

## مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر المان‌های گوه‌ای شکل بر ضریب زبری و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی

کیومرث روشنگر<sup>۱\*</sup>، سمیرا اخگر<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۷

### چکیده

در سرریز پلکانی، پله‌ها با فراهم کردن یک بستر زبر مصنوعی انرژی جریان را بیش از انواع دیگر سرریزها مستهلک می‌کند که این امر موجب کاهش زمان و هزینه ساخت سد شده و توانسته است توجه مهندسان طراح را به سوی این نوع از سرریزها جلب کند. اما آن‌چه در این نوع از سرریزها حایز اهمیت است، افزایش اثر پله‌ها در میزان استهلاک انرژی است. به همین دلیل هدف از تحقیق حاضر، بررسی افزودن المان‌های گوه‌ای شکل روی پله‌ها و تاثیر آن بر تغییرات ضریب زبری داری، ارتفاع آب پایین‌دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی است. در این راستا ابتدا چندین شکل از المان‌های گوه‌ای شکل با چیدمان‌های متفاوت با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شده و سپس با مقایسه نتایج، مدل مناسب از جنبه بیش‌ترین استهلاک انرژی در آزمایشگاه ساخته و مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات بر روی ۵ مدل فیزیکی، با تغییر در چیدمان گوه‌ها و میزان دبی انجام گردید و نتایج با سرریز پلکانی ساده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که افزودن المان‌ها بر روی سرریز پلکانی، ضریب زبری داری را افزایش داده و موجب کاهش ارتفاع آب در پایین‌دست سرریز و در نتیجه افزایش چشم‌گیر استهلاک انرژی می‌شود. با کاهش فاصله بین المان‌های گوه‌ای، استهلاک انرژی به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد. هم‌چنین روابطی برای زبری ( $f$ ) و نسبت عمق بحرانی به زبری پله ( $y_c/k$ ) بدست آمد که دقت بالای این روابط ( $R^2 = 0.98 - 0.99$ ) بیانگر وابستگی قابل توجه مقدار زبری ( $f$ ) به زبری پله ( $k$ ) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انرژی جریان، بستر زبر مصنوعی، چیدمان، گوه، سرریز پلکانی، Flow-3D

### مقدمه<sup>۱</sup>

همکاران (۱۳۸۳) با استفاده از نمونه آزمایشگاهی اصول حاکم بر هیدرولیک جریان و طراحی سرریزهای پلکانی بررسی کرده و روابطی را برای محاسبه افت انرژی بدست آوردند. چنگ و همکاران با استفاده از مدل عددی  $k-\epsilon$  RNG جریان روی سرریز پلکانی را شبیه‌سازی کردند و نتایج قابل قبولی برای توزیع سرعت و فشار بدست آوردند (Cheng et al., 2006). تبارا و همکاران جریان روی سرریز پلکانی را با استفاده از روش اجزا محدود و مدل  $k-\epsilon$  شبیه‌سازی نمودند (Tabbara et al., 2005). سلماسی و همکاران (۱۳۸۲) اثر تعداد پله‌ها در استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی با استفاده از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که تاثیر افزایش تعداد پله در افزایش استهلاک انرژی تا حدی مثبت است و سپس روند کاهشی دارد. بطوری که به ازای هر دبی و شیب مشخص می‌توان تعداد مشخصی پله تعیین کرد که میزان استهلاک انرژی جریان در حداکثر مقدار خود باشد. ژانگ دونگ و همکاران چهار مدل آشفتگی در شبیه‌سازی عددی جریان عبوری آب روی سرریز پلکانی بررسی نموده و با مقایسه نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی دریافتند که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  در شبیه‌سازی جریان روی سرریز پلکانی موثر

بررسی آزمایشگاهی، عددی و هوش مصنوعی رفتار انواع سرریزها در چند سال اخیر بطور گسترده مورد توجه طراحان و محققین قرار گرفته است. نخستین بررسی‌ها در مورد سرریز پلکانی به دهه ۱۹۷۰ بر می‌گردد، که به طراحی هیدرولیکی این سرریز توجه شده است. رایس و کادوی مطالعاتی را در مورد نمونه‌ای فیزیکی با مقیاس ۱:۲۰ برای تخمین جریان انتقالی روی سرریز انجام دادند (Rice and Kadavy., 1996). پله‌ها در مقایسه با سطح صاف شیب شکن بطور قابل توجهی بر استهلاک انرژی موثر بودند و این امر سبب کاهش قابل توجه در ابعاد حوضچه آرامش مورد نیاز در پنجه سرریز شد. فتحی و همکاران (۱۳۸۸) تاثیر شیب تندآب پایین‌دست تاج بر محل هواگیری بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. سامانی و

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

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

استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی را مدل‌سازی نموده و پارامترهای تاثیرگذار بر رژیم جریان تیغه‌ای و رویه‌ای را تعیین کردند (Roushangar et al., 2017). روشننگر و همکاران با استفاده از روش‌های داده محور ضریب دبی سرریز پلکانی را بررسی کرده و برای هریک از رژیم جریان تیغه‌ای و رویه‌ای رابطه‌ای برای ضریب دبی پیشنهاد دادند (Roushangar et al., 2018).

یکی از عواملی که باعث تغییرات اساسی در استهلاک انرژی و پارامترهای هیدرولیکی در سرریز پلکانی می‌شود تغییرات فرم (شکل) و هندسه سرریز و پلکان‌ها است. هدف این مطالعه بررسی تاثیر افزودن المان‌هایی روی پله‌ها بر ضریب زبری، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی در جریان رویه‌ای است. این المان‌ها به شکل گوه‌ای (مثلثی شکل در پلان) و با چیدمان‌های متفاوت می‌باشد.

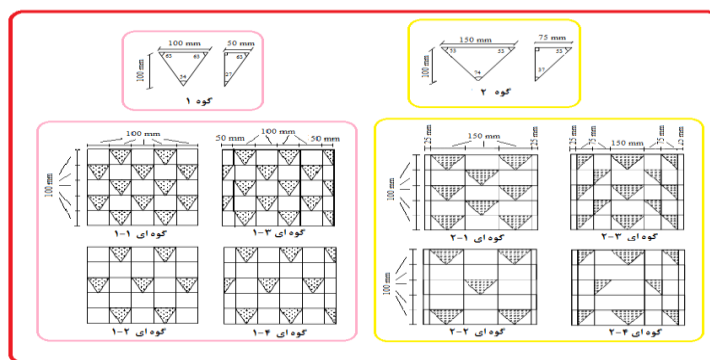
## مواد و روش‌ها

### مطالعه عددی

در این تحقیق از روش عددی حجم محدود (نرم‌افزار Flow-3D) برای بررسی تاثیر وجود المان‌های گوه‌ای شکل بر تغییرات ضریب زبری داری، ارتفاع آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی استفاده شد. المان‌های گوه‌ای شکل در پلان به شکل مثلث دیده می‌شوند که در این تحقیق ۲ شکل از مثلث با ۴ چیدمان مورد بررسی قرار گرفت. هندسه و چیدمان این گوه‌ها در شکل ۱ آورده شده است. در مجموع ۸ مدل با دبی‌های متفاوت در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد و بهترین هندسه گوه‌ها به لحاظ بیشترین استهلاک انرژی مورد آزمایش قرار گرفت.

است (Zhong Dong et al., 2009). سوری و مجتهدی (۱۳۹۳) به بررسی الگوی جریان عبوری روی سرریز پلکانی با استفاده از مطالعه عددی و مدل فیزیکی پرداختند. نتایج نشان داد که در هر دو رژیم جریان تیغه‌ای و رویه‌ای تغییرات حاصل از هندسه‌های متفاوت در افزایش افت انرژی موثر است اما تاثیر این پارامترها در رژیم جریان تیغه‌ای بسیار بیش‌تر از رژیم جریان رویه‌ای می‌باشد.

هو و همکاران پروفیل سرریز استاندارد را در حالات مختلف با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند و نتایج آن را با نمودارهای موجود مقایسه نمودند (Ho et al., 2009). مدل دوبعدی سرریز بدون هیچ‌گونه پایه ایجاد شد تا از اثر آن‌ها بر روی جریان صرف نظر شود. با استفاده از این نرم‌افزار خطوط هم‌تراز فشار و بردارهای سرعت در زمان‌های مختلف محاسبه شد. چن و همکاران با استفاده از روش VOF و  $K-\epsilon$  در نرم‌افزار فلوئنت به شبیه‌سازی عددی سرریز پلکانی پرداختند و پروفیل‌های سطح آب، سرعت و فشار روی سرریز و گردابه‌ها را بدست آوردند (Chen et al., 2002). نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاکی از آن بود که تطابق قابل ملاحظه‌ای با نتایج آزمایشگاهی دارد. محمودی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثر نصف کردن ابعاد پله‌ها در سه حالت نسبت ۱/۳، بر میزان افت انرژی در شبیه‌سازی پلکانی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداختند. شبیه‌سازی هیدرولیکی شکل خاصی از شبیه‌سازی فیزیکی است که با استفاده از مدل مقیاس‌دار برای شبیه‌سازی جریان به کار می‌رود. روشننگر و همکاران با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و الگوریتم تکاملی استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی را مدل‌سازی نموده و برای هریک از رژیم جریان تیغه‌ای و رویه‌ای رابطه‌ای ارائه دادند (Roushangar et al., 2014). روشننگر و همکاران با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی



شکل ۱- هندسه و چیدمان‌های گوه‌های مورد بررسی مطالعه عددی

رابطه ۱ تا ۴ است.

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

به منظور شبیه‌سازی میدان سرعت از معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفتنه استفاده شد. این معادلات شامل معادلات پیوستگی و مومنوم در دستگاه مختصات کارتزین به شرح

طرح‌های مختلف انفصال، معادلات منفصل می‌شوند. برای ایجاد هندسه‌ی میدان جریان ابتدا با استفاده از نرم‌افزار *Auto Cad-3d* فایل به نام *STL* تهیه گردید. شبکه‌بندی در دستگاه مختصات کارتزین است. جهت شبکه‌بندی غیریکنواخت، روی تاج سرریز و در پایین دست سرریز از مش ریزتر استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد از روش جز حجم سیال (*VOF*) برای تعیین سطح مشترک دو سیال (آب و هوا) استفاده شد. برای حل معادلات آشفتگی، از مدل آشفتگی *RNG* استفاده گردید. 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 شد. همچنین برای جلوگیری از تخلیه پایین دست فلوم از بلوک با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. نمایی از مدل عددی با شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

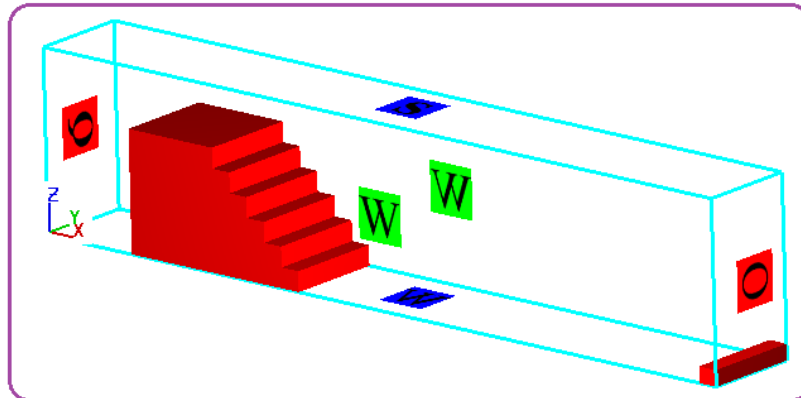
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

که در آن،  $V_F$  کسر حجمی فضای باز به جریان،  $\rho$  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 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

جدول ۱- شرایط مرزی مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار *Flow-3D*

مختصات	صفحات مش بندی		شرایط مرزی	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
X	-۰/۵	۳/۵	دبی	خروجی
Y	صفر	۰/۵	دیواره	دیواره
Z	صفر	۰/۹	دیواره	تقارن



شکل ۲- مدل عددی در نرم‌افزار *Flow-3D*

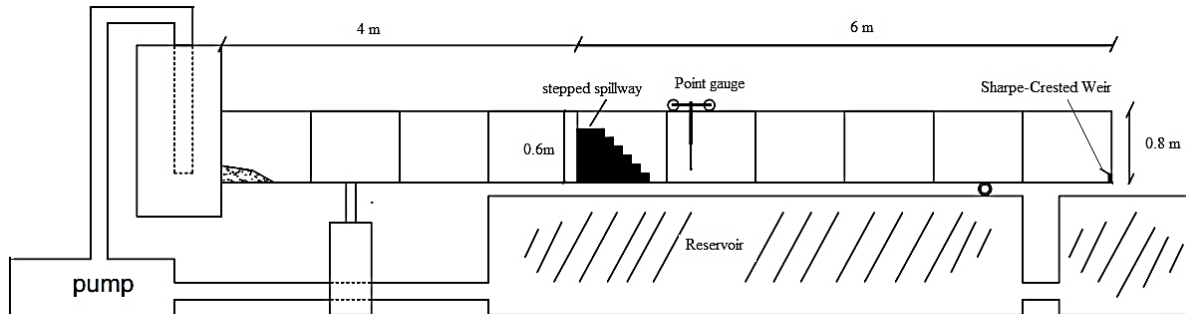
عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر استفاده شد که این عمق سنج در طول و عرض کانال متحرک بوده و ارتفاع آب روی سرریز و عمق آب در کانال قابل اندازه‌گیری بود. برای کنترل رقوم سطح آب در فلوم یک سرریز لبه تیز به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در انتهای پایین دست فلوم تعبیه شد (شکل ۳). در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی از سرریز پلکانی ساده به عرض ۵۰ سانتی‌متر (هم‌عرض کانال) و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که دارای ۶ پله با ارتفاع و طول ۱۰ سانتی‌متر ( $w=h=10\text{cm}$ ) چهار حالت چیدمان

#### مطالعه 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 پلکسی‌گلاس 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 دبی‌سنج آلتراسونیک نصب شده بر روی لوله مکش پمپ با دقت  $\pm 0/1$  لیتر بر ثانیه استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری عمق آب از

مدل ۵ دبی در محدوده ۱۰ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت.

مختلف از المان‌های گوه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. در مجموع ۲۵ آزمایش انجام شد که مدل‌های آزمایشگاهی در شکل ۴ ارائه شده است. سرریز پلکانی در ۴ متر از ابتدای کانال نصب گردید. برای هر

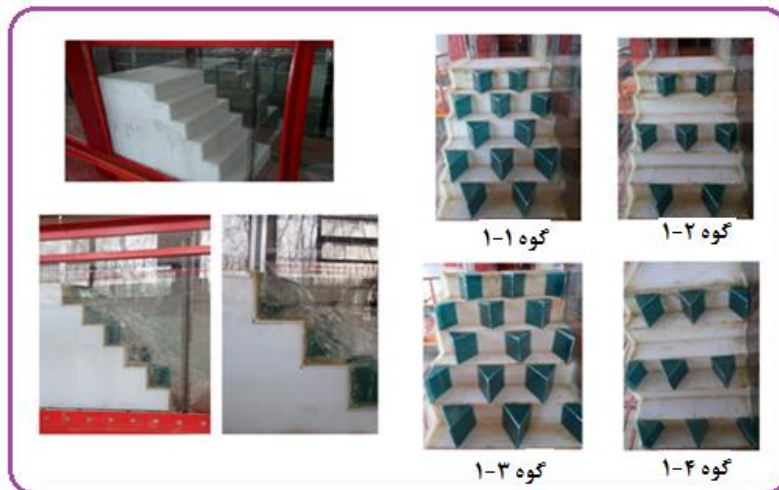


شکل ۳- شماتیک کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی

آزمایش قرار گرفت. اندازه قاعده المان گوه‌ای تیپ یک ۰/۲ برابر عرض کانال، المان گوه‌ای تیپ ۲ با ۰/۳ برابر عرض کانال است. برای این دو تیپ المان گوه‌ای (مثلی در پلان)، ارتفاع وارد بر قاعده المان‌ها با طول پله برابر است (شکل ۱). المان گوه‌ای تیپ ۱ و ۲ با چهار چیدمان برای دبی‌های ۲۰ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه مورد مطالعه عددی قرار گرفتند که نتایج به صورت زیر می‌باشد.

### نتایج و بحث

هدف این مطالعه بررسی تاثیر افزودن المان‌های گوه‌ای شکل روی پله‌ها بر ضریب زبری  $f$ ، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی است. بدین منظور ابتدا ۲ تیپ از المان گوه‌ای با چیدمان‌های مختلف به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت و بهترین هندسه و چیدمان در آزمایشگاه هیدرولیک مورد



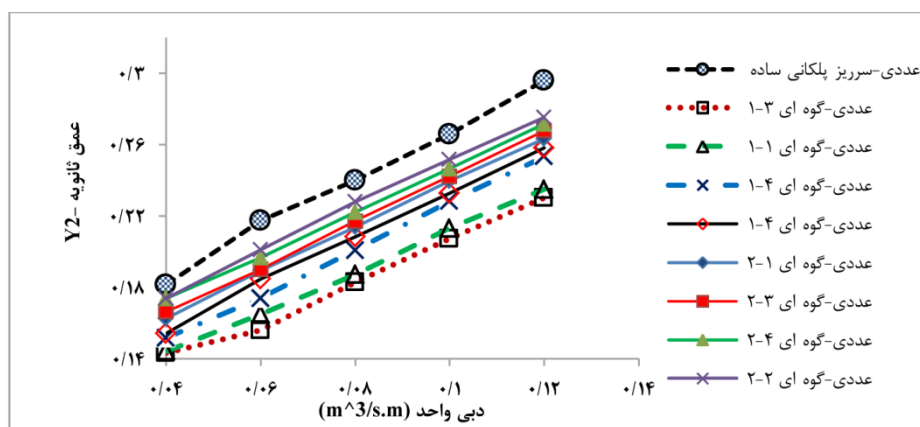
شکل ۴- هندسه و چیدمان‌های سرریز پلکانی همراه با المان گوه‌ای در مطالعه آزمایشگاهی

گوه‌ای تیپ ۱ و ۲ دارای عمق ثانویه کمتری نسبت به سرریز پلکانی ساده است. شکل ۶ تغییرات ضریب زبری  $f$  در مقابل دبی واحد در مدل عددی برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مقدار ضریب زبری  $f$  برای سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ و ۲ نسبت به

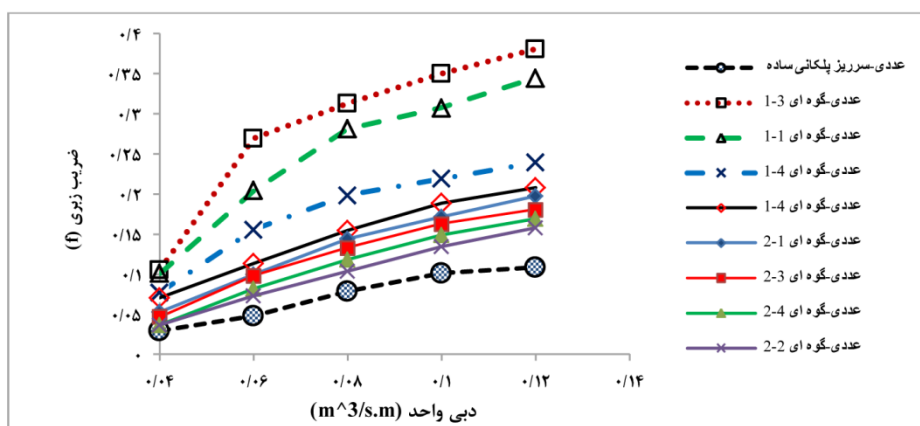
### مطالعه عددی

شکل ۵ مربوط به عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد در مدل عددی برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای با هندسه و چیدمان‌های مختلف است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که سرریز پلکانی همراه با المان‌های

سرریز پلکانی ساده بیش تر است. ملاحظه می شود که گوه‌ها با قاعده ۰/۲ برابر عرض کانال تاثیر بیش تری در افزایش مقدار زبری f نسبت به گوه‌های ۰/۳ برابر کانال دارد.



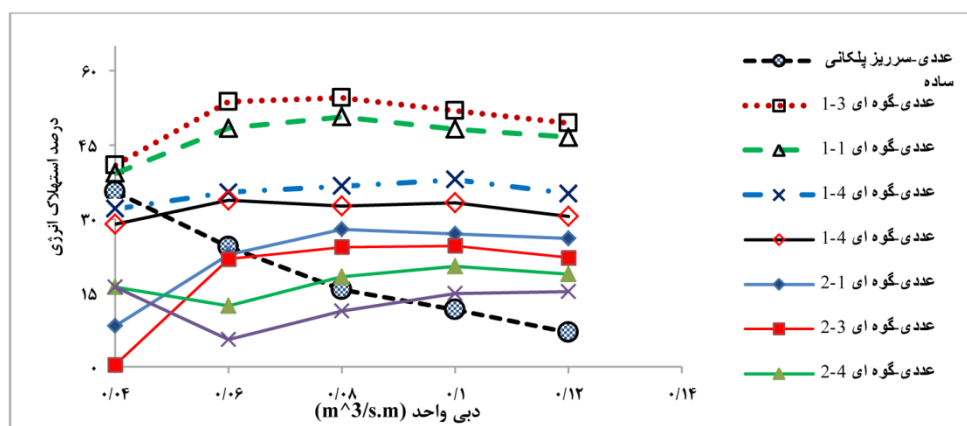
شکل ۵ - عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای



شکل ۶ - ضریب زبری دارسی در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای

ملاحظه می شود که سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ و ۲ نسبت به سرریز پلکانی ساده مقدار انرژی را بیش تر مستهلک کرد.

شکل ۷ مقادیر استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ و ۲ را نشان می دهد.



شکل ۷ - استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای

مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که داده‌های مربوط به سرریز با المان‌های گوه‌ای با هم تفاوت چندانی ندارند ولی تفاوت بین آن‌ها و سرریز ساده برای مطالعه عددی و آزمایشگاهی قابل مشاهده است. همچنین تطابق مناسبی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی دیده شد. البته در برخی نقاط پراکنده وجود دارد که قابل صرف‌نظر کردن است. برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی دیده می‌شود که با افزایش دبی واحد مقدار عمق ثانویه افزایش می‌یابد. همچنین مدل با چیدمان متراکم‌تر از المان‌های گوه‌ای، عمق ثانویه کم‌تری دارد. در واقع برای یک دبی مشخص با المان‌گذاری متراکم‌تر مقدار عمق ثانویه کاهش یافت.

شکل ۹ مقدار زبری  $f$  را برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار  $f$  برای سرریز با المان‌های گوه‌ای نسبت به حالت ساده افزایش یافت. واضح است با افزایش تعداد المان‌های گوه‌ای مقدار زبری  $f$  نیز افزایش یافت. همچنین تطابق مناسبی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی دیده می‌شود. برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی مشاهده می‌شود که با افزایش دبی واحد مقدار زبری  $f$  افزایش می‌یابد. سرریز با المان‌های گوه‌ای مقدار زبری  $f$  بیش‌تری نسبت به سرریز ساده دارد. همچنین مدل با چیدمان متراکم‌تر از المان‌های گوه‌ای، مقدار زبری  $f$  بیش‌تری دارد. در واقع برای یک دبی ثابت با المان‌گذاری بیش‌تر مقدار سرعت کاهش و در نتیجه زبری  $f$  افزایش یافت. قابل ذکر است مدلی که دارای نصف المان گوه‌ای در دیواره کانال (مدل ۱-۳ و ۱-۴) است نسبت به مدلی که فاقد نصف گوه‌ها است، مقدار زبری  $f$  بیش‌تری دارد.

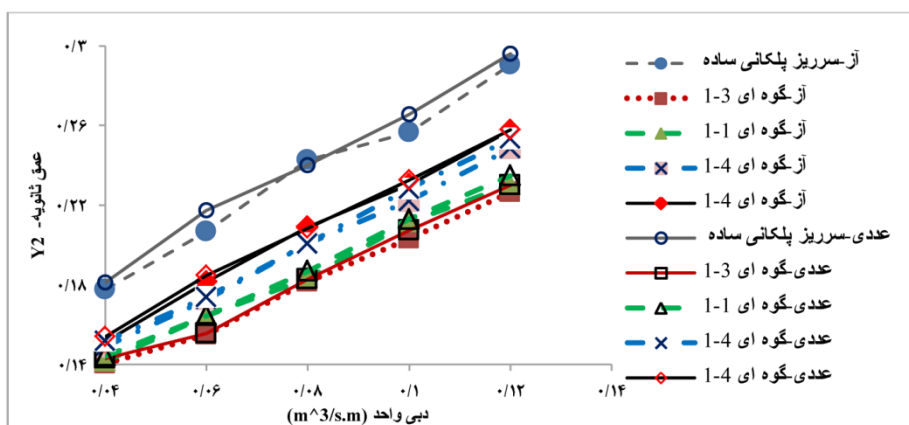
بنابراین با توجه به نتایج عددی حاصل از شکل‌های ۵ تا ۷ می‌توان استنباط نمود که سرریز پلکانی تیپ ۱ با چهار چیدمان، دارای بیش‌ترین مقدار ضریب زبری، کم‌ترین مقدار عمق ثانویه و در نتیجه بیش‌ترین مقدار استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی تیپ ۲ است. نتایج حاکی از آن است که المان‌های گوه‌ای با قاعده  $0/۲$  برابر عرض کانال نتایج بهتری نسبت به المان‌های گوه‌ای با قاعده  $0/۳$  برابر عرض کانال دارد. همچنین واضح است که برای المان گوه‌ای تیپ ۱ چیدمان متراکم‌تر نتایج بهتری دارد. در واقع به هر اندازه که فاصله‌گذاری بین المان‌های گوه‌ای کم‌تر باشد مقدار عمق ثانویه کم‌تر و ضریب زبری و مقدار استهلاک انرژی بیش‌تر است. بنابراین چیدمان ۳، ۴، ۱ و ۲ از المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ (۱-۳، ۱-۱، ۱-۴ و ۱-۲) به ترتیب دارای بهترین نتایج می‌باشد و به عنوان مدل‌های منتخب آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفتند.

### مطالعه آزمایشگاهی

چهار مدل منتخب از المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ که دارای بهترین نتایج عددی است مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. در این تحقیق، با اندازه‌گیری دبی و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ( $y_2$ )، ابتدا عمق بحرانی ( $y_c$ ) محاسبه گردید سپس با استفاده از رابطه هیدرولیکی عمق اولیه پرش هیدرولیکی ( $y_1$ ) و مقدار سرعت در پای سرریز ( $v_1$ ) محاسبه شد و در آخر با استفاده از داده‌های موجود و رابطه بدست آمده توسط هندرسون (Henderson., 1966)، مقدار ضریب زبری داری محاسبه شد:

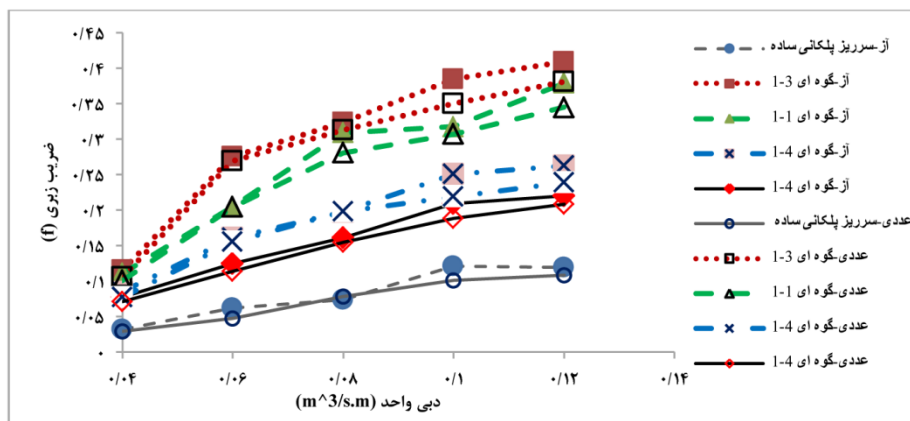
$$f = \frac{8gq\sin\theta}{v_1^3} \quad (۵)$$

شکل ۸ داده‌های آزمایشگاهی مربوط به عمق ثانویه آب در



شکل ۸- عمق ثانویه عددی و آزمایشگاهی سرریز پلکانی ساده و سرریز با المان‌های گوه‌ای تیپ

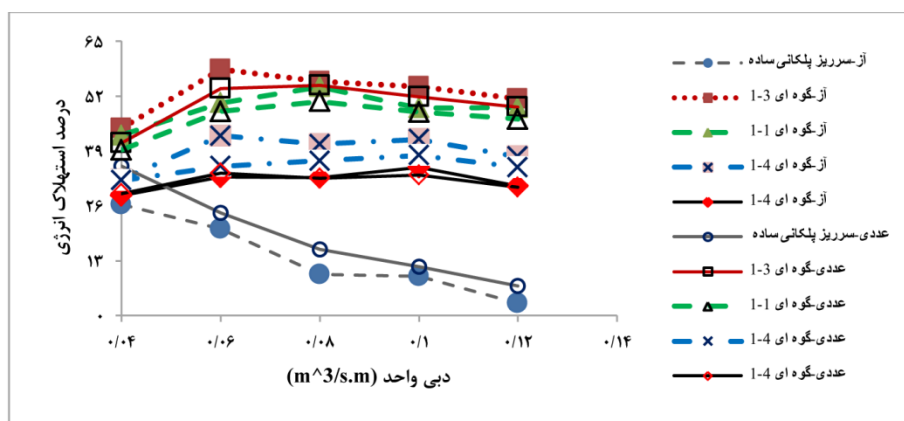




شکل ۹- زبری f سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱

از انرژی را مستهلک می‌کند. برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی دیده می‌شود که برای دبی مشخص با المان‌گذاری بیش‌تر مقدار استهلاک انرژی افزایش یافت. در واقع مدل با چیدمان متراکم‌تر از المان‌های گوه‌ای، انرژی را بیش‌تر از حالت ساده مستهلک می‌کند. همچنین مدلی که دارای نصف المان گوه‌ای در دیواره کانال (مدل ۱-۳ و ۱-۴) است نسبت به مدلی که فاقد نصف گوه‌ها است (مدل ۱-۱ و ۱-۲)، مقدار انرژی را بیش‌تر مستهلک می‌کند.

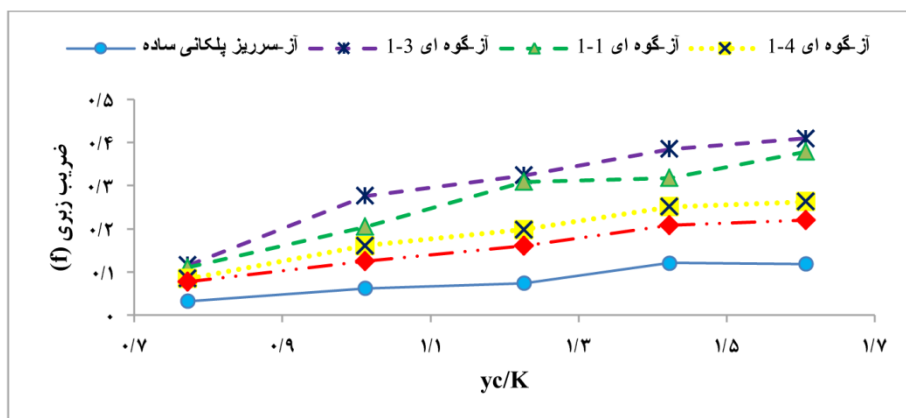
شکل ۱۰ تغییرات استهلاک انرژی را برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که مقدار استهلاک انرژی برای سرریز با المان‌های گوه‌ای نسبت به حالت ساده افزایش یافت. استهلاک انرژی برای سرریز با المان‌های گوه‌ای با افزایش دبی افزایش و سپس با شیب اندک کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش دبی مقدار استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده به صورت کاهشی است. در واقع با افزودن المان‌های گوه‌ای زبری پله‌ها افزایش یافته و مقدار بیش‌تری



شکل ۱۰- تغییرات استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱

بسیاری از محققین از جمله (Tozzi., 1992)، (Chamani and Rajaratnam., 1999) و (Boes and Minor., 2002) از نسبت  $y_c/k$  برای تعیین زبری f استفاده کردند و اذعان داشته‌اند که مقدار f وابسته به زبری پله (K) است. روابط توانی هر یک از مدل‌های سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ (مربوط به شکل ۱۱) و نیز روابط توانی برای داده‌های (Tozzi., 1992)، (Chamani and Rajaratnam., 1999) و (Boes and Minor., 2002) در جدول ۲ آورده شده است.

شکل ۱۱ مربوط به تغییرات زبری f و نسبت عمق بحرانی به زبری پله ( $y_c/k$ ) برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ است. با توجه به این شکل با افزایش نسبت عمق بحرانی به زبری پله ( $y_c/k$ ) مقدار f افزایش یافت. واضح است که سرریز با المان‌های گوه‌ای مقدار زبری f بیش‌تری نسبت به سرریز ساده دارد. همچنین با افزایش تعداد المان‌های گوه‌ای، مقدار زبری f افزایش یافت. این افزایش نسبی برای مدل‌های سرریز با المان‌های گوه‌ای بین ۲۰٪ تا ۴۷٪ درصد متغیر است.



شکل ۱۱- تغییرات زبری f نسبت به  $(y_c/k)$  برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱

### نتیجه‌گیری

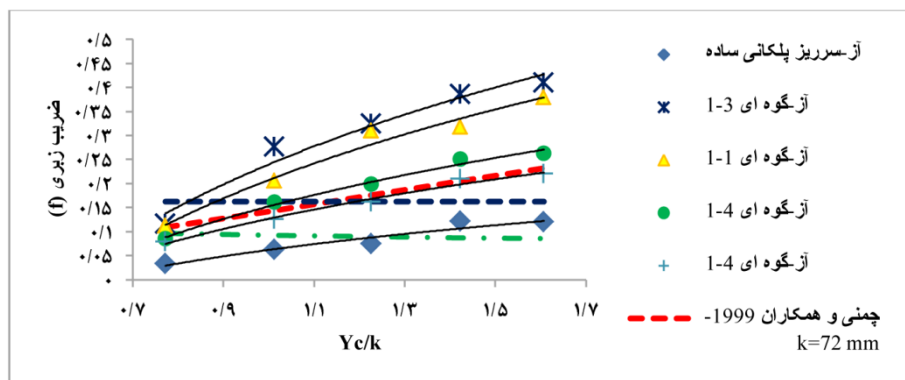
مطالعات عددی مدل‌ها نشان داد که سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ با ۴ چیدمان متفاوت دارای بیش‌ترین زبری، کم‌ترین عمق ثانویه و در نتیجه بیش‌ترین استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی با گوه‌های تیپ ۲ است. همچنین با تراکم المان‌های گوه‌ای نتایج بهتری بدست می‌آید. در واقع با کاهش فاصله بین المان‌ها زبری و استهلاک انرژی افزایش و عمق ثانویه کاهش می‌یابد.

واضح است که این روابط ضریب  $R^2$  نسبتاً خوبی دارند که نشان از دقت مناسب این روابط برای محاسبه زبری f با استفاده از نسبت  $y_c/k$  می‌باشد. با توجه به این روابط مشاهده می‌شود که توان  $y_c/k$  برای رابطه (Boes and Minor., 2002) منفی، برای رابطه (Tozzi., 1992)، برای  $y_c/k < 6.1$  صفر ( $f=0/163$ ) و تنها برای رابطه (Chamani and Rajaratnam., 1999) مقداری مثبت است. شکل ۱۲ مربوط به زبری f آزمایشگاهی برای روابط ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد. با توجه به این شکل می‌توان گفت که رابطه ارائه شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق تطابق مناسبی با رابطه ارائه شده توسط (Chamani and Rajaratnam., 1999) دارد.

جدول ۲- روابط توانی مدل‌های آزمایشگاهی سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ و تحقیقات گذشته

توضیحات	$R^2$	روابط	سرریزهای پلکانی
$K=h \cos\theta$ ارتفاع پله=h شیب سرریز= $\theta$ K=۷۱ میلی‌متر	۰/۹۶	$f = 0.0552 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{1.8343}$	سرریز پلکانی ساده
K=۷۱ میلی‌متر	۰/۹۵	$f = 0.1872 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{1.6588}$	گوه ۱-۱
K=۷۱ میلی‌متر	۰/۹۸	$f = 0.1181 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{1.4578}$	گوه ۱-۲
K=۷۱ میلی‌متر	۰/۸۹	$f = 0.2132 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{1.6662}$	گوه ۱-۳
K=۷۱ میلی‌متر	۰/۹۶	$f = 0.1396 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{1.5471}$	گوه ۱-۴
میلی‌متر $y_c/K < 6/1$	۱	$f = 0.163$	(Tozzi., 1992)
K=۷۱ میلی‌متر	۰/۷۵	$f = 0.1419 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{1.0351}$	(Chamani and Rajaratnam., 1999)
میلی‌متر $100 < K < 10$	۰/۹۹	$f = 0.0926 \left(\frac{y_c}{k}\right)^{-0.1637}$	(Boes and Minor., 2002)





شکل ۱۲- تغییرات زبری  $f$  نسبت به  $(y_e/k)$  برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تپ ۱ و تحقیقات گذشته

سوری، ن.، مجتهدی، ع. ۱۳۹۳. بررسی الگوی جریان عبوری روی سرریز پلکانی با استفاده از مطالعه عددی و مدل فیزیکی. پایان- نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی عمران، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

فتحی، ا.، بینام و موسوی جهرم، س. ح. ۱۳۸۸. بررسی تاثیر شیب تندآب پایین دست تاج بر محل هواگیری طبیعی در جریان غیرریزشی در سرریز پلکانی. نشریه آب و خاک. ۳: ۱۶۷-۱۵۶.

محمودی، م.، رستمی راوری، ا. ۱۳۹۱. بررسی اثر نصف کردن ابعاد پله‌ها در سه حالت نسبت ۱/۳، بر میزان افت کارمایه در شبیه سرریزهای پلکانی. مجله مهندسی منابع آب. ۵: ۱۱۹-۱۰۷.

Boes, R and Minor, H.E. 2002. Hydraulic design of stepped spillways for RCC dams. Hydropower dams. 9.3: 87-91.

Chamani, M.R and Rajaratnam, N. 1999. characteristics of skimming flow over stepped spillways. journal of hydraulic engineering. 125. 4: 361-368.

Chen, Q., Dai, G and Liu, H. 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. journal of hydraulic engineering. 128.7: 683-688.

Cheng, X., Chen, Y and Luo, L. 2006. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways. science in china series E: technological sciences. 49.6: 674-684.

Henderson, F.M. 1966. Open channel flow. macmillan, new york.

Ho, D., Boyes, K and Donohoo, S. 2001. Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique. 14th international proceeding conference of australasian fluid Mechanics.

Rice, C.E and Kadavy, K.C. 1996. Model study of a

مطالعات آزمایشگاهی مدل‌های سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تپ ۱ نیز حاکی از افزایش چشم‌گیر زبری  $f$  و استهلاک انرژی و کاهش قابل توجه عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی ساده می‌باشد. در واقع اندازه زبری  $f$  به اندازه ۲۰٪ تا ۴۷٪ افزایش، استهلاک انرژی به میزان ۲۵٪ تا ۴۵٪ افزایش و عمق ثانویه به اندازه ۱۵٪ تا ۳۵٪ کاهش یافت. همچنین بررسی روابط توانی زبری  $f$  با نسبت  $y_e/k$  برای هر یک از مدل‌های سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای تپ ۱ نشان دهنده تطابق مناسب این روابط با روابط ارائه شده توسط دیگر محققین است بطوری که ضریب  $R^2$  بین ۰/۸۹ تا ۰/۹۸ متغیر است. رابطه توانی  $f$  و  $y_e/k$  برای سرریز پلکانی ۱-۲ ( $R^2=0/98$ ) تطابق بسیار نزدیکی با رابطه ارائه شده توسط (Chamani and Rajaratnam., 1999) ( $R^2=0/75$ ) دارد. بنابراین مقدار زبری  $f$  وابسته به زبری پله  $K$  است و می‌توان با استفاده از نسبت  $y_e/k$  مقدار  $f$  را محاسبه نمود.

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی می‌توان چنین استنباط نمود که برای افزایش استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی می‌توان از المان‌های گوه‌ای استفاده کرد. المان‌های گوه‌ای با قاعده ۰/۲ برابر عرض کانال نتیجه مناسب‌تری خواهد داشت و چیدمان متراکم‌تر این المان‌ها نتایج را دو چندان خواهد نمود.

## منابع

سامانی، ح. م.، نظرزاده، م. ر. ۱۳۸۳. ارزیابی اصول حاکم بر هیدرولیک جریان و طراحی سرریزهای پلکانی. نشریه دانشکده فنی. ۳۸: ۳۳۹-۳۴۷.

سلماسی، ف.، بینام، م.، موسوی جهرمی، س. ح. ۱۳۸۲. ارزیابی افت کارمایه جریان از روی سرریزهای پلکانی با استفاده از شبیه فیزیکی، مجله کشاورزی. ۲۶: ۵۷-۷۱.

- dissipation over stepped spillways under nappe flow regime. journal of hydraulic engineering. 23. 1: 57-62
- Tozzi,M.J. 1992. residual energy in stepped spillways. water power and dam construction. 32-34.
- Tabbara,M., Chatila,J and Awwad,R. 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. Computers and structures. 83.27:2215-2224.
- Zhong Dong,Q., Xiaoqing,H., Wqnxin,H and Antonio,A. 2009. Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways. science in china series E: technological sciences.52.7:1958-1965.
- roller compacted concrete stepped spillway. Journal of hydraulic engineering. 122.6: 292-297.
- Roushangar,K., Akhgar,S and Salmasi,F.2018. Estimating discharge coefficient of stepped spillways under nappe and skimming flow regime using data driven approaches. flow measurement and instrumentation. 59: 79-87.
- 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
- Roushangar,K., Akhgar,S., Salmasi,F and Shiri,J. 2017. Neural networks- and neuro-fuzzy-based determination of influential parameters on energy

## Numerical and Experimental Study of the Influence of Wedge Elements on Roughness and Energy Dissipation over Stepped Spillway

K. Roushangar<sup>1</sup>\*, S. Akhgar<sup>2</sup>

Received: Jun.28, 2018

Accepted: Oct.09, 2018

### Abstract

In the stepped spillway, the steps, by providing an artificial roughening bed, dissipate the flow of energy more than other types of spillways, which reduce the time and cost of construction of the dam and have been able to attract the designer's attention to these types of spillways. But what is important in this type of spillway, increasing the effectiveness of steps in the rate of energy dissipation. For this reason, the present study intends to consider the addition of wedge-shaped elements on the steps and its impact on the variation of the Darcy roughness, the height of the downstream water flow and, as a result, energy depletion on the stepped spillway. In this regard, first, several shapes of wedge elements are simulated with different layouts and arrangement using Flow-3D software and then by comparing the results, the proper model from aspect the most energy dissipation has been studied in the laboratory. Experiments were performed on 5 physical models, with changes in wedge layout and discharge rate, and the results were compared with simple stepped spillway. Numerical and experimental results show that the addition of wedge elements on the steps increases the Darcy roughness coefficient and reduces the height of water in the downstream of the spillway and as a result, the energy depletion increases significantly. By reducing the distance between the wedge elements, energy depreciation increases more significantly. Also, there are relationships between the Darcy roughness ( $f$ ) and the ratio of the critical depth to the step roughness of the stairs ( $y_c / k$ ), that the high accuracy of these relationships ( $R^2 = 0.9-0.98$ ) indicate a significant dependence of the Darcy roughness ( $f$ ) to the step roughness ( $k$ ).

**Keywords:** Artificial roughening bed, Flow Energy, Flow-3D Stepped spillway, Wedge arrangement

1- Associate Professor of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz

2- Ph.D. Candidate of Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz

(\*-Corresponding Author Email: kroshangar@yahoo.com)