

## مقاله علمی - پژوهشی

# بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی همراه با الحاق المان‌هایی روی پله

امیر قادری<sup>۱\*</sup> و سعید عباسی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

### چکیده

پله‌ها در سرریز پلکانی با ایجاد یک بستر زبر مصنوعی، انرژی جریان را بیش از انواع دیگر سرریزها مستهلک می‌کنند. با افزایش زبری، انرژی جریان عبوری از روی سرریز به صورت یکنواخت و پیوسته پراکنده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، بررسی افزودن المان‌هایی بر روی پله‌ها و تأثیر آن بر تغییرات الگوی جریان، نقطه شروع هوادهی، میزان استهلاک انرژی و ضریب زبری داری می‌باشد. آزمایشات بر روی مدل فیزیکی سرریز پلکانی و با الحاق المان‌هایی بر روی پله در آرایش‌های مختلف و به صورت پیوسته و همراه با شکاف انجام گردید و نتایج با سرریز پلکانی ساده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ایجاد مانع بر روی پله‌ها باعث ایجاد برخی تلاطم و نوسانات بر روی سطح جریان در مرکز و کناره‌های پله می‌شود. این امر باعث اختلاط بیشتر آب و هوا و انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود. رژیم جریان انتقالی و غیر ریزشی بر روی مدل‌های سرریز پلکانی همراه با مانع در دبی‌های پایین‌تری نسبت به سرریز پلکانی ساده اتفاق می‌افتد. تغییر رژیم جریان بر روی سرریز پلکانی همراه با مانع شکافدار دیرتر از حالت پیوسته روی می‌دهد. همچنین موانع روی پله تأثیری بر روی میزان استهلاک انرژی جریان و ضریب زبری ندارند ولی با ایجاد شکاف بر روی موانع عملکرد آن‌ها بهتر شده و میزان استهلاک انرژی و ضریب زبری داری به طور متوسط به ترتیب ۷/۳۳ و ۸ درصد نسبت به سرریز پلکانی ساده افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** استهلاک انرژی، المان‌های روی پله، سرریز پلکانی، ضریب زبری، نقطه شروع هوادهی

### مقدمه

بهبود و افزایش استهلاک انرژی جریان از طریق ایجاد زبری بر روی شوت ایفا می‌کنند. در دهه‌های اخیر محققان درصدد افزایش کارایی این سرریزها برآمده و تحقیقات زیادی را در این زمینه انجام داده‌اند که از جمله‌ی آن‌ها، تلاش برای کاهش سرعت جریان در انتقال به پایین دست سد از طریق افزایش بازده استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی می‌باشد (قادری و عباسی، ۱۳۹۸). تحقیقات مختلفی توسط Rice and Kadavy, Rajaratnam (1990), Sorensen (1985) (1996) و Peyras et al., (1992) انجام و تأثیر الگوی جریان، هندسه‌ی پله و شیب سرریز بر روی میزان استهلاک انرژی بررسی شده است.

چانسون به همراه گونزالس و چانسون بررسی‌های آزمایشگاهی زیادی پیرامون تشخیص جریان و استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی برای سدهای خاکی انجام داده است. آن‌ها روابطی را برای تشخیص رژیم جریان بر روی سرریزهای پلکانی با در نظر گرفتن

سرریزهای پلکانی یکی از راهکارهای مؤثر در استهلاک انرژی جریان در طول سرریز در اثر انتقال آن به پایین دست می‌باشند. سرریزهای پلکانی با توجه به شکل و هندسه‌ای که دارند، برای هدر رفت انرژی آب، کاهش قدرت فرسایشی آن و نیز کاهش هزینه‌ی سازه‌های مستهلک کننده‌ی انرژی پایین دست سرریز سدهای بزرگ و در بازسازی سدهای خاکی استفاده می‌شوند (Chanson, 1995; Khatsuria, 2005). پله‌ها بر روی سرریز پلکانی، نقش مهمی در

۱- دانشجوی دکترای عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، ایران

۲- استادیار مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، ایران  
(Email: amir\_ghaderi@znu.ac.ir)

(\*نویسنده مسئول)

(2020) با استفاده از روش‌های دینامیک سیال‌های محاسباتی به شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی پرداخته‌اند. قادری و عباسی (۱۳۹۸) تأثیر ایجاد شکل کنگره‌ای پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی را با کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. ایشان مشاهده کردند که اصلاح شکل هندسی پله‌ها باعث بهبود عملکرد سرریز پلکانی در افزایش میزان استهلاک انرژی جریان شده و سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای انرژی باقی‌مانده کم‌تری نسبت به سرریزهای پلکانی ساده دارند. سرکمریان و احدیان (۱۳۹۹) با استفاده از مدل عددی انسیس میزان استهلاک انرژی تحت تأثیر پارامترهای هندسی پله‌ها شامل تعداد پله‌ها و شیب شوت و دبی عبوری جریان از روی سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش تعداد پله‌ها و شیب شوت سرریز، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین به ازای ثابت بودن شیب شوت، با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. اخگر و روشنگر (۱۳۹۹) به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر ایجاد حفره بر روی پله‌های سرریز پلکانی بر میزان استهلاک انرژی جریان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد، ایجاد حفره روی پله موجب کاهش سرعت تا حدود ۸۲ درصد و کاهش ارتفاع آب در پایین‌دست سرریز تا حدود ۳۳ درصد می‌گردد و میزان استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی تا حدود ۴ برابر افزایش می‌یابد. قادری و عباسی به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر الحاق المان‌های روی پله‌های سرریز پلکانی بر روی میزان استهلاک انرژی جریان و نقطه شروع هوادهی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که وجود المان‌ها بر روی پله‌ها و در آرایش‌های مختلف، باعث افزایش زبری و افزایش تلاطم و نوسانات سطح جریان عبوری از روی پله‌ها شده و در نتیجه میزان استهلاک انرژی به‌طور متوسط ۷/۲ درصد افزایش می‌یابد. وجود المان‌ها بر روی پله‌ها باعث انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود (Ghaderi and Abbasi, 2021)

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات آزمایشگاهی و عددی محققین بر روی سرریز پلکانی و بر اساس ماهیت کلی سرریزهای پلکانی، یکی از عوامل مهم و مؤثر در بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلکانی به‌خصوص در امر استهلاک انرژی جریان، تغییرات در فرم هندسی و ابعاد پله‌های سرریز پلکانی می‌باشد. تغییر در فرم هندسی پله‌ها باعث تغییر در پارامترهای هیدرولیکی جریان و میزان استهلاک انرژی جریان می‌گردد. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی خصوصیات جریان عبوری از روی سرریز پلکانی شامل تغییرات در سطح آب، میزان استهلاک انرژی، ضریب زبری و موقعیت شروع هوادهی در اثر استفاده از المان‌هایی بر روی پله‌ها در ابعاد و آرایش‌های مختلف می‌باشد.

شیب شوت و عمق بحرانی ارائه دادند. همچنین استفاده از سرریز پلکانی با شیب شوت کمتر از ۲۶/۶ درصد را برای سدهای خاکی پیشنهاد دادند (Chanson, 2001; Gonzalez and Chanson, 2007). سلماسی و همکاران (۱۳۸۲) تأثیر تعداد پله‌ها در استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که تأثیر افزایش تعداد پله در افزایش استهلاک انرژی تا حدی مثبت بوده و سپس روند کاهشی دارد. این در حالی است که روشن و همکاران دو مدل سرریز پلکانی با تعداد پله ۱۲ و ۲۲ پلکانی را در با شیب تند آب ۱۹/۲ درصد مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که راندمان استهلاک انرژی در مدل سرریز پلکانی با ۱۲ پلکان بیش از مدل پلکانی ۲۲ می‌باشند (Roshan et al., 2010). تحقیقات متعدد دیگری به‌صورت آزمایشگاهی توسط محققینی چون Hamed et al., (2011), al., (2012), Felder et al., (2014), Felder et al., (2011), Nohani et al., (2015), Felder and Chanson (2014) به ترتیب تأثیر شیب معکوس، تأثیر هندسه‌ی پله‌های سرریز، تأثیر ایجاد لبه در انتهای پله‌های سرریز و اثر زبری در سطح پله‌های سرریز پلکانی را در جهت افزایش میزان استهلاک انرژی و Ghaderi et al., (2020) تأثیر ابعاد پله و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آب شستگی پایین‌دست سرریز پلکانی را بررسی کردند. همچنین حیدری ارجلو و همکاران (۱۳۸۹)، جم و همکاران (۱۳۹۳)، Felder and Chanson (2014)، Mero and Mitchell (2017)، al., (2019) به ترتیب تأثیر شیب بر تعداد پله‌های سرریز پلکانی، استهلاک انرژی روی سرریز دنداندار بلوکی، تأثیر اثر مقیاس، تأثیر تغییر هندسه پله‌ها و ویژگی‌های جریان دوفازی آی و هوا در رژیم جریان ریزشی را مورد ارزیابی قرار دادند. روشنگر و اخگر (۱۳۹۸) تأثیر المان‌های گوه‌ای شکل را بر ضریب زبری و استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که افزودن المان‌های گوه‌ای روی پله ضریب زبری را افزایش داده و موجب افزایش استهلاک انرژی جریان می‌گردد. ترکمن سرابی و همکاران (۱۳۹۹) اثر اندازه مصالح سنگی بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی گابیونی را مورد بررسی قرار دادند. آنان مشاهده کردند که هرچه قطر دانه‌بندی ذرات کوچک‌تر باشد، میزان اتلاف انرژی بیش‌تر است. در سال‌های اخیر علاوه بر تحقیقات آزمایشگاهی، مطالعاتی مبتنی بر شبیه‌سازی عددی با کمک دینامیک سیال محاسباتی<sup>۱</sup> بر روی ویژگی‌های جریان عبوری از سرریزهای پلکانی انجام شده است. محققانی مانند Tongkratoke et al., (2009)، Chen et al., (2002)، Tabbara et al., (2005)، Nikseresht et al., (2013)، Daneshfaraz et al., (2016)، Morevati et al., (2016) و Ghaderi et al.,

## مواد و روش‌ها

### رابطه‌های تئوری تشخیص رژیم جریان

معیارهای مؤثر در به وجود آمدن انواع جریان در سرریزهای پلکانی شامل هندسه‌ی پله‌ها (طول پله  $l$  و ارتفاع پله  $h$ ) و میزان دبی عبوری از روی سرریز ( $Q$ ) می‌باشند. با این حال محققان دیگر معیارهای دیگری را نیز ارائه داده‌اند (Rajaratnam, 1990). نتایج کار بسیاری از محققین نشان دادند که نوع رژیم جریان وابسته به عمق بحرانی نرمال شده  $(y_c/h)$  و مختصات بدون بعد پله  $(h/l)$  می‌باشد که در آن  $y_c = (q^2/g)^{1/3}$  عمق بحرانی جریان،  $h$  و  $l$  به ترتیب ارتفاع و عرض پله می‌باشند (Rajaratnam, 1990; Peyras et al., )

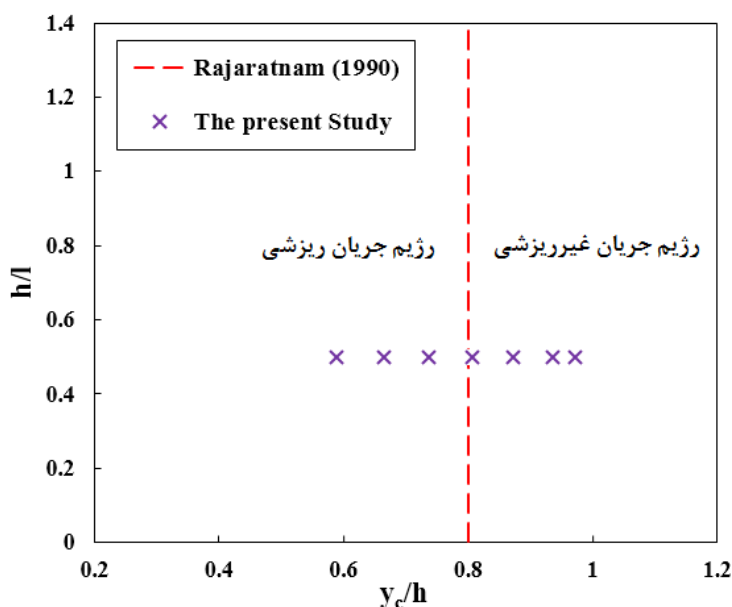
مبنا در زیر رابطه‌ی تجربی توسط راجاراتنام برای تشخیص رژیم جریان غیر ریزشی بر روی سرریز پلکانی ارائه شده است (Rajaratnam, 1990).

$$\frac{y_c}{h} \geq 0.8, 0.4 \leq \frac{h}{l} \leq 0.9 \quad (1)$$

با توجه به رابطه‌ی شماره (۱)، نوع رژیم جریان ایجاد شده بر روی مدل‌های سرریز پلکانی تحقیق حاضر در جدول (۱) و شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی و نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی تحقیق حاضر

دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)	عمق بحرانی (متر)	ارتفاع پله (متر)	طول پله (متر)	$h/l$	$y_c/h$	نوع رژیم جریان
۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۵۹	ریزشی
۰/۰۳۰	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۶۶	ریزشی
۰/۰۳۵	۰/۰۴۴	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۷۴	ریزشی
۰/۰۴۰	۰/۰۴۸	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۸۱	انتقالی
۰/۰۴۵	۰/۰۵۲	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۸۷	غیر ریزشی
۰/۰۵۰	۰/۰۵۶	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۹۴	غیر ریزشی
۰/۰۵۳	۰/۰۵۸	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۵	۰/۹۸	غیر ریزشی

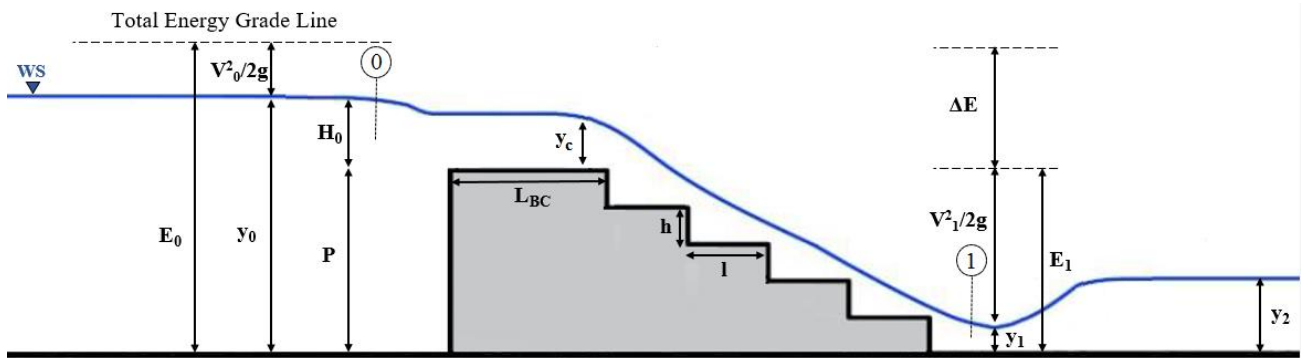


شکل ۱- رژیم جریان ایجاد شده بر روی سرریز پلکانی تحقیق حاضر

### استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی

اختلاف انرژی در بالادست سرریز پلکانی (بخش ۱) و انرژی در پایین دست آن در محلی که عمق اولیه پرش هیدرولیکی تشکیل

می‌گردد (بخش ۲) معیاری برای بررسی میزان استهلاک انرژی جریان می‌باشد. بنابراین مطابق شکل ۲ می‌توان انرژی بالادست و پایین دست سرریز پلکانی را محاسبه کرد.



شکل ۲- پارامترهای هیدرولیکی مهم در استهلاک انرژی سرریز پلکانی

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{y_c}{h}, \frac{y_c}{l}, \frac{P}{y_c}, \frac{h}{l}, f_e, R_e, W_e, Fr, N\right) \quad (۶)$$

اگر فرض شود که در آبراه‌های روباز نیروی لزجت سیال به نیروی اینرسی ناچیز می‌باشد (Chow, 1959) و با توجه به ماهیت پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز پلکانی و تلاطم زیاد آب و نیز با توجه به این که تعداد پله‌های سرریز پلکانی و ابعاد پله‌ها برای همه-ی مدل‌ها یکسان می‌باشد، می‌توان از عدد رینولدز  $R_e$ ،  $h/l$  و  $N$  صرف‌نظر کرد. همچنین با توجه به اینکه ارتفاع آب بر روی لبه تمامی مدل‌های سرریز پلکانی بیش‌تر از ۵ سانتی‌متر می‌باشد، از اثرات عدد وبر ( $W_e$ ) نیز صرف‌نظر شد (Chow, 1959).

### مدل‌های آزمایشگاهی

فلومی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۱/۲ و ۰/۸ متر با دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلس شفاف و کف فلزی جهت انجام آزمایش‌های مطالعه حاضر در نظر گرفته شد. برای تأمین دبی جریان، از پمپی با توان حداکثر ۵۵ لیتر بر ثانیه استفاده شد. تنظیم دبی خروجی از موتور پمپ توسط شیر اهرمی تعبیه‌شده روی پمپ انجام گردید. آب از منبع ذخیره اصلی موازی کانال به منبع ابتدای کانال پمپاژ شده و در آنجا با عبور از آرام‌کننده (دو صفحه مشبک) وارد کانال می‌شود. به‌منظور جلوگیری از تلاطم جریان در ابتدای کانال به‌ویژه در دبی‌های بالا از یک عدد صفحه شناور روی سطح آب استفاده شد. جریان آب پس از عبور از طول کانال به مخزنی در انتهای کانال تخلیه می‌شود. اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به کانال توسط دبی سنج صوتی نصب‌شده بر روی لوله پمپ صورت گرفت. اندازه‌گیری عمق جریان به‌وسیله عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر که بر روی کانال نصب شده است و امکان حرکت در راستای طولی و عرضی جریان را دارد، انجام شد. عمق جریان آب در فاصله‌ی ۲ متری (ناحیه آرام که باعث افزایش دقت قرائت می‌شود) از بالادست سرریز پلکانی و بعد از پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز پلکانی اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

$$E_0 = P + 1.5y_c \quad (۲)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (۳)$$

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (۴)$$

در این معادلات  $E_0$  انرژی کل بالادست سرریز پلکانی،  $E_1$  انرژی کل جریان در پایین‌دست سرریز پلکانی،  $\Delta E$  استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی،  $P$  ارتفاع سرریز پلکانی،  $y_c$  عمق بحرانی جریان،  $V_1$  سرعت جریان در پایین‌دست سرریز پلکانی (پنجه) و  $g$  شتاب گرانش زمین می‌باشد.

### آنالیز ابعادی

با توجه به نتایج بررسی‌های انجام‌شده توسط محققان مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی ( $\Delta E$ ) عبارت‌اند از (Ghaderi et al. 2020): الف: مشخصات سیال شامل گرانش دینامیکی ( $\mu$ )، چگالی ( $\rho$ )، شتاب گرانش زمین ( $g$ )، کشش سطحی ( $\sigma$ )

ب: مشخصات هیدرولیکی جریان شامل دبی در واحد عرض ( $q$ )، انرژی کل بالادست سرریز ( $E_0$ )

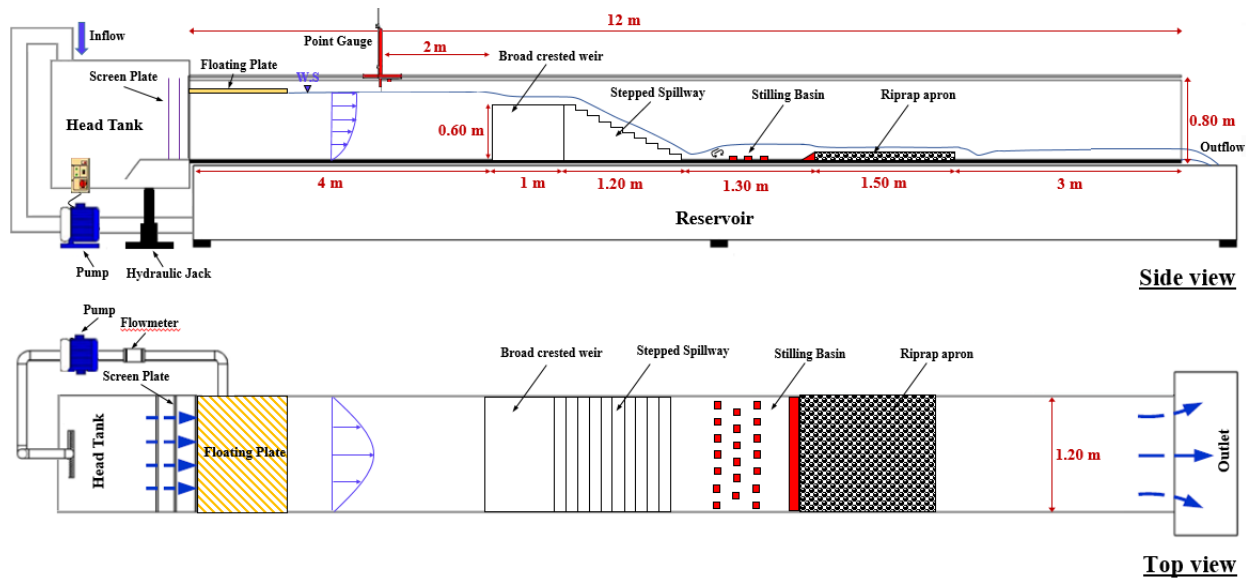
پ: مشخصات هندسی سرریز پلکانی شامل ارتفاع پله‌ی سرریز ( $h$ )، طول پله‌ی سرریز ( $l$ )، تعداد پله ( $N$ ) ضریب زبری بستر ( $f_e$ ) و ارتفاع سرریز ( $P$ )

بنابراین رابطه بین این پارامترها به‌صورت ذیل می‌باشد:

$$f(\Delta E, E_0, q, f_e, P, N, l, h, \sigma, g, \rho, \mu) = 0 \quad (۵)$$

با استفاده از تئوری پی باکینگهام<sup>۱</sup> می‌توان میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی را تابعی از پارامترهای بی‌بعد زیر در نظر گرفت:

1- Buckingham's  $\pi$  theory



شکل ۳- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی

جریان روی سرریز پلکانی از نوع رژیم جریان ریزشی می‌باشد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که رژیم جریان عبوری از روی سرریز پلکانی از پله شماره ۷ به صورت رژیم جریان ریزشی بوده و جت‌های جریان با برخورد و فرود بر روی پله‌ها به پایین دست سرریز پلکانی منتقل می‌شوند. این در حالی است که در سرریز پلکانی تمام استخر، در اثر برخورد بخشی از جریان عبوری از روی پله‌ها با مانع‌های روی پله، ناحیه برگشتی جریان را شکل دهند که باعث می‌شود ناحیه جریان‌های گردابه<sup>۳</sup> نسبت به سرریز پلکانی ساده بزرگتر بوده و جت‌های جریان در این نواحی به حالت غوطه‌وری درآمد و به دلیل استخراف پله‌ها، رژیم جریان انتقالی در این دبی برای سرریز تمام استخر وجود دارد. به بیان دیگر، جریان انتقالی و غیر ریزشی بر روی سرریز پلکانی تمام استخر در دبی‌های پایین تری نسبت به سرریز پلکانی ساده اتفاق می‌افتد.

شکل (۷) جریان عبوری از سرریزهای پلکانی در شرایط وجود مانع بر روی پله و در آرایش‌های مختلف را در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌ها، رژیم جریان برخلاف سرریز پلکانی ساده از نوع رژیم جریان انتقالی می‌باشد. به طوری که جریان بر روی هیچ یک از پله‌ها فرود نمی‌آید و رفتار جریان ریزشی مشاهده نمی‌گردد. هم‌چنین با مقایسه بین آرایش‌های مختلف مانع روی پله، می‌توان گفت که تلاطم و نوسانات بر روی سطح جریان و پرش جریان از روی پله در مرکز و کناره‌های پله در تمامی مدل‌ها و هم‌چنین در تمامی دبی‌ها مشاهده می‌شود.

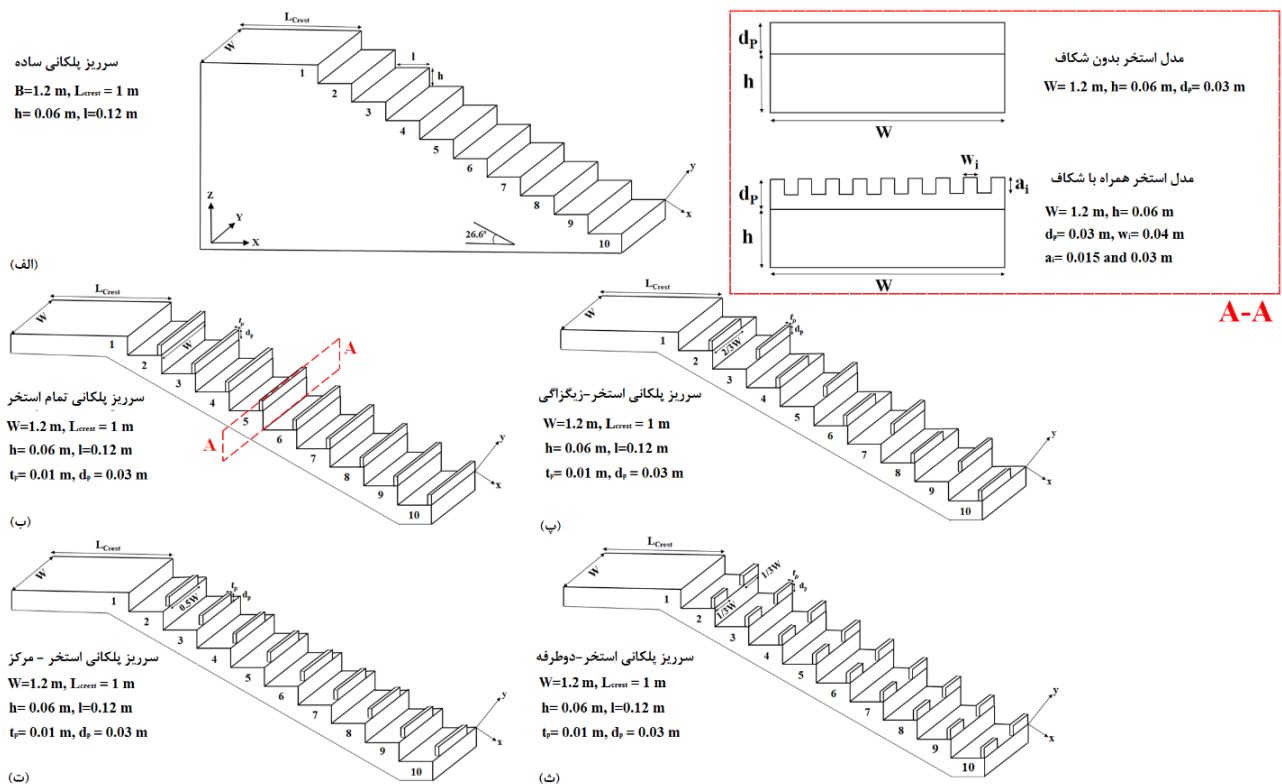
آزمایشات بر روی مدل سرریز پلکانی با شیب شوت ۲۶/۶ درجه و متشکل از ۱۰ پله با ارتفاع و طول به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۱۲ متر انجام گردید. سرریزهای ساخته شده از جنس فوم فشرده نسبتاً سخت (به دلیل امکان برش دقیق و راحت) با ضخامت ۰/۰۱۵ متر ساخته شدند. بدین منظور آزمایش‌ها از مدل سرریز پلکانی: سرریز پلکانی ساده، سرریز پلکانی همراه با موانعی روی پله که اصطلاحاً مدل استخری<sup>۱</sup> نام‌گذاری شده‌اند و سرریز پلکانی مدل استخری همراه با شکاف<sup>۴</sup> در آرایش به صورت تمام استخر، زیگزاگی، مرکزی و دوطرفه استفاده گردید. شکل‌های (۴) و (۵) مشخصات و نمایی از مدل‌های سرریز پلکانی ساخته شده را نشان می‌دهند. با توجه به مطالعات فلدر و همکاران و نتایج قادری و همکاران، ضخامت موانع روی پله تأثیری بر عملکرد آن‌ها نداشته و ارتفاع موانع روی پله نباید از نصف ارتفاع پله‌ها بیشتر باشد (Felder et al., 2012; Ghaderi et al., 2021). به همین علت ضخامت (t<sub>p</sub>) ۰/۰۱ متر و ارتفاع (d<sub>p</sub>) ۰/۰۳ برای موانع روی پله انتخاب گردید. هم‌چنین مقادیر ارتفاع شکاف (a<sub>i</sub>) به ترتیب نصف ارتفاع مانع و تمام ارتفاع مانع انتخاب شد.

## نتایج و بحث

### الگوی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی همراه با مانع

شکل (۶) جریان عبوری از سرریز پلکانی ساده (بدون مانع روی پله) و سرریز پلکانی تمام استخر را در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده شد، در این دبی رژیم

- 1- Pooled stepped spillway
- 2- Notch pool



شکل ۴- مشخصات هندسی مدل‌های سرریز پلکانی تحقیق حاضر

دهد و به دبی بیش‌تری جهت ایجاد رژیم جریان انتقالی و غیر ریزشی نسبت به سرریز پلکانی همراه با مانع پیوسته نیاز است. همچنین آنچه مشهود است، اینکه میزان اختلاط آب و هوا در اثر شکاف در موانع بیشتر شده است، به‌طوری‌که پله‌های بالادست سرریز پلکانی نیز همراه با نواحی اختلاط آب با هوا (جریان دو فاز) هستند. هر چه ارتفاع شکاف بیشتر شود، میزان اختلاط آب و هوا بیشتر می‌شود. به‌طور مثال در شکل (۸) نقطه شروع هوادهی در سرریز پلکانی تمام استخر بین پله‌های شماره ۵ و ۶ اتفاق می‌افتد، این در حالی است که برای مدل‌های همراه با شکاف با ارتفاع‌های شکاف ۱/۵ و ۳ سانتی-متر به ترتیب در پله‌های شماره ۶ و ۷ اتفاق رخ می‌دهد.

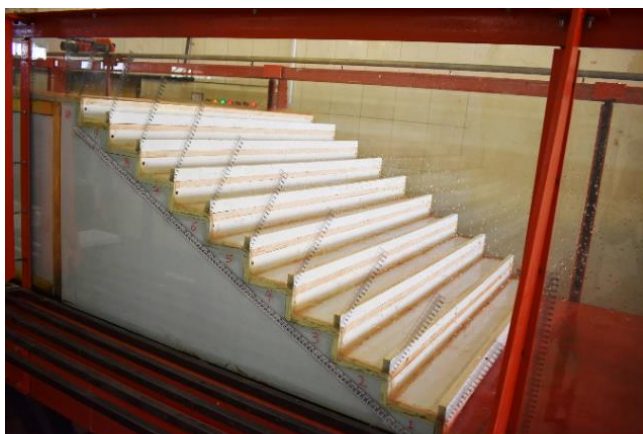
برای بررسی نقطه شروع هوادهی جریان عبوری از روی مدل‌های سرریز پلکانی، می‌توان از پارامتر بدون بعد  $L_i/k_s$  نسبت به عدد فرود استفاده کرد.  $L_i$  فاصله طولی نقطه شروع هوادهی تا لبه پله ۱۰ام و  $k_s = (h+d_p) \times \cos\theta$  ارتفاع زبری پله می‌باشد. برای سرریز پلکانی ساده مقدار ارتفاع مانع  $d_p=0$  می‌باشد. همچنین عدد فرود را می‌توان تابعی از زبری پله‌ها طبق رابطه (۷) بیان کرد.

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \times \sin\theta \times k_s^3}} \quad (7)$$

در بین مدل‌ها، شدت تلاطم جریان در مدل زیگزآگی بیش‌تر و در مدل تمام استخر کم‌تر از مدل‌های دیگر مشاهده گردید. علت آن این است که جریان به هنگام برخورد به موانع روی لبه پله‌ها، از مسیر مستقیم و موازی خود با محور عرضی سرریز پلکانی منحرف می‌شوند. به‌بیان‌دیگر، بخش‌های که مانع وجود دارد، شدت نوسانات سطح جریان بیش‌تر است و در بخش‌های که مانع روی پله‌ها وجود ندارد، شدت تلاطم و نوسانات سطح جریان کم‌تر است. وجود تلاطم و پرش جریان از روی پله‌ها در اثر موانع می‌تواند باعث ورود هوای بیش‌تر به درون جریان شده و علاوه بر ایجاد بی‌ثباتی<sup>۱</sup> و ناپایداری در جریان، موقعیت نقطه شروع هوادهی<sup>۲</sup> را تحت تأثیر قرار دهد.

تأثیر ایجاد شکاف بر روی الگوی جریان عبوری از سرریز پلکانی همراه با مانع روی پله در شکل (۸) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که ایجاد شکاف در موانع روی پله باعث کاهش نوسانات سطح جریان و پرش جریان از روی پله به‌خصوص در پله‌های پایین‌دست سرریز پلکانی نسبت به مدل‌های همراه با مانع بدون شکاف شده است. برای مانع شکافدار، عبور جریان از بین شکاف‌ها، تمایل جریان به ماندگاری در رژیم ریزشی را افزایش می‌-

1 Instabilities  
2 Inception point



مدل تمام استخر



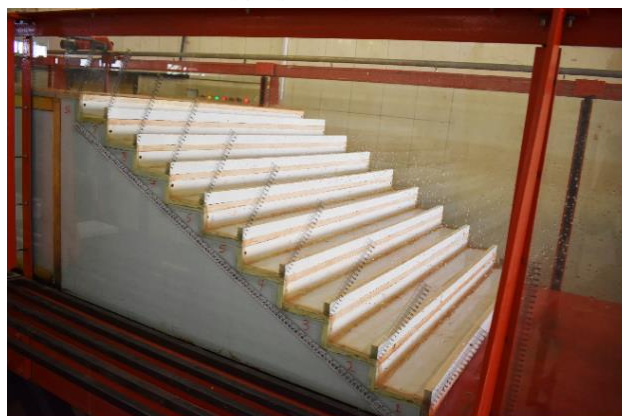
مدل استخر-زیگزاگی



مدل استخر-مرکز



مدل استخر- دو طرف



مدل تمام استخر



مدل تمام استخر با شکاف

شکل ۵- مدل های سه بعدی سرریزهای پلکانی همراه با المان الحاقی روی پله در مطالعه آزمایشگاهی



سرریز پلکانی ساده



سرریز پلکانی تمام استخر

شکل ۶- رژیم جریان ریزشی در سرریز پلکانی ساده و رژیم جریان انتقالی در سرریز پلکانی تمام استخر در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه



سرریز پلکانی تمام استخر



سرریز پلکانی استخر-زیگزاگی



سرریز پلکانی استخر-مرکز



سرریز پلکانی استخر-دو طرف

شکل ۷- نمایی از نوسانات سطح جریان عبوری از روی پله‌ها در مرکز و کناره‌ها در مدل‌های سرریز پلکانی همراه با مانع





سرریز پلکانی تمام استخر



سرریز پلکانی تمام استخر - با شکاف نصف ارتفاع استخر



سرریز پلکانی تمام استخر - با شکاف به ارتفاع استخر

شکل ۸- جریان عبوری از سرریز پلکانی همراه با مانع و شکاف بر روی پله

### استهلاک انرژی جریان و انرژی باقی مانده

همواره انتقال جریان به پایین دست سازه‌های هیدرولیکی توسط سرریزها باعث ایجاد انرژی جنبشی زیادی می‌شود. یکی از دغدغه‌های مهم مهندسان طراح، اطلاع از میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی و مقدار انرژی باقی مانده در انتهای این نوع از سرریزها می‌باشد. میزان استهلاک انرژی  $(\Delta E/E_0)$  و مقدار انرژی باقی مانده  $(H_{res})$  در لبه‌ی پله‌ی آخر همه‌ی مدل‌های سرریز پلکانی - همراه با مانع بر روی پله محاسبه و در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شد. برای محاسبه مقدار انرژی باقی مانده از رابطه ۸ استفاده گردید.

$$H_{res} = y \cos^2 \theta + \frac{V_1^2}{2 \times g} \quad (۸)$$

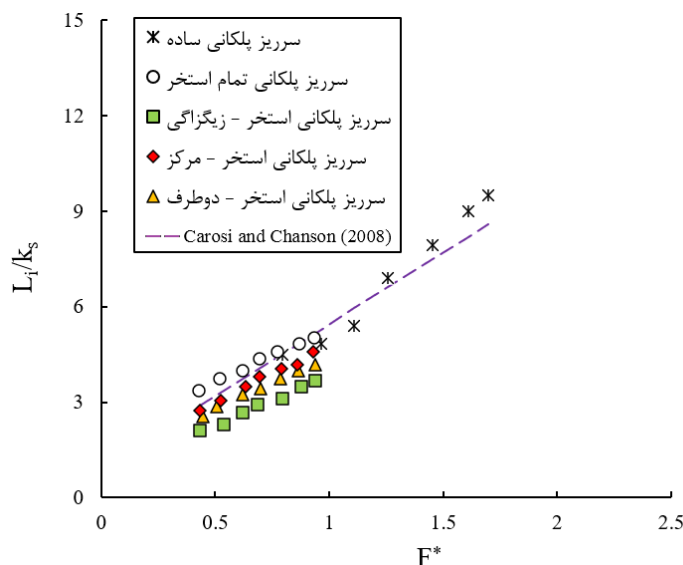
در این رابطه  $V_1$ ،  $\theta$ ،  $y$  و  $g$  به ترتیب سرعت جریان در پنجه سرریز، شیب شوت سرریز پلکانی، عمق جریان و شتاب گرانش زمین می‌باشند. در شکل (۱۱) دیده می‌شود برخلاف تصور اینکه ایجاد مانع در لبه پله باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد، اما بیشترین استهلاک انرژی در سرریز پلکانی ساده اتفاق افتاده است. همچنین رژیم جریان ریزشی (مقدار  $y_c$  کم) انرژی بیشتری مستهلک می‌شود.

در رابطه فوق،  $q$  دبی در واحد عرض،  $\theta$  شیب شوت سرریز می‌باشد. تمامی داده‌های برداشت شده از آزمایشات با رابطه خطی ارائه شده توسط کاروسی و چانسون بر روی سرریز پلکانی با شیب شوت ۶/۶ درجه مقایسه و در شکل (۹) ارائه گردید (Carosi and Chanson, 2008). مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل سرریز پلکانی ساده تحقیق حاضر همخوانی خوبی با رابطه ارائه شده توسط کاروسی و چانسون دارد. همچنین می‌توان گفت وجود مانع روی پله سرریز پلکانی باعث انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی شده و این امر در مدل‌های استخر در آرایش‌های مختلف افزایش می‌یابد. به طوری که در مدل استخر-زیگزاگی فاصله طولی نقطه شروع هوادهی دارای کمترین مقدار و مدل سرریز پلکانی تمام استخر دارای بیشتر مقدار در بین مدل‌های دارای مانع روی پله می‌باشند. با توجه به شکل (۱۰)، می‌توان دریافت که ایجاد شکاف در موانع روی پله باعث انتقال هر چه بیشتر محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود.

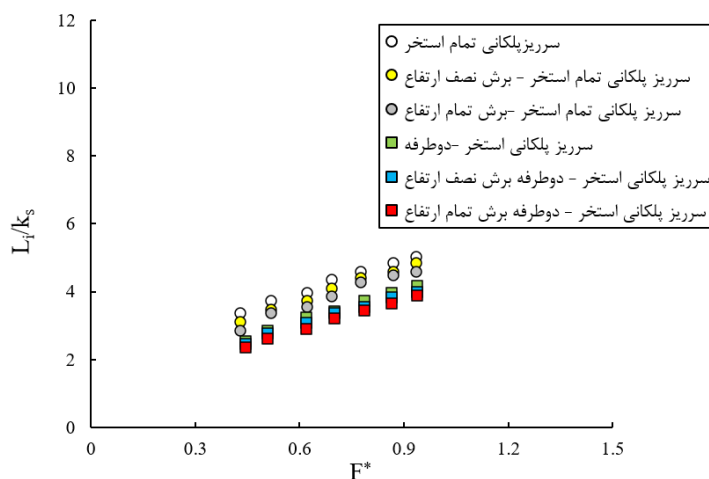
همکاران و قادری و عباسی دارد، که بیان کردند کم‌ترین انرژی باقی‌مانده بر روی سرریزهای پلکانی در رژیم جریان غیر ریزشی اتفاق می‌افتد (Felder et al., 2012; Ghaderi and Abbasi, 2021). همچنین در شرایط جریان یکسان، مقادیر انرژی باقی‌مانده بی‌بعد شده برای سرریز پلکانی ساده کمتر از مدل‌های سرریز پلکانی همراه با مانع است. به بیان دیگر می‌توان گفت، مقدار متوسط انرژی باقی‌مانده نسبی برای سرریز پلکانی ساده برابر  $H_{res}/y_c = 3/64$  می‌باشد. این در حالی است که میانگین این مقدار برای سرریزهای پلکانی همراه با مانع برابر  $H_{res}/y_c = 4/13$  می‌باشد.

به بیان دیگر، با افزایش دبی جریان، میزان استهلاك انرژی در تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد. در بین سرریزهای پلکانی همراه با مانع، مدل تمام استخر به علت ایجاد ناجیه جریان برگشتی و جریان‌های گردابه بزرگ‌تر، بیشترین کارایی و مدل استخر-مرکز کمترین کارایی را در میزان استهلاك انرژی دارند.

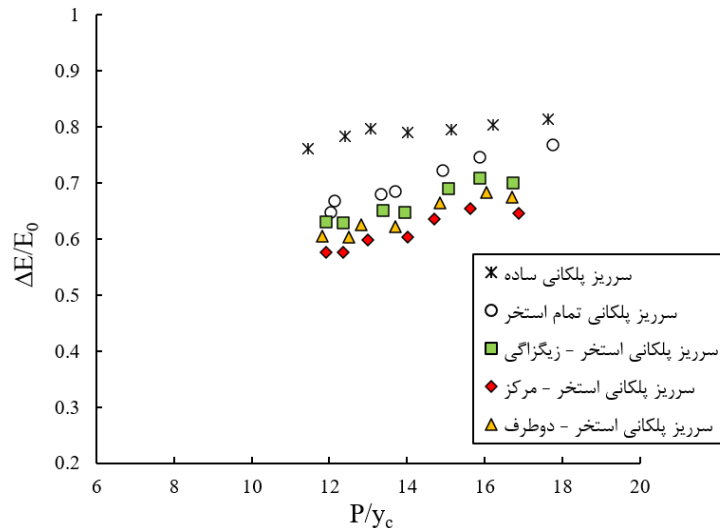
در شکل (۱۲) تغییرات مقدار انرژی باقی‌مانده نسبی مدل‌های سرریز پلکانی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان، مقادیر انرژی باقی‌مانده بر روی تمامی مدل‌های سرریز کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده همخوانی خوبی با نتایج فلدر و



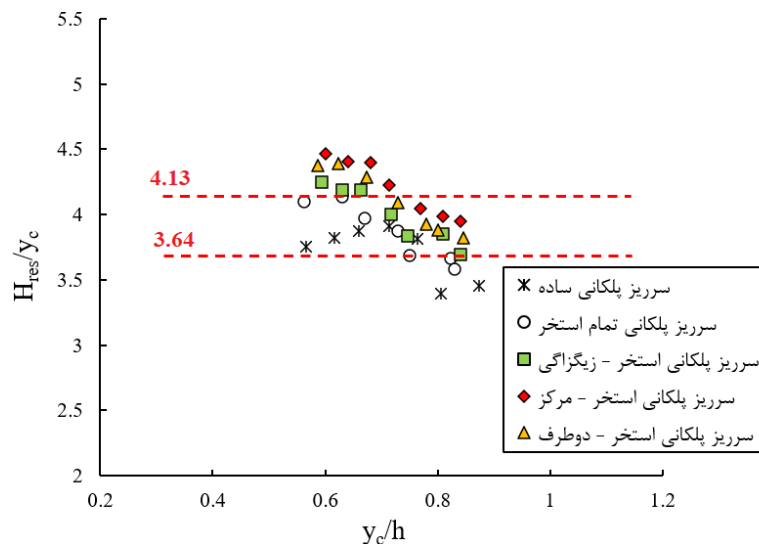
شکل ۹- نقاط شروع هوادهی بر روی مدل‌های سرریز پلکانی در شرایط وجود مانع روی پله در آرایش‌های مختلف



شکل ۱۰- تأثیر ایجاد شکاف بر روی موانع روی پله در نقاط شروع هوادهی بر روی مدل‌های سرریز پلکانی



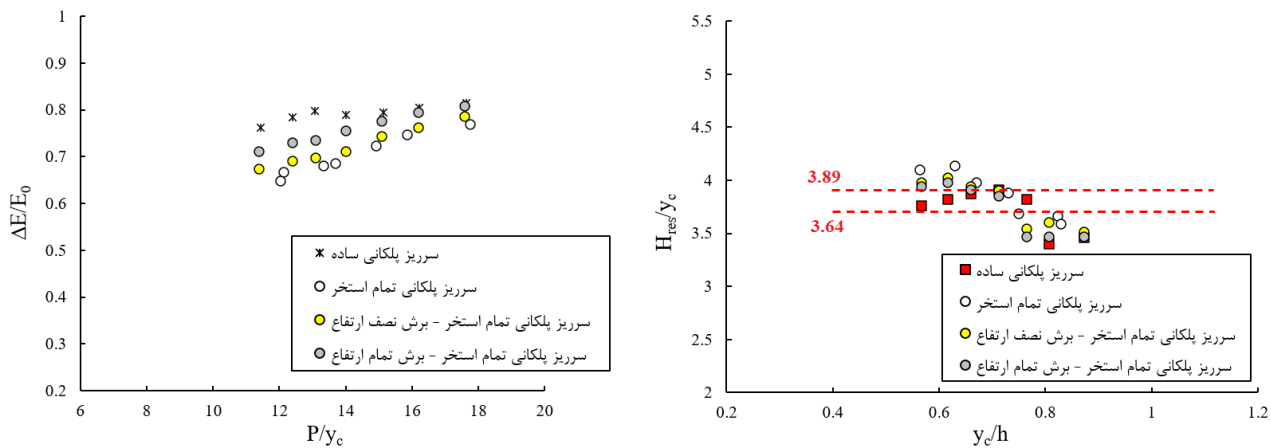
شکل ۱۱- تغییرات استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با مانع



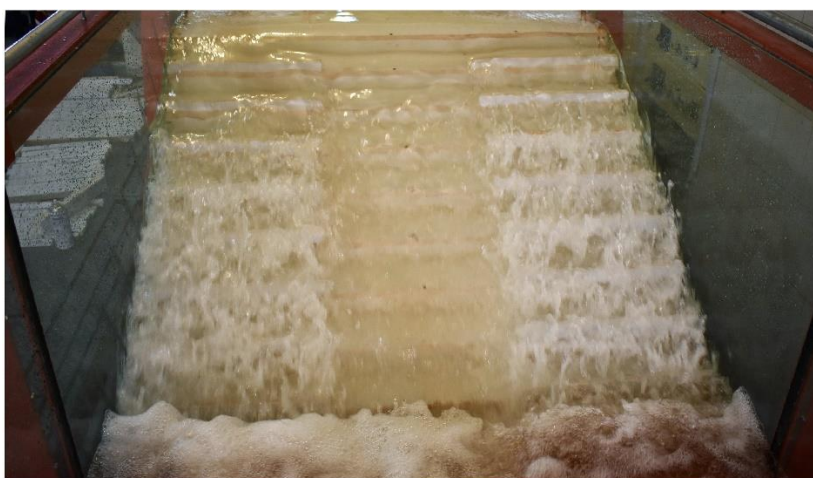
شکل ۱۲- مقادیر انرژی باقی مانده در مدل های سرریز پلکانی این تحقیق

در شکل (۱۳) مشاهده می گردد که ایجاد شکاف در موانع روی لبه پله های سرریز پلکانی باعث بهبود عملکرد مدل های پلکانی همراه با مانع می شود. هر چه مقدار شکاف بیشتر شده، عملکرد موانع روی پله در افزایش میزان استهلاک انرژی بهتر می شود. به طوری که در شرایط جریان یکسان، مدل سرریز پلکانی تمام استخر- شکاف با ارتفاع برابر با ارتفاع استخر، میزان استهلاک انرژی جریان به طور میانگین ۷/۳۳ درصد افزایش می یابد. طبق مطالعات قادری و عباسی (۱۳۹۷)، ایجاد شکاف باعث کاهش سرعت جریان در لبه پله های سرریز پلکانی شده و در نتیجه باعث کاهش انرژی جنبشی جریان در پایین دست می گردد (شکل ۱۴). همچنین ایجاد شکاف در موانع روی پله ها باعث کاهش بیشتر مقدار انرژی باقی مانده در پنجه مدل های سرریز پلکانی شده به طوری که میانگین این مقدار برای سرریزهای پلکانی همراه با مانع و شکاف برابر  $H_{res}/y_c = 3/89$  می باشد.

در شکل (۱۳) مشاهده می گردد که ایجاد شکاف در موانع روی لبه پله های سرریز پلکانی باعث بهبود عملکرد مدل های پلکانی همراه با مانع می شود. هر چه مقدار شکاف بیشتر شده، عملکرد موانع روی پله در افزایش میزان استهلاک انرژی بهتر می شود. به طوری که در شرایط جریان یکسان، مدل سرریز پلکانی تمام استخر- شکاف با ارتفاع برابر با ارتفاع استخر، میزان استهلاک انرژی جریان به طور میانگین ۷/۳۳ درصد افزایش می یابد. طبق مطالعات قادری و عباسی



شکل ۱۳- تغییرات مقادیر استهلاک انرژی و انرژی باقی‌مانده در شرایط وجود مانع همراه با شکاف



سرریز پلکانی استخر - دو طرف



مدل سرریز پلکانی استخر - دو طرف با شکاف تمام ارتفاع

شکل ۱۴- جریان عبوری از روی سرریز پلکانی همراه با مانع و شکاف

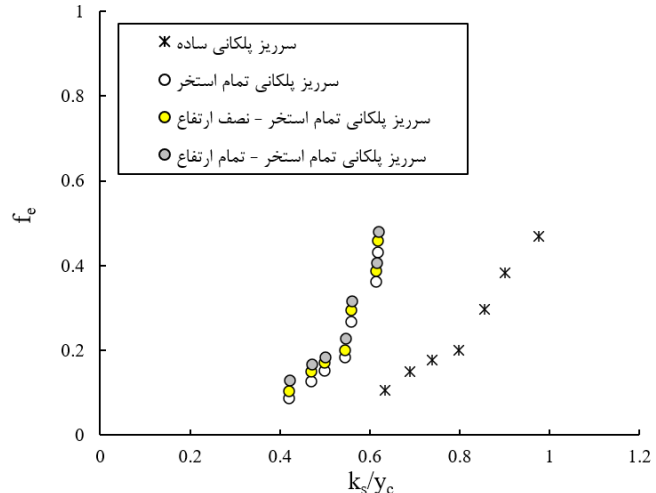
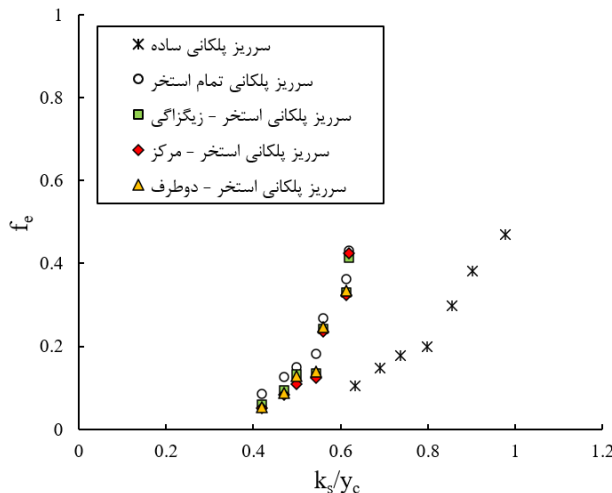
معمولاً به صورت ضریب اصطکاک دارسی ( $f_c$ ) بیان می‌شود. ضریب اصطکاک دارسی به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

**مقاومت در برابر جریان**  
مقاومت در برابر جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی

بی بعد  $k_s/y_c$  برای تمامی مدل‌های سرریز پلکانی نشان داده شده است.

$$f_e = \frac{8 \times g \times q \sin \theta}{V_1^3} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $V_1=q/y_1$  سرعت جریان در پنجه سرریز پلکانی می‌باشد. در شکل (۱۵) تغییرات ضریب زبری  $f_e$  نسبت به تغییرات



شکل ۱۵- تغییرات ضریب زبری  $f_e$  نسبت به  $k_s/y_c$  برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی همراه با مانع و شکاف

مدل‌های سرریز پلکانی همراه با مانع در دبی‌های پایین‌تری نسبت به سرریز پلکانی ساده اتفاق می‌افتد. با ایجاد موانع روی پله، تلاطم و نوسانات سطح جریان عبوری از روی پله در مرکز و کناره‌های پله در تمامی مدل‌ها مشاهده گردید که در بین مدل‌ها، شدت نوسانات جریان در مدل زیگزاگی بیش‌تر و در مدل تمام استخر کم‌تر از مدل‌های دیگر بود. ایجاد شکاف در موانع روی پله باعث کاهش تلاطم و نوسانات جریان عبوری از روی پله به‌خصوص در پله‌های پایین‌دست سرریز پلکانی می‌گردد. وجود مانع روی پله سرریز پلکانی باعث انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود. در بین مدل‌ها، سرریز استخر-زیگزاگی و سرریز تمام استخر به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین فاصله طولی نقطه شروع هوادهی را داشتند. ایجاد شکاف در موانع روی پله باعث انتقال هر چه بیش‌تر محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود.

در بررسی میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از مدل‌های سرریز پلکانی، برخلاف تصورات اینکه ایجاد مانع در لبه پله‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد، اما بیش‌ترین استهلاک انرژی در سرریز پلکانی ساده مشاهده گردید. در بین سرریزهای پلکانی همراه با مانع، مدل تمام استخر بیش‌ترین کارایی و مدل استخر-مرکز کم‌ترین کارایی را در میزان استهلاک انرژی دارند. ایجاد شکاف در موانع باعث بهبود عملکرد مدل‌های پلکانی می‌شود. هر چه ارتفاع شکاف بیش‌تر باشد، عملکرد موانع روی پله بهتر و به‌طور میانگین میزان استهلاک انرژی ۷/۳۳ درصد افزایش می‌یابد. ایجاد مانع روی

مشاهده می‌شود که بیش‌ترین ضریب زبری برای مدل‌های سرریز پلکانی در دبی‌های پایین و به علت رابطه غیرمستقیم ضریب زبری با دبی جریان، اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر طبق نمودار یا دیاگرام مودی، با افزایش عدد رینولدز، مقاومت در برابر جریان کاهش می‌یابد. همچنین ایجاد مانع روی پله‌های سرریز تأثیری روی افزایش ضریب زبری ندارد و بیش‌ترین ضریب زبری در بین مدل‌های همراه با مانع روی پله، برای مدل تمام استخر می‌باشد. نکته قابل‌ذکر اینکه، ایجاد شکاف در موانع روی پله، باعث افزایش ضریب زبری نسبت به حالت بدون شکاف شده و با افزایش ارتفاع شکاف، ضریب زبری افزایش می‌یابد. در واقع برای یک دبی ثابت، وجود شکاف در موانع روی پله باعث کاهش بیش‌تر سرعت جریان به هنگام عبور از بین شکاف‌ها شده و در نتیجه ضریب زبری افزایش یافت. این افزایش نسبی ضریب زبری برای مدل‌های سرریز پلکانی همراه با مانع و شکاف بر روی پله، بین ۶ تا ۱۰ درصد نسبت به مدل سرریز پلکانی ساده متغیر می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر بررسی خصوصیات جریان عبوری از سرریز پلکانی شامل تغییرات در سطح آب، موقعیت نقطه شروع هوادهی، میزان استهلاک انرژی، و ضریب زبری در اثر استفاده از المان‌هایی بر روی پله‌ها در ابعاد و آرایش‌های مختلف می‌باشد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که رژیم جریان انتقالی و غیر ریزشی بر روی

Pergamon, Oxford, UK, Jan., 292 pages.

Chanson. H. 2001. The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways. Balkema, Lisse, The Netherlands, 384 pages.

Chanson. H. 1994. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. Journal of Hydraulic Research, 32(3): 445-460.

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.

Chow. V.T. 1959. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York, USA.

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.

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, The University of Queensland, Brisbane, Australia.

Felder. S. and Chanson. H. 2014. Effects of step pool porosity upon flow aeration and energy dissipation on pooled stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 140 (4): 04014002

Felder. S. Geuzaine. M. Dewals. B. and Erpicum. S. 2019. Nappe flows on a stepped chute with prototype-scale steps height: Observations of flow patterns, air-water flow properties, energy dissipation and dissolved oxygen. Journal of Hydro-environment Research. 27: 1-19.

Ghaderi. A. Daneshfaraz. R. Torabi. M. Abraham. J. And Azamathulla. H.M. 2020. Experimental investigation on effective scouring parameters downstream from stepped spillways. Water Supply, 1988-1998.

Ghaderi. A. Abbasi. S. Abraham. J. and Azamathulla. H.M. 2020. Efficiency of trapezoidal labyrinth shaped stepped spillways. Flow Measurement and Instrumentation, 72: 101711.

Ghaderi, A.; Abbasi, S.; Di Francesco, S. 2021. Numerical Study on the Hydraulic Properties of Flow over Different Pooled Stepped Spillways. Water, 13, 710.

Ghaderi. A. and Abbasi. S. 2021. Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendage Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway. Water, 13, 957.

Gonzalez. C. and Chanson. H. 2007. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy

پله‌های سرریز تأثیری روی افزایش ضریب زبری ندارد و بیش‌ترین ضریب زبری در بین مدل‌های همراه با مانع روی پله، برای مدل تمام استخر می‌باشد. ولی ایجاد شکاف در موانع، باعث افزایش ضریب زبری می‌شود و با افزایش ارتفاع شکاف، ضریب زبری به‌طور میانگین ۸ درصد نسبت به سرریز پلکانی ساده افزایش می‌یابد.

## منابع

اخگر، س. و روشنگر، ک. ۱۳۹۹. مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر ایجاد حفره روی پله‌های سرریز پلکانی بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاك انرژی در جریان رویه‌ای، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲ (۸): ۱-۱۲.

ترکمن سرابی، م.، رجائی، س.ج.، گلکار، ح. و یی‌یزد، ح. ۱۳۹۹. بررسی اثر اندازه دانه‌بندی مصالح سنگی بر میزان تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۴): ۱۱۷۵-۱۱۸۶.

جم، م.، طالب بیدختی، ن. و مردشتی، ا. ۱۳۹۳. ارزیابی استهلاك انرژی روی سرریز دنداندار بلوکی و مقایسه آن با سرریز پلکانی، نشریه هیدرولیک. ۹ (۲): ۱-۱۰.

حیدری ارجلو، س.، موسوی جهرمی، س.ج. و ادیب، آ. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر شیب بر تعداد بهینه پلکان‌ها در سرریزهای پلکانی، علوم و مهندسی آبیاری. ۳۳ (۲): ۱۲۴-۱۴۰.

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

سرکمریان، سعید، احدیان، ج. ۱۳۹۹. مدل‌سازی ریاضی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل عددی-ANSYS CFX، علوم و مهندسی آبیاری. ۴۳ (۱): ۴۳-۵۶.

قادری، ا. و عباسی، س. ۱۳۹۸. بررسی عددی عملکرد سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای بر روی استهلاك انرژی جریان‌های غیر ریزشی، نشریه هیدرولیک. ۱۴ (۳): ۱-۱۶.

روشنگر، ک. و اخگر، س. ۱۳۹۸. مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر المان‌های گوه‌ای شکل بر ضریب زبری و استهلاك انرژی روی سرریز پلکانی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۱): ۷۸-۸۸.

Carosi. G. and Chanson. H. 2008. Turbulence characteristics in skimming flows on stepped spillways, Canadian Journal of Civil Engineering. 35 (9): 865-880.

Chanson. H. 1995. Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways.

- Peyras. L. Royet. P. and Degoutte. G. 1992. Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs. *Journal of hydraulic Engineering*. 118 (5): 707-717.
- Pfister. M. and Chanson. H. 2014. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26 (2): 291-298.
- Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116 (4): 487-591.
- Rice. C.E. and Kadavy. K.C. 1996. Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. 122 (6): 292-297.
- Roshan. R. Azamathulla. H.M. Marosi. M. Sarkardeh. H. Pahlavan. H. and Ghani. A. 2010. Hydraulics of stepped spillways with different numbers of steps. *Dams and Reservoirs*. 20 (3): 131-136.
- Sorensen. R.M. 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111 (12): 1461-1472.
- 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 free-surface flow over stepped spillways. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 23(5): 401-409.
- dissipators for embankment dams. *Dam Engineering*. 17 (4): 223-244.
- 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*.
- Khatsuria R.M. 2005. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Marcel Dekker, New york.
- Mero. S. and Mitchell. S. 2017. Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways. *Water and Environment Journal*, 31 (1): 127-137.
- Mondardo. J.M. and Fabiani. A.L. 1995. Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 33(1): 119-122.
- Morovati. K. Eghbalzadeh. A. and Soori. S. 2016. Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways. *Civil Engineering Journal*. 2 (5): 208-220.
- 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.

## Experimental Study of Energy Dissipation over Stepped Spillway with Appendage Elements on the Steps

A. Ghaderi<sup>1\*</sup>, S. Abbasi<sup>2</sup>

Received: Feb.10, 2021

Accepted: Mar.17, 2021

### Abstract

Steps in the stepped spillway by creating an artificial roughening bed, dissipate the flow of energy more than other types of spillways. An increase of roughness leads to a uniform and continuous distribution energy of the flow over the spillway. The present study deals with experimental study regarding the appendage elements on the steps and its impact on the variation of the flow pattern, inception point, energy dissipation and Darcy roughness coefficient. Experiments were performed on a physical model, with appendage elements on the steps in different configurations and type (height and notch), and the results were compared with flat stepped spillway. The results showed that the appendage elements on the steps causes some the instabilities and turbulence on the center axis and sides of the steps, which causes the inception point to be moved upstream of the stepped spillway. A nappe and transition flow regimes on stepped spillways with appendage elements occur at lower discharges than flat stepped spillway. With notched, the change of the flow regime on the stepped spillway occurs later than in the height state. Also, the appendage elements on the steps have no effect on the energy dissipation and Darcy roughness coefficient. However, with notched on the appendage elements, their performance is improves and the amount of energy dissipation and Darcy roughness coefficient increases 7.33% and 8% compared to flat stepped spillway, respectively.

**Keywords:** Appendage elements, Energy dissipation, Inception point, Roughness coefficient, Stepped spillway

1- Ph.D. Candidate of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

(\*- Corresponding Author Email: amir\_ghaderi@znu.ac.ir)