



## بررسی ضریب دبی جریان و رابطه دبی - اشل در سرریزهای لبه‌پهن حقیقی با ترکیب‌بندی مختلفی از تاثیر شیب‌دار کردن تاج، وجه بالادست و وجه پایین دست

بهرام نورانی، هادی ارونقی\*، فرزین سلماسی

گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز - ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

### کلمات کلیدی:

سرریز لبه‌پهن  
ضریب دبی جریان  
روش حجم محدود  
شیب وجه بالادست و پایین دست  
تاج با شیب مثبت و منفی

**خلاصه:** سرریزها یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی در پروژه‌های آبی می‌باشند که با شکل مقطع مختلف به طور وسیع به منظور اهداف خاصی همچون اندازه‌گیری و کنترل جریان و تنظیم تراز سطح آب بالادست سازه جهت آبیگری در کانال‌های انتقال آب و بدنه سدها به کار گرفته می‌شوند. در این تحقیق خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی با ترکیب‌بندی مختلف شیب وجه بالادست و پایین دست در شرایط با و بدون شیب تاج (تاج افقی، تاج با شیب منفی و تاج با شیب مثبت) به روش عددی و با به کارگیری نرم‌افزار ANSYS FLUENT که از روش حجم محدود (FVM) استفاده می‌کند، بررسی گردید. نتایج مدل عددی در تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب دبی در سرریزهای BCW-UDR-PSC و BCW-UDR-NSC بزرگتر از ضریب دبی در سرریز BCW-UDR-HC می‌باشد. متوسط افزایش در مقدار ضریب دبی در سرریز BCW-UDR-NSC نسبت به سرریز BCW-UDR-HC در شرایطی که زاویه شیب تاج ۴/۷۶ - و ۹/۴۶ - درجه به ترتیب ۱۸٪ و ۲۵٪، در حالی که این افزایش در سرریز BCW-UDR-PSC نسبت به سرریز BCW-UDR-HC در زاویه شیب تاج ۴/۷۶ + و ۹/۴۶ + به ترتیب ۱۰٪ و ۱۸٪ می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که برای سرریز BCW-UDR-PSC ضریب دبی در محدوده ۰/۳۵-۰/۴۷ است. این در حالی است که برای سرریز BCW-UDR-PSC ضریب دبی در محدوده ۰/۴۲-۰/۴۸ می‌باشد. این نشان می‌دهد که شیب‌دار کردن تاج تاثیر مثبتی در افزایش ضریب دبی داشته به طوری که این افزایش در تاج با شیب منفی بیشتر از تاج با شیب مثبت می‌باشد که متوسط این افزایش تقریباً ۸٪ می‌باشد.

### ۱- مقدمه

با گذر زمان و با پیشرفت تکنولوژی، علم هیدرومتری<sup>۱</sup> تکامل یافته است و روش‌های متفاوت، ابزارها و سازه‌های مختلفی ساخته شده‌اند که به کمک آن‌ها می‌توان دبی جریان آب را اندازه‌گیری نمود، که از عمومی‌ترین آن‌ها می‌توان به سرریزها اشاره نمود. سرریز کانال‌ها به منظور دستیابی به اهدافی چون تنظیم سطح آب در بالادست سازه جهت آبیگری و یا اندازه‌گیری دبی جریان به کار می‌رود. اندازه‌گیری سرعت جریان در کانال‌های باز بلاخص در کانال‌های غیریکنواخت و رودخانه‌ها به دلیل متغیر بودن ابعاد و سرعت جریان امری بسیار دشوار می‌باشد. سرریزها امکان حرکت آب از میان ساختاری با ابعاد شناخته شده را فراهم می‌آورند و دبی جریان را به عنوان تابعی از عمق جریان تعیین می‌کنند. بنابراین یکی از روش‌های ساده و دقیق

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های باز، استفاده از سرریزها می‌باشد.

بر اساس پارامتر بی‌بعد  $h/L_r$  (نسبت عمق آب در بالای تاج سرریز به طول تاج سرریز در جهت جریان) سرریزهای با طول تاج محدود به چهار گروه اساسی تقسیم‌بندی می‌شوند. این گروه‌ها عبارتند از: سرریز تاج طولانی ( $h/L_r \leq 1/0$ )، سرریز لبه‌پهن حقیقی ( $1/0 < h/L_r \leq 4/0$ )، سرریز لبه‌باریک ( $4/0 < h/L_r \leq 2$ ) و سرریز لبه‌تیز ( $h/L_r > 2$ ) [۱]. هندسه سرریزهای با طول تاج محدود می‌تواند تاثیر بسزایی در شرایط هیدرولیکی و ظرفیت انتقال جریان داشته باشد.

گودرزی و همکاران [۲، ۱] [۲] خصوصیات جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن با شیب‌های مختلف وجه بالادست را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد با کاهش شیب وجه بالادست، ضریب دبی جریان افزایش و ناحیه جدایی جریان کاهش می‌یابد. فرهودی و شاه عالمی [۳] به بررسی تاثیر شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی بر ضریب جریان

### 1 Hydrometry

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Arvanaghi.Hadi@gmail.com



نتایج مدل دو بعدی و سه بعدی و همچنین مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های آشفتگی مختلف مورد استفاده پرداختند. نتایج این مقایسه حاکی از این بود که مدل‌های آشفتگی  $k - \varepsilon$  و  $k - \omega$  نتایج تقریباً مشابهی را دارا می‌باشند. شایما و همکاران [۸] پروفیل سطح آب در سرریزهای لبه‌پهن را در حالت  $2D$  و  $3D$  با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی کردند و نتایج آن را با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که درصد خطای نسبی ( $\%RE$ ) و جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) برای مدل عددی  $2D$  به ترتیب  $2/5$  و  $0/6$  و برای مدل عددی  $3D$  به ترتیب  $2/1$  و  $0/5$  به دست می‌آید. ایشان در تحقیقات خود اشاره کردند که نتایج مدل سه بعدی تقریباً شبیه به مدل دو بعدی می‌باشد ولی مدل سه بعدی به ازای یک شرایط مشابه به زمان زیادی جهت شبیه‌سازی نیازمند می‌باشد. هون و همکاران [۹] با بکارگیری نرم‌افزار  $FLOW3D$  که یکی از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۶</sup> ( $CFD$ ) می‌باشد، جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن دوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار دادند و نتایج مدل عددی را با روش آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که خروجی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. آن‌ها در این تحقیق از روش کسر حجمی سیال ( $VOF$ )<sup>۷</sup> به بررسی پروفیل سطح جریان پرداختند. نادهیر و اعلا<sup>۸</sup> [۱۰] تاثیر کاهش شیب وجوه بالادست و پایین‌دست بر ضریب دبی جریان و خط‌گردایان انرژی کل را به روش عددی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بررسی نشان داد که کاهش شیب در وجه پایین‌دست بر پارامترهای فوق‌الذکر بی‌تاثیر است، اما کاهش شیب بالادست به میزان  $50\%$  و  $70\%$  درصد، ضریب دبی را به میزان  $9/5$  و  $13/2$  درصد افزایش و خط‌گردایان انرژی کل را به ترتیب  $4/3$  و  $8/7$  درصد کاهش می‌دهد.

عظیمی و همکاران [۱۱] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سایر محققان که در سال‌های مختلف صورت گرفته است، روابطی را برای ضریب دبی سرریزهای لبه‌پهن با تاج شیب‌دار در حالت بدون وجوه شیب‌دار و همچنین سرریزهای با وجوه شیب‌دار در بالادست، پایین‌دست و یا هر دو در حالت با تاج افقی را در شرایط جریان آزاد به دست آوردند. ایشان همچنین با جمع‌بندی نتایج آزمایشگاهی مختلف توسط سایر محققان به این نتیجه دست یافتند که برای سرریزهای لبه‌پهن طولانی، یک شیب مثبت برای تاج سرریز، دبی جریان را در مقایسه با حالت سرریز با تاج افقی افزایش می‌دهد.

و مشخصات جریان در این سازه‌ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی جریان و در نتیجه ظرفیت تخلیه سرریز، متناسب با کاهش شیب بالادست نسبت به سرریز لبه‌پهن استاندارد افزایش می‌یابد، که این افزایش در ضریب دبی در سرریز با شیب  $15^\circ$  درجه تا  $20\%$  درصد نیز می‌رسد. همچنین آزمایشات نشان می‌دهد که در تمامی سرریزها با شرایط جریان آزاد، عمق بحرانی بر روی سرریز تشکیل شده و در محدوده مقطع بحرانی تا انتهای تاج سرریز، جریان فوق بحرانی در تاج ایجاد می‌گردد. سارجیسون و پرسی<sup>۱</sup> [۴] جریان روی سرریزهای لبه‌پهن با مقطع طولی دوزنقه‌ای را در شیب‌های مختلف بالادست و پایین‌دست به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شیب وجه بالادست بیشترین اثر را در افزایش دبی جریان دارد و با کاهش شیب بالادست، ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. ایشان در بررسی خود مشاهده کردند که شیب پایین‌دست تاثیری در مقدار ضریب دبی جریان ندارد. بررسی آزمایشگاهی ایشان نشان داد که در صورتی که شیب وجه پایین‌دست برابر  $(2H : W)$  باشد، مقدار ضریب دبی جریان حدود  $10$  الی  $15\%$  درصد در حالتی که شیب وجه بالادست برابر  $(W : 2H)$  باشد بیشتر از حالتی که شیب وجه بالادست  $(W)$  یا قائم باشد، به دست آمد. ایشان همچنین رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی جریان ارائه نمودند. عباسپور و همکاران [۵] به مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی با وجوه شیب‌دار بوسیله نرم‌افزار فلوئنت<sup>۲</sup> با نتایج آزمایشگاهی سارجیسون و پرسی [۴] پرداختند و نتایج نشان داد که مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  ( $Standard$ ) نتایج مطلوبی را در پیش‌بینی پروفیل سطح آب، پروفیل سرعت، ضریب دبی جریان و ضخامت لایه مرزی ارائه می‌دهد. حداکثر خطا در مطالعات ایشان برای بار آبی و ضریب دبی به ترتیب  $4/06$  و  $6/54$  به دست آمد. سیمسک و همکاران<sup>۳</sup> [۶] به بررسی انواع مدل‌های آشفتگی در مدل عددی برای تعیین سرعت و پروفیل جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن منحنی‌الخط پرداختند. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  ( $RNG$ ) نسبت به سایر مدل‌هایی همچون  $k - \varepsilon$  ( $Standard$ )،  $k - \varepsilon$  ( $Realizable$ ) و  $k - \omega$  نتایج با دقت بالایی را نشان می‌دهد. ماجور و همکاران<sup>۴</sup> [۷] به مدل‌سازی عددی جریان بر روی سرریز لبه‌پهن با استفاده از نرم‌افزار  $FLOW3D$  پرداختند. ایشان با مد نظر قرار دادن مولفه پروفیل سطح آب در روی سرریز به مقایسه

5 Haun et al.  
6 Computational Fluid Dynamic  
7 Volume of Fluid  
8 Nadheer and Alla

1 Sargison and Percy  
2 Fluent  
3 Simsek et al.  
4 Major et al.

از داده‌های تولید شده به وسیله روش عددی بهره بردند و نشان دادند که شیب وجه پایین دست ضریب دبی را کمتر تحت تاثیر قرار می‌دهد. زیره‌ام و همکاران<sup>۳</sup> [۱۶] معادله‌ای را برای برآورد ضریب دبی جریان با لحاظ طول تاج سرریز، عمق آب در بالای سرریز و شیب وجوه بالادست و پایین دست توسعه دادند. ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا برای رابطه ارائه شده به ترتیب ۰/۹۱ و ۱/۱ به دست آمد. به منظور برآورد و تخمین ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه‌پهن با استفاده از پارامترهای موثر بر آن، نورانی و همکاران [۱۷] اقدام به توسعه مدل‌های منفرد شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> (*ANN*) و رگرسیون فرایند گوسی<sup>۵</sup> (*GPR*) و همچنین مدل‌های هیبریدی آن‌ها با الگوریتم شاهین هریس<sup>۶</sup> (*HHO*) نمودند. ارزیابی نتایج هر یک از مدل‌های توسعه یافته با شاخص‌های آماری نشان داد که هیبرید مدل شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم شاهین هریس (*ANN-HHO*) نسبت به بقیه مدل‌ها از دقت به مراتب بالاتری برخوردار می‌باشد. سلماسی و همکاران [۱۸] سه روش رگرسیون لجستیک غیرخطی، مدل درختی *M5* و شبکه عصبی مصنوعی را در برآورد ضریب دبی جریان در سرریز لبه‌پهن مستطیلی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که اگر چه دقت روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل درختی *M5* اندکی بالاتر است، ولی سادگی، قابل فهم بودن و همچنین ارائه روابط خطی ساده به فرم شرطی در روش *M5* باعث می‌گردد تا این روش به عنوان یک روش جایگزین و قابل رقابت با روش شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی مطرح گردد.

با توجه به تحقیقات انجام شده همانطور مشاهده گردید، اثر شیب‌دار کردن تاج در سرریزهای لبه‌پهن، به طور وسیع و کامل خصوصا در سرریزهای لبه‌پهن با وجوه شیب‌دار مورد بررسی واقع نشده است. در این تحقیق سعی گردیده است با تغییر دادن شکل هندسه این سازه هیدرولیکی (سرریز لبه‌پهن حقیقی) در جهت مسیر جریان از جمله حضور شیب در وجه بالادست و وجه پایین دست و همچنین شیب‌دار کردن سطح تاج (تاج با شیب منفی و تاج با شیب مثبت) نسبت به حالت استاندارد (تاج افقی)، خصوصیات هیدرولیکی جریان این نوع سرریزها مورد بررسی قرار گیرد. تاثیر توام شیب‌دار کردن سطح تاج (شیب مثبت و منفی) و شیب‌دار کردن وجوه بالادست و پایین دست به صورت همزمان هدف تحقیق حاضر در کنار سایر حالت‌های مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد که در تحقیقات قبلی، تا به حال مورد بررسی قرار

همچنین تعیین گردید که برای سرریزهای لبه‌پهن و لبه‌باریک، یک شیب منفی برای تاج سرریز، ضریب دبی را افزایش می‌دهد. در حالت کلی مشاهده کردند که سرریزهای با وجه شیب‌دار در بالادست و پایین دست، ضریب دبی بیشتری از سرریزهای لبه‌پهن بدون وجوه شیب‌دار را دارا می‌باشند. عظیمی و همکاران [۱۲] جریان مستغرق بر روی سرریزهای لبه‌پهن با لبه تیز و لبه‌گرد در نوک بالادست سرریزهای با طول تاج محدود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای این کار از داده‌های دیگران و همچنین نتایج آزمایشگاهی خود بهره برده و روابطی را برای فاکتور کاهش دبی در کلاس‌بندی‌های مختلف لبه‌پهن کوتاه (*SCW*)، لبه‌پهن حقیقی (*BCW*) و لبه‌پهن باریک (*NCW*) ارائه دادند. اکسوی و دوغان<sup>۱</sup> [۱۳] به بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه نزدیک‌شونده بر بازده دبی جریان در سرریزهای لبه‌پهن پرداختند. آن‌ها آزمایشات خود را برای چهار شیب در شرایطی که شیب بالادست و پایین دست یکسان باشد و دو طول تاج را به ازای سه دبی مختلف در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۸ متر و عرض ۱۵ سانتی‌متری انجام داده و به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی جریان فقط تابعی از طول تاج سرریز نبود، بلکه تابعی از زاویه وجه بالادست نیز می‌باشد. در نهایت بر اساس نتایج به دست آمده، رابطه‌ای برای تعیین ضریب دبی جریان در حالتی که شیب وجه بالادست و پایین دست یکسان باشد، از سوی ایشان پیشنهاد گردید. لی‌جینگ و همکاران [۱۴] ضریب دبی جریان و ناحیه جداسازی جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن با وجه شیب‌دار بالادست را با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مدل عددی مذکور به خوبی پروفیل سطح جریان و ضریب دبی را پیش‌بینی می‌کند. همچنین مشاهده گردید که با افزایش زاویه شیب بالادست ( $\beta_1$ ) ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد. ضمناً در تحقیقات ایشان مشاهده گردید که ناحیه جدا شدگی در تاج سرریز در زوایای بیش از ۶۰ درجه اتفاق می‌افتد و با افزایش این زاویه، ابعاد ناحیه جدا شدگی افزایش می‌یابد. اخیر در کنار استفاده از مدل‌های فیزیکی و مدل‌های عددی، استفاده از مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی<sup>۲</sup> به منظور برآورد و تخمین پارامترهای معین در مسائل مختلف در میان پژوهشگران مورد توجه واقع شده است. ملک‌زاده و همکاران [۱۵] پارامترهای موثر بر ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه‌پهن را تابعی از طول تاج سرریز، ارتفاع سرریز، عمق آب در بالای تاج و شیب وجوه بالادست و پایین دست در نظر گرفتند و در نهایت یک رابطه رگرسیونی چندگانه با دقت مطلوب برای برآورد آن معرفی نمودند. ایشان جهت توسعه این رابطه

3 Zerihum et al.  
4 Artificial Neural Network  
5 Gaussian Process Regression  
6 Harris Hawks Optimization

1 Aksoy and Doğan  
2 Data Mining

هیدرولیکی و خصوصیات سیال می‌باشد که بر اساس این سه پارامتر رابطه دبی-اشل در چنین سرریزهایی می‌تواند با رابطه (۳) بیان گردد:

$$F_1(Q, h, L_r, B, P, \beta_1, \beta_2, \theta, g, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $Q$  دبی جریان عبوری از روی تاج سرریز ( $m^3/s$ )،  $h$  بار آبی روی تاج سرریز ( $m$ )،  $L_r$  طول تاج سرریز در جهت جریان ( $m$ )،  $B$  عرض سرریز عمود بر جریان ( $m$ )،  $P$  ارتفاع سرریز ( $m$ )،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  به ترتیب زاویه شیب وجه بالادست و پایین‌دست،  $\theta$  شیب تاج،  $g$  شتاب ثقل ( $m/s^2$ )،  $\rho$  جرم مخصوص ( $Kg/m^3$ )،  $\mu$  لزجت دینامیکی ( $N/m^2$ ) و  $\sigma$  کشش سطحی آب ( $N/m$ ) می‌باشند. بر اساس تئوری باکینگهام<sup>۱</sup> و با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $g$  و  $h$  به عنوان پارامترهای تکرارشونده، پارامترهای بی‌بعد می‌توانند به صورت رابطه (۴) تعریف گردند:

$$\frac{q}{\sqrt{2gh^3}} = F_2\left(\frac{\sigma}{\rho gh^2}, \frac{\mu}{\rho h^2 \sqrt{g}}, \frac{h}{L_r}, \frac{h}{P}, \beta_1, \beta_2, \theta\right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، دو پارامتر بی‌بعد اول عدد وبر<sup>۲</sup> ( $We$ ) و عدد رینولدز<sup>۳</sup> ( $Re$ ) می‌باشند که به ترتیب تاثیر کشش سطحی و لزوجت سیال را نشان می‌دهند. هاگر و اسچوالت [۱۹] پیشنهاد کردند که عمق جریان بر روی تاج سرریز نباید کمتر از ۵۰ میلی‌متر باشد. بنابراین در تحقیق حاضر عمق‌های کمتر از ۵۰ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. در صورتی که تاثیر کشش سطحی و لزوجت نادیده گرفته شود، رابطه (۴) می‌تواند به صورت رابطه (۵) باز نویسی گردد. در رابطه (۴) پارامتر بی‌بعد سمت راست، ضریب دبی جریان ( $C_d$ ) را توصیف می‌کند که در آن  $q$  برابر با  $Q/B$  یعنی دبی در واحد عرض جریان ( $m/s^2$ ) است. بنابراین با بکارگیری ترکیبی از پارامترهای بی‌بعد سمت چپ رابطه (۶)، مقدار جریان عبوری می‌تواند از طریق رابطه دبی-اشل (رابطه ۲) و سایر خصوصیات هیدرولیکی برای هر یک از سرریزهای لبه‌پهن تعریف شده در بالا برآورد گردد.

نگرفته است و از این نظر می‌تواند تکمیل کننده پژوهش‌های انجام گرفته تا به حال باشد. شایان ذکر است که برای حل معادلات حاکم بر جریان از روش حجم محدود ( $FVM$ ) با بکارگیری نرم‌افزار  $ANSYS FLUENT$  استفاده شده است.

## ۲- الگوسازی نظری و تجربی

### ۲-۱- معادله حاکم

برای یک سرریز لبه‌پهن رابطه دبی-اشل به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$Q = C_d B \sqrt{2gH^3} \quad (1)$$

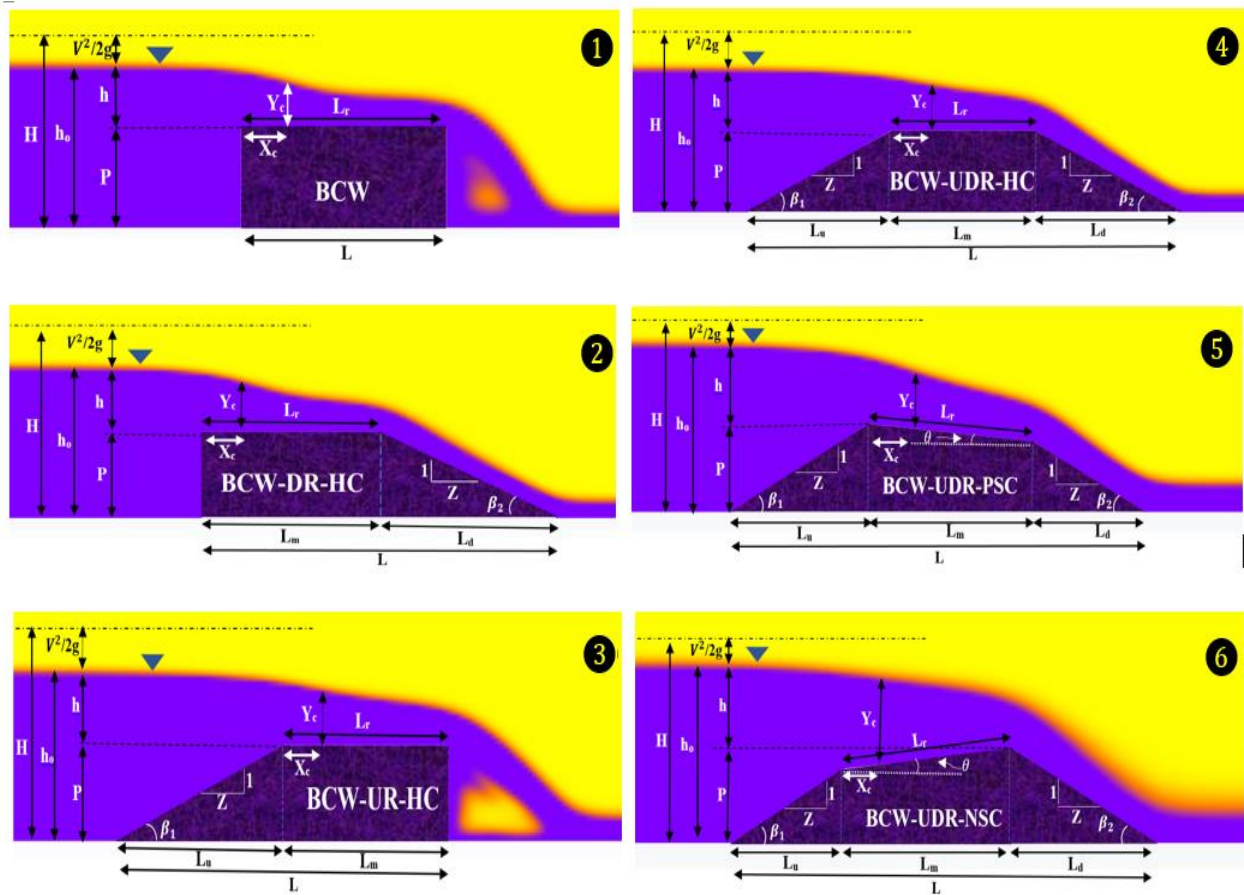
که در آن  $Q$  دبی جریان ( $m^3/s$ )،  $C_d$  ضریب دبی جریان (-)،  $B$  عرض فلوم یا سرریز هم عرض کانال ( $m$ )،  $g$  شتاب ثقل ( $m/s^2$ ) و  $H$  بار آبی کل ( $H = h + Q^2 / (2gB^2 (h + P)^2)$ )،  $h$  ارتفاع آب بالای تاج سرریز ( $m$ ) و  $P$  ارتفاع سرریز ( $m$ ) می‌باشند (هورتون و مورفی، ۱۹۰۶). از آنجایی که اندازه‌گیری بار آبی کل در محل امکان‌پذیر نیست، بار آبی کل ( $H$ ) با بار آبی اندازه‌گیری شده در بالادست سرریز ( $h$ ) جایگزین شده و تاثیر این امر نیز در ضریب دبی جریان لحاظ می‌گردد.

$$Q = C_d B \sqrt{2gh^3} \quad (2)$$

### ۲-۲- آنالیز ابعادی پارامترهای موثر بر ضریب دبی جریان

در شکل ۱ تعریف شماتیکی از شش نوع سرریز لبه‌پهن با ترکیب‌بندی مختلفی از شیب وجه بالادست، شیب وجه پایین‌دست و شیب تاج نشان داده شده است. این شش نوع سرریز عبارتند از: سرریز لبه‌پهن استاندارد ( $BCW$ )، سرریز لبه‌پهن با شیب وجه بالادست و تاج افقی ( $BCW-UR-HC$ )، سرریز لبه‌پهن با شیب وجه پایین‌دست و تاج افقی ( $BCW-DR-HC$ )، سرریز لبه‌پهن با شیب وجه بالادست و پایین‌دست و تاج افقی ( $BCW-UDR-HC$ )، سرریز لبه‌پهن با شیب بالادست و شیب پایین‌دست و تاج با شیب مثبت ( $BCW-UDR-PSC$ ) و سرریز لبه‌پهن با شیب وجه بالادست و پایین‌دست و تاج با شیب منفی ( $BCW-UDR-NSC$ ). در این نوع سرریزها ضریب دبی جریان تابعی از پارامترهای هندسی، شرایط

1 Buckingham Theorem  
2 Weber Number  
3 Reynolds Number



شکل ۱. شماتیکی از سرریزهای لبه پهن مورد مطالعه در تحقیق حاضر

Fig. 1. Definition sketch of broad-crested weirs in this study

و (۸) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{u}_i) = 0 \quad (۷)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \quad (۸)$$

$$f_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right)$$

در روابط فوق  $u_i$  و  $u_j$  مولفه بردار سرعت در راستای فضایی  $i$  و  $j$ ، نیروی حجمی در راستای  $i$ ،  $f_i$  بیانگر فشار،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $\rho$  چگالی سیال و  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  تنش رینولدزی می‌باشد که برای

$$\frac{q}{\sqrt{2g} h^2} = F_3(\text{Re}, \text{We}, \frac{h}{L_r}, \frac{h}{P}, \beta_1, \beta_2, \theta) \quad (۵)$$

$$C_d = \frac{q}{\sqrt{2g} h^2} = F_4(\frac{h}{L_r}, \frac{h}{P}, \beta_1, \beta_2, \theta) \quad (۶)$$

۲-۳ شبیه‌سازی عددی

۲-۳-۱ معادلات حاکم بر جریان در شبیه‌سازی عددی

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در مهندسی هیدرولیک حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و معادلات ممنتوم می‌باشد که اصطلاحاً به معادلات ناور-استوکس<sup>۱</sup> معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم‌ناپذیر با ویسکوزیته ثابت معادلات مذکور به ترتیب به فرم روابط (۷)

1 Navier-Stocks



از فازها و یا مخلوطی از فازها می‌باشد که بسته به مقادیر نسبت حجمی بین صفر و یک متغیر است. در شبیه‌سازی جریان دو فازی شامل آب و هوا، در صورتی که سلولی پر از هوا باشد مقدار نسبت حجمی صفر ( $\hat{\alpha} = 0$ )، در صورتی که سلول کاملاً پر از آب باشد، مقدار یک ( $\hat{\alpha} = 1$ ) و در صورتی که سلولی هر دو سیال را داشته باشد، مقدار عددی بین صفر و یک ( $0 < \hat{\alpha} < 1$ ) را به خود اختصاص می‌دهد که تحت این شرایط المان دارای سطح آزاد سیال می‌باشد. بایون و ولروا [۲۱] و تورا [۲۲] مقدار عددی  $\hat{\alpha}$  برابر  $0.5$  ( $\hat{\alpha} = 0.5$ ) را به عنوان معرف سطح آزاد سیال معرفی نمودند. در نرم‌افزار *ANSYS FLUENT* برای حل همزمان معادلات سرعت-فشار الگوریتم‌های مختلفی تدارک دیده شده است. هدف این روش‌های تصحیح فشار، کمک به همگرایی معادلات است. به عبارت دیگر در صورتی که الگوریتم متناسب با جریان مورد نظر انتخاب شود، تعداد تکرار لازم برای همگرایی کاهش می‌یابد و تحت این شرایط گام زمانی<sup>۲</sup> نیز در محاسبات می‌تواند بزرگتر انتخاب شود. انتخاب چنین شرایطی با سعی و خطا و بنا به تجربه کاربر می‌تواند فراهم گردد. برای حل‌های طولانی استفاده از الگوریتم *PISO*<sup>۳</sup> پایداری حل را تضمین می‌کند. با توجه به برقراری جریان دائمی در شبیه‌سازی تحقیق حاضر، برای تصحیح فشار از *PISO*، برای گسسته‌سازی عبارت فشار از روش *IBF*<sup>۴</sup> برای گسسته‌سازی عبارت ممتنم، نسبت حجمی، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ افت انرژی جنبشی از روش مرتبه دوم بالادست *SOU*<sup>۵</sup> که نسبت به روش جهت‌مند مرتبه اول *FOU*<sup>۶</sup> جواب بهتری را می‌دهد، استفاده شده است (شکل ۲).

## ۲-۳-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی

جهت ایجاد شبکه قابل فراخوانی در نرم‌افزار *FLUENT* ابتدا در میزکار (*Workbench*) نرم‌افزار *ANSYS FLUENT* هندسه مدل طراحی گردید و سپس از قسمت *Meshing* اقدام به شبکه‌بندی محدوده مسئله گردید. برای این منظور در تحقیق حاضر از المان چهار وجهی و سه وجهی منظم با کیفیت مناسب ( $Orthogonal Quality > 0.7$ ) استفاده شده است. همچنین یک تست مستقل از شبکه‌بندی و مدل آشفتگی به صورت همزمان در جهت کنترل عدم تاثیر اندازه شبکه‌ها و نوع مدل آشفتگی بر نتایج

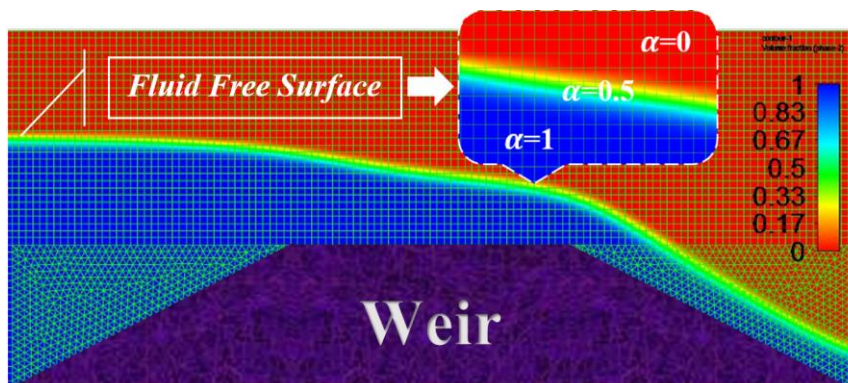
تعیین آن از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است، هر مدل آشفتگی برای توصیف یک رژیم جریان خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رژیم‌های با جریان تلاطم کم با مدل‌های ساده دو معادله‌ای همچون  $k - \varepsilon$  و  $k - \omega$  توصیف می‌شوند در حالی که جریان‌های با پیچیدگی بالا (جریانی که شامل اجسام در حال چرخش و گرداب‌های بزرگ است) به خوبی توسط مدل‌های توسعه‌یافته‌ای مانند مدل‌های تنش رینولدز (*RSM*) توصیف می‌شوند. در مطالعه حاضر، از آنجایی که هیچ ناحیه جریانی با پیچیدگی بالا انتظار نمی‌رفت، لذا در شبیه‌سازی رفتار جریان از روی سرریز لبه‌پهن، استفاده از مدل‌های آشفتگی از نوع دو معادله‌ای در اولویت قرار گرفتند. به طوری که ۵ مدل آشفتگی دو معادله‌ای ( $k - \varepsilon(Standard)$ ،  $k - \varepsilon(Realizable)$ ،  $k - \omega(RNG)$ ،  $k - \omega(Standard)$  و  $k - \omega(SST)$ ) برای شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از نرم‌افزار *ANSYS FLUENT* استفاده گردید و بعد از ارزیابی نتایج همه مدل‌های آشفتگی فوق‌الذکر با نتایج آزمایشگاهی در دسترس و معتبر، بهترین مدل آشفتگی جهت شبیه‌سازی جریان انتخاب گردید و همه شبیه‌سازی‌ها با این مدل آشفتگی انتخابی انجام گرفت.

جریان عبوری از روی سرریز لبه‌پهن در تحقیق حاضر در یک کانال روباز، یک جریان دو فازی و متلاطم می‌باشد. جریان دوفازی، جریانی است که در آن دو فاز در تعامل با یکدیگر حرکت می‌کنند. در این تحقیق دو فاز مربوط به فاز آب و فاز هوا می‌شود. هدف از مدل‌های شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی در واقع بررسی عوامل موثر بر حرکت این جریان‌ها و تاثیر فازها بر روی یکدیگر می‌باشد. در این مدل‌ها سعی می‌شود که مرز بین فازها تعیین شده و تاثیر فازها بر روی هم در حالت دینامیک بررسی شود. مهم‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی جریان دو فازی، مدل کسر حجمی سیال (*VOF*) می‌باشد که توسط هیرث و نیکولس [۲۰] ارائه شده است که در این روش رابطه انتقالی کسر سیال با رابطه (۹) بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha) + u_i \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha) = 0 \quad (9)$$

این روش بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند. پس مشخصات و مقادیر هر سلول به‌طور خالص نشان‌دهنده یکی

- 2 Time step
- 3 Pressure-Implicit with Spirting of Operator
- 4 Implicit Body Force
- 5 Second Order Upwind
- 6 First Order Upwind



شکل ۲. نمایش کنتورهای کسر حجمی سیال در تاج سرریز BCW-UDR-HC

Fig. 2. Illustration contours of fraction of fluid ( $\alpha$ ) at the crest of the BCW-UDR-HC

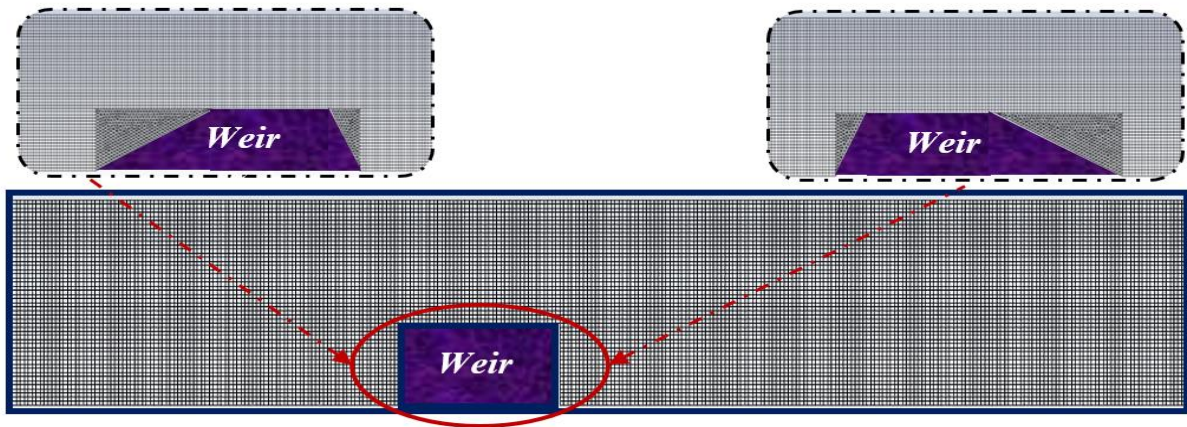
صورت دو بعدی لحاظ شده است. لازم به ذکر است یک ناحیه پر از سیال آب در داخل محدوده مساله به عنوان شرط اولیه در زمان شروع شبیه‌سازی‌ها برای قسمت بالادست سرریز جهت سهولت و کاهش زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی لحاظ شده است. شبیه‌سازی عددی جریان به صورت غیردائمی با گام زمانی  $0.001$  ثانیه انجام گردید و تا رسیدن به حالت دائمی ادامه یافت.

۳-۳-۲- تعریف محدوده و هندسه سرریزها به همراه محدوده پارامترهای مورد مطالعه در تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر یک فلومی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۱ و ۰/۵ متر به عنوان محدوده شبیه‌سازی در نرم‌افزار تعریف گردید. تاج سرریز در کل مدل‌های شبیه‌سازی شده در فاصله ۲/۵ متری از ورودی فلوم در نظر گرفته شد. ارتفاع سرریز در تمامی مدل‌ها ثابت و برابر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. جدول (۱) تعریف کلی از تمامی حالت‌های شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. به منظور بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای لبه پهن، ۱۶۴ مدل با ترکیب‌های مختلفی از شیب وجه بالادست، شیب وجه پایین‌دست و شیب تاج در نسبت بار آبی به طول تاج سرریز معین مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. این شبیه‌سازی برای ۵ حالت برای شیب وجه بالادست و پایین‌دست، ۳ حالت برای تاج با شیب مثبت، شیب منفی و افقی در ۴ حالت بار آبی معین برای محدوده سرریزهای لبه پهن حقیقی ( $0.1 < h / L_r \leq 0.4$ ) انجام گردید. در نرم‌افزار FLUENT به منظور ترسیم محدوده مساله و هندسه سازه مورد بررسی (که در تحقیق حاضر سرریز لبه‌پهن می‌باشد) از قسمت Design Modeler

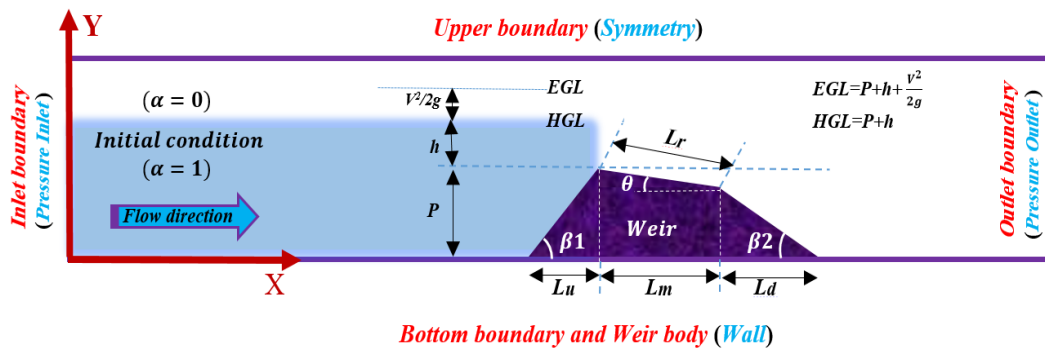
حاصل از شبیه‌سازی عددی انجام گرفت. با انتخاب هر کدام از مدل‌های آشفتگی یعنی  $k - \varepsilon (Standard)$ ،  $k - \varepsilon (Realizable)$ ،  $k - \omega (SST)$  و  $k - \omega (Standard)$ ،  $k - \varepsilon (RNG)$  با تغییر تعداد شبکه‌ها نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد با انتخاب مدل  $k - \varepsilon (RNG)$  و تعداد شبکه در حدود بیشتر از ۲۳۷۰۰، مدل عددی نتایج بسیار مشابهی به نتایج آزمایشگاهی دارد. لازم به ذکر است که تحت این شرایط ابعاد المان در حدود  $1 \text{ cm}^2$  باشد (کاهش ابعاد شبکه به بیش از یک مقدار معین نه تنها موجب بهتر شدن نتایج نمی‌شود بلکه مدت زمان شبیه‌سازی را نیز افزایش می‌دهد). در شکل ۳- الف خصوصیات شبکه‌بندی محدوده مسئله در تحقیق حاضر برای سرریز BCW و BCW-UDR-HC برای شرایطی که شیب وجه بالادست و پایین‌دست به ترتیب  $1V:2H$  و  $1V:0.5H$  و برای حالت عکس آن، نشان داده شده است که تحت این شرایط تعداد شبکه‌ها و گره‌ها به ترتیب ۲۳۶۷۸ و ۲۴۰۵۸ می‌باشند. در شکل ۳-ب موقعیت و نوع شرایط مرزی<sup>۱</sup> و همچنین شرط اولیه<sup>۲</sup> برای محدوده مسئله در حضور هندسه سرریز نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌گردد، شرایط مرزی برای جریان ورودی به صورت فشار جریان ورودی (Pressure Inlet)، برای خروجی به صورت فشار خروجی (Pressure Outlet)، برای کف کانال و بدنه سرریز لبه‌پهن داخل کانال به صورت دیوار (Wall) و برای بالای کانال شرط مرزی متقارن (Symmetry) به

- 1 Boundary conditions
- 2 Initial Condition



(الف)

(a)



(ب)

(b)

شکل ۳. (الف): نحوه شبکه‌بندی در شبیه‌سازی عددی برای تحقیق حاضر، (ب): محدوده و اعمال شرایط مرزی و شرط اولیه در شبیه‌سازی عددی برای تحقیق حاضر

Fig. 3. (a). Illustration of mesh generation in numerical simulation for this study, (b). Domain, boundary conditions and initial value in numerical simulation for this study



جدول ۱. هندسه سرریز و مقادیر پارامترهای مورد بررسی در تحقیق حاضر

Table 1. Geometry of weirs and variable values in this study

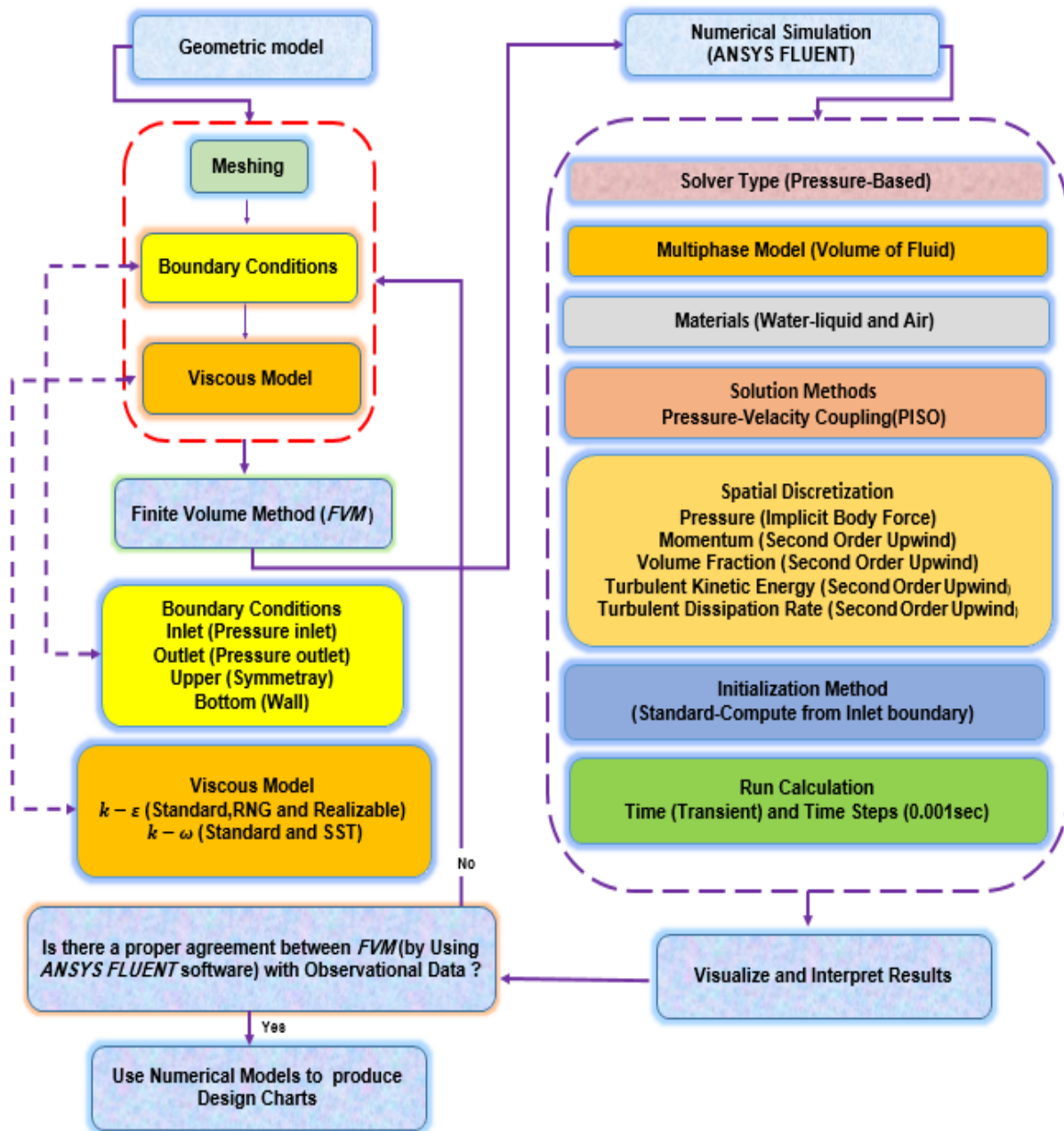
Type of Weir	Scheme	Upstream slope ( $\beta_1$ )	Downstream slope ( $\beta_2$ )	Crest Slope ( $\theta$ )	( $h/L_r$ )
BCW-Standard	$\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$ $\theta = 0^\circ$	V	V	.	۰/۱۵, ۰/۲۲۵, ۰/۳۰, ۰/۳۷۵
BCW-UR-HC	$\beta_1 \neq 90^\circ, \beta_2 = 90^\circ$ $\theta = 0^\circ$	(۱V:۰/۲۵H), (۱V:۰/۵H), (۱V:۱H), (۱V:۲H)	V	.	۰/۱۵, ۰/۲۲۵, ۰/۳۰, ۰/۳۷۵
BCW-DR-HC	$\beta_1 = 90^\circ, \beta_2 \neq 90^\circ$ $\theta = 0^\circ$	V	(۱V:۰/۲۵H), (۱V:۰/۵H), (۱V:۱H), (۱V:۲H)	.	۰/۱۵, ۰/۲۲۵, ۰/۳۰, ۰/۳۷۵
BCW-UDR-HC	$\beta_1 \neq 90^\circ, \beta_2 \neq 90^\circ$ $\theta = 0^\circ$	(۱V:۰/۲۵H), (۱V:۰/۵H), (۱V:۱H), (۱V:۲H)	(۱V:۰/۲۵H), (۱V:۰/۵H), (۱V:۱H), (۱V:۲H)	.	۰/۱۵, ۰/۲۲۵, ۰/۳۰, ۰/۳۷۵
BCW-UDR-NSC	$\beta_1 = \beta_2$ $\theta \neq 0^\circ$	(۱V:۰/۲۵H), (۱V:۰/۵H), (۱V:۱H), (۱V:۲H)		(۱V: -۶H) (۱V: -۱۲H)	۰/۱۵, ۰/۲۲۵, ۰/۳۰, ۰/۳۷۵
BCW-UDR-PSC	$\beta_1 = \beta_2$ $\theta \neq 0^\circ$	(۱V:۰/۲۵H), (۱V:۰/۵H), (۱V:۱H), (۱V:۲H)		(۱V: +۶H) (۱V: +۱۲H)	۰/۱۵, ۰/۲۲۵, ۰/۳۰, ۰/۳۷۵

شده در محدوده تاج سرریز با نتایج آزمایشگاهی عظیمی و همکاران [۱۱] برای شرایط معین و یکسان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نشان داد که اختلاف بسیار جزیی بین این مدل‌های آشفتگی در تخمین پروفیل سطح آب وجود دارد. بنابراین اگرچه همه مدل‌های آشفتگی از دقت خوبی در شبیه‌سازی جریان برخوردار می‌باشند، ولی همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon (RNG)$  نسبت به بقیه مدل‌های مورد نظر به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشد. لازم به ذکر است مدل آشفتگی فوق‌الذکر علاوه بر سادگی و کاربرد گسترده‌ای که دارد در جریان‌های با آشفتگی کم از دقت به مراتب بالاتری نیز برخوردار می‌باشد، لذا در تحقیق حاضر از این مدل آشفتگی جهت شبیه‌سازی در کل مدل‌ها بهره برده شده است. لازم به ذکر است این مدل آشفتگی در بسیاری از شبیه‌سازی‌های مسائل هیدرولیکی نتایج بسیار مطلوبی ارائه نموده است که در این بین می‌توان به شبیه‌سازی جریان در سرریزهای منحنی‌الخط توسط سیمسک و همکاران [۶] و شبیه‌سازی جریان در سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی توسط نورانی و همکاران [۲۳] اشاره نمود.

بهره برده شده است. لازم به ذکر است که در محیط طراحی هندسه مدل، بعد از تعریف هندسه برای اعمال نواحی صلب از شرط مرزی دیوار (*Wall*) استفاده می‌شود که در اینجا برای کف و دیواره‌های جانبی فوم و بدنه سرریز از شرط مرزی دیوار استفاده شده است تا نرم‌افزار در فرایند حل آن‌ها را به صورت صلب لحاظ نماید. هندسه سرریز در هر شبیه‌سازی متغیر بود (مطابق جدول ۱) لذا در همه حالت‌ها، مرزهای مربوط به بدنه سرریز به همین شکل به صورت صلب معرفی شده است. در شکل ۴ کلیه مراحل طی شده برای شبیه‌سازی عددی به صورت کامل آورده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

یکی از مهمترین مولفه‌های موثر بر دقت مدل‌سازی عددی با نرم‌افزارهای *CFD*، انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب می‌باشد. همانطور که اشاره گردید در تحقیق حاضر ۵ نوع مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی عددی جریان مورد نظر قرار گرفت و نتایج پروفیل سطح آب تخمین زده



شکل ۴. مراحل انجام گرفته جهت شبیه‌سازی عددی

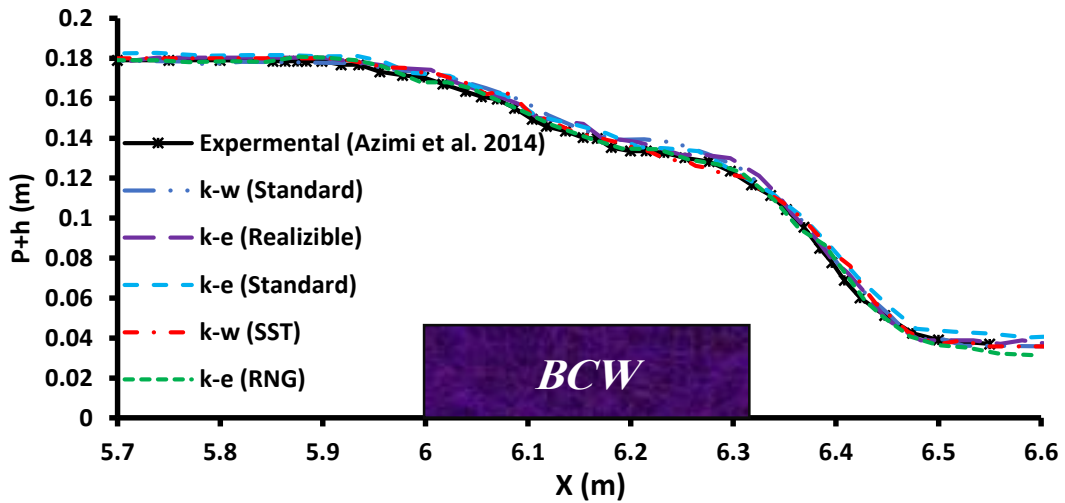
Fig. 4. Simulation process for numerical simulation

و  $h/P = 0.175$  در شرایطی که زوایای شیب وجه بالادست و شیب وجه پایین‌دست به ترتیب  $(\beta_1 = 45^\circ, \beta_2 = 90^\circ)$  و  $(\beta_1 = 45^\circ, \beta_2 = 90^\circ)$  باشد، بعد از شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش  $FVM$  نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌گردد در سرریز  $BCW-DR-$

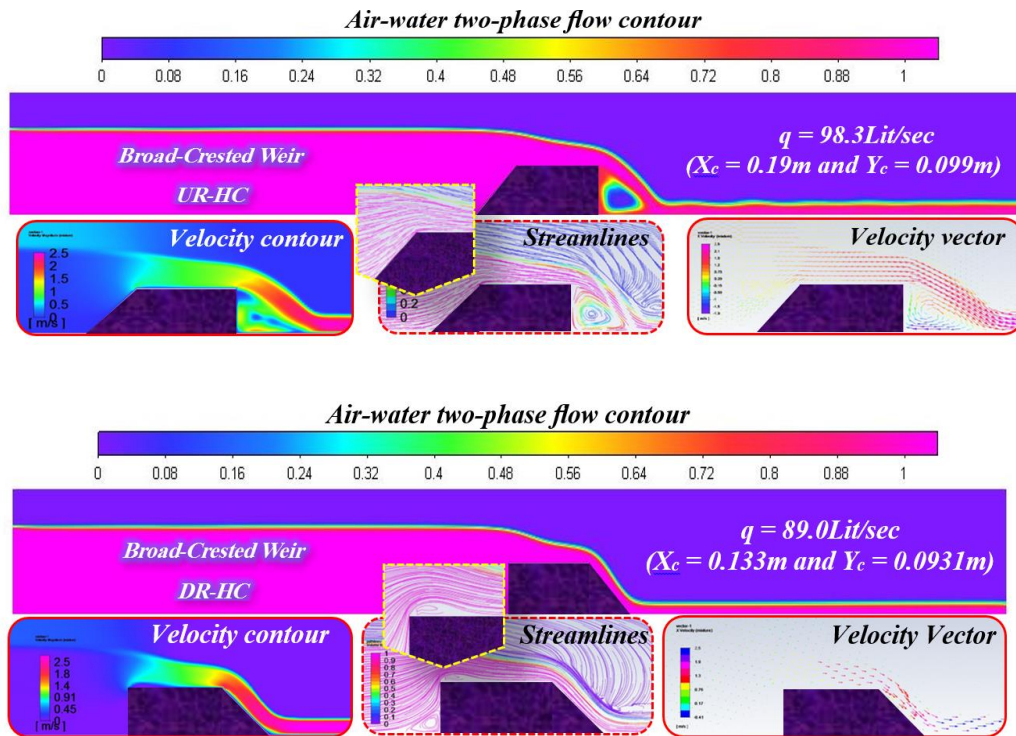
۳-۱- بررسی خصوصیات هیدورلیکی در سرریز لبه پهن با شیب وجه بالادست یا پایین‌دست

در شکل ۶ (الف و ب) به ترتیب کنتورهای پروفیل سطح آب، کنتور سرعت جریان، کنتور خطوط جریان و بردارهای سرعت برای سرریزهای  $BCW-UR-HC$  و  $BCW-DR-HC$  به ازای  $h/L_r = 0.375$



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل سطح آب بر روی تاج سرریز لبه پهن برای مدل‌های آشفتنی مختلف

Fig. 5. Comparison between experimental and numerical methods of water surface profile over broad-crested weir for different turbulent models



شکل ۶. (الف و ب): پروفیل سطح آب، کنتور خطوط جریان، کنتور سرعت، بردار سرعت و خصوصیات مقطع کنترل بحرانی برای حالت  $h/p=0.75$  و  $h/Lr=0.375$  برای سرریزهای BCW-DR-HC و BCW-UR-HC

Fig. 6. Comparison between experimental and numerical methods of water surface profile over broad-crested weir (a and b). Water surface profile, velocity contour, streamlines, velocity vector and properties of critical section for state  $h/Lr=0.375$ ,  $h/p=0.75$ : (a) BCW-UR-HC, and (b) BCW-DR-HC

وجه بالادست سرریز لبه‌پهن استاندارد ( $BCW$ ) تاثیر مثبتی در افزایش ظرفیت انتقال جریان دارد. همچنین نتایج نشان داد که برای  $\beta_1 \geq 75/96$  رفتار سرریز  $BCW-UR-HC$  بسیار مشابه به سرریز  $BCW$  می‌باشد. همچنین همانطور که از شکل ۷-ب مشاهده می‌گردد، مقدار  $C_d$  در سرریز  $BCW-DR-HC$  به مقدار  $C_d$  سرریز  $BCW$  بسیار نزدیک می‌باشد و این نشان می‌دهد که شیب‌دار کردن وجه پایین‌دست تاثیر بسیار زیادی در افزایش ضریب دبی جریان نخواهد داشت.

در شکل ۸ (الف و ب) به مقایسه رابطه دبی-اشل برای دو سرریز  $BCW-UR-HC$  و  $BCW-DR-HC$  با سرریز  $BCW$  در شرایط معین پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در سرریز  $BCW-DR-HC$  رابطه دبی-اشل به رابطه دبی-اشل سرریز  $BCW$  بسیار نزدیک می‌باشد. این در حالی است که رابطه دبی-اشل در سرریز  $BCW-UR-HC$  با افزایش زاویه شیب بالادست ( $\beta_1$ ) از رابطه دبی-اشل سرریز  $BCW$  خصوصا در بارهای آبی بالاتر فاصله می‌گیرد و این نشان می‌دهد که شیب‌دار کردن وجه بالادست نسبت به شیب‌دار کردن وجه پایین‌دست، نرخ انتقال جریان را برای شرایط یکسان هیدرولیکی بیشتر افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، روابط رگرسیونی چندگانه غیرخطی با دقت بالاتر برای تعیین ضریب دبی جریان در سرریزهای  $BCW-UR-HC$  و  $BCW-DR-HC$  با استفاده از نرم‌افزار  $SPSS$  استخراج و معرفی گردید (جدول ۲).

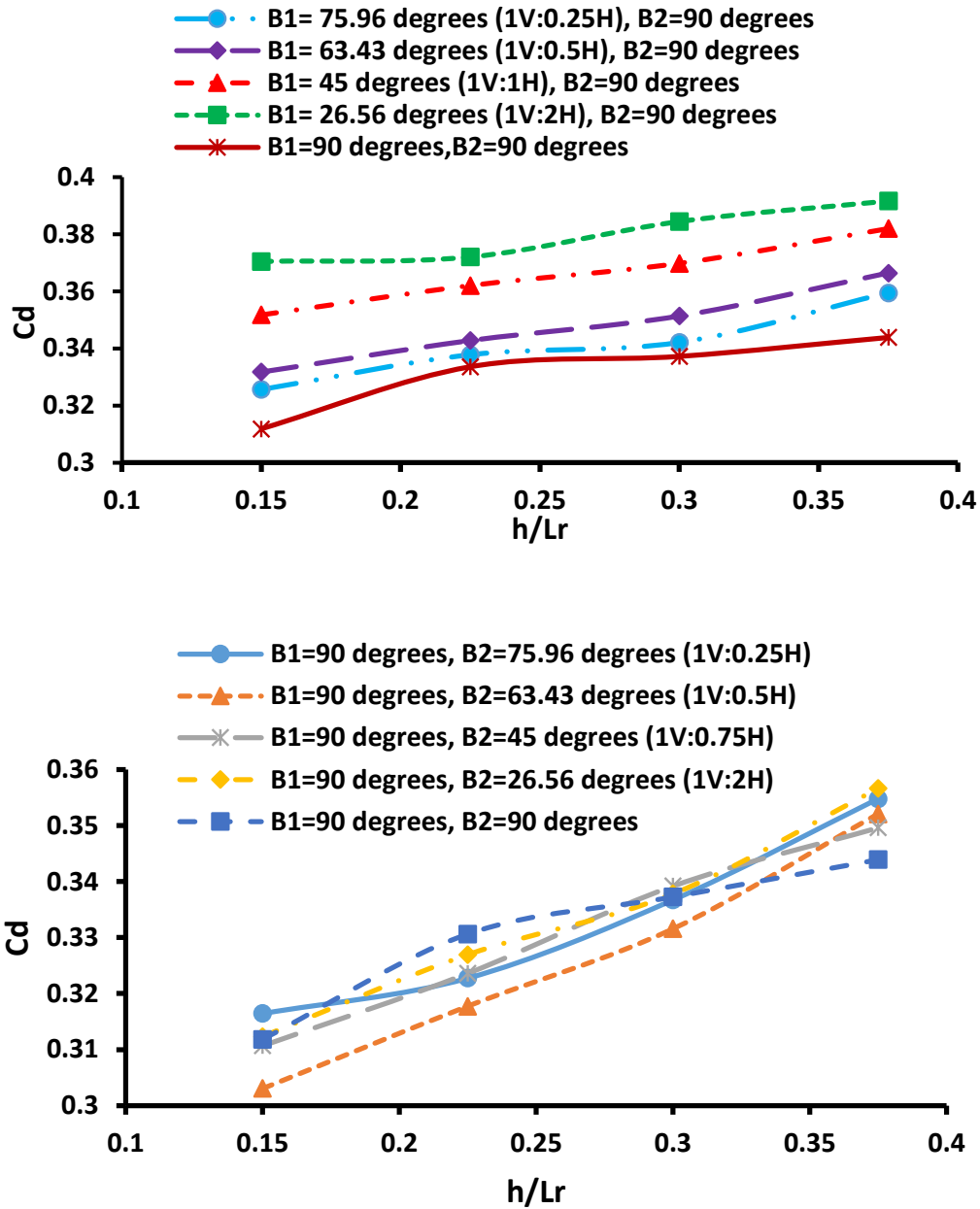
- در رابطه های رگرسیونی  $\beta_1$  و  $\beta_2$  بر حسب رادیان می‌باشد. در جدول ۳ به مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با تحقیقات انجام گرفته توسط سارجیسون و پرسی [۴]، عظیمی و همکاران [۱۱] و ایسوگل و مصطفی [۲۴] پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد نتایج شبیه‌سازی عددی و رابطه رگرسیونی استخراجی (رابطه ۱۰) در تحقیق حاضر به نتایج روش ارائه شده توسط سارجیسون و پرسی [۴] بسیار نزدیک بوده و این درحالی است که روش ارائه شده توسط عظیمی و همکاران [۱۱] و ایسوگل و مصطفی [۲۴] مقادیر بالاتری را نسبت به مقادیر تحقیق حاضر برای شرایط مشابه به دست داده‌اند. لازم به ذکر است اختلاف در مقادیر مشاهده شده به همبستگی بین پارامترها و میزان دقت روابط پیشنهادی محققان فوق‌الذکر مرتبط می‌باشد که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای شرایط مورد نظر پیشنهاد داده شده‌اند.

$HC$ ، جریان بعد از جدا شدن از انتهای گوشه تاج به صورت یک جت به کف کانال انتقال می‌یابد و چنین شرایطی باعث ایجاد جریان دو فاز آب و هوا بلافاصله بعد از سرریز می‌گردد. لازم به ذکر است این شرایط در جریان‌های با بار آبی بالاتر بیشتر نمایان می‌گردد (در شرایط با بار آبی کم جریان در تماس با دیواره قائم پایین‌دست سرریز به کف کانال منتقل می‌گردد). این در حالی است که در سرریز  $BCW-UR-HC$  این شرایط حاکم نبوده و جریان بعد از عبور از روی تاج و شیب وجه پایین‌دست به کف کانال پایین‌دست منتقل می‌گردد و همانطور که مشاهده می‌گردد وجود شیب وجه پایین‌دست باعث حذف ناحیه جریان دو فاز آب و هوا، حذف جریان‌های برگشتی و چرخشی و حذف نوسانات سطح آب در کانال پایین‌دست شده است (شکل ۶-ب).

با مقایسه بردارهای سرعت جریان در این دو سرریز مشاهده گردید که اندازه بردارهای سرعت از بالادست به پایین‌دست بزرگتر شده و این نشان دهنده افزایش سرعت جریان می‌باشد که برای شرایط فوق‌الذکر مقدار سرعت جریان از نزدیکی‌های صفر در بالادست به حداکثر مقدار خود یعنی ۲/۵ متر بر ثانیه در کف کانال پایین‌دست تغییر می‌کند. با مقایسه مسیر خطوط جریان برای دو سرریز نیز مشاهده گردید که در سرریزهای  $BCW-DR-HC$  همانند سرریز  $BCW$  هنوز ناحیه جدایی جریان وجود دارد، این در حالی است که برای سرریز  $BCW-UR-HC$ ، ابعاد ناحیه جدایی جریان به دلیل اضافه شدن شیب وجه بالادست، کاهش پیدا کرده و این عامل باعث افزایش ضریب دبی جریان و به تبع آن باعث افزایش مقدار دبی جریان عبوری از روی سرریز شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد برای شرایط یکسان، مقدار دبی در واحد عرض جریان، عمق بحرانی و محل ایجاد مقطع کنترل بحرانی از لبه بالادست تاج در سرریز  $BCW-UR-HC$  به ترتیب  $98/30$  لیتر بر ثانیه،  $9/90$  سانتی‌متر و  $19$  سانتی‌متر و این مقادیر برای سرریز  $BCW-DR-HC$  به ترتیب  $89$  لیتر بر ثانیه،  $9/31$  سانتی‌متر و  $13/30$  سانتی‌متر به دست آمده است.

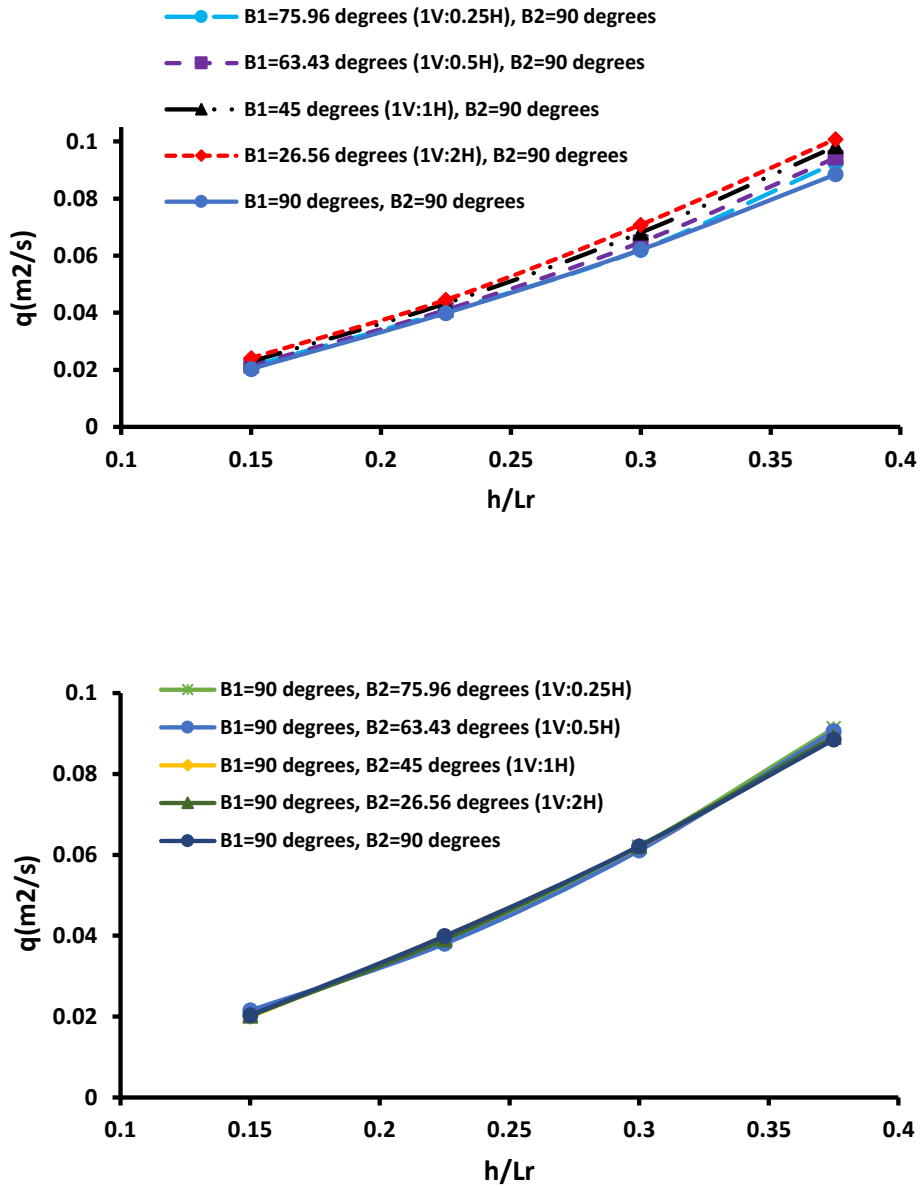
شکل ۷ (الف و ب) تغییرات ضریب دبی جریان ( $C_d$ ) در برابر  $h / L_r$  برای سرریزهای  $BCW-UR-HC$  و  $BCW-DR-HC$  در شرایطی که  $0/75 \leq h / P \leq 0/3$  نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۷-الف مشاهده می‌گردد با ملایم‌تر شدن شیب وجه بالادست (یعنی کاهش  $\beta_1$ ) مقدار  $C_d$  افزایش می‌یابد. بنابراین اضافه شدن قسمت شیب‌دار به





شکل ۷. تغییرات Cd در مقابل h/Lr برای حالتی که  $0.30 \leq h/p \leq 0.75$  (الف) BCW-UR-HC و (ب) BCW-UR-HC

Fig. 7 .(a and b). Variation of Cd versus h/Lr in such a way that  $0.30 \leq h/p \leq 0.75$   
 a) For the BCW-UR-HC, and b) For the BCW-DR-HC



شکل ۸. تغییرات  $q$  در مقابل  $h/Lr$  برای حالتی که  $0.30 \leq h/p \leq 0.75$  (الف) BCW-UR-HC و (ب) BCW-DR-HC

Fig. 8 . (a and b). Variation of  $q$  versus  $h/Lr$  in such a way that  $0.30 \leq h/p \leq 0.75$   
 a) For the BCW-UR-HC, and b) For the BCW-DR-HC

جدول ۲. روابط رگرسیونی غیر خطی چندگانه برای ضریب دبی سرریزهای BCW-UR-HC و BCW-DR-HC

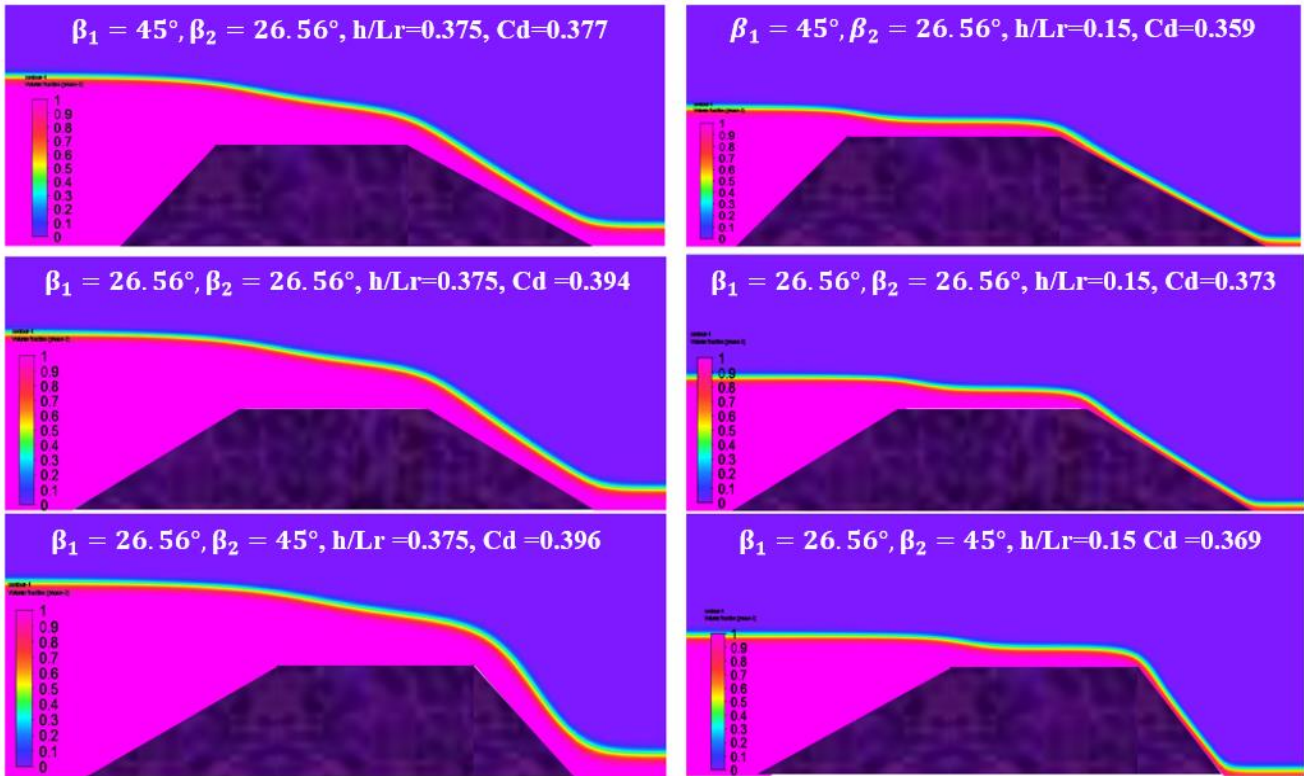
Table 2. Multiple nonlinear regression equation for Cd of the BCW-UR-HC and BCW-DR-HC

No.	Equation	R <sup>2</sup>	RMSE	RE%
(۱۰)	$C_{d(BCW-UR-HC)} = 0.392 \times \left(\frac{h}{L_r}\right)^{0.068} \times \left(\frac{h}{P}\right)^{0.018} \times (\beta_1)^{-0.105}$	۰/۹۳۱	۰/۰۰۵۱	۱/۲۳
(۱۱)	$C_{d(BCW-DR-HC)} = 0.390 \times \left(\frac{h}{L_r}\right)^{0.120} \times \left(\frac{h}{P}\right)^{0.001} \times (\beta_2)^{0.001}$	۰/۹۲۸	۰/۰۰۴	۰/۸۷

جدول ۳. مقایسه ضریب دبی جریان حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در سرریز BCW-UR-HC

Table 3. Comparison of the Cd of numerical and experimental model for the BCW-UR-HC

$\beta_1$ (degrees)	h/Lr	h/p	C <sub>d</sub> (CFD)	C <sub>d</sub> (Eq. 11)	C <sub>d</sub> Sargison and Percy equation (2009)	C <sub>d</sub> (Azimi et al. 2013)	C <sub>d</sub> Aysegul and Mustafa (2016)
۷۵/۹۶	۰/۱۵	۰/۳	۰/۳۲۶	۰/۳۲۷	۰/۳۲۲	۰/۳۹۲	۰/۳۵۱
۷۵/۹۶	۰/۲۲۵	۰/۴۵	۰/۳۳۸	۰/۳۳۹	۰/۳۲۶	۰/۴۱۲	۰/۳۵۴
۷۵/۹۶	۰/۳	۰/۶	۰/۳۳۷	۰/۳۴۷	۰/۳۳۰	۰/۴۳۰	۰/۳۵۸
۷۵/۹۶	۰/۳۷۵	۰/۷۵	۰/۳۵۹	۰/۳۵۴	۰/۳۳۴	۰/۴۴۶	۰/۳۶۳
۶۳/۴۳	۰/۱۵	۰/۳	۰/۳۳۲	۰/۳۳۴	۰/۳۳۱	۰/۳۸۸	۰/۳۶۴
۶۳/۴۳	۰/۲۲۵	۰/۴۵	۰/۳۴۳	۰/۳۴۵	۰/۳۴۴	۰/۴۰۸	۰/۳۶۷
۶۳/۴۳	۰/۳	۰/۶	۰/۳۵۱	۰/۳۵۴	۰/۳۳۸	۰/۴۲۶	۰/۳۷۲
۶۳/۴۳	۰/۳۷۵	۰/۷۵	۰/۳۶۶	۰/۳۶۱	۰/۳۴۳	۰/۴۴۱	۰/۳۷۶
۴۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۳۵۲	۰/۳۴۶	۰/۳۴۴	۰/۳۸۱	۰/۳۸۹
۴۵	۰/۲۲۵	۰/۴۵	۰/۳۶۲	۰/۳۵۸	۰/۳۴۷	۰/۴۰۱	۰/۳۹۳
۴۵	۰/۳	۰/۶	۰/۳۷۰	۰/۳۶۷	۰/۳۵۱	۰/۴۱۸	۰/۳۹۷
۴۵	۰/۳۷۵	۰/۷۵	۰/۳۸۲	۰/۳۷۴	۰/۳۵۶	۰/۴۳۳	۰/۴۰۲
۲۶/۵۶	۰/۱۵	۰/۳	۰/۳۷۱	۰/۳۶۶	۰/۳۵۶	۰/۳۷۰	۰/۴۲۸
۲۶/۵۶	۰/۲۲۵	۰/۴۵	۰/۳۷۲	۰/۳۷۸	۰/۳۶۰	۰/۳۸۹	۰/۴۳۱
۲۶/۵۶	۰/۳	۰/۶	۰/۳۸۵	۰/۳۸۸	۰/۳۶۴	۰/۴۰۶	۰/۴۳۵
۲۶/۵۶	۰/۳۷۵	۰/۷۵	۰/۳۹۲	۰/۳۹۵	۰/۳۶۹	۰/۴۲۱	۰/۴۴۰



شکل ۹. تغییرات پروفیل سطح آب در سرریز BCW-UDR-HC

Fig. 9. Variation of water surface profile for the BCW-UDR-HC

تغییرات قابل توجهی در مقدار ضریب دبی مشاهده نمی‌گردد و بنابراین تغییر در شیب پایین دست اثر قابل توجهی در افزایش ظرفیت انتقال جریان نخواهد داشت. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، روابط رگرسیونی چندگانه غیرخطی با دقت بالاتر برای تعیین ضریب دبی جریان در سرریز BCW-UDR-HC با استفاده از نرم‌افزار SPSS استخراج و معرفی گردید (جدول ۴).

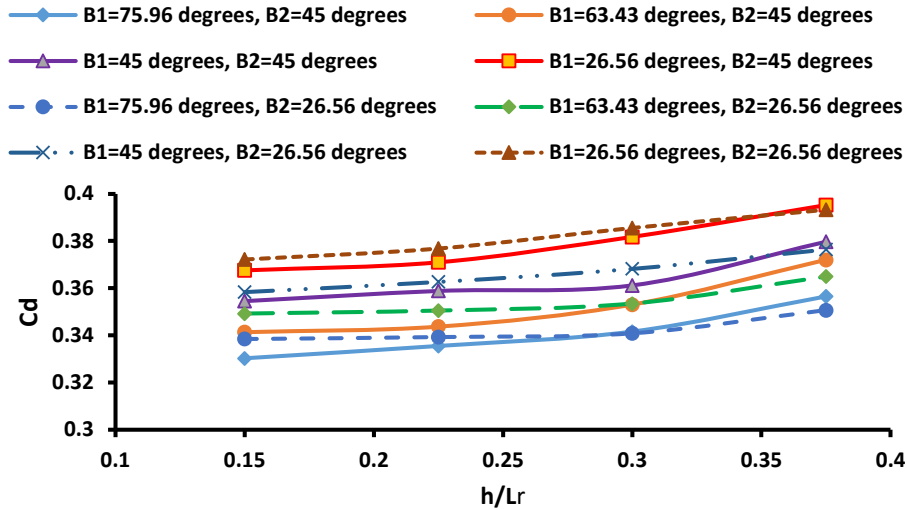
در شکل ۱۱ پروفیل سطح آب در شرایطی که  $\beta_1 = \beta_2 = 26/56$  برای دو حالت  $\theta = \mp 9/46$  و  $\theta = \mp 4/76$  بعد از شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده گردید، در سرریز BCW-UDR-PSC تغییرات تراز پروفیل سطح آب قابل توجه‌تر از سرریز BCW-UDR-NSC می‌باشد. همچنین در شرایطی که  $\beta_1 = \beta_2 = 26/56$  تقریباً ۴ الی ۷/۵ درصد بزرگتر از سرریز BCW-UDR-PSC به ترتیب برای  $\theta = \mp 9/46$  و  $\theta = \mp 4/76$  می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌گردد که شیب

۲-۳ بررسی خصوصیات هیدرولیکی در سرریز لبه پهن با شیب وجه بالادست و پایین دست با تاج افقی و شیب‌دار

در شکل ۹ پروفیل سطح آب برای سه حالت  $\beta_1 > \beta_2$ ،  $\beta_1 = \beta_2$  و  $\beta_1 < \beta_2$  برای سرریز BCW-UDR-HC در شرایطی که  $h/Lr = 0/375$  و  $h/Lr = 0/375$  باشد، بعد از شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در این نوع سرریزها با کاهش شیب وجه بالادست انحنای پروفیل سطح جریان در ورودی تاج سرریز کاهش می‌یابد و در زاویه‌های  $\beta_1 = 26/56$  و  $\beta_1 = 75/96$  درجه به ترتیب کمترین و بیشترین انحنای جریان در پروفیل سطح آب اتفاق می‌افتد.

در شکل ۱۰ تغییرات ضریب دبی جریان در سرریز BCW-UDR-HC به ازای  $h/Lr$  برای مقادیر مختلفی از  $\beta_1$  و  $\beta_2$  نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در این نوع سرریزها با افزایش زاویه شیب بالادست ( $\beta_1$ )، ضریب دبی جریان برای یک شیب وجه پایین دست ثابت ( $\beta_2$ )، کاهش پیدا می‌کند. همچنین همانطور که مشاهده می‌گردد در این نوع سرریزها با افزایش شیب وجه پایین دست از ۴۵ به ۶۳/۴۳ درجه،





شکل ۱۰. تغییرات Cd در مقابل h/Lr برای سرریز BCW-UDR-HC

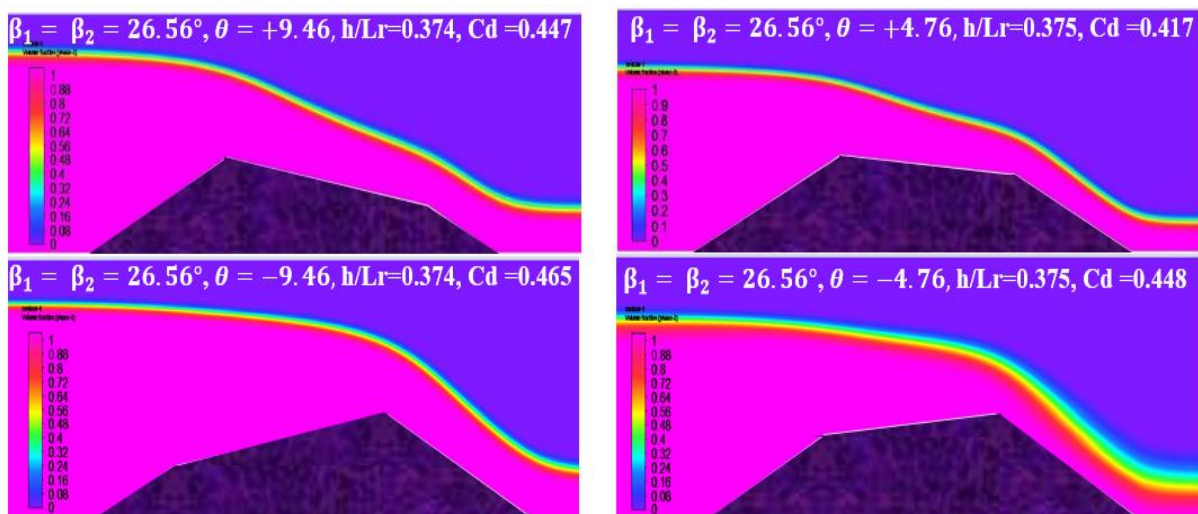
Fig. 10. Variation of Cd versus h/Lr for the BCW-UDR-HC

جدول ۴. رابطه رگرسیونی غیر خطی چندگانه برای ضریب دبی سرریز BCW-UDR-HC

Table 4. Multiple nonlinear regression equation for Cd of the BCW-UDR-HC

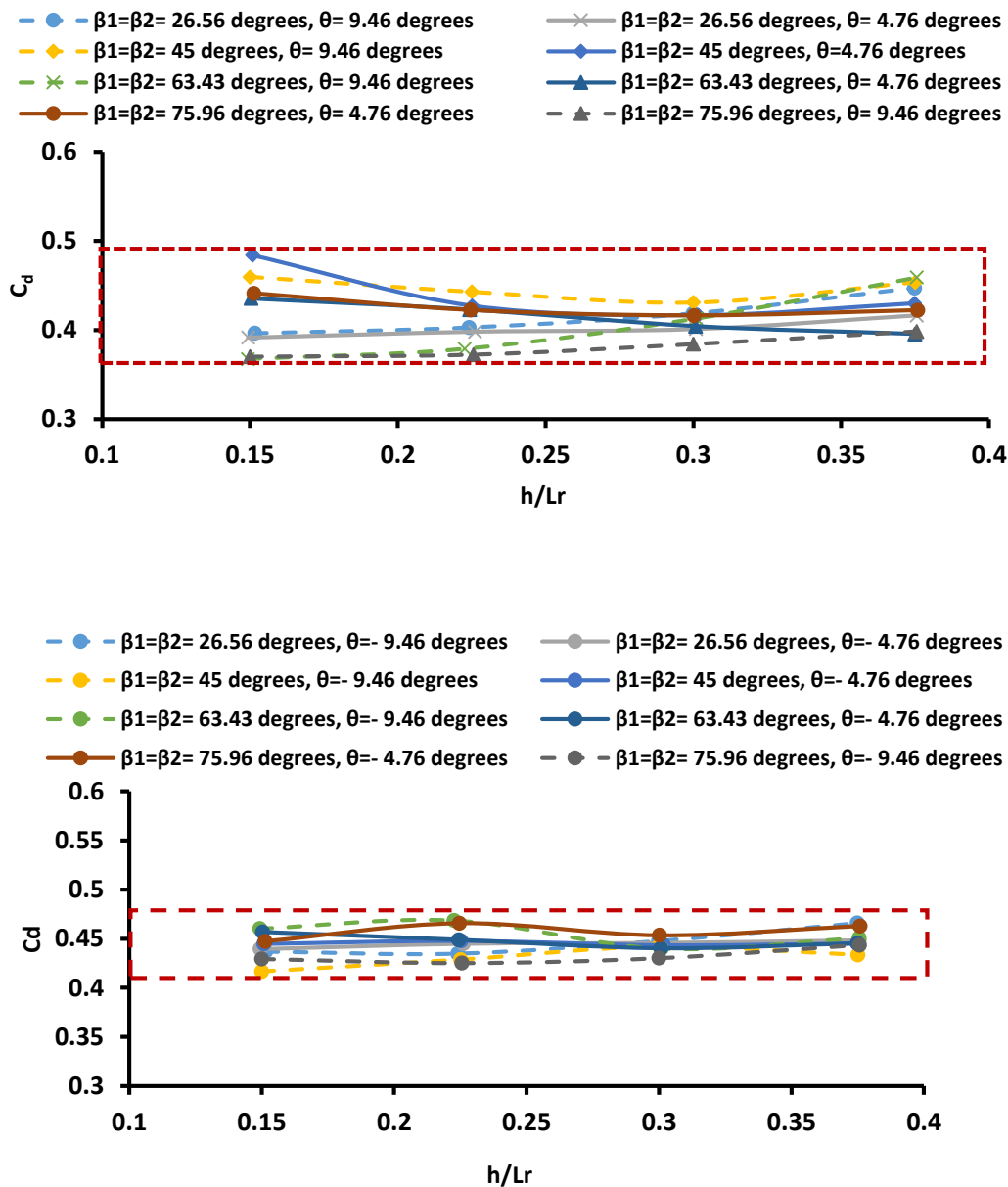
No.	Equation	R <sup>2</sup>	RMSE	RE%
(۱۲)	$C_{d(BCW-UDR-HC)} = 0.352 \times \left(\frac{h}{L_r}\right)^{-0.076} \times \left(\frac{h}{P}\right)^{0.143} \times (\beta_1)^{-0.092} \times (\beta_2)^{-0.012}$	۰/۹۰	۰/۰۰۶	۲/۰

در رابطه های رگرسیونی  $\beta_1$  و  $\beta_2$  بر حسب رادیان می باشد.



شکل ۱۱. تغییرات پروفیل سطح آب در سرریز BCW-UDR-PSC و BCW-UDR-NSC

Fig. 11. Variations of water surface profile for BCW-UDR-PSC and BCW-UDR-NSC



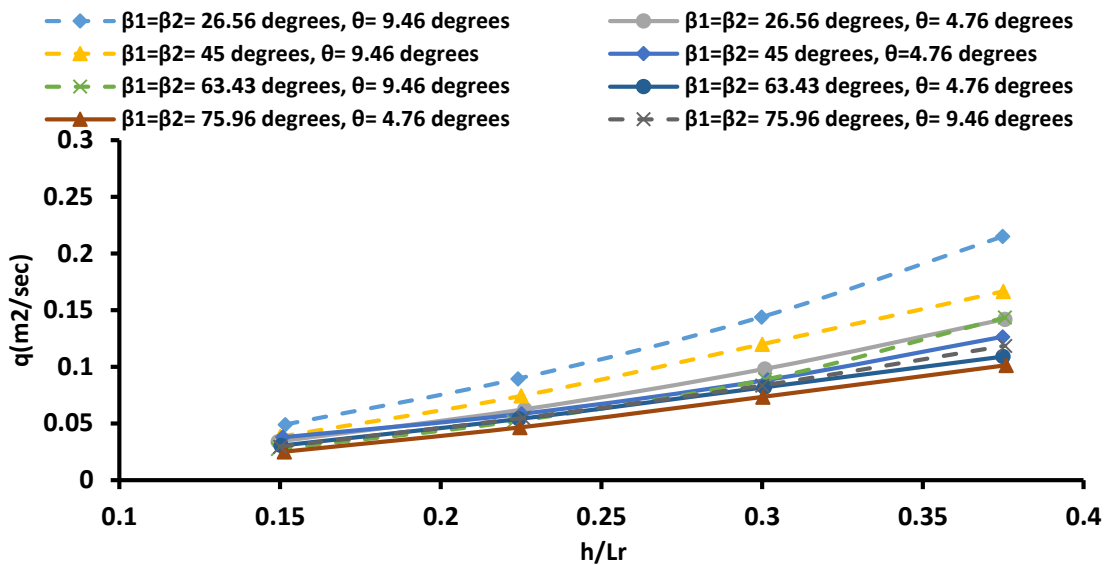
شکل ۱۲. الف و ب: تغییرات  $C_d$  در مقابل  $h/Lr$  الف: سرریز BCW-UDR-PSC و ب: BCW-UDR-NSC

Fig. 12. (a and b). Variation of  $C_d$  versus  $h/Lr$  a) For the BCW-UDR-PSC, and b) For the BCW-UDR-NSC

سرریز  $BCW-UDR-PSC$  در محدوده بین  $0.35$  تا  $0.47$  می‌باشد، این درحالی هست که این تغییرات برای سرریز  $BCW-UDR-NSC$  در محدوده بین  $0.42$  تا  $0.48$  می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد محدوده تغییرات ضریب دبی در سرریز  $BCW-UDR-PSC$  بزرگتر از سرریز  $BCW-UDR-NSC$  می‌باشد و این نشان می‌دهد که سرریز  $BCW-UDR-NSC$  ضریب دبی تقریباً ثابت‌تری دارند. در شکل ۱۳ نیز تغییرات

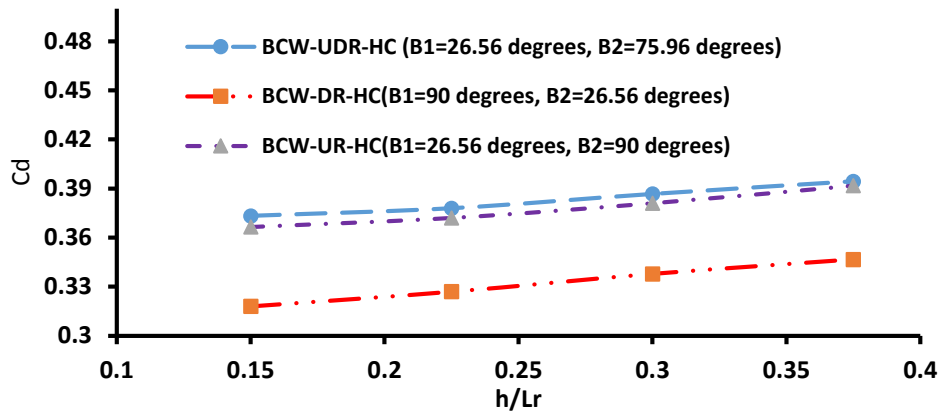
منفی نسبت به شیب مثبت برای تاج سرریز تاثیر بیشتری در افزایش ضریب دبی جریان داشته است. عامل این افزایش همگرایی جریان در اثر بالا رفتن تاج و کاهش فشار هیدرو استاتیک در تاج سرریز می‌باشد.

در شکل ۱۲ (الف و ب) به ترتیب تغییرات  $C_d$  به ازای  $h/Lr$  در سرریز  $BCW-UDR-PSC$  و  $BCW-UDR-NSC$  نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تغییرات ضریب دبی جریان برای



شکل ۱۳. تغییرات  $q$  در مقابل  $h/Lr$  برای سرریز BCW-UDR-PSC در شرایطی که  $0.30 \leq h/p \leq 0.75$

Fig. 13. Variation of  $q$  versus  $h/Lr$  for the BCW-UDR-PSC in such a way that  $0.30 \leq h/p \leq 0.75$

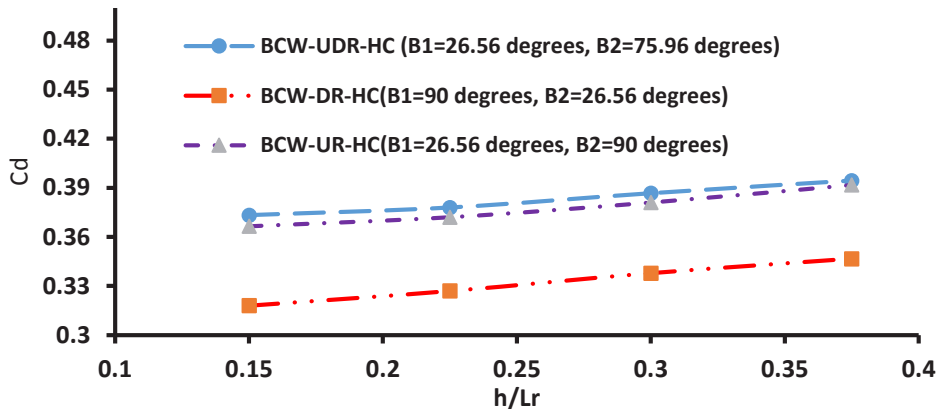


شکل ۱۴. مقایسه ضریب دبی جریان در سرریزهای BCW-UDR-HC، BCW-UR-HC، BCW-DR-HC

Fig. 14. Comparison of  $C_d$  the BCW-UR-HC, BCW-DR-HC, and BCW-UDR-HC

۳-۳- مقایسه سرریزهای لبه پهن مورد مطالعه در تحقیق حاضر در شکل ۱۴ به مقایسه  $C_d$  در سرریزهای BCW-UR-HC، BCW-DR-HC، BCW-UDR-HC پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد به ازای یک  $h/Lr$  معین، ضریب دبی در سرریزهای

دبی - اشل برای سرریز BCW-UDR-PSC نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، افزایش مقدار دبی جریان به ازای شرایط یکسان افزایش بار آبی در سرریزهای با BCW-UDR-PSC در شیب تندتر ( $\theta = +9/46$ ) بیشتر از شیب ملایم‌تر ( $\theta = +4/76$ ) می‌باشد.



شکل ۱۵. مقایسه ضریب دبی جریان سرریزهای BCW-UDR-HC، BCW-UDR-PSC و BCW-UDR-NSC

Fig. 15. Comparison of Cd the BCW-UDR-HC, BCW-UDR-PSC and BCW-UDR-NSC

نیم ساز ۴۵ درجه (خط نیم‌ساز) واقع شده‌اند و این نشان می‌دهد که سرریز با تاج شیب‌دار منفی، ضریب دبی بالاتری نسبت به سرریز با تاج شیب‌دار مثبت داشته است. مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط افزایش در مقدار ضریب دبی جریان در سرریز BCW-UDR-NSC نسبت به سرریز BCW-UDR-PSC به ترتیب ۲، ۱۵ و ۸ درصد می‌باشد. همچنین متوسط افزایش ضریب دبی در سرریز BCW-UDR-NSC نسبت به سرریز BCW-UDR-HC در شرایطی که  $\theta = -4/76$  و  $\theta = -9/46$  باشد، به ترتیب ۱۸ و ۲۵ درصد می‌باشد در حالی که همین افزایش در ضریب دبی در سرریز BCW-UDR-PSC نسبت به سرریز BCW-UDR-HC در شرایطی که  $\theta = -4/76$  و  $\theta = -9/46$  باشد، به ترتیب ۱۰ و ۱۸ درصد می‌باشد (جدول ۵).

#### ۴- نتیجه‌گیری کلی

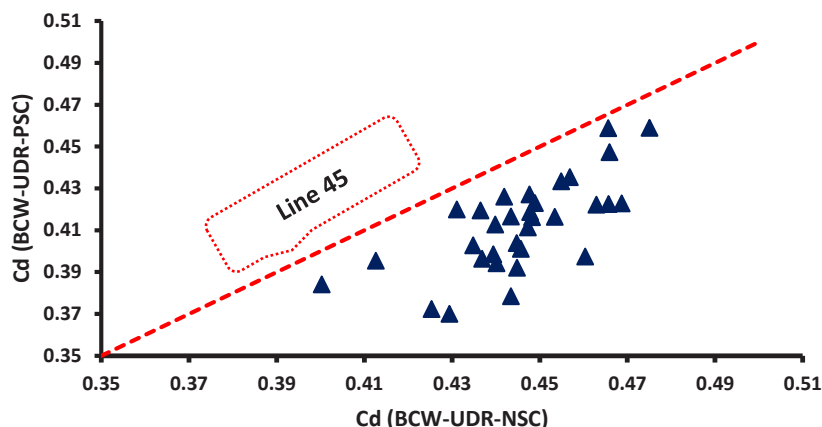
در این تحقیق خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی سرریز لبه‌پهن با ترکیب‌بندی مختلفی از شیب وجه بالادست و پایین دست در حالت با و بدون شیب تاج با استفاده از روش حجم محدود (FVM) با بکارگیری نرم‌افزار ANSYS FLUENT مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی عددی جریان و پروفیل سطح آب با روش حجم سیال (VOF) با استفاده از چندین مدل آشفتگی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج این ارزیابی با داده‌های آزمایشگاهی

BCW-UDR-HC و BCW-UR-HC به هم نزدیک بوده و ضریب دبی در سرریز BCW-UDR-HC کمی بیشتر از ضریب دبی سرریز BCW-UR-HC می‌باشد. ضریب دبی در سرریز BCW-DR-HC خیلی پایین‌تر از ضریب دبی سرریزهای BCW-UDR-HC و BCW-UR-HC می‌باشد و این به خاطر وجود ناحیه جدایی جریان در ورودی تاج سرریز می‌باشد که با فشردگی جریان در ورودی سرریز باعث کاهش ضریب دبی جریان می‌گردد.

در شکل ۱۵ نیز به مقایسه تغییرات  $C_d$  در برابر  $h/Lr$  در سرریزهای BCW-UDR-NSC، BCW-UDR-HC و BCW-UDR-PSC پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، شیب‌دار کردن تاج سرریز تاثیر مثبتی در افزایش ضریب دبی جریان دارد و ضریب دبی جریان در سرریزهای با تاج شیب‌دار (شیب مثبت و منفی) بیشتر از سرریز با تاج افقی (بدون شیب) می‌باشد. لازم به ذکر است که این افزایش در ضریب دبی جریان در سرریزهای با تاج شیب منفی (BCW-UDR-NSC) بیشتر از سرریزهای با تاج شیب مثبت (BCW-UDR-PSC) می‌باشد.

نمودار پراکنندگی ضریب دبی جریان برای دو سرریز با تاج شیب‌دار یعنی سرریز BCW-UDR-NSC و BCW-UDR-PSC در شکل ۱۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد همه داده‌ها در زیر خط





شکل ۱۶. نمودار پراکندگی ضریب دبی جریان برای دو سرریز BCW-UDR-NSC و BCW-UDR-PSC

Fig. 16. The scatter plot of Cd for two weirs the BCW-UDR-NSC and BCW-UDR-PSC

جدول ۵. مقایسه ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه‌پهن با تاج شیب دار و افقی

Table 5. Comparison of Cd in broad-crested weirs with sloped and horizontal crest

		$\theta$ (degree)				
		-۹/۴۶ (۱V: -۶H)	-۴/۷۶ (۱V: -۱۲H)	۹/۴۶ (۱V: ۶H)	۴/۷۶ (۱V: ۱۲H)	
$\beta_1 = \beta_2$	$h/Lr$	BCW-UDR-HC	BCW-UDR-NSC	BCW-UDR-NSC	BCW-UDR-PSC	BCW-UDR-PSC
۲۶/۵۶	۰/۱۵	-/۳۷۳	-/۴۳۹	۰/۴۳۷	-/۳۹۶	-/۳۹۸
۲۶/۵۶	۰/۲۲۵	-/۳۷۸	-/۴۴۶	۰/۴۳۴	-/۴۰۳	-/۳۹۲
۲۶/۵۶	۰/۳۰	-/۳۸۷	-/۴۴۸	/۴۴۶	-/۴۱۹	-/۴۰۱
۲۶/۵۶	۰/۳۷۵	-/۳۹۴	-/۴۶۶	۰/۴۴۸	-/۴۴۷	-/۴۱۶
۴۵	۰/۱۵	-/۳۵۵	-/۴۴۵	۰/۴۳۶	-/۴۲۰	-/۴۰۴
۴۵	۰/۲۲۵	-/۳۵۸	-/۴۶۹	۰/۴۴۸	-/۴۲۷	-/۴۲۳
۴۵	۰/۳۰	-/۳۵۸	-/۴۴۳	۰/۴۴۲	-/۴۲۶	-/۴۱۷
۴۵	۰/۳۷۵	-/۳۸۱	-/۴۵۵	۰/۴۳۱	-/۴۲۳	-/۴۲۰
۶۳/۴۳	۰/۱۵	-/۳۴۸	-/۴۶۰	۰/۴۵۷	-/۴۳۵	-/۳۹۷
۶۳/۴۳	۰/۲۲۵	-/۳۴۲	-/۴۶۶	۰/۴۴۹	-/۴۵۹	-/۴۲۳
۶۳/۴۳	۰/۳۰	-/۳۵۰	-/۴۴۰	۰/۴۴۰	-/۴۱۳	-/۳۹۴
۶۳/۴۳	۰/۳۷۵	-/۳۶۵	-/۴۷۵	۰/۴۱۳	-/۴۵۹	-/۳۹۶
۷۵/۹۶	۰/۱۵	-/۳۳۱	-/۴۴۷	۰/۴۲۹	-/۴۱۱	-/۳۷۰
۷۵/۹۶	۰/۲۲۵	-/۳۳۵	-/۴۶۶	۰/۴۲۵	-/۴۲۳	-/۳۷۲
۷۵/۹۶	۰/۳۰	-/۳۴۵	-/۴۵۳	۰/۴۰۰	-/۴۱۶	-/۳۸۴
۷۵/۹۶	۰/۳۷۵	-/۳۵۹	-/۴۶۳	۰/۴۴۳	-/۴۲۲	-/۳۷۸

## ۵- فهرست علائم

- $h$ : ارتفاع آب در بالای تاج سرریز،  $m$   
 $h_0$ : انرژی آب در بالای تاج سرریز،  $m$   
 $L_r$ : طول تاج سرریز،  $m$   
 $P$ : ارتفاع سرریز،  $m$   
 $g$ : شتاب گرانش،  $m/s^2$   
 $Q$ : دبی جریان عبوری از روی تاج سرریز،  $m^3/s$   
 $q$ : دبی در واحد عرض جریان عبوری از روی تاج سرریز،  $m^3/s$   
 $C_d$ : ضریب دبی جریان، -  
 $B$ : عرض فلوم،  $m$   
 $Xc$ : فاصله محل تشکیل عمق بحرانی از ابتدای تاج سرریز،  $m$   
 $Yc$ : عمق بحرانی روی تاج سرریز،  $m$   
 $\beta_1$ : زاویه شیب وجه بالادست  
 $\beta_2$ : زاویه شیب وجه پایین دست  
 $\theta$ : زاویه شیب تاج سرریز

## منابع

- [1] [1] N.S.G. Rao, D. Muralidhar, Discharge characteristics of weirs of finite-crest width, *Houille Blanche*, 18(5) (1963) 537 – 545.  
 [2] E. Goodarzi, J. Farhoudi, N. Shokri, Flow characteristics of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 60(2) (2012) 100-187.  
 [3] J. Farhoudi, H.S. Alami, Slope effect on discharge efficiency in rectangular broad crested weir with sloped upstream face, *Int. J. Civ. Eng.*, 3 (2005) 58–65.  
 [4] J.E. Sargison, A. Percy, Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(1) (2009) 115-118.  
 [5] A. Abbaspour, M. Abdolahpour, F. Salmasi, Numerical Simulation of Flow over Rectangular Broad-crested Weir with Upstream and Downstream Side Slopes Using

نشان داد که در مدل سازی عددی سرریزهای لبه پهن، مدل آشفتگی  $k$ - $(RNG)$  از دقت بالایی برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد که ضریب دبی جریان در سرریز  $BCW-UR-HC$  و  $BCW-UDR-HC$  بسیار به هم نزدیک می باشد به طوری که ضریب دبی در سرریز  $BCW-UDR-HC$  کمی بیشتر از سرریز  $BCW-UR-HC$  می باشد. همچنین نتایج نشان داد که سرریزهای  $BCW-UDR-PSC$  و  $BCW-UDR-NSC$  ضریب دبی بالاتری از سرریز  $BCW-UDR-HC$  را دارا می باشند. همچنین نتایج نشان داد که برای سرریز  $BCW-UDR-PSC$  ضریب دبی در محدوده  $0.35-0.47$  و برای سرریز  $BCW-UDR-PSC$  ضریب دبی در محدوده  $0.42-0.48$  می باشد. این نشان می دهد که شیب دار کردن تاج تاثیر مثبتی در افزایش ضریب دبی جریان دارد به طوری که این افزایش در سرریزهای با تاج شیب منفی بیشتر هم می باشد. همچنین معین گردید که در سرریز  $BCW-UDR-NSC$  با افزایش شیب تاج (یا کاهش  $\theta$ )، ضریب دبی جریان افزایش می یابد. ضمناً در سرریز  $BCW-UDR-PSC$  ضریب دبی جریان با افزایش شیب تاج (یا افزایش  $\theta$ ) بیشتر می گردد. بعد از شبیه سازی عددی و استخراج داده ها، روابط رگرسیونی چندگانه غیرخطی با دقت مناسب برای محاسبه ضریب دبی جریان معرفی گردید و این روابط با نتایج تحقیقات قبلی مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داده شد که این روابط از دقت بالایی در برآورد ضریب دبی سرریزهای لبه پهن حقیقی برخوردار می باشند.

این بررسی برای شرایط جریان آزاد (غیر مستغرق) برای محدوده سرریزهای لبه پهن حقیقی  $(1/0 < h / L_r \leq 4/0)$  صورت گرفت. پیشنهاد می گردد در تحقیقات آینده خصوصیات هیدرولیکی جریان مورد بررسی در تحقیق حاضر از جمله پروفیل سطح آب، ضریب دبی جریان و رابطه دبی- اشل به همراه سایر خصوصیات از جمله پروفیل توزیع سرعت، توزیع فشار، موقعیت مقطع کنترل و ... در سرریزهای لبه پهن با ترکیب بندی مختلفی از شیب وجه بالادست و پایین دست و همچنین تاج با شیب منفی و مثبت برای سایر سرریزهای لبه پهن تاج محدود همچون سرریز لبه پهن طولانی  $(h / L_r \leq 1/0)$  و سرریز لبه پهن کوتاه  $(4/0 < h / L_r \leq 2)$  نیز به صورت آزمایشگاهی یا روش عددی مورد بررسی قرار گیرد.

- [15] 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, *Appl Water Sci*, 12(110) (2022).
- [16] Y.T. Zerihun, Free flow and discharge characteristics of trapezoidal-shaped weirs *Fluids*, 5(4) (2020).
- [17] B. Nourani, H. Arvanaghi, F. Salmasi, A novel approach for estimation of discharge coefficient in broad-crested weirs based on Harris Hawks Optimization algorithm *Flow Measurement and Instrumentation*, 79(101916) (2021).
- [18] F. Salmasi, F. Nahrain, A.T. Aghdam, Prediction of discharge coefficients for broad-crested weirs using expert systems, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 4435-4458 (In Persian).
- [19] W.H. Hager, M. Schwalt, Broad-crested weir, *J. Irrigation and Drainage. Eng*, 120:1(13) (1994) 13–26.
- [20] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39 (1981) 201–225.
- [21] A. Bayon, D. Valero, Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump, *Environ. Model. Softw.*, 80 (2016) 322-335.
- [22] J.P. Toro, F. Bombardelli, J. Paik, Detached eddy simulation of the no narrated skimming flow over a stepped spillway, *J. Hydraul. Eng.*, 143 (2017).
- [23] B. Nourani, F. Salmasi, H. Arvanaghi, F. Rezaei, Undular flow conditions and discharge coefficients in rectangular broad-crested weirs, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 125-140 (In Persian).
- [24] O.A. Aysegul, D. Mustafa, Experimental investigation of the approach angle effect on the discharge efficiency for broad-crested weirs, *Sci. Technol*, 17. (2016) (279–286)
- Fluent Model, *Water and soil science*, 23(4) (2013) 266-276 (In Persian).
- [6] O. Simsek, M.S. Akoz, N.G. Soydan, Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 364-378 (2016) (6)16.
- [7] J. Major, M. Orfanus, Z. Zachoval, Flow over Broad-crested weir inflow by approach shaft-numerical model, *Stavební obzor*, 30(1) (2021) 260-267.
- [8] A.M. Shaymaa, M.M. Huda, M.K. Rasul, N.N. Thameen, A.A. Nadhir, Flow over broad-crested weirs: comparison of 2d and 3d models, *Civ. Eng. Archit.* , 11(1) (2017) 769-779.
- [9] S. Haun, N.R.B. Olsen, R. Feurich, Numerical modeling of flow over trapezoidal broad-crested weir, *Eng. Appl. Comp. Fluid*, 5 (2011) 397–405.
- [10] S.A. Nadheer, M.H. Alaa, Numerical simulation for flow over a broad-crested weir using FLOW-3D program, *Civil Engineering and Architecture* 10(5) (2022) 2157-2171.
- [11] A.H. Azimi, N. Rajaratnam, Z.Z. David, Discharge characteristics of weirs of finite crest length with upstream and downstream ramps, *J. Irrig. Drain Eng*, (2013) 75-83.
- [12] A.H. Azimi, N. Rajaratnam, Z.Z. David, Submerged Flows over rectangular weirs of finite crest length, *J. Irrigation and Drainage. Eng*, 140(5)(2014).
- [13] A. Aksoy, M. Doğan, Experimental investigation of the approach angle effects on the discharge efficiency for broad crested weirs, *Anadolu University Journal of Science and Technology, Applied Sciences and Engineering*, 17(2) (2016) 279-286.
- [14] L. Jiang, M. Diao, H. Sun, Y. Ren, Numerical modeling of flow over a Rectangular Broad-Crested Weir with a Sloped Upstream Face, *journal of water*, 10(11):1663 (2018).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*B. Nourani, H. Arvanaghi, F. Salmasi, Investigation Discharge Coefficient and Stage-discharge Equation for Broad-Crested Weirs Including the Effects of Sloping Crest and Upstream and Downstream ramps, Amirkabir J. Civil Eng., 55(10) (2024) 1933-1956.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2023.18920.6999](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.18920.6999)

