسوب‌گذاری S و کشش سطحی σ می‌باشد.

با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، می‌توان رابطه (۱) را به‌صورت رابطه تابعی زیر نوشت.

(رابطه ۲)

$$\frac{Q_w}{g^{0.5} H_w^{1.5} b_w} = f_2\left(\frac{V^2}{g H_1}, \frac{\mu}{\rho V H_1}, \frac{\sigma}{\rho V^2 H_1}, \frac{H_1}{P}, \frac{H_w}{H_1}, \frac{H_1}{b_w}, \frac{\varepsilon}{H_1}, \frac{S}{P}, \delta, S_0\right)$$

Bos (1976) معادله زیر را برای جریان عبوری از سرریز



شکل ۱. طرح کلی فلوم آزمایشگاهی



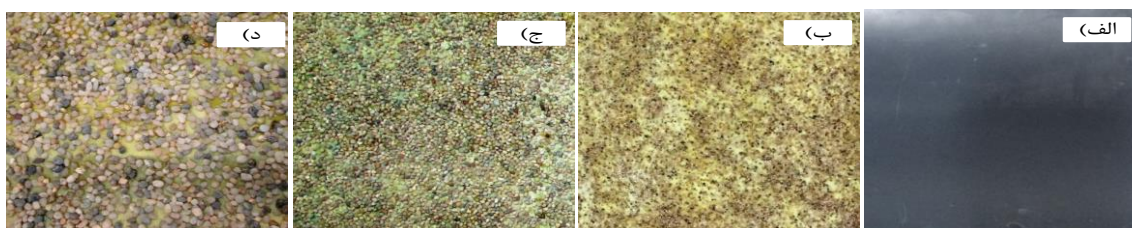
شکل ۲. تصاویری از (الف) فلوم آزمایشگاهی، (ب) سرویز استوانه‌ای و (ج) تراز رسوب گذاری در بالادست و سرویز استوانه‌ای زبر

رقومی سازی شد. علاوه بر آن عمق آب در بالادست سرویز (در فاصله ۴۰ سانتی متری از تاج سرویز)، با استفاده از یک عمق سنج دیجیتالی با دقت ± 0.01 میلی متر اندازه گیری شد. برای هر قطر از سرویز، آزمایش‌ها در شرایط آزاد انجام گردید. در جدول (۱) دامنه پارامترهای آزمایشگاهی نشان داده شد.

جدول ۱. دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

صفر	S_0	شیب کانال
۱۵-۲۵	D (cm)	قطر سازه
۸۸	b_w (cm)	عرض کانال
۱۶-۶۶	Q_w (l/s)	دبی
۴/۵-۱۱/۵	H_w (cm)	هد آب بالادست
۱/۵-۴/۵	ϵ (mm)	اندازه زبری
۰-۲P/۳	S	ارتفاع رسوب گذاری

برای ایجاد ترازهای رسوب گذاری به مقدار P/۳ و ۲P/۳، ارتفاع سرویز از کف کاذب استفاده شد. برای این منظور در بالادست سرویزهای استوانه‌ای از صفحه‌ای آلومینیمی زبر شده توسط شن با قطر ۴-۱ میلی متر استفاده گردید. سرویزهای استوانه‌ای مورد استفاده در این تحقیق، از لوله‌های PVC با قطرهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی متری ساخته شد. برای زبر کردن سطح سرویز، شنهایی با قطر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی متر بر روی سطح سرویز چسبانده شد (شکل (۳)). به منظور اندازه گیری فشار روی سرویز، پیزومترهایی حول خط مرکزی سرویز ایجاد و بر روی تابلویی که برای این منظور طراحی و ساخته شده بود، نصب گردیدند. در هر آزمایش، بعد از تنظیم دبی جریان، با استفاده از یک دستگاه دوربین پاورشات کنون مدل SX500، از نیمرخ سطح آب عبوری از سرویز و تغییرات سطح آب در پیزومترهای آن تصویربرداری و سپس با استفاده از نرم افزار Grapher 9.



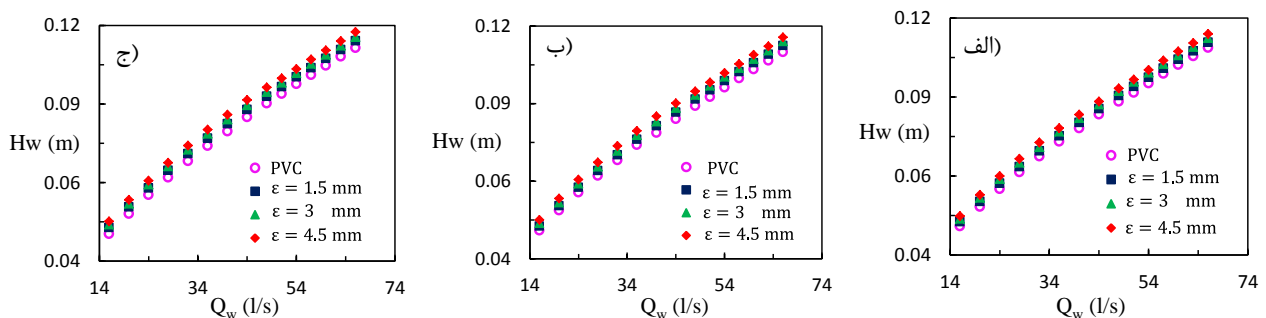
شکل ۳. تصاویری از سطح سرویزهای استوانه‌ای مورد مطالعه، (الف) بدون اعمال زبری (PVC)، (ب) زبری ۱/۵ میلی متر، (ج) زبری ۳ میلی متر و (د) زبری ۴/۵ میلی متر

نتایج و بحث

زبری از PVC به زبری ۴/۵ میلی‌متر، مقدار H_w به‌طور متوسط ۸ درصد در دبی حداقل و ۵ درصد در دبی حداکثر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر در شرایط بدون اعمال زبری و نیز اعمال زبری ۴/۵ میلی‌متر مقدار H_w محدوده‌ی دبی ۱۶ تا ۶۶ لیتر بر ثانیه ۱ تا ۳ درصد افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در دبی‌های کم می‌توان از تأثیر قطر سرریز بر روی هد آب بالادست صرف‌نظر کرد.

الف) بررسی تأثیر توأم زبری سطح سرریز استوانه‌ای و رسوب‌گذاری بالادست بر منحنی دبی-اشل و ضریب دبی سرریز

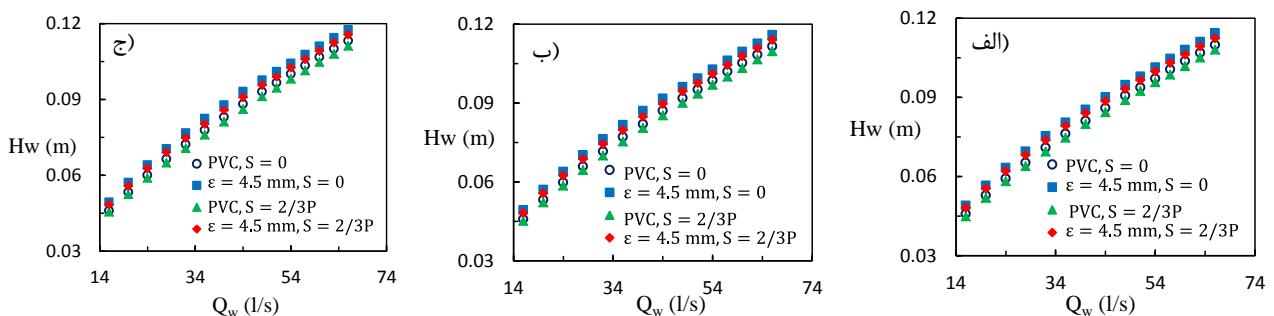
در نمودارهای شکل (۴) تأثیر زبری بر منحنی دبی-اشل برای سرریزهای با قطرهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر، نشان داده شده است. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که با افزایش



شکل ۴. تغییرات H_w در برابر دبی برای زبری‌های مختلف برای، الف) قطر ۱۵۰ میلی‌متر، ب) قطر ۲۰۰ میلی‌متر، ج) قطر ۲۵۰ میلی‌متر

است که مقدار کاهش هد بالادست ناشی از افزایش تراز رسوب‌گذاری به دوسوم ارتفاع سرریز، در هر سه قطر، در شرایط بدون اعمال زبری و در محدوده دبی‌های حداقل تا حداکثر به‌طور متوسط بین ۱/۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در شرایط مذکور با افزایش زبری سطح سرریز به ۴/۵ میلی‌متر، مقدار H_w ۵ درصد در دبی حداقل و ۳ درصد در دبی حداکثر افزایش می‌یابد.

در نمودارهای شکل (۵) تأثیر توأم زبری و سطح رسوب‌گذاری بر منحنی دبی-اشل به ترتیب برای سرریزهای با قطر ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر، نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان داد که در تمامی سرریزهای مورد مطالعه در حالت صاف و اعمال زبری تا ۴/۵ میلی‌متر، با افزایش تراز رسوب‌گذاری به دوسوم ارتفاع سرریز، هد بالادست به دلیل افزایش سرعت جریان نزدیک شونده کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن



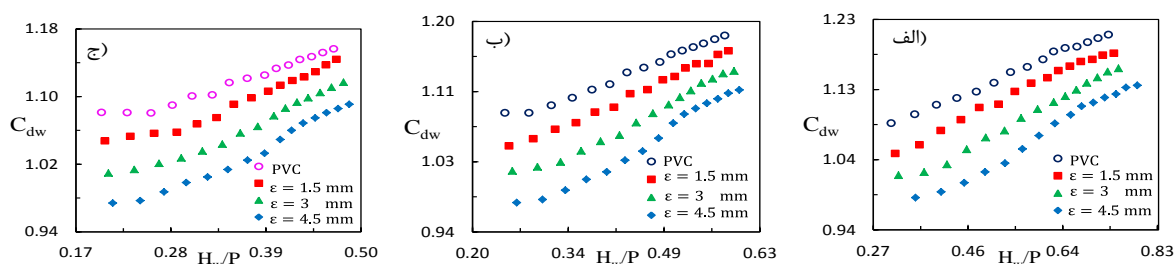
شکل ۵. تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر روی منحنی دبی-اشل برای الف) قطر ۱۵۰ میلی‌متر، ب) قطر ۲۰۰ میلی‌متر، ج) قطر ۲۵۰ میلی‌متر

داده شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه ضریب دبی سرریز از معادله (۳) استفاده شد. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که در کلیه سرریزهای مورد مطالعه، با افزایش دبی و در نتیجه افزایش هد نسبی (H_w/P) ، ضریب دبی سرریز افزایش می‌یابد که مطابق تحقیقات صورت گرفته توسط (1998)

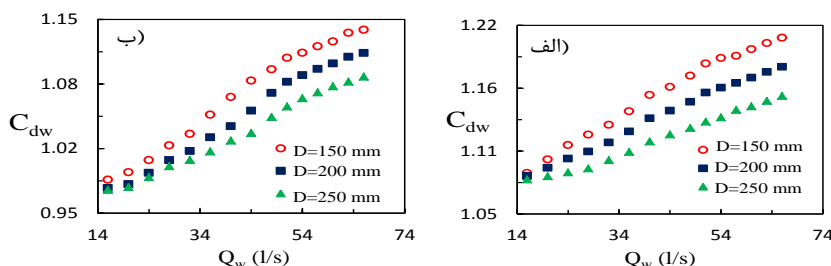
در سرریزهای استوانه‌ای وجود خلأ در وجه پایین‌دست و چسبندگی تیغه باعث می‌شود تا خطوط جریان با انحنای بیشتر و جریان با سرعت بالاتری شکل گرفته و لذا ضریب دبی سرریز به مقدار بیشتر از یک افزایش یابد. در شکل (۶) اثر زبری بر ضریب دبی سرریزهای با قطر ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر نشان

حالت سطح صاف (PVC) و زبری ۴/۵ میلی‌متر، در دبی‌های پایین افزایش قطر تأثیر چندانی بر ضریب دبی سرریز ندارد ولی با افزایش دبی بر میزان تأثیر قطر سازه بر ضریب دبی سرریز افزوده می‌شود به طوری که در دبی‌های بالا با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر یا به عبارتی افزایش شعاع انحناء سرریز، مقدار ضریب دبی سرریز بطور متوسط تا ۵ درصد در هر دو شرایط با و بدون زبری کاهش می‌یابد.

Chanson and Montes می‌باشد. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که در هر سه قطر سرریز مورد بررسی، با افزایش زبری به ۴/۵ میلی‌متر، مقدار ضریب دبی سرریز به طور متوسط ۸ درصد کاهش می‌یابد که این روند تغییرات مشابه با نتایج ارائه شده توسط Othman *et al.* (2010) می‌باشد. در شکل (۷) اثر قطر سرریز بر روی ضریب دبی سرریز به ترتیب در حالت بدون اعمال زبری و اعمال زبری ۴/۵ میلی‌متر را نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو



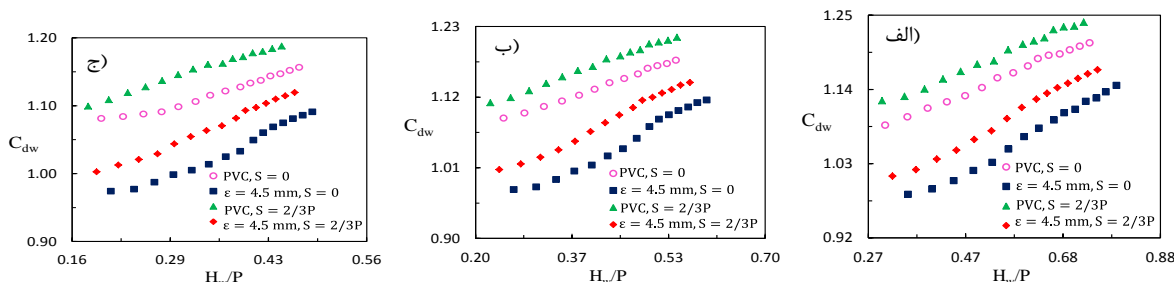
شکل ۶. تغییرات ضریب دبی سرریز نسبت به (H_w/P) در زبری‌های مختلف، الف) قطر ۱۵۰ میلی‌متر، ب) قطر ۲۰۰ میلی‌متر، ج) قطر ۲۵۰ میلی‌متر



شکل ۷. تغییرات ضریب دبی سرریز برای قطرهای و شرایط هیدرولیکی مختلف، الف) بدون اعمال زبری (PVC) و ب) زبری ۴/۵ میلی‌متر

می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در هر سه قطر از سرریز در شرایط بدون اعمال زبری، با افزایش تراز رسوب‌گذاری از صفر به دوسوم ارتفاع سرریز، مقدار ضریب سرریز به علت افزایش سرعت جریان نزدیک شونده به سرریز و نیز کاهش هد بالادست، ۳ درصد افزایش می‌یابد. در سطح رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، با افزایش مقدار زبری سطح سرریز به ۴/۵ میلی‌متر، مقدار ضریب دبی سرریز به طور متوسط بین ۳ تا ۷ درصد کاهش می‌یابد.

در نمودارهای شکل (۸) تغییرات ضریب دبی سرریز در برابر پارامتر بی‌بعد (H_w/P) به ترتیب برای سرریزهای با قطر ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر، برای دامنه دبی‌های مورد بررسی و لحاظ کردن تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری، نشان داده شده است. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که در کلیه سرریزهای مورد مطالعه، در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز و در شرایط بدون رسوب، با افزایش دبی و در نتیجه افزایش پارامتر هد نسبی (H_w/P) ، ضریب دبی سرریز افزایش



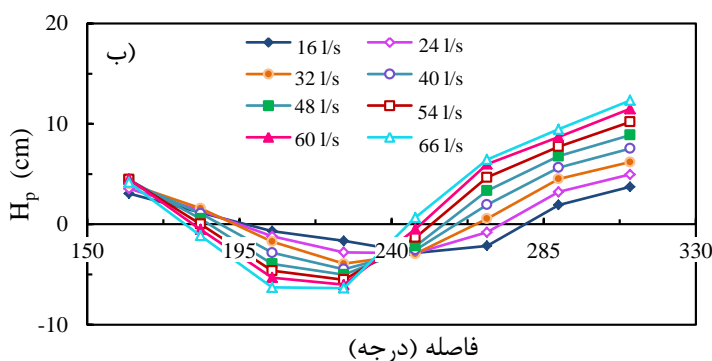
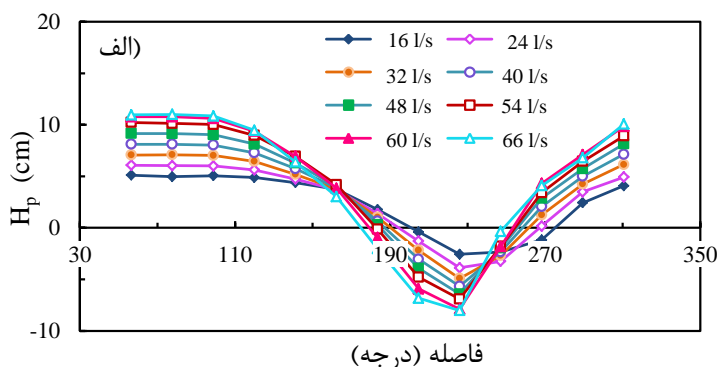
شکل ۸. تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر ضریب دبی سرریز برای الف) قطر ۱۵۰ میلی‌متر، ب) قطر ۲۰۰ میلی‌متر، ج) قطر ۲۵۰ میلی‌متر

برعکس می‌گردد. به همین دلیل افزایش شدید فشار در زوایای بالادست سرریز و نیز کاهش نسبی آن در پایین‌دست آن رخ می‌دهد.

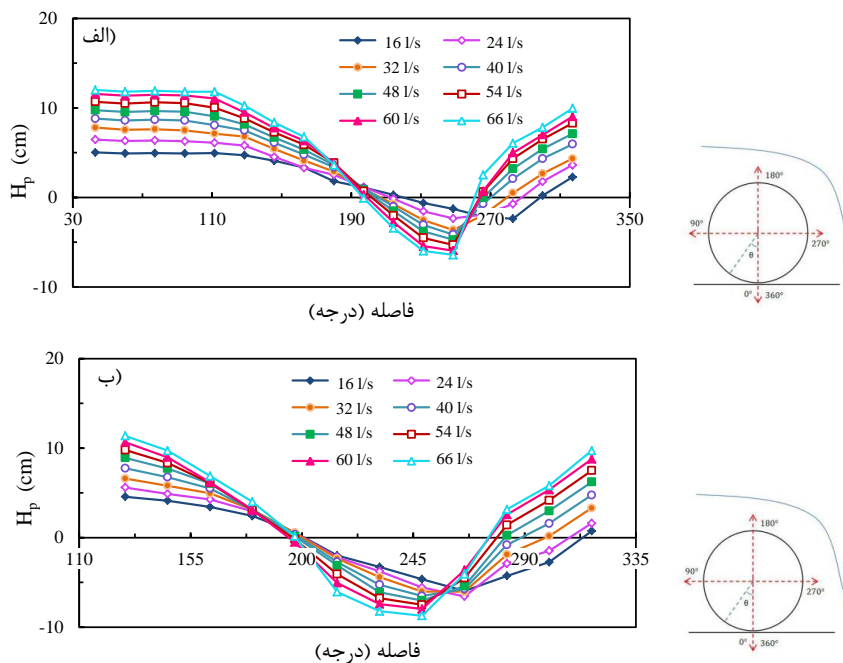
مقایسه‌های صورت گرفته نشان داد که روند تغییرات فشار در طول سرریز در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز بعد از تراز رسوب‌گذاری در بالادست، مشابه با روند تغییرات آن در شرایط بدون رسوب است اما مقدار آن متفاوت است. در شکل (۱۲) تغییرات هد فشاری در وجه پایین‌دست سرریز (بازه‌ی ۱۸۰ تا ۲۷۰ درجه)، در دبی ۶۶ لیتر بر ثانیه به ترتیب برای سرریزهای با قطر ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر و ترازهای رسوب‌گذاری مختلف نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که با افزایش تراز رسوب‌گذاری سرعت جریان نزدیک شونده و گذرنده از سرریز افزایش می‌یابد و طبق رابطه فشار در سطوح محدب که در آن عامل سرعت یا شتاب گریز از مرکز با علامت منفی ظاهر می‌شود، مقدار هد فشاری کاهش می‌یابد. این روند مشابه با افزایش دبی و یا به عبارتی سرعت جریان بر روی سرریز می‌باشد. به همین دلیل، در کلیه سرریزها مورد بررسی و نیز دامنه تمام دبی‌های مورد آزمایش، افزایش تراز رسوب‌گذاری، تأثیری مضاعفی را در کنار اثر افزایشی سرعت بر کاهش هد بالادست سرریز دارد.

ب) بررسی تأثیر توأم زبری سطح سرریز استوانه‌ای و رسوب‌گذاری بالادست بر توزیع فشار روی سرریز

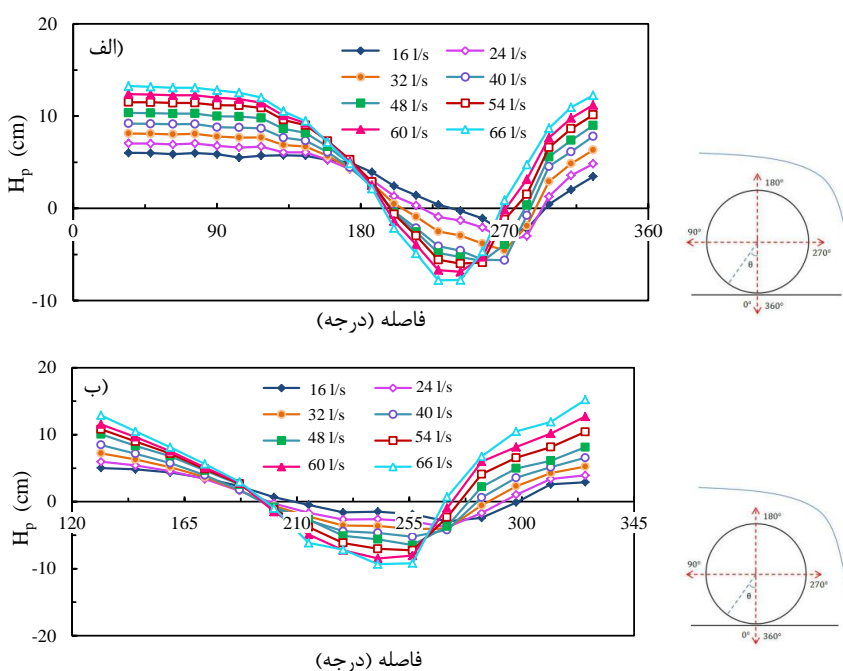
فشار وارده بر سازه‌های هیدرولیکی که در مسیر جریان در کانال واقع می‌شوند، هنگام عبور جریان از جنبه‌های مختلف از قبیل کاویتاسیون، لرزش، پایداری سازه و غیر دارای اهمیت است. در نمودارهای شکل‌های (۹) تا (۱۱)، توزیع فشار در نقاط مختلف سطح سرریز به ازای دبی و ترازهای رسوب‌گذاری مختلف به ترتیب برای قطرهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر از سرریز استوانه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تمامی دبی‌ها با پیشروی جریان بر روی سرریز به دلیل افزایش سرعت و کاهش عمق جریان، هد فشار کاهش می‌یابد. این روند تا موقعیت ۱۸۰ درجه که در آن هد فشاری دبی‌های مختلف تقریباً یکسان می‌گردد، تداوم می‌یابد و بعد از آن ترتیب قرارگیری خطوط معکوس می‌شود. به طوری که کمترین دبی بالاترین هد فشاری و بیشترین دبی کمترین هد فشاری را ایجاد می‌نماید. در وجه پایین‌دست سرریز، انحنای سطح سرریز موجب کاهش بار فشار در طول سرریز و افزایش بار سرعت می‌شود. به علت دوبردگی بودن سرعت در محدوده سرریز، بردار سرعت در بالادست و پایین‌دست سرریز دارای دو مؤلفه افقی و عمودی می‌باشد و نقش مؤلفه افقی سرعت در بالادست به نسبت مؤلفه عمودی آن بیشتر است و این شرایط در پایین‌دست



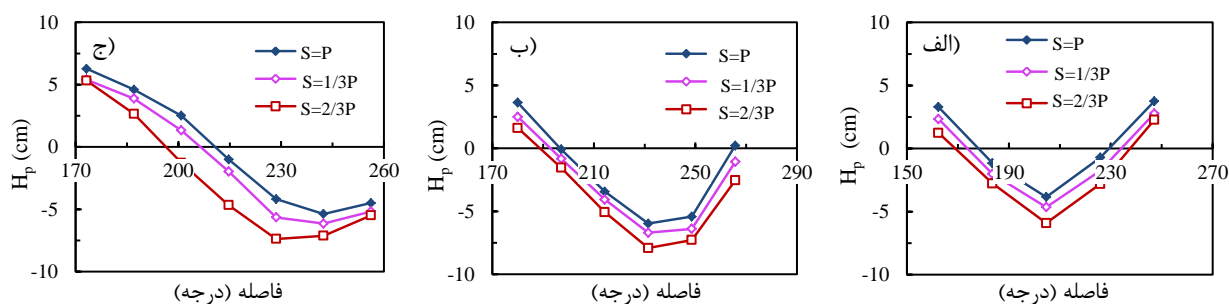
شکل ۹. تغییرات فشار روی بدنه سرریز استوانه‌ای در قطر ۱۵۰ میلی‌متر در شرایط الف) بدون رسوب‌گذاری و ب) تراز رسوب‌گذاری ۲/۳



شکل ۱۰. تغییرات فشار روی بدنه سرریز استوانه‌ای در قطر ۲۰۰ میلی‌متر در شرایط الف) بدون رسوب‌گذاری و ب) تراز رسوب‌گذاری $2P/3$



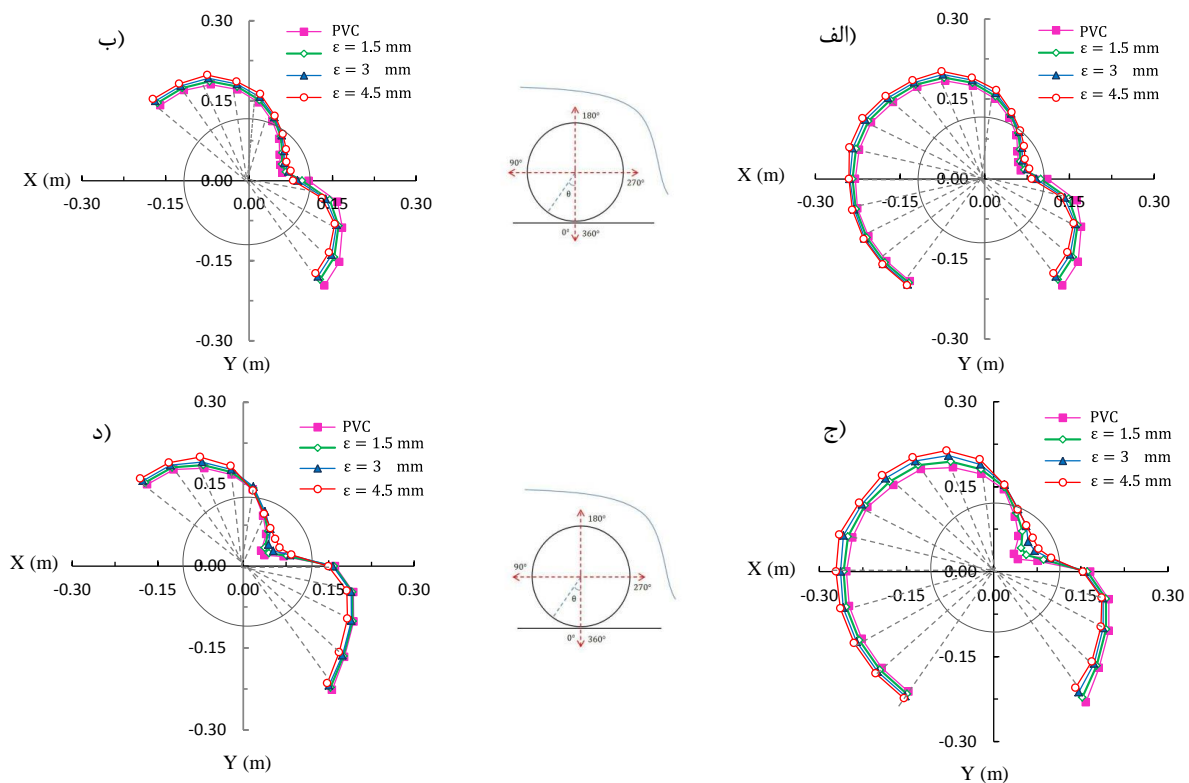
شکل ۱۱. تغییرات فشار روی بدنه سرریز استوانه‌ای در قطر ۲۰۰ میلی‌متر در شرایط الف) بدون رسوب‌گذاری و ب) تراز رسوب‌گذاری $2P/3$



شکل ۱۲. تغییرات فشار در ناحیه سوم از بدنه سرریز استوانه‌ای در دبی ۶۶ لیتر بر ثانیه برای قطرهای الف) ۱۵۰ میلی‌متر، ب) ۲۰۰ میلی‌متر ج) ۲۵۰ میلی‌متر

زبری به دلیل کاهش سرعت محل تشکیل فشار منفی به سمت پایین دست هدایت می‌شود و طولی از کمان که در آن فشار منفی به سرریز اعمال می‌شود، کاهش می‌یابد. از زاویه ۲۷۰ درجه واقع در پایین دست سرریز، به دلیل تأثیر تراز پایاب بر مقدار فشار، برخلاف بازه‌های قبل افزایش زبری باعث می‌شود که جریان به سمت بستر زبر گرایش پیدا کند و منجر به کاهش فشار روی بدنه سرریز می‌شود. کمترین مقدار فشار برای کلیه حالات زبری سطح سرریز، در زاویه ۲۵۰ درجه اتفاق می‌افتد. روند تغییرات فشار در زبرهای مختلف در هر دو تراز رسوب‌گذاری مشابه با یکدیگر است با این تفاوت که مقدار هد فشاری در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، کمتر از مقدار آن در تراز رسوب‌گذاری صفر است.

در شکل (۱۳)، تأثیر زبری بر نیمرخ فشار در نقاط مختلف سطح سرریز برای دبی‌های ۴۴ و ۶۶ لیتر بر ثانیه در تراز رسوب‌گذاری صفر و دوسوم ارتفاع سرریز با قطر ۲۵۰ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو دبی و تراز رسوب‌گذاری، تأثیر زبری بر نیمرخ فشار در بالادست و پایین دست سرریز متفاوت می‌باشد. در حالت کلی افزایش ارتفاع زبری منجر به افزایش هد فشاری در ناحیه بالادست، به‌ویژه در ناحیه دوم (بازه‌ی ۹۰ تا ۱۸۰ درجه) از سرریز می‌شود. ناحیه‌ی سوم از سرریز یعنی بازه‌ای که در آن فشار منفی رخ می‌دهد، نسبت به دو بازه‌ی قبل بیشتر متأثر از ارتفاع زبری است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد عامل سرعت نقش تعیین کننده‌ای در روند تغییرات فشار در این ناحیه دارد. با افزایش



شکل ۱۳. تغییرات فشار روی سرریز استوانه‌ای در قطر ۲۵۰ میلی‌متر الف) دبی ۴۴ لیتر بر ثانیه و تراز رسوب‌گذاری صفر ب) دبی ۴۴ لیتر بر ثانیه و تراز رسوب‌گذاری (2P/3) ج) دبی ۶۶ لیتر بر ثانیه و تراز رسوب‌گذاری صفر و د) دبی ۶۶ لیتر بر ثانیه و تراز رسوب‌گذاری (2P/3)

(ج) بررسی تأثیر توأم زبری سطح سرریز استوانه‌ای و رسوب‌گذاری بالادست بر افت انرژی در شکل (۱۴) تأثیر قطر سرریز بر افت انرژی در زبری‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر، مقدار افت انرژی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تغییرات افت نسبی انرژی در یک مقدار ثابت از نسبت بدون بعد $(\Delta E / E_1)$ در برابر نسبت بدون بعد (H_w / P) در شکل (۱۵) برای هر سه قطر از سرریز استوانه‌ای و در زبری‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای همه سرریزها با افزایش مقدار (H_w / P) ، به دلیل افزایش سرعت و کاهش ضریب دراگ، افت انرژی تقریباً ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در یک مقدار ثابت از نسبت بدون بعد

بررسی تأثیر توأم زبری سطح سرریز استوانه‌ای و رسوب‌گذاری بالادست بر افت انرژی در شکل (۱۴) تأثیر قطر سرریز بر افت انرژی در زبری‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر، مقدار افت انرژی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تغییرات افت نسبی انرژی

ارائه روابطی جهت پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای با هندسه‌های مختلف تحت شرایط هیدرولیکی یاد شده می‌توان در مراحل اولیه طراحی این نوع سرریزها مفید باشد. برای استخراج مدل رگرسیونی، تحلیل آماری بر روی پارامترهای هندسی مهم اثرگذار مورد مطالعه در این پژوهش بر ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای در صورت افزایش تراز رسوب‌گذاری و اعمال زبری روی سطح سرریزها انجام پذیرفت. همچنین جهت تشریح بهتر همبستگی میان نتایج آزمایشگاهی و مدل رگرسیونی در برآورد ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای، از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، راندمان مدل (EF) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |C_d(Exp) - C_d(Est)|^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (C_d(Exp) - C_d(Est))^2 - \sum_{i=1}^n (C_d(Exp) - \bar{C}_d)^2}{\sum_{i=1}^n (C_d(Exp) - \bar{C}_d)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

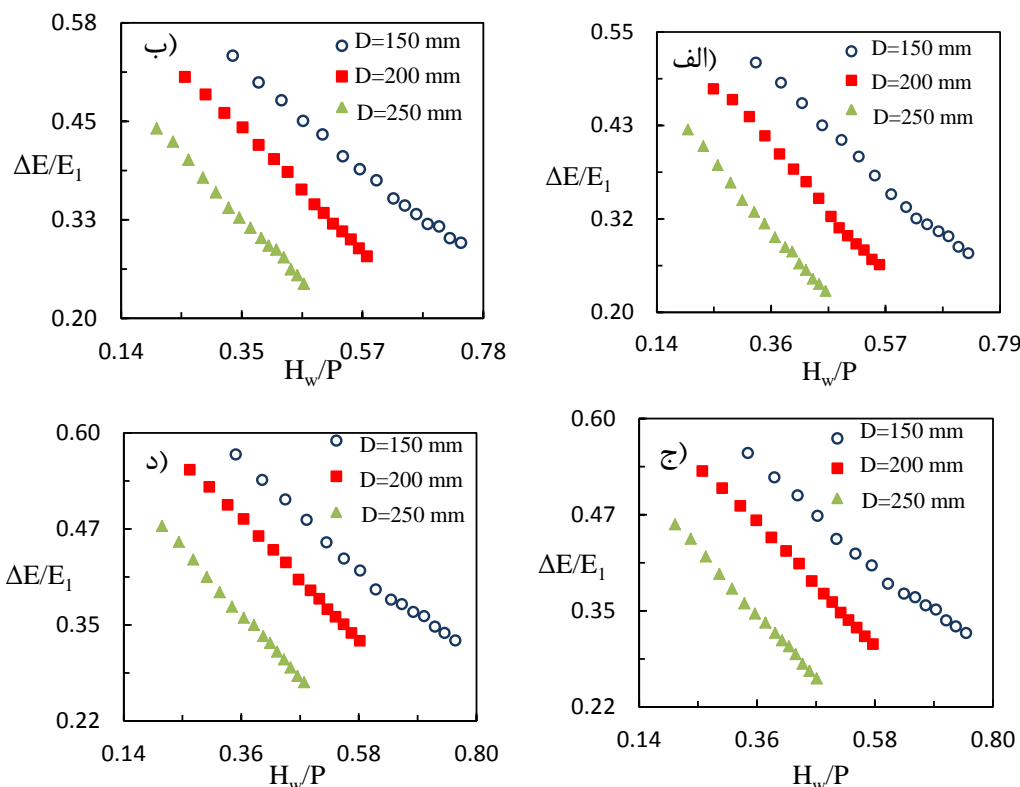
که در آن $C_d(Est)$ ضریب دبی سرریز برآورد شده از معادله پیشنهادی، $C_d(Exp)$ ضریب دبی سرریز حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

(H_w/P)، افزایش زبری از حالت PVC به زبری ۴/۵ میلی‌متر، منجر به افزایش افت انرژی به مقدار تقریباً ۱۴ درصد می‌شود که این روند به دلیل اصطحاکاتی که در اثر زبری ایجاد می‌شود قابل توجیه است.

در شکل (۱۵) تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر افت نسبی انرژی نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در هر سه قطر از سرریز و در یک زبری ثابت، با افزایش رسوب‌گذاری از تراز صفر به دوسوم ارتفاع سرریز مقدار افت انرژی تقریباً ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سطح رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، با افزایش زبری به ۴/۵ میلی‌متر و در نتیجه افزایش مقدار فاکتور اصطحاکاتی، مقدار افت انرژی ۱۰ تا ۱۶ درصد افزایش می‌یابد.

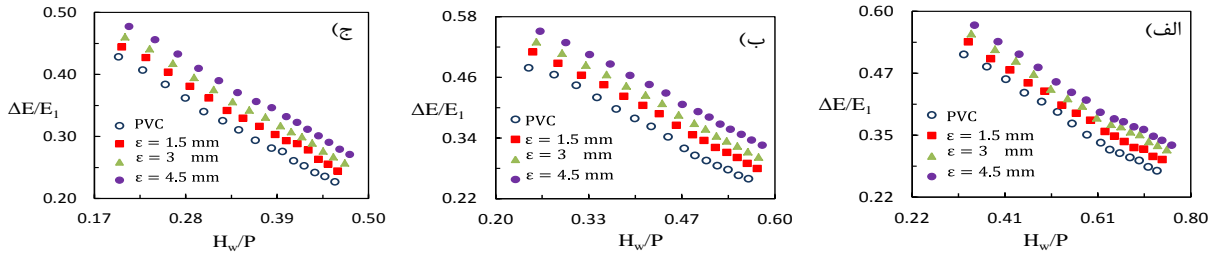
د) استخراج معادله رگرسیونی برای ضریب دبی جریان در سرریزهای استوانه‌ای

عملکرد سرریزهای استوانه‌ای تحت تأثیر پارامترهای هندسی مختلفی نظیر عرض کانال، شیب کانال، قطر سازه، ارتفاع زبری و شرایط هیدرولیکی مختلف مانند رسوب‌گذاری در بالادست و شرایط استغراق جریان در پایین‌دست سرریز می‌باشد. بنابراین

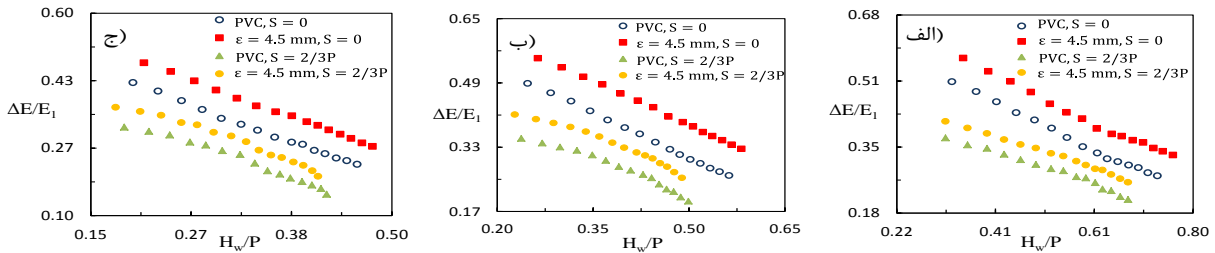


شکل ۱۴- تأثیر قطر سرریز استوانه‌ای بر افت نسبی انرژی در شرایط الف) بدون اعمال زبری (PVC)، ب) زبری ۱/۵ میلی‌متر،

ج) زبری ۳ میلی‌متر و د) زبری ۴/۵ میلی‌متر



شکل ۱۵. تغییرات افت نسبی انرژی در سرریزهای استوانه‌ای در زبری‌های مختلف برای قطرهای (الف) ۱۵۰ میلی‌متر، (ب) ۲۰۰ میلی‌متر (ج) ۲۵۰ میلی‌متر



شکل ۱۶. تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر افت نسبی انرژی در سرریزهای استوانه‌ای، برای قطرهای (الف) ۱۵۰ میلی‌متر، (ب) ۲۰۰ میلی‌متر (ج) ۲۵۰ میلی‌متر

نتیجه‌گیری

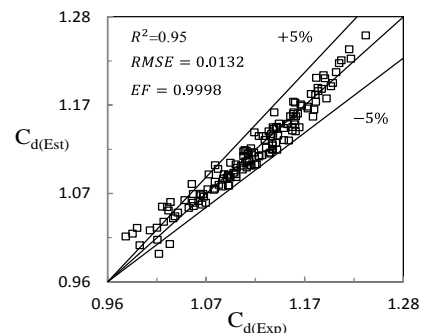
در این تحقیق، تأثیر پارامترهای هندسی، زبری و اثر رسوب‌گذاری در بالادست سرریز بر خصوصیات هیدرولیکی نظیر ضریب دبی سرریز، منحنی دبی-اشل، افت انرژی و تغییرات فشار در سرریز استوانه‌ای بررسی شد. نتایج آزمایش‌های این تحقیق نشان داد که در هر سه قطر از سرریز در محدوده دبی ۱۶ تا ۶۶ لیتر بر ثانیه با افزایش زبری از حالت صاف به ۴/۵ میلی‌متر، مقدار هد آب بالادست به‌طور متوسط ۵ تا ۸ درصد افزایش و ضریب دبی سرریز ۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر تغییرات هد آب بالادست و ضریب دبی سرریز در دبی‌های پایین ناچیز و با افزایش دبی بر تأثیر قطر سازه افزوده می‌شود به‌طوری که در دبی‌های بالا در یک زبری ثابت با افزایش قطر سرریز، مقدار هد آب بالادست تقریباً ۳ درصد افزایش و ضریب دبی سرریز ۴ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش تراز رسوب‌گذاری از صفر به دوسوم ارتفاع سرریز در شرایط بدون اعمال زبری، مقدار هد آب بالادست در محدوده دبی مورد مطالعه ۲ درصد کاهش و ضریب دبی سرریز تا ۳ درصد افزایش می‌یابد. در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، افزایش زبری به ۴/۵ میلی‌متر منجر به افزایش تا ۵ درصدی هد آب بالادست و کاهش تا ۷ درصدی ضریب دبی سرریز می‌شود. بررسی نتایج نشان داد که با عبور جریان از روی سرریز توزیع فشار همواره کاهش می‌یابد. روند تغییرات فشار در طول سرریز در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، مشابه با روند تغییرات آن در شرایط بدون رسوب است اما مقدار آن با افزایش تراز رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع زبری

به‌منظور استخراج روابط رگرسیونی، ۷۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها جهت صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. در استخراج معادله رگرسیونی، ترکیب‌های مختلف از پارامترهای اثرگذار که در معادله (۵) آورده شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت معادله (۸) استخراج گردید. در نمودار شکل (۱۷) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و برآورد شده ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان داشت که معادله استخراج شده از مدل رگرسیونی در برآورد ضریب دبی سرریزهای یاد شده برای شرایط هیدرولیکی مختلف دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.

$$C_{dw} = f\left(\frac{H_w}{H_1}, \frac{H_w}{P}, \frac{\varepsilon}{H_1}, \frac{S}{P}\right) \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$\quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$C_{d(Est)} = 0.9881 + 0.1677\left(\frac{H_w}{H_1}\right) + 0.1981\left(\frac{H_w}{P}\right) - 3.8393\left(\frac{\varepsilon}{H_1}\right) + 0.0173\left(\frac{S}{P}\right)$$



شکل ۱۷. ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی در برآورد ضریب دبی سرریزهای استوانه‌ای در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای شرایط رسوب‌گذاری و زبری مختلف

مقدار تقریباً ۱۴ درصد در هر سه سرریز می‌شود. در هر سه قطر از سرریز با افزایش تراز رسوب‌گذاری از صفر به دوسوم ارتفاع سرریز مقدار افت انرژی تقریباً ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. در سطح رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز افزایش زبری به ۴/۵ میلی‌متر منجر به افزایش ۱۰ تا ۱۶ درصدی افت انرژی می‌شود. در انتها رابطه‌ای مبتنی بر تحلیل رگرسیونی برای برآورد ضریب دبی سرریز در شرایط رسوب‌گذاری و زبری‌های مختلف سطح سرریز ارائه گردید.

منجر به افزایش هد فشاری در ناحیه بالادست می‌شود. در بازه‌ای از سرریز که در آن فشار منفی رخ می‌دهد، با افزایش زبری محل تشکیل فشار منفی به سمت پایین دست هدایت می‌شود و طولی از کمان که در آن فشار منفی به سرریز اعمال می‌شود، کاهش می‌یابد. مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که با افزایش قطر سرریز از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌متر، مقدار افت انرژی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین افزایش زبری از PVC به زبری ۴/۵ میلی‌متر، منجر به افزایش افت انرژی به

REFERENCES

- Asgarinezhad, A. R. (2013). Laboratory investigation of the effect of sedimentation and weir's angle on discharge coefficient of triangular weirs. Msc Thesis. University of Tarbiat modares, Tehran. (In Farsi)
- Bazin, H. (1898). Recent experiments on the flow of water over weirs. Mémoires Documents. Annales des Ponts et Chaussées. Paris. France. 15, 151-264.
- Beygipour, Gh. And Bina, M. (2005). Hydraulic characteristics of flow in cylindrical and circular crested weir. 5th Iranian hydraulics conference. Shahid Bahonar university of Kerman. Kerman. Iran. (In Farsi)
- Bos, M.G. (1976). Discharge measurement Structures. International Institute for Land Reclamation and Implovement, Wengeningen. The Netherlands. pp. 394.
- Chanson, H. and Montes, J. S. (1998). Overflow characteristics of circular weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 124(3), 152-162
- Creager, W.P. (1917). Engineering for masonry dams. John Wiley and Sons, New York, USA. pp. 289.
- Dastorani, M. and Nasrabadi, M. (2012). The effect of sedimentation deposition behind of ogee weir on flow conditions. Iranian Water Research Journal, 6(10), 47-57. (In Farsi)
- Dizji, N. and Mahmoudkhani, A.M. (2009). Experimental investigation of effect of sedimentation on discharge coefficient in triangular, rectangular, ogee and over pass in open channel. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 3(8), 50-39. (In Farsi)
- Dressler, R. F. (1978). New nonlinear shallow flow equations with curvature. *Journal of Hydraulic Research*, 16(3), 205-222.
- Escande, L. and Sananes, F. (1959). Etudes des seuils déversants à fente aspiratrice (Weirs with suction slots). *Journal of La Houille Blanche*, 14(Special B), 892-902.
- Esmaeili, K., Naghavi, B. Kouros Vahid, F. and Yazdi, J. (2010). Experimental and numerical modeling of flow pattern on circular weir. *Journal of Water and Soil*, 24(1), 166-179. (In Farsi)
- Heidarpour, M. and Chamain, M. R. (2006). Velocity distribution over cylindrical weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 44(5), 708-711. (In Farsi)
- Heidarpour, M., J. Mohammadzadeh Habili and A. H. Haghiabi. (2008). Application of potential flow to circular-crested weir. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 699-702. (In Farsi)
- Jaeger, C. (1956). Engineering fluid mechanics. Blackie and Son, London. pp. 548.
- Masoudian, M. and Gharahgezlou, M. (2012). Flow Characteristics of cylindrical weirs in a small laboratory canal. *Journal of Science Series Data Report*, 4(4), 12- 23.
- Othman, KH. I., Tahsen, A.CH. and Ebrahim, A. I. AL. H. (2010). Effect of size and surface roughness of cylindrical weirs on overflow characteristics. *Journal of AL-Rafidain Engineering*, 19(2), 77-89.
- Parilcova, J., Řiha, J. and Zachoval, Z. (2012). The influence of roughness on the discharge coefficient of abroad-crested weir. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, P: 101-114.
- Ramamurthy, A. S., Vo, N. D. and Vera, G. (1992). Momentum model of flow past weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 118(6), 988-994.
- Ramamurthy, A. S. and Vo, N. D. (1993a). Application of Dressler theory to weir flow. *Journal of Applied Mechanics*, 60(1), 163-166.
- Ramamurthy, A. S. and Vo, N. D. (1993b). Characteristics of circularcrested weir. *Journal of Hydraul Engineering*, ASCE, 119(9), 1055-1062.
- Rehbok, T. (1929). The river hydraulic laboratory of the Technical University of Karlsruhe. hydraulic laboratory practice. ASME, New York, N.Y, 111-242.
- Sarginson, EJ. (1972). Theinfluence of surfac tension on weir flow. *Journal of Hydraulic Research*, 10(4), 431-446.
- Shabanlou, S. and khorami, E. (2013). Study of the hydraulic properties of the cylindrical crested weirs. *Journal of Flow Measurement Institute*, 33, 153-159. (In Farsi)
- Shafaattalab Dehghani, H., Esmaeili Varaki, M. and Ashragzadeh, A. (2015). Experimental study on effect of geometry and up stream channel bed level on discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weir. 14th Iranian hydraulics Conference. University of Sistan and balochestan, Zahedan. (In Farsi)