

## بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان اطراف سرریز لبه‌تیز قائم و مورب با شبیه‌سازی در نرم‌افزار FLOW3D

سرریزها یکی از سازه‌های مهم در رودخانه و از رایج‌ترین وسایل اندازه‌گیری شدت جریان در مجاری روباز هستند. از انواع این سازه‌ها، سرریزهای لبه‌تیز هستند که براساس شکل تاج به مثلثی، مستطیلی، دایروی، دوزنقه‌ای و سهموی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش، مشخصات جریان در اطراف سرریز لبه‌تیز با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D شبیه‌سازی گردید. مشخصه‌هایی نظیر ارتفاع، عدد فرود و رینولدز در این سرریزها با سه زاویه مختلف ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق با ضریب تخلیه سرریز مستطیلی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی، مدل  $k-\epsilon$  با ضریب همبستگی ۰/۹۶ می‌باشد. مشخص شد که عدد فرود کمتر از ۱ و رینولدز بیش از ۲۰۰۰ می‌باشد و سرریز با زاویه ۵۰ درجه بیشترین مقدار آبگذری با ضریب آبگذری ۰/۷۴۷ را دارا می‌باشد. همچنین تأثیرات زاویه بر آبشستگی اطراف سرریز با توجه به فشار و سرعت جریان مطالعه شد و رابطه‌ای برای دبی آبگذری سرریز پیشنهاد گردید.

**واژگان کلیدی:** سرریز لبه‌تیز، مشخصات هیدرولیکی، شبیه‌سازی عددی، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، مدل FLOW3D

سعید فرزین\*

استادیار، دانشکده مهندسی  
عمران، دانشگاه سمنان.  
پست الکترونیک:  
Saeed.farzin@semnan.ac.ir

حجت کرمی

استادیار، دانشکده مهندسی  
عمران، دانشگاه سمنان.  
پست الکترونیک:  
Hkarami@semnan.ac.ir

فرزاد یحیوی کلاکی

دانشجوی کارشناسی ارشد،  
دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه سمنان.  
پست الکترونیک:  
Farzady70@gmail.com

شهاب نیر

دانشجوی کارشناسی ارشد،  
دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه سمنان.  
پست الکترونیک:  
Sh.nayyer@semnan.ac.ir

### ۱- مقدمه

کانال‌های انتقال آب، سرریزها می‌باشند که به‌منظور تخلیه، اندازه‌گیری و کنترل سطح آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجاکه حجم جریان عبوری از سرریز، تابع طول و شکل تاج سرریز می‌باشد؛ لذا تاکنون تحقیقاتی درخصوص تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر ضریب تخلیه جریان و مقدار دبی عبوری از روی سرریزها انجام شده است. دلایل زیادی از جمله انحنای خطوط جریان روی سرریز، عدم توزیع هیدرواستاتیک فشار، تماس آب با جداره سرریز، موجب تفاوت شدت جریان محاسبه شده و اندازه‌گیری شده از روی سرریز می‌گردد.

مدیریت و انتقال آب یکی از مباحث مهم در طول توسعه تمدن بشر می‌باشد. برای پاسخگویی به نیازها، سازه‌های هیدرولیکی متنوعی طراحی و ساخته شده است. یکی از سازه‌های متداول در بسیاری از سدها و

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۰۹، بازنگری ۱۳۹۶/۰۱/۲۰، پذیرش ۱۳۹۶/۰۱/۲۵.  
(DOI): 10.22091/cer.2017.1661.1068 شناسه دیجیتال

کاهش عدد فرود، سرعت جانبی و نهایتاً دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد [۱]. حیدرپور و همکاران، با مطالعه جریان هم‌زمان از یک دریچه کشویی و روی یک سرریز لبه تیز ذوزنقه‌ای به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار  $H/d$  مقدار  $C_d$  نیز افزایش می‌یابد [۲]. حق شناس و وطن خواه، با مطالعه‌ای تحت عنوان «مقایسه روش‌های مختلف تخمین بده سرریز جانبی لبه تیز نیم‌دایره‌ای در رژیم جریان زیر بحرانی» و با انجام ۱۶۲ آزمایش به این نتیجه رسیدند که با توجه به متغیر بودن ارتفاع لبه سرریز و گسترش عرض فوقانی در سرریز جانبی دایره‌ای، این سرریز توانایی کنترل بهتر سیلاب را نسبت به سرریز جانبی مستطیلی دارد [۳]. عامری و همکاران، در آزمایشگاه دانشگاه شاهرود بر روی تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی در ۲۶ مقطع، آزمایش‌هایی انجام دادند و بر پایه تحلیل ابعادی، روابطی ساده و با دقت مناسب جهت محاسبه ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب با زوایای رأس ۶۰ و ۹۰ درجه ارائه کردند [۴]. مانگارولکار<sup>۱</sup> با استفاده از مدل آشفتگی، شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و مشخصات جریان در اطراف سرریز جانبی با ارتفاع تاج صفر در کانال اصلی را بررسی کرده است. او همچنین در این مطالعه به بررسی محل تشکیل نقطه سکون به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج تحلیلی پرداخته است [۵]. رضایی و آقاجانی مازندرانی، سرریزهای کنگره‌ای را با سرریزهای مستقیم مقایسه کردند. نتایج نشان داد تغییرات ارتفاع آب بالادست نسبت به دبی در سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم، با توجه به طول زیادشان، کمتر است و به ارتفاع آزاد کمتری در بالادست نیاز دارند. بنابراین استفاده از آنها در شبکه‌های آبیاری مناسب‌تر می‌باشد [۶]. داراواس<sup>۲</sup>، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصل از مدل فیزیکی سرریزهای

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های آزمایشگاهی، سدهای مخزنی و شبکه‌های آبیاری دارای اهمیت زیادی است. به این منظور، از سازه‌های مختلفی مانند دریچه، پارشال فلوم و سرریز استفاده می‌شود. سرریزها از مهم‌ترین سازه‌های اندازه‌گیری و تنظیم دبی جریان بوده و کاربرد گسترده‌ای در اندازه‌گیری آزمایشگاهی و صحرایی دبی جریان دارند. این سازه‌ها به دو صورت لبه تیز و لبه پهن می‌باشند. در پشت سرریزهای لبه تیز بیش از سرریزهای لبه پهن، رسوب‌گذاری وجود دارد. سرریزها با توجه به نسبت  $h/l$  تقسیم‌بندی می‌شوند. برای سرریز لبه پهن با تاج طولانی ( $h/l < 0.1$ )، سرریز لبه پهن حقیقی ( $0.1 \leq h/l \leq 0.135$ )، در سرریز لبه پهن با تاج کوتاه ( $0.135 \leq h/l \leq 1/5$ ) و نهایتاً برای سرریز لبه تیز ( $h/l > 1/5$ ) است که در آن  $h$  بار آب پشت سرریز و  $l$  طول سرریز می‌باشد.

در سرریزهای لبه تیز، عمق بحرانی، قبل از سرریز اتفاق می‌افتد و محل آن مشخص نیست. به همین دلیل نمی‌توان مانند سرریزهای لبه پهن از رابطه انرژی برای به دست آوردن دبی استفاده کرد. سرریزهای لبه تیز بر اساس شکل تاج به مثلثی، مستطیلی، دایروی، ذوزنقه‌ای و سهموی تقسیم‌بندی می‌شوند. تاکنون مطالعاتی در زمینه هیدرولیک جریان در این سرریزها انجام شده و برای افزایش کارایی سرریزهای ساده، راه‌حل‌های مختلفی پیشنهاد شده است. از ترکیب یک سرریز لبه تیز مستطیلی و یک دریچه کشویی (سیستم سرریز-دریچه) برای جلوگیری از رسوب‌گذاری در جلوی سرریز و نیز عبور آسان اجسام شناور استفاده می‌شود. این سیستم برای تخلیه سیلاب، کارایی بهتری نسبت به کاربرد مجزای سرریز یا دریچه دارد. جهت بررسی این سازه‌ها و سرریزها روش‌های آزمایشگاهی و عددی وجود دارد که به دلیل محدودیت از روش‌های عددی استفاده زیادی می‌شود. غفاری و همکاران اثر عدد فرود بالادست بر الگو و مشخصات جریان در امتداد سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که با

<sup>1</sup>- Mangarulkar

<sup>2</sup>- Darvas

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده، فلومی با دیواره شیشه‌ای و به طول ۱۰، عرض ۰/۲۵ و عمق ۰/۵ متر می‌باشد که سرریز در آن با استفاده از صفحات پی‌وی‌سی<sup>۸</sup> و در سه زاویه، مدل‌سازی شده است [۱۲].

### ۲-۲- معادلات حاکم

نرم‌افزار FLOW3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات می‌باشد که قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد.

روش‌های حجم سیال (VOF<sup>۹</sup>) و کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR<sup>۱۰</sup>) مثال‌هایی از روش‌های جزء حجمی هستند که در مدل FLOW3D به کار می‌روند. هنگامی که جریان دارای سطح آزاد است از روش VOF استفاده می‌شود. روش FAVOR یکی از روش‌های جزء حجمی است که برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، معادله پیوستگی جرم به‌صورت معادله (۱) بیان می‌شود:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

که در آن،  $V_f$  کسر حجمی جریان،  $\rho$  دانسیته سیال،  $R_{DIF}$  عبارت پخش آشفستگی و  $R_{SOR}$  منبع جرم می‌باشند. مقدار ضریب بستگی به نوع سیستم مختصات دارد. ( $u, v, w$ )

سدهای ورونورا<sup>۳</sup> و آون<sup>۴</sup> در استرالیا، مجموعه‌ای از منحنی‌ها را برای طراحی سرریزهای زیگزاگی ارائه نمود [۷]. لاکس<sup>۵</sup>، با انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل فیزیکی سرریز کنگره‌ای، ضریب دبی عبوری از این سرریزها را به‌صورت تابعی از هد کل بالادست معرفی نمود [۸]. اسماعیلی و رضوی‌زاده، با بررسی آزمایشگاهی سرریزهای جانبی با تراز تاج متغیر، ضریب دبی اینگونه سرریزها را مورد مطالعه قرار داده و افزایش راندمان آنها را نسبت به سرریزهای با تراز تاج ثابت نشان دادند [۹]. کشاورز و همکاران و اکبری و قدسیان، به‌ترتیب ضریب آبگذری سرریزهای جانبی لبه‌تیز دوزنقه‌ای و مثلی را مورد بررسی قرار دادند [۱۰ و ۱۱].

با توجه به سوابق مطالعات موجود، بیشتر کارهای انجام شده روی سرریز لبه‌تیز به‌صورت آزمایشگاهی و به تبع آن همراه با محدودیت‌های اقتصادی، زمانی و محاسبه پارامترهای مختلف بوده است. در این پژوهش، از نتایج آزمایشگاهی ارونقی<sup>۶</sup> و اسکویی<sup>۷</sup> جهت مدل‌سازی عددی استفاده شده و عملکرد مدل عددی FLOW3D برای شبیه‌سازی جریان اطراف سرریز ارزیابی می‌شود. بدین منظور، با استفاده از مدل عددی FLOW3D، مشخصات هیدرولیکی جریان همچون ارتفاع، عدد فرود و رینولدز اطراف سرریز لبه‌تیز مستطیلی شبیه‌سازی شده و رابطه زاویه سرریز نسبت به قائم با کارایی سرریز و ضریب تخلیه آن بررسی شده و رابطه‌ای بدین منظور پیشنهاد گردیده است. همچنین تأثیرات زاویه بر آبشستگی اطراف سرریز با توجه به فشار و سرعت جریان مطالعه شده است. لازم به ذکر است در این مورد، مطالعات چندانی انجام نشده است. از این‌رو، تحقیق حاضر، منجر به ایجاد دیدی مناسب درباره نحوه عملکرد هیدرولیکی سرریز لبه‌تیز می‌گردد.

3- Woronora

4- Avon

5- Lux

6- Arvanaghi

7- Oskuei

8- PVC

9- Volume of Fluid

10- Fractional Area-Volume Obstacle Representation

اکثر جریان‌های موجود در طبیعت به صورت آشفته می‌باشند. در این نوع جریان‌ها، گردابه‌های کوچک بسیار زیادی وجود دارند. شکل کشیده یا عدم تقارن گرداب‌ها یکی از خصوصیات اصلی این جریان‌ها است که این امر با افزایش شدت آشفتگی افزایش می‌یابد.

آشفتگی جریان باعث می‌شود جریان‌هایی با مقادیر متفاوت اندازه حرکت با یکدیگر برخورد کنند. گرادیان‌های سرعت بر اثر ویسکوزیته سیال کاهش می‌یابند و این امر باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود. برای بررسی جریان‌های آشفته روش‌های مختلفی وجود دارد.

شبیه‌سازی آشفتگی در FLOW3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی متداول مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط FLOW3D عبارت‌اند از: طول اختلاط پراوتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. مدل‌سازی آشفتگی در FLOW-3D تا حدی از مدل‌سازی‌های قبلی متفاوت است؛ زیرا اثر کسرهای حجمی و سطحی روش FAVOR در معادلات مربوط به مدل‌های آشفتگی اعمال شده است و تولید یا تنزل آشفتگی به وسیله نیروهای شناوری تعمیم یافته‌اند.

معادله  $k-\epsilon$  شامل دو معادله انتقال، برای انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف آن است. معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی،  $\epsilon_T$ ، مطابق رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left( u A_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{CDIS_1 \cdot \epsilon_T}{K_T} (P_T + CDIS_3 \cdot G_T) + Diff_\epsilon - CDIS_2 \frac{\epsilon_T^2}{K_T} \quad (5)$$

جهت حصول به نتایج دقیق‌تر و همچنین کاهش محاسبات، از دو گروه مش‌بندی استفاده شده است. در مقاطعی از کانال که اهمیت کمتری دارند، مش‌بندی درشت‌تر استفاده شده است. مش بلاک اول به فاصله هر ۲ سانتیمتر در کل فلوم و مش بلاک دوم به فاصله هر ۵

اجزای سرعت در جهات  $(x, y, z)$  هستند. همچنین،  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند.

معادله پیوستگی اصلاح شده به صورت معادله (۲) حاصل می‌شود:

$$\frac{V_f}{\rho c^2} \frac{\partial u A_x}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \zeta \frac{U A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (2)$$

عدد فرود نیز، نسبت نیروی اینرسی به نیروی جاذبه در حرکت یک سیال را نمایش می‌دهد که از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$Fr^2 = \frac{\rho v^2 / l}{\gamma} \quad (3)$$

که در آن،  $l$  طول جریان،  $v$  سرعت جریان،  $\rho$  چگالی سیال و  $\gamma$  عدد حاصل ضرب چگالی در شتاب گرانش است. ضریب دبی نیز در سرریزها به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود [۱۳]:

$$C_d = \frac{q}{g^{0.5} \left( \frac{2}{3} H_l \right)^{1.5}} \quad (4)$$

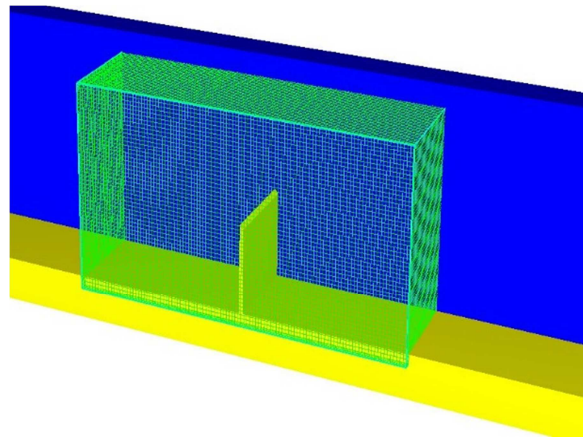
که در آن،  $C_d$  ضریب دبی جریان،  $q$  دبی عبوری از روی سرریز در واحد عرض  $(m^3/s.m)$ ،  $g$  شتاب ثقل  $(m/s^2)$  و  $H_l$  ارتفاع تراز آب در بالادست برحسب متر است.

### ۳-۲- مدل‌سازی آشفتگی

در رابطه (۵)،  $CDIS_1$ ،  $CDIS_2$  و  $CDIS_3$  پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقدارشان برای مدل  $k-\epsilon$ ، به ترتیب دارای مقادیر پیش‌فرض ۱/۴۴، ۱/۹۲ و ۰/۲ می‌باشند.

### ۴-۲- مدل‌سازی شرایط مرزی

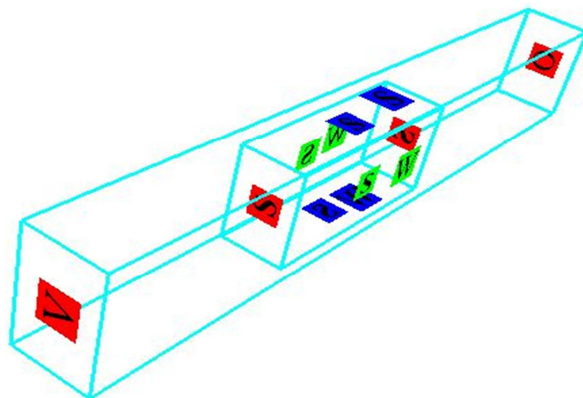
میلی‌متر در اطراف سرریز قرار گرفته است. شکل ۱ مش‌بندی در کل کانال و مش‌بندی ریزتر در اطراف سرریز را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مش‌بندی کل کانال و اطراف سرریز.

متقارن (S) و در کف شرط مرزی صلب (W)، تعریف گردیده است. این شرایط مرزی به صورت سه‌بعدی در شکل ۲ نشان داده شده است.

شرایط مرزی در ورودی کانال جریان با سرعت و عمق معلوم (V)، در کناره‌های مرز کانال، صلب (W)، در انتهای کانال به صورت ادامه‌دار (C)، در مرز بالا شرایط



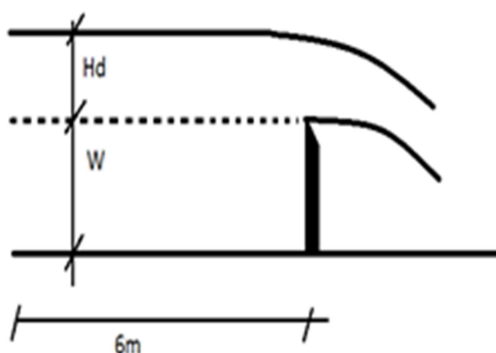
شکل ۲- شرایط مرزی مورد استفاده.

۰/۵ متری قبل از سرریز نمایش داده شده است و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

### ۳- نتایج و بحث

جهت بررسی توانایی مدل در روند شبیه‌سازی از نتایج آزمایشگاهی در فلومی از دیوار شیشه‌ای که طول فلوم، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۱۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ متر می‌باشد استفاده شده است. در شکل ۳ سرریز مدل شده در کانال مشاهده می‌شود.

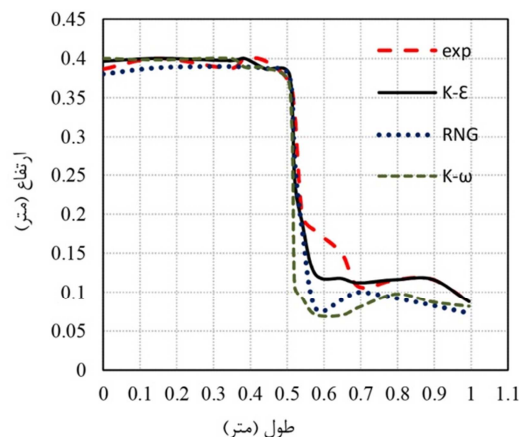
پس از مدل‌سازی و حل مدل در نرم‌افزار FLOW3D، داده‌های دریافتی با داده‌های موجود آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. در شکل ۴، ارتفاع سطح آزاد به دست آمده از مدل‌های مختلف آشفتگی در فاصله



شکل ۳- مشخصات فلوم آزمایشگاهی.

همچنین می‌توان گفت نرم‌افزار FLOW3D برای شبیه‌سازی جریان اطراف سرریز لبه تیز مناسب است و جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد.

براساس داده‌های جدول ۱، این نتیجه حاصل می‌شود که مدل K-ε بهترین جواب را با ضریب همبستگی ۰/۹۶ ارائه می‌دهد. بنابراین این مدل، بهترین مدل آشفتگی در بین سه مدل بررسی شده است.



شکل ۴- مقایسه سطح آزاد به‌دست آمده از مدل آشفتگی K-ε، K-ω و RNG با داده‌های آزمایشگاهی.

جدول ۱- دقت مدل آشفتگی جهت صحت‌سنجی پروفیل سطح آزاد آب.

مدل آشفتگی	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE
RNG	۰/۹۶	۰/۷۶	۰/۳۸
Les	۰/۸۳	۰/۴۶	۰/۷۶
k-ε	۰/۹۶	۰/۱۶	۰/۲۹

سرریز با  $H/W$  معادله‌ای درجه دو می‌سازند. رابطه (۶) می‌تواند تخمین خوبی از ضریب تخلیه ارائه دهد:

$$C_d = 0.727 \left( \frac{H}{W} \right)^2 - 1.232 \left( \frac{H}{W} \right) + 1.184 \quad (6)$$

که در آن  $H$  ارتفاع آب روی سرریز و  $W$  ارتفاع سرریز می‌باشد. رابطه (۶) برای تمام نسبت‌های ارتفاعی جواب قابل قبولی می‌دهد و با در نظر نگرفتن  $H/W < 0.4$  به رابطه باس<sup>۱۱</sup> که همان رابطه (۴) می‌باشد، دست پیدا کرده است.

در شکل ۶ خطوط جریان در اطراف سرریز در حالت سرریز قائم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود

در جداول ۲ و ۳، مقادیر ضریب آب‌گذری و دبی در حالات عددی (Num) و آزمایشگاهی (Exp) مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که اطلاعات به‌دست آمده از طریق نرم‌افزار نسبت به جواب‌های آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه مقدار عدد فرود کوچک‌تر از یک و مقدار رینولدز بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ است، جریان زیربحرانی و آشفته است.

در ادامه، با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۵ بخش‌های (الف) و (ب) می‌توان بیان داشت که با افزایش اعداد فرود و رینولدز، ضریب دبی کاهش می‌یابد و به سمت عدد ثابتی میل می‌کند. همچنین با مشاهده بخش (ج) در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد ضریب تخلیه

<sup>۱۱</sup>- BOS

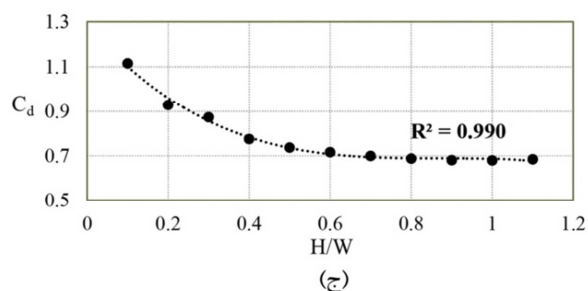
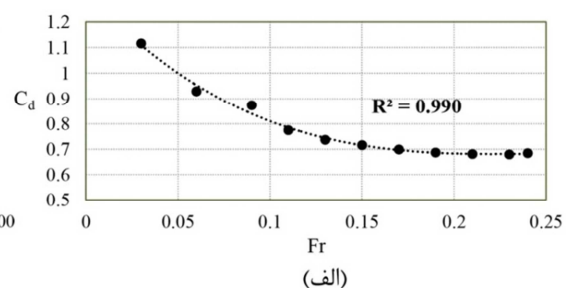
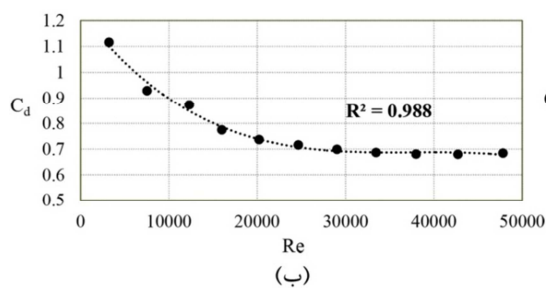
در بالادست سرریز، جریان به صورت خطوط موازی جاری است و با رسیدن به سرریز، این خطوط جهت عبور از سرریز به یکدیگر نزدیکتر و فشرده‌تر شده‌اند.

جدول ۲- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و عددی محاسبه شده با FLOW3D مربوط به دبی، ضریب تخلیه سرریز، فرود و رینولدز.

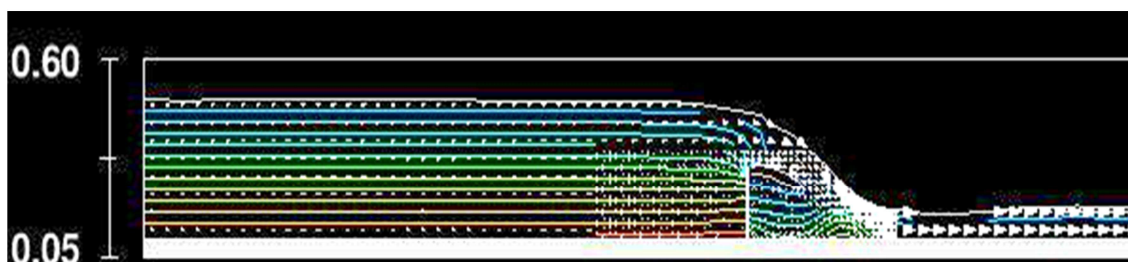
$C_d$		$q$ (lit/s/m)							
Num.	Exp.	Num.	Exp.	Fr	Re	V (m/s)	h (cm)	W (cm)	No
۱/۱۱۶	۱/۶۲	۹/۳۲	۸/۸۷	۰/۲۷۲	۳۲۱۳/۷۶	۰/۴	۲	۲۰	۱
۰/۹۲۹	۰/۹۳	۲۱/۹۵	۲۱/۹۸	۰/۵۹	۷۵۲۷/۴۱	۰/۹	۴	۲۰	۲
۰/۸۷۳	۰/۸۷۴	۳۷/۹۲	۳۷/۹۱	۰/۹۴	۱۲۳۰۸/۴۳	۰/۱۵	۶	۲۰	۳
۰/۷۷۵	۰/۷۷۵	۵۱/۸۱	۵۱/۸۱	۰/۱۱۵	۱۵۹۹۰/۷۵	۰/۱۹	۸	۲۰	۴
۰/۷۳۷	۰/۷۳۶	۶۸/۸۲	۶۸/۷	۰/۱۳۴	۲۰۲۰۵/۷۸	۰/۲۳	۱۰	۲۰	۵
۰/۷۱۶	۰/۷۱۵	۸۷/۸۹	۸۷/۸	۰/۱۵۲	۲۴۶۶۲/۹۳	۰/۲۷	۱۲	۲۰	۶
۰/۷	۰/۶۹۸	۱۰۸/۱۲	۱۰۸	۰/۱۷۵	۲۹۰۳۲/۲۶۵	۰/۳۲	۱۴	۲۰	۷
۰/۶۸۷	۰/۶۸۷	۱۲۹/۸۴	۱۲۹/۸	۰/۱۹۲	۳۳۴۵۳/۶۲	۰/۳۶	۱۶	۲۰	۸
۰/۶۸۱	۰/۶۸۱	۱۵۳/۵۲	۱۵۳/۵	۰/۲۰۷	۳۷۹۹۵/۴	۰/۴	۱۸	۲۰	۹
۰/۶۸	۰/۶۷۹	۱۷۹/۴۵	۱۷۹/۴۵	۰/۲۲۷	۴۲۷۲۶/۲	۰/۴۵	۲۰	۲۰	۱۰
۰/۶۸	۰/۶۸۴	۲۰۸/۵۲	۲۰۸/۵۱	۰/۲۴۶	۴۷۸۲۳/۳۸	۰/۵	۲۲	۲۰	۱۱

جدول ۳- دقت ضریب تخلیه و دبی آبگذری سرریز.

RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۲	۰/۲۶	۰/۹۹۳	$C_d$
۰/۱۷	۰/۲۹۱	۰/۹۹۹	q



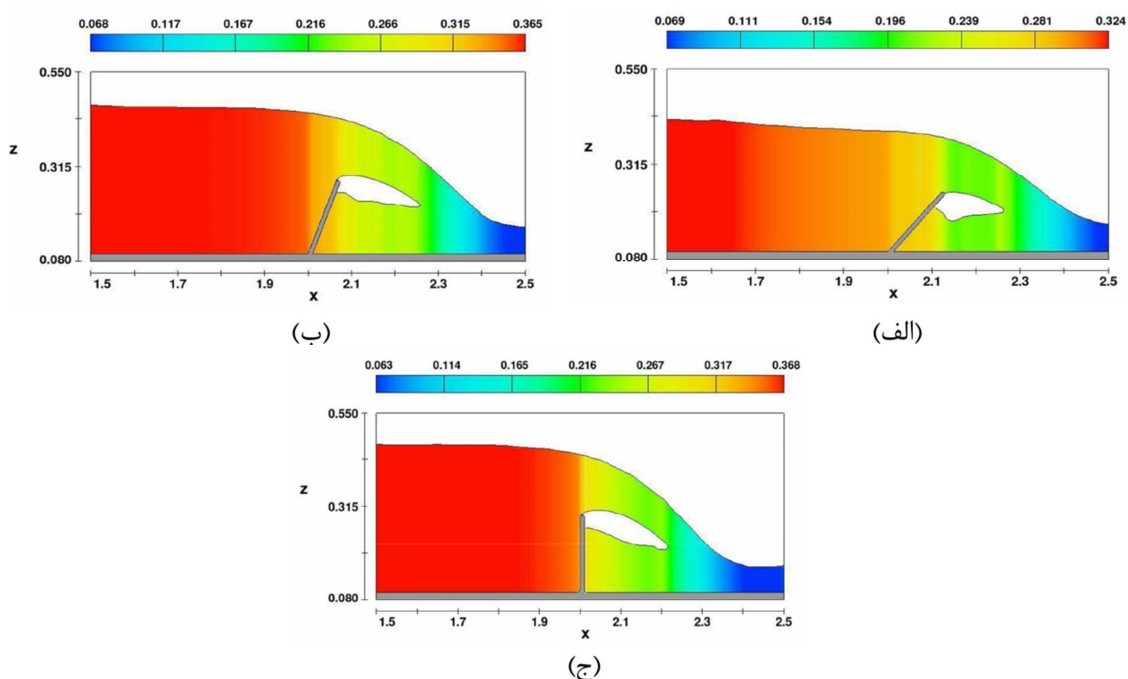
شکل ۵- نمودار مقادیر عددی ضریب تخلیه سرریز. (الف) نسبت به عدد فرود، (ب) نسبت به رینولدز و (ج) نسبت به ارتفاع آب روی سرریز تقسیم بر ارتفاع سرریز.



شکل ۶- خطوط جریان اطراف سرریز.

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش زاویه، ارتفاع آب پشت سرریز، بر طبق انتظار، کاهش یافته است.

همچنین در شکل ۷، پروفیل سطح آب برای زوایای مختلف قرارگیری سرریز نسبت به کف کانال، مورد بررسی قرار گرفته است و حالت مایل و قائم شبیه‌سازی و مدل



شکل ۷- پروفیل سطح آب در سه حالت قرارگیری سرریز. (الف) ۵۰ درجه، (ب) ۷۰ درجه و (ج) ۹۰ درجه.

قائم سرریز مایل) و همچنین ایجاد حالتی با شیب بالادست برای سرریز می‌باشد که این حالت بر خطوط جریان عبوری از سرریز انطباق بیشتری دارند که منجر به افزایش آبگذری می‌شود.

براساس جدول ۴ می‌توان بیان کرد با تغییر جهت سرریز، دبی و ضریب دبی تغییر می‌کند و هرچه سرریز به سمت بیرون شیب داشته باشد، دبی و ضریب دبی افزایش پیدا خواهد کرد. علت آن، کاهش ارتفاع سرریز (تصویر

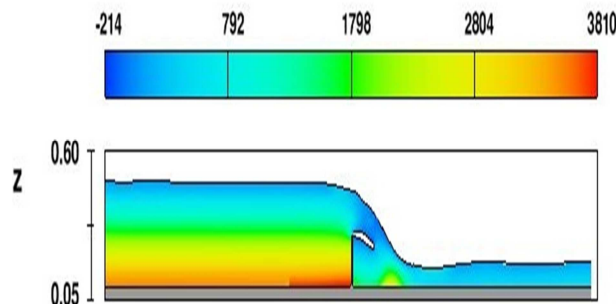
جدول ۴- داده‌های عددی مربوط به ضریب تخلیه سرریز در سه حالت قرارگیری سرریز.

$C_d$	$q$ (lit/s/m)	نوع
۰/۶۸	۱۷۹/۴۵	سرریز قائم
۰/۷۱۴	۱۸۸/۶۶	سرریز با زاویه ۷۰ درجه نسبت به افق
۰/۷۴۷	۱۹۷/۲۲	سرریز با زاویه ۵۰ درجه نسبت به افق

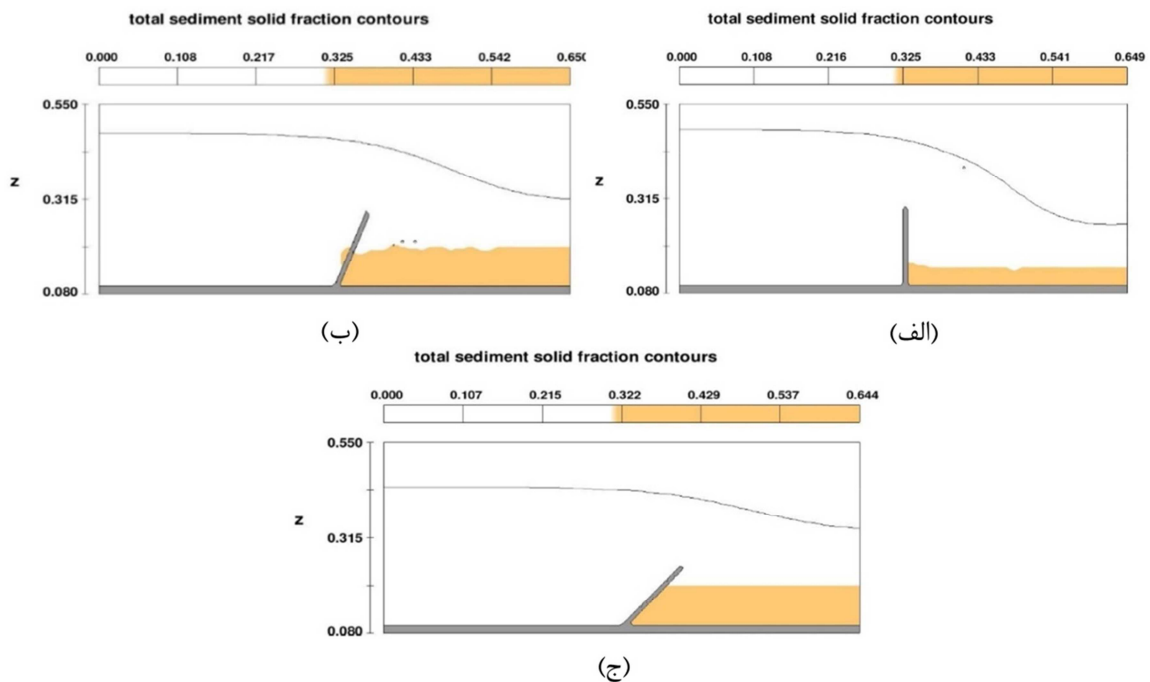


باعث آبشستگی می‌شود. با توجه به شکل ۹، با کاهش زاویه سرریز، آبشستگی در اطراف سرریز کاهش می‌یابد؛ زیرا سرعت و فشار منفی موجود اطراف سرریز کاهش پیدا می‌کند.

در ادامه، تغییرات فشار در اطراف سرریز در شکل ۸ نشان داده شده است. براساس شکل ۸، فشار در پشت سرریز دارای مقداری مثبت و بیشترین فشار  $3/8$  کیلوپاسکال است که به دلیل ارتفاع زیاد آب در آن مقطع می‌باشد. در پایین دست سرریز نیز، فشار منفی است که



شکل ۸- تغییرات فشار در اطراف سرریز.



شکل ۹- آبشستگی اطراف (الف) سرریز ۹۰ درجه، (ب) سرریز ۷۰ درجه و (ج) سرریز ۵۰ درجه.

#### ۴- نتیجه گیری

فشار و آبشستگی اطراف سرریز به خصوص در پایین دست کاهش پیدا می‌کند.

۲- تقریباً با کاهش ۴۵ درصدی زاویه از ۹۰ درجه به ۵۰ درجه، ضریب آبدهی حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است.

۳- سرریز با زاویه ۵۰ درجه بیشترین مقدار آبدگری با ضریب آبدگری  $0/747$  را دارا می‌باشد.

در این پژوهش، مشخصات هیدرولیکی جریان در اطراف سرریز لبه تیز مستطیلی قائم و مورب با استفاده از نرم افزار FLOW3D شبیه سازی و تحلیل گردید. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- با افزایش شیب سرریز در جهت جریان، دبی و ضریب آبدهی سرریز افزایش می‌یابد. همچنین

- ۴- مقدار ضریب آبدهی با توجه به افزایش عدد فرود و رینولدز به تدریج کاهش پیدا کرده و به عددی ثابت نزدیک می‌شود.
- ۵- رابطه برای ضریب آبدهی پیشنهاد گردید که نتایج آن برای نسبت‌های  $H/W < 0.4$  با رابطه باس یکسان است.
- ۶- نرم‌افزار FLOW3D قابلیت خوبی در شبیه‌سازی سرریز لبه تیز دارد و جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهد.
- ۷- با توجه به نتایج به دست آمده عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، مدل آشفتگی k-ε بهترین مدل برای این شبیه‌سازی معرفی گردید.

## مراجع

- [1] Eghbalzadeh, A. (2016). "Numerical study of the effect of upstream Froude number on the flow characteristics along a rectangular sharp-crested side weir", *Modares Civil Engineering journal*, 16(2), 215-228.
- [2] Heidarpour, M., Razavian, S. H., & Hosseini, Y. (2014). "Study of Simultaneous Flow over Sharp-Crested Trapezoidal Weir and Below Sluice Gate", *JWSS-Isfahan University of Technology*, 18(68), 147-156.
- [3] Haghshenas, V., & Vatankhah, A. (2015). "Discharge coefficient equation for semi-circular sharp-crested side weir in subcritical flow regime", *Shahrekord University Electronic Journals- IWRJ*, 9(4), 131-138.
- [4] Ameri, M. (2015). "Determination of discharge coefficient of compound triangular-rectangular sharp-crested side weirs", *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(3), 105-120.
- [5] Mangarulkar, K. (2010). Experimental and numerical study of the characteristics of side weir flows. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- [6] Rezaiy, M., & Aghajani Mazandarani, Gh. (2015). "Laboratory study overflow rectangular Congress", *Journal of Water and Soil Science*, 29(9), 1438-1446 (in Persian).
- [7] Darvas, L.A. (1971). "Performance and design of labyrinth weirs", *J. Hydraul. Eng, ASCE*, 97(80), 1246-1251.
- [8] Lux, F. (1993). "Design methodologies for labyrinth weirs", In *International conference on Hydropower, Water Power Nashville, Tennessee, USA*, 1379-1407.
- [9] Esmaily varaki, M., & Safarrazavizadeh, M. (2013). "Study on hydraulic characteristics of flow over spillways Congress with semicircular plan", *Journal of Water and Soil Science*, 27(1), 224-234 (in Persian).
- [10] Keshavarz, Z., Rahimpour, M., & Ahmadi, M.M. (2011). "Study of hydraulic characteristics of trapezoidal sharp crested side weirs", In *6th National Congress on Civil Engineering, Semnan University, Semnan*. (In Persian).
- [11] Akbari, R., & Ghodsian, M. (2011). "Determination of discharge coefficient in triangular side weirs", In *10th Iranian Hydraulic Conference, Gilan University, Rasht*. (In Persian).
- [12] Arvanaghi, H., & Oskuei, N.N. (2013). "Sharp-crested weir discharge coefficient", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3(3), 87-91.
- [13] Boss, M. G. (1988). Discharge Measurement Structures. ILRI Pub. Wageningen, Netherlands.

**S. Farzin \***

Assistant Professor,  
Department of Civil  
Engineering, Semnan  
University.

**e-mail:** saeed.farzin@semnan.ac.ir

**H. Karami**

Assistant Professor,  
Department of Civil  
Engineering, Semnan  
University.

**e-mail:** Hkarami@semnan.ac.ir

**F. Yahyavi**

M.Sc. Student, Department of  
Civil Engineering, Semnan  
University.

**e-mail:** Farzady70@gmail.com

**Sh. Nayyer**

M.Sc. Student, Department of  
Civil Engineering, Semnan  
University.

**e-mail:** sh.nayyer@semnan.ac.ir

## Numerical Study of Hydraulic Characteristics Around the Vertical and Diagonal Sharp-Crested Weirs Using FLOW3D Simulation

*Weir is important structure in the river and is the most common means of flow measurement in open channels. One type of this structure is sharp crested weir which is categorized based on the shape of crest to triangular, rectangular, circular, trapezoidal and parabolic. In this study, numerical simulation is used to predict overflow around sharp crested weir and attributes like height, Froude number and Reynolds number in the overflow with three different slope angles of 50, 70 and 90 degrees from horizontal and discharge coefficient of rectangular overflow has been investigated. An equation between discharge and inflow coefficient  $k-\varepsilon$  is proposed, and the best turbulence model due to better simulation is adopted among three turbulence models with correlation coefficient of 0.96. The results indicated that when Froude number is less than 1 and Reynolds number is more than 2000 and weirs have a 50-degree slope, inflow will have its maximum volume with inflow coefficient of 0.747. Also, the effect of slope on scouring around the weirs with respect to the pressure and velocity of inflow is studied.*

**Keywords:** Sharp crested weirs, Hydraulic characteristics, Numerical simulation,  $k-\varepsilon$  turbulence model, FLOW3D modeling.

---

\* Corresponding author