



مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر ایجاد حفره روی پله های سرریز پلکانی بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی در جریان رویه ای

سمیرا اخگر^{۱*}، کیومرث روشنگر^۲

^۱ دانش آموخته دکتری سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۰۳
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۳۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۰۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹

کلمات کلیدی:

سرریز پلکانی
پله های حفره دار
استهلاک انرژی
توزیع فشار و سرعت
Flow-۳D

خلاصه: یکی از مشخصه های بارز در عملکرد سرریز پلکانی، قابل ملاحظه بودن استهلاک انرژی در طول آن در مقایسه با انواع سرریزهای دیگر است. با توجه به این ویژگی، کسب دیدگاهی دقیق تر در ارتباط با پارامتر استهلاک انرژی و نهایتاً افزایش مقدار آن، محور اکثر تحقیقات مربوط به این نوع از سرریزها بوده است. در این تحقیق، جهت افزایش و بهبود اثربخشی استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی طرحی در نظر گرفته شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از مدل عددی Flow-۳D تأثیر ایجاد حفره روی پله بر تغییرات سرعت و فشار، ارتفاع آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی بررسی شده و مدل مناسب از جنبه بیشترین استهلاک انرژی در آزمایشگاه ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد که ایجاد حفره روی پله های سرریز پلکانی موجب کاهش سرعت تا حدود (۶۹٪-۸۲٪) و کاهش ارتفاع آب در پایین دست سرریز تا حدود ۳۳٪ و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی تا حدود ۴ برابر افزایش یافته است. با ترسیم پروفیل های توزیع فشار در لبه قائم پله ملاحظه شد که مقدار فشار منفی در دیواره قائم پله تا حدود ۸۲٪ کاهش و فشار مثبت در محل وجود حفره و در داخل حفره به ترتیب تقریباً ۳ و ۴ برابر افزایش یافته است. فشار منفی در پروفیل های توزیع فشار روی کف پله به فشار مثبت تبدیل شده و فشار مثبت در نزدیکی لبه به دلیل وجود حفره افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که درصد خطای پارامترهای مورد بررسی در مدل عددی و آزمایشگاهی بسیار اندک و در حد قابل قبول بوده که نشان از تطابق مناسب بین داده های عددی و آزمایشگاهی است.

۱-مقدمه

مستهلك نمودن انرژی جریان عبوری از سرریز جهت جلوگیری از وارد آمدن خسارت به پایین دست بسیار حائز اهمیت است. یکی از بهترین راهکارهای مستهلك نمودن انرژی استفاده از سرریزهای پلکانی بوده که با استهلاک مناسب جریان باعث کوچکتر شدن ابعاد حوضچه آرامش واقع در پایین دست سرریز می گردد. به علت تمایل روزافزون طراحان به استفاده از سرریزهای پلکانی، محققین نیز درصدد افزایش کارایی این سرریزها بر آمده و تحقیقات زیادی به صورت آزمایشگاهی و عددی در این زمینه انجام داده اند که از جمله

آنها تلاش جهت افزایش میزان استهلاک انرژی می باشد.

هورنر [۱] از اولین کسانی بود که تحقیقات علمی را بر روی سرریزهای پلکانی آغاز نمود. کریستودولو [۲] با انجام یک سری آزمایش روی مدل های فیزیکی سرریز پلکانی با نسبت $\frac{h}{l} = 0.7$ (ارتفاع پله به طول پله) نتیجه گرفت که عوامل مؤثر در اتلاف انرژی $\frac{y_c}{h}$ و تعداد پله ها N می باشد که y_c عمق بحرانی و h ارتفاع پله می باشد.

سلماسی و همکاران [۳] اثر تعداد پله ها را در استهلاک انرژی با استفاده از ۲۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی و صاف (بدون پلکان) که دارای شیب و تعداد پله های مختلف بودند مورد بررسی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: samira.akhgar66@yahoo.com



مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG توانایی بالایی در مدلسازی الگوی جریان و کاویتاسیون دارد. دهدار بهبهانی و پارسایی [۱۵] الگوی جریان روی دیواره های کناری سرریز سد بالارود را با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی قرار داد. مروتی و همکاران [۱۶] با تغییر در هندسه و ایجاد استخر روی پله های سرریز پلکانی، تغییرات الگوی جریان و استهلاك انرژی را با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی قرار داد.

روشنگر و همکاران [۱۷] با بکارگیری روش های داده محور ضریب دبی روی سرریز پلکانی برای جریان های تیغه ای و رویه ای را مورد بررسی قرار داده و با روش GEP روابطی ارائه دادند. پارسایی و همکاران [18, 19, 20] و حقیایی [۲۱] توانایی روش های هوشمند و الگوریتم های تکاملی از جمله GP, MARS, MLP, ANN, SVM و GMDH را جهت مدلسازی و پیش بینی استهلاك انرژی روی سرریزهای پلکانی با استفاده از داده های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد این روش ها توانایی بالای در مدلسازی و پیش بینی استهلاك انرژی روی سرریزهای پلکانی دارند. سوری و مجتهدی [۲۲] با بکارگیری سیستم استنتاج فازی تاثیر تغییرات هندسی سرریز پلکانی شامل تعداد پله و شیب کف پله بر استهلاك انرژی را مورد بررسی قرار داد.

در این تحقیق، جهت افزایش و بهبود اثربخشی استهلاك انرژی، روی پله های سرریز پلکانی حفراتی با شکل و چیدمان مختلف ایجاد شده و تاثیر هر یک از آنها بر تغییرات سرعت و فشار، ارتفاع آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاك انرژی روی سرریز پلکانی با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل مناسب از جنبه بیشترین استهلاك انرژی در آزمایشگاه ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع ایده اصلی ایجاد حفره روی پله ها جهت افزایش زبری پله ها و ایجاد پله های کوچکتر بر روی پله های اصلی و بررسی تاثیر آن بر استهلاك انرژی است.

۲- مواد و روش ها

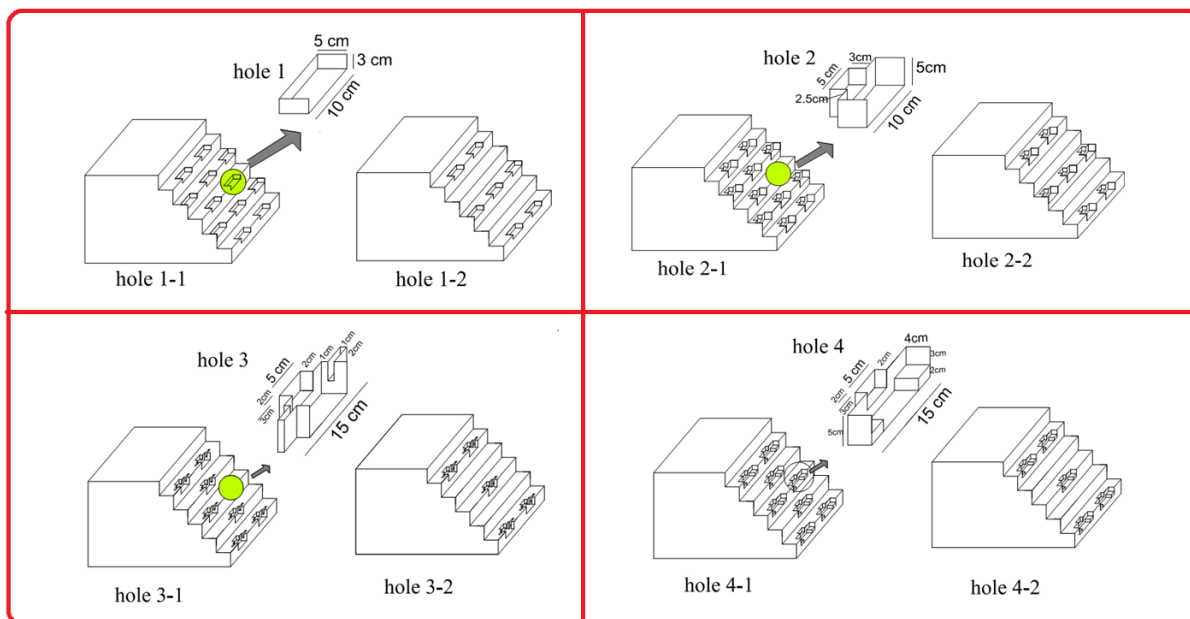
۲-۱- مدل عددی

در این تحقیق از روش عددی حجم محدود (نرم افزار-Flow) 3D برای بررسی تاثیر ایجاد حفره روی پله ها بر تغییرات سرعت و فشار درکف و لبه پله، ارتفاع آب پایین دست سرریز و در نتیجه

قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که میزان استهلاك انرژی نسبی با افزایش دبی جریان کاهش می یابد. محمد ولی سامانی و همکاران [۴] با استفاده از مدل آزمایشگاهی اصول حاکم بر هیدرولیک جریان و طراحی سرریزهای پلکانی را مورد بررسی قرار دادند و روابطی را برای محاسبه افت انرژی بدست آوردند. ترابی [۵] و همکاران با ایجاد زبری روی پله های سرریز پلکانی، عملکرد این نوع سرریزها را بررسی نموده که نتایج نشان داد با ایجاد زبری روی پله استهلاك انرژی ۲۰-۱۵٪ افزایش می یابد. فلدر و همکاران [۶] چندین شکل از سرریزهای پلکانی با پله های لبه دار و استخری را مورد آزمایش قرار داده که نتایج نشان داد با استخری نمودن پله ها استهلاك انرژی افزایش می یابد. برخی محققین نیز در پیشبرد و پیشرفت نتایج آزمایشگاهی به مطالعه عددی پرداخته از جمله کسادی [۷] برای تعیین فشار روی تاج سرریز از روش عددی به صورت دوبعدی استفاده کرد. هو و همکاران [۸] پروفیل سرریز استاندارد را در حالات مختلف با استفاده از نرم افزار FLOW-3D بررسی کردند و نتایج آن را با نمودارهای موجود مقایسه نمودند. چن و همکاران [۹] با استفاده از روش VOF و $K-\epsilon$ در نرم افزار فلوئنت به شبیه سازی عددی سرریز پلکانی پرداختند و پروفیل های سطح آب، سرعت و فشار روی سرریز و گردابه ها را بدست آوردند. نتایج حاصل از شبیه سازی حاکی از آن بود که تطابق قابل ملاحظه ای با نتایج آزمایشگاهی دارد. سانچز و همکاران [۱۰] به تحلیل میدان فشار روی لبه افقی و عمودی پله های سرریز پلکانی بتن غلتکی پرداختند. روشنگر و همکاران [۱۱] با بکارگیری روش های هوشمند و الگوریتم تکاملی استهلاك انرژی روی سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از داده های آزمایشگاهی برای هر یک از جریان های تیغه ای و رویه ای روابطی ارائه دادند. مروتی و اقبال زاده [۱۲] تغییرات فشار و انرژی آشفتگی روی سرریزهای پلکانی با بکارگیری مدل عددی VOF و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG مورد بررسی قرار دادند. سوری و مجتهدی [۱۲] به بررسی الگوی جریان عبوری روی سرریز پلکانی با استفاده از مطالعه عددی و مدل فیزیکی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش افت انرژی در رژیم جریان تیغه ای بسیار بیشتر از رژیم جریان رویه ای می باشد. پارسایی و همکاران [۱۳، ۱۴] به ترتیب الگوی جریان روی سرریز سد کمال صالح و کاویتاسیون روی شوت انتهای سرریز سد بالارود را با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داده که

شکل ۱: هندسه و چیدمان سرریز پلکانی حفره دار مورد بررسی در مطالعه عددی

Fig.1. Geometry and alignment of the holes on the stepped spillway in the numerical study



جدول ۱: شرایط مرزی مدل‌سازی عددی در نرم افزار Flow-3D

Table1. Boundary conditions for numerical modeling in Flow-3D

Direction	Mesh plane		Boundaries	
	min	max	min	Max
X	-۰.۵	۳.۵	Volume rate	of Outflow
Y	۰	۰.۵	Wall	Wall
Z	۰	۰.۹	Wall	Symmetry

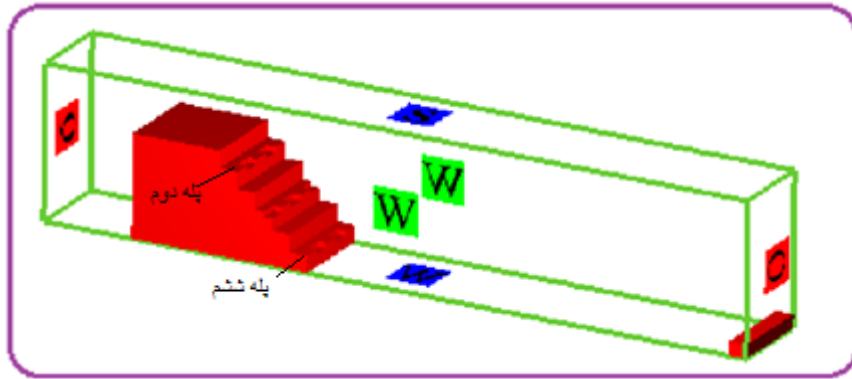
برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد از روش جزء حجم سیال (VOF) برای تعیین سطح مشترک دو سیال (آب و هوا) استفاده شده است. شرایط مرزی به صورت مقادیر جدول ۱ است. جهت جریان در طول فلوم (X)، عرض کانال در جهت (Y) و ارتفاع سرریز در جهت (Z) مدل‌سازی شده است. همچنین برای جلوگیری از تخلیه پایین دست فلوم از بلوک با ارتفاع ۱۰ سانتیمتر استفاده شده است. نمایی از مدل عددی همراه با شماره پلکان‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱-۱-۲- معادلات حاکم بر جریان در مدل عددی Flow-3D

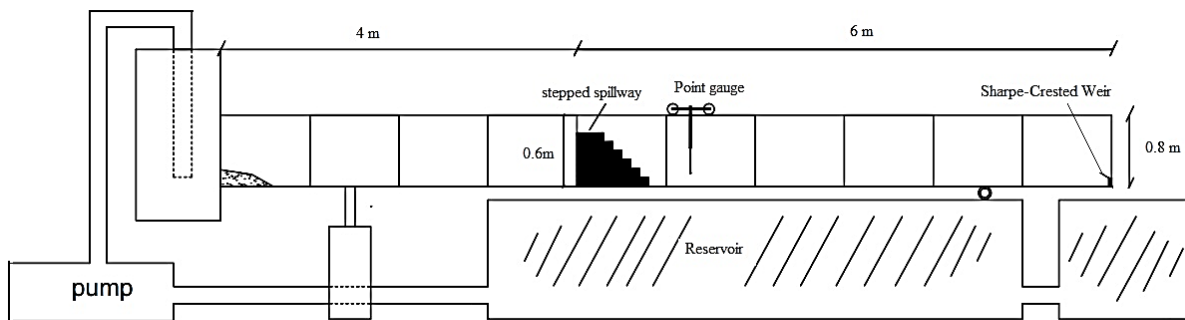
به‌منظور شبیه‌سازی میدان سرعت از معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفتنه استفاده شد. این معادلات

استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی استفاده شده است. بدین منظور شکل ۴ حفره با ۲ چیدمان مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه و چیدمان این حفرات در شکل ۱ آورده شده است. در این شکل منظور از 1-hole 2 یعنی چیدمان ۱ از حفره نوع ۲ و مفهوم 2-hole 4 یعنی چیدمان ۲ از حفره نوع ۴ است. مجموع ۹ مدل (۸ مدل سرریز پلکانی حفره دار و یک مدل سرریز پلکانی استاندارد) با دبی‌های متفاوت در نرم افزار شبیه‌سازی شده است.

برای ایجاد هندسه میدان جریان ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Auto Cad-3d فایلی به نام STL تهیه می‌گردد. شبکه‌بندی در دستگاه مختصات کارتزین بوده است. جهت شبکه‌بندی غیریکنواخت، روی تاج سرریز و در پایین دست سرریز از مش ریزتر استفاده شده است.



شکل ۲: مدل عددی در نرم افزار Flow-3D
Fig. 2. The numerical model in the Flow-3D



شکل ۳: شماتیک کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی
Fig.3. General Schematics of laboratory flume facilities

در جهت‌های x, y, z هستند G_x, G_y, G_z شتاب‌های بدنه، f_x, f_y, f_z شتاب‌های ناشی از لزجت هستند. نرم‌افزار *Flow3d* کل میدان جریان را بصورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد و از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفصال، معادلات منفصل می‌شوند.

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه دانشکده عمران دانشگاه تبریز در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با سیستم جریان آزاد انجام گردید. جنس دیواره‌های فلوم پلکسی گلاس و کف فلزی (گالوانیزه) بود که جهت تامین جریان آب از پمپ با قابلیت تغییر دبی استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال از دبی سنج آلتراسونیک نصب شده بر روی لوله مکش پمپ استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری عمق آب از عمق سنج با دقت ۰/۱

شامل معادلات پیوستگی و مومنوم در دستگاه مختصات کارترین به شرح زیر است:

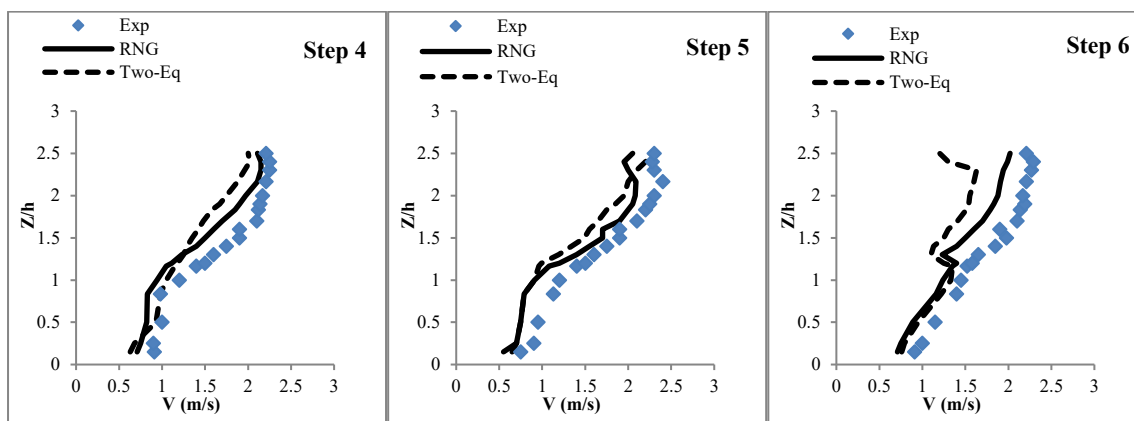
$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

که در آن، V_F کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ چگالی سیال، R_{SOR} برابر چگالی چشمه است. u, v, w اجزای سرعت در جهت‌های x, y, z هستند. A_x, A_y, A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان



شکل ۴: مقایسه مدل های آشفتگی در نرم افزار Flow-3D
 Fig. 4. Comparison of turbulence models in Flow-3D

جدول ۲. درصد خطای میانگین برای مدل های آشفتگی
 Table 2. Percent average error for turbulence models

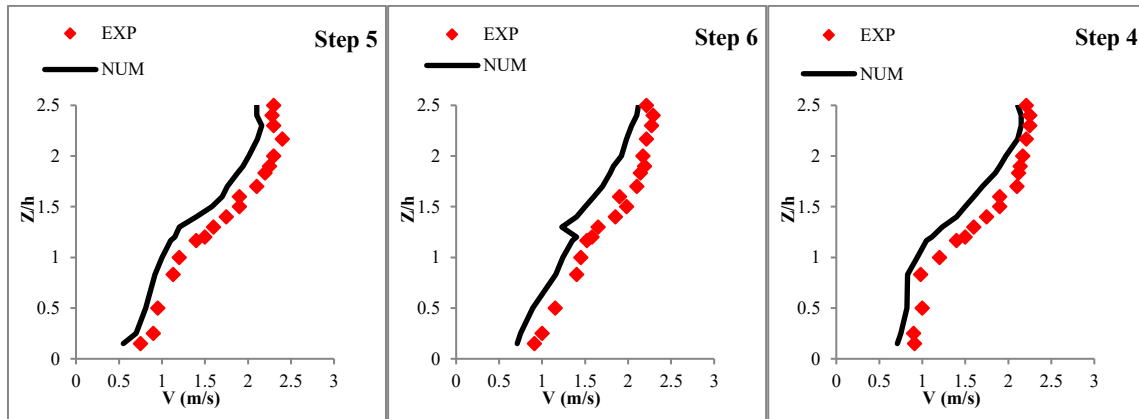
مدل آشفتگی	پله ۴ام	پله ۵ام	پله ۶ام
K-ε (RNG)	۹/۲۳	۹/۷۸	۱۱/۰۴
Two-equation(K-ε)	۱۳/۷۸	۱۴/۲۸	۱۸/۹۳

میلیمتر استفاده شد که این عمق سنج در طول و عرض کانال متحرک بوده و ارتفاع آب روی سرریز و عمق آب در کانال قابل اندازه گیری بود (شکل ۳). مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی استاندارد دارای ۶ پله با ارتفاع و طول ۱۰ سانتیمتر ($w=h=10\text{cm}$) بوده و عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۵۰ سانتیمتر (هم عرض کانال) و ۶۰ سانتیمتر بود. محدوده تغییرات دبی ۱۰ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه بود. با بررسی معادلات نیمه تجربی موجود برای طول جریان توسعه یافته در کانال، سرریز پلکانی در ۴ متری بالادست نصب گردید. همچنین در بالادست فلوم یک منبع آرام کننده جریان وجود داشت که جهت آرام کردن تلاطم جریان آب از دو صفحه مشبک و در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از یک صفحه شناور بر روی سطح آب استفاده گردید بطوریکه مشاهده شد جریان پس از ورود به کانال آرام و توسعه یافته است.

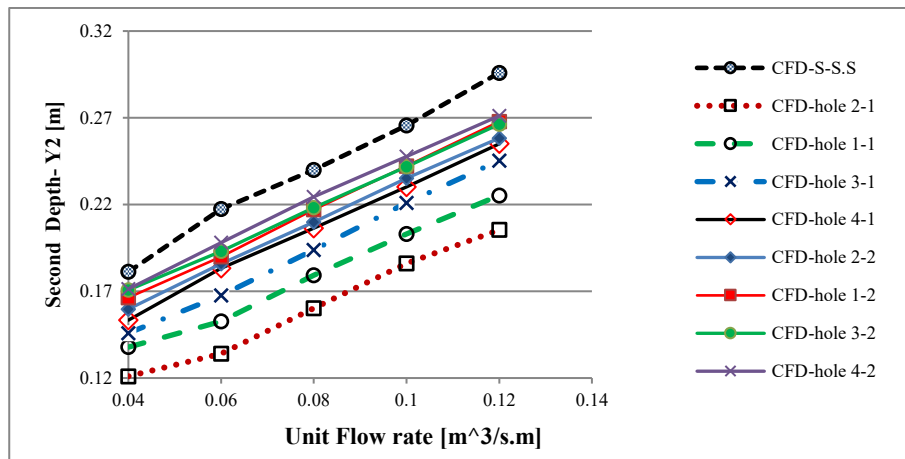
۴ و میانگین خطای نسبی ارائه شده در جدول ۲ می توان گفت که مدل آشفتگی K-ε (RNG) نسبت به مدل آشفتگی Two-equation(K-ε) برای شبیه سازی عددی الگوی جریان بر روی سرریز پلکانی از دقت بالاتری برخوردار است. زمان اتمام شبیه سازی (یکنواخت شدن جریان) در مدل آشفتگی K-ε (RNG) زودتر اتفاق می افتد. مدل آشفتگی Two-equation(K-ε) سرعت جریان در نزدیکی لبه پله را نسبت به مدل K-ε (RNG) بهتر شبیه سازی کرده است. دقت مدل Two-equation(K-ε) در نزدیکی سطح جریان، فقط در پله ۵ نسبت به پله های ۴ و ۶ بهتر می باشد. براساس نتایج بیان شده می توان گفت در حالت کلی مدل آشفتگی K-ε (RNG) در نرم افزار Flow-3D برای شبیه سازی جریان عبوری بر روی سرریز پلکانی از دقت بالاتری برخوردار است. البته ارجحیت مدل آشفتگی K-ε (RNG) برای شبیه سازی جریان عبوری بر روی سرریز پلکانی در تحقیقات بسیار از محققین [۱۳، ۱۴، ۱۵] بررسی شده که نتایج این تحقیقات نیز مصداق این موضوع است.

۳-مقایسه مدل های آشفتگی K-ε (RNG) و Two-equation(K-ε) در مدلسازی عددی

برای حل معادلات آشفتگی و شبیه سازی عددی الگوی جریان در نرم افزار Flow-3D، دو مدل آشفتگی K-ε (RNG) و Two-



شکل ۵: توزیع سرعت روی پله های ۴، ۵ و ۶
 Fig.5. Distribution of Velocity on the Steps 4, 5 and 6



شکل ۶: عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی حفره دار روی پله در مطالعه عددی
 Fig. 6. Secondary water depth versus unit flow rate in Standard stepped spillway and stepped spillway with holed steps in CFD study

نزدیک به سطح جریان است.

۴-صحت سنجی مدل عددی

جهت صحت سنجی مدل عددی مقادیر سرعت اندازه گیری شده در آزمایشگاه و سرعت در مدل عددی برای دبی ۶۰ لیتر در ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ توزیع سرعت در لبه پله های ۴، ۵ و ۶ بر روی سرریز پلکانی را نشان می دهد. درصد خطای میانگین نسبی برای پله های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۸/۵۷، ۱۰/۷۲ و ۱۱/۱۸ درصد است. با توجه به شکل ۵ و درصد خطاهای بدست آمده می توان گفت بیشترین تطابق در پله ۴ می باشد. نمودارهای مربوط به مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد که، بیشترین سرعت روی پله های ۴ و ۶ در سطح جریان بوده در حالیکه برای پله ۵ بیشترین سرعت

۵-نتایج و بحث

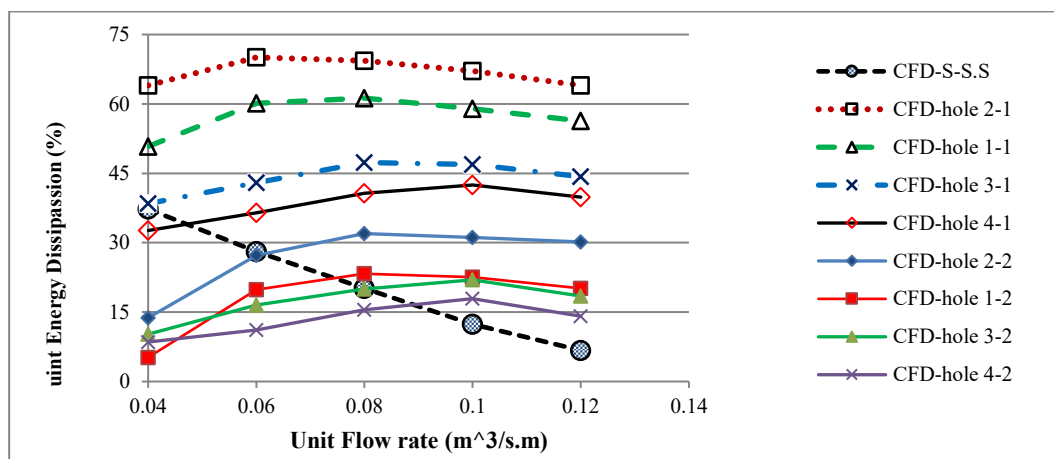
۵-۱-نتایج و بحث مطالعات عددی

هدف این مطالعه بررسی تاثیر حفره دار کردن پله ها بر تغییرات سرعت و فشار در کف و لبه پله، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی است. بدین منظور ۴ شکل از حفره با ۲ چیدمان مختلف به صورت عددی برای دبی های ۱۰ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).

از آنجایی که در آزمایشگاه مقدار V_1 و y_1 به ترتیب سرعت و عمق

جدول ۳: میزان کاهش عمق ثانویه در مطالعه عددی برای سرریزهای پلکانی حفره‌دار تیپ ۱ تا ۴
Table 3: secondary depth reduction for all holed stepped spillway in CFD study

سرریز پلکانی حفره‌دار	Hole 1-1	Hole 1-2	Hole 2-1	Hole 2-2	Hole 3-1	Hole 3-2	Hole 4-1	Hole 4-2
تغییرات عمق ثانویه (%)	۲۹.۶	۹.۷	۳۳.۱	۱۲.۶	۱۹.۱	۹	۱۴.۴	۷.۲

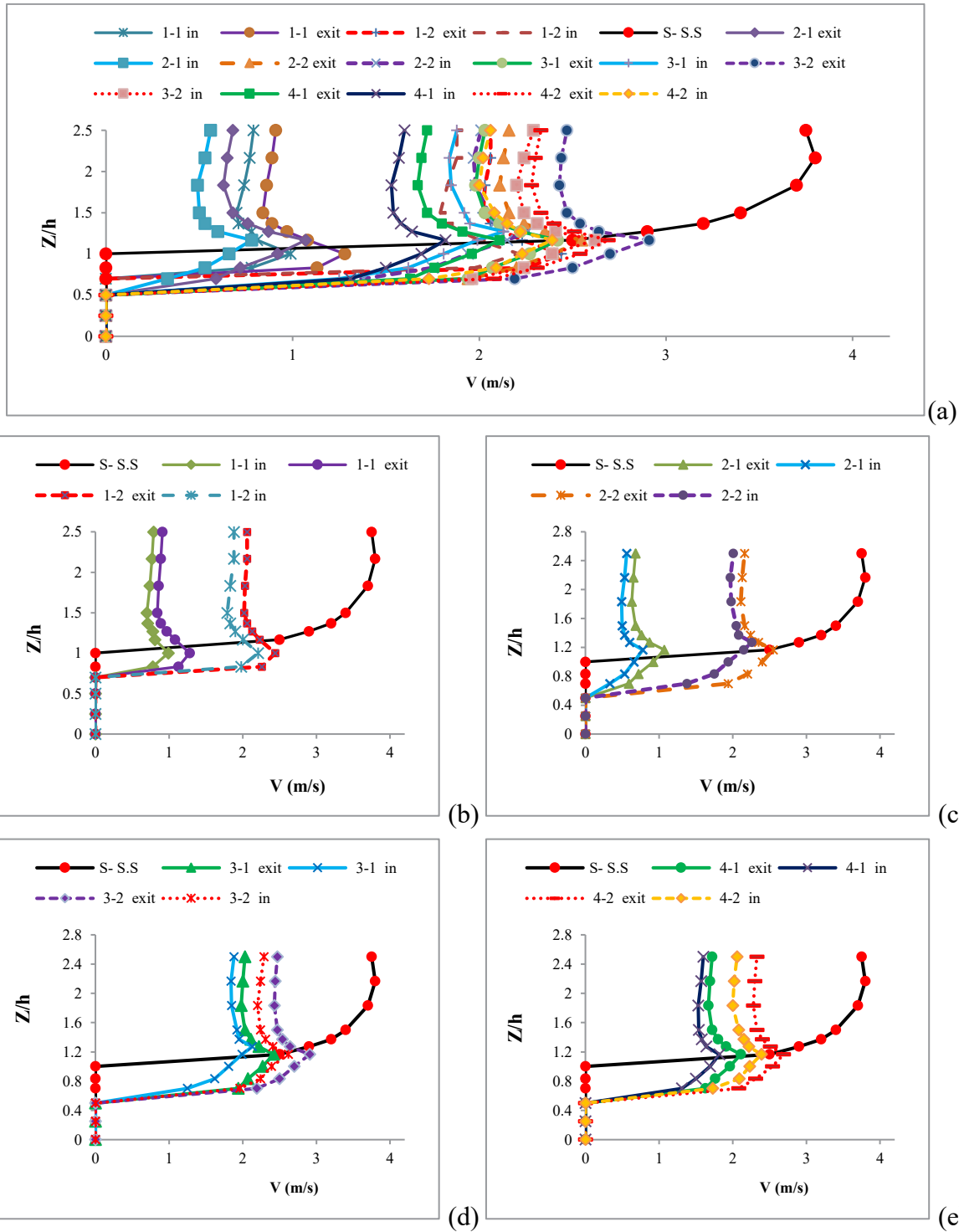


شکل ۷: استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی حفره‌دار نوع ۱ تا ۴ در مطالعه عددی
Fig.7. Energy dissipation for standard stepped spillway and all holed stepped spillway in CFD study

سرریزهای پلکانی حفره دار با چیدمان های مختلف است. حفره‌های نوع ۱ و ۲ با چیدمان بر روی همه پله‌ها (1-hole 1) و (hole 1-2) به ترتیب باعث کاهش ۲۹/۶٪ و ۳۳/۱٪ عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی استاندارد شده است. یکی از دلایل ارجحیت دو مدل مذکور حجم حفرات در مدل های متناظر است. بطوریکه درصد حجم حفرات نوع ۲ و با چیدمان روی همه پله ها (مدل 1-hole 2) ۱۴٪ و درصد حجم حفرات نوع ۱ و با چیدمان روی همه پله ها ۸٪ است.

شکل ۷ مقادیر استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی حفره‌دار نوع ۱، ۲، ۳ و ۴ را نشان می دهد. ملاحظه می شود که در سرریزهای پلکانی حفره دار نوع ۱ تا ۴ نسبت به سرریز پلکانی استاندارد مقدار انرژی بیشتری مستهلک شده است که این مقدار افزایش در استهلاک انرژی برای سرریزهای پلکانی حفره دار نوع ۱ و ۲ با چیدمان روی همه پله‌ها بیشتر است.

جریان در پای سرریز (قبل از پرش هیدرولیکی) به دلیل نوسانات جریان و اغتشاشات فراوان بطور دقیق قابل اندازه گیری نیست، مقدار Y_2 (عمق ثانویه) را اندازه گیری کرده و با استفاده از روابط هیدرولیکی موجود، V_1 و Y_1 و در نهایت استهلاک انرژی قابل محاسبه خواهد بود. بنابراین Y_2 به عنوان پارامتر مناسب در مطالعات عددی و آزمایشگاهی جهت انتخاب هندسه و چیدمان مناسب از حفره‌ها در نظر گرفته شده است. شکل ۶ مربوط به نتایج عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی با ایجاد حفره روی پله با هندسه و چیدمان های مختلف است. با توجه به این شکل ملاحظه می شود که همه سرریزهای پلکانی حفره دار نوع ۱، ۲، ۳ و ۴ دارای عمق ثانویه کمتری نسبت به سرریز پلکانی استاندارد (S-S.S) است. میزان کاهش عمق ثانویه برای سرریزهای پلکانی حفره دار نسبت به سرریز پلکانی استاندارد در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می شود که سرریزهای پلکانی حفره دار نوع ۱ و ۲ با چیدمان اول (۱-۱ و ۲-۱) دارای عمق ثانویه کمتری نسبت به سایر



شکل ۸: پروفیل قائم توزیع سرعت جریان در دیواره قائم در موقعیت $x=0$ در مطالعه عددی (Z نسبت عمق از کف پله و h ارتفاع پله)
 Fig. 8. Vertical profile of the flow velocity distribution in the vertical wall at $x=0$ (Z is the distance from the floor of the step (and h is the height of the step)

نسبت به سرریز پلکانی استاندارد است. بطوریکه استهلاک انرژی برای 1-hole2 به میزان ۴/۱ برابر و برای 1-hole1 به اندازه ۳/۳ برابر

با چیدمان روی همه پله‌ها یعنی (1-hole 1) و (1-hole 2)، دارای کمترین مقدار عمق ثانویه و در نتیجه بیشترین مقدار استهلاک انرژی

جدول ۴: میزان کاهش سرعت برای سرریز پلکانی با حفره در مطالعه عددی

Table 4: Rate of Velocity reduction for stepped spillway with selected wedge elements of type 1

سرریز پلکانی حفره‌دار	Hole 1-1		Hole 1-2		Hole 2-1		Hole 2-2		Hole 3-1		Hole 3-2		Hole 4-1		Hole 4-2	
	exit	in	exit	in	exit	in	exit	in	exit	in	exit	in	exit	in	exit	in
کاهش سرعت (%)	۶۹	۷۵	۳۳	۴۰	۷۷	۸۲	۳۱	۳۶	۳۴	۴۰	۲۵	۲۹	۴۴	۵۰	۲۷	۳۳

استاندارد در دیواره پله از کنج پله ($x=0$) تا ارتفاع یک که معادل لبه پله است، سطح جامد بوده و جریان در جهت افقی حرکتی نداشته در نتیجه مقدار سرعت صفر می باشد. پس از گذر از لبه پله در فاصله اندکی از جداره، با ورود جریان به توده منسجم و اصلی پروفیل توزیع سرعت روند افزایش داشته بطوریکه در $0/3$ از سطح آزاد جریان به بیشترین مقدار خود می رسد. از آنجایی که در سرریزهای پلکانی حفره‌دار عمق حفره شکل یک ۳ سانتیمتر و حفره‌های شکل ۲، ۳ و ۴، ۵ سانتیمتر می باشد بنابراین به ترتیب در دیواره پله از کنج پله ($x=0$) تا ارتفاع $0/8$ و $0/5$ که معادل لبه حفره است، سطح جامد بوده و برای هر دو حالت exit و in جریان در جهت افقی حرکتی نداشته در نتیجه مقدار سرعت صفر می باشد. پس از گذر از لبه حفره در فاصله اندکی از جداره آن، پروفیل توزیع سرعت روند افزایش داشته و در $0/2$ بالای سطح آزاد حفره ($0/2$ از کف پله) به بیشترین مقدار خود می رسد. با ورود جریان به توده منسجم و اصلی جریان پروفیل توزیع سرعت روند کاهشی داشته بطوریکه در $0/2$ از سطح آزاد جریان ($0/8$ از کف پله) به کمترین مقدار خود می رسد.

شکل a (۸) تا e (۸) پروفیل توزیع سرعت برای هر یک از حفرات و چیدمان های آن نسبت به سرریز پلکانی استاندارد رسم شده است. در این نمودارها کاهش چشمگیر سرعت جریان در دیواره و داخل حفره مشهود است. همچنین الگوی تغییرات سرعت نسبت به سرریز پلکانی استاندارد کاملاً تغییر کرده است. بطوریکه پروفیل توزیع سرعت در داخل حفره ابتدا افزایشی و پس از عبور از بالای حفره (کف پله) کاهشی است که باعث کاهش مقدار زیادی از سرعت جریان شده است. مقدار کاهش سرعت جریان برای مکان‌های مشخص شده (exit و in) در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به شکل ۸ و جدول ۴ ملاحظه می شود کاهش سرعت به برای چهار شکل از حفرات و

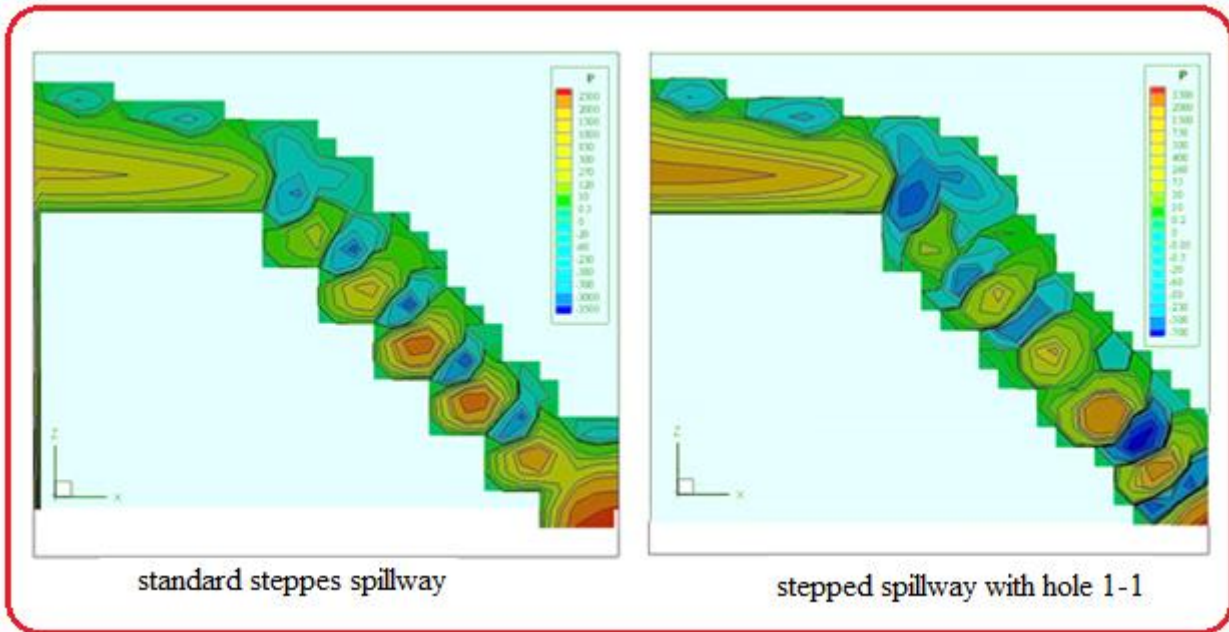
نسبت به سرریز پلکانی استاندارد افزایش یافته است. واضح است که برای حفره‌های نوع ۱ تا ۴ چیدمان روی همه پله‌ها نتایج بهتری دارد. در واقع با ایجاد حفره روی همه پله‌ها مقدار عمق ثانویه کمتر و مقدار استهلاک انرژی بیشتر است. بنابراین سرریزهای پلکانی حفره‌دار نوع ۱ و ۲ با چیدمان روی همه پله‌ها (1-hole 2) و (1-hole 1) به ترتیب دارای بهترین نتایج می باشد و به عنوان مدل‌های منتخب آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می گیرند.

۵-۱-۱-۵ مطالعه عددی تأثیر حفره‌دار کردن پله‌ها بر فشار و سرعت

در این بخش تغییرات سرعت و فشار بر روی دیواره قائم و کف پله سرریزهای پلکانی حفره‌دار نوع ۱ تا ۴ با دو چیدمان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. محل بررسی تغییرات سرعت و فشار روی کف پله و دیواره قائم، روی پله چهارم در نظر گرفته شده است. این پله در ناحیه جریان یکنواخت قرار دارد و برای بررسی تغییرات سرعت و فشار دو مکان که به ترتیب exit و in یعنی روی پله چهارم مکانی که حفره وجود دارد و داخل حفره در نظر گرفته شده است. همچنین محور عمودی گراف های سرعت و فشار در دیواره قائم با استفاده از ارتفاع پله ($h=10\text{cm}$) و محور افقی در توزیع فشار در کف پله با استفاده از طول پله ($L=10\text{cm}$) بی بعد شده است.

۵-۱-۱-۵-۱ مطالعه عددی میدان سرعت

شکل a (۸) پروفیل توزیع سرعت جریان در دیواره قائم ($x=0$) برای دبی ۶۰ لیتر در ثانیه برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی با حفره‌های نوع ۱ تا ۴ با دو چیدمان مختلف ترسیم شده است. در این شکل منظور از پسوند های exit یعنی جایی که حفره وجود دارد و منظور از in داخل حفره است. در نمودار سرریز پلکانی



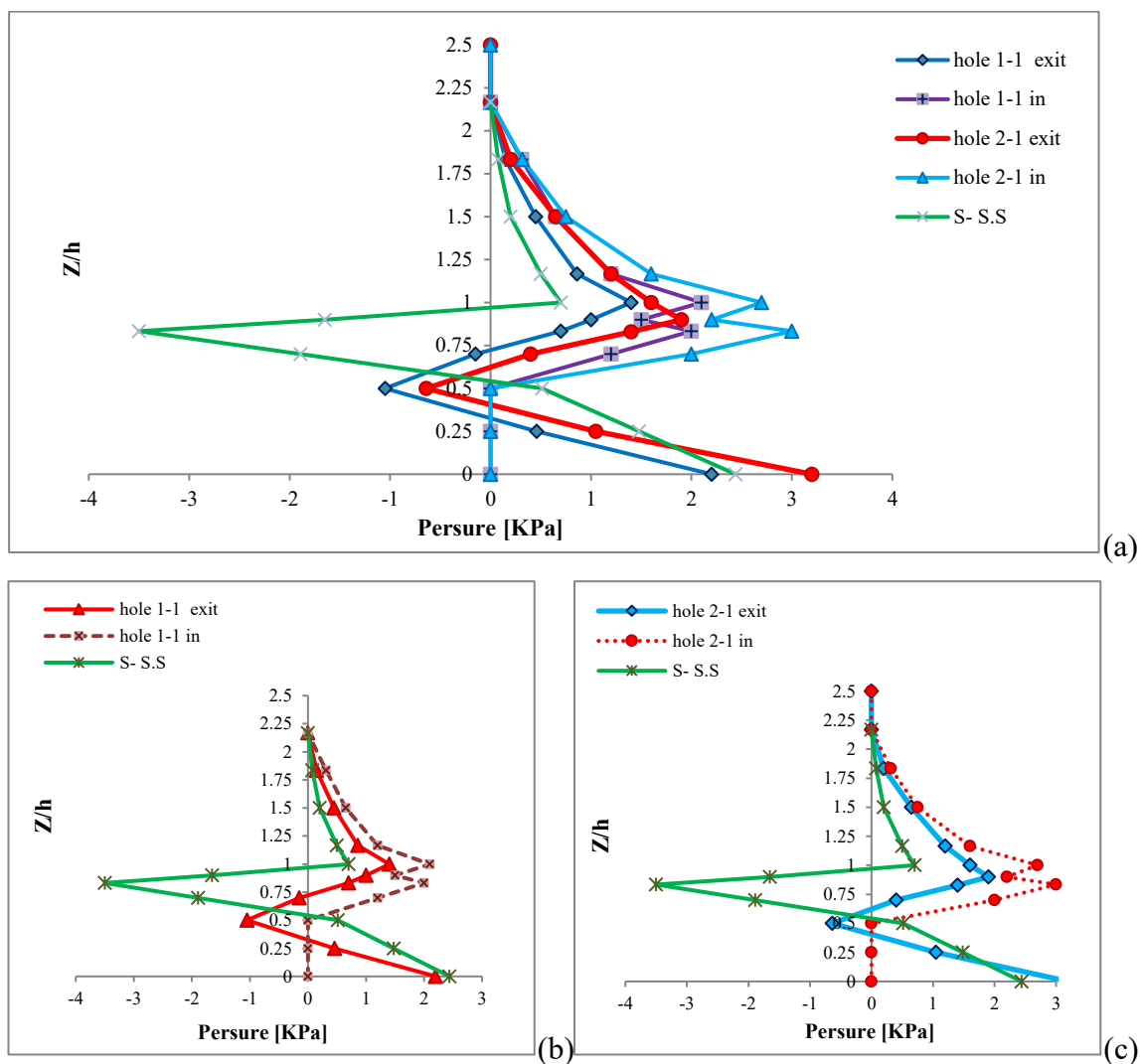
شکل ۹. کانتورهای فشار استاتیکی (پاسکال) برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریز پلکانی حفره دار در مطالعه عددی با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه
 Fig. 9. Contour lines of the static pressure (Pa) for standard stepped spillway and holed stepped spillway in CFD study with the discharge of 60 liter/ s

نمودارهای شکل a (۱۰) مربوط به تغییرات فشار در مقطع قائم پله است. حرکت جریان آب در لبه پله به سمت دیواره پله بوده و فشاری در حدود ۲/۵ تا ۳/۵ مگاپاسکال اعمال می کند. برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریز پلکانی حفره دار در مکان exit با برخورد جریان به دیواره پله، مقداری از جریان که امکان تغییر جهت آن مهیا نیست در کنج پله آب راکدی ایجاد می کند و باقیمانده جریان با تغییر جهت به سمت بالا و مماس با دیواره حرکت کرده از این رو مقدار فشار کاهش می یابد پس از آن تحت تأثیر جریان آشفته، در عمق ۲۵/۰ تا ۹/۰ از کنج پله فشار دچار نوسان می شود. بطوریکه برای سرریز پلکانی استاندارد با رسیدن به فاصله قائم ۰/۸۳ از کنج پله و برای سرریز پلکانی حفره دار با رسیدن به فاصله قائم ۰/۵ تحت تأثیر جدایش جریان قرار گرفته و بیشینه فشار منفی اتفاق می افتد و با فاصله گرفتن از این نقطه و کاهش تأثیر جدایش جریان، همچنین عبور و برخورد جریان جت به لبه پله، فشار به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. پس از گذر از لبه پله و ورود به قسمت منسجم و توده اصلی جریان متناسب با عمق جریان، فشار هیدرولیکی جریان روند کاهشی در پیش گرفته بطوریکه در سطح آزاد جریان به مقدار صفر یا فشار اتمسفر می رسد. همچنین برای سرریز پلکانی حفره دار

چیدمان های آن به میزان ۲۵ تا ۸۲ درصد بوده که مدل های (hole 1) و (1-hole 2) به ترتیب باعث بیشترین کاهش سرعت به میزان (۷۷٪-۸۲٪) و (۶۹٪-۷۵٪) شده است. همچنین مقدار کاهش سرعت داخل حفره ها قدری بیشتر است. بنابراین سرریزهای پلکانی حفره دار نوع ۱ و ۲ با چیدمان روی همه پله ها (1-hole 2) و (1-hole 1) به ترتیب دارای بهترین نتایج می باشد و به عنوان مدل های منتخب آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می گیرند.

۵-۱-۱-۲ مطالعه عددی میدان فشار

شکل ۹ توزیع فشار در قسمت های مختلف سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی حفره دار ترسیم شده است. با دقت در این شکل مشاهده می شود که در سرریز پلکانی استاندارد به واسطه افزایش سرعت جریان در نواحی نزدیک به لبه قائم پله، فشار جریان در این نواحی از فشار اتمسفر پایین تر می باشد که با ایجاد کردن حفره در این ناحیه از پله، سرعت جریان کاهش یافته و موجب افزایش فشار مثبت و کاهش فشار منفی و پیشگیری از ایجاد کاویتاسیون شده که در نهایت موجب کاهش سرعت در پای سرریز و افزایش استهلاک انرژی می گردد.



شکل ۱۰: پروفیل قائم توزیع فشار در دیواره قائم در موقعیت $x=0$ در مطالعه عددی

Fig. 10. Vertical profile of the Pressure distribution in the vertical wall at $x = 0$ in the in CFD study

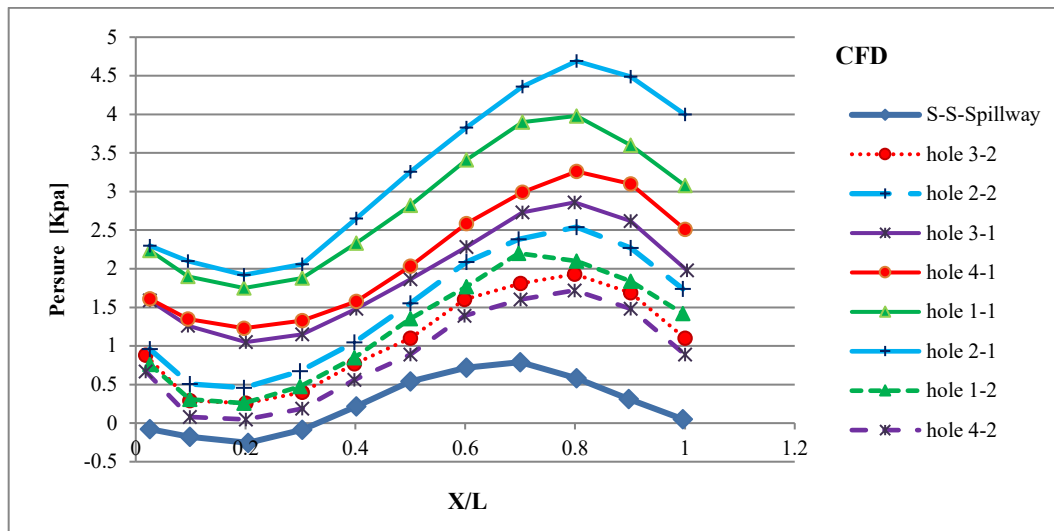
جدول ۵: میزان افزایش فشار مثبت و کاهش فشار منفی برای سرریزهای پلکانی حفره دار منتخب در مطالعه عددی

Table 5: Positive pressure increase and negative pressure reduction for selected holed stepped spillway in the CFD study

سرریز پلکانی با المان گوه‌ای	محل تغییر فشار	hole 1-1	hole 2-1
تغییرات فشار (%)	exit برای $z/h=1$ افزایش فشار مثبت در	۱۰۰	۲۲۸
	$z/h=0.5$ کاهش فشار منفی	۷۰	۸۲
	$z/h=1$ افزایش فشار مثبت داخل حفره در	۲۰۰	۲۸۵

فشار کاهش و سپس افزایش می‌یابد و در لبه پله به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از آن متناسب با عمق جریان، فشار هیدرولیکی

در داخل حفره (in) از کنج پله تا ارتفاع $z/h=0.5$ که لبه حفره است فشار در دیواره قائم برابر صفر و با جدا شدن از لبه حفره ابتدا



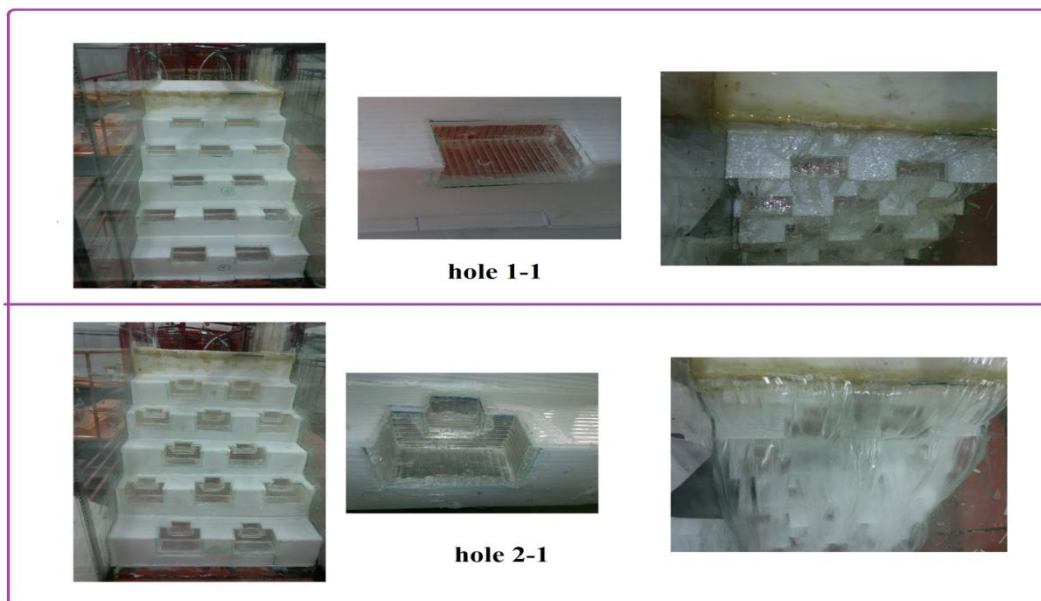
شکل ۱۱: پروفیل افقی توزیع فشار در کف پله در مطالعه عددی (X فاصله از کنج پله و L طول پله)

Fig. 11: Horizontal profile of the pressure distribution in the floor of the step (X distance from the step corner and L step length)

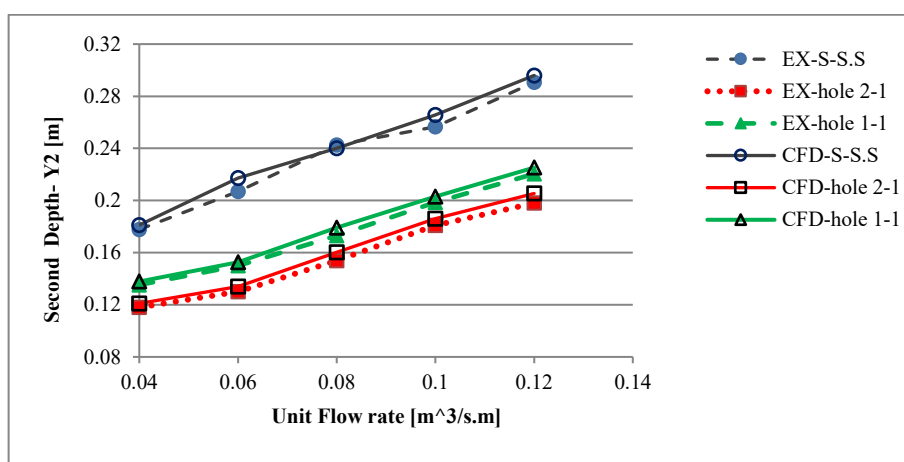
حفره (in) برای hole 1-1 و hole 2-1 به ترتیب ۳ و تقریباً ۴ برابر افزایش یافته (بطور مثال برای hole 1-1 مقدار آن از 0.7 MPa به 2.1 MPa رسیده) است. بنابراین تأثیر افزودن حفره روی لبه پله بر کاهش فشار منفی و کاهش خطر وقوع کاویتاسیون مشهود است. شکل ۱۱ مربوط به تغییرات فشار در کف پله سرریز پلکانی استاندارد و سرریز حفره دار با دو چیدمان متفاوت در ناحیه توسعه یافته جریان (یکنواخت) با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه می باشد. نمودارهای فشار برای سرریزهای پلکانی از یک مقدار اولیه شروع شده و سپس کاهش پیدا می کند پس از آن تا یک مقدار بیشینه افزایش پیدا کرده و با نزدیک شدن به لبه پله به علت جدایش جت مقدار فشار دوباره حالت نزولی پیدا می کند. مقدار فشار بیشینه برای سرریز پلکانی استاندارد در ۰/۷ طول کف پله و برای سرریزهای حفره دار hole 1-1 و hole 2-1 در ۰/۸ طول کف پله رخ می دهد و مقدار کمینه در $x/l=0.2$ اتفاق می افتد. با ایجاد حفره روی لبه پله فشار منفی در نزدیکی کنج پله به فشار مثبت تبدیل شده که خطر وقوع کاویتاسیون را از بین برده و فشار بیشینه در نزدیکی لبه پله به دلیل وجود حفره افزایش یافته است. افزایش فشار کمینه و کاهش فشار بیشینه در مدل هایی که حفرات روی همه پله ها وجود دارد بیش از مدل های متناظری است که حفرات به صورت یک درمیان روی پله ها قرار گرفته است. در واقع با تراکم بیشتر حفرات و قرارگیری آنها روی

کاهش یافته و در سطح آزاد جریان برابر صفر می شود. در واقع خود حفره نیز مانند یک پله با مقیاس کوچکتر عمل کرده و در ابتدا باعث کاهش فشار و سپس موجب افزایش فشار شده است.

نمودارهای b (۱۰) و c (۱۰) مربوط به تغییرات فشار در لبه قائم پله برای بهترین مدل سرریز پلکانی حفره دار و سرریز پلکانی استاندارد است. با توجه به این نمودارها فشار در دیواره قائم برای سرریز پلکانی استاندارد در $z/h=0.83$ بیشترین مقدار منفی را داراست که با ایجاد حفره در لبه پله مقدار فشار منفی بسیار کاهش می یابد. در سرریز پلکانی استاندارد با رسیدن جریان به لبه پله (Z/h=1) فشار مثبت شده و با ایجاد حفره در لبه پله فشار مثبت در این ناحیه افزایش می یابد. میزان کاهش فشار منفی در دیواره قائم پله و افزایش فشار مثبت در لبه پله برای سرریز پلکانی حفره دار در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به این جدول ملاحظه می شود که با ایجاد حفره های نوع یک و دو با چیدمان روی همه پله ها یعنی hole 1-1 و hole 2-1 مقدار فشار منفی در دیواره قائم پله به ترتیب به میزان ۷۰٪ و ۸۲٪ کاهش یافته (بطور مثال برای hole 1-1 مقدار آن از 3.5 MPa به 1.05 MPa- رسیده است) است. فشار مثبت در لبه پله برای hole 1-1 و hole 2-1 در محل exit به ترتیب ۲ و تقریباً ۳ برابر افزایش یافته (بطور مثال برای hole 1-1 مقدار آن از 0.7 MPa به 1.4 MPa رسیده) است. همچنین فشار مثبت در داخل



شکل ۱۲: مدل‌های منتخب از سرریزهای پلکانی حفره‌دار جهت مطالعه آزمایشگاهی
 Fig.12. the selected models of holed stepped spillway in the experimental study



شکل ۱۳: عمق ثانویه عددی و آزمایشگاهی سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای حفره‌دار منتخب

Fig.13. Numerical and laboratory secondary water depth of a standard stepped spillway and selected holed stepped spillway

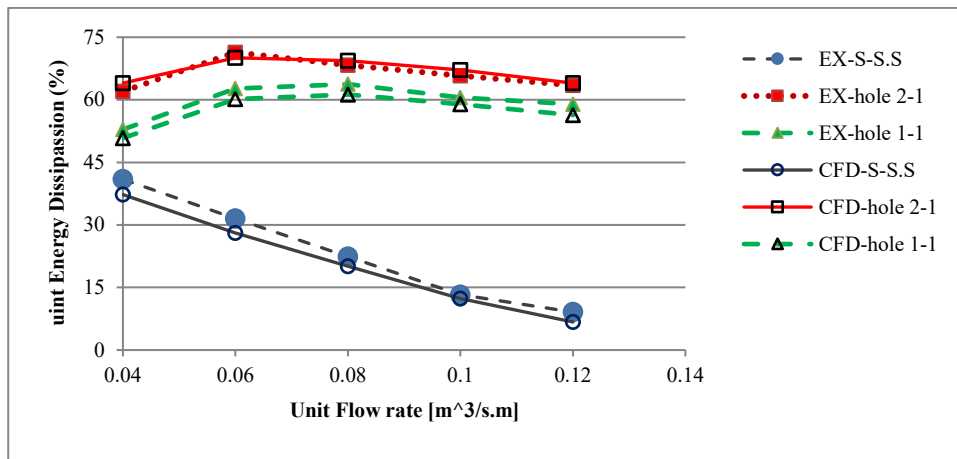
حفره دار که دارای بهترین نتایج عددی بوده مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت (شکل ۱۲). در این تحقیق، با اندازه گیری دبی و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (Y_2)، ابتدا عمق بحرانی (Y_c) محاسبه شد سپس با استفاده از روابط هیدرولیکی عمق اولیه پرش هیدرولیکی (Y_1) و مقدار سرعت در پای سرریز (V_1) برای تعیین مقدار استهلاك انرژی محاسبه گردید.

شکل ۱۳ داده های مربوط به عمق ثانویه آب در مقابل دبی

همه پله‌ها نتایج بهتری حاصل شده است.

۵-۵ مطالعه آزمایشگاهی

در این بخش از تحقیق تأثیر ایجاد حفره های منتخب روی پله در سرریز پلکانی استاندارد بر مشخصه های هیدرولیکی جریان (عمق آب و استهلاك انرژی) مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. بدین منظور دو مدل منتخب hole1-1 و hole2-1 از سرریزهای پلکانی



شکل ۱۴. تغییرات استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریز پلکانی حفره دار منتخب

Fig.14. Changes of the energy dissipation for standard stepped spillway and selected holed stepped spillway

و سرریز پلکانی حفره دار منتخب نشان می دهد. در این شکل دیده می شود که با افزایش دبی استهلاک انرژی برای سرریزهای حفره دار افزایش و سپس با شیب اندک کاهش می یابد درحالیکه در سرریز پلکانی استاندارد با افزایش دبی مقدار استهلاک انرژی به صورت کاهشی است. همچنین مقدار استهلاک انرژی برای سرریز حفره دار نسبت به حالت استاندارد افزایش یافته است. بطوریکه استهلاک انرژی برای 1-hole2 به میزان ۴ برابر و برای 1-hole1 به اندازه ۳/۲ برابر نسبت به سرریز پلکانی استاندارد افزایش یافته است. درواقع با ایجاد حفره، زبری پله ها افزایش یافته و مقدار بیشتری از انرژی را مستهلک کرده است. درصد خطای استهلاک انرژی در مدل عددی و آزمایشگاهی بسیار اندک و در محدوده قابل قبول بوده که نشان از تطابق مناسب بین داده های عددی و آزمایشگاهی است و این میزان پراکندگی بین داده های عددی و آزمایشگاهی قابل چشم پوشی است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری کلی

هدف این مطالعه بررسی تأثیر حفره دار کردن پله های سرریز پلکانی بر تغییرات سرعت و فشار روی کف و لبه پله، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی است. بدین منظور ابتدا ۴ شکل حفره با دو چیدمان مختلف به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات عددی این مدل ها نشان داد که سرریز پلکانی با حفره های شکل ۱ و ۲ با چیدمان روی همه پله ها (1-hole2 و 1-hole1) دارای کمترین عمق ثانویه و در نتیجه بیشترین استهلاک

واحد برای سرریز پلکانی استاندارد و سرریزهای پلکانی حفره دار منتخب است. در این شکل ملاحظه می شود که داده های مربوط به سرریزهای پلکانی حفره دار باهم تفاوت چندانی ندارند ولی تفاوت بین آنها و سرریز پلکانی استاندارد برای مطالعه عددی و آزمایشگاهی قابل مشاهده است. درصد خطای عمق ثانویه جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی بسیار اندک و در محدوده قابل قبول بوده که نشان از تطابق مناسب بین داده های عددی و آزمایشگاهی است و این میزان پراکندگی بین داده های عددی و آزمایشگاهی قابل چشم پوشی است. با افزایش دبی واحد مقدار عمق ثانویه برای داده های آزمایشگاهی و عددی افزایش می یابد. همچنین ملاحظه می شود که برای یک دبی مشخص با ایجاد حفره روی لبه پله مقدار عمق ثانویه کاهش یافته است بطوریکه برای سرریزهای پلکانی با پله های حفره دار (1-hole1 و 1-hole2) به ترتیب باعث کاهش ۲۶٪ و ۳۱٪ عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی استاندارد شده است. ملاحظه می شود که سرریز حفره دار 1-hole2 عملکرد مناسبتری نسبت به 1-hole1 داشته است. با ایجاد حفره روی همه پله ها سرعت جریان در پای سرریز کاهش یافته (عدد فرود کاهش می یابد) و عمق قبل از پرش هیدرولیکی افزایش می یابد. با توجه به اینکه عمق قبل از پرش هیدرولیکی افزایش یافته و عدد فرود هم کاهش یافته است جریان آب با انرژی کمتری پرش داشته و طبق روابط هیدرولیکی عمق ثانویه نیز کاهش می یابد.

شکل ۱۴ تغییرات استهلاک انرژی را برای سرریز پلکانی استاندارد

می‌شود که برای کاهش سرعت، کاهش فشار منفی و افزایش فشار مثبت روی پله و نیز برای افزایش استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی می‌توان روی پله حفرات شکل ۱ و ۲ را ایجاد نمود. در واقع با ایجاد حفرات زبری پله‌ها افزایش یافته و مقدار بیشتری از انرژی مستهلک می‌شود.

منابع

- [1] M.W. Horner, An analysis of flow on cascades of steps, University of Birmingham, 1969.
- [2] G.C. Christodoulou, Energy dissipation on stepped spillways, Journal of Hydraulic Engineering, 119(5) (1993) 644-650.
- [3] F. Salmasi, M. Bina, S.A. Mousavi Jahromi, Estimating of flow loss over stepped spillway using physical model, Journal of Agriculture, 26 (2003) 57-71.
- [4] H. Mohammad Vali Samani, M.R. Nazarzadeh, Evaluation of Hydraulic Principles governing on Flow and Design of Stepped spillways, Journal of Technical School, 38(2) (2004) 339-347.
- [5] H. Torabi, A. Parsaie, H. Yonesi, E. Mozafari, Energy dissipation on rough stepped spillways, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 42(3)(2018), 325-330.
- [6] S. Felder, Ph. Guenther, H. Chanson Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways: A physical study of several pooled stepped configurations, School of Civil Engineering The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia. Report CH87/12 (2012a).
- [7] J.J. Cassidy, Irrotational flow over spillways of finite height, University of Missouri-Columbia, 1965.
- [8] D. Ho, K. Boyes, S.M. Donohoo, Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique, in: 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia, 2001.
- [9] Q. Chen, G. Dai, H. Liu, Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow, Journal of Hydraulic Engineering, 128(7) (2002) 683-688.

انرژی است. همچنین با چیدمان حفره‌ها روی همه پله‌ها نتایج بهتری بدست می‌آید بطوریکه سرریز پلکانی حفره‌دار 1-hole2 و 1-hole1 به ترتیب باعث کاهش ۳۳/۱٪ و ۲۹/۶٪ عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی استاندارد شده است.

در سرریزهای پلکانی حفره‌دار 1-hole1 و 1-hole2 مقدار فشار منفی در دیواره قائم پله به ترتیب به میزان ۷۰٪ و ۸۲٪ کاهش و فشار مثبت در محل exit به ترتیب ۲ و تقریباً ۳ برابر افزایش یافته است. همچنین فشار مثبت در داخل حفره (in) برای 1-hole1 و 1-hole2 به ترتیب ۳ و تقریباً ۴ برابر افزایش یافته است. بنابراین تأثیر افزودن حفره روی پله بر کاهش فشار منفی و کاهش خطر وقوع کاویتاسیون مشهود است. پروفیل‌های توزیع سرعت برای سرریز پلکانی به صورت افزایشی و برای سرریزهای پلکانی حفره‌دار به صورت کاهش‌ی است و نیز مدل‌های سرریز پلکانی حفره‌دار 1-hole2 و 1-hole1 به ترتیب باعث بیشترین کاهش سرعت به میزان (۸۲٪- ۷۷٪) و (۷۵٪-۶۹٪) شده است. همچنین مقدار کاهش سرعت داخل حفره‌ها قدری بیشتر است.

همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی استهلاک انرژی برای سرریزهای پلکانی حفره‌دار افزایش و سپس با شیب اندک کاهش می‌یابد در حالیکه با افزایش دبی مقدار استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی استاندارد به صورت کاهش‌ی است. همچنین مقدار استهلاک انرژی برای سرریزهای حفره‌دار نسبت به حالت استاندارد افزایش یافته است. بطوریکه استهلاک انرژی برای 1-hole2 به میزان ۴/۱ برابر و برای 1-hole1 به اندازه ۳/۳ برابر نسبت به سرریز پلکانی استاندارد افزایش یافته است. درصد حجم حفرات در این سرریزها به ترتیب ۱۴/۵ و ۸ درصد می‌باشد. این درحالیست که درصد حجم حفرات برای انواع دیگر و باچیدمان روی همه پله‌ها حداکثر ۶/۵ درصد است. بنابراین پارامتر بدون بعد حجم حفره به حجم پله‌ها را می‌توان به عنوان عدد بی بعد برای بررسی عملکرد سرریز پلکانی حفره‌دار در نظر گرفت. با انجام آزمایش برای مدل‌های منتخب مشخص شد که درصد خطای عمق ثانویه جریان و استهلاک انرژی در مدل عددی و آزمایشگاهی بسیار اندک و در حدود ۱۱٪ تا ۱۳٪ بوده که نشان از تطابق مناسب بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی است.

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های عددی چنین استنباط

- flow regime Acta Mechanic 227, 353–366 (2016) DOI 10.1007/s00707-015-1444-x
- [18] K. Roushangar, S. Akhgar, F. Salmasi, J. Shiri, Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches, Journal of Hydrology, 508 (2014) 254-265.
- [19] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, M. Saneie, H. Torabi, Prediction of energy dissipation on the stepped spillway using the multivariate adaptive regression splines, ISH Journal of Hydraulic Engineering 22(3)(2016) 281-29.
- [20] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, M. Saneie, H. Torabi, Applications of soft computing techniques for prediction of energy dissipation on stepped spillways, Neural Computing and Applications, 29(12)(2016) 1393-1409.
- [21] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, M. Saneie, H. Torabi, Prediction of Energy Dissipation of Flow over Stepped Spillways Using Data-Driven Models." Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 42(1) (2017) 39-53.
- [22] A.H. Haghiabi, H.M. Azamathulla, A. Parsaie, Prediction of head loss on cascade weir using ANN and SVM." ISH Journal of Hydraulic Engineering, 23(1) (2016) 102-110.
- [23] N. Souri, A. Mojtahedi, Evaluation of the effects of stepped spillway geometry on the amount of passive energy dissipation using a fuzzy inference system, Journal of Civil and Environmental Engineering, 45(3)(2016).
- [10] M. S' nchez-Juny, E. Blade, J. Dolz, Pressures on a stepped spillway, Journal of Hydraulic Research, 45(4) (2007) 505-511.
- [11] K. Roushangar, S. Akhgar, F. Salmasi, Estimating discharge coefficient of stepped spillways under nappe and skimming flow regime using data driven approaches, Flow Measurement and Instrumentation, 59 (2018) 79-87.
- [12] K. Morovati, A. Eghbalzadeh, Stepped Spillway Performance: Study of the Pressure and Turbulent Kinetic Energy versus Discharge and Slope.
- [13] N. Souri, A. Mojtahedi, Investigating the flow pattern over stepped spillway using numerical and physical model, Tabriz University, 2014.
- [14] A. Parsaie, S. Dehdar-Behbahani, A.H. Haghiabi, Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket, Frontiers of Structural and Civil Engineering, 10(4)(2016) 438-444.
- [15] Parsaie, A. Moradinejad A.H. Haghiabi, Numerical Modeling of Flow Pattern in Spillway Approach Channel, Jordan Journal of Civil Engineering, 12(1)(2018) 1-9.
- [16] S. Dehdar-Behbahani, A. Parsaie ,Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran ,Alexandria Engineering Journal, 55(1)(2016) 467-473.
- [17] Kh . Morovati, A. · Eghbalzadeh, M. Javan, Numerical investigation of the configuration of the pools on the flow pattern passing over pooled stepped spillway in skimming

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Akhgar, K. Roushangar, Numerical and experimental study of pitched steps effects in stepped spillway on the hydraulic parameters and energy dissipation in the skimming flow, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 2043-2058.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15856.6057

