

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی عددی تاثیر شیب پیشانی پله سرریز پلکانی ساده و بلوک‌دار با تاج نیم‌دایره‌ای بر پارامترهای هیدرولیکی آن

احسان امین‌وش^۱، کیومرث روشنگر^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷

چکیده

جهت انتقال و تخلیه آب اضافی جمع‌شده در پشت سدها به پایین‌دست از سرریزها استفاده می‌شود. سرریزها از نظر هندسی و محل استفاده انواع مختلفی دارند که براساس توپوگرافی منطقه، شرایط هیدرولیکی و هیدرولوژیکی و ... از آن‌ها بهره گرفته می‌شود. بر همین اساس در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر شیب پیشانی پله سرریز پلکانی ساده و بلوک‌دار با تاج نیم‌دایره‌ای بر پارامترهای هیدرولیکی سرریز با استفاده از مدل Flow-3D و مدل آشفتگی RNG پرداخته شده است. سه مقدار برای شیب ناحیه پیشانی پله سرریز در نظر گرفته شده و محدوده عمق بحرانی نسبی در بازه ۰/۷۱ الی ۱/۰۶ انتخاب شد. شبیه‌سازی عددی نشان داد با افزایش زاویه پیشانی پله نسبت به افق یا به عبارت دیگر با کاهش شیب پیشانی پله، استهلاك انرژی نسبی جریان افزایش می‌یابد، به طوری که این میزان افزایش در سرریز با پله ۹۰ درجه نسبت به پله با زاویه ۶۰ درجه، ۱۳/۸۸ درصد و نسبت به پله با زاویه ۴۵ درجه ۲۸/۹ درصد بیشتر است. از طرفی استفاده از بلوک نیز باعث افزایش استهلاك انرژی در سرریز با پله ۹۰ درجه نسبت به پله با زاویه ۶۰ درجه به مقدار ۷ درصد و نسبت به پله با زاویه ۴۵ درجه ۲۴/۳۲ درصد شده است. همچنین مقدار عمق نسبی پایین‌دست با افزایش دبی جریان روند افزایشی داشته و با افزایش افت انرژی پایین‌دست، عدد فرود ناحیه پایین‌دست سرریز پلکانی کاهش می‌یابد که این مقدار کاهش در زاویه ۹۰ درجه حدوداً ۶۰ درصد بیشتر از زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه بوده است.

واژه‌های کلیدی: سرریز پلکانی، مدل عددی Flow-3D، استهلاك انرژی نسبی، مدل بلوک‌دار و بدون بلوک

مقدمه

صورت نیاز به احداث آن، ابعاد حوضچه آرامش را کاهش می‌دهد. با توجه به اهمیت این موضوع نیاز است تا تحقیقات وسیعی در این زمینه جهت شناخت هرچه بیشتر این سازه‌ها انجام گیرد. روشنگر و همکاران نوع رژیم جریان تشکیل‌شده بر روی سرریز پلکانی را تابعی از دبی جریان و همچنین شکل هندسی پله بیان کرده‌اند (Roshangar et al., 2014). با توجه به تفاوت در مقادیر عمق و سرعت جریان و همچنین تداخل آب و هوا و تشکیل جریان‌های دوفازی در رژیم‌های ریزشی، انتقالی و رویه‌ای، ارزیابی جریان در این رژیم‌ها برای طراحان سازه‌های هیدرولیکی نکته‌ای بسیار مهم است و به همین دلیل مطالعات صورت پذیرفته، نشان‌دهنده این است که آغاز جریان ریزشی تابعی از ارتفاع و طول پله و همچنین عمق بحرانی است. چانسون و تامیز (۲۰۰۴) مطالعه‌ای در خصوص رفتار جریان بر روی سرریزهای پلکانی انجام دادند و نتایج را جهت رسیدن به به حدود بالا و پایین جریان انتقالی به صورت زیر ارائه دادند:

$$y_{cr}/h > 0.917 - 0.381h/l \quad (1)$$

آب‌های اضافی اجتماع یافته در پشت سدها بایستی به‌وسیله سرریزها به سمت پایین‌دست سد انتقال داده شوند. سرریزهای پلکانی از نظر فنی و اقتصادی یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای اجرای سرریزها در سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود (قادری و عباسی، ۱۳۹۸). از نظر مهندسی این سرریزها بیشترین مقدار استهلاك انرژی را دارا می‌باشند. قسمت اعظم انرژی جنبشی مخرب جریان تحت اثر پله‌ها مستهلک می‌گردند و به‌همین دلیل از ایجاد هزینه‌های گزاف جهت احداث حوضچه آرامش در پایین‌دست جلوگیری می‌کند و یا در

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: kroshangar@yahoo.com)

انرژی مورد بررسی قرار دادند (Felder et al., 2012; 2014; Felder and Chanson., 2014; Hamed et al., 2011; Nohani et al., 2015). روشنگر و اخگر (۱۳۹۸) تاثیر المان‌های گوه‌ای شکل را بر ضریب زبری و استهلاک انرژی جریان عبوری از روی سرریز پلکانی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اضافه نمودن المان‌های گوه‌ای بر روی پله، ضریب زبری را افزایش داده و موجب مستهلک شدن انرژی جریان می‌شود. قادری و همکاران تاثیر ابعاد پله و پارامترهای موثر آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند (Ghaderi et al., 2020).

هم‌چنین با پیشرفت روش‌های شبیه‌سازی عددی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بر روی مشخصات جریان عبوری از روی سرریز پلکانی انجام شده است. تانگراتوک و همکاران مدل‌های آشفتگی غیرخطی را برای جریان سطح آزاد چرخشی چند فازی بر روی سرریزهای پلکانی را مورد پژوهش قرار دادند (Tongkratoke et al., 2009). شن و همکاران از مدل حجم سیالات (VOF) برای شبیه‌سازی عددی آشفتگی جریان با سطح آزاد بر روی سرریز پلکانی استفاده نمودند (Chen et al., 2002). تابارا و همکاران با استفاده از روش المان محدود و مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و با استفاده از نرم‌افزار ADINA به پیش‌بینی پارامترهای اصلی جریان با سطح آزاد بر روی سرریز پلکانی پرداختند (Tabbara et al., 2005). شبیه‌سازی جریان دوفازی بر روی سرریزهای استخر-پلکانی توسط Nikseresht et al., (2013) نشان داد که مدل اختلاط آب و هوا با مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) برای شبیه‌سازی جریان دوفازی بر روی سرریزها مناسب است.

دانشفراز و همکاران با استفاده از نرم‌افزار Fluent به بررسی توزیع فشار جریان بر روی سرریز پلکانی پرداخته و نشان دادند که روند توزیع فشار تا رسیدن به لبه پله‌ها بصورت کاهشی بوده و سپس در اثر سقوط آب و برخورد به کف پله افزایش یافته و دوباره در طول پله کاهش یافته است (Daneshfaraz et al., 2016). ترومیده و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی تاثیر پروفیل طولی سرریز پلکانی بر استهلاک انرژی جریان نشان دادند که میزان افت انرژی در ارتفاع و طول یکسان، بیشترین مقدار را داشته و هم‌چنین افزایش تعداد پله نیز باعث افزایش استهلاک انرژی شده است.

قادری و عباسی (۱۳۹۸) اثر هندسه کنگره‌های پله‌ها بر مقدار استهلاک انرژی جریان عبوری از روی سرریز پلکانی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اصلاح شکل هندسی پله‌ها باعث بهبود عملکرد سرریز پلکانی در افزایش استهلاک انرژی جریان دارد. اخگر و روشنگر (۱۳۹۹) به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر ایجاد حفره بر روی سرریزهای پلکانی بر میزان استهلاک انرژی جریان پرداختند. نتایج نشان داد که ایجاد حفره بر روی پله‌های سرریز پلکانی باعث کاهش سرعت جریان و کاهش

$$\frac{y_{cr}}{h} < \frac{0.928}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}} \quad (2)$$

چمنی و راجاراتنام حد بالای جریان ریزی و حد پایین جریان غیرریزی را با استفاده از روابط ۳ و ۴ ارائه نمودند (Chamani and Rajaratnam., 1999):

$$\frac{h}{l} = 0.45 \left(\frac{y_{cr}}{h}\right)^{-0.62} \quad (3)$$

$$\frac{h}{l} = \sqrt{0.89 \left[\left(\frac{y_{cr}}{h}\right)^{-1} - \left(\frac{y_{cr}}{h}\right)^{-0.34} + 1.5 \right]} - 1 \quad (4)$$

آمدور و همکاران در مطالعه‌ای به صورت آزمایشگاهی بر روی سرریزهای پلکانی با شیب تند، توزیع فشار هیدرودینامیکی را در وجه‌های قائم و افقی پله در شرایط جریان یکنواخت مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که فشار دینامیکی حداقل، در وجه افقی پله و بیشترین مقدار آن در وجه خارجی پله رخ داده است (Amador et al., 2004). سانچز و همکاران برای معین نمودن میدان فشار در سرریزهای پلکانی در جریان‌های رویه‌ای تحقیقی را به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج نشان داد که در یک دبی ثابت، حداکثر فشار در لبه خارجی پله بوده و با اختلاف نسبتاً زیادی نسبت به سایر نقاط دیگر پله اتفاق می‌افتد (Sanchez et al., 2008).

در چندین سال اخیر پژوهشگران به دنبال افزایش کارایی سرریزهای پلکانی بوده و مطالعات زیادی را در این زمینه به ثبت رساندند که از جمله آن‌ها می‌توان به ارائه راهکارهایی برای کاهش سرعت جریان در انتقال به پایین دست با استفاده از افزایش افت انرژی در سرریزهای پلکانی اشاره نمود (قادری و عباسی، ۱۳۹۸). هم‌چنین تحقیقات مختلفی به‌وسیله پیراس و همکاران، راجاراتنام و سورنسن انجام گرفته و اثر الگوی جریان، هندسه پله و شیب سرریز بر روی میزان استهلاک انرژی بررسی گردیده است (Sorensen, 1985; Rajaratnam, 1980; Peyras et al., 1992).

سلماسی و همکاران (۱۳۸۲) اثر تعداد پله‌ها را در استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی مورد پژوهش قرار داده و بیان نمودند که تاثیر افزایش تعداد پله در افزایش استهلاک انرژی در ابتدا روند افزایشی داشته و سپس به صورت نزولی روند کاهشی داشته است. روشن و همکاران با استفاده از دو مدل سرریز پلکانی با تعداد پلکان-های ۱۲ و ۲۲ تایی را با شیب تندآب مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که درصد استهلاک انرژی در سرریز با تعداد ۱۲ پله بیشتر از ۲۲ پله می‌باشند (Roshan et al., 2012).

پژوهش‌های آزمایشگاهی دیگری توسط سایر محققین از جمله حامدی و همکاران، فلدر و همکاران، فلدر و چانسون و نوهانی و همکاران انجام گرفته و اثر شیب معکوس، اثر هندسه چله‌های سرریز و اثر زبری در سطح پله‌های سرریز پلکانی را جهت افزایش استهلاک

پله‌های ساده و بلوک‌دار پرداخته شده و برای جلوگیری از افزایش ابعاد حوضچه آرامش در پایین‌دست از بلوک‌های صلب به صورت زیگزاگی بر روی پله‌ها استفاده گردیده است.

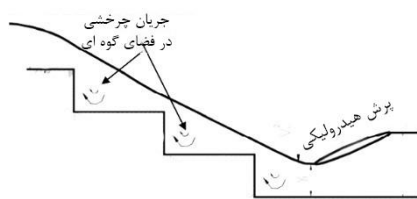
مواد و روش‌ها

رژیم جریان‌های ریزشی بر روی سرریزهای پلکانی (Napped Flow)

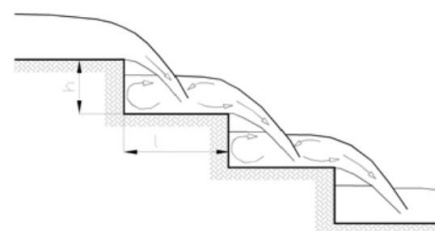
در رژیم جریان ریزشی، پلکان‌ها به صورت یک سری سرریز قائم با استخر تشکیل شده در پایین‌دست مطابق شکل (۱-الف) عمل می‌کنند. در حالت کلی رژیم جریان‌های ریزشی در دبی‌های ورودی کم و همچنین ارتفاع زیاد پله شکل می‌گیرند (مرادی سبزه‌کوهی و همکاران، ۱۳۹۰). بر اساس مطالعات انجام گرفته بر روی سرریزهای پلکانی، استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی با رژیم جریان ریزشی، دارای پرش هیدرولیکی کامل در حالت شوت‌های بدون دریاچه می‌باشد (Chanson., 2002).

رژیم جریان رویه‌ای (Skimming Flow)

در رژیم جریان رویه‌ای، جریان به صورت چسبیده به روی پله‌ها سیلان می‌یابد. در این رژیم پنجه پله‌ها به نوعی به صورت یک کف کاذب عمل می‌کند. در فضای گوه‌ای شکل بین پله‌ها، قسمتی از جریان مطابق شکل (۱-ب) حالت چرخشی به خود می‌گیرد. مقدار عمده‌ای از استهلاک انرژی سازه در رژیم رویه‌ای در نتیجه انتقال تنش برشی از جریان روی کف کاذب به جریان چرخشی حصر شده در فضای گوه‌ای بین پله‌ها و حفظ چرخش آن صورت می‌پذیرد (مرادی سبزه‌کوهی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Chanson., 2002).



(ب)



(الف)

شکل ۱- نحوه عبور جریان از روی سرریز پلکانی (الف) رژیم جریان ریزشی (ب) رژیم جریان رویه‌ای

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{\frac{2}{3} g H_d^{1.5}} \quad (5)$$

که در رابطه فوق، q دبی واحد عرض جریان، g شتاب گرانش، C_d ضریب دبی جریان و H_d هد آبی عبوری از روی سرریز می‌باشد. با استفاده از رابطه (۵) می‌توان مقادیر انرژی کل جریان موجود در بالادست و پایین‌دست سرریز پلکانی را محاسبه نموده، برای محاسبه میزان درصد استهلاک نسبی انرژی جریان از رابطه (۷) و برای

ارتفاع آب در پایین‌دست سرریز شده و همچنین باعث افزایش چهار برابری استهلاک انرژی گردیده است. دانگ و همکاران جریان دوفازی آب-هوا را بر روی سرریز پلکانی در دبی‌های بالا و با قرارگیری یک دریچه قطاعی بر روی تاج سرریز به صورت عددی با استفاده از مدل Flow-3D و متد دینامیک سیالات محاسباتی، مورد بررسی و پژوهش قرار دادند (Dong et al., 2019). کارایی سرریزهای پلکانی با هندسه کنگره‌ای-دوونقه‌ای توسط Ghaderi et al., (2020) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از پله‌های کنگره‌ای-دوونقه‌ای باعث افزایش ۱۷ درصدی افت انرژی شده است. امیدی و ظریف طی تحقیقی اثر شیب جانبی پله‌های سرریز پلکانی را بر پارامتر استهلاک انرژی به صورت عددی با استفاده از مدل Flow-3D مورد بررسی قرار دادند (Omidi Arjenaki and Zarif Sanayei, 2020). قادری و عباسی به مطالعه عددی و آزمایشگاهی اثر هندسه المان‌های الحاقی نصب شده بر روی سرریز پلکانی بر پارامتر استهلاک انرژی پرداخته و نشان دادند المان‌های الحاقی نصب شده، باعث افزایش افت انرژی نسبت به حالت ساده سرریز گردیده است (Ghaderi and Abbasi, 2021).

بررسی مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته در سالیان متمادی نشان داد که در ارتباط با سرریزهای پلکانی، تحقیقات وسیعی صورت پذیرفته است. در میان این پژوهش‌ها، تحقیقاتی در زمینه شکل هندسی پلکان‌ها، زوایای طولی و عرضی پله‌ها، شیب‌های مثبت و منفی کف پله‌ها و ... مورد بررسی قرار گرفته است اما با بررسی بیشتر مقالات، مشاهده گردید که اثر شیب پیشانی پله‌ها بر پارامترهای هیدرولیکی جریان انجام نگرفته و جای خالی این موضوع در میان سایر تحقیقات دیده می‌شود. بر همین اساس، در مطالعه حاضر سعی به بررسی اثر شیب پیشانی سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای به صورت

روابط مورد استفاده در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی و روابط ارزیابی

جهت محاسبه میزان ضریب دبی عبوری از روی سرریز پلکانی لبه تیز می‌توان از رابطه (۵) استفاده کرد (Parsaie and Haghiabi., 2019). بر حسب این رابطه، ضریب دبی جریان تابعی از دبی واحد عرض و هد آبی عبوری از روی سرریز می‌باشد.

میانگین مربعات (RMSE) و آماره کلینگ-کوپتا (KGE) (Gupta et al., 2009) جهت ارزیابی کیفی روابط بکار گرفته شد. در روابط زیر M_{Num} ، M_{Cal} و N به ترتیب تعداد داده‌ها، مقادیر داده‌های عددی و مقادیر داده‌های محاسباتی است.

$$R^2 = \left(\frac{(N \sum M_{Num} M_{Cal}) - (\sum M_{Num})(\sum M_{Cal})}{\sqrt{N(\sum M_{Num}^2) - (\sum M_{Num})^2} \sqrt{N(\sum M_{Cal}^2) - (\sum M_{Cal})^2}} \right)^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (M_{Num} - M_{Cal})^2} \quad (10)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\overline{Pre}}{\overline{Obs}}; \gamma = \frac{\sigma_{Pre} / \overline{Pre}}{\sigma_{Obs} / \overline{Obs}}$$

لازم بذکر است که، بهترین پاسخ زمانی است که ضریب RMSE به عدد صفر و ضریب R^2 به عدد یک میل کند. همچنین بازه کیفی ضریب کلینگ کوپتا در جدول ۱ ذکر گردیده است (Gupta et al., 2009).

جدول ۱- بازه تغییرات و وضعیت کیفی ضریب KGE

وضعیت کیفی	بازه تغییرات
Very good	$0.7 < KGE \leq 1$
Good	$0.6 < KGE \leq 0.7$
Satisfactory	$0.5 < KGE \leq 0.6$
Unsatisfactory	$KGE \leq 0.4$

جهت $x_i = (x, y, z)$ ، $U_i = (U, V, W)$ و $u_i = (u, v, w)$ ، ρ ، μ ، P و g_i به ترتیب جرم مخصوص، ویسکوزیته دینامیکی، فشار و شتاب گرانش می باشد. سرعت لحظه‌ای با استفاده از رابطه $u_i = U_i + u_i'$ برای هر سه جهت بدست می‌آید.

شبیه‌سازی در مدل Flow-3D با استفاده از چندین مدل آشفتگی می‌تواند صورت پذیرد که این مدل‌های آشفتگی عبارتند از: مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، مدل دو معادله‌ای K- ϵ ، مدل K- ω ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل طول اختلاط پاراتدل. در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی جریان آشفتگی و برای صحت‌سنجی از مدل‌های آشفتگی RNG، K- ϵ و K- ω استفاده گردید و با توجه به نتایج صحت‌سنجی هر سه مدل آشفتگی از میان مدل‌های ذکر شده، برای شبیه‌سازی سایر مدل‌ها از روش گروه‌های نرمال شده (RNG) استفاده گردید. دلیل استفاده از این مدل آشفتگی، توانایی این مدل در شبیه‌سازی جریان با تعداد مش‌های بالا، عملکرد خوب در شبیه‌سازی نواحی جداشدگی جریان، نتایج بهتر در مقابل

محاسبه خطای نسبی از رابطه (۸) استفاده نمود.

$$E_{0,1} = y_{0,1} + \frac{V_{0,1}^2}{2g} = y_{0,1} + \frac{q^2}{2gy_{0,1}} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100 = \left(1 - \frac{E_1}{E_0}\right) \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Relative Error} = \left| \frac{x_{Num} - x_{Cal}}{x_{Num}} \right| \quad (8)$$

که در روابط فوق y_0 و y_1 به ترتیب اعماق بالادست و پایین‌دست، E_0 و E_1 به ترتیب انرژی مخصوص جریان بالادست و پایین‌دست و x_{Num} و x_{Cal} به ترتیب مقادیر عددی و محاسباتی می‌باشند. براساس نتایج استخراج شده از مدل Flow-3، روابطی برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی تحقیق حاضر ارائه گردیده است. بدین منظور، پارامترهای وابسته $(\Delta E/E_0)$ و (y_2/y_1) مورد نظر به صورت تابعی از پارامترهای مستقل (α) و $(y_{cr}/R, Fr_0)$ در نظر گرفته شد. برای بدست آوردن روابط، ۸۰ درصد از داده‌های عددی به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان ورودی استفاده شدند که با بهره‌گیری از مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی مدل SPSS بدست آمدند. برای صحت‌سنجی معادلات بدست آمده از ۲۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها استفاده شد. همچنین از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R^2)، خطای جذر

مدل آشفتگی، مشخصات شبیه‌سازی و شبکه میدان حل

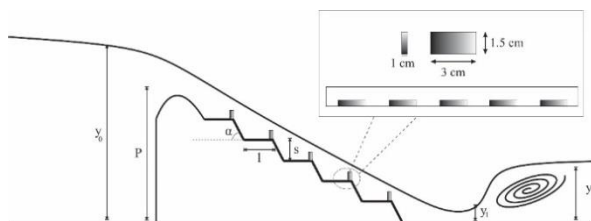
Flow-3D یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند برای حل مسائل هیدرولیکی است که بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بوده و قادر است جریان‌های مختلف را شبیه‌سازی نماید. معادلات حاکم بر جریان در این نرم‌افزار، معادلات پیوستگی یا بقاء جرم و ناویر-استوکس می‌باشد. این مدل برای تحلیل جریان در حالت غیرقابل تراکم، معادلات فوق را با روش حجم محدود (VOF) بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده، حل می‌کند. فرم عمومی معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به ترتیب در روابط (۱۲) و (۱۳) ارائه گردیده است.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\delta U_i}{\delta t_i} + \rho U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho u_j u_i) + \rho g_i \quad (13)$$

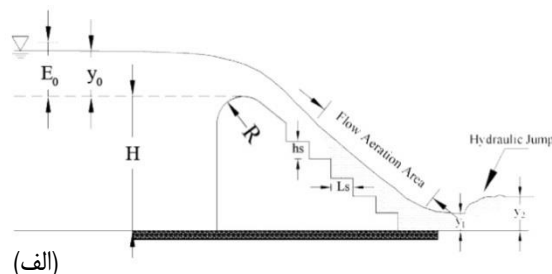
که در آن، U_i و u_i' به ترتیب سرعت متوسط و سرعت نوسان در

سانتی‌متر و جهت شیب‌دهی به پیشانی پله زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با شیب‌های $m=0/58$ ، $m=1$ و شیب قائم در نظر گرفته شد. ارتفاع سازه سرریز با تاج نیم‌دایره‌ای ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۲ نمایی از سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

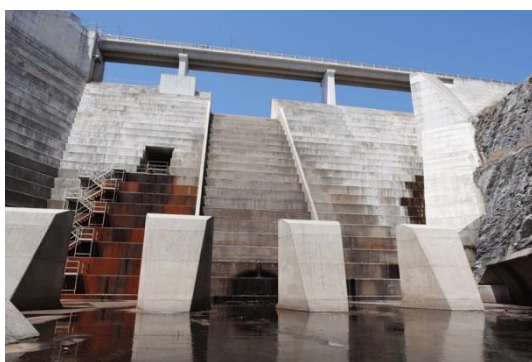


کرنش و انحنای ناگهانی خطوط جریان و همچنین مطالعات عددی پیشین (Gaderi et al., 2020; Daneshfaraz et al., 2020; Daneshfaraz et al., 2021a, b, c) می‌باشد.

در پژوهش حاضر، جهت شبیه‌سازی عددی تاثیر شیب پیشانی پله سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای، از تعداد ۵ پله با طول و ارتفاع‌های ۴



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف: شکل شماتیک سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای تحقیق حاضر، ب: تصاویر سرریز پلکانی ساده و بلوک‌دار

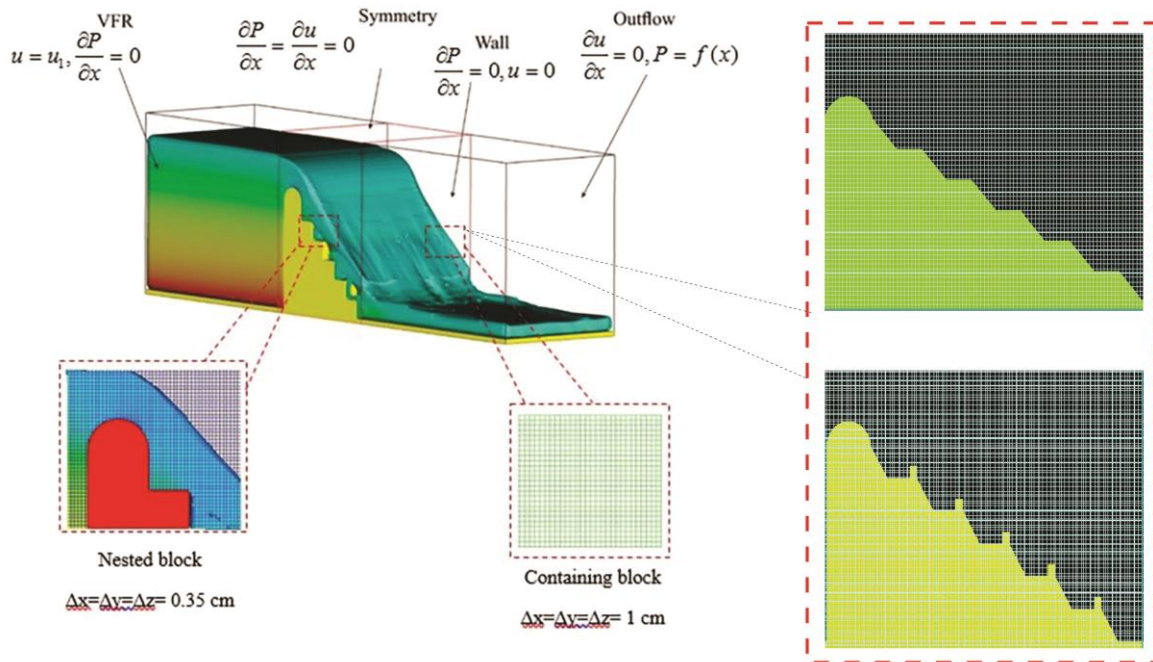
برای اعمال شرایط مرزی، در مقطع ورودی از شرط مرزی (VFR) Volume Flow Rate، در مقطع خروجی از شرط مرزی Outflow، برای دیواره‌ها و کف از شرط مرزی Wall و در مرز فوقانی از شرط مرزی Symmetry استفاده شده است. شکل ۳ میدان حل به همراه شرایط مرزی آن جدول ۲ محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند.

آنالیز ابعادی

مطابق شکل ۲، پارامترهای موثر سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای که دارای شیب در قسمت پیشانی پله می‌باشد، مطابق رابطه زیر ارائه شده است.

جدول ۲- محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر

توضیحات	α (degree)	Fr_d (-)	y_{cr} (cm)	y_d (cm)	Q (Lit/Sec)	نام مدل
پله ساده و بدون بلوک	۴۵	۱/۴۷ - ۴/۰۹	۱۱/۹ - ۱۴/۵	۲/۶۳ - ۵/۸۷	۸/۳۳ - ۱۵	مدل S1
	۶۰	۱/۱۰۲ - ۳/۷۱۸		۲/۴۵ - ۵/۸۳		مدل S2
	۹۰	۱/۰۸ - ۱/۶۰۹		۳/۱۲ - ۶		مدل S3
پله بلوک‌دار	۴۵	۱/۰۷ - ۳/۲۱۸	۱۱/۹ - ۱۴/۵	۳/۴۱ - ۶/۷۱	۸/۳۳ - ۱۵	مدل S4
	۶۰	۱/۴۵۵ - ۳/۰۷۳		۳/۵۸ - ۶/۹۸		مدل S5
	۹۰	۰/۴۳۷ - ۱/۲۳۵		۴/۳۳ - ۷/۳۹		مدل S6



شکل ۳- شبکه میدان حل و شرایط مرزی تحقیق حاضر

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_2}{y_1}, Fr_2 = f_4\left(Fr_0, \frac{y_{cr}}{R}, \alpha\right) \quad (17)$$

صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی، از مدل آزمایشگاهی تحقیق پارسائی و حق-یابی با زاویه پله ۹۰ درجه و سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای استفاده شده است (Parsaie and Haghiabi., 2019). آزمایش‌های مربوط به مدل فیزیکی در فلومی با ابعاد ۱۲×۰/۵×۰/۴۵ متر (ارتفاع×عرض×طول) و دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلس شفاف انجام گرفته است. عمق جریان توسط یک عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ±۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. دبی ورودی جریان توسط یک سرریز مثلثی لبه تیز که در ابتدای ورودی فلوم واقع شده گردیده، محاسبه شده است. ارتفاع مدل فیزیکی ۳۰ سانتی‌متر و شعاع قسمت نیم‌دایره‌ای تاج سرریز ۶ سانتی‌متر و تعداد پله‌های به کار رفته ۳، ۵ و ۷ پله بوده است. شیب شوت‌های این سرریز (V:H) ۱:۱ و ۱:۱/۲۵ و جنس سازه سرریز از نوع بتنی بوده است. در تحقیق حاضر، مدل‌های متفاوتی جهت انتخاب اندازه شبکه بهینه شبیه‌سازی انجام گرفت. مطابق آنچه که در بخش مواد و روش‌ها ذکر گردید، برای صحت‌سنجی مدل‌های آشفتگی از مدل‌های RNG، K-ε و K-ω استفاده شده است که نتایج آن‌ها در جدول ۳ خلاصه گردیده است. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌گردد که نتایج مدل RNG بهترین نتایج را در میان سایر مدل‌های بررسی شده ارائه داده است.

$$f_1(Q, R, E_0, H, l, s, \rho, V_0, V_2, y_{cr}, y_0, y_1, y_2, g, \alpha, C_d) = 0 \quad (14)$$

که در آن دبی جریان Q ، شعاع قسمت نیم‌دایره‌ای تاج سرریز E_0 ، عمق جریان بالادست سرریز y_0 ، عمق جریان بالادست y_1 ، عمق جریان پایین دست قبل از پرش هیدرولیکی y_2 ، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی H ، سرریز l ، طول پله h ، ارتفاع پله V_0 و V_2 به ترتیب سرعت جریان در بالادست و پایین دست سرریز $[LT^{-1}]$ ، g شتاب گرانش $[LT^{-2}]$ و α زاویه شیب پیشانی پله سرریز پلکانی $[-]$ و C_d ضریب دبی جریان می‌باشد.

آنالیز ابعادی انجام گرفته با استفاده از روش پی-باکینگهام بوده و به همین دلیل پارامترهای R ، V_0 و g به عنوان پارامترهای تکراری در نظر گرفته شده است. پس از اعمال روش پی-باکینگهام و حذف برخی از پارامترهایی که مقادیر آن‌ها ثابت هستند، آنالیز ابعادی به صورت زیر ارائه شده است (Daneshfaraz et al., 2022a, b).

$$C_d, \frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_2}{y_1}, Fr_2 = f_2\left(\frac{E_0}{R}, Fr_0, \frac{y_{cr}}{R}, \alpha\right) \quad (15)$$

با توجه به اینکه ضریب دبی جریان عبوری فقط تابعی از شرایط هندسی و هیدرولیکی بالادست سرریز می‌باشد، لذا آنالیز ابعادی نهایتاً براساس روابط زیر می‌باشد.

$$C_d = f_3\left(\frac{E_0}{R}\right) \quad (16)$$

جدول ۳- صحت‌سنجی مدل‌های آشفستگی بررسی شده در تحقیق حاضر

پارامترهای ارزیابی			مدل آشفستگی
KGE	R ²	RMSE (%)	
۰/۹۸۴	۰/۹۸۱۴	۲/۹	RNG
۰/۹۲۱	۰/۹۱۵	۵/۹	K-ε
۰/۸۹۸	۰/۸۹۱	۷/۱	K-ω

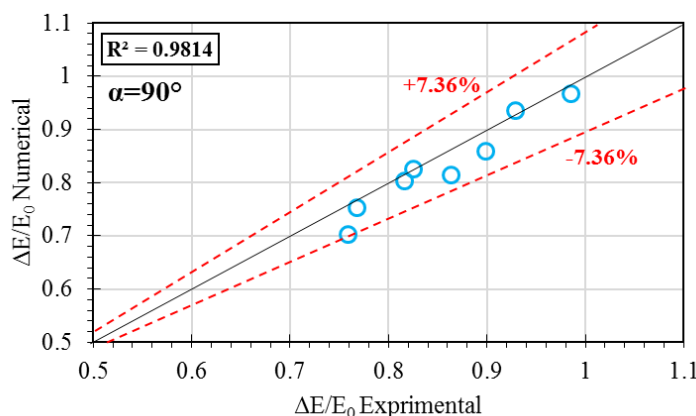
جدول ۴- آنالیز حساسیت مش‌بندی و محاسبه مش بهینه در مدل آشفستگی RNG

KGE	R ²	RMSE (%)	تعداد کل مش‌ها	مدل آشفستگی	شماره تست
۰/۷۳۵	۰/۶۵۳۲	۱۶/۵۵	۲۸۰۰۰	RNG	تست ۱
۰/۸۲۵	۰/۷۱۲۵	۱۴/۳۱	۱۸۵۰۰۰		تست ۲
۰/۸۹۶	۰/۸۴۳۲	۱۰/۵	۲۶۵۰۲۰		تست ۳
۰/۹۸۴	۰/۹۸۱۴	۲/۹	۹۹۹۱۴۴		تست ۴
۰/۹۹	۰/۹۸۳۵	۲/۶	۱۲۹۶۰۰۰		تست ۵

نتایج شبیه‌سازی، اندازه سائز سلول ۴/۹ میلی‌متر در میدان حل برای تمامی مدل‌های پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است. نتایج صحت‌سنجی داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های عددی در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که مقدار استهلاک انرژی مدل عددی با تعداد کل شبکه ۹۹۹۱۴۴ در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی دارای خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین مناسبی بوده و صحت مدل‌سازی انجام شده را با حداکثر خطای نسبی ۷/۳۶ درصد نشان می‌دهد.

همچنین آنالیز حساسیت اندازه سائز سلول تا رسیدن به نتایج ثابت و دارای اختلاف کم مابین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انجام شد. آنالیز حساسیت سائز سلول مش‌بندی در جدول ۴ ارائه شده است.

همانگونه که در جدول ۴ قابل ملاحظه می‌باشد، مدل با تعداد کل مش ۹۹۹۱۴۴ با خطای جذر میانگین مربعات، ضریب تعیین و ضریب کلینگ-گوپتا به ترتیب ۰/۰۲۹، ۰/۹۸۱۴ و خیلی خوب برای شبیه‌سازی انتخاب گردید. لذا جهت کاهش اثر شبکه محاسباتی در



شکل ۴- صحت‌سنجی داده‌های عددی با آزمایشگاه براساس پارامتر استهلاک انرژی نسبی

استنباط است که پس از جاری شدن سیال از تاج سرریز و سقوط آن از پله‌های سرریز پلکانی در دبی‌های پایین، جریان از نوع رژیم ریزشی (شکل ۱-الف) بوده و با افزایش دبی، در دبی‌های بالاتر این رژیم به رژیم جریان رویه‌ای (شکل ۱-ب) تبدیل می‌گردد. در سرریزهای با زوایای پیشانی ۴۵ و ۶۰ درجه، به دلیل دارا بودن شیب مایل، در دبی-

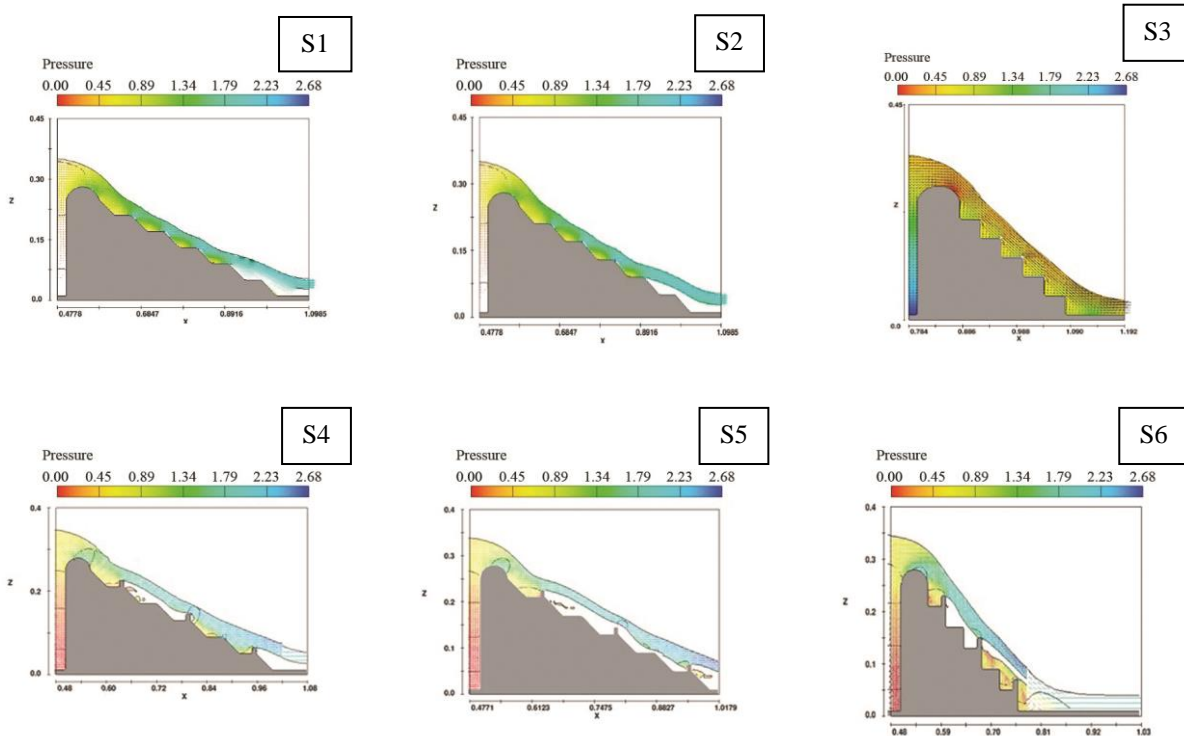
نتایج و بحث

پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب جریان بر روی سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای و پیشانی شیب‌دار با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه در دبی ۱۱/۶۷ لیتر بر ثانیه و کانتور فشار در شکل ۵ نشان داده شده است. با دقت در شکل قابل

عملکرد پلکانی بودن خود را از دست داده و همانند یک شوت مایل با سطح صاف عمل می‌کند که نتایج آن به وضوح در نمودار شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

های پایین نیز دارای رژیم جریان رویه‌ای خواهد بود اما در سرریز با زاویه پیشانی ۹۰ درجه تبدیل رژیم جریان ریزشی به رویه‌ای در دی‌های بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها اتفاق می‌افتد. در این دو مدل، با افزایش زاویه پیشانی پله به خصوص در زوایای تندتر، سرریز تقریباً



شکل ۵- پروفیل‌های طولی جریان بر روی سرریز پلکانی در دبی ۱۱/۶۷ لیتر بر ثانیه

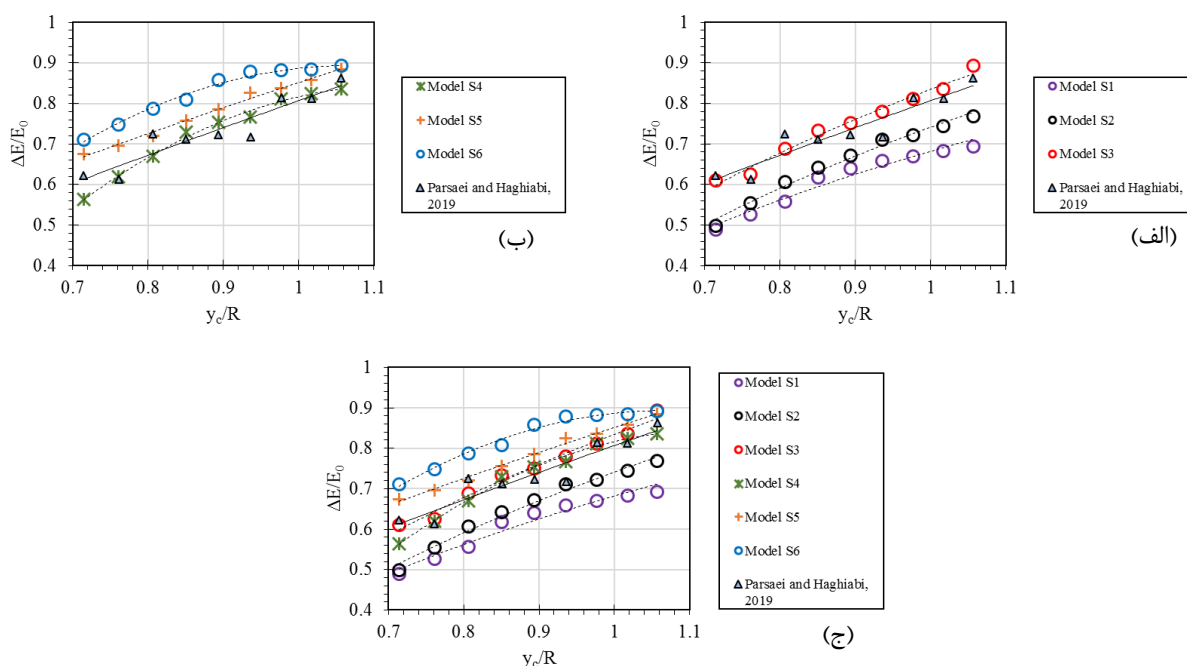
استفاده از بلوک بر روی پله‌ها نیز باعث افزایش استهلاک انرژی جریان نسبت به حالت ساده و بدون بلوک آن می‌شود (شکل ۶-ب). استفاده از بلوک باعث برخورد جریان به موانع و کاهش سرعت آن شده و به تبع آن باعث افزایش عمق پایین دست سرریز می‌گردد که در نهایت منجر به افزایش افت انرژی نسبی جریان می‌گردد. به طوری که در حالت ساده، افت انرژی نسبی سرریز پلکانی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به زاویه ۶۰ درجه به مقدار ۲۸/۸۹ درصد بیشتر است. همچنین در حالت بلوک‌دار نیز افت انرژی سرریز پلکانی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۶۰ درجه به مقدار ۷ درصد و نسبت به زاویه ۴۵ درجه به مقدار ۳۴/۳۲ درصد بیشتر است. در مقایسه با تحقیق پارسایی و حق‌آبی (Parsaei and Haghiabi, 2019) که به بررسی سرریز پلکانی با تاج نیم دایره با پله‌های قائم پرداخته‌اند می‌توان دریافت که در پله‌های بدون بلوک و زاویه قائم افت انرژی نسبت به حالت بلوک‌دار کمتر بوده و با اعمال بلوک به پله‌ها شاهد افزایش افت انرژی نسبی

استهلاک انرژی نسبی

مقادیر مربوط به استهلاک انرژی نسبی سرریز پلکانی با تاج نیم-دایره‌ای و با پیشانی پله شیب‌دار در شکل ۶ در برابر عمق بحرانی نسبی نشان داده است. مشاهده می‌گردد که برای تمامی مدل‌های سرریز پلکانی ساده و بلوک‌دار با افزایش عمق بحرانی نسبی افزایش می‌یابد. در مدل‌های ساده و بدون بلوک (شکل ۶-الف)، با افزایش زاویه پیشانی پله افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. به طوری که افت انرژی در سرریز پلکانی با پیشانی ۹۰ درجه بیشتر از پله با پیشانی ۶۰ و آن هم بیشتر از ۴۵ درجه می‌باشد. علت این امر آن است که در سرریز پلکانی با پیشانی ۹۰ درجه با سقوط جریان از هر پله، تلاطم جریان و تداخل آب و هوا بیشتر شده و جریان‌های چرخشی باعث افزایش استهلاک انرژی در پایین دست سرریز می‌گردد. اما با کاهش زاویه پیشانی پله عملکرد سرریز پلکانی کاهش یافته و به دلیل افزایش شیب پله‌ها، سرریز همانند یک شوت عمل کرده و با سرعت بیشتری به پایین دست منتقل می‌شود.

درصد اختلاف بیشترین و کمترین افت انرژی نسبی برابر با ۵۳/۴۱ درصد می‌باشد. شکل ۷ تغییرات استهلاک انرژی جریان در برابر عمق مزدوج پایین‌دست را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که با افزایش عمق مزدوج پایین‌دست، افت انرژی نسبی نیز روند افزایشی دارد.

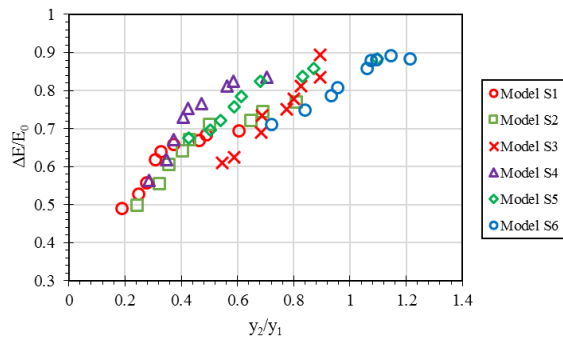
می‌باشیم. از طرفی مقایسه تحقیق حاضر با تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که در حالت بدون بلوک نیز با کاهش شیب تند پله‌ها، افت انرژی نسبی جریان کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۶-ج) که به مقایسه تمام مدل‌ها پرداخته، قابل استنباط است که بیشترین و کمترین افت انرژی نسبی به ترتیب مربوط به سرریز پلکانی بلوک‌دار با زاویه ۹۰ درجه و سرریز پلکانی ساده با زاویه ۴۵ درجه می‌باشد که



شکل ۶- تغییرات استهلاک انرژی نسبی در برابر عمق بحرانی نسبی: الف) مدل‌های ۱ تا ۳ سرریز پلکانی ساده ب) مدل‌های ۴ تا ۶ سرریز پلکانی بلوک‌دار ج) مقایسه مدل‌ها

به کار بردن بلوک بر روی پله‌ها در مقایسه با حالت ساده انرژی جریان را به مقدار بیشتری مستهلک می‌نماید. در حالت ساده و بدون بلوک در پله با زاویه قائم، پس از سقوط جریان از هر پله مقداری از انرژی مستهلک شده و مقدار دیگر آن هنگام پرش هیدرولیکی در پایین‌دست مستهلک می‌گردد اما در زوایای ۶۰ و ۴۵ درجه به دلیل کاهش شیب تند، جریان با سرعت بیشتری پله‌ها را طی کرده و نسبت به حالت قائم افت انرژی کمتری دارند. در هنگام استفاده از بلوک در زاویه ۹۰ درجه علاوه بر ریزش جریان از هر پله و افت ناشی از پرش هیدرولیکی، بلوک‌ها باعث جلوگیری از سرعت مازاد جریان شده و باعث افزایش دو چندان افت انرژی می‌گردد. این در حالی است که در زوایای ۶۰ و ۴۵ درجه به دلیل کاهش شیب تند پله‌ها بلوک‌ها انرژی بسیار زیادی از جریان را گرفته و نسبت به حالت ساده پله‌های زاویه‌دار استهلاک انرژی را افزایش می‌دهند.

بدین صورت که با افزایش زاویه پیشانی پله و همچنین قرارگیری بلوک بر روی پله‌ها عمق مزدوج افزایش یافته و با افزایش عمق مزدوج، افت انرژی نسبی افزایش یافته است. از طرف دیگر استفاده از بلوک بر روی سرریز پلکانی باعث افزایش میزان فشار جریان چرخشی در فضای گوه‌ای شده و افزایش فشار در این نواحی باعث کاهش پدیده کاویتاسیون شده و از تخریب سازه در بلند مدت جلوگیری می‌کند. در مقایسه حالت بلوک‌دار با حالت ساده می‌توان گفت با اینکه در حالت ساده سرریز پلکانی با اعمال زاویه به پیشانی آن افت انرژی کاهش می‌یابد اما میزان استهلاک انرژی که این مدل‌ها ایجاد می‌کنند نسبت به سرریزهای مایل و شوت‌ها زیاد بوده و حداقل ۵۰ و حداکثر ۷۰ درصد از انرژی جریان را مستهلک نموده است. به عبارت دیگر در صورت عدم استفاده از بلوک‌ها نیز، سازه سرریز به خودی خود مقدار قابل توجهی از انرژی جریان را کاسته و

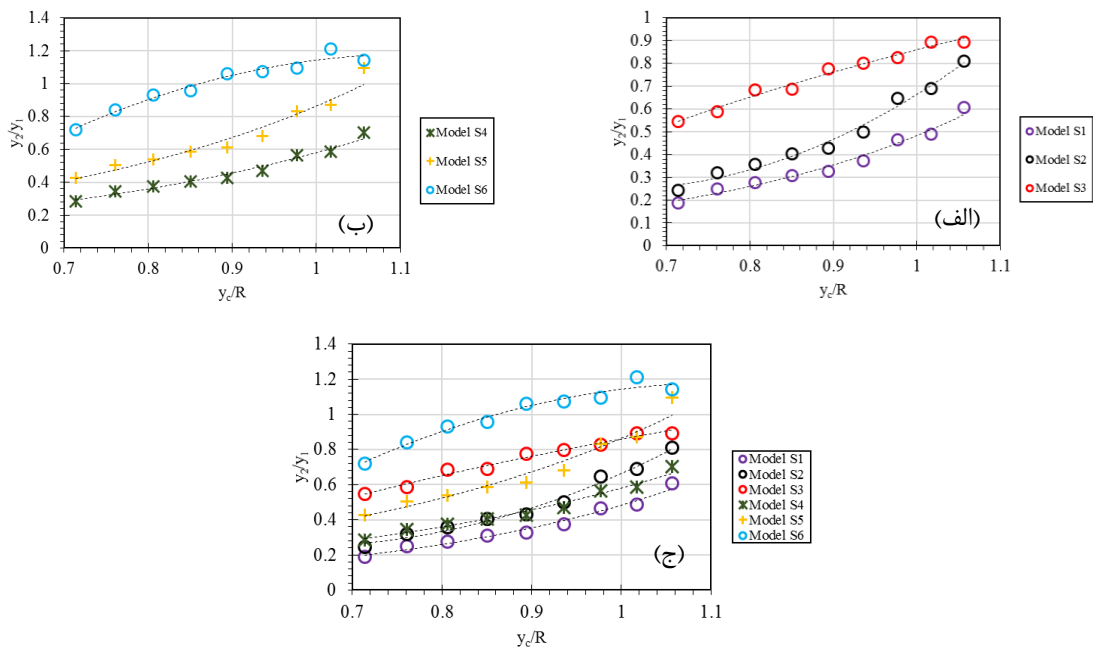


شکل ۷- تغییرات استهلاک انرژی نسبی در برابر عمق نسبی مزدوج

دیگر با توجه به شکل (۸-ب) استفاده از بلوک بر روی پله‌ها به سبب کاهش سرعت جریان، عق جریان افزایش یافته که در این حالت نیز مشابه حالت ساده و بدون بلوک با افزایش زاویه پیشانی، شاهد افزایش عمق نسبی در پایین‌دست سرریز مذکور خواهیم بود. همچنین استفاده از بلوک نیز باعث افزایش ۱۹/۰۵، ۲۹/۰۲ و ۳۸/۳۷ درصدی به ترتیب زوایای ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه نسبت به حالت ساده و بدون بلوک گردیده است. از لحاظ کاربردی بودن بلوک‌ها می‌توان به کاهش میزان استهلاک انرژی اشاره کرد که این امر باعث می‌شود که ابعاد حوضچه آرامش کوچک‌تر شده و باعث کاهش هزینه‌های احداث سازه مورد نظر می‌گردد.

عمق نسبی و عدد فرود پایین‌دست

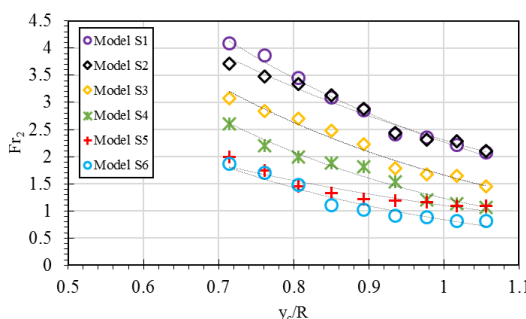
براساس آنالیز ابعادی انجام گرفته، مقادیر عمق نسبی پایین‌دست به ازای سه زاویه برای پیشانی پله سرریز پلکانی در برابر عمق بحرانی نسبی مطابق شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که در تمامی مدل‌های به کار رفته در تحقیق حاضر به ازای افزایش عمق بحرانی نسبی، مقادیر عمق نسبی پایین‌دست روند افزایشی به خود گرفته است. در مدل‌های ساده و بدون بلوک، با افزایش زاویه شیب پیشانی پله، عمق نسبی پایین‌دست نیز افزایش یافته است (شکل ۸-الف). بدین صورت که افزایش عمق نسبی پایین‌دست در سرریز با زاویه پیشانی ۹۰ درجه نسبت به ۶۰ درجه به مقدار ۴۷/۸۱ درصد و نسبت به زاویه ۴۵ درجه به مقدار ۵۷/۵۶ درصد می‌باشند. از طرف



شکل ۸- تغییرات عمق نسبی پایین‌دست در برابر عمق بحرانی نسبی: الف) مدل‌های ۱ تا ۳ سرریز پلکانی ساده ب) مدل‌های ۴ تا ۶ سرریز پلکانی بلوک‌دار

پله‌های سرریز باعث افزایش عمق جریان در پایین دست شده که این عامل باعث کاهش شدید عدد فرود مقطع پایین دست می‌گردد که این مقدار کاهش عدد فرود در سرریز دارای بلوک بیشتر از سرریز ساده و بدون بلوک می‌باشد. بطوریکه در مدل ۶ که شامل سرریز پلکانی با زاویه ۹۰ درجه بلوک‌دار می‌باشد، عدد فرود پایین دست در دبی‌های بالا باعث زیربحرانی شدن رژیم جریان در پایین دست گردیده است. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است با استفاده از بلوک بر روی سرریز پلکانی و کاهش شدید عدد فرود پایین دست، می‌توان ابعاد حوضچه آرامش را کوچک‌تر کرده و یا در مواردی از احداث حوضچه آرامش در پایین دست صرف‌نظر کرد.

هم‌چنین شکل ۹ تغییرات عدد فرود پایین دست در برابر عمق بحرانی نسبی را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، عدد فرود پایین دست روند نزولی داشته و مقدار آن کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش دبی جریان میزان افت انرژی افزایش می‌یابد به همین دلیل با کاهش انرژی مخرب جریان، عدد فرود پایین دست کاهش می‌یابد. این کاهش عدد فرود در سرریز با زاویه پیشانی ۹۰ درجه به دلیل تلاطم بسیار زیاد جریان، جریان‌های چرخشی در فضای گوه‌ای و جریان ریزشی قائم از هر پله، به میزان حدود ۶۰ درصد بیشتر از سرریز های پلکانی با زوایای پیشانی ۴۵ و ۶۰ درجه می‌باشند. بازه تغییرات عدد فرود پایین دست سرریز پلکانی در جدول ۲ ارائه شده است. استفاده از بلوک بر روی



شکل ۹- تغییرات عدد فرود پایین دست در برابر عمق بحرانی نسبی

عبوری از روی سرریز شده است.

روابط چند متغیره غیرخطی

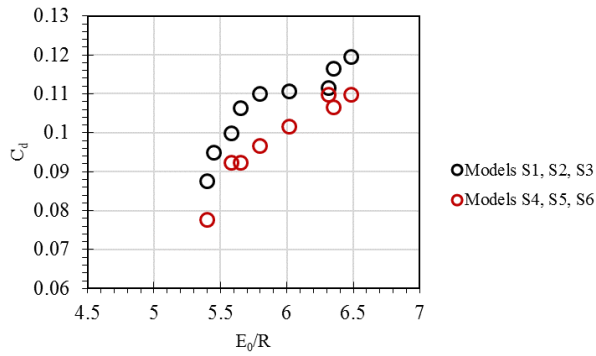
برای بررسی تاثیر پارامترهای مستقل و همچنین تمین مقادیر عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی، روابط تجربی ارائه گردید. روابط ارائه شده با مدل SPSS و مدل رگرسیون چند متغیره غیرخطی بدست آمده است. رابطه ۱۸ جهت تخمین عمق استهلاک انرژی نسبی و رابطه ۱۹ برای تخمین و محاسبه عمق نسبی پایین دست ارائه شده‌اند و مقادیر پارامترهای ثابت و معیارهای ارزیابی آن در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = a(Fr_0)^b \times c\left(\frac{y_{cr}}{R}\right)^d \times \ln(\theta) \quad (18)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{a(Fr_0)^b \times \ln(\theta)}{c\left(\frac{y_{cr}}{R}\right)^d} \quad (19)$$

ضریب دبی جریان

براساس آنالیز ابعادی انجام‌گرفته، ضریب دبی جریان در سرریز پلکانی تنها تابعی از شرایط بالادست سرریز بوده و تغییر زوایای پیشانی پله، تغییر تعداد و ابعاد پله هیچ تاثیری در افزایش یا کاهش ضریب دبی جریان نخواهد داشت. در این صورت ضریب دبی جریان تابعی از انرژی نسبی بالادست بوده که روند تغییرات آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است که با دقت در این شکل می‌توان دریافت که با افزایش انرژی نسبی بالادست سرریز پلکانی، ضریب دبی جریان در تمامی مدل‌ها افزایش می‌یابد اما ضریب دبی جریان در مدل‌هایی که بر روی پله‌ها از بلوک استفاده شده کمتر از مدل‌هایی است که سرریز بدون بلوک تعبیه شده است. این درحالی است که تغییرات ضریب دبی عبوری در مدل‌های بدون بلوک و هم‌چنین مدل‌های بلوک‌دار در مقایسه با خودشان تقریباً مقدار برابری دارند. علت این امر آن است که استفاده از بلوک بر روی پله‌ها باعث افزایش هد کل در بالادست سرریز نسبت به حالت بدون بلوک شده و از آن‌جائیکه ضریب دبی با هد کل آب رابطه معکوس دارد باعث کاهش ضریب دبی جریان



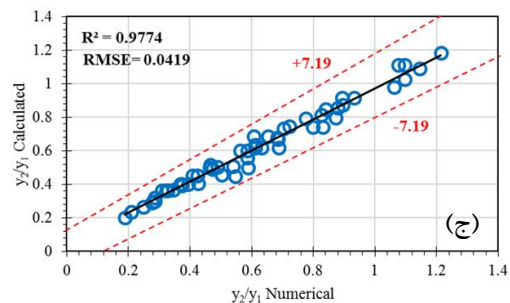
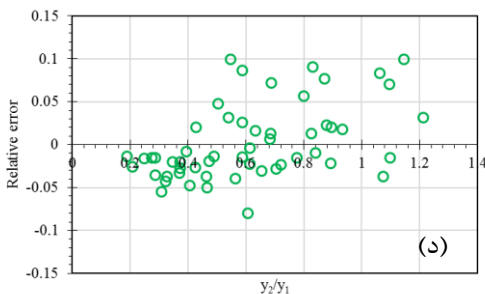
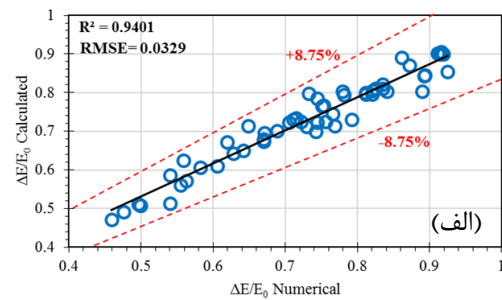
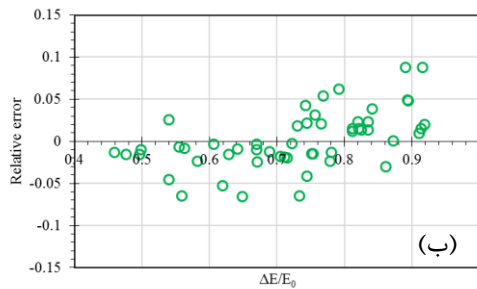
شکل ۱۰- تغییرات ضریب دبی جریان در برابر انرژی نسبی بالادست سرریز پلکانی

جدول ۵- مقادیر پارامترهای ثابت روابط (۱۸) و (۱۹)

پارامترهای وابسته	پارامترهای ثابت				معیارهای ارزیابی		
	a	b	c	d	RMSE	R ²	KGE
$\frac{\Delta E}{E_0}$	-۰/۲۹۲۷	-۰/۳۱۵	۰/۲۹۳	۰/۶۹۹	۰/۰۳۲۹	۰/۹۴۰۱	Very good
$\frac{y_2}{y_1}$	-۰/۱۸۲۸	-۰/۴۰۷	۳/۴۳۶	-۲/۵۱۱	۰/۰۴۱۹	۰/۹۷۷۴	Very good

نسبی پایین‌دست با خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین به ترتیب ۰/۰۴۱۹ و ۰/۹۷۷۴ و با خروجی حاصل از رابطه استهلاک انرژی نسبی با خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین به ترتیب ۰/۰۳۲۹ و ۰/۹۴۰۱ تطابق بسیار مطلوبی با یکدیگر دارند.

پس از استخراج روابط تجربی برای تخمین عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی، مقادیر حاصل از داده‌های عددی با مقادیر خروجی حاصل از روابط ۱۷ و ۱۸ مقایسه گردیده و نتایج آن در شکل‌های ۱۱ نشان داده شده است. چنانچه از شکل استنباط می‌شود در هر دو مورد داده‌های عددی با خروجی حاصل از رابطه عمق



شکل ۱۱- (الف و ج) نمودار مقایسه مقادیر محاسباتی و عددی استهلاک انرژی و عمق مزدوج، ب و د) نمودار پراکندگی خطای نسبی داده‌ها

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تاثیر شیب پیشانی پله سرریز پلکانی با تاج نیم دایره‌ای به صورت ساده و بلوک‌دار بر پارامترهای هیدرولیکی سرریز پلکانی با استفاده از مدل FLOW 3D مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF و دینامیک سیالات محاسباتی و برای مدل آشفتگی از مدل RNG استفاده گردید. برای شیب‌دهی به قسمت پیشانی پله سرریز پلکانی از زوایای ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه و از المان‌های مکعب‌مستطیلی به صورت زیگزاگی بر روی پله استفاده گردید. بررسی نتایج نشان داد که در حالت کلی در سرریز پلکانی با تاج نیم‌دایره‌ای و در تمامی زوایای پیشانی پله بدون بلوک، استهلاک انرژی نسبی با افزایش عمق بحرانی نسبی جریان، افزایش می‌یابد بطوریکه این افزایش در زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۶۰ درجه و ۴۵ درجه به ترتیب ۱۳/۸۸ و ۲۸/۸۹ درصد بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر نتایج نشان داد که استفاده از بلوک بر روی پله‌های سرریز پلکانی در تمامی مدل‌ها استهلاک انرژی نسبی را افزایش می‌دهد به طوری که بیشترین استهلاک مربوط به پله بلوک‌دار با زاویه پیشانی ۹۰ درجه و کمترین استهلاک انرژی مربوط به پله بلوک‌دار با زاویه پیشانی ۴۵ درجه بوده که درصد اختلاف بیشترین و کمترین استهلاک انرژی در حدود ۶۰/۳۸ درصد می‌باشد. همچنین این افزایش در زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۶۰ درجه و ۴۵ درجه به ترتیب ۷ درصد و ۲۴/۳۲ درصد بیشتر می‌باشد. با افزایش زاویه پیشانی پله، عدد فرود پایین دست روند کاهشی داشته اما این روند کاهشی در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه کمتر بوده ولی زاویه پیشانی ۹۰ درجه عدد فرود را به میزان ۶۲ درصد بیشتر از سایر زوایا کاهش داده است. از طرفی استفاده از بلوک باعث کاهش شدید عدد فرود پایین دست نسبت به حالت ساده شده به طوری که در پله بلوک‌دار با زاویه پیشانی ۹۰ درجه در دبی‌های بالا عدد فرود پایین دست در محدوده رژیم زیربحرانی قرار گرفته است. همچنین در حالت کلی در مدل بدون بلوک با افزایش عمق بحرانی نسبی، اعماق نسبی پایین دست افزایش یافته که در مقایسه با مدل‌های بدون بلوک با افزایش زاویه پیشانی پله، اعماق نسبی پایین دست (مزدوج) افزایش می‌یابد. این در حالی است که در مدل بلوک‌دار نیز به دلیل کاهش سرعت جریان و افزایش تلاطم و تداخل آب و هوا در میان بلوک‌ها اعماق نسبی پایین دست در مدل‌های بلوک‌دار نیز روند افزایشی به خود گرفته است. با توجه به وسعت مطالب موجود در زمینه سرریزهای پلکانی، پیشنهاد می‌گردد که تحقیقاتی با موضوع توزیع سرعت، توزیع فشار، کاویتاسیون و ... نیز در ارتباط با موضوع تحقیق حاضر انجام پذیرند.

منابع

- اخگر، س. و روشنگر، ک. ۱۳۹۹. مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر ایجاد حفره روی پله‌های سرریز پلکانی بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی در جریان رویه‌ای. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۲ (۸): ۱-۱۲.
- ترومیده، ف.، فضل اولی، ر.، عمادی، ع. و میرناصری، م. ۱۳۹۷. بررسی تاثیر پروفیل طولی سرریز پلکانی بر استهلاک انرژی جریان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۲): ۲۴۸-۲۵۹.
- روشنگر، ک. و اخگر، س. ۱۳۹۸. مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر المان‌های گوه‌ای شکل بر ضریب زبری و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۱): ۷۸-۸۸.
- سلماسی، ف.، بینا، م. و موسوی جهرمی، س.ح. ۱۳۸۲. ارزیابی افت کارمایه جریان از روی سرریزهای پلکانی با استفاده از شبیه‌فیزیکی. مجله کشاورزی. ۲۶: ۵۷-۷۱.
- قادری، ا. و عباسی، س. ۱۳۹۸. بررسی عددی عملکرد سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای بر روی استهلاک انرژی جریان‌های غیرریزشی. نشریه هیدرولیک. ۱۴ (۳): ۱-۱۶.
- قادری، ا. و عباسی، س. ۱۴۰۰. بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی همراه با الحاق المان‌هایی روی پله. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵ (۳): ۴۹۴-۵۰۹.
- Amador, A., Sanchez-Juny, M., Dolz, J., Sanchez-Tembleque, M. and Puertas J. 2004. Velocity and Pressure Field in Skimming Flow in Stepped Spillways. *Hydraulics of Dams and River Structures*. 179-285. DOI: 10.1201/b16994-39.
- Arjenaki, M.O., Sanayei, H.R.Z. 2020. Numerical investigation of energy dissipation rate in stepped spillways with lateral slopes using experimental model development approach. *Modeling Earth Systems Environ*. 6: 605-616. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00714-z>
- Chamani, M. R. and Rajaratnam, N. 1999. Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125: 969-971.
- Chen, Q., Dai, G. and Liu, H. 2002. Volume of fluid model for turbulent numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 128 (70): 683-688.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E. and Najibi, A. 2022a. Experimental study of hysteretic behavior of supercritical regime on hydraulic parameters of flow against gabion contraction. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 53(1): 33-44.

- on pooled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140 (4): 04014002
- Ghaderi, A. and Abbasi, S. 2021. Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendence Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Water*. 13(7):957.
- Ghaderi, A., Abbasi, S., Abraham, J. and Azamathulla, H.M. 2020. Efficiency of trapezoidal labyrinth shaped stepped spillways. *Flow Measurement and Instrumentation*, 72: 101711.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 377(1-2), 80–91.
- Hamedi, A., Mansoori, A., Malekmohamadi, I. and Roshanaei, H. 2011. Estimating energy dissipation in stepped spillways with reverse inclined steps and end sill. *World Environmental and Water Resources Congress. Bearing Knowl Sustain. ASCE*.
- Nikseresht, A.H., Talebbeydokhti, N. and Rezaei, M.J. 2013. Numerical simulation of two-phase flow on step-pool spillways. *Scientia Iranica*. 20 (2): 222-230.
- Nohani, E., bahadoribirgani, B., Jalili, D. and Mirazizi, S. 2015. Study The Effect Of The Number Of Steps On Energy Dissipation Of Stepped Spillways In Non-Nappe or Skimming Flow. *Journal of Novel Applied Sciences*. 4 (9): 932-939.
- Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. and Shiri, J. 2014. Modeling Energy Dissipation over Stepped Spillways Using Machine Learning Approaches. *Journal of Hydrology*. 508: 254-265.
- Sánchez-Juny, M., Bladé, E. and Dolz, J. 2008. Analysis of pressures on a stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research*. 46(3): 410-414.
- Tabbara, M., Chatila, J. and Awwad, R. 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers and Structures*. 83: 2215–2224.
- Tongkratoke, A., Chinnarasri, C., Pornprommin, A., Dechaumphai, P. and Juntasaro, V. 2009. Non-linear turbulence models for multiphase recirculating freesurface flow over stepped spillways. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 23(5): 401–409.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Bagherzadeh, M., Ghaderi, A., Kuriqi, A., Najibi, A. and Ricardo, A.M. 2021c. Laboratory Investigation of Hydraulic Parameters on Inclined Drop Equipped with Fishway Elements. *Symmetry*. 13: 1643. <https://doi.org/10.3390/sym13091643>.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A. and Abraham, J. 2021b. Three-Dimensional Study of the Effect of Block Roughness Geometry on Inclined Drop. *Numerical Methods in Civil Engineering*. 6 (1): 1-9.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaeli, R., Sadeghfam, S. and Abraham, J. 2020. Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *Journal of Groundwater Science and Engineering*. 8(4): 396-406.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Kuriqi, A. and Abraham, J. 2021a. Three-Dimensional Investigation of Hydraulic Properties of Vertical Drop in the Presence of Step and Grid Dissipators. *Symmetry*. 13, 895. <https://doi.org/10.3390/sym13050895>
- Daneshfaraz, R., Joudi, A.R., Ghahramanzadeh, A. and Ghaderi, A. 2016. Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. *Advances and Applications in Fluid Mechanics*. 19(4): 811–822.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Aminvash, E. and Abraham, J. P. 2022b. Experimental Investigation of Multiple Supercritical Flow States and the Effect of Hysteresis on the Relative Residual Energy in Sudden and Gradual Contractions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 1-16.
- Dong, Z., Wang, J., Vetsch, D.F., Boes, R.M. and Tan, G. 2019. Numerical Simulation of Air–Water Two-Phase Flow on Stepped Spillways behind X-Shaped Flaring Gate Piers under Very High Unit Discharge. *Water*. 11: 1956. <https://doi.org/10.3390/w11101956>.
- Felder, S., Guenther, P. and Chanson, H. 2012. Air–Water Flow Properties and Energy Dissipation on Stepped Spillways: a Physical Study of Several Pooled Stepped Configurations. *Hydraulic Model Report No. CH87/12, School of Civil Engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia*.
- Felder, S. and Chanson, H. 2014. Effects of step pool porosity upon flow aeration and energy dissipation

Numerical Investigation of the Effect of the Frontal Slope of Simple and Blocky Stepped Spillway with Semi-Circular Crest on Its Hydraulic Parameters

E. Aminvash¹, K. Roushangar^{2*}

Received: Sep.15, 2022

Accepted: Nov.18, 2022

Abstract

Spillways are used to transfer and discharge the excess water collected behind the dams downstream. There are different types of spillways in terms of geometry and place of use, which are used based on the topography of the region, hydraulic and hydrological conditions, etc. Based on this, in the current research, the effect of the frontal slope of a simple and blocky stepped spillway with a semi-circular crest on the hydraulic parameters of the spillway has been investigated using the Flow-3D® model and the RNG turbulence model. Three values were considered for the slope of the front area of the spillways step and the range of critical depth was between 11.9 and 14.5 cm. Numerical simulation showed that increasing the angle of the front of the step relative to the horizon, or in other words, reducing the slope of the front of the step, has increased the relative energy dissipation, so that the amount of energy dissipation increases in the spillway with a 90 degree step compared to a step with a 60 degree angle are 13.88% and 28.89% higher than the 45 degree angle stairs. On the other hand, the use of blocks has increased the consumption of energy in the overflow with a 90-degree step compared to a 60-degree angle step by 7% and compared to a 45-degree angle step by 32.24%. Also, the value of the downstream relative depth increases with the increase of the flow rate and with the increase of the downstream energy loss, the descent number of the downstream area of the stepped spillway decreases, and this decrease is about 60% more at the angle of 90 degrees than the angles were 45 and 60 degrees.

Keywords: Flow-3D Numerical Model, Model with and without Blocks, Relative Energy Dissipation, Stepped Spillways

1- Ph. D Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran (Email: E.aminvash@tabrizu.ac.ir)

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran (*Corresponding Author Email: kroshangar@yahoo.com)