

مطالعه افت انرژی در سرریزهای پلکانی - زیگزاگی

سید علی بنی‌شعبان^۱، امین بردبار^۲، امیرعباس کمان بدست^{۲*}، علیرضا مسجدی^۲ و محمد حیدر نژاد^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲۲)

چکیده

ترکیب سرریز زیگزاگی با سرریز پلکانی یک ترکیب خوبی از سرریزها برای تخلیه سیلاب از مخازن سدها است. زیرا از یک طرف، سرریز زیگزاگی ظرفیت تخلیه سیلاب را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر، سرریز پلکانی باعث افزایش افت انرژی در پایین دست سرریز می‌شود. در ادامه به ترکیب این دو سازه و تغییر ابعاد آنها برای بیشتر کردن استهلاک انرژی آب پرداخته شده است. به منظور بررسی آزمایشگاهی این پژوهش، از یک فلوم با قوس ۹۰ درجه در دانشگاه آزاد واحد اهواز استفاده شد و با انتخاب مدل‌های زیگزاگی روی پله در سه شکل زیگزاگ، دو طول و سه عرض متفاوت زیگزاگ و پنج دبی، در مجموع ۹۰ آزمایش انجام شد. پس از تحلیل نتایج مشخص شد که در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی از نظر شکل پله به ترتیب اشکال مثلثی، مستطیلی و ذوزنقه‌ای، شاهد کاهش افت انرژی هستیم. سرریزهای زیگزاگی دو سیکله دارای افت انرژی بیشتری نسبت به تک‌سیکله‌ها هستند که به دلیل افزایش طول خزش و استهلاک است. با افزایش (vc/h) ۰/۰۲ تا ۰/۰۳۲ شاهد افزایش افت انرژی هستیم ولی با افزایش (vc/h) از ۰/۰۳۲ به ۰/۰۵۷ روند عوض شده و شاهد کاهش افت انرژی هستیم که این پدیده به دلیل استغراق پله‌ها، کاهش زبری پله‌ها و افزایش شدت ورود هوا است که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: سرریز زیگزاگی، سرریز پلکانی، استهلاک انرژی، مدل فیزیکی

۱. گروه علوم و مهندسی آب، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*: مسئول مکاتبات: ka57_amir@yahoo.com

مقدمه

در این زمینه متعلق به چانسون (۱۰، ۱۱ و ۱۲) است که رابطه‌ای را برای تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی با پله‌های افقی در رژیم جریان تیغه‌ای ارائه کرده است. همچنین چمنی و راجاراتنام (۲۳) نیز با پژوهش روی جریان تیغه‌ای رابطه‌ای را برحسب تعداد پله‌های مورد استفاده به‌منظور برآورد استهلاک انرژی در حالت پله‌های افقی ارائه کرده‌اند. چیناراسری و ونگ وایز (۱۴) نیز رابطه‌ای را برای تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب معکوس و یا آستانه‌دار ارائه کردند. مسئله بااهمیت برای پژوهشگران در این زمینه، افزایش اثر پله‌ها در میزان استهلاک انرژی جریان است. بینا و همکاران (۲) و (۳) با پژوهشی مشابه تأثیر هندسه سرریزهای پلکانی در افت انرژی آن را بررسی کردند. موسوی جهرمی (۲۰) تأثیر شیب بر میزان افت انرژی صورت گرفته در سرریزهای پلکانی را با استفاده از مدل‌های فیزیکی بررسی کردند.

ترکیب سرریزهای پلکانی با دیگر سرریزها

سرریزهای زیگزاگی و کلید پیاپی از جمله سرریزهایی هستند که همزمان می‌توان با پلکان ترکیب کرد و امکان عبور نسبتاً فراوان آب را از طریق عرض و عمق کم سرریز در مقایسه با سرریزهای قدیمی‌تر فراهم می‌آورد. همچنین می‌توان آنها را به‌آسانی روی تاج سد وزنی تعبیه کرد. سرریزهای پلکانی عموماً در سدهای وزنی RCC استفاده می‌شوند. مهم‌ترین برتری این کار سازگاری مناسب میان ساختار سرریز و روش ساخت سدهای RCC و مهم‌تر از همه امکان کاهش انرژی آب روی پلکان‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های ساخت و ابعاد حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست سد است، از این‌رو به‌نظر می‌رسد که بررسی آزمایشگاهی کاربرد همزمان این دو نوع سرریز مثمر ثمر بوده است و نتیجه حاصله می‌تواند به‌عنوان الگویی جدید برای تعیین ابعاد هیدرولیکی بهینه به‌منظور استفاده در مقیاس بزرگ مطالعه شود. مشخصه‌های هندسی خاص سرریزهای زیگزاگ جت‌ها و جریان‌های متفاوتی را در پایین‌دست سازه ایجاد می‌کند و در نتیجه هدررفت انرژی و

سرریزهای زیگزاگی سازه‌های هیدرولیکی مهم برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها و نیز هوادهی جریان در شبکه اصلی فاضلاب‌ها به‌شمار می‌آیند (شکل ۱). فرضیه اصلی در توسعه طرح زیگزاگی سرریزها، افزایش ظرفیت انتقال جریان روی سرریز از طریق افزایش طول تاج سرریز در یک محدوده معین عرضی بوده است. یکی از انواع سرریزهای با محور تاج غیرخطی در سطح افق (پلان)، سرریزهای نوع Labyrinth است. سرریزهای Labyrinth ترکیبی از دیواره‌هایی است که در سطح افق عموماً با هندسه مثلثی، ذوزنقه‌ای، مستطیلی و یا U شکل احداث می‌شوند. این شکل هندسی ممکن است، پی در پی در عرض جریان با سیکل زیگزاگی تکرار شود. جریان در کانال بالادست این نوع سرریزها به‌صورت زیر بحرانی است. به‌دلیل وجود تبدیل تنگ‌شدگی، در امتداد کانال، جریان فشرده شده و سطح آب پایین می‌افتد.

سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده است و تا پاشنه پایین‌دست ادامه دارد. توجه به این نوع سرریزها به‌دلیل تأثیر قابل ملاحظه پلکان‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، بیشتر شده است. استهلاک انرژی در سرریز پلکانی در طول سرریز بر اثر برخورد جریان آب با پلکان‌ها انجام می‌شود. بنابراین انرژی کمتری در انتهای سرریز باید مستهلک شود و در نتیجه، سازه مستهلک‌کننده انرژی با ابعاد کوچک‌تری نیاز است. یکی از راه‌های افزایش زبری ایجاد پله در سرریزها است که به این نوع سرریز، سرریز پلکانی (شکل ۲) گفته می‌شود.

مطالعات انجام شده روی مدل هیدرولیکی سرریزهای پلکانی نشان می‌دهد که اتلاف انرژی در پنجه سرریزهای پلکانی تا ۸۴ درصد بوده است. همچنین اتلاف انرژی در این گونه سرریزها در حدود ۷۵ درصد بیشتر از سرریزهای پلکانی غیر اوجی بوده است. هونر (۱۵) از اولین کسانی بود که پژوهش‌های علمی را روی سرریزهای پلکانی آغاز کرد. مهم‌ترین مطالعات را



شکل ۲. سرریز پلکانی (۱۷)



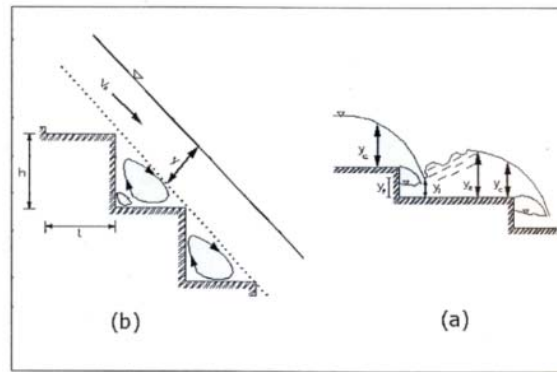
شکل ۱. سرریز زیگزاگی

از روش حجم محدود، جریان روی سرریزهای پلکانی را آنالیز و برای تعیین آشفتگی جریان از مدل استاندارد به منظور تعیین آشفتگی جریان $k-\epsilon$ استفاده کردند. چن و همکاران (۱۸) سرریز پلکانی را با استفاده از روش اجزای محدود آنالیز و مدل کردند. مقدم و همکاران (۱۹) نسبت استهلاك انرژی به انرژی اولیه، در سرریز پلکانی را به روش شبیه‌سازی عددی ارائه کردند. به وسیله روش عددی، سرعت و ارتفاع جریان در پایین دست سرریز به دست می‌آید و در ادامه استهلاك انرژی در طول $k-\epsilon$ آشفتگی سرریز محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده از آنالیز عددی با نتایج آزمایشگاهی روی مدل فیزیکی سرریز پلکانی مقایسه شد و پژوهش نشان می‌دهد که به‌ازای انرژی ثابت بالادست، افزایش تعداد پلکان‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاك انرژی می‌شود. کمان بدست و عباسی با کمک نرم‌افزار عددی هندسه سرریز پلکانی را بررسی کردند و مشخص شد با افزایش دبی و افزایش تعداد پله‌ها نسبت استهلاك انرژی کاهش می‌یابد (۱).

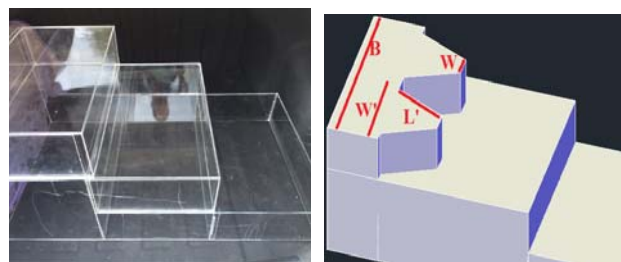
معادلات حاکم بر جریان

بیشتر پژوهشگران به دو نوع رژیم جریان متفاوت (از نظر مکانیسم میزان استهلاك انرژی) به نام‌های ریزشی (Nappe) و غیر ریزشی (Skimming) اشاره کرده‌اند. نوع اول در دبی‌های جریان کم و ارتفاع پلکان‌های بزرگ اتفاق می‌افتد و نوع دوم در سرریزهای با دبی زیاد و ارتفاع پلکان‌های کم رخ می‌دهد

هوادهی را متأثر می‌سازد. با توجه به مبانی علم هیدرولیک و هیدرودینامیک و نتایجی که از پژوهش‌های سرریزهای پلکانی در مطالعات گذشتگان به دست آمده است، استفاده از یک زیگزاگ یا کلید پیانویی برای کنترل جریان بالادست یک آبراهه می‌تواند هدرفت انرژی را در کانال پایین دست که مجهز به یک سرریز پلکانی است بهبود ببخشد. کاسیدی (۷) از اولین پژوهشگرانی بود که از معادله لاپلاس و حل آن به روش تفاضلات محدود برای آنالیز جریان روی سرریزهای اوجی شکل از استفاده کرد. او با استفاده از تئوری جریان پتانسیل توانست سطح آزاد آب و فشار تاج سرریز را تحلیل کند که نتایج ایشان تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. نادری‌راد و همکاران (۲۷) استهلاك انرژی را در سرریز پلکانی و سرریز اوجی به وسیله روش حجم سیال مقایسه کردند و نشان دادند که ۸۰ درصد نسبت به سرریز اوجی افزایش داشته است. سورنسن (۲۵) و چانسون (۲۴) مطالعات آزمایشگاهی زیادی پیرامون تشخیص جریان و پراکنش انرژی روی سرریزهای پلکانی انجام دادند و روابطی را برای تعیین نوع جریان و میزان انرژی تلف شده روی این نوع سرریزها ارائه دادند. اولسن و جلسوینگ (۲۱) جریان روی سرریزهای اوجی را در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به‌ازای پارامترهای هندسی توسط روش‌های عددی مدل و حل کردند و ضریب دبی را برای سرریز اوجی به دست آوردند. چن و همکاران (۱۸) معادلات ناویر-استوکس را با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده کردند. تابارا و همکاران (۲۸) با استفاده



شکل ۳. رژیم‌های جریان از روی سرریز پلکانی: الف) رژیم ریزشی و ب) رژیم غیر ریزشی (۱۵)



شکل ۴. طرح‌واره و اصل مدل در ترکیب سرریز پلکانی و زیگزاک

کشش سطحی سیال؛ f_e : ضریب زبری بستر سرریز؛ N : تعداد پله‌ها؛ μ : لزجت دینامیکی سیال و g : شتاب ثقل.

بنابراین رابطه بین این کمیت‌ها به صورت زیر است:

$$F(\Delta H, H_0, q, h, l, \rho_w, \sigma, f_e, N, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

$$f\left(\frac{\Delta H}{h}, \frac{H_0}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{h}{l}, \frac{\sigma}{\rho_w g h^2}, f_e, \frac{\mu}{\rho_w \sqrt{gh^3}}, N\right) = 0 \quad (2)$$

با نادیده گرفتن اثر لزجت سیال μ و تنش سطحی σ و انجام اندکی عملیات روی پارامتری بیان شده می‌توان پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر تلفات انرژی در سرریز پلکانی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta H/H_0 = f(y_c/H, h/l, N, f_e, W/B, L'/W, L''/W') \quad (3)$$

برای آزمایش ترکیب سرریز پلکانی و زیگزاک، مدل‌های با پلکسی گلاس ساخته شد که قابلیت ترکیب و تعویض را داشته باشند و در این صورت آزمایش‌ها با ۱۸ سرریز زیگزاک سرریز سه پلکانی و پنج دبی صورت گرفت که در مجموع شامل ۹۰ آزمایش است. در شکل ۴ طرح‌واره و اصل مدل و موقعیت پارامترها نشان داده شده است.

(اسری و هورنر (۱۵)، راجاتنام (۲۵)، چانسون (۱۰، ۱۱ و ۱۲)، چمنی و راجاتنام (۸)). در شکل (۳) این دو رژیم جریان مشاهده می‌شوند. در این شکل طول افقی هر پلکان به l و ارتفاع عمودی آن به h نشان داده شده است.

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده روی سرریزهای پلکانی با محدوده وسیع تغییر در شیب‌ها می‌توان گفت که تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیر ریزشی تقریباً در $y_c/h = 0/8$ اتفاق می‌افتد (۲۳).

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی برای تعیین تلفات انرژی

بدین منظور لازم است تا پارامترهایی که بر میزان استهلاك انرژی تأثیرگذار هستند مشخص شود. بر طبق مطالعات پیشین استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی ΔH به موارد زیر بستگی دارد (۱۲):

H_0 : انرژی کل بالادست سرریز؛ q : دبی واحد عرض سرریز؛ h : ارتفاع پله؛ l : طول پله؛ ρ_w : جرم مخصوص سیال؛ σ :

جدول ۱. متغیرهای آزمایش

| جمع آزمایش‌ها | شکل پله | L'/W | W/B | y _c /H |
|---------------|---------|------|-----|-------------------|
| ۹۰ | ۳ | ۳ | ۲ | ۵ دبی |

جدول ۲. مشخصات و ابعاد سرریزهای زیگزاگی (واحدها به cm)

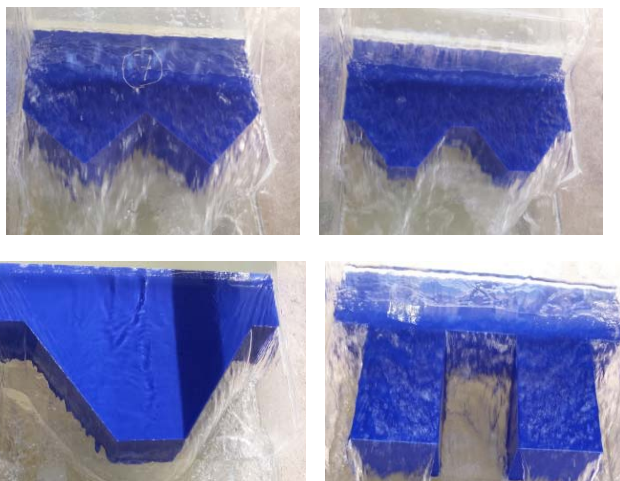
| شماره سرریز زیگزاگی | شماتیک سرریز زیگزاگی | نوع سرریز زیگزاگی | W' | L' | W | L'/W' | L'/W |
|---------------------|----------------------|-------------------|----|------|------|-------|------|
| ۱ | | A | ۴۶ | ۲۵/۵ | - | ۰/۵۵ | - |
| ۲ | | | ۴۶ | ۳۲/۵ | - | ۰/۷۱ | - |
| ۳ | | | ۴۶ | ۳۵/۵ | - | ۰/۷۷ | - |
| ۴ | | B | ۲۳ | ۱۶ | - | ۰/۷ | - |
| ۵ | | | ۲۳ | ۲۰/۵ | - | ۰/۸۹ | - |
| ۶ | | | ۲۳ | ۲۵/۵ | - | ۱/۱ | - |
| ۷ | | C | ۴۶ | ۱۶ | ۱۰ | ۰/۳۵ | - |
| ۸ | | | ۴۶ | ۲۴/۵ | ۱۰ | ۰/۵۳ | - |
| ۹ | | | ۴۶ | ۳۰ | ۱۰ | ۰/۶۵ | - |
| ۱۰ | | D | ۲۳ | ۱۲ | ۵ | ۰/۵۲ | - |
| ۱۱ | | | ۲۳ | ۱۶ | ۵ | ۰/۷ | - |
| ۱۲ | | | ۲۳ | ۲۱ | ۵ | ۰/۹۱ | - |
| ۱۳ | | E | - | ۱۲ | ۲۳ | - | ۰/۵۲ |
| ۱۴ | | | - | ۲۳ | ۲۳ | - | ۱ |
| ۱۵ | | | - | ۲۸/۵ | ۲۳ | - | ۱/۲۴ |
| ۱۶ | | F | - | ۱۱/۵ | ۱۱/۵ | - | ۱ |
| ۱۷ | | | - | ۱۷ | ۱۱/۵ | - | ۱/۴۸ |
| ۱۸ | | | - | ۲۰ | ۱۱/۵ | - | ۱/۷۴ |

سرریزهای زیگزاگی و پلکانی ساخته شده، آمده است. ارتفاع هر پله ۱۲ سانتی‌متر و کل سرریز ۳۶ سانتی‌متر و عرض فلوم ۵/۰ متر است که به دلیل استفاده از پلکسی‌گلاس عرض سرریز ۴۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی آزمایشگاهی این پژوهش، فلومی در دانشگاه آزاد واحد اهواز با مشخصات زیر استفاده شد. کانال‌های ورودی و خروجی فلوم ساخته شده، رویاز مستطیلی با جداره ورق پلکسی‌گلاس است، به طوری که که طول کانال‌های مستقیم ورودی در ابتدای فلوم و خروجی در انتهای

$$\Delta H/H_0 = f(y_c/H, W/B, L'/W, L'/W') \quad (4)$$

پژوهش شامل ارزیابی عدد فرود، تغییر در طول زیگزاگ، تغییر در عرض سیکل‌های زیگزاگ و حتی شکل زیگزاگ و تأثیر آن روی افت انرژی است. متغیرها شامل آزمایش با پنج دبی متفاوت (۴ الی ۱۵ لیتر بر ثانیه)، تغییر در طول سرریز (دو متغیر)، تغییر در عرض هر پله سرریز (سه متغیر)، شکل پله‌های زیگزاگ (سه متغیر) که مجموع کل آزمایش‌ها باهم در مدل فیزیکی ۹۰ عدد است (جدول ۱). در جدول (۲) همچنین در شکل (۵) نمونه‌هایی از



شکل ۵. نمونه‌های از سرریزهای زیگزاکی و پلکانی



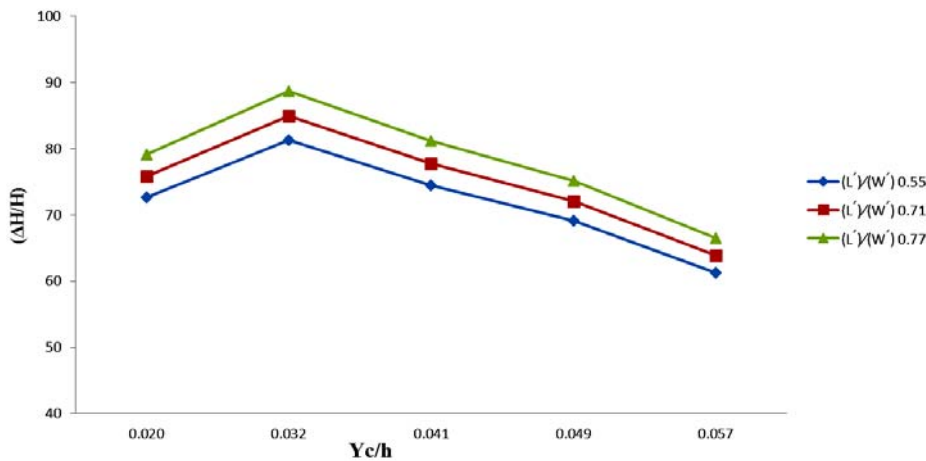
شکل ۶. نمایی از فلوم

ورودی به فلوم و یک سرریز مثلثی 90° درجه برای اندازه‌گیری دبی ورودی و یک دریچه کشویی در ابتدای آبگیر جانبی برای باز و قطع جریان ورودی به آبگیر جانبی و همچنین سرریز مثلثی 90° درجه در انتهای فلوم، به منظور اندازه‌گیری دبی خروجی از فلوم، از جنس ورق فلزی در نظر گرفته شده است و برای جلوگیری از ورود امواج به کانال از یک توری مشبک، بعد از سرریز ابتدایی استفاده شده است.

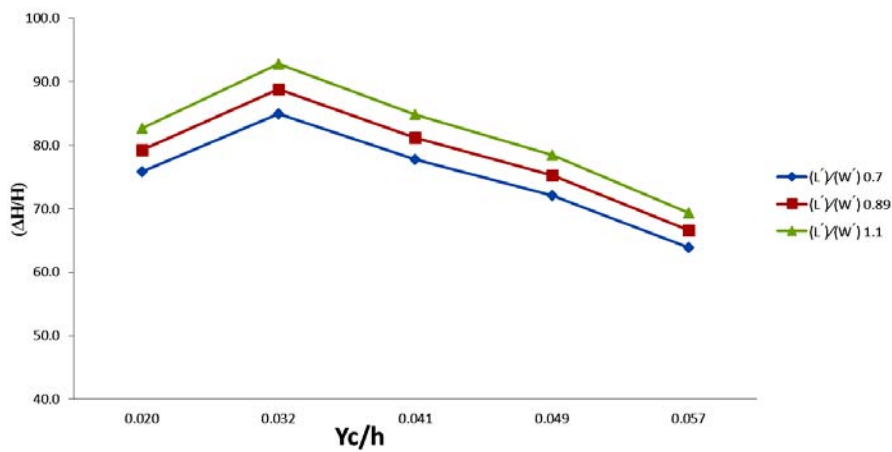
برای چرخش آب در فلوم آزمایشگاهی از یک پمپ سانتریفیوژ به قدرت شش کیلووات، قطر لوله مکش و دهش چهار اینچ استفاده شد. ارتفاع مکش پمپ تقریباً دو متر و ارتفاع دهش آن حدود ۲۰ متر و حداکثر دبی قابل انتقال توسط پمپ ۲۰ لیتر در ثانیه است.

فلوم به ترتیب $4/5$ و $2/5$ متر است، عرض و ارتفاع فلوم نیز به ترتیب $0/5$ و $0/6$ متر بوده است و بدنه فلوم در ارتفاع $0/7$ متری از سطح زمین قرار دارد. مسیر ورودی مستقیم و کف آن از جنس ورق فلزی به ضخامت سه میلی‌متر و دیواره‌ها از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت 10 میلی‌متر و به طول $4/5$ متر ساخته شده است که هم اثر زبری جداره را کاهش می‌دهد و هم پدیده‌های هیدرولیکی در محفظه قابل رؤیت هستند، مسیر خروجی نیز مستقیم، کف آن از جنس ورق فلزی به ضخامت سه میلی‌متر و دیواره آن از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت 10 میلی‌متر به طول $2/5$ متر است، کف فلوم به صورت بستر ثابت و بدون شیب و در حد دقت اجرایی به صورت افقی ساخته شده است (شکل ۶).

بعد از مخزن فلوم، یک دریچه کشویی برای تنظیم دبی



شکل ۷. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع A



شکل ۸. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع B

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} = 1 - \frac{H_1}{H_t} = 1 - \frac{\left(y_t - \frac{V_1^2}{2g} \right)}{1/5 y_c + H_{dam}} \quad (5)$$

بررسی اثر تغییر در طول و عرض سیکل‌های زیگزاگ بر

استهلاک و افت انرژی

با انجام آزمایش‌ها، داده‌های مورد نیاز برای تحلیل نتایج برداشت شد که به صورت نمودار نشان داده می‌شود. در ادامه به بررسی نتایج افت نسبی در (y_c/h) مختلف و نسبت (L'/W') در ترکیب سرریز پلکانی با انواع سرریزهای زیگزاگی پرداخته شده است. همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود،

بحث و نتایج

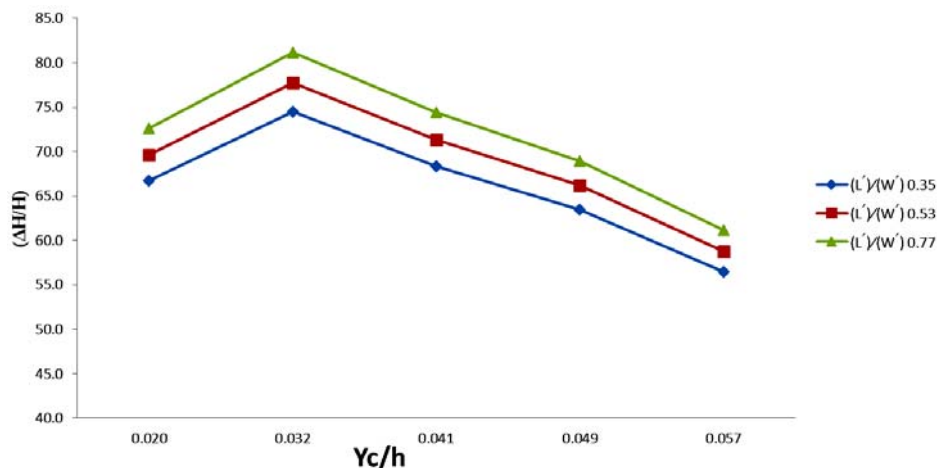
نتایج در این پژوهش شامل ارزیابی عدد فرود، تغییر در طول زیگزاگ، تغییر در عرض سیکل‌های زیگزاگ و حتی شکل زیگزاگ و تأثیر آن روی افت انرژی است به این ترتیب نتایج در سه بخش تقسیم می‌شوند:

۱- اثر تغییر در طول و عرض سیکل‌های زیگزاگ بر استهلاک و افت انرژی

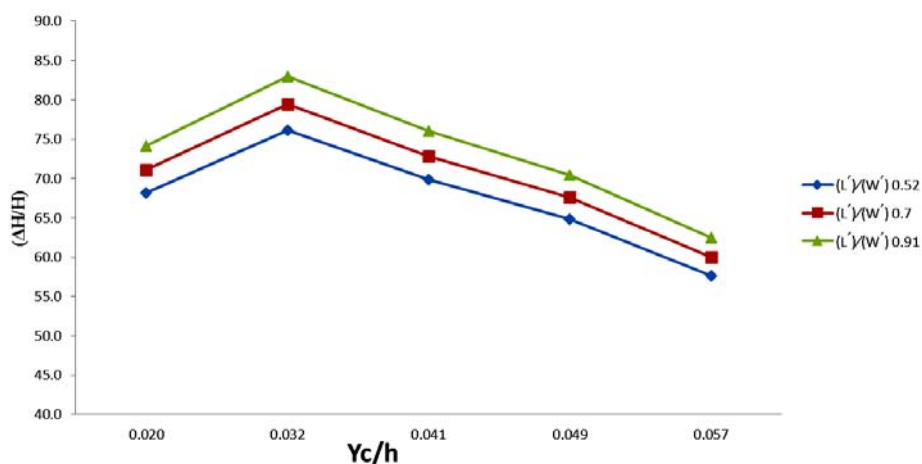
۲- اثر تغییر شکل و تعداد سیکل بر استهلاک و افت انرژی

۳- اثر عدد فرود بر استهلاک و افت انرژی

برای مقایسه حالت‌های مختلف باهم، نتایج به صورت افت انرژی ارائه شده است که از معادله زیر استخراج شده است.



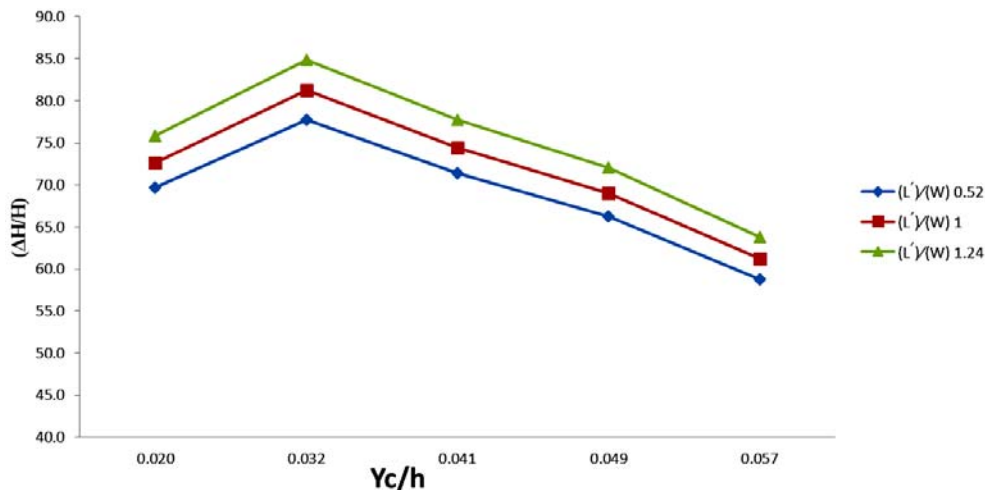
شکل ۹. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع C



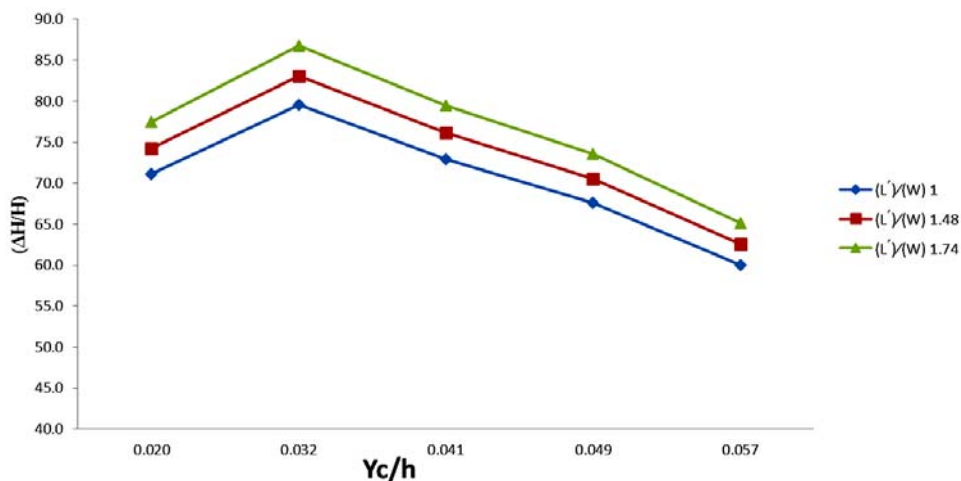
شکل ۱۰. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع D

همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع C با افزایش نسبت (L'/W') از ۰/۳۵ به ۰/۶۵ شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم و در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع D با افزایش نسبت (L'/W') از ۰/۵۲ به ۰/۹۱ شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم همچنین به خوبی می‌توان مشاهده کرد با افزایش (y_c/h) تا ۰/۳۲ افت نسبی افزایش پیدا کرده است اما با بیشتر شدن (y_c/h) از ۰/۳۲ افت نسبی کاهش می‌یابد که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت ورود هوا است که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد. با مقایسه سرریز زیگزاگی نوع C با نوع D

در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع A با افزایش نسبت (L'/W') از ۰/۵۵ به ۰/۷۷ شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم و در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع B با افزایش نسبت (L'/W') از ۰/۷ به ۱/۱ شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم همچنین به خوبی می‌توان مشاهده کرد با افزایش (y_c/h) تا ۰/۳۲ افت نسبی افزایش پیدا کرده است اما با بیشتر شدن (y_c/h) از ۰/۳۲ افت نسبی کاهش می‌یابد که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا است که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد. با مقایسه سرریز زیگزاگی نوع A با نوع B به دلیل دو سیکله شدن قسمت مثلثی، افزایش افت را شاهد هستیم.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع E



شکل ۱۲. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع F

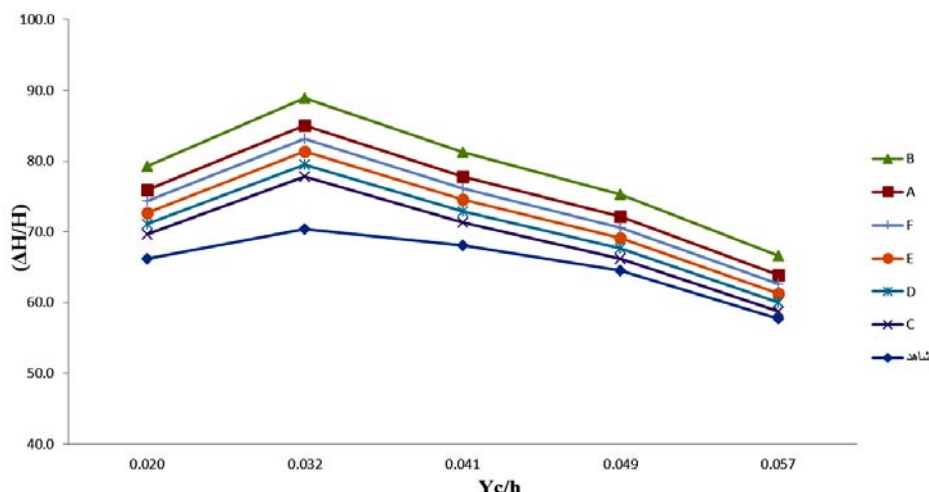
می‌یابد که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا است که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد. با مقایسه سرریز زیگزاگی نوع E با نوع F به دلیل دو سیکله شدن قسمت مستطیلی و افزایش طول خزش و استهلاک، افزایش افت را شاهد هستیم.

بررسی اثر تغییر شکل، تعداد سیکل و عدد فرود زیگزاگ بر استهلاک و افت انرژی

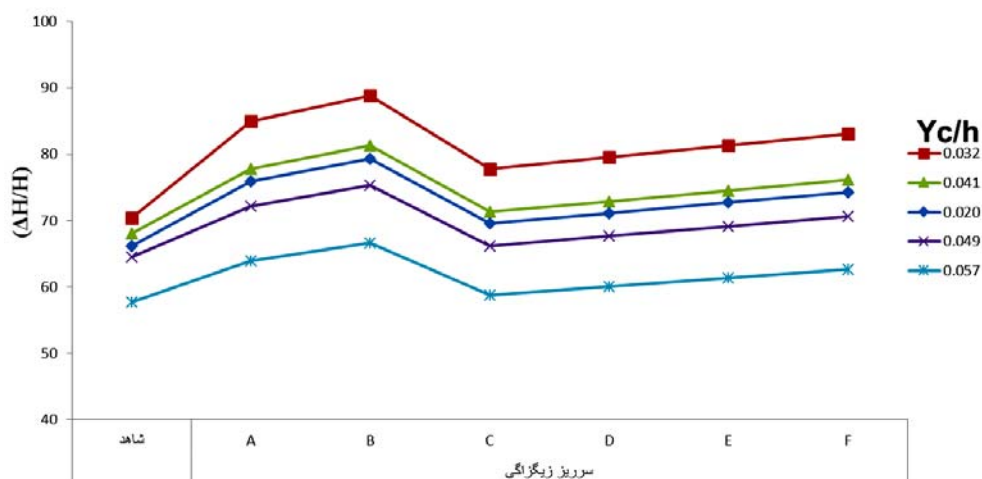
در این بخش به بررسی اثر تغییر شکل و تعداد سیکل و همچنین اثر تغییر عدد فرود در ترکیب سرریز پلکانی با انواع

به دلیل دو سیکله شدن قسمت ذوزنقه‌ای و افزایش طول استهلاک، افزایش افت را شاهد هستیم.

همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع E با افزایش نسبت (L'/W) از ۰/۵۲ به ۱/۲۴ شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم و در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع F با افزایش نسبت (L'/W) از ۱ به ۱/۷۴ شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم. همچنین به خوبی می‌توان مشاهده کرد با افزایش (y_c/h) تا ۰/۳۲ افت نسبی افزایش پیدا کرده است اما با بیشتر شدن (y_c/h) از ۰/۳۲ افت نسبی کاهش



شکل ۱۳. نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریزهای زیگزاگی



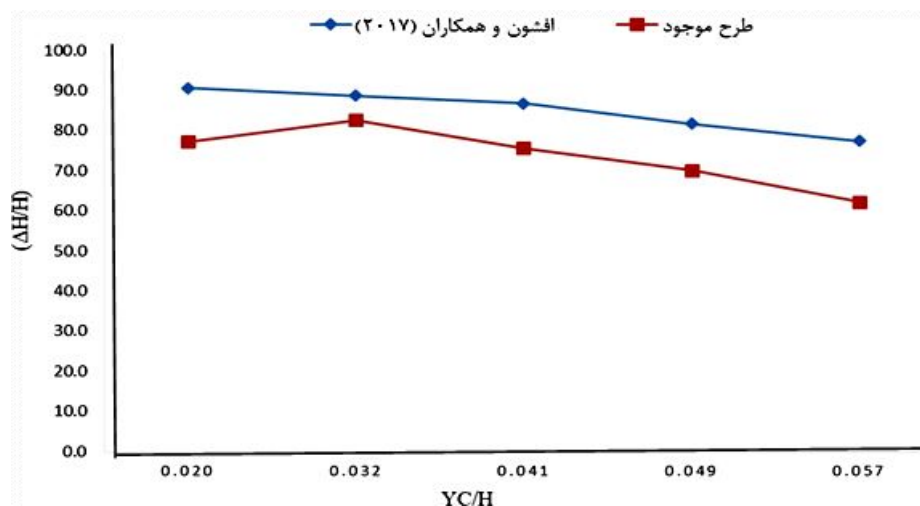
شکل ۱۴. نمودار تأثیر عدد فرود بر افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با سرریزهای زیگزاگی

به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا است که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد.

بررسی نتایج این پژوهش با نتایج دیگر پژوهشگران

به منظور بررسی و مقایسه نتایج با دیگران از تحقیقات افشون و همکاران (۲) به دلیل شباهت نسبتاً نزدیک به نتایج این پژوهش استفاده شد. ایشان به بررسی هندسه سرریز پلکانی و تأثیر موانع روی پله‌ها بر افت انرژی با کمک مدل فیزیکی یعنی همان رویکرد تغییر در هندسه پلکان پرداختند. در این بررسی به ترکیب

سرریزهای زیگزاگی در قالب دو نمودار پرداخته شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی نوع B شاهد بیشترین افت نسبی انرژی هستیم. در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی به ترتیب مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای، شاهد کاهش افت انرژی هستیم. همچنین سرریزهای زیگزاگی دو سیکله دارای افت انرژی بیشتری نسبت به تک‌سیکله‌ها دارند. با توجه به نمودار شکل (۱۴) می‌توان مشاهده کرد با افزایش (y/h) ۰/۰۲ تا ۰/۰۳۲ شاهد افزایش افت انرژی هستیم اما با افزایش (y/h) از ۰/۰۳۲ به ۰/۰۵۷ شاهد کاهش افت انرژی هستیم که



شکل ۱۵. نمودار مقایسه طرح موجود با افشون و همکاران (۲۰۱۷)

است:

۱. در ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی به ترتیب مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای، شاهد کاهش استهلاک و افت انرژی هستیم.
۲. سرریزهای زیگزاگی دو سیکله استهلاک و افت انرژی بیشتری نسبت به تک‌سیکله‌ها دارند.
۳. با افزایش (y/h) از $0/02$ تا $0/032$ شاهد افزایش افت انرژی هستیم اما با افزایش (y/h) از $0/032$ به $0/057$ شاهد کاهش افت انرژی هستیم که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا است که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد.
۴. با مقایسه این مطالعه با پژوهش افشون و همکاران (۲۰۱۷) مشخص شد به‌طور متوسط ترکیب سرریزهای پلکانی با زیگزاگی ۱۵ درصد استهلاک انرژی کمتری را نسبت به ترکیب موانع با سرریزهای پلکانی را باعث می‌شوند.

سرریز پلکانی با موانع مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای و تأثیر آن بر کاهش استهلاک و افت انرژی پرداخته شد. در این بخش به بررسی این مطالعه با پژوهش حاضر پرداخته شده است در نمودار شکل (۱۵) که به مقایسه با مطالعه افشون و همکاران (۲) پرداخته شده است مشخص شد که اول تغییرات افت انرژی در هر دو پژوهش شکل نزولی دارد و دوم به‌طور متوسط ترکیب سرریزهای پلکانی با زیگزاگی ۱۵ درصد استهلاک انرژی کمتری را نسبت به ترکیب موانع با سرریزهای پلکانی را باعث می‌شوند.

نتیجه‌گیری

ترکیب سرریز پلکانی با سرریز زیگزاگی می‌تواند باعث افزایش استهلاک انرژی شود. بنا به این مهم در این پژوهش به ترکیب سرریز پلکانی با سرریزهای زیگزاگی مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی یک و دو سیکله پرداخته شد که نتایج آن به شرح زیر

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, S. and A. A. Kamanbedast. 2012. Investigation of effect of changes in dimension and hydraulic of stepped spillways for maximization energy dissipation. *World Applied Sciences Journal* 18(2): 261-267.
2. Afshoon, H., R., A. A. Kamanbedast, A. Masjedi, M. Heidarnajad and A. Bordbar. 2018. Evaluation of the effect of the geometry of the barriers on stairs on energy loss in step spillways using physical model, Fresen.

- Environmental Bulletin* 27(1): 346-356.
3. Birami, M. K. 2008. Water Convayence Structures, Isfahan University of Technology, Isfahan University of Technology Publication Center, Isfahan, Iran. (In Farsi).
 4. Bina, M., H. Mousavi Jahromi and F. Salmasi. 2005. Impact of stepped spillway geometry on energy loss, *In: Proceeding of the 5th Iranian Hydraulic Conference*, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. (In Farsi).
 5. Bina, M., F. Salmasi and H. Mousavi. 2003. Experimental investigation of flow energy loss from step spillway overflows, *In: Proceeding of the 6th International Conference on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology, Iran. (In Farsi).
 6. Bina, M., A. Moradi Sabze Kohi and S. M. Kashefipour. 2006. Experimental investigation of energy dissipation rate in stair slopes, *In: Proceeding of the 7th International Seminar on River Engineering*, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Farsi).
 7. Cassidy, J. J. 1965. Irrigational flow over spillways of finite height. University of Missouri-Columbia.
 8. Chamani, M. R. and N. Rajaratnam. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(4): 361-367.
 9. Chanson, H. 1995. Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillway, Pergamon, Oxford, UK.
 10. Chanson, H. 1994a. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulics Research* 32(3):445-460.
 11. Chanson, H. 1994b. Comparison of Energy dissipation between nappe and skimming flow Regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research* 32(2): 213-218.
 12. Chanson, H. 1994c. Jet flow on stepped spillways, Discussion, *Journal of Hydraulic Engineering* 120(2): 443-444.
 13. Chanson, H. 2002. Hydraulics of Stepped Chutes and Spillway, CRC Press.
 14. Chinnarasi, C. and S. Wongwisess. 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 132(1):70-76
 15. Essery, I. T. S. and M. W. Horner. 1971. The hydraulic design of stepped spillway, Report 33, Constr. Industry Res. And Information Assoc., London, England.
 16. Johnson, M. and B. Savage. 2006. Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(12): 1353-1357.
 17. Kamanbedast, A. 2014. Handbook of Hydraulic Structures Engineering. Published in Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
 18. Li, W., Q. Xie and C. J. Chen. 1989. Finite analytic solution of flow over spillways, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 115(12): 2635-2648.
 19. Moghaddam, A. Kamanbedast, A., Ali Moradi, A. and Afshoon H. 2016. Hydraulic flow evaluation of the ariobarzen behbahan regulatory dam overflow using FLUENT software, *In: Proceeding of the National Conference on Water and Hydraulic Structures*, Islamic Azad University, Dezful Branch.(In Farsi).
 20. Mousavi Jahromi, H., S. Heydari Arjlou and Q. Farazmand. 2009. Investigation of the effect of slope on energy loss rate of stepped weirs using physical models, *In: Proceeding of the Eighth International Congress of Civil Engineering*, Shiraz University, Iran. (In Farsi).
 21. Olsen, N. R. and H. M. Kjellesving. 1998. Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway, capacity. *Journal of Hydraulic Engineering, the Netherland* 36(5): 775-784.
 22. Qudsian. 2003. Hydraulic Dam, Tarbiat Modarres University, Tarbiat Modarres University Publications Office, Tehran, Iran. (In Farsi).
 23. Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 116(4):587-591
 24. Savege, B. M. and C. M. Johnson. 2001. Flow over ogee spillway physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 127(8): 640-649.
 25. Sorensen, R. M. 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(12): 1461-1472.
 26. Tabbara, M., J. Chatila and R. Awwad. 2005. Computational Simulation of Flow over Stepped Spillways, Department of Civil Engineering, Lebanese American University, Lebanon.
 27. Taleb Bidokhti N., Naderi Rad A. And Nick Seresht. H. 2009. Investigation of energy dissipation in simple, steep and edge-stepped overflow types using numerical model, *Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz* 39(1). (In Farsi).
 28. Vafaiean M. 1998. Earth Dams, Isfahan University of Technology, Isfahan University of Technology-Center of Jihad publication, Iran.(In Farsi).
 29. Zaretsky, Y. and V. Korchevsky. 1997. Kowsar Dam Project (Tang-E-Duk), Joint Final Report, International Institute of Geotechnics and Hydro Structures, Moscow, Russia.

The Study of Energy Loss in Stepped- Labyrinth Spillways

S. A. Banishoab^{1,2}, A. Bordbar², A. A. Kamanbedast^{2*}, A. Masjedi² and
M. Heidarnejad²

(Received: August 21-2017 ; Accepted: May 12-2018)

Abstract

A 'spillway' is a structure used to provide the controlled release of flood water from upstream into downstream area of a dam. As an important component of every dam, a spillway should be constructed strongly, reliably and efficiently to be used at any moment. Labyrinth and stepped spillways are presented as appropriate modifications to those spillways hardly capable of managing the maximum potential discharge. Owing to their nonlinear crests for a given width, labyrinth and stepped spillways have a larger discharge rate than linear- crest spillways at an identical height. Compared to other energy dissipaters, the combination of stepped and labyrinth spillways is known as a very strong energy dissipater. In the following part, the combination of these two structures and their dimensional change for increasing the water- energy dissipation are addressed. To conduct this study, an experimental flume with a 90- degree bend in the Islamic Azad University of Ahvaz was used. In total, 90 experiments were conducted on three different labyrinth- shape stepped spillway models with two different lengths, three different widths, and five different discharges. Analysis of the results showed a greater energy loss reduction in triangular rather than rectangular or trapezoidal labyrinth- shape stepped spillways. In addition, energy loss was greater in labyrinth spillways with two cycles than those with one cycle. Energy loss was increased by raising the Froude number from 0.05 to 0.1; in contrast, energy loss was decreased with increasing the Froude number from 0.1 to 1.0, which was due to the submergence of steps, a decrease in the roughness of steps and an increase in the intensity of aeration.

Keywords: Labyrinth spillway, Stepped spillway, Energy dissipation, Physical model

1. Department of Water Science and Engineering, Khuzestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding author: ka57_amir@yahoo.com