



اثر شیب در استهلاک انرژی جریان از روی سرریز پلکانی

فرزین سلماسی^{۱*}، هادی ارونقی^۲

^۱دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز
^۲استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از سرریزهای پلکانی به دلیل تاثیر قابل ملاحظه پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان رواج بیشتری یافته و توجه روزافزونی به آن می‌شود. در این تحقیق برای بررسی اثر شیب سرریز در استهلاک انرژی، آزمایشاتی بر روی ۱۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های ۴۵، ۲۵، ۱۵ درجه و تعداد پله‌های ۵، ۱۰، ۱۵ انجام گرفت. نوع تاج سرریزها از منحنی استاندارد اوجی است و پلکان‌ها با شیب ثابت تا پنجه پایین دست سرریز ادامه دارند. هدف از این تحقیق بررسی استهلاک انرژی در واحد طول سرریزهای پلکانی و اثر شیب سرریز بر روی استهلاک انرژی است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به ازای تعداد پله‌های برابر، ضمن افزایش شیب، ارتفاع سرریز بر استهلاک انرژی در واحد طول سرریز پلکانی نیز افزوده می‌شود. آنالیز رگرسیون چند متغیره نشان داد که از بین پارامترهای بی بعد موجود، شیب سرریز و عدد رینولدز در تخمین استهلاک انرژی جریان مهم‌تر از بقیه می‌باشند. در این تحقیق همچنین معادلاتی جهت تعیین استهلاک انرژی با کاربرد پارامترهای بی بعد گوناگون ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: استهلاک انرژی، سرریز پلکانی، شیب سرریز، رگرسیون چند متغیره.

۱- مقدمه

می‌باشد. میزان افت انرژی قابل ملاحظه باعث می‌شود تا عمق حفاری حوضچه آرامش پایین دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن کاهش بیابد و سبب صرفه‌جویی اقتصادی در اجرای سد بشود. اکثر محققان به دو نوع رژیم جریان متفاوت به نام‌های ریزشی و غیر ریزشی اشاره نموده‌اند. نوع اول در دبی‌های جریان کم و ارتفاع پلکان‌های بزرگ اتفاق می‌افتد و نوع دوم

سرریزهای پلکانی از زمان‌های بسیار قدیم (حدود ۳۵۰۰ سال پیش) مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند ولی تاکنون، برخی از جنبه‌های هیدرولیکی مربوط به آنها ناشناخته باقی مانده است [۴]. در دهه‌های اخیر با استفاده از تکنولوژی جدید، ساخت سدها با کاربرد مصالح بتن غلطکی توسعه یافته و توجه به این سرریز را بیشتر کرده است. تحقیقات نشان می‌دهند که مقدار استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بیشتر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۴۱۱۳۳۹۲۷۸۶

آدرس پست الکترونیک: Salmasi@Tabrizu.ac.ir

تئوری توسط راجاراتنام^۶ [۱۴] که این میزان را ۸۹ درصد اعلام کرده بود، تناقض دارد [۱۲].

رایس و کاداوی^۷ [۱۵] مدلی از سرریز پلکانی سد سالادو کریک^۸ در ایالت تگزاس آمریکا ساختند. ارتفاع مدل ۸۵/۳۵ سانتیمتر، شیب آن ۲۱/۸ درجه و تعداد پله های آن ۲۷ عدد بود. جهت مقایسه مدلی نیز از سرریز صاف با همان ارتفاع ساخته شد. شیب سرریز پلکانی بسیار ملایم تر از شیب سرریز ساخته شده توسط کریستودولو^۹ [۷] با شیب ۵۵ درجه بود. به نظر رایس و کاداوی [۱۵] افت انرژی می بایست در شیب های تند بیشتر از شیب های ملایم باشد. ولی نتایج آزمایش ها نشان می داد که میزان استهلاک انرژی در آزمایش های ایشان و کریستودولو [۷] تطابق بسیار خوبی را نشان می دهند. به عقیده رایس و کاداوی [۱۵] در صورت مقایسه افت انرژی نسبی در واحد طول سرریز در راستای جریان، میزان افت انرژی نسبی در سرریزهای با شیب تند بیشتر از سرریزهای با شیب ملایم خواهد شد.

چمنی^{۱۰} و راجاراتنام [۳] آزمایش هایی بر روی سرریز پلکانی با شیب ۵۹ درجه انجام دادند. با اندازه گیری غلظت حباب های هوای وارد شده به داخل جریان و تاثیر آن در افزایش عمق جریان، محققان مذکور عمق آب خالص (بدون هوا) را محاسبه و سپس با کاربرد آن، مقدار افت انرژی نسبی را تعیین نمودند. نتایج آزمایش ها نشان می داد که میزان افت انرژی نسبی در رژیم جریان غیرریزشی بین ۴۸ تا ۶۳ درصد تغییر می نماید.

فلدر^{۱۱} و چانسون [۹] آزمایش هایی روی مدل فیزیکی سرریز پله ای به ارتفاع یک متر و شیب ۲۶/۶ درجه انجام دادند. ۵ حالت مختلف برای پله ها در نظر گرفته شد و میزان انرژی باقی مانده در پایین دست سرریز اندازه گیری گردید. گرچه نتایج نشان می داد که تعداد پله اثر زیادی در انرژی باقیمانده پایین دست سرریز ندارد، لیکن سرریز دارای ۱۰ پله در حالی که هر کدام از پله ها ۱۰ سانتی متر ارتفاع داشته باشد، انرژی باقی مانده کمتری در پایین دست دارد و همین امر نشان دهنده ی استهلاک انرژی بیشتری در این سرریز

در سرریزهای با دبی زیاد و ارتفاع پلکان های کم رخ می دهد [۵ و ۸]. احتمالاً اسری و هورنر^۱ [۸] و سورنسن^۲ [۱۶] جزو اولین پژوهشگرانی بودند که جریان از روی سرریزهای پلکانی را به دو نوع رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی تقسیم بندی نمودند.

براساس نتایج آزمایش های انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی می توان گفت که تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیر ریزشی تقریباً در $y_c/h = 0/8$ اتفاق می افتد [۵]، که در آن y_c عمق بحرانی بر روی سرریز (نماینده دبی جریان) و h ارتفاع عمودی هر یک از پلکان ها می باشد. در تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیر ریزشی علاوه بر پارامتر بی بعد y_c/h ، شیب سرریز نیز موثر است. نتایج بررسی ها نشان می دهد که برای وقوع رژیم جریان غیرریزشی، می بایست دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر گردد. این مشخصه برای شروع رژیم غیر ریزشی به صورت رابطه زیر ارائه گردید [۶]:

$$(y_c)_{onset} / h = 1.057 - 0.465 (h/l) \quad (1)$$

در رابطه (۱) l طول افقی هر یک از پلکان ها است. بسیاری از محققین بر این عقیده اند که استهلاک انرژی در رژیم جریان ریزشی بیشتر از رژیم جریان غیرریزشی است [۳]، [۱۱] و [۱۳]. ولی به عقیده چانسون^۳ در سرریزهای پلکانی طولانی که در آنها جریان توسعه یافته اتفاق می افتد، افت انرژی جریان با رژیم غیرریزشی بیشتر از رژیم ریزشی خواهد بود [۵ و ۴]. در پاسخ به این نظر، ماتوس و کینتلا^۴ خطای حاصل از ورود هوا در مجرای سرریز را در هنگام اندازه گیری عمق جریان مطرح ساختند و اظهارات چانسون [۶] را سوال انگیز تلقی نمودند. ایشان استفاده از عمق آب هوادهی شده جهت محاسبه افت انرژی را صحیح ندانستند و اظهار داشتند که به سبب کاربرد عمق آب هوادهی شده به جای عمق آب خالص، مقدار استهلاک انرژی جریان بیش از واقعیت تخمین زده شده است [۱۱]. تعیین مقدار افت انرژی توسط روش غیرمستقیم با استفاده از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی نیز به کار گرفته شده است [۱۲ و ۱۷]. نتایج آزمایش های پگرام^۵ و همکاران نشان می داد که میزان استهلاک انرژی با تخمین

⁶ Rajaratnam

⁷ Rice and Kadavy

⁸ Salado Creek

⁹ Christodoulou

¹⁰ Chamani

¹¹ Felder

¹ Essery and Horner

² Sorensen

³ Chanson

⁴ Matos and Quintela

⁵ Pegram

سرریزهای با شیب ۴۵ درجه بزرگ مقیاس دارای عرض ۵۰ سانتی متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر بودند. سرریزهای با شیب ۲۵ و ۱۵ درجه کوچک مقیاس دارای عرض ۲۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۲ سانتی متر بودند. در جدول (۱) به برخی از مشخصات مدل فیزیکی سرریزهای ساخته شده اشاره شده است.

جریان آب توسط مخزنی با ارتفاع ثابت ۴/۵ متری توسط شیر کنترل وارد فلومها می شد و پس از عبور از روی تاج سرریز و برخورد به پلکانها، به پایین دست انتقال می یافت. جهت کنترل عمق آب پایین دست و محل تشکیل پرش هیدرولیکی، از دریچه کشویی قائم در انتهای فلومها استفاده گردید. عمق آب قبل و بعد از پرش هیدرولیکی توسط شاخص مدرج مجهز به ورنیه با دقت ۰/۱ میلی متر در سه نقطه در عرض فلوم اندازه گیری می شد. اندازه گیری دبی جریان با سرریز مثلثی ۵۳ درجه (کالیبره شده) انجام می گرفت. در مقطع عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی، هوای زیادی وارد جریان می گردید (به خصوص در دبی های بالا) و بنابراین در این مقطع، عمق جریان دو فازی (مخلوط آب و هوا) توسط شاخص مدرج اندازه گیری می شد.

است. برای ۵ حالت، ضریب زبری دارسی ویسیاخ از ۰/۱۲ تا ۰/۳۷ تغییر می کرد که با کار قبلی فلدرو و چانسون [۹] که در آن ضریب زبری دارسی ویسیاخ از ۰/۱ تا ۰/۳۵ تغییر داشت، هماهنگ بود.

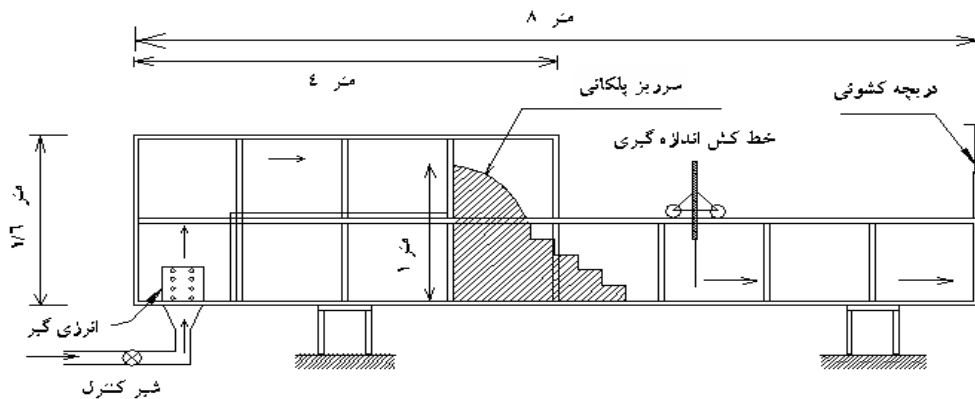
شجاع و همکاران [۲] با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به تعیین ابعاد بهینه سرریز سد مخزنی ساروق واقع در استان آذربایجان غربی نمودند. نتایج بهینه سازی نشان داد که سرریز پلکانی جایگزین شده به جای سرریز صاف، منجر به افزایش استهلاک انرژی، حذف و یا کاهش ابعاد مستهلک کننده انرژی در پایین دست سرریز پلکانی گردیده است. سلماسی [۱] با تجزیه و تحلیل داده های حاصل از تعداد زیادی آزمایش نشان داد که استهلاک انرژی در سرریزهای پله ای متاثر از تعداد پله بوده و به ازای تعداد پله مشخص، می توان به حداکثر استهلاک انرژی دست یافت.

۲- مواد و روشها

این تحقیق در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی انجام پذیرفت. تعداد ۱۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب های ۴۵، ۲۵، ۱۵ درجه و تعداد پله های ۵، ۱۰، ۱۵ ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات عمومی مدل فیزیکی سرریزهای پلکانی ساخته شده

عرض فلوم (سانتی متر)	تعداد آزمایشات	تعداد پله ها	ارتفاع کل سرریز پلکانی (سانتی متر)	شیب سرریز پلکانی (درجه)
۵۰	۹۳	۵-۱۰-۱۵-۲۰-۳۵-۵۰	۱۰۰	۴۵
۲۵	۲۲	۵-۱۰-۱۵	۳۲	۲۵
۲۵	۴۵	۵-۱۰-۱۵	۳۲	۱۵



شکل ۱- مقطع طولی فلوم، سرریز پلکانی و سیستم کنترل جریان در فلوم به عرض ۵۰ سانتی متر

۳- آنالیز ابعادی

هدف از روش آنالیز ابعادی، پیدا نمودن رابطه‌های بین کمیت‌های فیزیکی در یک پدیده طبیعی است. با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان در بسیاری از حالات، رابطه‌های پیچیده را تجزیه و تحلیل کرد و بین متغیرهای مختلف آن پدیده روابط صحیحی ایجاد نمود. رابطه به دست آمده از آن‌ها معمولاً ساده‌تر و منطبق با شرایط فیزیکی می‌باشد. پارامترهای مهم و موثر بر جریان از روی سرریزهای پلکانی به شرح زیر می‌باشند:

- الف- خصوصیات مربوط به سیال شامل: جرم واحد حجم مایع (ρ) ، لزجت دینامیکی (μ) و شتاب ثقل (g)
- ب- خصوصیات مربوط به جریان شامل: عمق جریان (y) و سرعت جریان (V)
- ج- خصوصیات هندسی سرریز شامل: تعداد پله‌ها (N) ، ارتفاع پله (h) ، طول افقی (l) هر پله و ارتفاع کل سرریز (H_{dam}) .
- پارامترهای ذکر شده در فوق را می‌توان در رابطه (۶) خلاصه نمود:

$$f(H_{dam}, h, l, N, g, y, \rho, \mu, V) = 0 \quad (6)$$

برای تبدیل متغیرهای رابطه (۶) به پارامترهای بی بعد، سه متغیر تکراری ρ, V, y را انتخاب می‌کنیم. سه متغیر مذکور مجموعاً ابعاد M, L, T را شامل می‌شوند. بعد از بدست آوردن پارامترهای بی بعد، نهایتاً معادله (۶) به صورت معادله (۷) تغییر خواهد کرد:

$$\Delta H / H_t = f_1(y_c / H_{dam}, q^2 / gH_{dam}^3, h / l, F_r, R_n, N) \quad (7)$$

دامنه تغییرات متغیرها به شرح زیر می‌باشند:
دبی کل از ۰/۷۵ تا ۵۴/۱۵ لیتر در ثانیه، عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی از ۱/۶ تا ۶/۴ سانتی متر، عمق آب بعد از پرش هیدرولیکی از ۴/۷ تا ۲۴/۹ سانتی متر، سرعت جریان آب قبل از پرش هیدرولیکی از ۱/۲ تا ۳/۱۴ متر در ثانیه، عدد فرود از ۳/۷۵ تا ۷/۴، عدد رینولدز از ۳۱۴۳ تا ۱۰۵۹۸۰، تعداد پله از ۵ تا ۵۰ و ارتفاع سرریزها از ۳۲ تا ۱۰۰ سانتی متر.

اندازه‌گیری عمق آب بعد از پرش هیدرولیکی در محلی که حباب‌های هوای اندکی در جریان آب وجود داشت، انجام می‌گرفت.

در این آزمایش‌ها همچنین عمق‌های قبل و بعد از پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری گردید. ولی برای محاسبه افت انرژی نسبی، از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی استفاده گردید که دلیل آن وجود حباب‌های هوای کمتر در این مقطع نسبت به مقطع عمق قبل از پرش هیدرولیکی و خطای کمتر در محاسبات بود [۱]. مقدار انرژی در بالادست تاج سرریز، H_t ، به صورت زیر محاسبه گردید:

$$H_t = H_{dam} + 3/2 y_c \quad (2)$$

در رابطه ۲، H_{dam} برابر رقوم تاج سرریز می‌باشد که با توجه به اندازه دقیق مدل پس از ساخته شدن در فرمول قرار داده شده است. مقدار آن به طور متوسط یک متر برای سرریز به عرض ۵۰ سانتی متر و ۳۲ سانتی متر برای سرریز به عرض ۲۵ سانتی متر است. همچنین y_c نشان‌دهنده عمق بحرانی بر روی سرریز می‌باشد که از رابطه $y_c = (q^2/g)^{1/3}$ به دست آمده است و در آن q دبی در واحد عرض سرریز (متر مربع بر ثانیه) و g شتاب ثقل زمین و برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه است. برای محاسبه انرژی در پایین دست سرریز و قبل از پرش هیدرولیکی، با استفاده از عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی، به روش زیر عمل شده است [۱۲]:

$$H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (3)$$

$$y_1 = \frac{1}{2} y_2 \left(\sqrt{1 + 8(y_c / y_2)^3} - 1 \right) \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴، y_1 و y_2 به ترتیب عمق‌های اندازه‌گیری شده قبل و بعد از پرش هیدرولیکی می‌باشند. همچنین لازم به توضیح است که y_1 و y_2 به ترتیب نمایانگر اعماق "مخلوط آب - هوا" و "آب" می‌باشند. مقدار استهلاک انرژی نسبی به صورت معادله (۵) تعریف شده است:

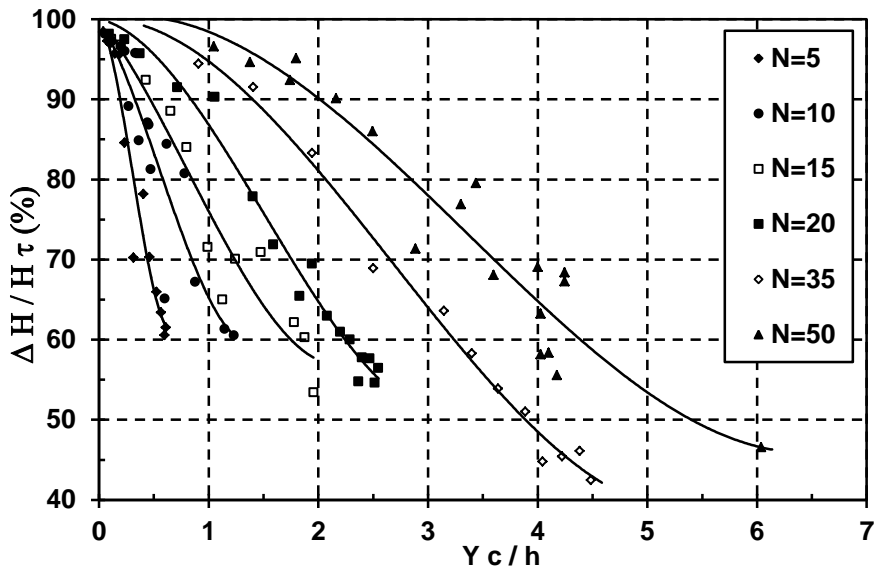
$$\Delta H / H_t = (H_t - H_1) / H_t \quad (5)$$

در رابطه (۵) H_t انرژی در پایین دست سرریز و قبل از پرش هیدرولیکی، با استفاده از رابطه ۳ و H_t انرژی کل در بالادست سرریز، با استفاده از رابطه ۲ هستند و بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

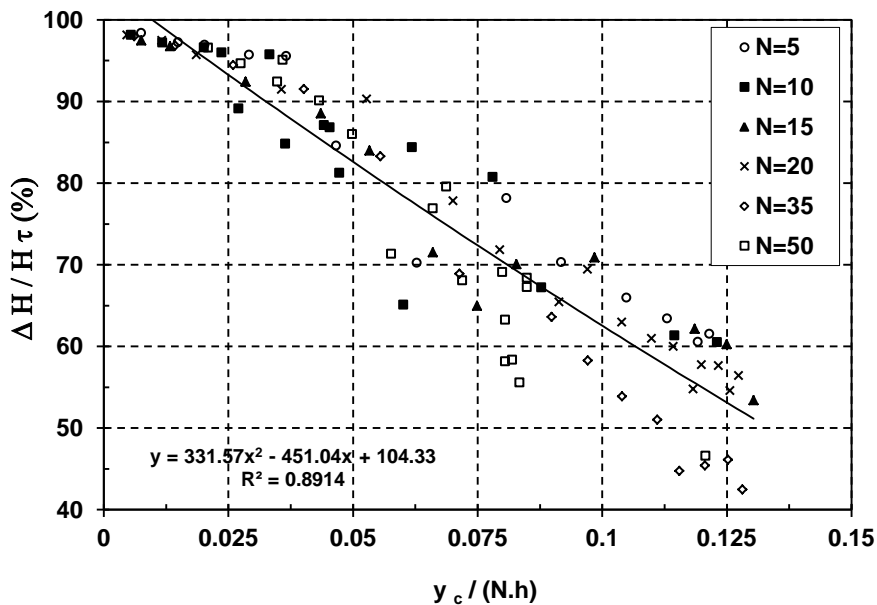
۴- نتایج و بحث

نتایج و بحث در سه بخش: الف- استهلاک انرژی نسبی ب- اثر شیب در استهلاک انرژی. ج- مقایسه استهلاک انرژی نسبی این تحقیق با سایرین و د- تحلیل آماری مدل‌های خطی و غیر خطی چند متغیره برای سرریزهای پلکانی با شیب‌های متفاوت ۴۵، ۲۵، ۱۵ درجه به شرح زیر ارائه می‌گردد:

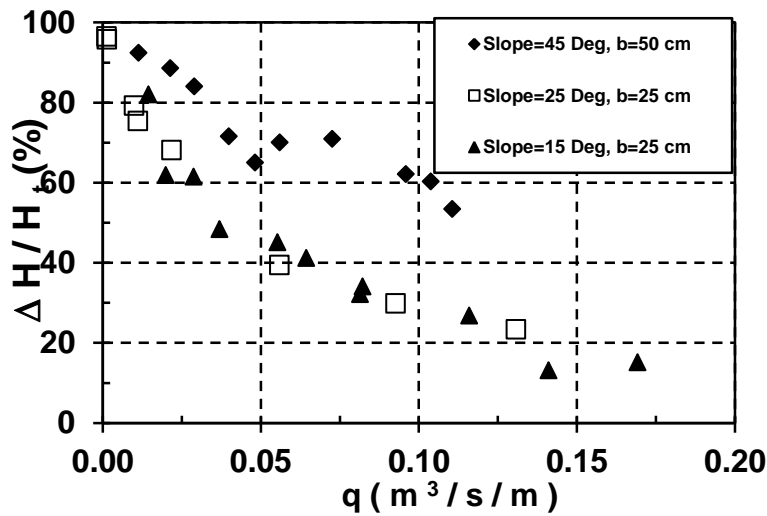
الف- شکل ۲ نمایانگر نتایج استهلاک انرژی نسبی در سرریزهای پلکانی ۵ تا ۵۰ پله با شیب ۴۵ درجه می‌باشد. محور افقی و عمودی هر دو بی بعد هستند. لازم به ذکر است که جهت رعایت اختصار سایر شکل‌ها برای شیب‌های ۲۵ و ۱۵ درجه در این قسمت ارائه نشده است.



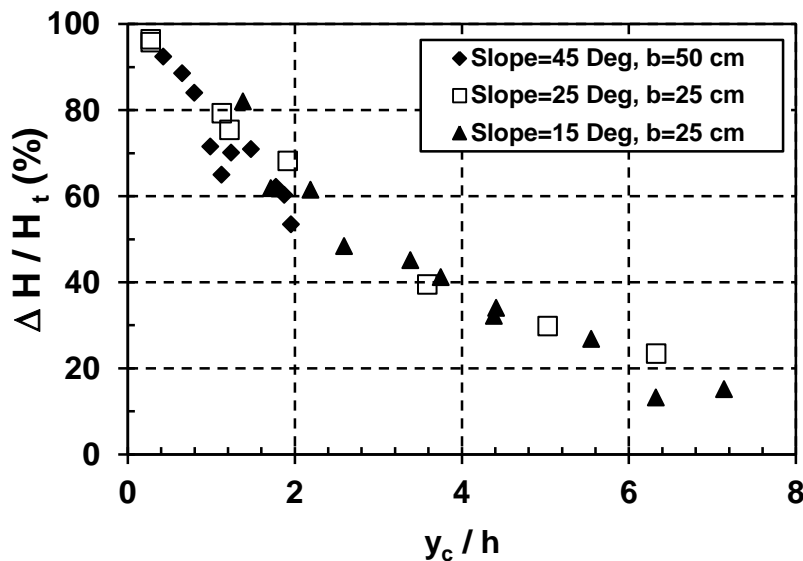
شکل ۲- استهلاک انرژی نسبی در سرریز پلکانی ۵ تا ۵۰ پله به تفکیک با شیب ۴۵ درجه



شکل ۳- استهلاک انرژی نسبی در سرریز پلکانی ۵ تا ۵۰ پله (نرمالیزه شده) با شیب ۴۵ درجه



شکل ۴- اثر شیب در استهلاك انرژی نسبی در سرریز پلکانی ۱۵ پله



شکل ۵- اثر شیب در استهلاك انرژی نسبی در سرریز پلکانی ۱۵ پله (نرمالیز شده)

تعدیل یا نرمالیز کردن عامل بی بعد در محور افقی به صورت (y_c/h) می توان برای تمام نقاط آزمایشی یک خط برازش داد و به عبارت دیگر معادله ای فشرده تر را به دست آورد. ب- در شکل (۴) به وضوح اثر شیب ۴۵ درجه (بیشترین شیب) در افزایش استهلاك انرژی، نسبت به شیب های ۲۵ و ۱۵ درجه مشاهده می گردد. احتمالاً اثر ناشی از شیب تند مربوط به تلاطم ایجاد شده، سرعت جریان بیشتر و همچنین اثر ناقص یا کامل بودن پرش هیدرولیکی بر روی هر پله در

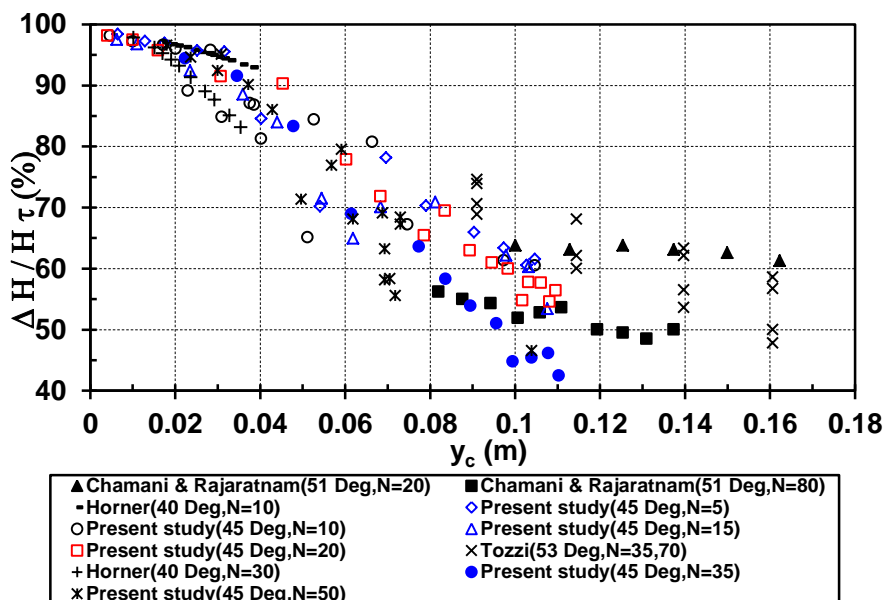
با توجه به شکل ۲ می توان ملاحظه نمود که با افزایش نسبت بی بعد y_c/h استهلاك انرژی نسبی کاهش می یابد. به تعبیر دیگر افزایش دبی، سبب کاهش اثر زبری پله ها در استهلاك انرژی می شود و یا با افزایش تعداد پله ها (کاهش ارتفاع پله ها)، تاثیر پله در مقاومت در برابر جریان کمتر می شود و لذا استهلاك انرژی کاهش می یابد. شکل (۳) حالت دیگری از شکل (۲) را ارائه می دهد که در آن عامل بی بعد در محور افقی تغییر یافته است. نتیجه جالب این است که با

دسترس نبود، در محور افقی شکل (۶) ناچاراً از دبی در واحد عرض استفاده شده است. شیب های منتخب بین ۴۰ تا ۵۱ درجه است که در محدوده شیب های تند قرار دارند. مطابق شکل (۶)، روند تغییرات استهلاک انرژی نسبی در داده هایی که متفاوت گزارش شده، نسبتاً مشابه بوده است و با افزایش دبی، استهلاک انرژی نسبی نیز کاهش می یابد. نتیجه دیگر این که افزایش شیب، باعث افزایش استهلاک انرژی می گردد و علت آن افزایش اندازه حرکت تبدالی بین جریان چرخشی زیر هر پله و جریان رویه ای می باشد. این تبادل اندازه حرکت بین دو جریان با سرعت های متفاوت توسط چانسون و فلدر [۹] نیز بیان گردیده است.

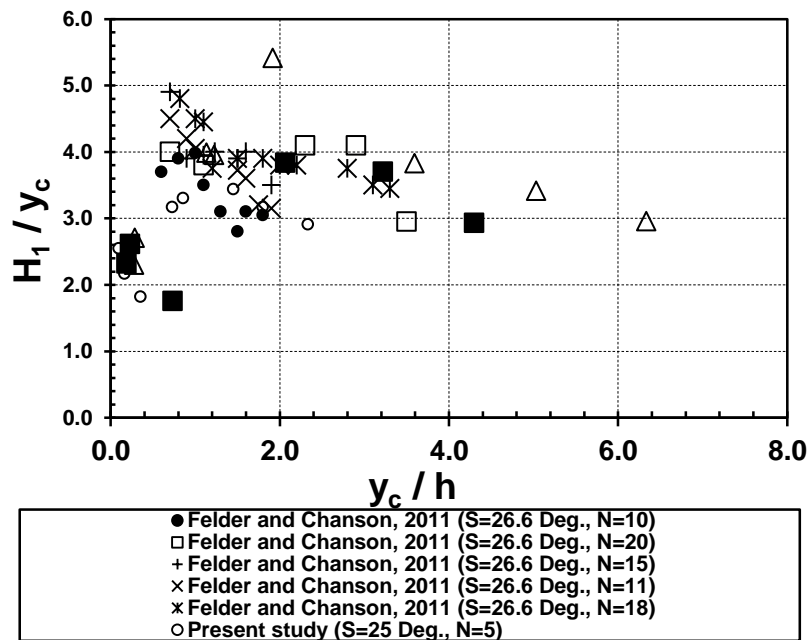
در شکل ۷ نتایج این پژوهش با نتایج آزمایش های چانسون و فلدر [۹] مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به داده های موجود، در محور عمودی از عامل بی بعد H_1/y_c استفاده گردید (امکان مقایسه در شکل ۶ نبود) که در آن H_1 از رابطه (۳) به دست آمده است. H_1/y_c به طور متوسط از ۲/۵ تا ۴/۵ متغیر است و ضمناً با افزایش دبی کاهش می یابد. نکته دیگر این که نتایج این پژوهش تطابق زیادی را با نتایج چانسون و فلدر [۹] نشان می دهد.

حالت رژیم ریزشی) می باشد. داده های آزمایشی نشان می دهند که بین شیب های ۲۵ و ۱۵ درجه اختلاف چشمگیری در استهلاک انرژی نسبی وجود ندارد، هر چند در شیب ۲۵ درجه، این امر کمی بیشتر از شیب ۱۵ درجه است که احتمالاً علت آن کوتاه بودن ارتفاع سرریز است؛ زیرا همانطور که قبلاً اشاره شد، دو مدل سرریز با شیب های ۲۵ و ۱۵ درجه دارای ارتفاع ۳۲ سانتی متر بوده اند و لذا اختلاف طول وجه شیب دار که پله ها روی آن قرار دارند نیز ناچیز بوده است. به نظر می رسد که اثر شیب در ارتفاع های زیاد (مثل مدل به ارتفاع ۱۰۰ سانتی متری) نمایان تر می شود و در این زمینه نیاز به انجام آزمایش های بیشتری احساس می گردد. در شکل (۵) از عامل بی بعد y_c/h استفاده شده و ملاحظه می شود که نقاط آزمایشی در سه شیب به هم نزدیک تر شده و اثر شیب به نوعی در ارتفاع پله ظهور پیدا کرده است. شکل (۵) در واقع نرمالایز شده شکل (۴) است.

ج- در شکل (۶) نتایج استهلاک انرژی نسبی در شیب ۴۵ درجه حاصل از این پژوهش، با نتایج سایر محققین مقایسه گردیده است. چون آزمایش های سایرین در شیب های متفاوت انجام گرفته است، لذا سعی شده تا حد امکان، شیب های تقریباً مشابه در شکل (۶) به مقایسه گذاشته شوند. ضمناً از آنجا که کلیه داده های خام محققین مورد اشاره در



شکل ۶- مقایسه بین استهلاک انرژی نسبی با سایر محققین



شکل ۷- مقایسه بین انرژی در پایین دست سرریز پلکانی با نتایج آزمایشگاهی [۹]

جدول ۲- همبستگی تک پارامتری بین متغیر وابسته $\Delta H / H_t$ و متغیرهای بی بعد

R_n	F_r	$\frac{H_{dam}}{y_c}$	$\frac{q^2}{gH_{dam}^3}$	N	S	r^2	درصد خطای متوسط نسبی
***	---	---	---	---	---	۰/۲۲	۵/۵۲
---	***	---	---	---	---	۰/۱۵	۷/۷۵
---	---	***	---	---	---	۰/۵۳	۴/۴
---	---	---	***	---	---	۰/۴۴	۴/۸
---	---	---	---	***	---	۰/۲۳	۵/۷۳
---	---	---	---	---	***	۰/۸۷	۱/۹۸

*** به معنی حضور پارامتر و --- به معنی عدم حضور پارامتر است.

مطابق جدول ۲ ملاحظه می شود که بزرگترین ضریب رگرسیون، مربوط به حضور پارامتر بی بعد شیب سرریز می باشد. برای رعایت اختصار، از آوردن ترکیبات مختلف رگرسیون بین پارامترهای بی بعد صرف نظر شده و فقط معادلات منتخب از بین آنها به شرح جدول ۳ ارائه می شود.

د- تحلیل آماری مدل های خطی چند متغیره برای شیب های ۴۵،۲۵،۱۵ درجه: در این بخش از تمامی اطلاعات حاصل از آزمایش ها برای شیب های ۴۵،۲۵،۱۵ درجه و تعداد پله های متفاوت ۵ تا ۵۰ عدد در رگرسیون چند متغیره استفاده می گردد. رابطه (۷) به دست آمده از آنالیز ابعادی در نظر گرفته می شود. نتایج رگرسیون خطی چند متغیره توسط نرم افزار SPSS به صورت جدول ۲ می باشد.

جدول ۳- معادلات منتخب ترکیبات مختلف بین پارامترهای بی بعد برای سرریزهای پلکانی با شیب ۴۵،۲۵،۱۵ درجه

معادله رگرسیون	ضریب تبیین R^2	درصد خطای متوسط نسبی
$\frac{\Delta H}{H_t} = -542.62 +$ $656.32 \left(\frac{H_{dam}}{y_c} \right)^{-0.0032} - 0.0012 R_n^{0.895} -$ $0.076 F_r^{2.967} - 2.697 N^{0.178} + 12.32 S$	۰/۹۹۳	۰/۳۰۷
$\frac{\Delta H}{H_t} = 107.190 -$ $6.259 N^{0.098} - 0.00017 R_n^{1.051}$ $- 0.069 F_r^{3.021}$	۰/۹۹۲	۰/۴۵۰
$\frac{\Delta H}{H_t} = 99.061 - 0.00018 R_n^{1.047}$ $- 0.073 F_r^{3.011}$	۰/۹۹۱	۰/۴۵۳
$\frac{\Delta H}{H_t} = 101.0585 - 0.000752 S$ $+ 3.93 E - 9 R_n^2 - 9.32 E - 15 * R_n^3$	۰/۹۰۰	۰/۷۱۰
$\frac{\Delta H}{H_t} = 99.061 - 0.00018 R_n^{1.047}$ $- 0.073 F_r^{3.011}$	۰/۹۹۱	۰/۴۵۷

- آنالیز رگرسیون چند متغیره نشان داد که از بین پارامترهای بی بعد موجود، شیب سرریز و عدد رینولدز در تخمین استهلاک انرژی جریان مهم تر از بقیه می باشند.

۶- منابع

- [۱] سلماسی، ف. ۱۳۸۸. اثر تعداد پله ها بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای بر اساس روش جدید طراحی، دانش آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، شماره ۱ جلد ۱۹، صفحات ۲۷ تا ۳۸.
- [۲] شجاع، ف، سلماسی، ف، فرسادی زاده، د، ناظمی، ا ح و صدرالدینی، ح. ۱۳۹۱. تعیین ابعاد بهینه سرریزهای پله‌ای جهت حداکثرسازی استهلاک انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دانش آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، شماره ۱ جلد ۲۲، صفحات ۹۱ تا ۱۰۴.

۵- نتیجه گیری

- برای بررسی اثر شیب سرریز روی استهلاک انرژی، ۱۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب های ۴۵،۲۵،۱۵ درجه و تعداد ۵ الی ۵۰ پله (شش حالت) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که:
- با افزایش دبی، استهلاک انرژی نسبی نیز کاهش می یابد.
 - افزایش شیب سرریز باعث افزایش استهلاک انرژی می گردد که علت آن افزایش اندازه حرکت تبادلی بین جریان چرخشی زیر هر پله و جریان رویه‌ای می باشد.
 - نتایج این پژوهش تطابق زیادی را با نتایج فلدر و چانسون [۹] نشان می دهد.

area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways. *Environ. Fluid Mech.*, 9 (4): 427-441.

[11] Matos, J. and Quintela, A. 1994. Jet flow on stepped spillways. Discussion, *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 120 (2): 443-444.

[12] Pegram, G.G.S and Officer, A.K., and Mottram, S.R. 1999. Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 125 (5): 500-509.

[13] Peyras, L., Royet, P., and Degoutte, G. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 118 (5): 707-717.

[14] Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 116(5): 587-591.

[15] Rice, C.E., and Kadavy, K.C. 1996. Model study of roller compacted concrete stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 122 (6): 292-297.

[16] Sorensen, R.M. 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 111 (12): 1461-1472.

[17] Tozzi, M.J. 1992. Flow characterization/behavior on stepped spillways. PhD thesis, University of Sao Paulo- Brazil.

[3] Chamani, M.R. and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 125 (4): 361-368.

[4] Chanson, H. 1994a. Hydraulic design of stepped channels and spillways. The university of Queensland, Report CH43/94.

[5] Chanson, H. 1994b. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regims on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 32(2): 213-218.

[6] Chanson, H. 1994c. Jet flow on stepped spillways. Discussion, *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(2): 441-442.

[7] Christodoulou, G.C., 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 119(5): 644-649.

[8] Essery, I.T.S., and Horner, M.W. 1971. The hydraulic design of stepped spillways. Report 33, Constr. Industry Res. and Information Assoc., London. England.

[9] Felder, S. and Chanson, H. 2009. Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 137 (11): 1543-1548.

[10] Felder, S. and Chanson, H. 2011. Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial

Effect of slope on energy dissipation in flow over stepped spillway

Farzin Salmasi^{1*} and Hadi Arvanaghi²

¹Associate Prof, Department of Water Eng., Tabriz Univ., Tabriz

²Assistant Prof, Department of Water Eng., Tabriz Univ., Tabriz

**Corresponding author: Salmasi@Tabrizu.ac.ir*

Abstract

Recently, stepped spillways were the subject of many researches because of more effective energy dissipation and reduction in the size of the stilling basins. In the present work, stepped spillways sloped at 15, 25, 45 degrees with 5, 10, 15 steps have been investigated in a physical model. Spillways consisted of standard Ogee followed by constant slope toward the downstream river. The purpose of this research was to investigate the effects of number of steps and slope on the energy dissipation. Results showed that the rate of energy dissipation per unit length increases with spillway height and slope with the same number of steps. Analyze of multiple regressions showed that dimensionless parameter of Reynolds number and spillway slope have more significant effect on energy dissipation. An empirical equation then extracted to predict the energy dissipation by such spillways.

Keywords: Energy dissipation, slope, stepped spillway, multiple regressions.



shahrood University

Vol. 1, No. 1, Spring 2013: 47- 56

Iranian Journal of
Water & Environment Engineering



Effect of Slope on Energy Dissipation in Flow Over Stepped Spillway

F. Salmasi^{1*}, H. Aronghi²

¹Associat Prof, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Assistant Prof, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author: salmasi@tabrizu.ac.ir (F. Salmasi)

Abstract

Recently, stepped spillways were the subject of many researches because of more effective energy dissipation and reduction in the size of the stilling basins. In the present work, stepped spillways sloped at 15, 25, 45 degrees with 5, 10, 15 steps have been investigated in a physical model. Spillways consisted of standard Ogee followed by constant slope toward the downstream river. The purpose of this research was to investigate the effects of number of steps and slope on the energy dissipation. Results showed that the rate of energy dissipation per unit length increases with spillway height and slope with the same number of steps. Analyze of multiple regressions showed that dimensionless parameter of Reynolds number and spillway slope have more significant effect on energy dissipation. An empirical equation then extracted to predict the energy dissipation by such spillways.

Keywords: Energy dissipation, slope, Stepped spillway, multiple regressions.