



Energy Loss Promotion of Stepped Spillways Based On Step-Pool Formation In High Gradient Mountain Streams

A. Mardashti¹ and N. Talebbeydokhti²

Abstract

The most important characteristic of a stepped spillway compared to other kinds of spillways is the high energy dissipation. The understanding of head loss, evaluation and promotion of energy dissipation are the basis of more research. In this study, a new step-pool formation is designed in stepped spillway based on natural high gradient mountain stream bed formation. Residual energy downstream of both the step-pool stepped spillway and the normal stepped spillway are measured in the hydraulic laboratory of the School of Engineering of Shiraz University.

For new design, the experiments were made at two slopes, under six discharges and six step-pool configurations. Therefore, a total of 72 tests were performed. Based on this laboratory results, it was concluded that the step-pool (compound) stepped spillway caused an extra 30% reduction in energy dissipation compared to the simple stepped spillway. This result confirms the optimization of natural step-pool formation for stepped spillways.

Keywords: Energy dissipation, Energy loss, Stepped spillway, Step-pool, Mountain stream

ارتقاء استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی با استفاده از فرآیند پله - حوضچه‌ای رودخانه‌های کوهستانی

اسدالله مردشتی^۱ و ناصر طالب بیدختی^۲

چکیده

یکی از بارزترین مشخصه‌های کاربردی سرریز پلکانی در مقایسه با سرریزهای دیگر، استهلاک انرژی قابل ملاحظه در طول مسیر سرریز است. بنابراین با توجه به ویژگی اصلی سرریز پلکانی، فهم کاملتر چگونگی استهلاک انرژی، برآورد میزان و نهایتاً افزایش مقدار آن، محور بیشتر تحقیقات بوده است. در این تحقیق ضمن ارزیابی چگونگی و اندازه‌گیری میزان استهلاک انرژی سرریز پلکانی معمول، با توجه به اهمیت زیاد سهم زبری فرم بستر در میزان استهلاک انرژی با الهام از الگوی طبیعی فرم بستر پایدار پله- حوضچه‌ای در رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد، اقدام به ارائه طرح جدید سرریز پلکانی با بستر ترکیبی پله- حوضچه‌ای گردیده است.

در این راستا، شش الگوی مختلف تحت دو شیب مختلف سرریز و شش دبی متفاوت عبوری (جمعاً ۷۲ حالت) مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی در مقایسه آزمایشگاهی با سرریز پلکانی معمولی با خیز پلکان یکسان، افزایش استهلاک انرژی تا حداکثر ۳۰ درصد را در سرریز پلکانی با فرم پله- حوضچه‌ای ترکیبی نشان می‌دهد که این نتیجه خود تاییدی در راستای بهینه بودن فرآیندهای طبیعی و راندمان بالای مدل سرریز پلکانی مرکب بعنوان یک مدل جدید سرریز پلکانی است.

کلمات کلیدی: استهلاک انرژی، اتلاف انرژی، سرریز پلکانی، پله- حوضچه‌ای، رودخانه کوهستانی

1- Ph. D. Student of Civil Eng. Dep., Engineering School, Shiraz University
2- Prof. of Civil Eng. Dep., Engineering School, Shiraz University

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، بخش عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
۲- استاد بخش عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه شیراز

۱- مقدمه

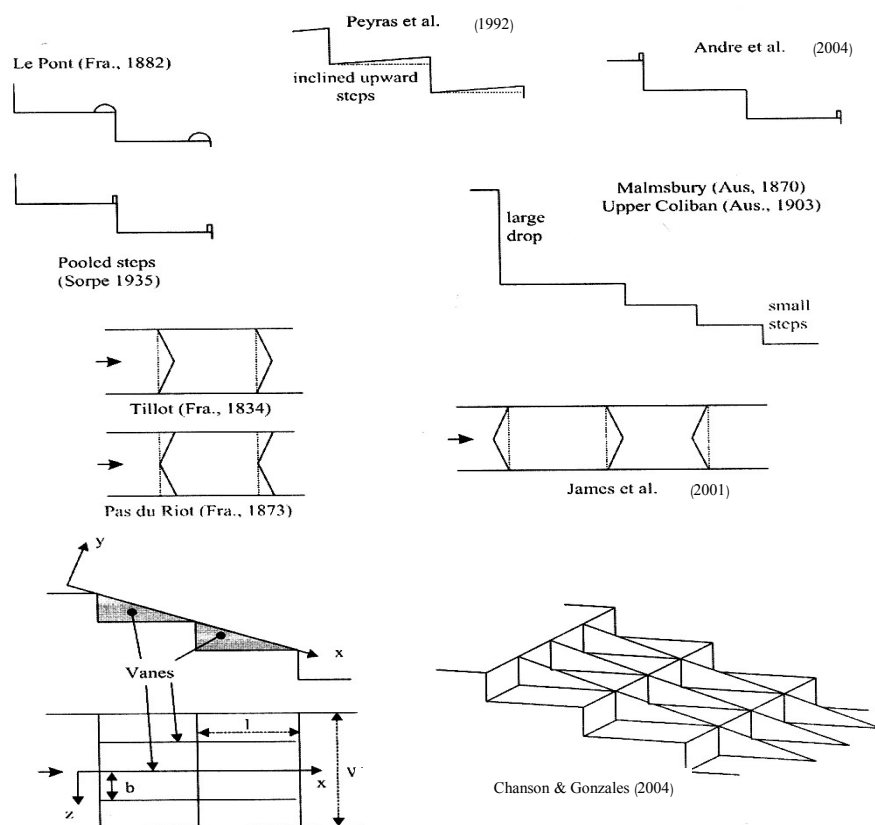
جمع بندی کلیه تحقیقات پژوهشگران طی یک کتاب منتشر گردید (Minor and Hager, 2000). همچنین (Chanson, 2002). کتاب جامعی ماحصل تحقیقات چند ساله خود و دیگر محققان جهت سرریزهای پلکانی تهیه کرد. در سالهای ۲۰۰۲ تاکنون پیرامون درک هر چه بیشتر هیدرولیک جریان روگذر سرریز پلکانی بوده‌اند (Frizell, 2006).

در راستای افزایش میزان استهلاک انرژی سرریز پلکانی طی سالیان اخیر کوششهای متعددی توسط تعدادی از محققان، نظیر پلکان با شیب معکوس کف پله، تمهید آستانه در انتهای لبه پلکانهای متوالی یا یک درمیان، استفاده از لبه نیم دایره‌ای در انتهای لبه پلکان، ترکیب پله‌های با ارتفاعهای متفاوت و ... انجام گرفته است که تعدادی از آنها بعنوان نمونه در شکل (۱) ارائه شده‌اند.

اکثر طرحها بدلیل تاثیر بسیار محدود (افزایش چند درصدی، کمتر از ۵ درصد) و در مقابل افزایش هزینه قابل ملاحظه، در اجرا عمومیت پیدا نکرده‌اند. البته بعضی از طرحها، جدای از بحث اقتصادی، اجرائی هم نبوده‌اند.

سرریزهای پلکانی در سه دهه اخیر بخاطر توسعه صنعت ساخت سدهای بتن غلطکی^۱ (RCC) که قادر به عبور سرریز بر روی بدنه سد می‌باشند، رشد چشمگیری داشته است. همچنین احداث سرریزهای پلکانی روگذر با بلوکهای بتنی پیش ساخته بر روی بدنه سدهای خاکی، اهمیت این نوع سرریزها را دو چندان کرده است (Chanson, 2002). هنگامی که جریان سیلاب از روی سرریز پلکانی عبور می‌کند، زبری ناشی از برآمدگی پلکان باعث استهلاک قابل ملاحظه انرژی در طول سرریز می‌گردد که به تبع آن انرژی جریان در پایین دست کاهش زیادی یافته و پیامد آن سازه انرژی گیر متمرکز پایین دست، کوچکتر و با هزینه ساخت کمتر است. عامل اصلی در ایجاد اصطلاک بستر با توجه به بزرگی ابعاد پله‌ها نسبت به عمق جریان ریزشی، زبری شکل بستر ناشی^۲ از پلکان می‌باشد. تاثیر زبری جداره^۳ در مقایسه با زبری شکل بستر بسیار کمتر و در عمل قابل صرف نظر کردن است (Boes and Minor, 2002).

مطالعات وسیعی بر روی پلکانهای با کف پله صاف طی سالهای ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۷ انجام گردیده است. در این راستا یک کنفرانس خاص مسائل سرریز پلکانی در سال ۲۰۰۰ در زوریخ سویس برگزار گردید و



شکل ۱- فرمهای مختلف پیشنهادی جهت افزایش راندمان استهلاک انرژی سرریز پلکانی، (Chanson and Gonzales 2004)

در این تحقیق، با رویداشت به مشکلات طرحهای گذشته و با توجه به اینکه نقش اصلی استهلاک انرژی در سرریز پلکانی، توسط زبری شکل بستر تامین می‌شود، با مدنظر قرار دادن اول: اجرائی بودن، دوم: اقتصادی بودن، سوم: فنی بودن از لحاظ عملکرد مطمئن در طیف کلیه دبیهای کمتر از دبی طرح، با الهام از فرآیند طبیعی فرم پله- حوضچه‌ای در بستر رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد^۴، هنده جدید پلکان مرکب با رویکرد افزایش مطمئن اصطکاک ناشی از شکل بستر^۵ ارائه گردیده است. جهت این ایده جدید با تغییر ابعاد حوضچه‌های میانی و پشته‌های کناری آنها، تاثیر پارامترهای مختلف هنده سرریز پلکانی با فرم پله- حوضچه‌ای در مقایسه با سرریز پلکانی با پله افقی و خیز معادل، مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است.

پیش از ارائه روش تحقیق جهت ایده جدید سرریز پلکانی ترکیبی با فرم پله- حوضچه‌ای میانی، پژوهشهای انجام گرفته مرتبط با تحقیق حاضر به اختصار و به تفکیک پیرامون سرریز پلکانی و رودخانه‌های کوهستانی با فرم پله- حوضچه‌ای در زیر ارائه می‌گردد.

۱-۱- فرآیند جریان ریزشی سرریز پلکانی

در حقیقت سرریز پلکانی یک کانال روباز است که به جای کف صاف و یکنواخت دارای یک سری پله (آبشار) متوالی می‌باشد. جریان ریزشی بر حسب میزان استغراق نسبی برجستگی پلکان (که به صورت نسبت بدون بعد عمق بحرانی جریان d_c ، به ارتفاع پله s ، تعریف می‌شود) و شیب سرریز S ، به سه ناحیه تفکیک می‌گردد (Chanson 1994, 1996, 2002). شکل ۲ سه ناحیه جریان افتان و خیزان^۶ (استغراق نسبی کم)، انتقالی^۷ (استغراق نسبی متوسط) و سرسره غلطشی^۸ (استغراق نسبی زیاد) را نشان می‌دهد. عملکرد زبری شکل بستر با توجه به نوع جریان ریزشی از حالت پله‌های آبشاری مجزا در جریان افتان و خیزان تا حالت چرخابه‌های نظام مند بین پله‌ها در جریان سرسره غلطشی تغییر می‌کند و کاملاً متفاوت است. اصطکاک بستر با توجه به نوع عملکرد زبری شکل بستر در جریان افتان و خیزان زیاد و در جریان سرسره غلطشی کمتر است.

محققان زیادی روی آستانه تفکیک حالت‌های جریان بر روی سرریز پلکانی مطالعه کرده‌اند که پوشش نهایی معادلات کلیه محققان توسط Ohtsu et al. (2004) به صورت رابطه ۱ ارائه شده است. معادلات رابطه ۱ به ترتیب معادلات منحنی بالا و پایین در شکل (۲) می‌باشند.

(۱- الف) آستانه پایین دست سرسره غلطشی

$$\frac{d_c}{s} \geq \frac{7}{6} (\tan \theta)^{\frac{1}{6}}$$

(۱- ب) آستانه بالایی جریان افتان و خیزان

$$\frac{d_c}{s} \leq 1.4(1.4 - \tan \theta)^{-0.26}$$

به نحوی که $\tan \theta = S = \frac{s}{l}$ می‌باشد.

برآورد میزان استهلاک انرژی نسبی سرریز پلکانی برحسب نوع جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی به صورت مجزا توسط محققان زیادی بررسی و اندازه گیری شده است. نتایج کار ایشان نهایتاً منجر به ارائه روابطی در محدوده جریان افتان و خیزان و جریان سرسره غلطشی گردیده است. در محدوده جریان انتقالی به دلیل ناپایداری و شرایط نوسانی جریان، رابطه کاربردی جامعی ارائه نشده است. در زیر طی بررسی و ارزیابی کار محققان نسبت به یکدیگر، بهترین مدلها ارائه شده است.

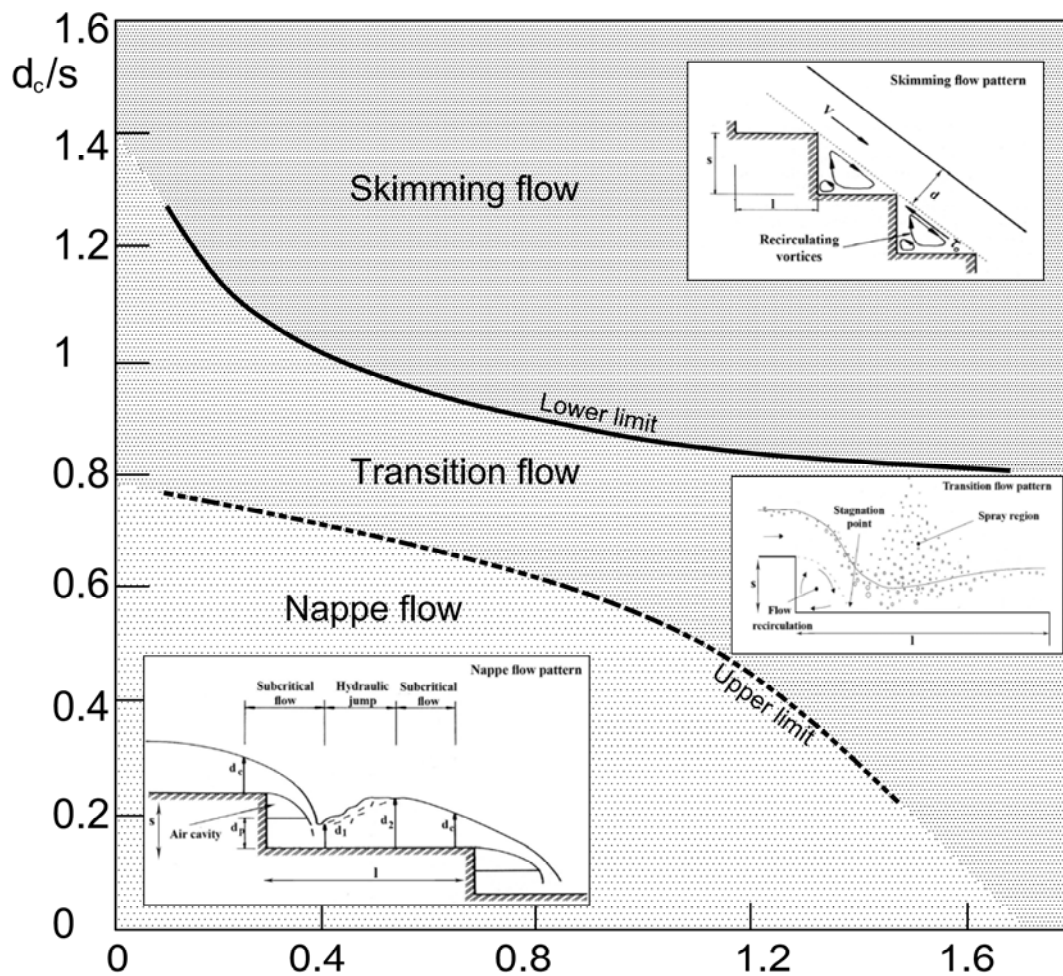
در جریان افتان و خیزان، تیغه ریزشی از روی هر پله به روی کف پله بعدی سقوط کرده و انرژی جریان تحت حرکت تیغه آب در هوا، برخورد به کف بستر پله پایین دست و نهایتاً پرش هیدرولیکی کامل یا ناقص تشکیل شده بر روی کف پله پایین دست، مستهلک می‌گردد. پیرامون برآورد افت انرژی جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی در محدوده جریان افتان و خیزان، Pinherio and Fael (2000) طی بررسی آزمایشگاهی کار کلیه محققان قبل از خود، به این نتیجه رسیدند که مدل ارائه شده توسط Chamani and Rajaratnam (1994) (رابطه ۲) نتایج مناسبتری را ارائه می‌کند.

$$\frac{\Delta E}{E} = 1 - \frac{\left\{ (1-A)^N \left[1 - 1.5 \left(\frac{d_c}{s} \right) \right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1-A)^i \right\}}{N + 1.5 \left(\frac{d_c}{s} \right)} \quad (2)$$

بطوریکه

$$A = \left[0.3 - 0.35 \left(\frac{s}{l} \right) \right] - \left[0.54 + 0.27 \left(\frac{s}{l} \right) \right] \log \left(\frac{d_c}{s} \right)$$

به نحوی که در آن ΔE میزان انرژی مستهلک شده بر روی سرریز، E انرژی کل در بالادست سرریز و N تعداد پله‌ها می‌باشد.



$$S = \text{Slope} = \frac{S}{l} = \tan \theta$$

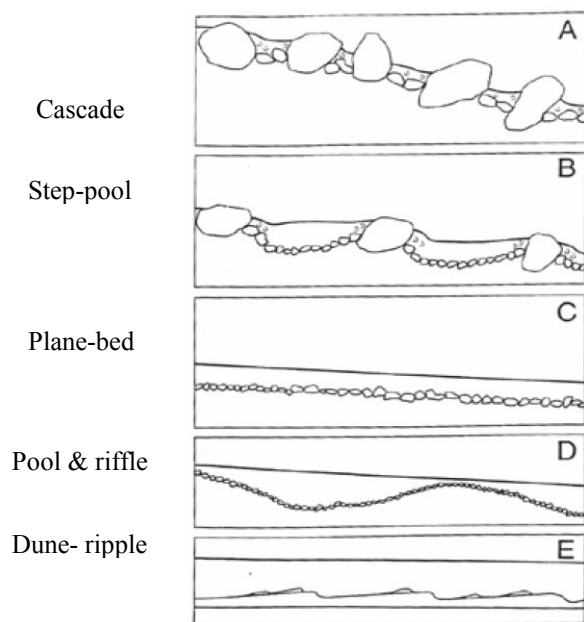
شکل ۲- روند تغییر حالت جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی بر حسب تغییرات استغراق نسبی، d_c/S و شیب

عمومی سرریز $S = \frac{S}{l}$ ، اصلاح شده شکل ... Boes and Hager (2003b)

روگذر، ضخامت توده جریان ریزشی افزایش می‌یابد. در این وضعیت انرژی جریان تحت انتقال ممتد جریان ریزشی سرسره‌ای به چرخابه‌های غلطشی مستهلک می‌گردد. البته هواگیری جریان اثر کاهنده در میزان استهلاک انرژی دارد (Boes and Hager, 2003a; Chanson, 2002). علی‌رغم حاکم بودن زبری شکل بستر در عملکرد جریان سرسره غلطشی در سرریز پلکانی، ضریب زبری داری و ایسباخ جهت تعیین انرژی استهلاکی بر روی سرریز پلکانی در اکثر مدل‌ها بکار می‌رود. (Chanson (2002), Boes and Hager (2003b) و Valentin, Volkart and Minor (2004) به منظور برآورد میزان استهلاک انرژی ریزشی بر روی سرریز پلکانی در وضعیت جریان سرسره غلطشی یکنواخت روابطی را ارائه کرده‌اند که براساس بررسی

در جریان سرسره غلطشی، توده اصلی جریان بر روی یک سری چرخ آبی (چرخابه) که در محفظه داخلی پله‌ها شکل می‌گیرند به پایین سرخورده و ریزش می‌کند. بعلاوه بوجود آمدن این چرخابه‌ها که در کنار هم فرورفتگی پلکان را پر می‌کند یک بستر نسبتاً صاف که در حقیقت سطح پوش چرخابه‌های غلطشی می‌باشد بوجود می‌آید که امکان پایین لغزیدن راحت‌تر توده اصلی جریان را فراهم می‌سازد. همانطوریکه جریان بر روی بستر پوشیده شده از غلطک‌های چرخابه‌ای به پایین می‌لغزد، به تدریج بدلیل رشد لایه مرزی به داخل توده جریان، افزایش تلاطم قائم (V') و فراگیر شدن آن در کل عمق، هوای قابل ملاحظه‌ای بداخل جریان وارد می‌شود و به اصطلاح جریان هوادهی گردیده و به رنگ سفید در می‌آید. با هوادهی تیغه جریان

جداره‌های رودخانه می‌شود که منجر به کنترل فرسایش و افزایش اصطکاک کف تحت حالت زبری شکل بستر^{۱۳} و به تبع آن افزایش مقاومت و پایداری بیشتر جداره کف و نهایتاً استهلاک انرژی بیشتر جریان می‌گردد (Abraham et al., 1995).



شکل ۳- حالت‌های مختلف زبری شکل بستر رودخانه‌های کوهستانی برحسب شیب عمومی

مورفولوژی پله- حوضچه‌ای^{۱۳} (فرم دوم شکل ۳) در رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد، بصورت یک سری منظم پلکان و بستر حوضچه‌ای می‌باشد (شکل ۴). محدوده پله‌ها از سنگدانه‌های درشت شکل می‌گیرد و ریزدانه‌ها محدوده حوضچه را تشکیل می‌دهند. در انتهای هر حوضچه یک شیب معکوس (سربالا) وجود دارد.

سنگدانه‌های درشت که در محدوده پلکان بصورت مجتمع در می‌آیند باعث جلوگیری از فرسایش ریزدانه‌ها گردیده و عملاً ترکیب پلکان و حوضچه به کمک هم تشکیل یک بستر حفاظتی مناسب برای کف می‌دهند. تئوریهای مختلفی برای روند شکل‌گیری پلکان- حوضچه‌ای توسط محققین مختلف بیان گردیده است. یکی از اولین ایده‌ها، شکل‌گیری پلکان- حوضچه‌ای تحت اثر موجهای ایستای^{۱۴} موجود در جریان عبوری می‌باشد. (Wittaker and Jaeggi (1982) طی آزمایشهایی جهت شبیه‌های طولی کمتر از ۸ درصد، یک سری فرورفتگی متوالی تحت آزمایشهای مختلف در کانال با بستر آبرفتی بدست آوردند، که به وجود موجهای ایستا مربوط دانستند.

آزمایشگاهی (Frizell (2006) مدل ارائه شده توسط Boes and Hager (2003a) (رابطه ۳) از تطابق مناسبتری با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{H_{\max} - H_{res}}{H_{\max}} = 1 - \frac{H_{res}}{H_{\max}} \quad (3)$$

$$= 1 - \frac{\left(\frac{f_b}{8 \sin \theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos \theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f_b}{8 \sin \theta}\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{H_{dam}}{dc} + \left(\frac{f_b}{8 \sin \theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos \theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f_b}{8 \sin \theta}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

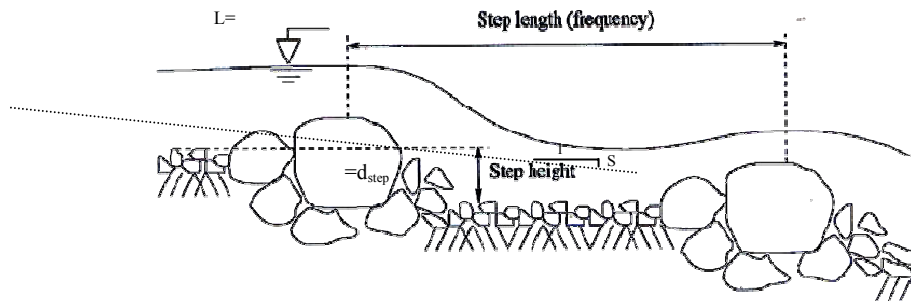
بطوریکه

$$\frac{I}{\sqrt{f_b}} = \frac{I}{\sqrt{0.5 - 0.42 \sin(2\theta)}} \left[1.0 - 0.25 \log\left(\frac{K}{D_h}\right) \right]$$

f_b ، ضریب زبری بستر از روی عمق جریان عاری از هوا d_w ، با احتساب اثر دیواره‌های جانبی سرریز و ضریب تصحیح شکل تغییر مقطع از دایره به مستطیل در نظر گرفته شده است. همچنین جهت سرریزهای پلکانی عریض $\frac{D_h}{4} \approx d_w$ می‌باشد و K یک ضریب ثابت بدون بعد ناشی از لایه برشی است که در تحقیقات (Gonzales and Chanson (2005) $K=6$ بهترین نتیجه را داده است. $H_{\max}=E$ ، حداکثر بلندای انرژی جریان در بالادست سرریز و H_{res} ، بلندای باقیمانده جریان در پایین دست سرریز پلکانی و H_{dam} ارتفاع سرریز یا سد می‌باشد. در ضمن α ، ضریب تصحیح انرژی جریان است.

۱-۲- مورفولوژی پله- حوضچه‌ای در رودخانه‌های کوهستانی

در رودخانه‌های کوهستانی شیب طبیعی رودخانه زیاد بوده و بدلیل سرعت بالای جریان، رسوبات بستر، درشت دانه تا قلوه سنگهای درشت می‌باشند. در چنین رودخانه‌هایی دبی جریان دارای نوسانات زیاد (فصول سیلابی تا فصول خشک) است. ترکیب حالت شیب زیاد رودخانه و نوسانات زیاد دبی و عرض محدود دره‌های کوهستانی (دره‌های V شکل) فرسایشهای قابل ملاحظه در بستر و جداره‌ها ایجاد می‌کند که گاهی منجر به حمل قلوه سنگهای بزرگ^۹ در محدوده بارکف می‌گردد. براساس این فرآیند سنگدانه‌ها برحسب اندازه به گونه‌ای خاص در کنار هم مجتمع^{۱۰} شده و تشکیل فرمهای تکراری مختلفی برحسب شیب رودخانه می‌دهند. در شکل ۳ فرمهای مختلف برحسب شیب طولی رودخانه ارائه شده‌اند (Montgomery and Buffington, 1997). این فرآیند بصورت طبیعی انجام می‌گیرد و باعث ایجاد یک لایه حفاظتی^{۱۱} در بستر و



شکل ۴- فرم پله-حوضچه‌های رودخانه‌های کوهستانی با شیب زیاد

d_{step} : ارتفاع خیز پلکان سنگدانه‌ای در فرم پله-حوضچه‌ای
 $\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$: انحراف معیار توزیع ذرات کف
 Q : دبی جریان رودخانه به مترمکعب در ثانیه
 g : شتاب جاذبه زمین
 d_{50} : اندازه‌ای از الک که ۵۰٪ ذرات از آن کوچکتر می‌باشند.
 H : عمق جریان آب به متر

$$L = 7.39 \ln \left(\frac{d_{step}}{S} \right) - 5.52 \quad (5)$$

$$\sqrt{\frac{g}{f}} = -3.73 \log \left[\frac{d_{step} d_{84}}{LH} \right] - 0.80 \quad (6)$$

بطوریکه f ضریب اصطکاک بستر شامل مجموع زبری ناشی از سنگدانه‌ها (f_{grain}) و زبری ناشی از فرم بستر (f_{form}) می‌باشد.

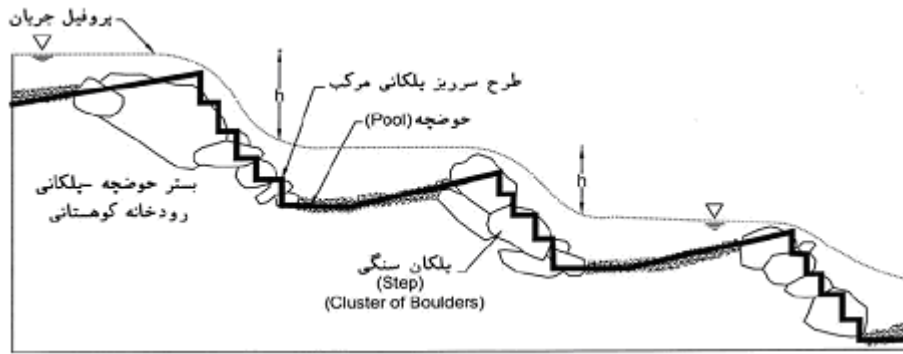
۲- ساختار جدید سرریز پلکانی پله-حوضچه‌ای

با توجه به مبانی ارائه شده در قسمت مقدمه، هدف پیاده کردن الگوی طبیعی فرم بستر رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند با علم به تاثیر زیاد آن در اصطکاک بستر، در سرریز پلکانی و بررسی اثر آن می‌باشد. به بیانی دیگر، هدف از این تحقیق، نیل به یک فرم کاملتر ترکیبی از پله‌های معمولی سرریز پلکانی است که طی چیدمان خاص در کنار یکدیگر تشکیل پله - حوضچه‌های بزرگتر بدهند. در حقیقت پله‌های معمول در سرریز پلکانی مرکب نقش قله سنگ‌های بزرگ در سیستم پله-حوضچه‌ای در رودخانه‌های کوهستانی را ایفا می‌کنند. شکل (۵) با روی هم قرار دادن فرم طبیعی رودخانه کوهستانی با فرم پله-حوضچه‌ای و مدل سرریز پلکانی مرکب تشابه الگویی را نشان می‌دهد.

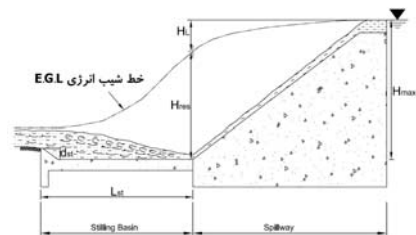
Abraham et al. (1995) طی بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی به این نتیجه رسید که مدل‌های برگرفته شده از موج سطحی^{۱۵} یا مدل فرسایشی و پشته^{۱۶} جوابگوی ساختار فرم پله-حوضچه‌ای نیست و در مدل جدید حداکثر مقاومت بستر را به صورت زیر بیان کرد. «فرم پله-حوضچه‌ای رودخانه‌های کوهستانی به گونه‌ای شکل می‌گیرد که حداکثر مقاومت بستر در مقابل جریان را ایجاد نماید. زیرا حداکثر مقاومت بستر در حقیقت حداکثر پایداری سنگدانه‌های بستر را در پی خواهد داشت». اکثر تحقیقات پیرامون مورفولوژی فرم پله-حوضچه‌ای رودخانه‌های کوهستانی بصورت آماری بوده است (Chin (1998,2003). ولی بعد از (Abraham et al. (1995)، محققینی چند نظیر (Maxwell and Papanicolaou (2001)، (Lenzi(2001) Zimmermann and Church (2001)، (Church and Zimmermann (2007)، (Comiti and Lenzi (2005)، (Wilcox et al. (2006) جهت درک عمیقتر هیدرولیک جریان رودخانه‌های کوهستانی با فرم پله-حوضچه‌ای تلاش‌های زیادی کرده‌اند. یکی از عمده‌ترین نتایج این محققین براساس تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی، سهم بیش از ۸۰ درصد اصطکاک کف، ناشی از زبری فرم بستر پله-حوضچه‌ای می‌باشد (Wilcox et al. (2006). همچنین اکثر محققین فوق تلاش‌هایی در راستای برآورد فاصله طولی بین پلکان‌های متوالی L ، ارتفاع پلکانها d_{step} و ارتباط بین آنها با شیب عمومی کانال S ، انجام داده‌اند. در این میان (Maxwell and Papanicolaou (2001) روابطی را برای تعریف هندسه رودخانه پرشیب پلکان-حوضچه‌ای بیان کرده‌اند که بصورت مختصر تحت روابط (۴) تا (۶) بیان شده‌اند.

$$\frac{d_{step}}{H} \sigma^{0.5} = 2.0 \left[\frac{Q}{\sqrt{gH^5}} \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^{1.5} \right]^{0.31} \quad (4)$$

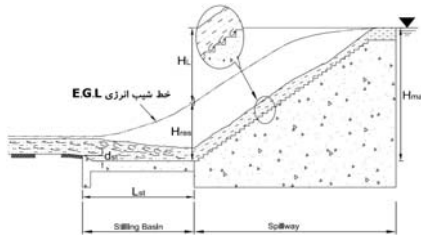
بطوریکه :



شکل ۵- تطابق فرم پله- حوضچه‌ای رودخانه‌های کوهستانی با سرریز پلکانی مرکب



الف) سرریز سرسره‌ای ساده



ب) سرریز پلکانی ساده



ج) سرریز پلکانی مرکب

شکل ۷- مقایسه افت انرژی در طول سرریزهای مختلف

۳- روش تحقیق

در مطالعات حاضر جهت اندازه گیری میزان استهلاک انرژی جریان ریزشی بر روی سرریز پلکانی با توجه به اینکه مواردی نظیر الف) جریان ریزشی بدلیل زبری فرم بستر، از تلاطم شدیدی برخوردار است
ب) جریان ریزشی بدلیل تلاطم شدید قائم (v')، بصورت دو فازی آب و هوا حرکت می‌کند.^{۱۸}

دیدگاه کلان در ساختار سرریز پلکانی مرکب پله- حوضچه‌ای به گونه‌ای است که حجم عملیات نسبت به رویه پایین دست یک سد بتنی وزنی یا سد بتن غلطکی وزنی و یا یک سرریز پلکانی ساده در حالیکه تغییر نمی‌کند (شکل ۶)، باعث افزایش قابل ملاحظه راندمان استهلاک انرژی جریان روگذر گردد (شکل ۷). لازم به توضیح است که با حفظ کردن خیز پلکانهای معمول حتی فرم قالب بندی و ارتفاع اجرایی قالبها در عملیات اجرایی حفظ خواهد گردید.

روند هیدرولیکی سرریز پلکانی مرکب، به گونه‌ای است که حوضچه‌های میانی با عملکرد چرخابه‌ای بزرگ و تلاطم شدید بعنوان عامل جدید مستهلک کننده انرژی جریان علاوه بر عملکرد پله‌های ساده سرریز پلکانی به مجموعه زبری فرم بستر (f_{form}) اضافه گردیده‌اند. چرخابه‌های حوضچه‌ای^{۱۷} با توجه به بالای استهلاک انرژی، راندمان را به صورت قابل ملاحظه افزایش داده و از افزایش سرعت بر روی سرریز پلکانی ساده (کف صاف) به میزان زیادی جلوگیری می‌کنند.



شکل ۸- تعادل بین حجم فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌ها در سرریز پلکانی مرکب

عمق گودال آب شستگی پایین دست در مقایسه با نتیجه کار دیگر محققان (جمعا ۴۰ حالت)

۳- مرحله سوم: آزمایش بروی سرریز پلکانی مرکب تحت فرمهای مختلف، شیبهای مختلف و دبیهای مختلف به منظور حصول ارزیابی روند کلی عملکرد سرریز پلکانی مرکب در مقایسه با سرریز پلکانی با کف پله ساده هم ارز (جمعا ۷۲ حالت)

۴- ساختار آزمایشگاهی

شکل ۸ سیمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی کانال سرریز که به ترتیب شامل (۱) مخزن آرامش جریان در بالادست کانال (۲) کانال شیشه‌ای سرریز به عرض ۲۰ سانتیمتر، طول ۴ متر و دیواره‌های شیشه‌ای به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر (۳) کانال افقی حوضچه شنی (cm $d_{50} = 2/5$) به عمق ۳۰ سانتیمتر شن و ۲۰ سانتیمتر لبه آزاد شیشه‌ای به عرض ۲۰ سانتیمتر (۴) مخزن پایین دست کانال به ابعاد ۳/۵ متر در ۳ متر به عمق ۷۰ سانتیمتر با احتساب ۱۰ سانتیمتر لبه آزاد (۵) پمپ سانتریفوژ با قدرت آبدهی حداکثر ۶۰ لیتر در ثانیه در ارتفاع ۱۵ متر (۶) شیر کنترل کشویی به قطر ۴ اینچ (۷) دستگاه سنجش دبی مغناطیسی^{۱۹} با دقت ۰/۱ لیتر در ثانیه (۸) لوله فلزی ۴ اینچ به طول کلی ۱۱/۵ متر می‌شوند، را نشان می‌دهد. همچنین جهت کنترل عملکرد فلومتر از سرریز تیغه‌ای سری مثلی با زاویه ۹۰ درجه در مخزن پایین دست نیز بهره گرفته شده است. شیب کانال سرریز از زاویه ۵ درجه الی ۲۸ درجه قابل تنظیم بوده است. جهت اندازه‌گیری عمق جریان در طول کانال سرریز و کانال حوضچه شنی از ارتفاع سنج دیجیتال ورنیه^{۲۰} با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین اندازه‌گیری عمق آب در بالادست سرریز تیغه‌ای سری مثلی بوسیله شناور قائم دیجیتالی با دقت ۰/۵ میلی‌متر بهره گرفته شده است.

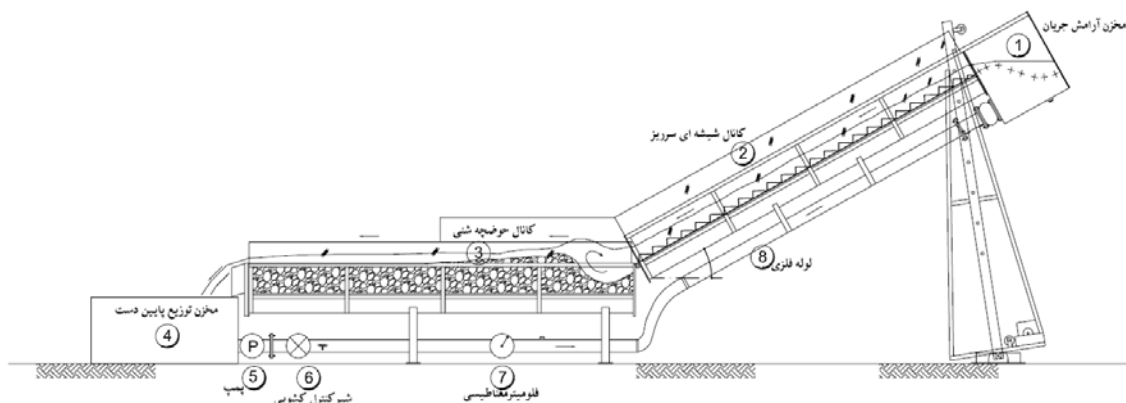
پ) اندازه‌گیری انرژی جریان ریزشی در پای سرریز پلکانی از طریق ابزار پیشرفته و دقیق اندازه‌گیری غلظت هوا، بسیار سخت و پرهزینه است.

ت) اندازه‌گیری انرژی جریان ریزشی در پای سرریز پلکانی از طریق پدیده پرش هیدرولیکی، به دلیل عدم همخوانی و تبعیت کامل فرم پرش هیدرولیکی از تئوری پرش هیدرولیکی، بخاطر دو فازی بودن تیغه ورودی، دارای خطای قابل ملاحظه می‌باشد.

در شرایط آزمایشگاهی وجود دارند، از روش غیرمستقیم جدیدی جهت برآورد انرژی کل تیغه خروجی از پایین دست سرریز پلکانی بهره گرفته شده است. این روش مبتنی بر اندازه‌گیری فرسایش ناشی از برخورد جت جریان پای سرریز با بستر سنگدانه‌ای پایین دست سرریز پلکانی می‌باشد. به عبارت دیگر هر چه انرژی مجموعه تیغه جریان خروجی بیشتر باشد، عمق فرسایش بیشتر است. به تبع بکارگیری روش جدید اندازه‌گیری میزان انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز پلکانی، جهت انجام تحقیق حاضر و دستیابی به هدف نهایی پژوهش که همانا مقایسه عملکرد سرریز پلکانی مرکب در مقابل سرریز پلکانی معمولی می‌باشد، آزمایشها به سه مرحله کلی تقسیم گردیده‌اند.

۱- مرحله اول: آزمایش بر روی سرریز سراسره‌ای ساده به منظور کالیبره کردن گودال آب شستگی ناشی از فرسایش جت آب در پایین دست سرریز تحت شیبها و دبیهای مختلف (جمعا ۳۰ حالت)

۲- مرحله دوم: آزمایش بر روی سرریز پلکانی با کف پله ساده جهت ارتفاعهای مختلف پلکان تحت شیبهای مختلف و دبیهای مختلف به منظور ارزیابی روش جدید اندازه‌گیری استهلاک انرژی جریان ریزشی دو فازی بر روی سرریز پلکانی توسط



شکل ۸ - ساختار آزمایشگاهی کانال سرریز

۵- نتایج و بحث

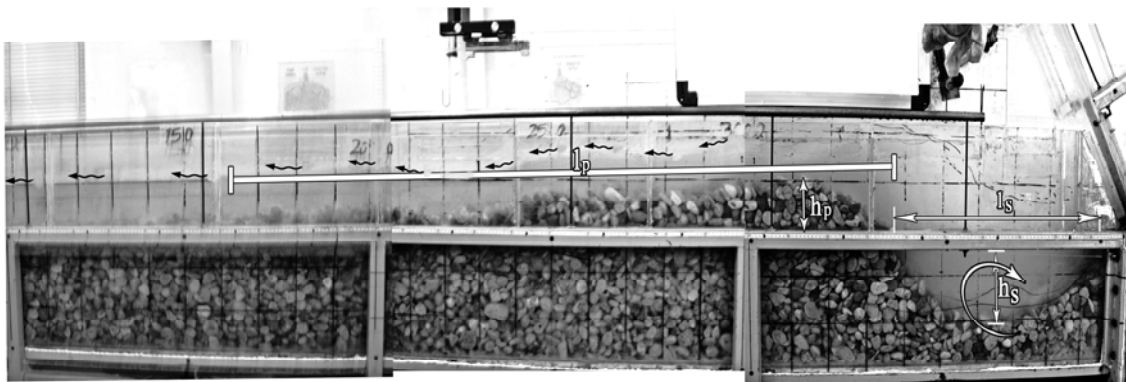
دبیهای مختلف ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر در ثانیه جریان ورودی به سرریز سرسره‌ای ساده^{۳۳}، ابعاد حفره آب شستگی حاصل جهت سه دانه‌بندی با d_{50} معادل ۰/۷۵، ۱/۷۰ و ۲/۵۰ سانتیمتر اندازه‌گیری گردیده است، که به تبع آن با اندازه‌گیری دقیق عمق جریان در پای سرریز سرسره‌ای ساده همچنین اندازه‌گیری میزان انرژی جریان در پای سرریز، ارتباط بین مشخصات گودال آب شستگی پایین دست و انرژی جریان پایاب سرریز مشخص گردیده است. در این خصوص ارتباط بسیار مناسبی بین عمق گودال آب شستگی و توان جریان ورودی جهت کلیه شبیها حاصل گردیده است شکل ۱۰ ارتباط فوق را بخوبی نشان می‌دهد.

$$P_{\Delta} = 1.05h_s^{1.92} + 5h_s + 3.1 \quad (7)$$

بنابراین با اندازه‌گیری بلندای جریان بلافاصله بعد از گودال فرسایشی (پایاب) H_t و برآورد P_{Δ} از رابطه ۷ مقدار انرژی باقیمانده جریان در پایین دست سرریز H_{res} از رابطه ۸ معلوم می‌گردد.

در قسمت اول، توسعه حفره آب شستگی موضعی در پایاب سرریز بستگی به جنس بستر (قطر متوسط ذرات d_{50} ، منحنی دانه بندی ذرات، ضریب یکنواختی $\frac{d_{60}}{d_{10}}$ و چگالی سنگدانه‌ها G) و شرایط جریان اعم از جهت و نحوه برخورد جت آب با بستر، مجموعه انرژی پتانسیل و جنبشی کل جریان دارد که این مهم با ترم کلی توان^{۳۱} مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

پارامترهای مشخصه برای تعریف حفره آب شستگی موضعی در پایاب سازه در حالت تعادل نهایی (گسترش نهایی حفره) شامل عمق (h_s) و طول گودال آب شستگی، عمق (h_p) و طول پشته (l_p) ایجاد شده بعد از گودال آب شستگی می‌باشد (شکل ۹). در این خصوص تراز آب روی پشته بعد از گودال که خود متأثر از شرایط پایاب جریان می‌باشد، در طول گودال و پشته نقش به‌سزایی دارد. جهت واسنجی^{۳۲} گودال ناشی از فرسایش بستر در پایاب سرریز در ابتدا تحت شبیهای مختلف ۳، ۸/۸، ۱۳، ۱۸/۸، ۲۳ و ۲۸ درجه و



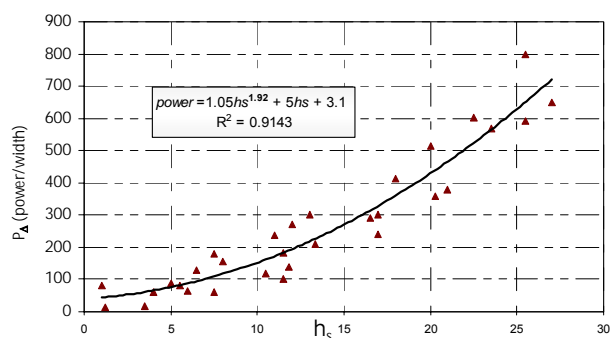
شکل ۹- پارامترهای مشخصه گودال آب شستگی پایین دست سرریز اعم از عمق گودال h_s ، طول گودال l_s ، ارتفاع پشته پایین دست گودال h_p و طول پشته پایین دست گودال l_p

$$P_{\Delta} = \gamma_w q [H_{res} - H_t] \quad (8)$$

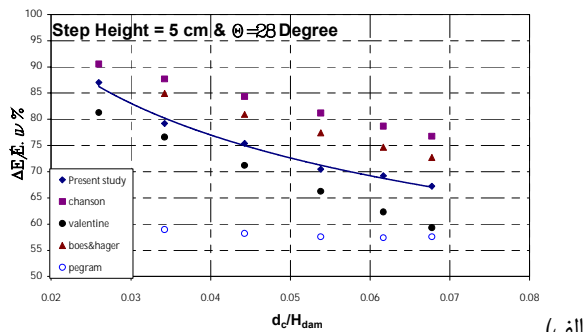
بطوریکه: q دبی در واحد عرض، γ_w وزن واحد حجم آب است. به تبع مشخص شدن H_{res} از رابطه ۸ براساس رابطه ۹ میزان استهلاک انرژی جریان ریزشی بر روی سرریز ΔE قابل محاسبه است.

$$\Delta E = H_{max} - H_{res} \quad (9)$$

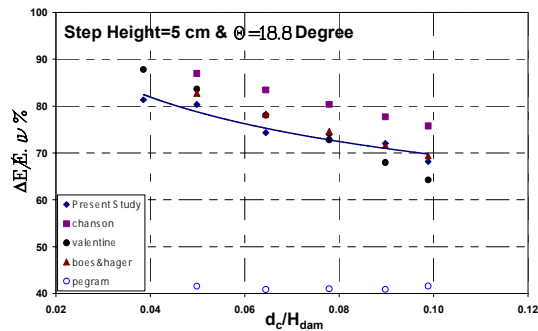
در قسمت دوم، در ادامه تحقیق جهت ارزیابی عملکرد روش غیرمستقیم عمق فرسایشی بستر پایاب سرریز، در دو شیب ۱۸ و ۲۸ درجه پلکانهایی با کف پله افقی و خیزهای ۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتر



شکل ۱۰- ارتباط بین عمق گودال شنی h_s با توان جریان تلف شده در گودال فرسایشی P_{Δ}



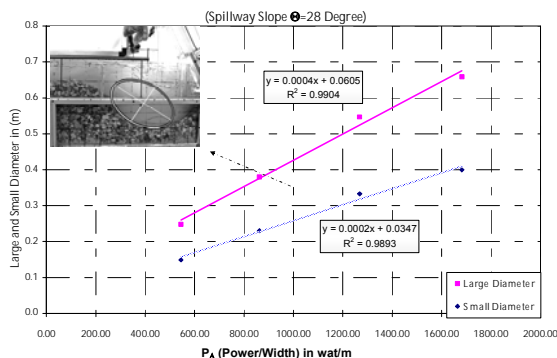
الف)



ب)

شکل ۱۱- نمودارهای مقایسه افت انرژی سرریز پلکانی با ارتفاع پله‌های ۵ سانتیمتری حاصل از مطالعات حاضر با روابط ارائه شده از سوی محققان مختلف جهت الف) شیب ۲۸ درجه

و ب) شیب ۱۸/۸ درجه



شکل ۱۲- ارتباط قطرهای بزرگ و کوچک چرخابه بیضوی (چرخابه داخل گودال فرسایشی) با توان مستهلک شده درون گودال آب شستگی

طی بررسی مقایسه نحوه هیدرولیکی الگوهای مختلف عملکرد مدل‌های ۴، ۵ و ۶ نسبت به مدل‌های ۱، ۲ و ۳ از نظر حفظ و پایدار سازی چرخابه حوضچه‌ای و جلوگیری از جدایی جریان به مراتب بهتر بوده است. این مهم در پیامد عمود سازی شیب معکوس پایین دست حوضچه به شیب عمومی سرریز پلکانی مرکب و استفاده از پروفیل اوجی بر روی پشته پلکانی پایین دست هر حوضچه همچنین ارتفاع مناسب پشته‌ها به منظور ایجاد جریان بحرانی بر روی تاج

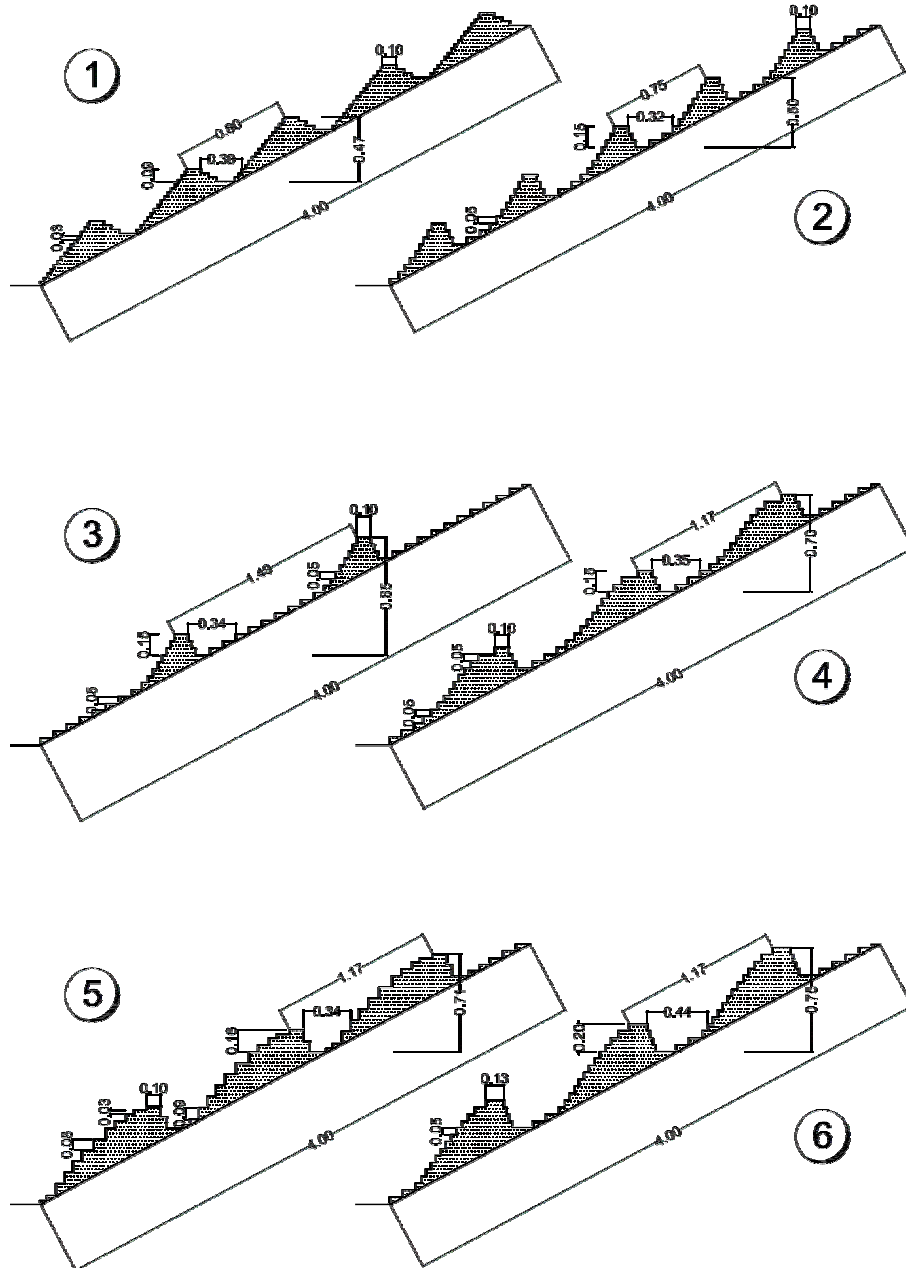
جهت دیبهای ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر در ثانیه در کانال شیشه‌ای به عرض ۲۰ سانتیمتر و طول ۴ متر مورد ارزیابی قرار گرفت. در این خصوص با توجه به روابط ارائه شده توسط دیگر محققان این رشته نظیر Chanson (2000)، Boes and Hager (2003b)، Pegram et al. (1999) و Valentine et al. (2004) میزان استهلاك انرژی بر روی سرریز پلکانی جهت خیزهای مختلف در دو شیب مربوطه برای دیبهای مختلف محاسبه و در مقابل میزان استهلاك انرژی بدست آمده از آزمایش در شکل ۱۱ جهت مقایسه، ترسیم گردیده است. مشاهده می‌شود که این روش اندازه‌گیری در عین سادگی در صورت رعایت پایداری و به تعادل رسیدن گودال فرسایش نتایج قابل قبول و نزدیک به نتایج حاصل از کار محققانی (بویژه Boes and Hager, 2003b) که از روش اندازه‌گیری غلظت هوا در جریان بهره برده‌اند، بدست می‌دهد. در قسمت سوم، مبنای طرح مدل‌ها همانا تقسیم یا شکست کل توان موجود جریان بالادست سرریز به چند قسمت در طول سرریز و تعبیه حوضچه‌ها در طول مسیر جهت استهلاك متمرکز توان به کمک چرخابه‌های بزرگ با الهام از حوضچه‌های موجود در مسیر طبیعی رودخانه‌های کوهستانی پله-حوضچه‌ای می‌باشد.

به عبارت دیگر یک حوضچه آرامش متمرکز بزرگ در پایین دست سرریز به یک سری حوضچه کوچکتر با فضای به مراتب کوچکتر که قابلیت جانمایی در طول شیب سرریز را داشته باشند، شکسته می‌شود. البته نحوه عملکرد استهلاك انرژی این حوضچه‌های کوچکتر به جای یک پرش هیدرولیکی با طول قابل ملاحظه در افق به صورت چرخابه بزرگ حوضچه‌ای (Pool Vortex) در حداقل فضا می‌باشد. معماری هیدرولیکی این حوضچه‌ها با توجه به ارتباط اندازه چرخابه بزرگ و توان تلفاتی (شبهه ارتباط بین اندازه قطر توربین با توان اسمی کارکرد) که براساس اندازه‌گیری ابعاد چرخابه تعادلی در گودال فرسایشی بدست آمده، پایه ریزی شده است. در شکل ۱۲ نمونه‌ای از ارتباط اندازه قطر بزرگ چرخابه بیضوی با توان مصرفی آن مشاهده می‌شود این ارتباط بر اساس آزمایشهای متعدد انجام گرفته در مرحله اول حاصل گردیده است.

در مرحله نهایی آزمایش در دو شیب ۱۸/۸ و ۲۸ درجه و برای هر شیب شش الگوی متفاوت فرم پلکانی پله-حوضچه‌ای تحت دیبهای مختلف ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر در ثانیه (جمعاً ۷۲ حالت)، میزان استهلاك انرژی سرریز پلکانی مرکب مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفت. شکل ۱۳ مدل‌های مختلف بکار رفته آزمایشگاهی در شیب ۲۸ درجه را به عنوان نمونه ارائه می‌کند.

معمولی با خیز پله ۳، ۵، ۸ و حتی ۱۲ سانتیمتری (شکل ۱۵) مشاهده می‌شود. راندمان استهلاک انرژی سرریز پلکانی مرکب در دبیهای بالا (که عملکرد سرریز پلکانی معمولی به صورت سرسره غلطی می‌باشد) حتی تا ۳۰ درصد بیشتر است که این نتیجه موید پیش بینی اولیه طرح و تاثیر بسیار زیاد اصطکاک ناشی از زبری پله- حوضچه‌ای در استهلاک انرژی می‌باشد.

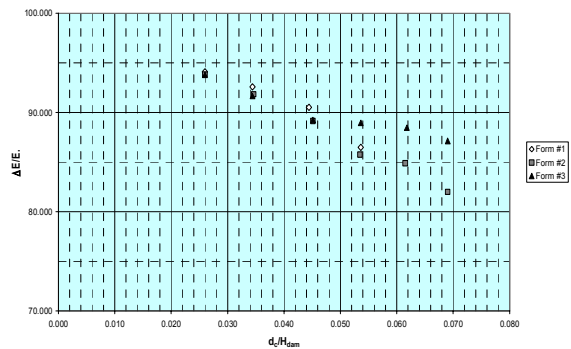
پشته در مدل‌های ۴، ۵ و ۶ میسر گردیده است. به تبع پایداری بیشتر چرخابه حوضچه‌ای، راندمان استهلاک انرژی در مجموعه مدل‌های ۴، ۵ و ۶ نسبت به مدل‌های ۱، ۲ و ۳ بیشتر بوده است. در شکل ۱۴ نتایج راندمان استهلاک نسبی انرژی سرریز پلکانی مدل‌های ششگانه نسبت به یکدیگر برحسب نسبت بدون بعد $\frac{d_c}{H_{dam}}$ ارائه شده است. در یک مقایسه کلی میزان استهلاک انرژی الگوی ۶ سرریز پلکانی مرکب با پلکانهایی با خیز ۵ سانتیمتری در قیاس با سرریزهای پلکانی



شکل ۱۳ - مدل‌های شش گانه مختلف سرریز پلکانی مرکب مورد آزمایش در شیب ۲۸ درجه (ابعاد به متر است)

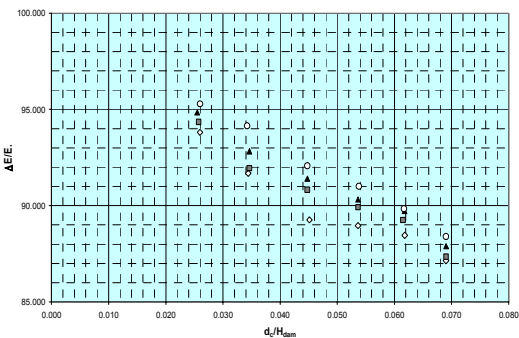
(الف)

کار محققانی که از طریق اندازه گیری غلظت هوا، انرژی پایین دست سرریز را اندازه گرفته‌اند، به عنوان یک روش جدید ساده و قابل استناد اندازه گیری انرژی جریانهای دوفازی روباز قابل کاربرد است. همچنین این روش اندازه گیری با توجه به مستقل بودن نسبت به حالت‌های سه گانه جریان بر روی سرریز پلکانی، قادر به تعیین انرژی باقیمانده در پایین دست سرریز جهت کلیه حالت‌های جریان ریزشی می‌باشد. در راستای ارزیابی روند گودال آب شستگی پایین دست سرریز و ارتباط با مشخصه‌های جریان ورودی، ارتباط بسیار خوب و مناسبی بین عمق گودال فرسایشی و توان جت آب ورودی وجود دارد.



(ب)

مجموعه نتایج آزمایشگاهی بررسی مدل سرریز پلکانی مرکب نشانگر تایید بهتر بودن الگوی پله- حوضچه‌ای رودخانه‌های کوهستانی نسبت به سرریز پلکانی معمول می‌باشد. در حقیقت با تمهید فرم پله- حوضچه‌ای در داخل هندسه پلکان، پدیده چرخابه حوضچه‌ای^{۳۴} به عنوان عامل قدرتمند مستهلک کننده انرژی به مجموعه اجزاء موثر در زبری فرم بستر اضافه می‌گردد. که علاوه بر ایجاد پایداری بیشتر در عملکرد هیدرولیکی سرریز در مقابل طیف جریانهای ریزشی محدوده طرح، راندمان استهلاک انرژی نسبی را به میزان قابل ملاحظه‌ای (تا حدود ۳۰ درصد) افزایش دهد.



شکل ۱۴- استهلاک انرژی نسبی سرریز پلکانی مرکب در

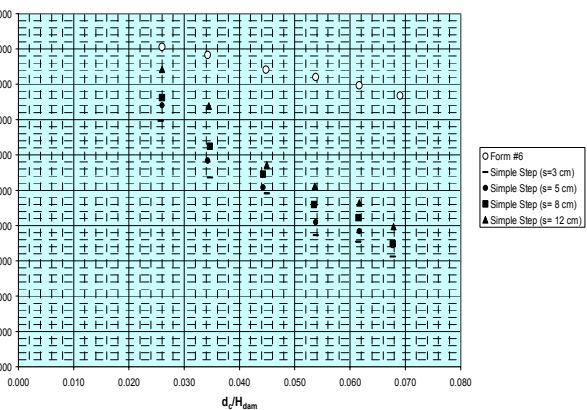
شیب ۲۸ درجه بر حسب نسبت بدون بعد $\frac{d_c}{H_{dam}}$ (الف)

الگوهای ۱، ۲ و ۳ (ب) الگوهای ۳، ۴، ۵ و ۶

در خاتمه علی‌رغم حجم قابل ملاحظه آزمایشهای انجام گرفته به منظور شناخت کاملتر و به کمیت کشاندن معماری سرریز پلکانی با فرم پله- حوضچه‌ای و تدوین مبانی طراحی نیاز به آزمایشهای بیشتری می‌باشد. که در برنامه آتی این تحقیق می‌باشد و اما نتیجه‌گیری اصلی این تحقیق اثبات قابلیت بالاتر سرریز پلکانی مرکب در استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی معمولی بوده است که می‌توان به عنوان گام اول تحقیق در شاخه جدیدی از مجموعه سرریزهای پلکانی مطرح کرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Roller compacted Concrete
- 2- Form roughness
- 3- Skin friction
- 4- Step- pool in high- gradient mountain stream
- 5- Form drag
- 6- Nappe flow
- 7- Transition flow
- 8- Skimming flow
- 9- Boulder
- 10- Cluster
- 11- Armoring
- 12- Form roughness



شکل ۱۵- استهلاک انرژی نسبی $(\Delta E/E)$ سرریز پلکانی

مرکب در مقایسه با سرریز پلکانی معمولی با ارتفاع پله‌های

۳، ۵، ۸ و ۱۲ سانتیمتر بر حسب نسبت بدون بعد $\frac{d_c}{H_{dam}}$

۶- نتیجه گیری

براساس تحقیق حاضر، روش جدید اندازه گیری عمق فرسایشی گودال پایین دست، با توجه به نزدیکی بسیار خوب و معنی‌دار با نتایج

- Chin, A. (2003), "The Geomorphic Significance of Step-Pools in Mountain Streams". *Geomorphology* 55. pp. 205, 217.
- Church, M. and Zimmermann, A. (2007), "Form and Stability of Step-Pool Channels: Research Progress." *Water Resources Research*, Vol. 43, W03415, doi: 10.1029/2006 WR005037, pp.37-47
- Comiti, F., Andreoli, A. and Lenzi, M.A. (2005), "Morphological Effects of Local Scouring in Step-Pool Stream." *Earth Surt. Process Landforms* 30, pp.1567-1581.
- Frizell, K. H. (2006), "Research state-of-the-art and needs for hydraulic design of stepped spillways", U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, HL-2005-06, 65P
- Gonzales, C.A. and Chanson, H. (2005), "Experimental study of turbulence manipulation in stepped spillways". "Implications on flow resistance in skimming flows". *Proceedings of the 31st IAHR Congress, Seoul, Korea*, September 11-16, pp. 152-467
- Lenzi, M.A. (2001), "Step-Pool Evolution in the Rio Cordon, Northeastern Italy." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.26, pp. 999-1008.
- Maxwell, A.R. and Papanicolaou, A.N. (2001), "Step-pool Morphology in High Gradient Streams." *International Journal of Sediment Research*, Vol.16, No.3, pp. 380-390.
- Minor, H. E. and Hager, W. H. (2000), "Hydraulics of Stepped Spillways". *Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, Zurich, Switzerland.
- Montgomery, D. R. and Buffington, J. M. (1997), "Channel-Reach Morphology in Mountain Drainage Basin." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 109, No. 5, pp. 596-611.
- Ohtsu, I. Yasuda, Y., and Takahashi, M. (2004), "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.130, No.9, pp.860-869.
- Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1997), "Characteristics of flow conditions on stepped channels". *Proc. 27th IAHR Congress*, Theme D, San Francisco, USA, pp. 583-588
- Pegram, G., Officer, A., and Mottram, S. (1999), "Hydraulics of skimming flow on modelled stepped spillways". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(4), pp. 361-368.
- Pinheiro, A.N. and Fael, C.S., (2000), "Nappe flow in stepped channels – occurrence and energy dissipation," *Proc. Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, VAW,ETH Zurich, Minor, H.E.,
- 13- Step- pool
14- Standing wave
15- Surface wave
16- Dune and antidune
17- Pool Vortex
۱۸- از حدود ۷۰ درصد عمق به سطح، جریان آب به صورت قطرات مجزا از یکدیگر با سرعت‌های مختلف در جهتهای مختلف و عمدتاً در مسیر اصلی جریان حرکت می‌کنند.
- 19- Magnetic Flow Meter
20- Digital Vernier Depth Gage
21- Power
22- Calibration
23- Chute spillway
24- Pool vortex

۷- مراجع

- Abraham, D.A., Li, G., and Atkinson, J.F. (1995), "Step-pool Streams: Adjustment to Maximum Flow Resistance". *Water Resources Research*, 31(10), pp.2593-2602
- Boes, R.M. and Hager, W. H., (2003a), "Two-phase flow characteristics of stepped spillways," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, pp. 661-670.
- Boes, R.M. and Minor, H.E., (2002), "Hydraulic design of stepped spillways for rcc dams". *Hydropower Dams*, 9(33), pp. 87-91.
- Boes, R.M. and Hager, W.H., (2003b), "Hydraulic design of stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129(9), pp. 671-679.
- Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., (1994), "Jet flow on stepped spillways". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120(2), pp. 273-283.
- Chanson, H. (1994), "Hydraulics of Nappe Flow Regime above Stepped Chutes and Spillways". *Aust. Civil Engrg. Trans., I. E. Aus, Vol. CE36. No. 1 Jan.* pp. 69-76.
- Chanson, H. (1996), "Prediction of the Transition Nappe/Skimming Flow on a Stepped Channel". *Journal of Hydraulic Research. IAHR*, Vol. 34. pp. 320-333
- Chanson, H. (2002), "The hydraulics of stepped chutes and spillways". *Balkemaed., ISBN 90 5809 352 2.*
- Chanson, H., and Gonzalez, C. A. (2004), "Stepped spillways for embankment dams, review, progress and development in overflow hydraulics." *International conference on Hydraulic of Dams and River Structures*, Tehran, Iran, F. Yazdandoost and J. Attari Eds., Balkema, pp. 287-294.
- Chin, A. (1998), "The Morphologic Structure of Step-Pools in Mountain Streams." *Geomorphology* 27, pp. 191-204.

- Wilcox, A.C., Nelson, J.M. and Wohl, E.E. (2006), "Flow Resistance Dynamics in Step- Pool Channels: 2. Partitioning Between Grain, Spill, and Woody Debris Resistance." *Water Resources Research*, Vol. 42, W05419, doi: 10.1029/2005 WR 004278, pp. 402-430
- Zimmermann, A. and Church, M. (2001), "Channel Morphology, Gradient Profiles and Bed Stresses during Flood in a Step- Pool Channel." *Geomorphology* 40, pp.311-327.
- and Hager, W.H., (eds.). Balkema, Rotterdam, pp. 119-126.
- Valentine, G., Volkart, P.U. and Minor, H.E. (2004), "Energy dissipation along stepped spillways". *International conference on Hydraulic of Dams and River Structures*, Tehran, Iran, F. Yazdandoost and J. Attari Eds., Balkema, pp. 359-370.
- Whittaker, J.G. and Jaeggi, M.N.R. (1982), "Origin of step-pool systems in mountain streams, *J. Hydraulic Division ASCE*, Vol 108, pp. 758-773

تاریخ دریافت مقاله: ۲۵ بهمن ۱۳۸۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۹ شهریور ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۲ آبان ۱۳۸۶