



بررسی تغییرات ضریب دبی در سرریز لبه پهن مستطیلی با رویه شیب‌دار بالادست و پایین دست با شبیه سازی عددی

فائزه ملک زاده، فرزین سلماسی*، هادی ارونقی

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

سرریز لبه پهن
ضریب دبی
شیب وجه بالادست
اندازه‌گیری دبی

خلاصه: سرریزها از جمله سازه‌هایی هستند که به منظور اندازه‌گیری دبی جریان و کنترل سطح آب دارای اهمیت بوده و به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که ضریب دبی در سرریز لبه پهن عدد ثابتی نبوده و تابعی از پارامترهایی مانند طول سرریز، ارتفاع سرریز، ارتفاع آب بالادست سرریز، شیب بالادست و پایین دست است. در این تحقیق به صورت شبیه‌سازی عددی، تأثیر پارامترهای مذکور بر روی ضریب دبی جریان مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت استفاده شد. نتایج نشان داد که شیب وجه پایین دست تأثیر چندانی روی ضریب دبی جریان ندارد. به ازای مقادیر w/H_1 بین ۰/۱ و ۰/۴ با کاهش شیب بالادست مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد (H_1 بار آبی روی تاج سرریز و w طول تاج است). به ازای مقادیر w/H_1 بین ۰/۱ و ۰/۴ با کاهش ارتفاع سرریز (p)، ضریب دبی افزایش می‌یابد. به ازای مقادیر p/H_1 بین ۰/۱۶ و ۲/۰ با کاهش طول تاج، ضریب دبی افزایش می‌یابد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی سایر محققین انجام و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۷۱ تا ۰/۸۶ به دست آمد. علاوه بر ضریب دبی، استخراج سایر اطلاعات جزئی‌تر مانند پروفیل سطح آب، پروفیل عمقی سرعت در مقاطع مختلف در بالادست، پایین دست و روی سرریز به همراه کانتورهای فشار انجام شد.

۱- مقدمه

سرریزهای لبه پهن مزایایی نسبت به سایر سازه‌های اندازه‌گیری جریان دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲]:
- توانایی اندازه‌گیری محدوده‌ی مناسبی از دبی جریان. برای جریان‌های کمتر از ۱۰ فوت مکعب بر ثانیه (۰/۲۸۳ متر مکعب بر ثانیه) تا بیشتر از ۱۵۰ فوت مکعب بر ثانیه (۴/۲۴۸ متر مکعب بر ثانیه) مناسب می‌باشند.
- در شرایطی که آبراهه عریض باشد، نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری از کارایی بالاتری برخوردار هستند.
- دارای استحکام بالایی نسبت به سرریزهای لبه تیز هستند.
- آستانه استغراق بالایی دارند. مستغرق شدن تا حدود ۸۰ درصد با وجه پایین دست عمودی و تا ۹۰ درصد با وجه بالادست شیب‌دار اثری روی عملکرد و دقت سرریزهای لبه پهن ندارد.
- بیشتر به عنوان سرریز سد به خصوص در سرریزهای گابیونی و گاهی به عنوان خود سد) در صورتی که آب مجاز به گذشتن از روی آن باشد) به کار می‌روند.

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای اندازه‌گیری دبی جریان و کنترل سطح آب در کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزایش دقت اندازه‌گیری و همچنین سهولت بهره‌برداری در شرایط مختلف سبب تنوع طراحی سرریزها شده است. سرریزها برحسب ضخامت لبه آن‌ها در جهت جریان به دو گروه سرریزهای لبه تیز (لبه نازک) و لبه پهن تقسیم‌بندی می‌شوند. در سرریز لبه تیز، ضخامت لبه سرریز در مقایسه با سایر ابعاد آن بسیار کوچک است در حالی که در سرریز لبه پهن، لبه سرریز به اندازه کافی پهن بوده و در مقایسه با سایر ابعاد سرریز اندازه قابل ملاحظه‌ای دارد. در سرریزهای لبه تیز، سفره آب فقط با لبه تیز سرریز در تماس است، در صورتی که در سرریز لبه پهن، سفره آب بر روی تمامی ضخامت لبه بالای سرریز جریان دارد. سرریزهای لبه تیز معمولاً با توجه به شکل بازشدگی طبقه‌بندی می‌شوند که انواع مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای، دایره‌ای و سهموی را از این گروه می‌توان نام برد [۱].

- در مواقع لزوم برای ذخیره نمودن حجم‌های زیاد آب و ارتفاع‌های بالا

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: armamdoohi@modares.ac.ir



می‌توان از سرریزهای لبه پهن استفاده کرد.

- اگر وجه بالادست سرریز شیب‌دار باشد، نسبت به سرریزهای لبه تیز، به راحتی می‌تواند رسوبات و اجسام شناور را از خود عبور دهد [۳].

از معایب سرریزهای لبه پهن این است که کشاورزان و سایر مصرف کنندگان آب تمایل به نصب این سازه ندارند. زیرا آن‌ها معتقدند که این سازه به طور قابل ملاحظه‌ای حجم انتقال آب کانال را کم می‌کند. هر چند که این مورد درک نادرستی از سرریز لبه پهنی است که به درستی طراحی شده است و این یک عیب مهم در مقایسه با سایر سازه‌های اندازه‌گیری تلقی نمی‌شود. همچنین برای آب‌هایی که همراه با رسوب هستند، مشکل ته‌نشینی رسوبات در بالادست سازه وجود دارد (برای سرریز لبه پهن با وجه بالادست عمودی).

گوینداریو و مورالیدها (۱۹۶۳) سرریزهای مستطیلی را بر اساس بار هیدرولیکی کل آب (H_1) و طول تاج سرریز (w) به چهار دسته سرریزهای لبه طولانی مستطیلی ($0 < H_1/w < 0.1$)، سرریزهای لبه پهن مستطیلی ($0.1 < H_1/w < 0.4$)، سرریزهای لبه کوتاه مستطیلی ($0.4 < H_1/w < 1.5$) و سرریزهای لبه تیز مستطیلی ($1.5 < H_1/w$) تقسیم کردند [۴]. سینگر (۱۹۶۴) نشان داد که با تغییر ارتفاع سرریز (p) و طول تاج سرریز (w)، ضریب دبی تغییر می‌کند [۵]. هاگر و اسپوالت (۱۹۹۴) تحقیقی در خصوص سرریز لبه پهن با دیواره‌های عمودی انجام دادند. آن‌ها در طول سرریز پیژومترهایی برای اندازه‌گیری فشار مورد استفاده قرار دادند که تعدادی از پیژومترها در سطح دیواره قائم بالادست و تعدادی دیگر بر روی بخش افقی سرریز قرار گرفتند [۶]. از نتایج قابل توجه که توسط هاگر و اسپوالت (۱۹۹۴) به دست آمد، افت یک باره سطح جریان در پایین‌دست سرریز در دبی‌های کم بود. در حالی که در دبی‌های زیاد سطح جریان به تدریج از بالادست سرریز افت کرده و به پایین‌دست سرریز می‌رسید.

فریتز و هاگر (۱۹۹۸) ضریب دبی و داده‌های جریان را برای سرریز لبه پهن با شیب دیواره‌های ۲:۱ (عمودی: افقی) به دست آوردند [۷]. آن‌ها نشان دادند که پدیده جدایش جریان در وجه بالادست سرریز به دلیل شیب‌دار بودن آن کاهش می‌یابد. جانسون (۲۰۰۰) نشان داد که منحنی تغییرات ضریب دبی برای هر دو سرریز لبه پهن و لبه تیز به ازای $H_1/w > 0.2$ به یک منحنی واحد تبدیل می‌شوند که در آن H_1 بار آبی روی سرریز و w طول تاج سرریز می‌باشند [۸].

فرهودی و شاه‌عالمی (۲۰۰۵) تاثیر شیب وجه بالادست سرریز لبه پهن،

در چند شیب محدود را مورد بررسی قرار داده و افزایش ضریب دبی سرریز با کاهش شیب وجه بالادست سرریز را گزارش کردند و شیب ۲۵ درجه را برای وجه بالادست پیشنهاد نمودند [۹].

گوگوس و همکاران (۲۰۰۶) آزمایشات متعددی برای سرریزهای لبه پهن مستطیلی با مقطع مرکب انجام دادند [۱۰]. این نوع سرریز شامل یک بخش مستطیلی کوچک برای عبور دبی‌های کم و نیز یک بخش مستطیلی بالایی با عرض بیشتر است. مقطع مرکب (مجموع بخش مستطیلی کوچک در زیر و بخش مستطیلی بالایی) برای عبور دبی‌های بیشتر به کار می‌رود. مطالعه سرریزهای لبه پهن مستطیلی با مقطع مرکب در تحقیق سلماسی و همکاران (۲۰۱۳) نیز دیده می‌شود که در آن با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی، اقدام به تخمین ضریب دبی با برنامه‌ریزی ژنتیک (GA) شده است [۱۱].

فرهودی و شکری (۲۰۰۷) به صورت آزمایشگاهی تاثیر شیب وجه پایین‌دست را بر ضریب دبی بررسی کردند و نشان دادند که شیب وجه پایین‌دست اثر ناچیزی بر روی ضریب دبی دارد و برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون بهتر است این شیب به صورت قائم ساخته شود [۱۲]. چانسون و گزالس (۲۰۰۷) آزمایشاتی را روی سرریز لبه پهن انجام دادند و پروفیل توزیع فشار و توزیع سرعت را روی یک سرریز لبه پهن غیرتیزگوشه مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. نتایج نشان داد که در دیواره بالادست سرریز، جریان گرداب‌های ماریچی تشکیل می‌شود که دارای محور عمودی می‌باشد. آن‌ها از طریق تحلیل ابعادی اظهار داشتند که شکل‌گیری و میزان قدرت این جریان‌های گردابه‌ای، تابعی از ارتفاع نسبی سرریز (H_1/p) عرض نسبی (B/p) و عدد رینولدز جریان ($Q/B \times v$) می‌باشد که در آن H_1 ارتفاع آب روی تاج، p ارتفاع سرریز، B عرض سرریز، Q دبی عبوری از روی سرریز و v لزجت سینماتیک هستند.

سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) با ساخت مدل‌های فیزیکی از سرریزهای لبه پهن مستطیلی با شیب‌های بالادست و پایین‌دست متفاوت، نشان دادند که شیب پایین‌دست اثر ناچیزی روی ضریب دبی دارد و هر چقدر شیب بالادست ملایم‌تر شود، ضریب دبی افزایش می‌یابد [۳]. بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی جریان از روی سرریزهایی با طول تاج و ارتفاع متفاوت را بررسی کردند تا با توجه به پارامترهای بی‌بعد w/p و k_s/p برای انواع مختلف سرریزهای مستطیلی (سرریز لبه بلند، سرریز لبه پهن، سرریز لبه کوتاه و سرریز لبه تیز) فرمول واحدی به دست آورند [۱۴]. بررسی آن‌ها منجر به ارائه رابطه زیر با خطای کمتر از ۴ درصد شد.

پایین دست و y_1 : عمق آب بالادست)، فاکتور کاهش دبی (ψ) در جریان آزاد با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد ولی در جریان مستغرق، این حالت نزولی شیب تندتری به خود می‌گیرد و با افزایش شیب بالادست و پایین دست فاکتور کاهش دبی افزایش می‌یابد. مطالعه جدید دیگر مربوط به تحقیق سلماسی و همکاران (۲۰۲۱a) است که ضریب دبی سرریز گابیونی لبه پهن مستطیلی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی کردند [۲۰]. بر اساس نتایج آزمایشگاهی روی مدل‌های فیزیکی، ایشان روابط رگرسیونی برای تخمین ضریب دبی این نوع سرریزها را ارائه کردند.

دیوید و جیمز (۲۰۲۰) بررسی آزمایشگاهی برای تعیین ضریب دبی برای سرریز لبه‌پهن ذوزنقه‌ای انجام دادند [۲۱] و نتایج خود را با نتایج فریتز و هاگر [۷] و سارگیسون و پرسی [۳] مقایسه کردند. نتایج نشان داد که وجوه بالادست و پایین دست بر روی ضریب دبی سرریز لبه‌پهن تأثیر دارد. همچنین رابطه زیر را با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۱/۱۱ درصد ارائه دادند:

$$C_d = 0.4 - 0.215(\sin \theta)^{\frac{22}{125}} + 0.13(\sin \phi)^{\frac{3}{20}} + \frac{0.134\zeta}{1 + 0.596\zeta} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{H_0}{L}$$

که در آن H_0 بار هیدرولیکی بالادست سرریز تا خط انرژزی، L : طول تاج سرریز، θ : زاویه شیب بالادست سرریز و ϕ : زاویه شیب پایین دست سرریز می‌باشند. سلماسی و همکاران (۲۰۲۱b) ضریب دبی سرریز لبه‌پهن مستطیلی را به روش هوش مصنوعی و با دقت خوب تخمین زدند [۲۲]. آن‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات آزمایشگاهی، از نتایج تحقیقات چهار محقق دیگر استفاده نمودند.

اخیرا سلماسی و همکاران (۲۰۲۲) ضریب دبی سرریز اوجی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و اثر شیب بالادست، ارتفاع کف حوضچه آرامش و استغراق بر ضریب دبی را با معادلات ریاضی نشان دادند [۲۳]. زریهان (۲۰۲۰) با استفاده از بررسی‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ای را برای تخمین ضریب دبی برای سرریزهای با مقطع ذوزنقه‌ای ارائه کرد [۲۴]. از مطالعات دیگر برای تعیین ضریب دبی می‌توان به تحقیق اکبری

$$\frac{h_1}{w} = 1.4404 \left(\frac{w}{P} \right)^{-0.97} \left(\frac{K_s}{P} \right) \quad (1)$$

در رابطه بالا h_1 بار آبی در بالادست سرریز، w طول تاج سرریز، P ارتفاع سرریز و K_s عمق بحرانی می‌باشد.

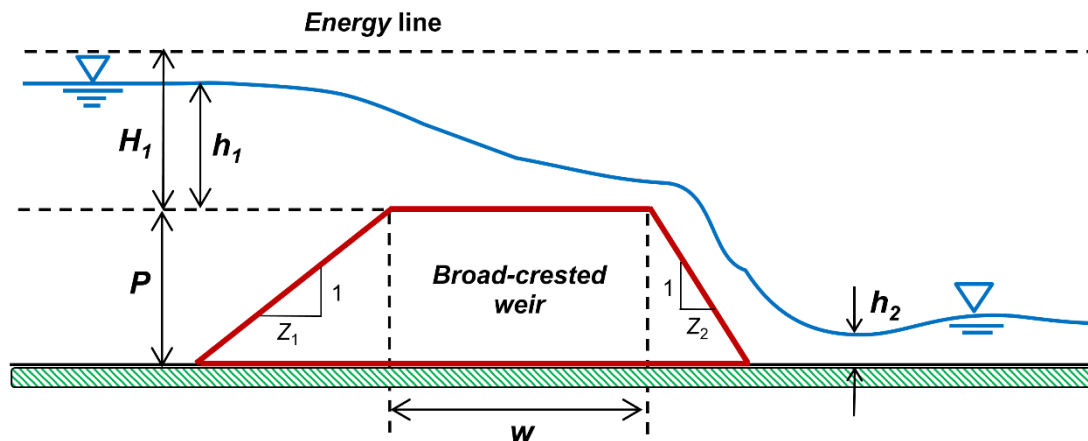
حسینی و افشار (۲۰۱۴) آزمایشاتی را روی دو مدل از سرریز لبه‌پهن مستطیلی با طول‌های مختلف به منظور بررسی ضریب دبی انجام دادند [۱۵]. نتایج آنان نشان داد که پارامتر بدون بعد H_1/B (H_1 : بار آبی بالادست سرریز و B : عرض سرریز) در تعیین معادله ضریب دبی نباید نادیده گرفته شود. همچنین با افزایش عمق آب روی تاج سرریز، ضریب دبی به مقدار کمی افزایش پیدا کرد که با نتایج مطالعات قبلی همخوانی دارد.

مددی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر شیب وجه بالادست سرریز لبه‌پهن مستطیلی روی ضریب دبی و پروفیل سطح آب پرداختند [۱۶]. نتایج نشان داد که کاهش شیب وجه بالادست از توسعه ناحیه‌ی جدائی جلوگیری می‌کند. آنان اظهار داشتند که کاهش شیب وجه بالادست تا ۲۱ درجه، ضریب دبی را تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد و طول و ارتفاع نسبی جدائی را به ترتیب ۸۰ و ۹۵ درصد کاهش می‌دهد. جیانگ و همکاران (۲۰۱۸) به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار *OpenFOAM*، جریان از روی سرریز لبه‌پهن با وجه بالادست شیب‌دار را بررسی کردند [۱۷]. آن‌ها نشان دادند بین ضریب دبی و شیب وجه بالادست رابطه عکس وجود دارد. بدین معنی که با کاهش شیب وجه بالادست، ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین وقتی که شیب وجه بالادست بیشتر از ۶۰ درجه شود، پدیده کاویتاسیون اتفاق می‌افتد و با افزایش این شیب کاویتاسیون افزایش می‌یابد.

هیترز و نیکولاس (۱۹۸۱) سرریز لبه‌پهن را به صورت آزمایشگاهی و عددی با استفاده از نرم‌افزار *Ansys Fluent* مدل‌سازی کرده و فرمول زیر را برای ضریب دبی ارائه کردند و بیان کردند که اندازه سازه در محل تشکیل عمق بحرانی تأثیر دارد [۱۸].

$$C_{wd} = \frac{0.65}{\sqrt{1 + \frac{H_1}{P}}} \quad (2)$$

مرادی و همکاران (۲۰۲۰) مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرریز گابیونی لبه‌پهن با وجوه شیب‌دار بالادست و پایین دست انجام دادند [۱۹]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش پارامتر عمق نسبی y_2/y_1 (y_2 : عمق آب



شکل ۱. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی سرریز لبه پهن

Fig. 1. Geometrical and hydraulic parameters of the broad-crested weir

۳- معیارهای ارزیابی دقت

برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی نرم‌افزار Ansys Fluent در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی موجود، از سه شاخص آماری استفاده شده است. معیارهای ارزیابی شامل ضریب تبیین (R^2) ، جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و درصد خطای نسبی^۳ (%RE) می‌باشند که هر کدام از آن‌ها به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌گردند.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$RE\% = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (6)$$

در این روابط O_i مقادیر ضریب دبی حاصل از نرم‌افزار Ansys Flu-

- 1 Determination coefficient
- 2 Root mean square error
- 3 Percent relative error

و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد که روی سرریزهای کلید پیاپویی انجام شد [۲۵].

در این تحقیق جریان آزاد بر روی سرریزهای لبه پهن با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent و به صورت دو بعدی شبیه‌سازی می‌شود. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که عوامل متعددی روی ضریب دبی در سرریزهای لبه پهن تاثیرگذار هستند. لیکن مطالعه‌ای که تاثیر همزمان عوامل مختلف را بررسی کرده باشد، وجود ندارد. در تحقیق حاضر، با تغییر پارامترهای هندسی (شیب بالادست سرریز، شیب پایین‌دست سرریز، ارتفاع سرریز، طول تاج سرریز و ارتفاع آب بالادست سرریز) تغییرات ضریب دبی، پروفیل سرعت و فشار به دست خواهد آمد. در نظر گرفتن تمامی متغیرها، منجر به دستیابی به داده‌های زیادی می‌شود و بر غنای کار می‌افزاید. برای استفاده از نتایج حاصله، سعی خواهد شد تا معادلات ریاضی با دقت مناسب برای طراحی این نوع سازه ارائه گردد. به نظر می‌رسد که شیب‌دار کردن وجوه بالادست و پایین‌دست این نوع سرریز، بر عملکرد و کارایی آن خواهد افزود.

۲- مواد و روش‌ها

شکل ۱ مقطع طولی سرریز لبه پهن مستطیلی به همراه پارامترهای هیدرولیکی را نشان می‌دهد. در جدول ۱ مشخصات هندسی سرریزهای لبه پهن بررسی شده در این تحقیق ارائه شده است. تعداد کل شبیه‌سازی‌ها ۴۳۲ مورد و شامل ۴ شیب بالادست، ۴ شیب پایین‌دست، ۳ ارتفاع سرریز، ۳ ارتفاع آب در بالادست سرریز و ۳ طول تاج سرریز است.

جدول ۱. مشخصات هندسی سرریزهای لبه پهن در این تحقیق

Table 1. Geometrical properties of broad-crested weirs in this study

شیب وجه بالادست (Z1)	شیب وجه پایین دست (Z2)	بار آبی (H1) (m)	عرض کانال (L) (m)	طول تاج سرریز (w) (m)	ارتفاع سرریز (p) (m)
۰ - ۴	۰ - ۴	۰/۵ - ۰/۲	۰/۶	۰/۵ - ۱	۰/۱ - ۰/۳

شامل: شتاب ثقل (g)، لزوجت دینامیکی (μ)، و جرم مخصوص (ρ) می‌باشند.

در معادله (۸) ترم بدون بعد $\frac{\rho g^{0.5} H_1^{1.5}}{F_r}$ ، شاخص تأثیر نیروی لزوجت بوده و معادل با نسبت عدد رینولدز (R_e) به عدد فرود (F_r) است.

$$\frac{R_e}{F_r} = \frac{\rho g^{0.5} H_1^{1.5}}{\mu} \quad (10)$$

برای سیال معین مقادیر g و ρ و μ معلوم و ثابت می‌باشد، از این رو ترم‌های R_e و F_r به صورت تابعی از H_1 در نظر گرفته می‌شود. لذا رابطه (۹) به صورت رابطه (۱۱) ساده می‌شود.

$$\frac{Q}{g^{0.5} H_1^{2.5}} = f^* \left(\frac{H_1}{w}, \frac{H_1}{p}, \frac{L}{w}, Z_1, Z_2 \right) \quad (11)$$

همچنین رابطه کلی سرریز لبه پهن مستطیلی به صورت زیر است.

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_1^{1.5} \quad (12)$$

از مقایسه طرف راست معادله (۱۱) با معادله کلی سرریز لبه پهن مستطیلی معادله (۱۲) ملاحظه می‌شود که طرف راست معادله (۱۱) به عنوان ضریب دبی با تابع ساده و کاربردی زیر معادل خواهد بود.

$$C_d = f \left(\frac{H_1}{w}, \frac{H_1}{p}, \frac{L}{w}, Z_1, Z_2 \right) \quad (13)$$

با توجه به فاکتورهای متغیر در این تحقیق معادله نهایی به فرم معادله

P_i, ent مقادیر آزمایشگاهی ضریب دبی به دست آمده از سایر محققان، میانگین مقادیر حاصل از نرم‌افزار (شبیه‌سازی عددی) و n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

۴- آنالیز ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که بیشترین تأثیر را در ضریب دبی سرریز لبه پهن مستطیلی دارند اقدام نموده و با تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج می‌گردد. پارامترهای موثر در این تحقیق در رابطه زیر ارائه شده است [۲۶].

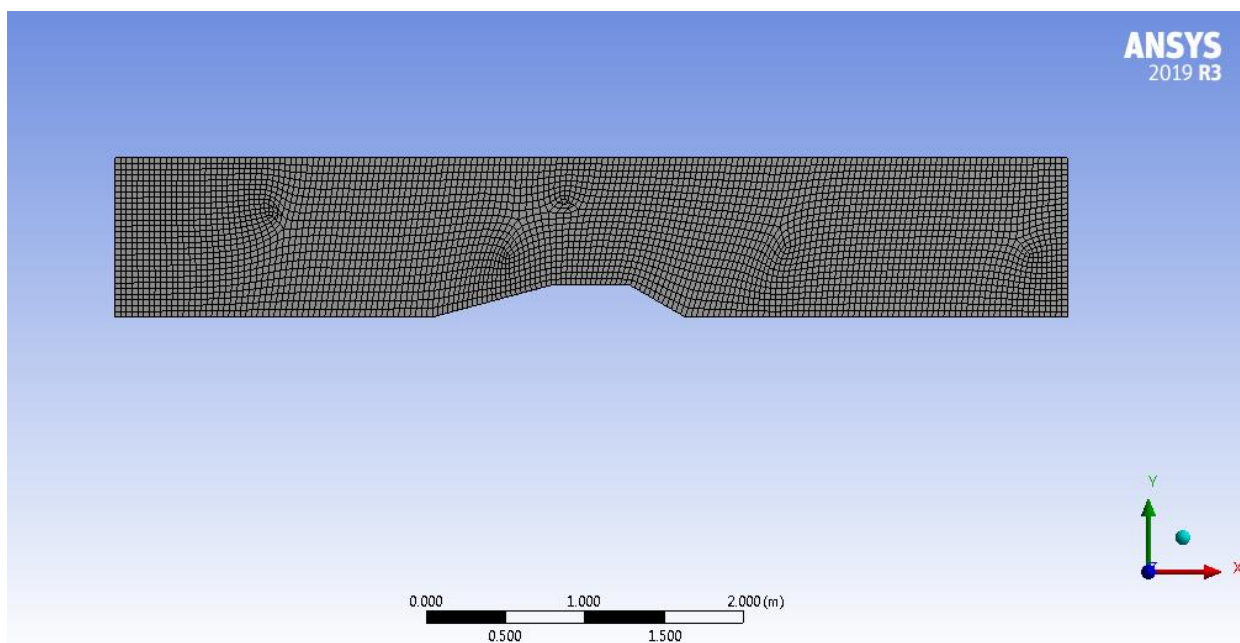
$$f(H_1, w, p, L, Q, g, \mu, Z_1, Z_2) = 0 \quad (7)$$

با استفاده از تئوری پی-باکینگهام، عوامل بی‌بعد به صورت معادلات زیر به دست آمدند.

$$f \left(\frac{H_1}{w}, \frac{H_1}{p}, \frac{L}{w}, \frac{\rho g^{0.5} H_1^{1.5}}{\mu}, \frac{Q}{g^{0.5} H_1^{2.5}}, Z_1, Z_2 \right) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{Q}{g^{0.5} H_1^{2.5}} = f \left(\frac{H_1}{w}, \frac{H_1}{p}, \frac{L}{w}, \frac{\rho g^{0.5} H_1^{1.5}}{\mu}, Z_1, Z_2 \right) \quad (9)$$

در روابط فوق، خصوصیات هندسی که شامل: ارتفاع سرریز (p)، عرض تاج سرریز (L)، هد کل موثر در بالادست سرریز (H_1)، طول سرریز (w)، خصوصیات سینماتیکی مانند دبی جریان (Q) و خصوصیات دینامیکی که



شکل ۲. نمونه‌ای از شبکه‌بندی برای بررسی جریان از روی سرریز لبه پهن

Fig. 2. The computational mesh

کف فلوم و روی بدنه سرریز) از شرط مرزی دیواره (Wall) استفاده شد.

(۱۴) ارائه می‌شود.

مرز بین آب و هوا با شرط مرزی (Symmetry) تعریف گردید.

نکته مهم در رابطه با اندازه شبکه این است که هر چقدر اندازه شبکه ریزتر باشد، تعداد سلول‌های ایجاد شده بیشتر و در نتیجه محاسبات دقیق‌تر است. همچنین در شبکه‌بندی، تعداد شبکه بهینه هم در نظر گرفته شده است. تعداد متوسط شبکه و گره‌ها به ترتیب ۱۳۶۳۵ و ۱۴۴۳۴ می‌باشد که در مش‌بندی معیار اورتوگونال^۱ بین ۰/۷ الی ۱ در نظر گرفته شده است. در شکل زیر نمونه‌ای از شبکه‌بندی نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر برای جلوگیری از تاثیر اندازه شبکه‌ها در حل معادلات حاکم، آزمون مستقل از شبکه (آنالیز حساسیت شبکه) صورت گرفت و تعداد شبکه مناسب انتخاب شد. در این شبیه‌سازی، تعداد شبکه مناسب در حدود ۱۳۶۳۵ به دست آمد. در شکل ۳، محور عمودی خطای نسبی را نشان می‌دهد که مربوط به مقایسه بین ضریب دبی در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی است.

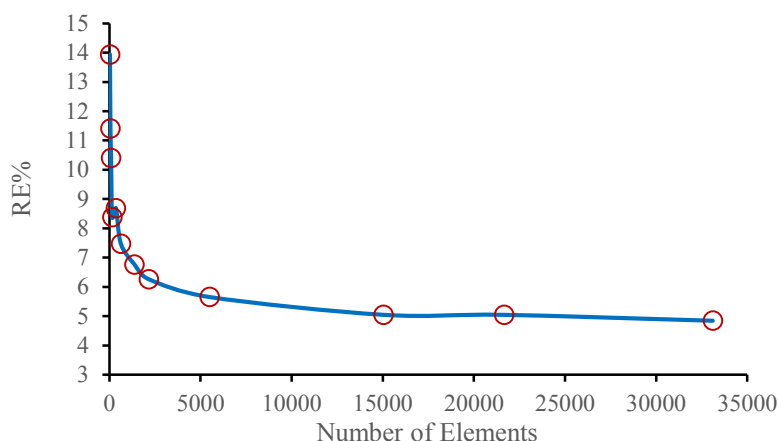
در قسمت Multiphases، از زیر مجموعه Model نوع مدل چند فازی، حجم سیال Volume of Fluid و نوع مدل آشفستگی،

$$C_d = f\left(\frac{H_1}{w}, \frac{H_1}{p}, Z_1, Z_2\right) \quad (14)$$

۵- ایجاد هندسه مدل

مدل‌سازی سرریز لبه پهن مستطیلی در محیط Ansys Workbench در قسمت Geometry انجام شد. از یک سیستم مختصات کارترین برای تعریف هندسه استفاده شد. مدل‌سازی به صورت دو بعدی در جهت X, Y با عرض ۰/۶ متر در نظر گرفته شد. مدل عددی بر اساس نمونه واقعی و با همان ابعاد مدل‌سازی شده است. برای این منظور، از اطلاعات آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) استفاده شد. طول فلوم برابر ۶ متر می‌باشد که سرریز در فاصله ۲ متری از بالادست آن قرار گرفت. مرز خروجی کانال آب به عنوان شرط مرزی سرعت (Velocity-inlet) در نظر گرفته شد. در ورودی شرط مرزی سرعت ورودی (Velocity-inlet) لحاظ شده است. سرعت متوسط در ورودی و خروجی فلوم آزمایشگاهی، با داشتن دبی جریان و عمق آب به دست آمد. در دیواره‌ها

1 Orthogonal Quality



شکل ۳. آزمون مستقل از شبکه‌بندی برای تحقیق حاضر

Fig. 3. Mesh independence test

$$D = 4R = 4 \times \frac{A}{P} \quad (15)$$

و همچنین عدد رینولدز از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن V سرعت جریان، D قطر هیدرولیکی و ν لزجت سینماتیکی است.

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (16)$$

و نهایتاً شدت آشفتگی به وسیله رابطه $I = 16R_e^{-\frac{1}{8}}$ به دست می‌آید. در قسمت **Run Calculation**، **Number of Time Steps** برابر ۱۰۰۰ و اندازه بازه‌های زمانی برابر ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد. ضمناً حداکثر تعداد تکرار برابر ۱۰۰ انتخاب شد. سپس با زدن گزینه **Calculate** حل آغاز می‌شود تا زمانی که شرط همگرایی که همان دائمی شدن جریان است (برابری دبی ورودی و خروجی)، حاصل شود.

برای صحت‌سنجی از نتایج کار آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) استفاده شد. در مدل‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق سعی شد تا شرایط آزمایشگاهی موجود در تحقیق سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) شبیه‌سازی شود. مدل عددی بر اساس نمونه واقعی و با همان ابعاد مدل‌سازی شده است. عرض فلوم ۰/۶ متر و طول فلوم برابر ۶ متر بود که سرریز در فاصله ۲ متری از بالادست آن قرار گرفت. سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) رابطه‌ی زیر را برای محاسبه ضریب دبی ارائه نمودند که در آن θ زاویه شیب وجه

(k-ε(RNG) انتخاب شد و روش حل به صورت غیرصریح (Implicit) انتخاب گردید. سپس در قسمت فازها (Phases)، فاز اول هوا (air) و فاز دوم آب (water) تعریف شد.

فلوئنت کل میدان جریان را به صورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر گرفته، از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفصال، معادلات جبری منفصل می‌شوند. برای گسسته‌سازی فشار از طرح PRESTO، برای انفصال جملات جابه‌جایی معادلات مومنتم از طرح Second Order Up-wind و برای انفصال جملات جابه‌جایی معادلات آشفتگی و همچنین جزء حجم سیال از طرح First Order Upwind استفاده شد. الگوریتم SIMPLEC نیز برای کوپل نمودن فشار و سرعت به کار گرفته شد. طرح SIMPLEC یکی از روش‌هایی است که از الگوریتم Segre-gated استفاده می‌کند و برای مدل‌های چند فاز مناسب است و مزایای بیشتری در مقایسه با روش SIMPLE به خصوص در مورد تسریع در همگرا شدن جواب‌ها دارد.

در قسمت شرط مرزی (Boundary condition) از Specifc-cation Method پارامترها بر اساس شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی (Intensity and Hydraulic Diameter) انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که قطر هیدرولیکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن A سطح مقطع جریان و P محیط خیس شده می‌باشد.

بالادست برحسب رادیان بوده و ε طول نسبی تاج می‌باشد که برابر است با:

$$\varepsilon = \frac{H_1}{H_1 + w}$$

$$C_d = 0.43 + 0.06 \sin[\pi(\varepsilon - 0.55)] - 0.039\theta + 0.0029 \quad (17)$$

حداقل و حداکثر خطای شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر نسبت به نتایج آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) به ترتیب ۳/۴ و ۱۰/۲ درصد به دست آمد که در حد قابل قبول است.

۶- معادلات حاکم بر جریان

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در رشته مهندسی هیدرولیک حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است که اصطلاحاً به معادلات ناویر-استوکس معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم ناپذیر با ویسکوزیته ثابت، معادلات مذکور به ترتیب به فرم معادله‌های ۱۸ و ۱۹ نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial X_j} (\overline{U_i}) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} (-P \delta_{ij} - \overline{\rho U_i U_j}) \quad (19)$$

که در رابطه فوق U_i و U_j مولفه‌های بردار سرعت در راستای فضایی i و j ، فشار، P چگالی سیال و δ_{ij} دلتای کرونکر است (در صورتی که $i=j$ باشد، مقدار آن یک و در غیر این صورت مقدار آن صفر است). عبارت اول در سمت چپ معادله ۱۹ عبارت غیرماندگاری و عبارت دوم انتقال (Convection) است. عبارت اول سمت راست معادله ۱۹ عبارت فشار و عبارت دوم تنش رینولدزی است. برای حل معادله حاکم بر جریان می‌توان از یکی از نرم افزارهای CFD بهره برد. در تحقیق حاضر از نرم افزار Ansys-Fluent استفاده که به روش حجم محدود به شبیه‌سازی عددی جریان می‌پردازد، استفاده گردید.

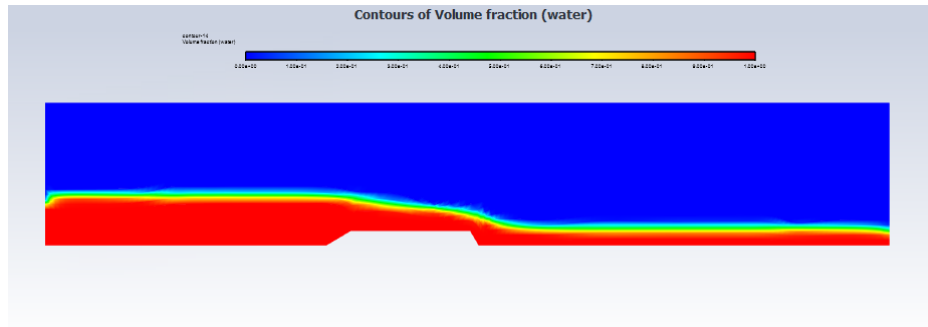
۷- نتایج و بحث

در شکل ۴ (الف، ب و ج) کنتورهای پروفیل سطح آب به ازای شرایطی

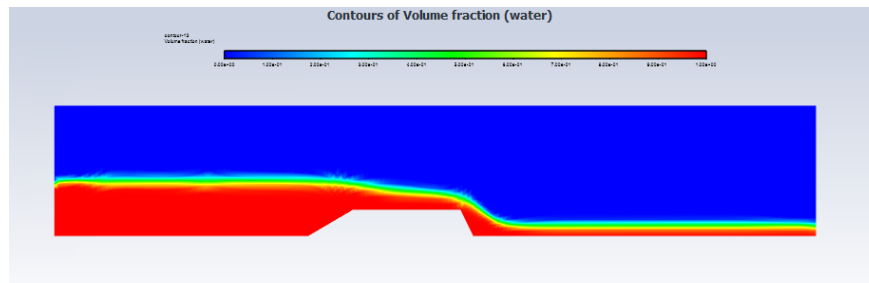
که زاویه شیب وجه بالادست (Z_1) برابر ۳۰ درجه، زاویه شیب وجه پایین‌دست (Z_2) برابر ۶۰ درجه، طول تاج سرریز (w) برابر ۰/۸۵ متر و بار آبی بالادست سرریز (H_1) برابر ۰/۲ متر باشد، نشان داده شده است. شکل مذکور به ازای سه ارتفاع سرریز (p) مختلف ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر بعد از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent حاصل شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که دبی جریان عبوری از روی سرریز تحت شرایط فوق‌الذکر برای این سه حالت به ترتیب ۰/۲۲۵، ۰/۱۸۸ و ۰/۱۷۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که ارتفاع سرریز نقش بسزایی در مقدار جریان عبوری داشته است، به طوری که به ازای یک شرایط معین با افزایش ارتفاع سرریز، مقدار جریان عبوری از روی سرریز کاهش پیدا می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش ۳۳ درصد در ارتفاع سرریز (یعنی از ۰/۳ به ۰/۲ متر) و ۵۰ درصد در ارتفاع سرریز (یعنی از ۰/۲ به ۰/۱ متر)، دبی عبوری از روی سرریز به ترتیب ۱۶/۵ و ۹/۶ درصد افزایش یافته است. به بین دیگر، اثر کاهش ارتفاع سرریز بر افزایش دبی عبوری از روی سرریز، خطی نیست.

در شکل‌های ۵ (الف ب و ج) تا ۷ (الف، ب و ج) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای کنتورهای پروفیل سرعت جریان عبوری از روی سرریز لبه پهن به ترتیب برای سه حالت وجه بالادست شیب‌دار و پایین‌دست قائم، وجه بالادست قائم و پایین‌دست شیب‌دار، وجه‌های بالادست و پایین‌دست شیب‌دار به ازای شرایطی که ارتفاع سرریز (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر)، طول تاج سرریز (۰/۵، ۰/۸۵ و ۱ متر) و بار آبی بالادست (۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۲ متر) باشد مورد بررسی قرار گرفته است.

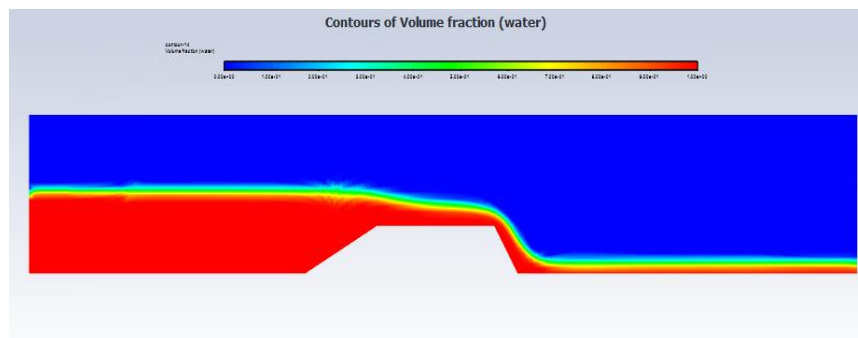
در شکل ۵ (الف) کنتورهای پروفیل سرعت جریان عبوری در شرایطی که زاویه شیب وجه بالادست (Z_1)، زاویه شیب وجه پایین‌دست (Z_2)، ارتفاع سرریز (p)، طول تاج سرریز (w) و بار آبی بالادست (H_1) به ترتیب ۶۰ درجه، ۹۰ درجه، ۰/۲ متر، ۰/۵ متر و ۰/۲ متری باشد، نشان داده شده است. تحت شرایط فوق‌الذکر مقدار سرعت جریان ۰/۷۲ متر بر ثانیه به دست آمد. همچنین در شکل ۵ (ب) کنتور پروفیل سرعت جریان عبوری برای شرایطی که زاویه شیب وجه بالادست ۹۰ درجه، زاویه شیب وجه پایین‌دست ۳۰ درجه، ارتفاع سرریز ۰/۲ متر، طول تاج سرریز ۰/۸۵ متر و بار آبی بالادست ۰/۲ متر می‌باشد، نشان داده شده است. در این شرایط مقدار سرعت جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی ۰/۶۵ متر بر ثانیه به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقدار سرعت جریان عبوری از روی سرریز در شرایطی که زاویه شیب وجه بالادست ۶۰ درجه، زاویه شیب وجه پایین‌دست ۳۰ درجه،



الف. برای شرایط $z_1 = 30^\circ, z_2 = 60^\circ, p = 0.1\text{ m}, w = 0.85\text{ m}, H_1 = 0.2\text{ m}$
 (a). Results for $z_1 = 30^\circ, z_2 = 60^\circ, p = 0.1\text{ m}, w = 0.85\text{ m},$ and $H_1 = 0.2\text{ m}.$



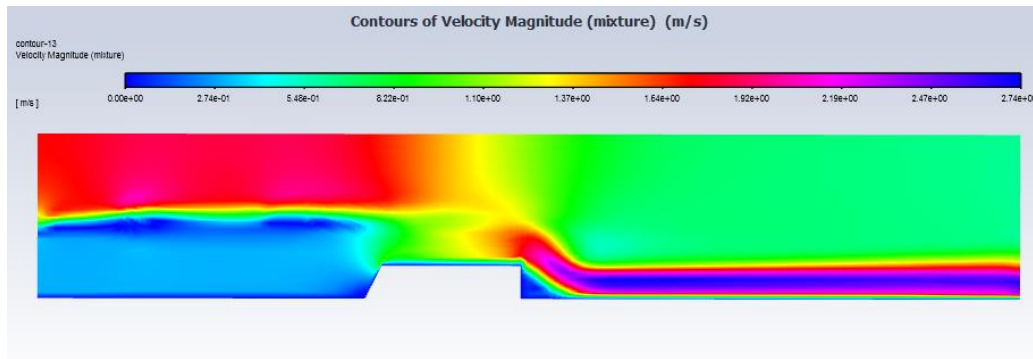
ب. برای شرایط $z_1 = 30^\circ, z_2 = 60^\circ, p = 0.2\text{ m}, w = 0.85\text{ m}, H_1 = 0.2\text{ m}$
 (b). Results for $z_1 = 30^\circ, z_2 = 60^\circ, p = 0.2\text{ m}, w = 0.85\text{ m},$ and $H_1 = 0.2\text{ m}.$



ج. برای شرایط $z_1 = 30^\circ, z_2 = 60^\circ, p = 0.3\text{ m}, w = 0.85\text{ m}, H_1 = 0.2\text{ m}$
 (c). Results for $z_1 = 30^\circ, z_2 = 60^\circ, p = 0.3\text{ m}, w = 0.85\text{ m},$ and $H_1 = 0.2\text{ m}.$

شکل ۴. الف، ب و ج. کنتورهای پروفیل سطح آب برای سرریز لبه پهن با وجه بالادست و پایین دست شیبدار برای ارتفاع‌های مختلف سرریز

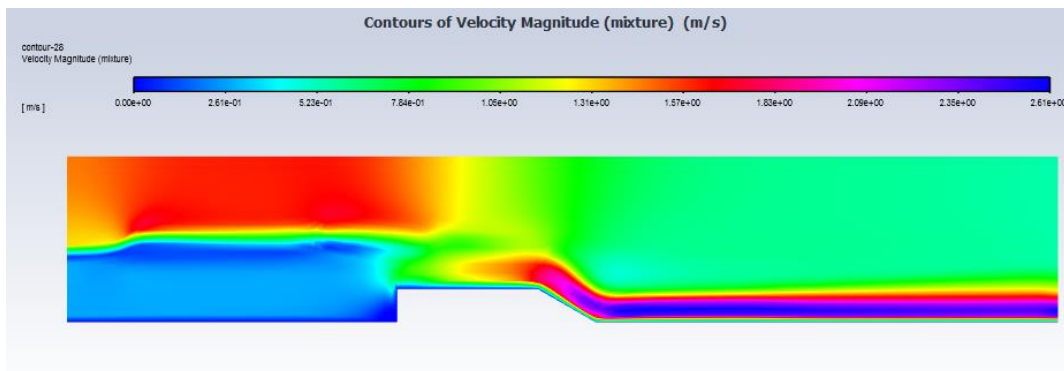
Fig. 4. Water level profiles for broad-crested weirs with upstream and downstream sloped faces and for different weir heights.



الف. در شرایط بالادست شیب‌دار و پایین دست قائم

$$z_1 = 60^\circ, z_2 = 90^\circ, p = 0.2m, w = 0.85m, H_1 = 0.2m$$

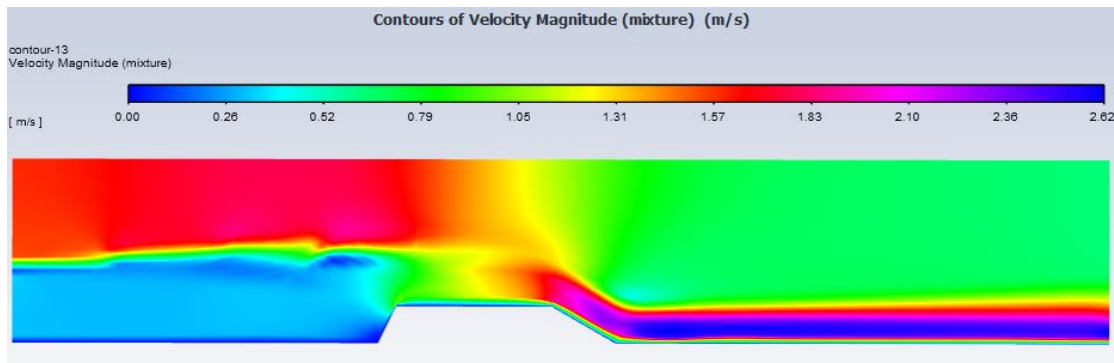
(a). sloped upstream face and vertical downstream face



ب. در شرایط بالادست قائم و پایین دست شیب دار

$$z_1 = 90^\circ, z_2 = 30^\circ, p = 0.2m, w = 0.85m, H_1 = 0.2m$$

(b). Vertical upstream face and sloped downstream face



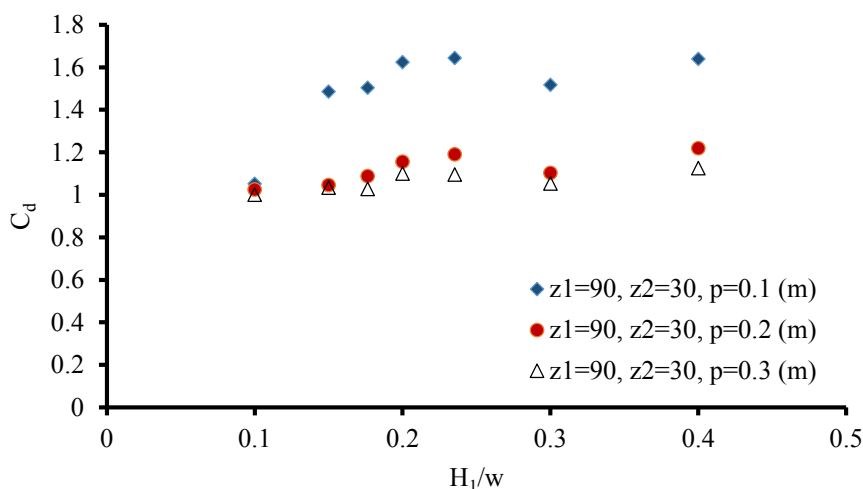
ج. در شرایط با وجه بالادست و پایین دست شیب‌دار

$$z_1 = 60^\circ, z_2 = 30^\circ, p = 0.2m, w = 0.85m, H_1 = 0.2m$$

(c). Sloped upstream and downstream faces

شکل ۵. الف و ب و ج. کنتورهای پروفیل سرعت جریان عبوری از روی سرریز لبه‌پهن برای سه حالت الف. بالادست شیب‌دار و پایین دست قائم، ب. بالادست قائم و پایین دست شیب دار و ج. با وجه بالادست و پایین دست شیب‌دار

Fig. 5. a,b,c. Velocity contours on the broad-crested weir for three different face slope scenarios.



شکل ۶. تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بی بعد (H_1/w) برای $z_1=90^\circ$, $z_2=30^\circ$ و ارتفاع های مختلف

Fig.6. Discharge coefficients for $z_1=90^\circ$, $z_2=30^\circ$ and various weir heights

بالادست سرریز کاهش می یابد و این مساله باعث می شود، مقدار ضریب دبی جریان افزایش یابد. لازم به ذکر است که از مقایسه شکل ها می توان مشاهده کرد که شیب وجه پایین دست تأثیر چندانی روی ضریب دبی جریان جریان عبوری از روی سرریز ندارد. با توجه شکل های ۶ تا ۸ بیشترین ضریب دبی در کمترین ارتفاع سرریز تحت شرایط یکسان و شیب های بالادست و پایین دست یکسان اتفاق می افتد.

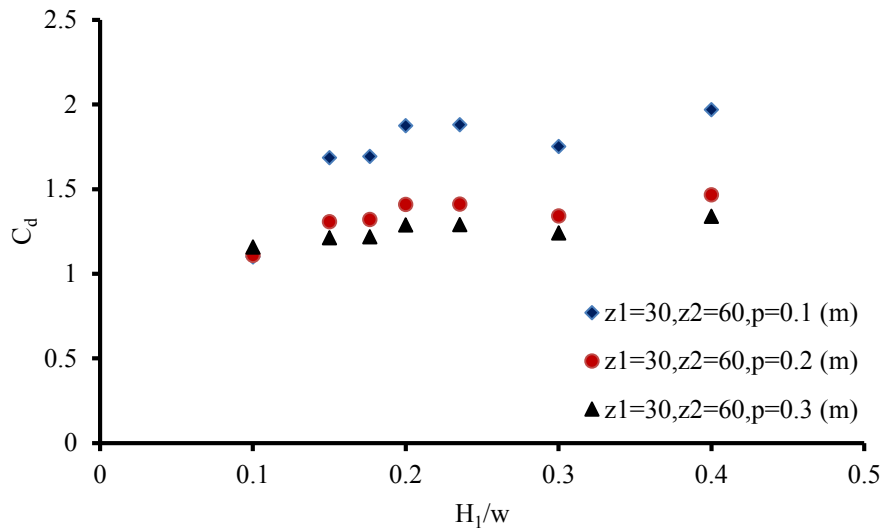
در شکل ۸ تغییرات ضریب دبی جریان در مقابل H_1/w نشان داده شده است همانطور که مشاهده می گردد، بیشترین ضریب دبی جریان در شرایطی اتفاق می افتد که به ازای یک شرایط معین و یکسان، شیب بالادست سرریز ۱۵ درجه باشد.

در شکل های ۱۰ تا ۱۲، روند تغییرات بار آبی بالادست نسبت به ارتفاع سرریز در مقابل ضریب دبی جریان برای سرریز لبه پهن در شرایطی که شیب وجه بالادست (۹۰، ۶۰، ۳۰ و ۱۵ درجه) و شیب وجه پایین دست (۹۰، ۶۰، ۳۰ و ۱۵ درجه) باشد به ازای طول های تاج سرریز (۰/۵، ۰/۸۵ و ۱ متر) ارائه شده است. با توجه به این شکل ها می توان گفت، به ازای مقادیر $0.16 < H_1/p < 2$ با کاهش طول تاج سرریز به سمت لبه تیز بودن پیش می رود مقدار ضریب دبی جریان افزایش می یابد. نتایج همچنین نشان داد که با کاهش شیب وجه بالادست نیز مقدار ضریب دبی جریان افزایش

ارتفاع سرریز ۰/۲ متر، طول تاج سرریز ۰/۸۵ متر و بار آبی بالادست ۰/۲ متر می باشد، ۰/۷۴ متر بر ثانیه به دست می آید (شکل ۵-ج).

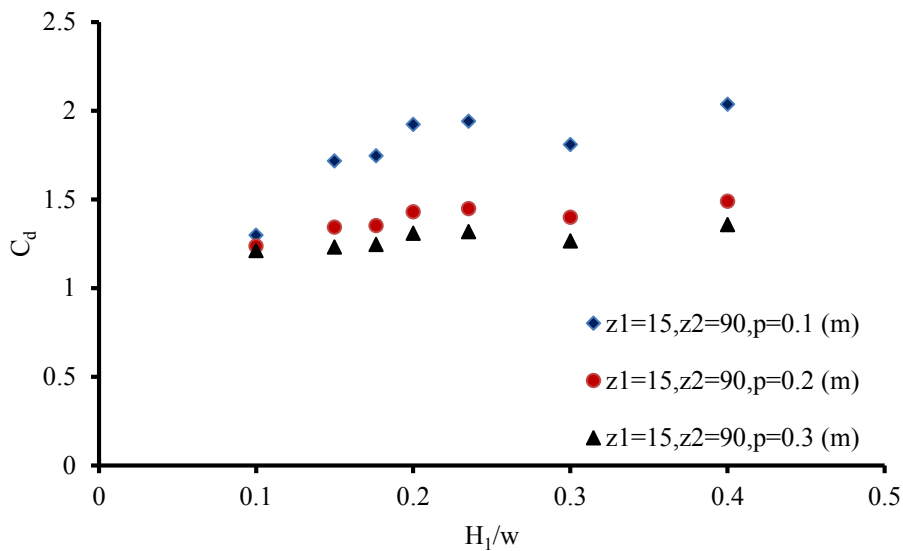
مقایسه نتایج حاصل از سه شکل ۵ (الف، ب و ج) نشان می دهد شیب وجه بالادست تأثیر چشمگیری روی سرعت جریان دارد ولی شیب پایین دست تأثیر چندانی روی سرعت جریان ندارد. در ادامه، برای روشنی بیشتر موضوع، از نمودارهای بی بعد استفاده شده است که به آن ها اشاره خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) برای کاهش جدایی جریان^۱ در وجه پایین دست، شیب ۹۰ درجه بهتر است. پس شیب بالادست ۱۵ درجه و پایین دست ۹۰ درجه بهترین حالت این تحقیق است.

در شکل های ۶ تا ۸، روند تغییرات بار آبی بالادست نسبت به طول تاج در مقابل ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن در شرایطی که شیب وجه بالادست (۹۰، ۶۰، ۳۰ و ۱۵ درجه)، شیب وجه پایین دست (۹۰، ۶۰، ۳۰ و ۱۵ درجه) و ارتفاع سرریز (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر) ارائه شده است. برای تعیین ضریب دبی، از معادله ۱۲ استفاده شد. به ازای مقادیر $0.1 < H_1/w < 0.4$ ، با کاهش ارتفاع سرریز در یک شرایط معین، مقدرا بار آبی بالادست افزایش می یابد و در نتیجه مقدار ضریب دبی جریان عبوری از روی سرریز افزایش پیدا می کند. با کاهش شیب بالادست، مقدار جداسدگی جریان در گوشه



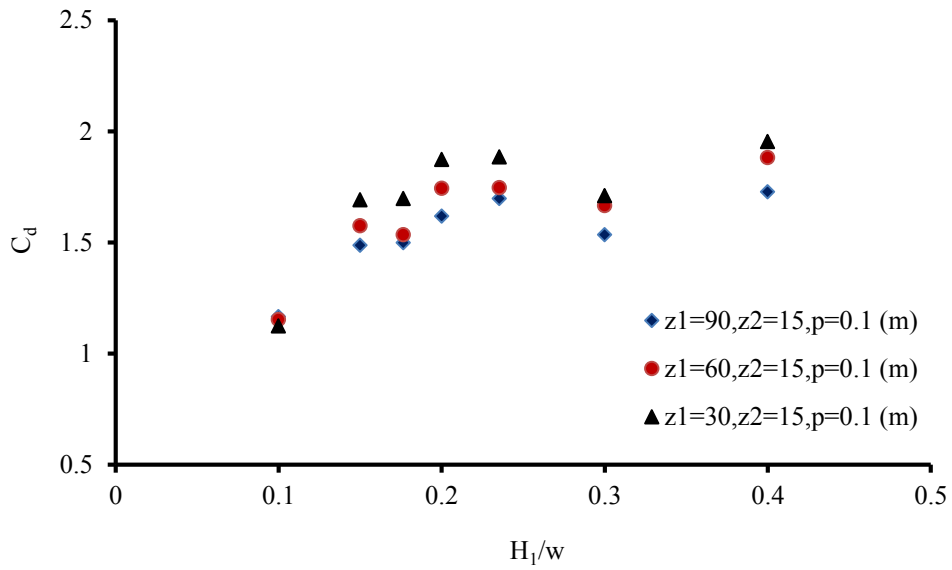
شکل ۷. تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بی بعد (H_1/w) برای $z_1=30^\circ$, $z_2=60^\circ$ و ارتفاع‌های مختلف

Fig.7. Discharge coefficients for $z_1=30$, $z_2=60$ and various weir heights.



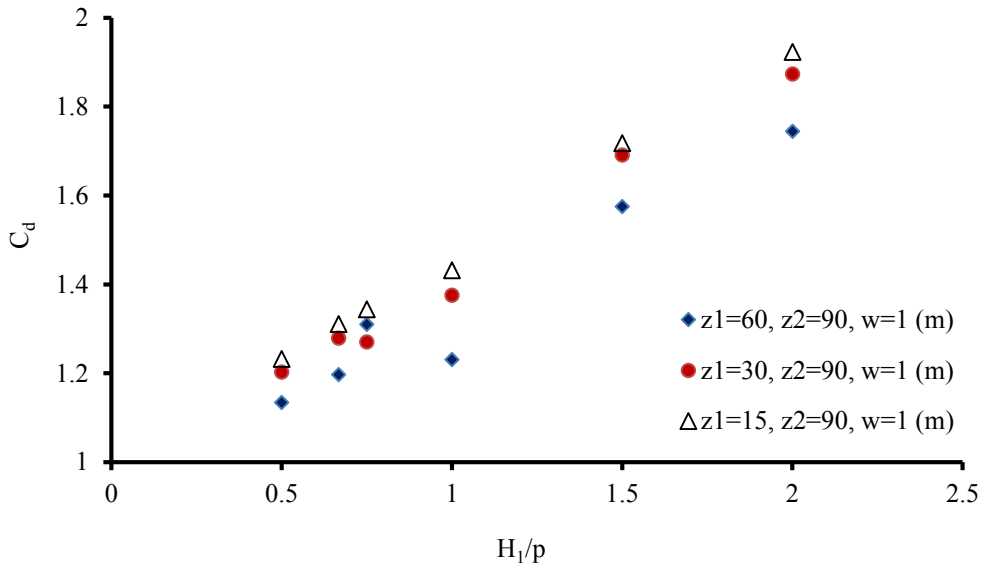
شکل ۸. تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بی بعد (H_1/w) برای $z_1=15^\circ$, $z_2=90^\circ$ و ارتفاع‌های مختلف

Fig.8. Discharge coefficients for $z_1=15$, $z_2=90$ and various weir heights



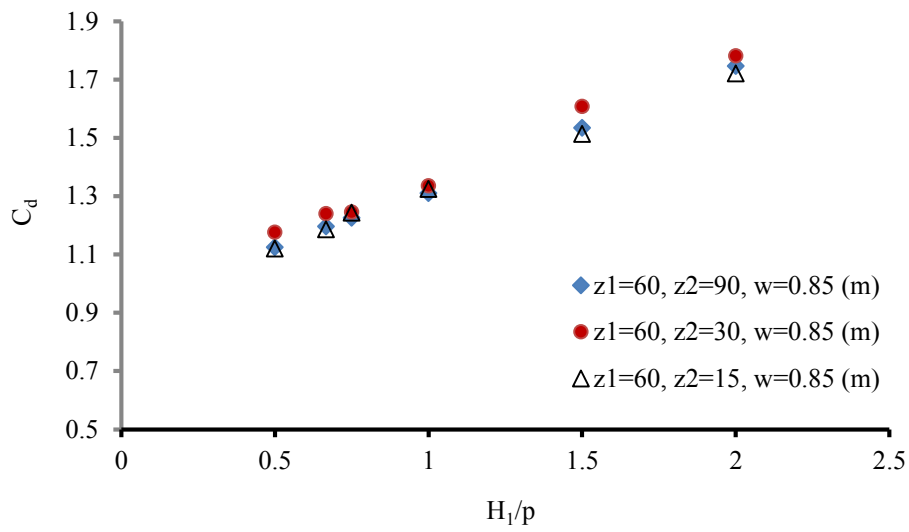
شکل ۹. تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت بی‌بعد (H_1/w) برای $z_2=15^\circ$, $p=0.1$ و شیب‌های بالادست متفاوت

Fig.9. Discharge coefficients for $z_2=15^\circ$, $p=0.1$ m and for different upstream slopes.



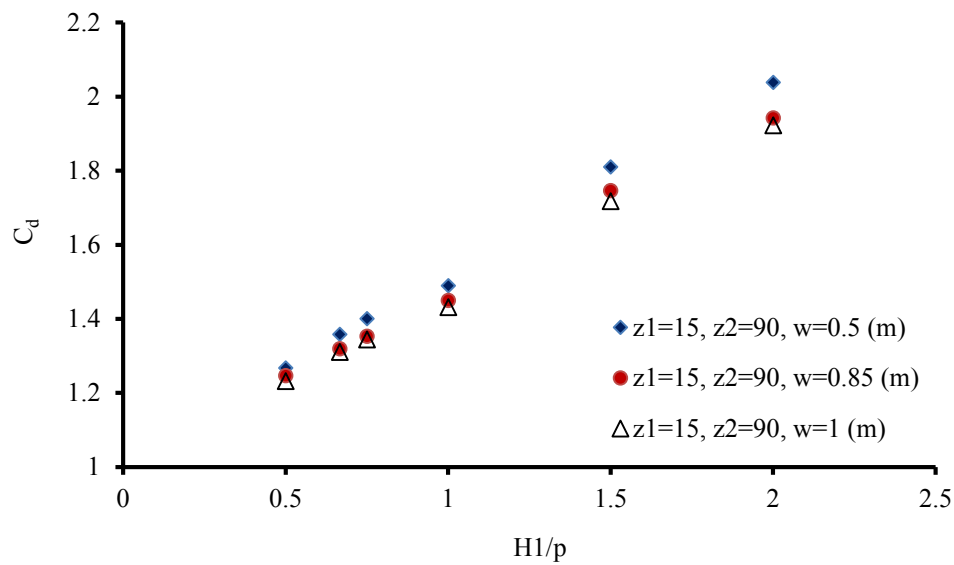
شکل ۱۰. تغییرات نسبت بی‌بعد (H_1/p) و ضریب دبی برای $z_2=90^\circ$, $w=1$ و شیب‌های بالادست متفاوت

Fig.10. Discharge coefficients for $z_2=90^\circ$, $w=1$ m and various upstream slopes.



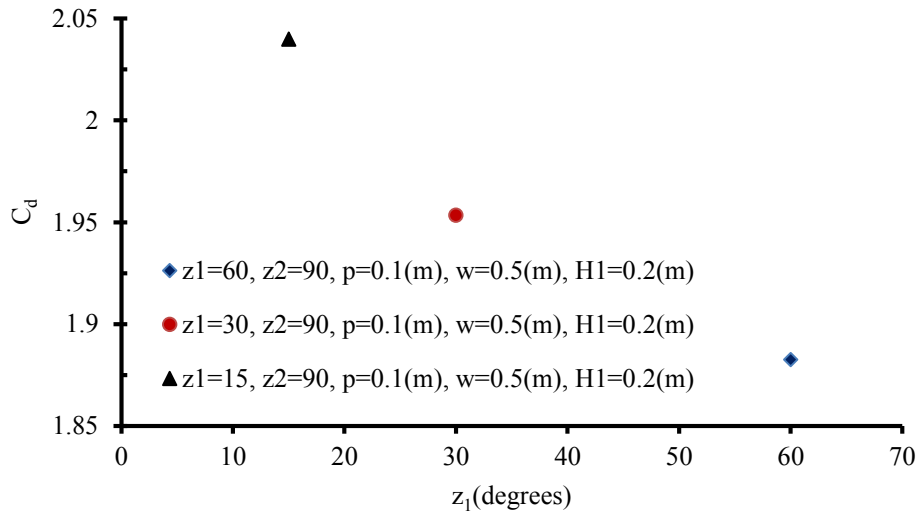
شکل ۱۱. تغییرات نسبت بی‌بعد (H_1/p) و ضریب دبی برای $z_2=60^\circ$, $w=0.85$ و شیب‌های بالادست متفاوت

Fig. 11. Discharge coefficients for $z_2=60^\circ$, $w=0.85$ m and various upstream slopes.



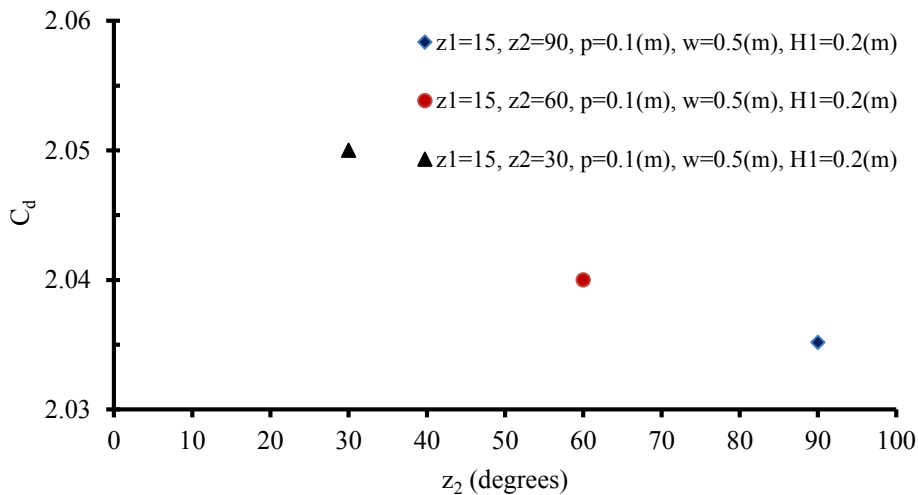
شکل ۱۲. تغییرات نسبت بی‌بعد (H_1/p) و ضریب دبی برای $z_1=15^\circ$, $z_2=90^\circ$ و طول تاج‌های متفاوت

Fig. 12. Discharge coefficients for $z_1=15^\circ$, $z_2=90^\circ$ and various crest lengths



شکل ۱۳. تغییرات شیب وجه بالادست و ضریب دبی جریان در شرایط هیدرولیکی یکسان

Fig. 13. Discharge coefficient and upstream face slope for similar hydraulic conditions.



شکل ۱۴. تغییرات شیب وجه پایین دست و ضریب دبی جریان در شرایط هیدرولیکی یکسان

Fig. 14. Discharge coefficient and downstream face slope for similar hydraulic conditions

درصد افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۱۴ نشان می‌دهد که شیب وجه پایین دست تأثیر چندانی روی ضریب دبی ندارد.

می‌یابد. توجه به شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شود که بیشترین ضریب دبی جریان به ازای کمترین طول تاج سرریز در یک H_1/p یکسان اتفاق می‌افتد.

۸- استخراج روابط رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار SPSS
بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، روابط رگرسیونی برای تعیین ضریب دبی جریان با استفاده از پارامترهای Z_1 , Z_1/p , H_1/w , H_1/p با

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با کاهش شیب وجه بالادست در شرایط یکسان، ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. بدین معنی که با کاهش ۵۰ درصد در شیب وجه بالادست، ضریب دبی جریان در حدود ۴

جدول ۲. معیارهای دقت معادله (۱۸)

Table 2. Accuracy evaluation indicators in Eq. (18)

معیار دقت معادله رگرسیون	R ²	RMSE	RE (%)
معادله ۲۰	۰/۹۵۴	۰/۰۵	۰/۰۲
معادله ۲۱	۰/۹۶۳	۰/۰۷	۰/۰۴
معادله ۲۲	۰/۹۴	۰/۰۶	۰/۵۶
معادله ۲۳	۰/۹۷۸	۰/۱۳۲	۰/۳۷

$$C_d = 0.982 + 0.42(Z_1)^{-0.253}(Z_2)^{0.007}\left(\frac{H_1}{w}\right)^{0.105}\left(\frac{H_1}{p}\right)^{1.068} \quad (22)$$

$$C_d = \frac{0.124 + 0.047(Z_1)^{1.286} + 0.881(Z_2)^{0.22} + 12.504\left(\frac{H_1}{w}\right)^{6.960} + 0.188\left(\frac{H_1}{p}\right)^{2.213}}{-0.547 + 0.132(Z_1)^{1.345} + 0.009(Z_2)^{1.708} + 1.289\left(\frac{H_1}{w}\right)^{-0.027} + 3.438 \times 10^{-7}\left(\frac{H_1}{p}\right)^{18.625}} \quad (23)$$

در شکل ۱۵ به مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با تحقیقات انجام گرفته توسط سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) به ازای ۱۰۰ داده در شرایطی که $Z_1=30^0$, $w=0.5$ m, $p=0.25$ m, باشد، پرداخته شده است. شبیه‌سازی عددی انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent در تحقیق حاضر، نتایج نسبتاً نزدیکی نسبت به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹) را فراهم نموده است (جدول ۳). بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از بررسی‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای برای تخمین ضریب دبی جریان به فرم معادله (۱۹) ارائه کردند.

$$C_d = 4.2003\left(\frac{h}{h+p}\right)^2 - 2.5966\left(\frac{h}{h+p}\right) + 1.3563 \quad (24)$$

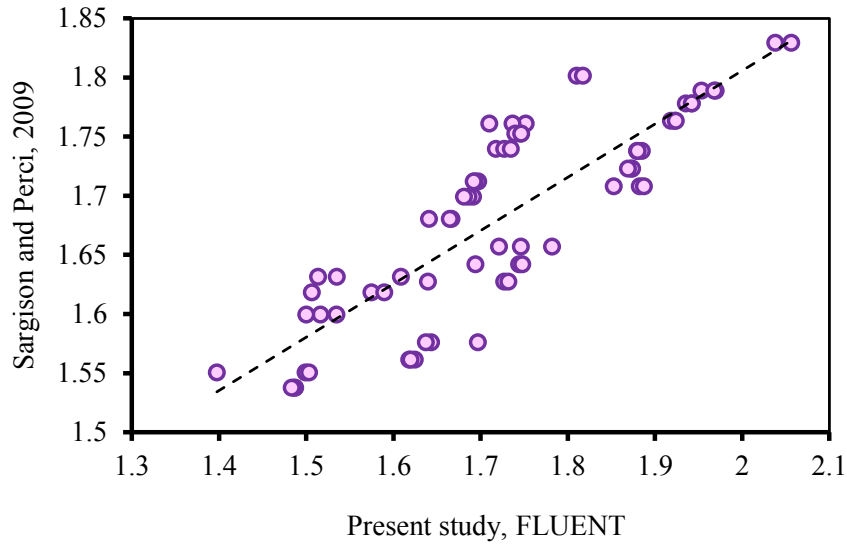
در شکل ۱۶ مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با تحقیقات انجام گرفته توسط بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳) به ازای ۱۰۰ داده در شرایط یکسان نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که برای $C_d > 0.25$ تطابق بین شبیه‌سازی‌های عدد تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳) بهتر است. در جدول ۳ معیارهای دقت برای مقایسه

استفاده از نرم‌افزار SPSS استخراج و معرفی گردید (معادله‌های ۲۰ تا ۲۳). برای رعایت اختصار و نیز امکان مقایسه بین معادلات به دست آمده، مقادیر R²، RMSE و %RE برای معادلات مذکور، در جدول ۲ ارائه شده است.

$$C_d = -0.178Z_1 + 0.005Z_2 + 0.431\left(\frac{H_1}{p}\right) + 0.084\left(\frac{H_1}{w}\right) + 1.085 \quad (20)$$

نتایج استخراج روابط رگرسیونی بین ضریب دبی (متغیر وابسته) و سایر متغیرهای مستقل نشان داد که در معادله ۲۰، منفی بودن ضریب شیب وجه بالادست (Z_1)، حاکی از کاهش ضریب دبی با افزایش Z_1 است. لذا یک رابطه معکوسی بین شیب وجه بالادست و ضریب دبی وجود دارد. مطابق جدول ۲، رابطه رگرسیونی چند متغیره غیرخطی به صورت معادله (۲۱) نشان داد که رابطه غیرخطی بر رابطه خطی (۲۰) برتری دارد. رابطه رگرسیونی چند متغیره غیرخطی به صورت معادله (۲۲) نیز نشان داد که عملکرد رابطه غیرخطی (۲۲) در حد رابطه خطی (۲۰) است. رابطه رگرسیونی چند متغیره غیرخطی به صورت معادله (۲۳) نیز نشان داد که عملکرد رابطه غیرخطی (۲۳) بر دو رابطه غیرخطی (۲۲) و (۲۱) برتری ندارد.

$$C_d = 161.473 - 0.182(Z_1)^{0.978} + 0.072(Z_2)^{0.072} - 160.295\left(1 + \frac{H_1}{w}\right)^{-0.001} + 0.293\left(\frac{H_1}{p}\right)^{1.403} \quad (21)$$



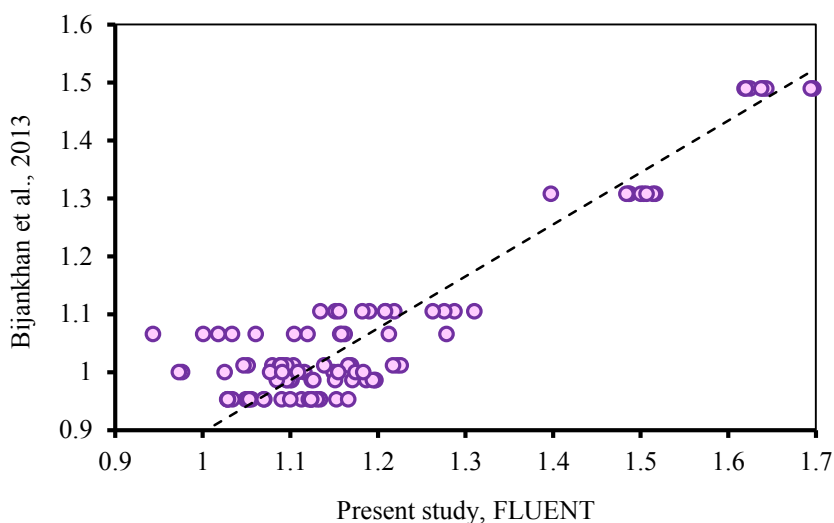
شکل ۱۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹)

Fig. 15. Comparison of the present numerical simulation results to laboratory results of Sargison and Percy (2009).

جدول ۳. معیارهای دقت برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی سه تحقیق دیگر با تحقیق حاضر

Table 3. Accuracy evaluation indicators in this study and comparison with the other studies

معیار دقت معادله رگرسیون	R^2	RMSE	RE (%)
تحقیق سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹)	۰/۷۱۴	۰/۱۰۴	۲/۵
تحقیق بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳)	۰/۸۶۰	۰/۱۳۹	۱۰
تحقیق زریهان (۲۰۲۰)	۰/۷۲۰	۰/۰۹۴	۵



شکل ۱۶. مقایسه نتایج شبیه سازی عددی در تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳)

Fig. 16. Comparing the numerical simulation results in present study and laboratory results of Bijankhan et al. (2013).

طول تاج، ارتفاع تاج و بار آبی تاج بودند. از روش شبیه سازی عددی با کاربرد نرم افزار Ansys Fluent و به صورت دو بعدی استفاده شد. تعداد کل مدل های شبیه سازی شده عددی برابر ۲۵۲ بود. برای کاربردی کردن نتایج، تلاش شد تا معادلات مختلف رگرسیون چند متغیره برای ضرایب دبی (متغیر وابسته) و متغیرهای مستقل مورد آزمون قرار گیرند. سپس ضرایب دبی به دست آمده در سرریزهای لبه پهن شبیه سازی شده با داده های آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (۲۰۰۹)، بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳) و زیرپهان (۲۰۲۰) مورد مقایسه قرار گرفت. برخی از نتایج مهم به شرح زیر می باشند:

با توجه به مقادیر درصد خطای نسبی در مقایسه با داده های آزمایشگاهی این نتیجه حاصل می شود، نرم افزار Ansys Fluent جریان بر روی سرریزهای لبه پهن را با دقت بالایی شبیه سازی می کند. در این پژوهش بیشترین ضریب دبی مربوط به سرریز با شرایط $Z_1=15^\circ$, $Z_2=30^\circ$, $w=0.5$ m, $p=0.1$ m و کمترین ضریب دبی مربوط به سرریز با شرایط $Z_1=90^\circ$, $Z_2=15^\circ$, $w=0.5$ m, $p=3$ m می باشد. به ازای مقادیر $0.1 < H_1/w < 0.4$ و $H_1=0.05$ m با کاهش ارتفاع سرریز مقدار ضریب دبی افزایش می یابد. به ازای مقادیر $0.1 < H_1/w < 0.4$ با کاهش شیب بالادست مقدار ضریب دبی افزایش می یابد. شیب وجه پایین دست تأثیر چندانی روی ضریب دبی جریان ندارد.

نتایج آزمایشگاهی تحقیق بیژن خان و همکاران (۲۰۱۳) با تحقیق حاضر ارائه شده است.

زیرپهان (۲۰۲۰) با استفاده از بررسی های آزمایشگاهی، رابطه زیر را برای تخمین ضریب دبی جریان ارائه کردند [۲۴].

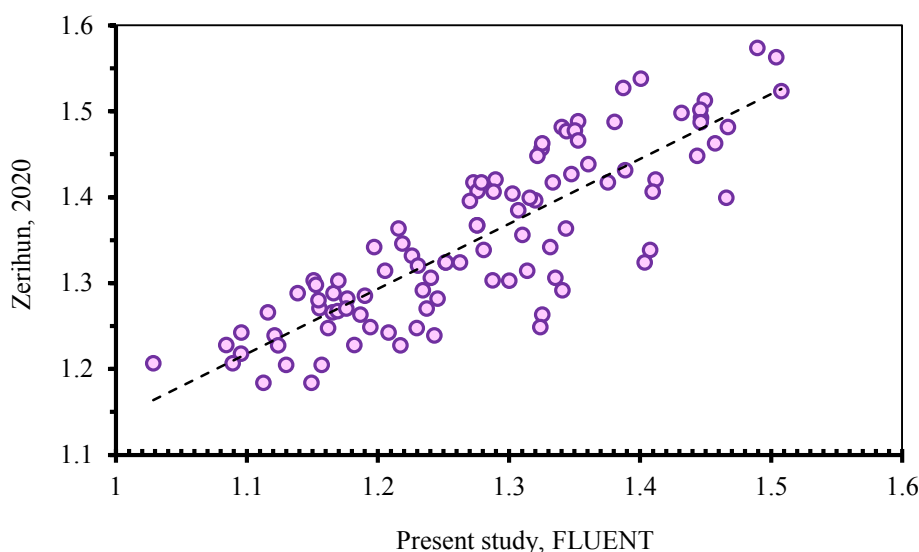
$$C_d = 0.4 - 0.215(\sin \theta)^{\frac{22}{125}} + 0.13(\sin \phi)^{\frac{3}{20}} + \frac{0.134\zeta}{1 + 0.596\zeta} \quad (25)$$

$$\zeta = \frac{H_0}{L}$$

در شکل ۱۷ مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با تحقیقات انجام گرفته توسط زیرپهان (۲۰۲۰) به ازای ۱۰۰ داده نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ معیارهای دقت برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی تحقیق زیرپهان (۲۰۲۰) با تحقیق حاضر ارائه شده است.

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق تغییرات ضریب دبی در سرریزهای لبه پهن مورد بررسی قرار گرفت. متغیرها شامل شیب وجه بالادست سرریز، شیب وجه پایین دست،



شکل ۱۷. مقایسه نتایج شبیه سازی عددی در تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی زیریهان (۲۰۲۰)

Fig. 17. Comparison of the present numerical simulations results to the laboratory results of Zerihun (2020).

(2009) 115-118.

- [4] N.S. Govinda Rao, D. Muralidhar, Discharge characteristics of weirs of finite-crest width. *Houille Blanche*, 18(5), (1963) 537-545.
- [5] J. Singer, Square-edged broad-crested weir as a flow measuring device. *Water and Water Eng.*, 68(820), (1964) 229-235
- [6] W.H. Hager, M. Schwalt, Broad-crested weir. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120(1), (1994) 13-26.
- [7] H.M. Fritz, H.W. Hager, Hydraulics of embankment weirs. *J. Hydraul. Eng.*, 124(9), (1998) 963-971.
- [8] M. Johnson, Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs. *Irrig Sci* 19, (2000) 133-137
- [9] J. Farhoudi, H. Shah Alami, Slope Effect on Discharge Efficiency in Rectangular Broad Crested Weir with Sloped Upstream Face, *International Journal of Civil Engineering*, 3(1), (2005) 58-65.
- [10] M. Gogus, Z. Defne, V. Ozkandemir, Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 132(3), (2006) 272-280

به ازای مقادیر $0.16 < H_1 / p < 2$ با کاهش طول تاج مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد. به ازای مقادیر $0.16 < H_1 / p < 2$ با کاهش شیب بالادست مقدار ضریب دبی افزایش می‌یابد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی سایر محققین انجام شد و ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۷۱ تا ۰/۸۶ به دست آمد که نشان دهنده تطابق مناسب شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی بود. لازم به ذکر است که گرچه شرایط آزمایشگاهی در تحقیقات مختلف با یکدیگر مشابه نیست، ولی استفاده از اعداد بی‌بعد، این امکان را می‌دهد تا مقایسه بین پارامترهای هیدرولیکی مشابه میسر گردد.

منابع

- [1] M.G. Bos, Discharge measurement structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication 20 (1989) 3rd Revised Edition Wageningen.
- [2] F.M. Henderson, Open-Channel Flow, Macmillan, New York, (1966).
- [3] J.E. Sargison, A. Percy, Hydraulic of broad-crested weirs with varying side slopes. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 135(1)

- [19] M. Moradi, M. Fathi Moghadam, L. Davoudi, Experimental investigation of submerged flow over porous embankment weirs with up and downstream slopes. *J. Irrig. Sci. and Eng.*, 42(2), (2020) 187-199, (In Persian).
- [20] F. Salmasi, N. Sabahi, J. Abraham, Discharge coefficients for rectangular broad crested gabion weirs: An experimental study. *J. Irrig. Drain. Eng.*, (2021a)
- [21] A. David, K. James, Free flow and discharge characteristics of trapezoidal-shaped weirs. *J. Fluids*, 5, (2020) 238-242.
- [22] F. Salmasi, F. Nahrain, J. Abraham, A. Taheri Aghdam, Prediction of discharge coefficients for broad-crested weirs using expert systems, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (2021b)
- [23] F. Salmasi, J. Abraham, Discharge coefficients for ogee spillways, *Water Supply*, ws2022129, (2022)
- [24] Y.T. Zerihun, Free flow and discharge characteristics of trapezoidal-shaped weirs. *Fluids*, 5(4), (2020) 238
- [25] M. Akbari, F. Salmasi, H. Arvanaghi, M. Karbasi, D. Farsadizadeh, Application of Gaussian Process Regression Model to Predict Discharge Coefficient of Gated Piano Key Weir, *Water Resources Management*, 33 (11), (2019) 3929–3947
- [26] F. Malekzadeh, F. Salmasi, J. Abraham, H. Arvanaghi, Numerical investigation of the effect of geometric parameters on discharge coefficients for broad-crested weirs with sloped upstream and downstream faces, *Applied Water Science*, 12, (2022) 110
- [11] F. Salmasi, G. Yıldırım, A. Masoodi P. Parsamehr, Predicting discharge coefficient of compound broad-crested weir by using genetic programming (GP) and artificial neural network (ANN) techniques. *Arabian Journal of Geosciences*. (6), (2013) 2709–2717.
- [12] J. Farhoudi, N. Shokri, Flow from broad crested rectangular weirs with sloped downstream face. 32nd IAHR Congress, Venice, Italy (2007).
- [13] C.A. Gonzalez, H. Chanson, Experimental measurements of velocity and pressure distributions on a large broad-crested weir, *J. Flow Measurement and Instrumentation*. 18 (3), (2007) 107–113.
- [14] M. Bijankhan, C. Di Stefano, S. Kouchakzadeh, New stage-discharge relationship for weirs of finite crest length, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 06013006(8), (2013) 0733-9437
- [15] S.H. Hosseini H. Afshar, Experimental and 3-D numerical simulation of flow over a rectangular broad-crested weir. *Int J Eng Adv Tech* 2(6), (2014) 2249–8958
- [16] M.R. Madadi A. Hosseinzadeh Dalir, D. Farsadizadeh, Investigation of flow characteristics above trapezoidal broad-crested weirs, *Flow Measurement and Instrumentation* 38, (2014)
- [17] L. Jiang, M. Diao, H. Snu, Y. Ren, Numerical modeling of flow over a rectangular broad-crested weir with a sloped upstream face. *Water*, 10 (11), (2018) 1663
- [18] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 39, (1981) 201–225.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Kanaani¹, A. R. Mamdoohi, Identification of some sources of heterogeneity in value of travel time of Tehran LEZ users, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(11) (2023) 4119-4138.

DOI: 10.22060/ceej.2022.19870.7279

