



بررسی آزمایشگاهی میدان جریان ریزشی در سرریزهای پلکانی

عبدالله قاسم‌پور فرمی^۱، محمدرضا کاویان‌پور اصفهانی^{۲*}، شروین فقیهی راد^۱

۱- پژوهشکده هیدرولیک و محیط‌های آبی موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۲

کلمات کلیدی:

سرریز پلکانی
جریان ریزشی
مدل هیدرولیکی
استهلاک انرژی
هندسه سرریز

خلاصه: سرریز پلکانی از جمله سازه‌های تخلیه کننده سیلاب ورودی به سد می‌باشد که جریان عبوری از آن با استهلاک انرژی نیز همراه می‌باشد. این سازه متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پاشنه ادامه یافته و در ثابت ماندن عمق آب و سرعت جریان در طول سرریز، برقراری استهلاک طولی انرژی و تاثیرگذاری بر مشخصات جریان و پایاب سرریز بسیار موثر می‌باشند. در سرریزهای پلکانی، جریان به سه نوع ریزشی، انتقالی و رویه‌ای قابل تفکیک است. تاکنون بر اساس روابط تحلیلی و آزمایشگاهی، مطالعات اندکی جهت بررسی شرایط و طبیعت پیچیده جریان ریزشی انجام شده و مطالعات آزمایشگاهی مبتنی بر مدل‌سازی فیزیکی نیز محدود می‌باشد. بنابراین روابط محدودی نیز در زمینه جریان ریزشی در این سرریزها ارائه شده است. در تحقیق حاضر آزمایش‌هایی بر روی سه مدل هیدرولیکی سرریز پلکانی بزرگ مقیاس سدهای سیاه‌بیشه بالا، سیاه‌بیشه پایین و سد ژاوه در شش شیب متفاوت انجام گرفت و به ازای ۲۴ دبی جریان، اندازه‌گیری عمق آب، سرعت جریان و فشار استاتیکی بر روی ۴۰ مقطع مختلف در طول سرریز انجام شد. تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی بر اساس این اطلاعات انجام و تاثیر شرایط هیدرولیکی و هندسی سرریز بر محدوده وقوع جریان ریزشی مورد ارزیابی قرار گرفت و رابطه‌ای برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی در شرایط جریان ریزشی پیشنهاد شد. نتایج تحقیق نشان داد که مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار در پیش‌بینی استهلاک انرژی، پارامتر بی‌بعد عمق بحرانی به ارتفاع سرریز می‌باشد که افزایش آن باعث کاهش استهلاک انرژی نسبی در رژیم ریزشی می‌شود.

۱- مقدمه

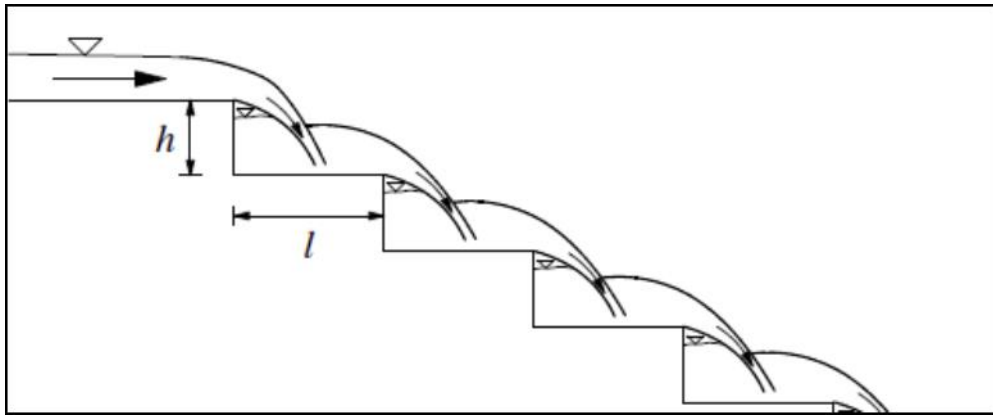
جریان به کاهش موثر انرژی کمک می‌نماید [۱]. در دهه‌های اخیر به علت هزینه‌های پایین و سرعت نسبی بالای ساخت سرریزهای پلکانی و به خصوص شناخت فناوری‌های جدید ساخت سدها با کاربرد مصالح بتن غلطکی، بهره‌برداری و نگهداری آسان، افزایش میزان افت انرژی و در نتیجه کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش، توسعه و توجه به این سرریزها را بیشتر نموده است.

سرریزهای شوت معمول عمدتاً برای دبی‌های بالا (تا حدود دبی در واحد عرض ۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه در واحد متر) به کار می‌روند (دبی در واحد عرض سرریز سدهای چم‌شیر، سردشت کردستان و

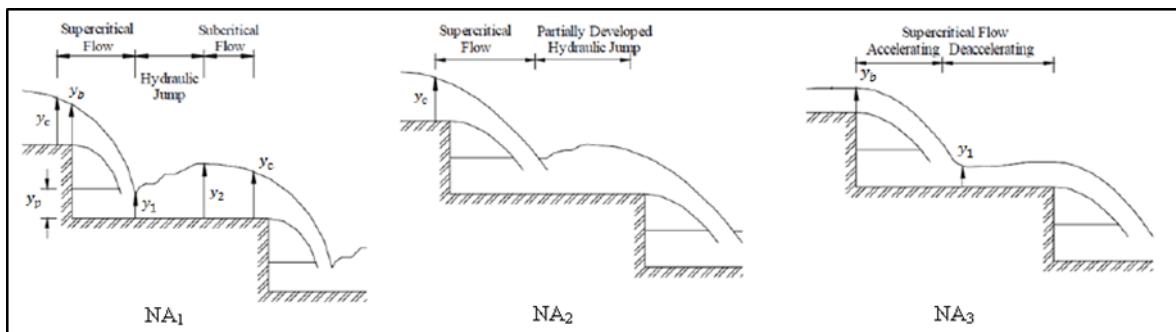
استفاده از پروفیل پلکانی به جای پروفیل مسطح در سرریز سدهای بلند به عنوان یک راه‌حل قابل قبول جهت استهلاک انرژی مورد توجه طراحان قرار گرفته است. این پروفیل از یک سری پله تشکیل شده که از تاج تا پنجه سرریز را فرا گرفته‌اند. پله‌های مستقر در سرریز پلکانی با ایجاد پراکنش انرژی در قالب زبری طولی باعث استهلاک انرژی و کاهش سرعت جریان خروجی از سرریز می‌شود. مکانیزم هواگیری جریان به داخل جت نیز با تغییر مشخصه‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kavianpour@kntu.ac.ir





شکل ۱. نمای شماتیک جریان ریزشی آزاد و هندسه پله یک سرریز پلکانی [۸]
 Fig. 1. Schematic view of free nappe flow and step geometry of a stepped spillway



شکل ۲. جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل NA_1 ، پرش هیدرولیکی ناقص NA_2 ، بدون پرش هیدرولیکی NA_3 [۱۱]
 Fig. 2. Nappe flow with full hydraulic jump NA_1 , incomplete hydraulic jump NA_2 , without hydraulic jump NA_3

کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش همراه می‌باشند. در جریان نوع ریزشی، افت کلی انرژی به تعدادی افت جزئی روی هر پله تقسیم می‌شود. استهلاک انرژی به وسیله حرکت جت در هوا، برخورد جت به کف پله و پرش هیدرولیکی صورت می‌گیرد [۴]. در فصل مشترک بین هر جت و دیواره پله عبوری و نیز در محل برخورد جت با حوضچه آب ایجاد شده در پله پائین‌دست، مقداری هوا حبس می‌شود. این جریان ریزشی در تندآب‌هایی که دارای شیب کم و ارتفاع پله نسبتاً زیاد باشند، در دبی کم رخ می‌دهد. این نوع رژیم جریان توسط محققین مختلفی همچون هارنر^۳ (۱۹۶۹)، پیراس^۴ (۱۹۹۱)، چانسون^۵ (۱۹۹۴)، چمنی و راجاراتنام^۶ (۱۹۹۴) مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. ژانگ و چانسون^۷ (۲۰۱۶) در یک مطالعه آزمایشگاهی، توسعه لایه مرزی بر روی سرریزهای پلکانی را مورد

داریان به ترتیب ۱۴۰، ۱۲۰ و ۱۱۰ متر مکعب بر ثانیه در واحد متر می‌باشد)، در حالی که سرریزهای پلکانی عمدتاً برای ارتفاع‌های نسبتاً کم سرریز و دبی در واحد عرض محدود (تا حدود ۳۰ متر مربع بر ثانیه) مورد استفاده قرار می‌گیرند. فیستر^۱ (۲۰۰۶) دریافت که محدودیت‌هایی برای عملکرد مناسب سرریزهای پلکانی هم در دبی بالا و هم دبی کم وجود دارد [۲]. تجربیات موجود در موسسه تحقیقات آب ایران و مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در دبی خیلی کم پاشش آب می‌تواند برای سازه‌های مجاور مشکلاتی را ایجاد کند و در دبی‌های بالا خطر کاویتاسیون در ناحیه بین اولین پله تا نقطه شروع هوادهی قابل تامل می‌باشد [۳ و ۲]. این سرریزها با کاهش هزینه‌های کلی سرریز و تأسیسات پایین‌دست در مقایسه با سرریزهای شوت معمول، کاهش فشار برگشتی^۲، کوتاه شدن زمان اجرا، بهبود بهره‌برداری و نگهداری، افزایش میزان پراکنش انرژی و

3 Horner
 4 Peyras
 5 Chanson
 6 Chamani and Rajaratnam
 7 Zhang and Chanson

1 Pfister
 2 Uplift Pressure

تحقیقات کمتری به دلیل پیچیدگی هیدرولیک پدیده انجام شده است. استفاده از آبشارهای قائم متوالی در سرریزهای پلکانی برای استهلاک انرژی جریان، منجر به صرفه‌جویی در هزینه احداث حوضچه آرامش پایین‌دست و کاهش ریسک وقوع پدیده کاویتاسیون می‌شود. چانسون^۲ (۱۹۹۴) رابطه (۱) را برای سرریزهای با جریان آزاد ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته ارائه کرد [۱۲]:

$$\frac{H_r}{H_{max}} = \frac{0.54\left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_D}{y_c}} \quad (1)$$

که در آن H_D ارتفاع سد از پنجه تا تاج سرریز، H_{max} هد ماکزیمم در ابتدای سرریز، y_c عمق بحرانی و h ارتفاع پله است (واحدها برحسب متر است). در یک سرریز پله‌ای با جریان ریزشی و تعداد پله‌های کافی که جریان یکنواخت در پله‌های آخر به وجود آید، H_r هد باقی‌مانده بلافاصله پایین‌دست کانال به صورت رابطه $H_r = y_1 + q^2 / 2gy_1^2$ بیان می‌شود که در آن y_1 عمق جریان در ابتدای پرش هیدرولیکی و q دبی در واحد عرض می‌باشد. استهلاک انرژی ΔH به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta H = H_{max} - H_r \quad (2)$$

چانسون (۱۹۹۶) روشی بر پایه تغییر جهت مومنوم در محل برخورد جت در پله پایین‌دست ارائه کرد [۱۳]. در جریان ریزشی در سازه تک پله‌ای (آبشار)، در صورت برابری ارتفاع حوضچه (زیر جت) با ارتفاع پله، حفره هوای زیر تیغه ریزشی ناپدید خواهد شد. چرخش آب در این حوضچه به این دلیل اهمیت دارد که نیروی فشاری مرتبط، نیرویی موازی با سطح پله که برای تغییر جهت زاویه جت θ_1 مطابق شکل ۳ نسبت به افق لازم است را فراهم می‌آورد. برای تیغه هوادهی شده، رابطه مومنوم به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{1}{2} \rho g y_p^2 - \frac{1}{2} \rho g y_1^2 = \rho g (v_1 - v_i \cos \theta_i) \quad (3)$$

که در آن y_p ارتفاع آب در حوضچه، y_1 عمق جریان پایین‌دست محل برخورد جت، V_1 سرعت متناظر با y_1 ، V_i سرعت برخورد

تحقیق قرار دادند. در سرریزهای پلکانی، پله‌ها همچون المان‌های زبری بزرگ مقیاس عمل کرده که گذشته از افزایش زبری و افت اصطکاکی، آشفتگی جریان را نیز افزایش می‌دهند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در سرریزهای پلکانی با شیب تند 1V:1H، توسعه لایه مرزی آشفته در مقایسه با سرریزهای شوت صاف با همان دبی و شیب، سریع‌تر اتفاق می‌افتد [۶]. حسنعلی‌پور و همکاران^۱ (۲۰۱۹)، چهار مدل آزمایشگاهی سرریز سدهای بالا و پایین سیاه‌بیشه با مقیاس ۱:۱۵ و ۱:۲۰ با شیب‌های ۱۸/۴۴، ۲۶/۵۶، ۲۹/۷۴ و ۳۸/۸۱ درجه را مورد آزمایش قرار دادند. در این تحقیق، تشکیل رژیم‌های مختلف جریان و مقایسه پروفیل جریان عبوری و فشار وارد بر کف پله‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در رژیم جریان ریزشی، روند افزایشی فشار از پاشنه پله به سمت لبه پله قابل مشاهده است، که تا میانه پله با شیب کم و پس از آن با شیب تند ادامه می‌یابد. همچنین، در رژیم جریان ریزشی با افزایش شیب سرریز، فشار از پاشنه پله به سمت لبه پله افزایش یافته، چنانچه مقادیر اکسترمم فشار در نزدیک لبه پله به وقوع می‌پیوندد [۷]. نمای شماتیک از جریان ریزشی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

در حالت کلی جریان ریزشی آزاد مطابق شکل ۲ به سه حالت تقسیم می‌شود که دو حالت اول با پرش هیدرولیکی همراه بوده و حالت سوم بدون پرش هیدرولیکی می‌باشند [۹]. این سه حالت شامل جریان ریزشی آزاد با پرش هیدرولیکی کامل (رژیم جریان فرعی NA_1) که در دبی پایین رخ می‌دهد، جریان ریزشی آزاد با پرش هیدرولیکی ناقص (رژیم جریان فرعی NA_2) که در دبی متوسط رخ می‌دهد و جریان ریزشی آزاد بدون پرش هیدرولیکی (رژیم جریان فرعی NA_3) که در دبی بالا رخ خواهد داد، می‌باشند [۱۰].

۲- روابط و معادلات حاکم مساله

پروفیل سطح آب بر روی سرریزهای پلکانی به شکل رژیم جریان ریزشی بوده و تابعی از ابعاد هندسی پله است. جریان ریزشی از روی این گونه سرریزها پس از طی شیب‌شکن‌های متوالی، سرانجام به حوضچه آرامش پایین‌دست می‌رسد. اکثر تحقیقات انجام‌گرفته، متوجه جریان غیر ریزشی بوده و در زمینه الگوی جریان ریزشی که جریان به صورت متوالی بر روی پله‌های سرریز ریزش می‌کند،

$$\frac{y_p}{y_i} = \sqrt{1 + 2 \frac{v_i^2}{gy_i} (1 - \cos \theta_i)} \quad (7)$$

چانسون^۱ (۱۹۹۴) یک رابطه تحلیلی برای تخمین انرژی باقی‌مانده E_{ult} در پنجه شوت پیشنهاد داده است. رابطه (۸) فقط برای رژیم جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته به کار می‌رود [۱۴]:

$$\frac{E_{ult}}{E_0} = \frac{0.54 \left(\frac{h_c}{h_s} \right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} \left(\frac{h_c}{h_s} \right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_D}{h_c}} \quad (8)$$

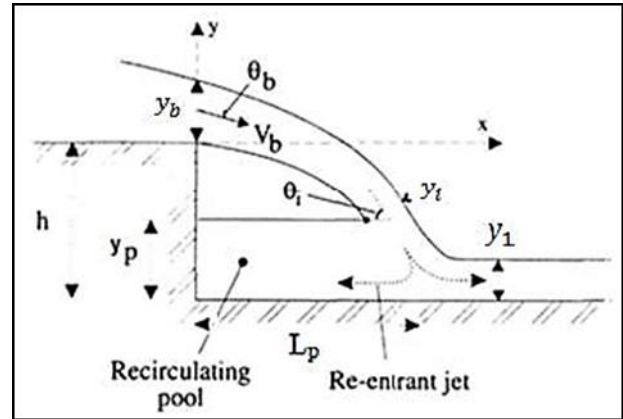
که در آن E_0 انرژی اولیه، h_c عمق بحرانی جریان، h_s ارتفاع پله و H_D ارتفاع سرریز است.

چمنی و راجارتنام^۲ (۱۹۹۴) یک رابطه تحلیلی عمومی‌تری برای جریان ریزشی، صرف‌نظر از نوع جهش هیدرولیکی تشکیل شده روی پله ارائه دادند که مبنای آن میانگین استهلاک انرژی در هر پله می‌باشد. مطابق این تحقیق، در پنجه سرریز E_{ult} ، انرژی باقی‌مانده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$E_{ult} = (1 - \varepsilon)^{N_s} (h_s + 1.5h_c) + h_s \sum_{i=1}^{N_s-1} (1 - \varepsilon)^i \quad (9)$$

که در آن l_s عرض هر پله و \bar{a} نیز بیانگر سهم پراکنش انرژی در هر پله می‌باشد. رابطه فوق بر اساس محدودیت‌های تعداد کل پله‌ها $8 \leq N_s \leq 30$ و ارتفاع هر پله $0.03m < h_s < 0.45m$ و $0.421 \leq h_s / l_s \leq 0.842$ بنا شده است.

فراآتینو و پیسینی^۳ (۲۰۰۰) استهلاک انرژی نسبی در پنجه سرریز پلکانی تحت جریان ریزشی را به صورت رابطه (۱۰) بیان کردند [۱۶]:



شکل ۳. مسیر جریان ریزشی در سازه آبخاری [۱۳]
Fig. 3. Nappe flow path in waterfall structure

جت با زاویه برخورد جت θ_i مطابق شکل ۳ می‌باشد. همچنین ρ جرم حجمی آب، g ثابت گرانش و q دبی در واحد عرض هستند. در رابطه ۳ از نیروهای برشی در سطوح صرف‌نظر و توزیع فشار در وجه قائم پله را هیدرواستاتیک فرض می‌کند.

در شرایط برخورد جریان از محاسبات ساده پرتابه، می‌توان روابط زیر را نتیجه گرفت [۱۳]:

$$\frac{y_i}{y_b} = \left(1 + \frac{1}{Fr_b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\frac{V_i}{V_b} = \sqrt{1 + \frac{1}{Fr_b^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_b} = \left(1 + \frac{1}{Fr_b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن و مطابق شکل، y_b عمق جریان در لبه پله، y_i عمق جریان در محل برخورد جت، V_b سرعت جریان در لبه پله، θ_b زاویه اولیه خطوط جریان با افق و $Fr_b = \frac{V_b}{\sqrt{gy_b}}$ عدد فرود در لبه پله است. در محل برخورد جت با پله با فرض برابری سرعت ورودی و خروجی در یک حجم کنترل معین، رابطه مومنوم (۳) به شکل زیر قابل ارائه است:

1 Chanson
2 Chamani and Rajaratnam
3 Fratino and Piccini

در این رابطه $M = \frac{Y_c}{h}$ بر اساس ارتفاع پله می‌باشد و به ازای یک پله تعریف شده است و با توجه به تعداد پله‌ها مقدار آن متفاوت است. به عنوان نمونه برای دو پله، $M = \frac{Y_c}{2h}$ و برای سه پله، $M = \frac{Y_c}{3h}$ می‌باشد. در هر حال، مقدار استهلاک انرژی نسبی تابعی از Y_c/h خواهد بود. در رژیم جریان ریزشی در سرریزهای پلکانی با شیب ملایم که امکان وقوع پرش هیدرولیکی کامل بر روی کف افقی هر پله وجود دارد، رابطه ارائه شده در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایش‌های روی شیب‌شکن‌های قائم به نحو مطلوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌های روی سرریز پلکانی با شیب ۱۵ و ۲۵ درجه انطباق نشان می‌دهد. انتظار می‌رود در شیب‌های ملایم‌تر که امکان تشکیل پرش هیدرولیکی کامل روی هر پله وجود خواهد داشت، این تطابق باز هم بهبود یابد.

جعفری‌نیا و موسوی جهرمی^۳ (۲۰۰۵) ارزیابی تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی در رژیم ریزشی و غیرریزشی را ارائه نمودند. داده‌های مربوط به مدل سرریزهای پلکانی با چهار نسبت مختلف $\frac{h}{l}$ (ارتفاع پله و طول پله) را مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پله‌ها تاثیر قابل ملاحظه در استهلاک انرژی دارند. همچنین افزایش شیب معکوس پله‌ها در رژیم ریزشی افت انرژی بیشتری را به همراه داشته، ولی در رژیم غیر ریزشی تاثیر چندان بر روی افت انرژی نخواهد داشت [۱۹]. کاویان‌پور و معصومی^۴ (۲۰۰۸) نیز روش و رابطه جدیدی برای ارزیابی میزان افت انرژی نسبی در سرریزهای پلکانی در رژیم جریان سرسره ارائه نمودند. آن‌ها جریان را به دو قسمت جریان متغیر و یکنواخت تقسیم و سپس با تعیین محل انتقال جریان غیریکنواخت به یکنواخت و فرض افت انرژی یکنواخت در محدوده یکنواخت به معرفی رابطه‌ای برای برآورد افت انرژی در محدوده جریان غیریکنواخت پرداختند. آنان این روش را دقیق معرفی و توصیه نمودند که افت انرژی در سرریزهای پلکانی بر این اساس تعیین شود [۱].

با توجه به مطالعات اشاره شده، ملاحظه می‌شود که ارزیابی آزمایشگاهی تاثیرات هندسه پله، شیب و دبی جریان عبوری بر استهلاک انرژی در سرریز پلکانی در حالت جریان ریزشی نیازمند تحقیقات سیستماتیک می‌باشد. در تحقیق حاضر به کمک مدل‌سازی فیزیکی ارزیابی اثرات این پارامترها بر جریان و تاثیر آن‌ها بر استهلاک

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{H_r}{H_{\max}} = 1 - \frac{y_1 + \frac{1}{2} \frac{y_c^3}{y_1^2}}{H_D + \frac{3}{2} y_c} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2} \lambda^{-2}}{\frac{H_D}{y_c} + \frac{3}{2}} \quad (10)$$

در رابطه فوق پارامتر بی‌بعد λ نسبت بین y_1 و y_c را بیان می‌کند و سایر پارامترها در بالا اشاره شده‌اند. در رژیم جریان ریزشی، پارامتر λ با ملاحظات نظری صورت گرفته توسط وایت^۱ (۱۹۴۳) به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h}{y_c}} + \frac{3}{2}} \quad (11)$$

سلماسی^۲ (۲۰۰۴) پس از بررسی نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مدل‌های شیب‌شکن قائم و همچنین انجام آزمایش‌هایی بر روی هفت مدل از سرریزهای پلکانی با شیب ملایم ۲۵ درجه (با ۱۵ و ۱۰ و ۵ پله) ۱۵ درجه (با ۱۵ و ۱۰ و ۵ و ۳۰ پله) رابطه (۱۲) را با فرض وقوع پرش هیدرولیکی کامل در شرایط جریان ریزشی بر روی هر پله به منظور تعیین استهلاک انرژی ارائه داد [۱۸]:

$$\frac{\Delta H}{H} = 1 - \frac{\frac{k^2}{2} + \frac{1}{8}(\sqrt{1+8k^3} + 5) + \frac{1}{8}(\sqrt{1+8p^3} + 2)}{\frac{1}{M} + 1.5} \quad (12)$$

در این رابطه به جای k و P می‌توان معادل آن‌ها را برحسب پارامتر بی‌بعد Y_c/h مطابق زیر در نظر گرفت:

$$k = \frac{Y_c}{Y_1} = 2.0284 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{-0.012} \quad (13)$$

$$P = \frac{Y_c}{Y_2} = 0.5385 \left(\frac{Y_c}{h} \right)^{0.048} \quad (14)$$

3 Jafarinia and Mousavi jahromi
4 Kavianpour, M. and Masoumy

1 White
2 Salmasi

جدول ۱. مشخصات مدل‌های مورد آزمایش
Table ۱. The attitudes of physical models

نام مدل	نام اختصاری	مقیاس مدل	شیب تندآب پلکانی	ارتفاع پله (سانتی‌متر)	طول پله (سانتی‌متر)	ارتفاع (سانتی‌متر)	عرض سرریز (سانتی‌متر)	تعداد پله (N)
سیاه‌بیشه بالا	Model A	۱:۱۵	3H:1V(18.43)	۴/۶۷	۱۴	۲۸۵/۳۳	۱۳۳	۵۹
سیاه‌بیشه بالا	Model B	۱:۱۵	2.5H:1V(21.8)	۶/۶۷	۱۶/۶۷	۳۴۶/۷۵	۱۳۳	۵۲
سیاه‌بیشه بالا	Model C	۱:۱۵	1.75H:1V(29.74)	۶/۶۷	۱۱/۶۷	۸۲/۴	۱۳۳	۱۲
سیاه‌بیشه پایین	Model D	۱:۲۰	1.2H:1V(39.8)	۶	۷/۲	۳۷۳/۱	۱۵۰	۶۲
سیاه‌بیشه پایین	Model E	۱:۲۰	2H:1V(26.56)	۶	۱۲	۱۴۳/۹	۱۵۰	۲۳
ژاوه	Model F	۱:۲۵	1.2H:1V(39.8)	۴/۸	۴	۳۲۸/۱۲	۲۲۰	۷۱



SiahBisheh (D, E Model)



Zhaveh (F Model)

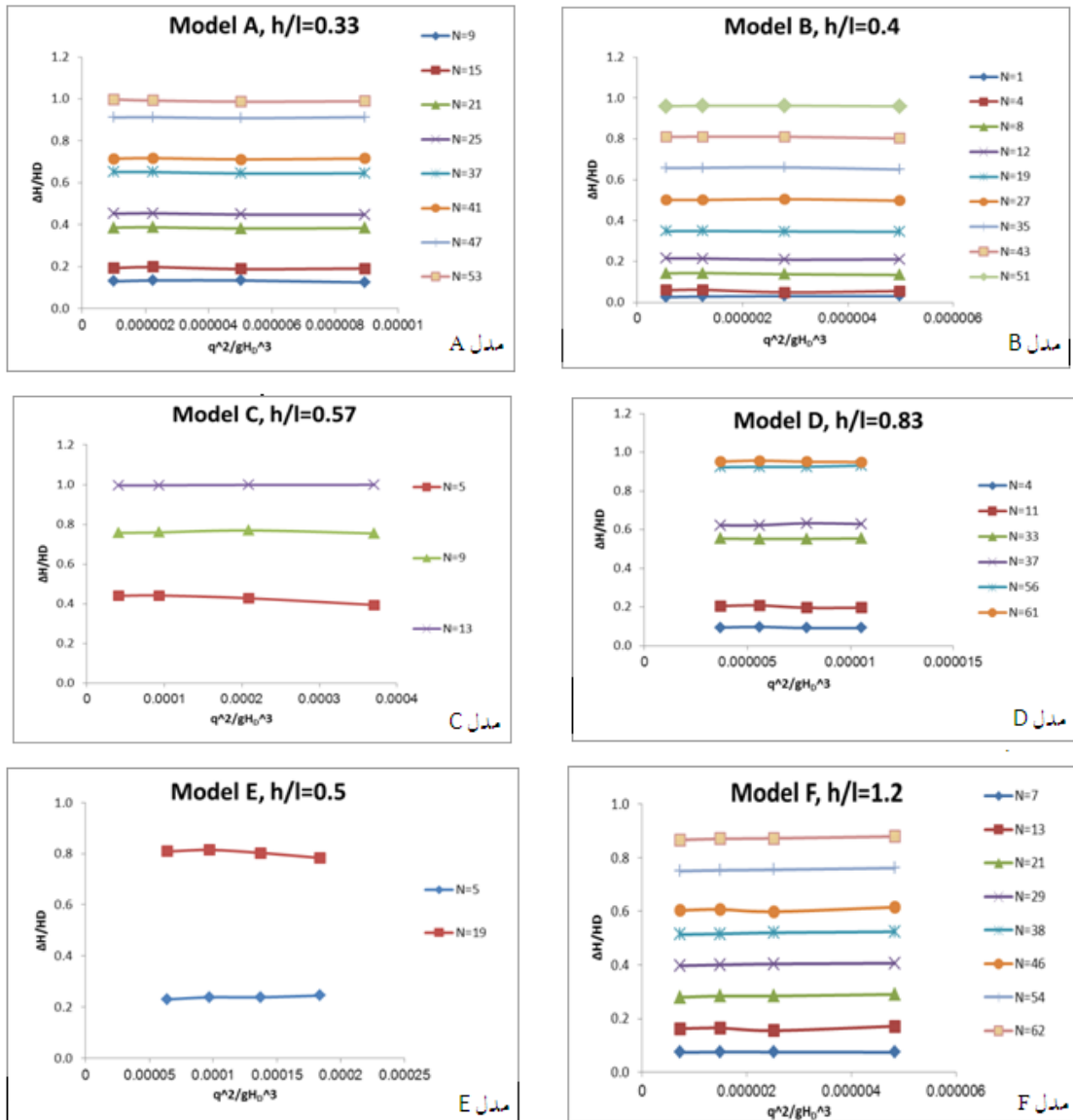
شکل ۴. سرریز سد سیاه‌بیشه پایین (model D & E) و سد ژاوه (model F)
Fig. 4. Lower Siahbisheh dam spillway (model D & E) and Zhaveh dam (model F)

اصلی را ارائه می‌دهند. با روش آنالیز ابعادی می‌توان از روی معادله موجود بین چند متغیر یک پدیده را به خوبی شناسایی کرد. در این تحقیق پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را می‌توان ارتفاع پله (h)، طول پله (l)، دبی جریان در واحد عرض (q)، اختلاف ارتفاع بین تاج سرریز و کف حوضچه آرامش (H_D)، شتاب جاذبه (g)، تعداد پله‌ها (N) و حداکثر هد آب روی سرریز (H_{max})

انرژی مورد توجه قرار گرفته است. اندازه‌گیری فشار روی کف پله‌ها، پروفیل جریان و اندازه‌گیری سرعت جریان در جریان ریزشی جهت تعیین تغییرات انرژی در سرریزهای پلکانی در رژیم ریزشی در این پژوهش در مسیر تحقیق حاضر قرار گرفته است.

۳- معرفی مدل آزمایشگاهی

مدل‌های فیزیکی، مدل‌های ساده‌ای از ساختارهای پیچیده نمونه



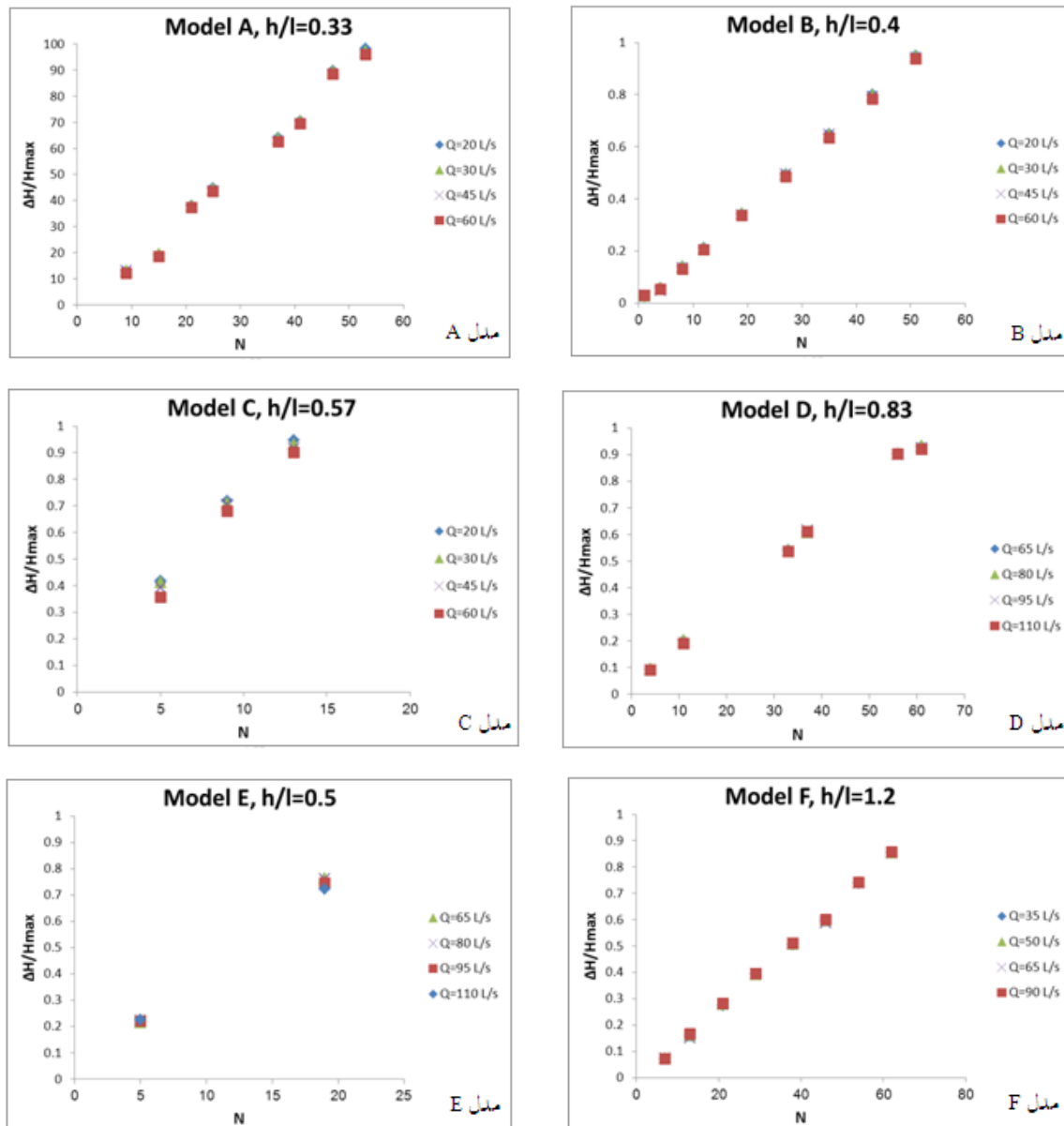
شکل ۵. افت انرژی در واحد ارتفاع سرریز بر اساس پارامتر بی بعد $\frac{q^2}{gH_D^3}$ در مدل های مختلف تحقیق حاضر

Fig. 5. Energy drop per unit of spillway height based on dimensionless parameter $\frac{q^2}{gH_D^3}$ in different models of the present study

تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو بر روی سه مدل هیدرولیکی (سد سیاه‌بیشه بالا، سیاه‌بیشه پایین و ژاوه) و شش سرریز با شیب مختلف انجام گرفت. سد مخزنی ژاوه در ۳۴ کیلومتری جنوب شهرستان سنندج بر روی رودخانه ژاوه در محل تلاقی رودخانه گاو رود و قشلاق واقع شده است. این سد از نوع بتن غلطکی (RCC) با ارتفاع ۹۴ متر از

به عنوان متغیر وابسته یا پاسخ عنوان کرد. با توجه به آنکه جریان از نوع سطح آزاد می‌باشد و صرف نظر کردن از تاثیر عدد رینولدز و ویر، استهلاک انرژی نسبی به صورت ترم‌های بی بعد زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = f\left(\frac{y_c}{Nh}, \frac{h}{l}, \frac{H_D}{y_c}\right) \text{ or } \frac{\Delta H}{H_{\max}} = f\left(\frac{y_c}{Nh}, \frac{h}{l}, \frac{H_D}{y_c}, N\right) \quad (15)$$



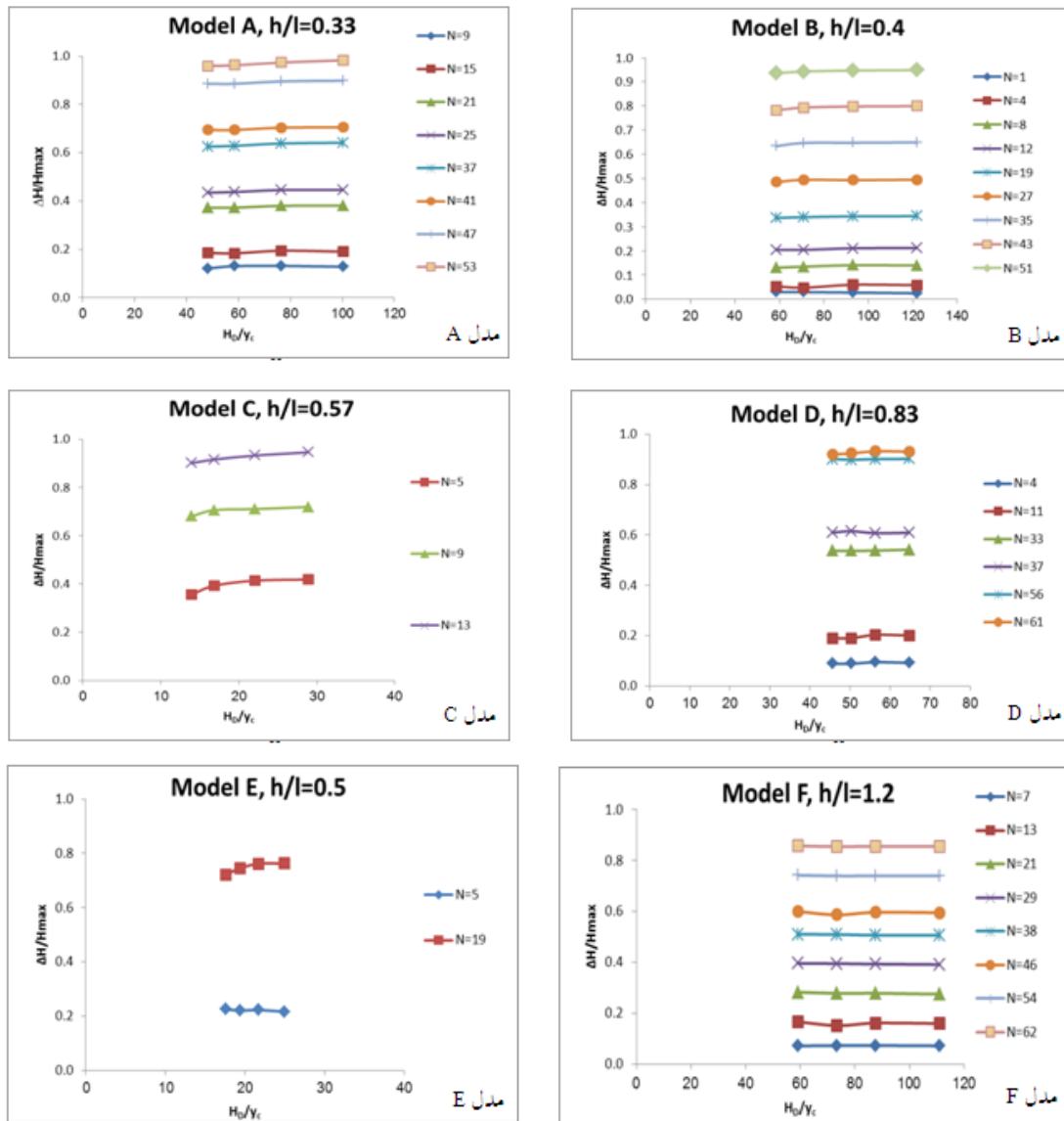
شکل ۶. تغییرات $\frac{\Delta H}{H_{max}}$ بر حسب N در مدل‌های مختلف تحقیق حاضر

Fig. 6. Changes of $\frac{\Delta H}{H_{max}}$ in terms of N in different models of the present study

است. مشخصات مدل سرریزهای فوق در جدول ۱ ذکر شده است. مدل سرریز سد سیاه‌بیشه بالا با سه شیب، مدل سرریز سد سیاه‌بیشه پایین با دو شیب و مدل سرریز سد ژاوه با یک شیب، مدل‌های مورد بررسی این تحقیق مطابق شکل ۴ را تشکیل می‌دهند.

آزمایش‌ها بر روی شش سرریز با شش شیب مختلف و چهار دبی ریزشی جهت اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی انجام شد و سپس تجزیه و تحلیل نتایج و مشاهده و اندازه‌گیری تاثیر پارامترهای هندسی مدل (هندسه، شیب، ارتفاع و طول پله) صورت پذیرفت. شرایط دبی ریزشی و انتقالی از طریق مشاهدات جریان و روابط ارائه

بستر رودخانه می‌باشد. سیستم تخلیه سیلاب این سد شامل سرریز اوجی آزاد، تنداب پلکانی و حوضچه آرامش است. دبی طراحی سیلاب ۱۰۰۰ ساله سرریز سد ژاوه ۹۷۰ متر مکعب بر ثانیه است که با توجه به مزیت سدهای بتن غلطکی، سرریز بر روی بدنه سد جانمایی گردیده است. هدف از ساخت سد مخزنی ژاوه، کنترل جریان‌های سطحی رودخانه می‌باشد. سرریز سد سیاه‌بیشه بالا و سیاه‌بیشه پایین نیز در جناح چپ و از نوع سرریز آزاد پلکانی می‌باشند. دبی طراحی سرریز سد سیاه‌بیشه بالا ۲۰۳ و سد سیاه‌بیشه پایین ۸۶۰ متر مکعب بر ثانیه بوده و سیستم استهلاک انرژی آن‌ها از نوع حوضچه آرامش



شکل ۷. تاثیر پارامتر $\frac{H_D}{Y_c}$ بر استهلاک انرژی نسبی در مدل‌های مختلف تحقیق حاضر

Fig. 7. The effect of $\frac{H_D}{Y_c}$ parameter on relative energy dissipation for different models of the present study

با افزایش پارامتر بی‌بعد $\frac{q^2}{gH_D^3}$ ، افت انرژی در واحد ارتفاع سرریز

شده قابل تشخیص می‌باشد.

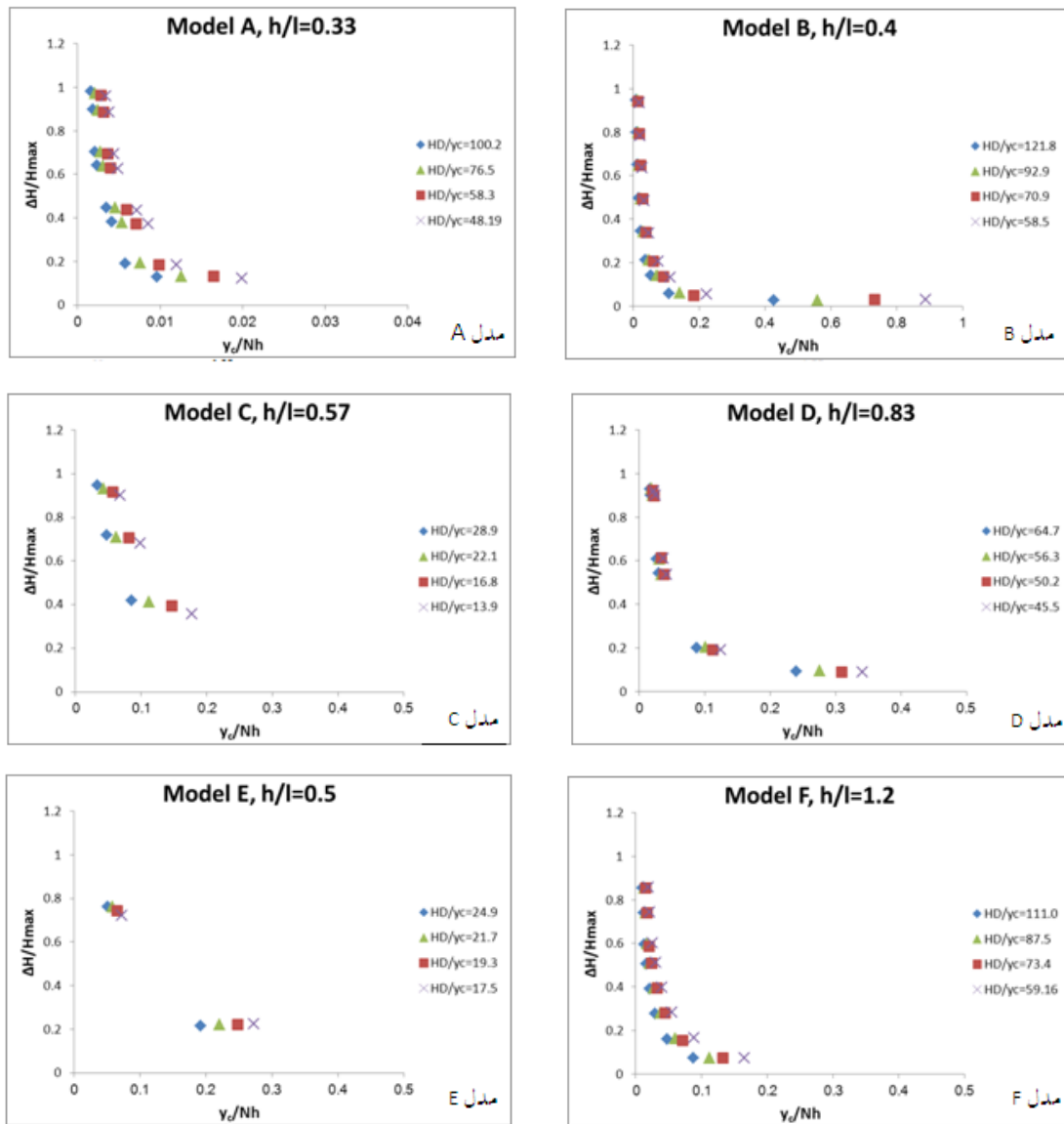
کاهش می‌یابد. کاهش پارامتر $\left(\frac{\Delta H}{H_D}\right)$ با افزایش $\frac{q^2}{gH_D^3}$ توسط محققین از جمله پیراس (۱۹۹۲) نیز گزارش شده است. با افزایش دبی سرریز پلکانی، به تدریج جریان از حالت ریزشی به حالت انتقالی و پیوسته تغییر می‌کند.

بیشتر محققین معتقدند که رژیم جریان ریزشی نسبت به جریان‌های دیگر، با استهلاک انرژی بیشتری همراه می‌باشد. در رژیم ریزشی هر چه دبی کمتر باشد، میزان استهلاک انرژی بیشتر است.

۴-ارائه و تفسیر نتایج

با بیان افت انرژی ΔH مطابق رابطه برنولی، واحد ارتفاع سرریز

بر اساس مطالعات پیراس^۱ (۱۹۹۲) تابعی از شیب سرریز و عدد آبشار $\left(\frac{q^2}{gH_D^3}\right)$ بیان شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که



شکل ۸. تغییرات $\frac{\Delta H}{H_{max}}$ برحسب $\frac{y_c}{Nh}$ در مدل‌های مختلف تحقیق حاضر

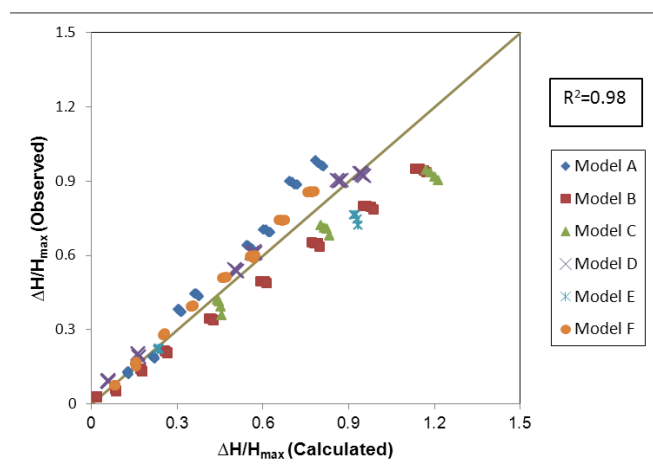
Fig. 8. Changes of $\frac{\Delta H}{H_{max}}$ in terms of $\frac{y_c}{Nh}$ in different models of the present study

نمودارهای شکل نشان می‌دهند که در هر شیب معین به ازای دبی مشخص، با افزایش تعداد پله‌ها (N)، استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که در شیب معین، به ازای تعداد پله (N) مشخص، افزایش دبی با کاهش استهلاک انرژی نسبی همراه است که در دبی‌های رویه‌ای محسوس‌تر می‌باشد. بررسی اثر پارامتر $\frac{H_D}{y_c}$ بر استهلاک انرژی نسبی روی پله‌های معین هر سرریز بررسی تا اثر پارامتر N حذف شود. مطابق شکل ۷ افزایش پارامتر

با توجه به نتایج فوق، به نظر می‌رسد که با افزایش پارامتر $\frac{q^2}{gH_D^3}$ آهنگ کاهشی تغییرات افت انرژی در واحد ارتفاع سرریز کمتر شده و اثر تعداد پله‌ها (N) به عنوان زبری کاهش می‌یابد. بررسی هر سرریز نیز نشان می‌دهد که در هر عدد آبشار مشخص، با افزایش تعداد پله‌ها، افت انرژی در واحد ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش تعداد پله‌ها در یک سرریز مشخص با یک دبی ثابت، افزایش افت انرژی در واحد ارتفاع سرریز انتظار می‌رود. تاثیر پارامتر تعداد پله‌ها (N) در شکل ۶ ارائه شده است.

به کمک رابطه (۱۷) استهلاک انرژی نسبی در سرریز با ارتفاع معین H_D و شیب $\tan \theta$ ($\frac{h}{l}$) تا پله N قابل تخمین می‌باشد. با توجه به اطلاعات پایه اولیه استفاده شده، این رابطه برای محدوده $0.33 < \frac{h}{l} < 1.2$ و $13.92 < \frac{H_D}{y_c} < 121.84$ و $0.00163 < \frac{y_c}{Nh} < 0.8875$ قابل استفاده و توصیه می‌شود. برای صحت‌سنجی رابطه، تغییرات $\frac{\Delta H}{H_{max}}$ اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با رابطه پیشنهادی مقایسه و پراکندگی نقاط مطابق شکل ۹ مورد بررسی قرار گرفت. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود، پراکندگی نقاط حول خط ۴۵ درجه در روش حل لگاریتمی به خصوص در مقادیر $\frac{\Delta H}{H_{max}}$ کمتر از ۰/۹ منطقی به نظر می‌رسد.

برای اطمینان از دقت رابطه پیشنهادی در محاسبه استهلاک انرژی، نتایج حاصل از این رابطه با نتایج سایر محققین مقایسه شد. به همین منظور، رابطه (۱۷) با روابط (۱)، (۱۰) و (۱۲) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت که نتایج در جدول ۲ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، دقیق‌ترین معادله جهت محاسبه استهلاک انرژی نسبی در رژیم جریان ریزشی و در دبی‌های محدود



شکل ۹. صحت‌سنجی رابطه پیشنهادی برای محاسبه استهلاک انرژی نسبی (روش حل لگاریتمی)

Fig. 9. Validation of the proposed relation to calculate relative energy dissipation (Logarithmic solution method)

باعث افزایش استهلاک انرژی نسبی می‌شود. با توجه به شکل ۷، در یک سرریز با ارتفاع مشخص و تعداد پله معین (N)، در قالب حالات با افزایش دبی (کاهش $\frac{H_D}{y_c}$)، استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد. همچنین استهلاک انرژی نسبی به ازای یک دبی ثابت، با افزایش ارتفاع سرریز، افزایش می‌یابد. شیب نمودارها با افزایش پارامتر $\frac{H_D}{y_c}$ کاهش می‌یابد. تاثیر پارامتر $\frac{y_c}{Nh}$ در شکل ۸ قابل مشاهده است.

از نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت که در هر شیب معین به ازای مقدار $\frac{H_D}{y_c}$ ثابت (برای سرریز مشخص با دبی معین)، با افزایش پارامتر $\frac{y_c}{Nh}$ (یعنی کاهش N)، استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. همچنین به ازای یک دبی مشخص، با افزایش پارامتر Nh (تقریباً برابر ارتفاع سرریز)، استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. در رژیم جریان ریزشی، انرژی جریان با شکل‌گیری پرش هیدرولیکی مستهلک می‌شود که این امر سبب شده تا در رژیم ریزشی نسبت به سایر رژیم‌ها (انتقالی و رویه‌ای)، استهلاک انرژی جریان بیشتر شود.

با توجه به آنالیز ابعادی انجام شده، رابطه پیشنهادی جهت محاسبه استهلاک انرژی نسبی جریان ریزشی در سرریزهای پلکانی از روش حل لگاریتمی به دست آمد. رابطه کلی استهلاک انرژی نسبی بر اساس مطالعات صورت گرفته به صورت زیر مورد توجه قرار گرفت:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = a \times \left(\frac{h}{l}\right)^b \times \left(\frac{H_D}{y_c}\right)^c \times \left(\frac{y_c}{Nh}\right)^d \quad (16)$$

که a ، b ، c و d مجهولات معادله می‌باشند. معادله نهایی پیشنهادی به

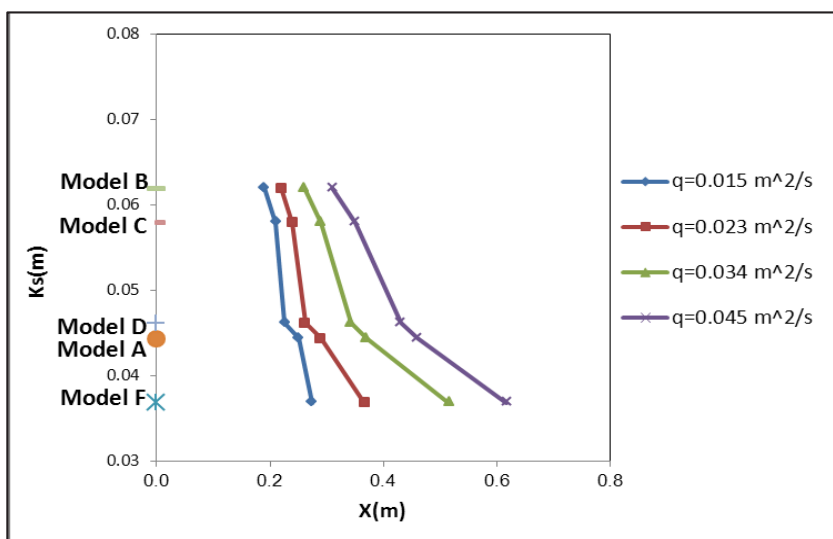
شکل رابطه (۱۷) خواهد بود:

$$R^2 = 0.98) \quad (17)$$

$$\left(\frac{\Delta H}{H_{max}}\right) = 1.11 \times \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.30} \times \left(\frac{H_D}{y_c}\right)^{-1.07} \times \left(\frac{y_c}{Nh}\right)^{-1.021}$$

جدول ۲. ارزیابی معادلات استهلاک انرژی برای رژیم ریزشی
Table 2. Evaluation of energy dissipation equations for nappe flow regime

نام محقق	رابطه پیشنهادی	R^2
Chanson (1994)	$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{0.54 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.275} + 1.715 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.55}}{1.5 + \frac{H_D}{y_c}}$	۰/۶۱
Fratino (2000)	$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{H_r}{H_{max}} = 1 - \frac{y_1 + \frac{1}{2} \frac{y_c^3}{y_1^2}}{H_D + \frac{3}{2} y_c} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2} \lambda^{-2}}{\frac{H_D}{y_c} + \frac{3}{2}}$	۰/۷۷
سلماسی (۱۳۸۲)	$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{H_r}{H_{max}} = 1 - \frac{y_1 + \frac{1}{2} \frac{y_c^3}{y_1^2}}{H_D + \frac{3}{2} y_c} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2} \lambda^{-2}}{\frac{H_D}{y_c} + \frac{3}{2}}$	۰/۹۰
تحقیق حاضر (روش حل لگاریتمی)	$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1.11 \times \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.30} \times \left(\frac{H_D}{y_c}\right)^{-1.07} \times \left(\frac{y_c}{Nh}\right)^{-1.021}$	۰/۹۸

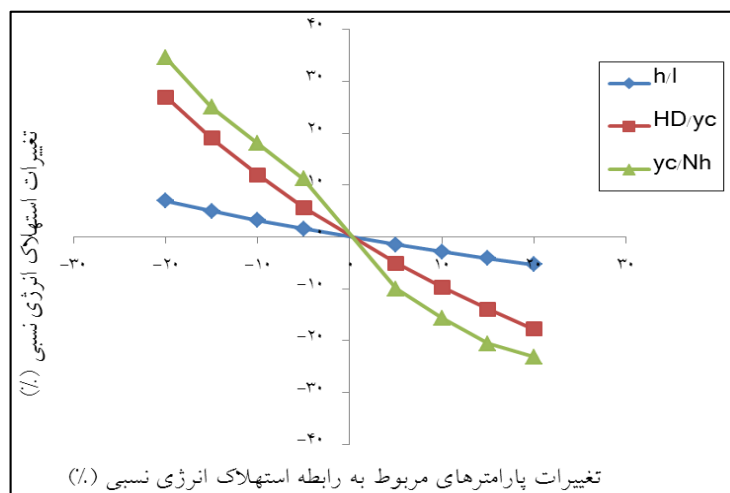


شکل ۱۰. تاثیر پارامتر K_s بر محل وقوع جریان ریزشی مدل‌های آزمایشگاهی
Fig. 10. The effect of K_s parameter on the location of nappe flow in laboratory models

بستگی به ارتفاع و شیب سرریز دارد و از فرمول $K_s = h \cos \alpha$ محاسبه می‌شود. در این تحقیق به ازای دبی واحد عرض‌های ثابت، طول افقی جریان از اولین پله تا محل تشکیل جریان ریزشی (X) در مدل‌های مختلف اندازه‌گیری و نمودار آن در شکل ۱۰ رسم گردید.

به آزمایش‌های انجام شده، رابطه (۱۷) می‌باشد که با دقت بالایی استهلاک انرژی نسبی را به دست می‌آورد.

یکی از عوامل مهمی که در وقوع جریان ریزشی نقش موثری دارد، زبری معرف پله در سرریزهای پلکانی یا همان K_s می‌باشد که



شکل ۱۱. نتایج آنالیز حساسیت رابطه استهلاک انرژی نسبی
Fig. 11. Results of sensitivity analysis for relative energy dissipation relationship

بیشتری از خود نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که در رژیم جریان ریزشی، بهترین عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلکانی در حالت جریان ریزشی آزاد با پرش هیدرولیکی کامل (رژیم جریان فرعی NA_1) می‌باشد که در دبی‌های پایین اتفاق می‌افتد و حداکثر تلفات انرژی را به همراه دارد. همچنین، بر اساس نتایج حاصل در رژیم ریزشی، هر چه مقدار h/l و شیب سرریز بزرگ‌تر باشند، استهلاک انرژی کاهش می‌یابد و با افزایش پارامتر بی‌بعد $\frac{q^2}{gH_D^3}$ ، افت انرژی در واحد ارتفاع سرریز $(\frac{\Delta H}{H_D})$ کاهش می‌یابد. به ازای یک دبی مشخص، با افزایش تعداد پله‌ها (N)، استهلاک انرژی نسبی افزایش و با افزایش پارامتر بی‌بعد $\frac{H_D}{y_c}$ در تمام شیب‌ها و پله‌ها، استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. مهم‌ترین پارامتر بی‌بعد تاثیرگذار در پیش‌بینی استهلاک انرژی، پارامتر بی‌بعد $\frac{y_c}{Nh}$ می‌باشد که تغییرات آن، تاثیر بیشتر بر استهلاک انرژی نسبی در رژیم جریان ریزشی می‌گذارد. همچنین، در سرریزهای پلکانی به ازای دبی واحد عرض ثابت، هر چه زبری پله‌ها (K_s) افزایش یابد، مکان

چنانچه که در شکل مشاهده می‌شود، به ازای دبی واحد عرض ثابت، با افزایش زبری پله (K_s) مقدار X (محل وقوع جریان ریزشی) کاهش پیدا می‌کند. همچنین در دبی‌های واحد عرض کمتر، شیب منحنی تندتر و در دبی‌های واحد عرض بیشتر، شیب منحنی ملایم‌تر می‌باشد. روند تغییرات شیب منحنی در مدل‌های D-A-F و B-C-D متمایز است، یعنی به ازای $k_s > 0.045$ و دبی در واحد عرض کمتر، شیب خطوط تندتر شده است.

رابطه پیشنهادی محاسبه استهلاک انرژی نسبی بر اساس میزان اهمیت پارامترهای موثر بر استهلاک انرژی نسبی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، ابتدا با ثابت نگه داشتن پارامترهای $\frac{H_D}{y_c}$ و $\frac{y_c}{Nh}$ از رابطه (۲۲)، مقدار $\frac{h}{l}$ در بازه -20% تا $+20\%$ (هشت نقطه) تغییر و به ازای هر درصد از مقدار $\frac{h}{l}$ ، مقدار استهلاک انرژی نسبی به دست آمد که درصد تغییرات آن قابل اندازه‌گیری می‌باشد. سپس نمودار درصد تغییرات استهلاک انرژی نسبی (محور قائم) نسبت به پارامتر $\frac{h}{l}$ (محور افق) رسم شد. برای پارامترهای $\frac{H_D}{y_c}$ و $\frac{y_c}{Nh}$ نیز این عمل تکرار شد که نتایج در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۱۱ حساسیت رابطه (۱۷) نسبت به پارامتر $\frac{y_c}{Nh}$ بیشتر از دو پارامتر دیگر می‌باشد و استهلاک انرژی نسبی تغییرات

4248-4252.

- [9] Chanson H. Hydraulic of Stepped Chutes and Spillways, A.A.Balkema, Lisse, the Netherlands. 2002.
- [10] Kavianpour, M. and Mohebbi, M. Numerical and Experimental investigation of pressure changes on stepped spillways, khajeh nasir Toosi University, civil college, 2012. (in Persian)
- [11] Toombes, C. Experimental Study of Air-water Flow Properties on Low-gradient Stepped cascades, Ph.D. Thesis, Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, 2002.
- [12] Khaturia, R.M. Hydraulic of spillways and Energy Dissipators, USA, 2005.
- [13] Chanson, H. Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel, Journal of Hydraulic Research, 1996. 34(3): p. 421-429.
- [14] Chanson H. Comparision of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped chutes, J. of Hydraulic Research, 1994. Vol.32, No.2: p. 213-218.
- [15] Chamani M and Rajaratnam N. Jet flow on stepped spillways, J. of Hydraulic Engineering, 1994. Vol.120, No.2: pp. 254-259.
- [16] Fratino, U. Piccini, F. Dissipation efficiency of stepped spillways, Proc. International workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Zurich, Switzerland, H. E. Minor and W. Hager Eds. Balkema, 2000. 103-110.
- [17] White, M. P. Discussion to energy loss at the base of free overfall, Moore, Transactions, ASCE, 1943. Vol.108, pp.1361-1364.
- [18] Salmasi, F. et al. Experimental investigation of current head loss over stepped spillways, the 6th international conference of civil Engineering, industrial university of Isfahan, civil college, 2004. (in Persian)
- [19] Jafarinia, R. and Mousavi jahromi, H. Evaluation of energy losses in stepped spillways in nappe regime and non-nappe regime, The Second National Conference on Watershed Management and Soil and Water

وقوع جریان ریزشی به بالادست منتقل می‌شود. دقیق‌ترین معادله جهت محاسبه استهلاک انرژی نسبی در رژیم جریان ریزشی، رابطه

می‌باشد که بر اساس تحقیق حاضر به دست آمد و در مقایسه با روابط پیشین از دقت بالاتری برای محاسبه استهلاک انرژی نسبی برخوردار می‌باشد.

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1.11 \times \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.30} \times \left(\frac{H_D}{y_c}\right)^{-1.07} \times \left(\frac{y_c}{Nh}\right)^{-1.021}$$

مراجع

- [1] Kavianpour, M. and Masoumy, M. New approach for estimating of energy dissipation over stepped spillways, International Journal of civil Engineering, 2008. Vol. 6, No. 3, Sep. (in Persian)
- [2] Pfister, M. Hager, W. and Minor, H. Bottom aeration of stepped spillways, Journal of Hydraulic Engineering, 2006. 132(8): p. 850-853.
- [3] Zamora, A. Pfister, M. Hager, W. and Minor, H. Hydraulic performance of step aerator, Journal of Hydraulic Engineering, 2008. 134(2): p. 127-134.
- [4] Shamsaei, A. and Paknahal, F. Hydraulic of chutes and stepped spillway, Publications of sharif industrial university, civil college, 2006. (in Persian)
- [5] Boes, R. and Hager W. Two-phase Flow Characteristics of Stepped Spillway, J. of Hydraulic Engineering; 2003. Vol.129, No.9: pp.661-670.
- [6] Zhang, G. and Chanson H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways, I: Physical Modeling and Boundary Layer Development, Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(7): 8 p. DOI: 10.1061, (ASCE) HY.1943-7900.0001138.
- [7] Hasanalipour A. et al. Experimental investigation of the effect of stepped spill slope on flow regime and field hydraulic parameters (Case study: Siahbishe Dams Spillways), Iranian Journal of Water Research, 2019. 33: p. 139-149. (in Persian)
- [8] Hanbay, D. Baylar, A. and Batan, M. Prediction of aeration efficiency on stepped cascades by using least square support vector machines, International Journal of Expert Systems with Applications, 2009. 36: p.

Resources Management, Kerman, Iranian Association
of Irrigation and Water Engineering, 2005. (in Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ghasempour Feremi, M. R. Kavianpour, Sh. Faghihrad, *Experimental Investigation of Nappe Flow Domain on Stepped Spillways*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4473-4488.

DOI: [10.22060/cej.2021.18376.6856](https://doi.org/10.22060/cej.2021.18376.6856)



