

مطالعه آزمایشگاهی راندمان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای

مرجان کشاورز اسکندری^۱ و مهدی اسمعیلی ورکی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و دانشیار دانشکده کشاورزی، و وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۲۳

چکیده

جریان آب عبوری از سرریز سدها انرژی جنبشی بالایی دارد که می‌تواند آسیب‌های زیادی بر تأسیسات پایین‌دست و فرسایش شدید بستر رودخانه وارد کند. انرژی معمولاً با ایجاد حوضچه آرامش در پایین‌دست سرریزها، پرتاب‌کننده‌های جامی شکل و پلکان در سرریزها مستهلک می‌شود. سرریزهای پلکانی یکی از سازه‌های متداول به منظور استهلاک انرژی و نیز کاهش ابعاد حوضچه آرامش در سدهاست. در این پژوهش، تأثیر ایجاد کنگره‌ها با ارتفاع ۰/۵ و ۰/۷۵ ارتفاع پلکان (h)، فواصل کارگذاری برابر و دو برابر ارتفاع پلکان و سه اندازه زبری سطح پلکان به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ متر بر افت انرژی کل در پایین‌دست سرریز پلکانی با شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۵h، فاصله کارگذاری ۲h و طولی برابر با طول پلکان به افزایش ۱۲/۷ درصد در افت انرژی می‌انجامد. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ نشان می‌دهد ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۷۵h و فاصله کارگذاری ۲h و طول کنگره برابر با ارتفاع پلکان، میزان افت انرژی را ۸/۴ درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش می‌دهد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ ایجاد آستانه‌ای یکپارچه با طول h و ارتفاع ۰/۵h با افزایش ۴/۷ درصد در افت انرژی، نسبت به حالت بدون کنگره، مناسب‌ترین عملکرد را دارد. مقایسه‌ها همچنین نشان می‌دهد اعمال زبری در سرریزهای مورد مطالعه عملکرد آنها را کاهش می‌دهد و میزان افت نسبی انرژی را به طور متوسط ۳/۶ درصد نسبت به حالت‌های بدون زبری کم می‌کند.

واژه‌های کلیدی

اتلاف انرژی، رژیم جریان، زبری، سرریز پلکانی، سرریز کنگره‌ای، شیب سرریز

مقدمه

(1990). سرریزهای پلکانی با قدمتی بیش از ۳۵۰۰ سال برای اتلاف انرژی آب، کاهش قدرت فرسایشی آن و کاهش هزینه سازه مستهلک‌کننده انرژی پایین‌دست سرریز به کار می‌روند. بر اساس تجربیات، استفاده از سرریزهای پلکانی با دبی واحد عرض تا ۳۰ متر مکعب بر ثانیه در متر محدود شده است و دلیل آن آسیب کاپیتاسیون در دبی‌های بیشتر است (Khatsuria, 2005).

مطالعات نشان می‌دهد جریان‌های عبوری از سرریزهای پلکانی به سه صورت ریزشی، انتقالی و سطحی

سرریزها بخش مهمی از سازه سدها هستند که برای تخلیه جریان مازاد بر ظرفیت ذخیره ساخته می‌شوند. نوع سرریزها بستگی به شرایط هیدرولیکی جریان و ویژگی‌های ژئوتکنیکی محل ساخت سدها دارد که می‌تواند در شکل‌های مختلف ساخته شود. با توجه به دبی بالای جریان عبوری از سرریزها، طراحی و ساخت آنها بسیار پیچیده و معمولاً با مشکلاتی مانند کاپیتاسیون و انرژی جنبشی بالای جریان مواجه است (Novak et al.,

یکنواخت را در شیب‌های تندتر از ۱۰ درجه کاهش می‌دهد. در نتیجه، در داخل لایه مرزی، تنش برشی بین لایه‌های جریان کاهش می‌یابد و با کاهش نیروی برشی (دراگ)، کارایی این سرریزها در استهلاک انرژی کم می‌شود. مقایسه‌ها نشان داده است که بیشترین میزان اتلاف انرژی در شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه رخ می‌دهد. چمنی و راجاراتنام (Chamani & Rajaratnam, 1994) روشی برای برآورد اتلاف انرژی در سرریز پلکانی در رژیم جریان ریزشی ارائه کرده‌اند. مقایسه نتایج آزمایش‌ها نشان داده است زمانی که نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله کمتر از تقریباً ۰/۸ باشد، رژیم جریان ریزشی است و اتلاف انرژی قابل توجه است.

ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2005) پوشش‌دار بودن و پوشش‌دار نبودن تاج سرریز، روی پله‌ها و وجه قائم بالادست سرریزهای پلکانی در شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ را بررسی کردند و نشان دادند که در تمامی شیب‌ها، استهلاک انرژی بیشتر در گزینه با بالادست نفوذناپذیر و پله دارای پوشش است و به‌طور کلی شیب پایین‌دست ۱:۳ بیشترین اتلاف انرژی را دارد. مفتاح‌هلقی و بیات (Meftah-Halaghi & Bayat, 2008) تأثیر شیب بالادست و پایین‌دست سرریز پلکانی را بر افت انرژی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که سرریز پلکانی-گابیونی با شیب بالادست قائم و شیب پایین دست ۱:۴، بیشترین مقدار افت انرژی جریان را دارد. عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2008) اثر تخلخل بر سرریزهای پلکانی-گابیونی را در آزمایشگاه بررسی کردند و نشان دادند که با کم شدن تخلخل سنگ دانه‌ها و به‌دنبال آن کاهش جریان عبوری از درون آنها، مقدار تلفات انرژی افزایش می‌یابد. چایناراسری و همکاران (Chinnarasri et al., 2008) با بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سرریزهای پلکانی-گابیونی با شیب‌های مختلف نشان دادند که جریان روی این سرریزها شامل دو بخش

شکل می‌گیرند. جریان ریزشی خود به دو نوع جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی جزئی توسعه یافته و جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کامل تقسیم می‌شود (Peyras et al., 1991; 1992). بررسی‌های مور (Moore, 1943) و اسری و هورنر (Essery & Horner, 1971) درباره سرریزهای پلکانی نشان می‌دهد اتلاف انرژی در رژیم جریان ریزشی بیشتر به دلیل اختلاط جت با چرخش جریان است و تشکیل پرش هیدرولیکی جزئی در جت‌های ریزشی سهم قابل توجهی ندارد. پیراس و همکاران (Peyras et al., 1991) با بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان ریزشی برای شرایط پرش هیدرولیکی نیمه توسعه یافته و کامل نشان دادند که مقدار اتلاف انرژی در جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی نیمه توسعه یافته ۱۰ درصد مقادیر به‌دست آمده برای جریان ریزشی با پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه یافته در شرایط جریان مشابه است (به نقل از Chanson, 1993).

پیراس و همکاران (Peyras et al., 1991) استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی-گابیونی را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که سرریزهای پلکانی-گابیونی قادر به تحمل دبی جریان تا ۳۰ متر مکعب بر ثانیه در متر هستند. معکوس کردن شیب پله‌ها و ایجاد یک لایه بتن روی پله‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. چانسون (Chanson, 1993) در آزمایشگاه با بررسی ویژگی‌های جریان و اتلاف انرژی در جریان‌های بدون هوادهی عبوری از سرریز پلکانی و اثر ورود هوا بر جریان‌ها نشان داد که دو نوع رژیم جریان ریزشی و سطحی رخ می‌دهد. در هر دو نوع رژیم، طراحی سرریز پلکانی روش مؤثری برای استهلاک بخش زیادی از انرژی جریان تا ۹۹ درصد هد کل موجود است. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داده است که شرایط جریان روی سرریزهای پلکانی با ورود هوا تحت تأثیر قرار می‌گیرد و حضور هوا، ضرایب اصطکاک جریان‌های هوادهی شده

دبی‌های کوچک‌تر ممکن است موجب ناپایداری جریان شود. واسریچ و چانسون (Wuthrich & Chanson, 2014) عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی-گابیونی را با دو نوع پیکربندی در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بوده است که برای دبی‌های کوچک (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله کمتر از ۰/۳) جریان ریزشی مشاهده نمی‌شود و تنها از طریق فضای بین سنگ‌ها در گابیون‌ها نشت می‌کند. در دبی‌های بزرگ‌تر (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله بیشتر از ۰/۹) رژیم‌های جریان ریزشی، انتقالی و سطحی مشاهده می‌شود. پیش‌تر اشاره شد که سرریزهای پلکانی به دلیل نوع عبور جریان از آن نقش مؤثری بر اندازه و هزینه سازه حوضچه آرامش پایین‌دست دارند. نظر به اینکه یکی از راهکارهای افزایش تداخل تیغه‌های ریزشی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی و تغییر در میزان استهلاک انرژی در این نوع از سرریزها، ایجاد کنگره روی پلکان‌هاست، هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر هندسه کنگره‌ها بر تغییرات افت انرژی در دامنه شیب‌های مختلف، زبری سطوح پلکان و رژیم‌های مختلف جریان است.

مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

پارامترهای مختلفی بر میزان افت نسبی انرژی (R_L) در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای تأثیر گذارند که مهم‌ترین آنها تعداد پلکان (N)، ارتفاع پلکان (h)، طول پلکان (l)، هندسه کنگره (x)، اندازه زبری‌ها (k_s)، عمق بحرانی (y_c)، دبی واحد عرض (q)، کشش سطحی سیال (σ)، شتاب ثقل (g)، جرم مخصوص سیال (ρ) و لزوجت دینامیکی سیال (μ)، است (شکل ۱). این پارامترها را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

$$R_L = f_1(N, h, l, x, k_s, y_c, q, \sigma, g, \rho, \mu) \quad (1)$$

جریان عبوری از فضای بین سنگ‌ها و جریان سطحی روی گابیون‌هاست. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که شیب سرریز بر اتلاف انرژی مؤثر و نسبت اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی-گابیونی برای شیب‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۷، ۱۰ و ۱۴ درصد بیشتر است تا در سرریزهای مشابه پلکانی افقی. مقایسه نتایج همچنین نشان داده است که اندازه و شکل سنگ‌ها تأثیر کمی در اتلاف انرژی دارد.

کارلوس و همکاران (Carlos *et al.*, 2008) اثر زبری پله بر مشخصات جریان را با نوع شرایط پله صاف و زبر (سه نوع زبری) به صورت آزمایشگاهی بررسی و مشخصات جریان هوا-آب را برای چند دبی جریان اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است که زبری پله در تمام هندسه‌های استفاده شده اثری بر رژیم‌های جریان ندارد. سلماسی و همکاران (Salmasi, *et al.*, 2010) شرایط هیدرولیکی جریان عبوری از روی پله، تأثیر تخلخل و اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی-گابیونی در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ را بررسی کردند و نشان دادند که در رژیم جریان غیر ریزشی (سطحی) که در دبی‌های بالا اتفاق می‌افتد، سرریزهای پلکانی-گابیونی، نسبت به سرریزهای نفوذناپذیر، افت انرژی بیشتری دارند. همچنین مشاهده شده است که افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها در داخل گابیون تا حدودی به افزایش افت انرژی جریان می‌انجامد. فلدر و چانسون (Felder & Chanson, 2011) تأثیر غیر یکنواختی پله بر شرایط جریان و اتلاف انرژی را با پیکربندی‌های یکنواخت و غیر یکنواخت در آزمایشگاه کردند و نشان دادند که مقدار اتلاف انرژی برای پیکربندی‌های پلکانی غیر یکنواخت و یکنواخت یکسان است و طراحی سرریزهای پلکانی با ارتفاع‌های غیر یکنواخت پله، به افزایش اتلاف انرژی پایین‌دست منجر نمی‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی همچنین نشان داده است که پیکربندی‌های پلکانی غیریکنواخت در

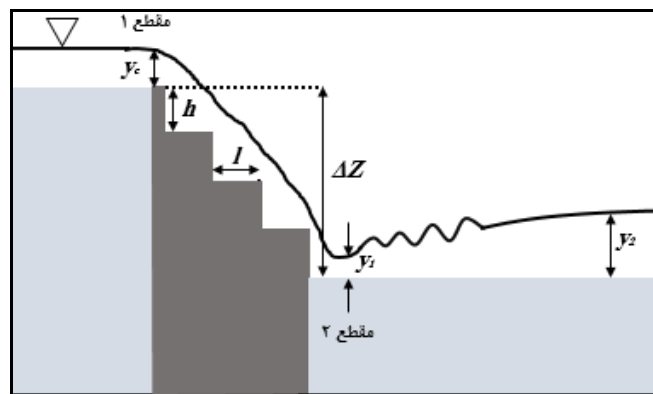
در این تحقیق، مقدار افت نسبی انرژی با برقراری معادله انرژی بین مقاطع قبل و بعد از سرریز (مقاطع ۱ و ۲ در شکل ۱) به صورت رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\Delta ELH = ELH_1 + ELH_2 \quad (2)$$

$$\Delta ELH = 1.5y_c + \Delta Z - (y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^3}) \quad (3)$$

$$R_L = \frac{\Delta ELH}{ELH_1} \quad (4)$$

که در آن،



شکل ۱- نیمرخ طولی سرریز پلکانی و معرفی پارامترهای مؤثر

$$R_L = f_4\left(\frac{h}{l}, \frac{h}{y_c}, \frac{x}{y_c}, \frac{k_s}{h}\right) \quad (6)$$

با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی،

رابطه ۱ به صورت زیر تبدیل می‌شود (رابطه ۵):

$$R_L = f_3(N, \frac{h}{l}, \frac{h}{y_c}, \frac{x}{y_c}, \frac{k_s}{h}, Re, Fr, We) \quad (5)$$

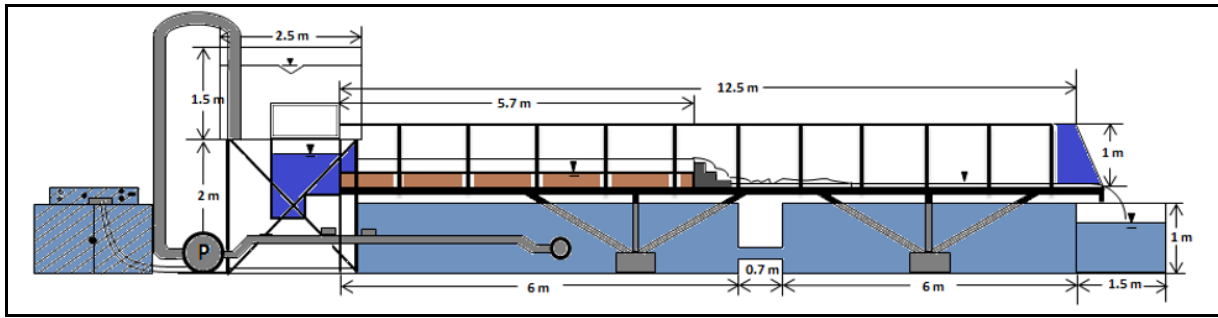
در این تحقیق، رابطه ۶ به عنوان رابطه پایه‌ای برای اجرای آزمایش‌ها به کار گرفته شد.

(ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی شیب‌پذیر با سیستم بازچرخانی به طول ۱۵، عرض ۱/۵ و عمق ۱ متر با دیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی اجرا شد (شکل ۲). برای تأمین جریان، از پمپ سانتریفیوژ مجهز به دستگاه تنظیم دور موتور استفاده شد که قادر به تأمین دبی تا ۹۰ لیتر بر ثانیه بود. جریان با پمپ به مخزن بالادست و پس از آن به مخزن آرام‌کننده ورودی و در ادامه به کانال وارد می‌گردید. به منظور اندازه‌گیری و تنظیم دبی جریان، از دبی‌سنج التراسونیک با دقت ۰/۰۱ ± لیتر بر ثانیه استفاده شد.

که در آن،

$Re = \frac{\rho q}{\mu}$ عدد رینولدز، $Fr = \frac{q}{\sqrt{gy_c^3}}$ عدد فرود و $We = \frac{\sigma y_c}{\rho q^2}$ عدد وبر. با توجه به اینکه عمق جریان در لبه سرریز همواره بیشتر از ۲ سانتی‌متر و جریان عبوری از سرریز همواره آشفته است، نیروهای کششی و لزوجت قابل چشم‌پوشی هستند و همچنین به دلیل آنکه همواره در ورودی سرریز در عمق بحرانی تشکیل می‌گردد، عدد فرود برابر با یک خواهد شد (Subramanya, 1986). با توجه به اینکه تعداد پلکان‌ها (N) در کلیه آزمایش‌ها ۴ است، این پارامتر نیز ثابت در نظر گرفته شده است. در نتیجه، رابطه ۵ به صورت رابطه ۶ ساده می‌شود.



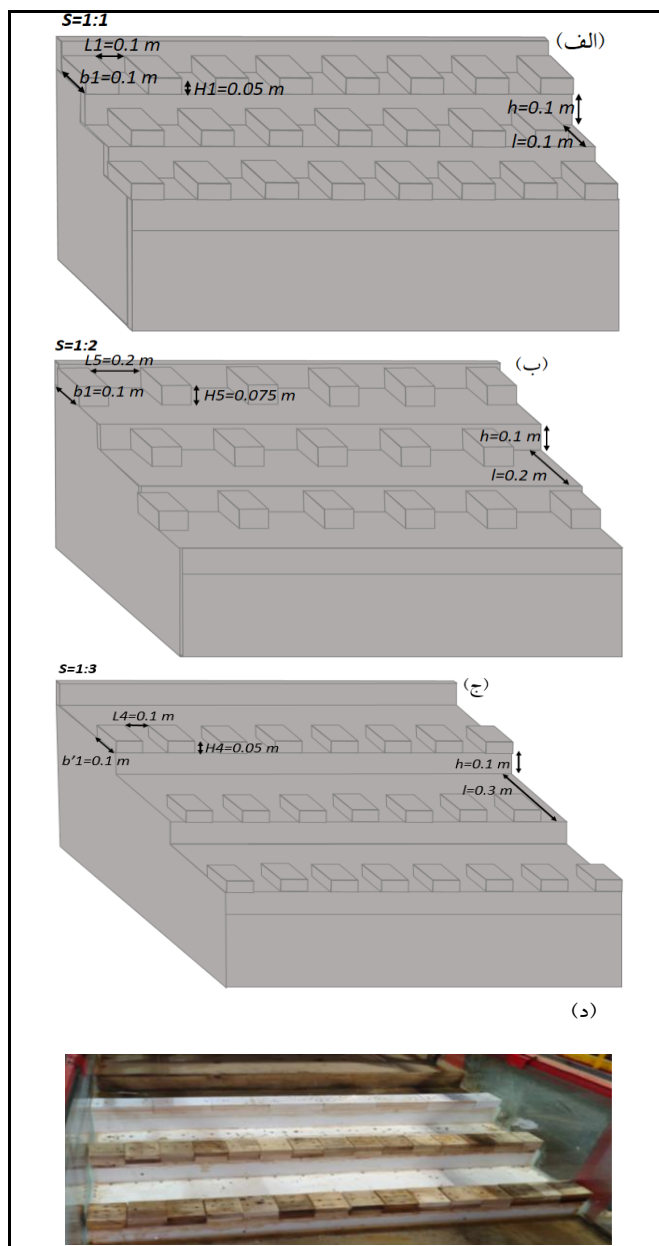
شکل ۲- طرح کلی از کانال آزمایشگاهی

کنگره‌های استفاده شده در این تحقیق با فواصل کارگذاری ۰/۱ و ۰/۲ متر در طول پلکان، ارتفاع‌های ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ متر هستند که با ترکیب‌های متفاوت و در موقعیت‌های کارگذاری مختلف (جدول ۱) روی سطوح پلکان‌ها در سرریزهای مورد مطالعه نصب گردیدند. علاوه بر این، در هر هندسه سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای، با ایجاد سطوحی زیر با اندازه‌های ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ متری تهیه شده از مصالح رسوبی، تأثیر افزایش زبری بر راندمان افت نسبی انرژی سرریز مورد مطالعه بررسی گردید (شکل ۵).

سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق از جنس چوب-پلاستیک در سه شیب کارگذاری ۱:۱ با ارتفاع و طول پلکان ۰/۱ متر، شیب ۱:۲ با ارتفاع پلکان ۰/۱ و طول ۰/۲ متر و شیب ۱:۳ با ارتفاع ۰/۱ و طول پلکان ۰/۳ متر ساخته و در فاصله ۵/۷ متری از ورودی کانال نصب شدند (شکل ۳). در این تحقیق، تأثیر کنگره‌ها با ارتفاع و فواصل کارگذاری مختلف بر تغییرات افت انرژی در سرریزهای پلکانی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۱ و شکل ۴ به ترتیب مشخصات هندسی و تصویری از نمای سه بعدی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد آزمایش آورده شده است.



شکل ۳- تصویرهایی از فلوم آزمایشگاهی و سرریزهای پلکانی



شکل ۴- تصویرهایی از سرریزهای مورد مطالعه

الف) سرریز $S_1H_1L_1b_1$ (ب) سرریز $S_2H_2L_2b_2$ (ج) سرریز $S_3H_3L_3b'_1$ و (د) سرریز $S_3H_3b'_1$



شکل ۵- تصویرهایی از زبری‌های به‌کاربرده شده روی سطوح سرریزها

الف) زبری 0.002 متر، ب) زبری 0.004 متر و ج) زبری 0.006 متر

در این تحقیق در مجموع ۴۴۴ آزمایش برای شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی اجرا شد که دامنه آنها در جدول ۱ آورده شده است. در هر آزمایش پس از نصب کنگره‌ها روی سرریزهای پلکانی، عمق جریان در فاصله بیش از ۴ برابر عمق بحرانی در بالادست سرریز با استفاده از عمق‌سنج دیجیتال با دقت ± 0.1 میلی‌متر قرائت شد.

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد مطالعه

شماره سرریز	فاصله کنگره (L, متر)	ارتفاع کنگره (H, متر)	طول کنگره (b, متر)	اندازه زبری (k _s , متر)	دامنه دبی (متر مکعب بر ثانیه)
S ₁	.	.	.	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s1}}	.	.	.	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s2}}	.	.	.	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s3}}	.	.	.	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1H₁L₁b₁}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s1}H₁L₁b₁}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s2}H₁L₁b₁}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s3}H₁L₁b₁}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1H₂L₂b₁}	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s1}H₂L₂b₁}	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1H₃L₃b₁}	۰/۲	۰/۰۷۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{1k_{s1}H₃L₃b₁}	۰/۲	۰/۰۷۵	۰/۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S ₂	.	.	.	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s1}}	.	.	.	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s2}}	.	.	.	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s3}}	.	.	.	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2H₁L₁b₂}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s1}H₁L₁b₂}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s2}H₁L₁b₂}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s3}H₁L₁b₂}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2H₂L₂b₂}	۰/۲	۰/۰۵	۰/۲	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s1}H₂L₂b₂}	۰/۲	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2H₃L₃b₂}	۰/۲	۰/۰۷۵	۰/۲	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2k_{s1}H₃L₃b₂}	۰/۲	۰/۰۷۵	۰/۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2H₄L₄b₁}	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{2H₅L₅b₁}	۰/۲	۰/۰۷۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S ₃	.	.	.	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3k_{s1}}	.	.	.	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3k_{s2}}	.	.	.	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3k_{s3}}	.	.	.	۰/۰۰۶	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₁L₁b₁}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₂L₂b₁}	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₃L₃b₂}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₄L₄b'₁}	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₅L₅b'₁}	۰/۱	۰/۰۷۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₆L₆L'₆b'₁}	پله اول و سوم ۰/۲ پله دوم ۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸
S _{3H₇b'₁}	پله دارای آستانه	۰/۰۵	۰/۱	صاف	۰/۰۲۵ - ۰/۰۸

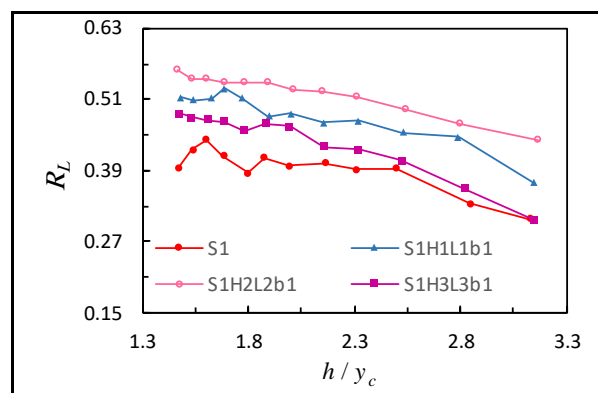
پلکان‌ها، امکان ریزش تیغه‌های جریان در جهت‌های مختلف در طول سرریز فراهم می‌شود. در نتیجه، میزان تداخل جریان در طول سرریز افزایش می‌یابد و مقدار افت انرژی در طول سرریز بیشتر می‌شود. در سرریز با شیب ۱:۱ وقتی کنگره وجود ندارد، تیغه جریان عبوری از روی سرریز پلکانی کاملاً شفاف و بدون هواست در حالی که در شرایط مشابه هیدرولیکی ولی با حضور کنگره، ترکیبی از تشکیل گرمابه‌ها و ریزش جریان در هر پلکان رخ می‌دهد (شکل ۷).

تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که از میان کنگره‌های مختلف مورد بررسی، هندسه $S_1H_2L_2b_1$ (فاصله کارگذاری $2h$ ، ارتفاع $0.5h$ و طول h) با ایجاد متوسط افت نسبی انرژی ۵۲ درصد و متوسط افزایش $12/7$ درصد، نسبت به حالت بدون کنگره، بهترین عملکرد را در افزایش افت انرژی دارد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که با نصب کنگره با ارتفاع $0.5h$ ، افزایش فاصله کارگذاری بین کنگره‌ها از h به $2h$ ، منجر به افزایش میزان افت نسبی انرژی به میزان $3/9$ درصد می‌شود. در فاصله یکسان نصب کنگره‌ها به مقدار $2h$ ، با افزایش ارتفاع کنگره از 0.5 به 0.75 ارتفاع پله، میزان افت نسبی انرژی به میزان $4/3$ درصد کاهش می‌یابد.

عمق آب در پایین‌دست سرریز و بعد از تشکیل پرش هیدرولیکی نیز با استفاده از عمق سنج با دقت ± 0.1 میلی‌متر قرائت و با استفاده از رابطه تئوری پرش هیدرولیکی کلاسیک، عمق اولیه پرش هیدرولیکی محاسبه گردید. از نیمرخ سطح آب نیز در همه آزمایش‌ها تصویربرداری شد تا رفتار جریان تحلیل شود.

نتایج و بحث

در شکل ۶، نمودار اثر ایجاد کنگره بر افت نسبی انرژی (R_L) در مقابل (h/y_c) برای سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ نشان داده شده است. در شیب ۱:۱، بر اساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان در سرریزهای پلکانی، رژیم جریان سطحی در $h/y_c < 1/25$ ، رژیم جریان انتقالی در $1/25 < h/y_c < 1/82$ و رژیم ریزشی در $h/y_c > 1/82$ شکل می‌گیرد (Khatsuria, 2005). مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان می‌دهد که روی سرریز S_1 ، رژیم جریان عبوری در $h/y_c > 1/9$ به صورت ریزشی و در مقادیر کمتر h/y_c (دبی‌های بیشتر از 0.055 مترمکعب بر ثانیه بر متر) ابتدا جریان انتقالی و سپس جریان سطحی مشاهده گردید. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که با ایجاد کنگره روی



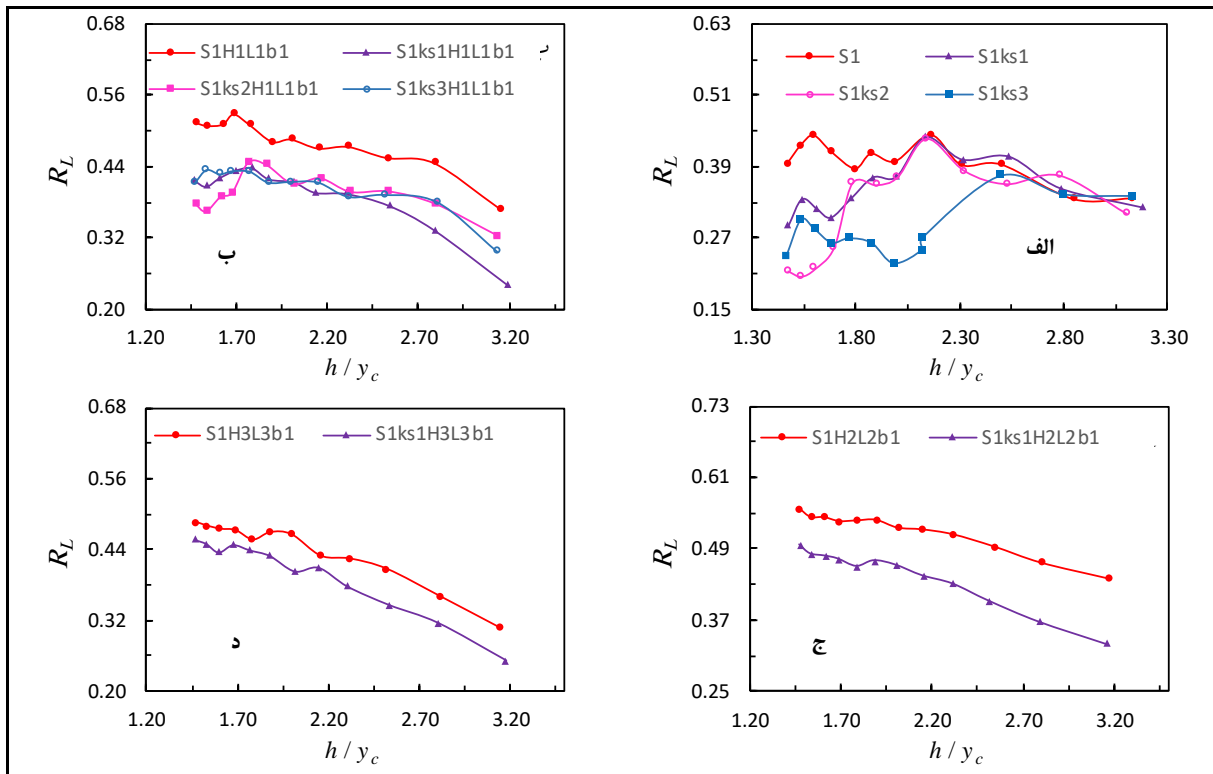
شکل ۶- تأثیر ایجاد کنگره بر سرریز پلکانی بر افت نسبی انرژی در شیب ۱:۱



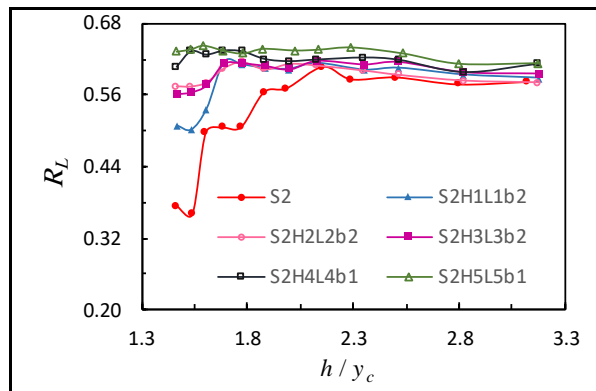
شکل ۷- الف) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز $S_1H_1L_1b_1$ در $h/y_c=1.5$ و ب) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز $S_1H_1L_1b_1$ در $h/y_c=1.5$

نتایج افت نسبی انرژی (R_L) در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ در شکل ۹ ارائه شده است. در سرریز با شیب ۱:۲ جریان سطحی در $h/y_c < 1/0.5$ و جریان انتقالی در $1/43 < h/y_c < 1/0.5$ و جریان ریزشی در $h/y_c > 1/43$ رخ می‌دهد (Khatsuria, 2005).
مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در $h/y_c > 1/9$ رژیم جریان تشکیل شده به صورت ریزشی است و با افزایش دبی ($h/y_c < 1/9$) حفره‌های زیر تیغه ریزشی شروع به پر شدن می‌کنند و با تغییر رژیم جریان به انتقالی، جریان چرخشی در این حفره‌ها تشکیل می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که به طور کلی نصب کنگره بر این شیب از سرریز پلکانی افت نسبی انرژی را به طور متوسط ۷/۸ درصد افزایش می‌دهد. با نصب کنگره با هندسه $S_2H_1L_1b_2$ افت نسبی انرژی ۵/۵ درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش می‌یابد و به ۵۸ درصد می‌رسد. این روند افزایشی در کنگره‌های $S_2H_2L_2b_2$ ، $S_2H_3L_3b_2$ ، $S_2H_4L_4b_1$ و $S_2H_5L_5b_1$ به ترتیب برابر ۶/۷، ۷/۲، ۹/۳ و ۱۰/۵ درصد به دست آمده است.

در شکل ۸، تأثیر ایجاد زبری بر افت نسبی انرژی (R_L) در سرریزهای پلکانی با و بدون کنگره در شیب ۱:۱ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه زبری در محدوده h/y_c های کمتر از ۲/۵، افت نسبی انرژی با افزایش مقدار زبری کاهش می‌یابد ولی با افزایش نسبت h/y_c (کاهش دبی واحد عرض جریان از ۰/۳ مترمکعب بر متر بر ثانیه)، زبری اثر محسوسی بر افت انرژی ندارد. در شرایط رژیم جریان انتقالی و تقریباً سطحی در سرریزهای پلکانی، جریان چرخشی در فضای بین پلکان‌ها علت اصلی افت انرژی است. در نتیجه، با افزایش زبری سطوح پلکان‌ها از قدرت جریان چرخشی کاسته و راندمان سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در افزایش افت انرژی کم می‌شود. برای نمونه، دیده شده که در سرریز $S_1H_1L_1b_1$ با اعمال زبری k_{s1} ، k_{s2} و k_{s3} میزان افت نسبی انرژی نسبت به حالت صاف به طور متوسط ۸/۴ درصد کاهش یافته است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که روند کاهش افت انرژی با اعمال زبری در سایر کنگره‌ها مشابه است.



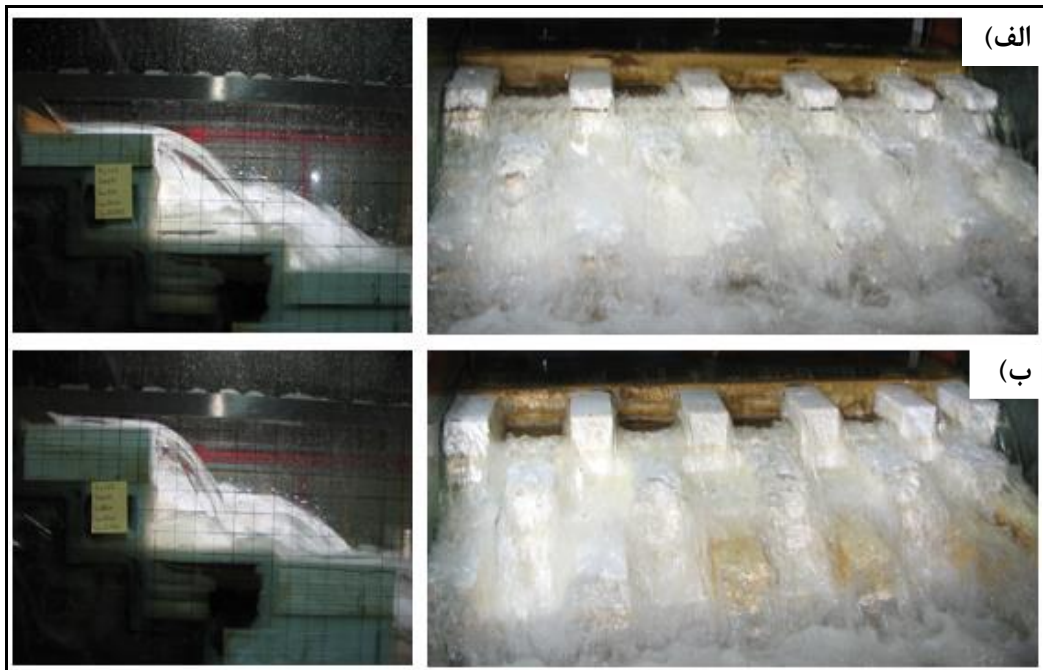
شکل ۸- مقایسه تأثیر زبری بر افت نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی- کنگره‌ای با شیب ۱:۱
 (الف سرریز S_1 ب) سرریز $S_{1H1L1b1}$ ج) سرریز $S_{1H2L2b1}$ د) سرریز $S_{1H3L3b1}$



شکل ۹- مقایسه تأثیر ایجاد کنگره بر افت نسبی انرژی در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع کنگره‌ها در فاصله یکسان $2h$ ، طول تیغه‌های ریزشی در جهت جریان افزایش و در دیگر جهت‌ها (عرض پله) کاهش می‌یابد. در نتیجه تداخل تیغه‌های ریزشی کاهش و میزان افزایش افت انرژی تغییر محسوسی نمی‌کند (شکل ۱۰).

مقایسه نتایج حاکی از آن است که با افزایش فاصله کنگره‌ها از h به $2h$ و در ارتفاع کنگره $0.5h$ میزان افت انرژی ۱/۳ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در فاصله یکسان کنگره‌ها ($2h$) و افزایش ارتفاع از 0.5 به 0.75 ارتفاع پله، میزان افت نسبی انرژی کمتر از ۱ درصد افزایش می‌یابد.



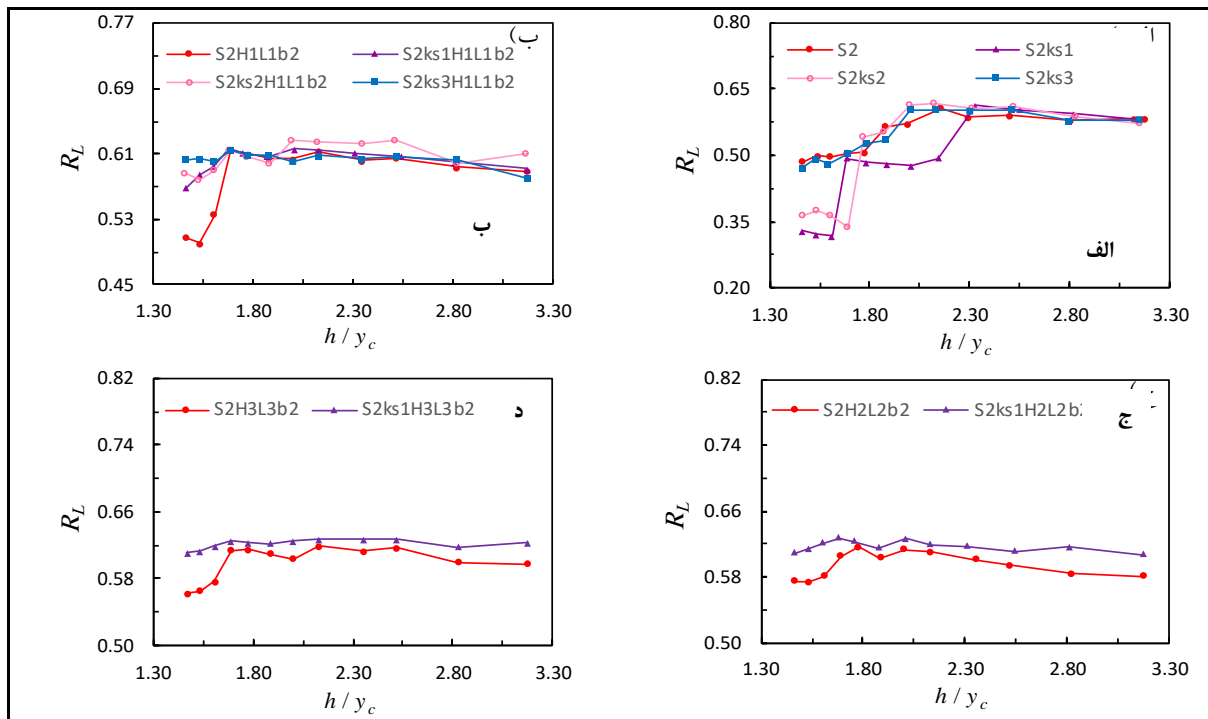
شکل ۱۰- الف) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز $S_2H_2L_2b_2$ در $h/y_c=3.2$ و

ب) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز $S_2H_3L_3b_2$ در $h/y_c=3.2$

به میزان ۲/۱ درصد می‌شود. مقایسه نتایج اثر زبری بر سطوح سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای با هندسه‌های مختلف کنگره در شیب ۱:۲ نشان می‌دهد که به‌طور کلی زبری منجر به افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. با توجه به رژیم جریان حاکم در این سرریز و گسترش حفره مثلی و جریان چرخشی در بین لبه‌های پلکان، در شرایط اعمال زبری بر سطوح سرریز و کنگره‌ها، آشفتگی ظاهری در جریان بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان افت انرژی افزایش می‌یابد. برای نمونه، در سرریز پلکانی-کنگره‌ای $S_2H_1L_1b_2$ اعمال زبری‌های مختلف به‌طور متوسط ۲-۳ درصد افت نسبی انرژی را نسبت به حالت صاف افزایش می‌دهد و این روند افزایش افت انرژی در دیگر هندسه‌ها نیز مشاهده شده است.

در شکل ۱۱ تأثیر ایجاد زبری بر افت نسبی انرژی (R_L) در سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در شیب ۱:۲ آورده شده است.

مقایسه نتایج حاکی از آن است که برای سرریز پلکانی بدون کنگره (شکل ۱۱- الف) در محدوده $2/3 < h/y_c < 3/1$ زبری اثر محسوسی بر افت انرژی ندارد و در مقادیر کمتر h/y_c (دبی واحد عرض بیشتر از 0.27 مترمکعب بر ثانیه بر متر) با اعمال زبری افت نسبی انرژی کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه زبری‌ها مقدار کاهش افت نسبی انرژی کمتر می‌شود به‌گونه‌ای که اعمال زبری k_{s1} و k_{s2} به ترتیب ۴/۵ و ۱/۵ درصد افت نسبی انرژی را نسبت به حالت بدون زبری کاهش می‌دهند و زبری k_{s3} با بزرگ‌ترین قطر، باعث افزایش افت نسبی انرژی

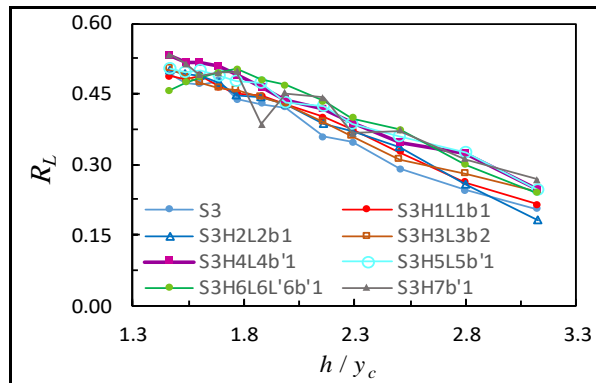


شکل ۱۱- مقایسه تأثیر زبری بر افت نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی - کنگره‌ای با شیب ۱:۲

(الف سرریز S_2 ، ب) سرریز $S_2H_1L_1b_2$ ، ج) سرریز $S_2H_2L_2b_2$ و د) سرریز $S_2H_3L_3b_2$

ریزش (برای نمونه هندسه‌های $S_3H_4L_4b_1$ و $S_3H_1L_1b_1$) فراهم آمده است. در این شرایط، گزینه‌های قرارگیری کنگره‌ها هم لبه با وجه پایین دست نسبت به سایر گزینه‌ها با متوسط افزایش افت نسبی انرژی ۴ درصد، عملکرد مناسب‌تری دارند. در کنار هندسه‌های مختلف کنگره، ایجاد آستانه روی لبه پلکان (شکل ۱۳) با عرض h و ارتفاع $0.5h$ نیز بررسی شد که به‌طور متوسط به افزایش ۴ درصد در افت نسبی انرژی انجامید. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که نصب آستانه‌ها به تشکیل پرش هیدرولیکی و جریان چرخشی در ناحیه پای هر پلکان منجر می‌شود. در نمودار شکل ۱۴، اثر ایجاد زبری بر افت نسبی انرژی (R_L) در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی اعمال زبری اثر محسوسی بر میزان افت نسبی انرژی ندارد. با توجه به اینکه رژیم جریان در این سرریز ریزشی و فاقد جریان گردابه‌ای در حفره بین پله‌هاست، ایجاد سطوح زبر بر رژیم جریان و افت نسبی انرژی تأثیرگذار نبوده است.

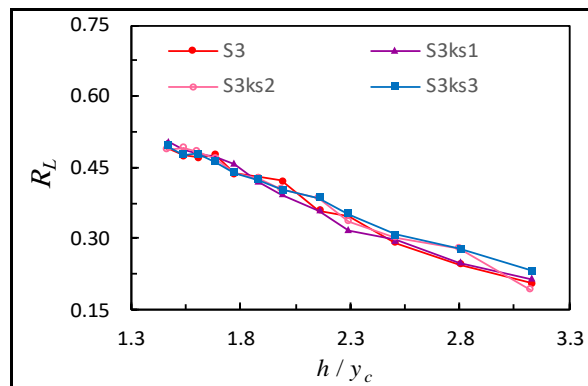
در شکل ۱۲، تأثیر ایجاد کنگره بر افت نسبی انرژی (R_L) برای سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ نشان داده شده است. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده رژیم‌های جریان در شیب ۱:۳ در $0.97 < h/y_c < 1.25$ انتقالی و برای $h/y_c > 1.25$ ریزشی است (Khatsumia, 2005). نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در سرریز با شیب ۱:۳، جریان سطحی تشکیل نمی‌شود. در محدوده $h/y_c > 1/8$ (محدوده دبی واحد عرض $0.17/0.37 - 0$) رژیم جریان به‌صورت ریزشی رخ می‌دهد و با کاهش نسبت h/y_c به کمتر از $1/8$ ، شرایط جریان انتقالی شکل می‌گیرد. مقایسه نتایج افت نسبی انرژی در شیب ۱:۳ حاکی از آن است که در شرایط بدون کنگره (سرریز S_3) متوسط افت نسبی انرژی ۳۹ درصد است. با نصب کنگره بر این سرریز، به‌طور متوسط افت نسبی انرژی ۳ درصد افزایش می‌یابد. در این هندسه، به‌دلیل طول ۳ برابر ارتفاع پلکان‌ها، امکان کارگذاری کنگره‌ها به‌صورت چسبیده به وجه بالادست پله و یا هم لبه با وجه لبه



شکل ۱۲- مقایسه اثر ایجاد کنگره بر افت نسبی انرژی در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳



شکل ۱۳- نمای روبه‌رو و نیمرخ سرریز پلکانی-کنگره‌ای S3H7b'1



شکل ۱۴- مقایسه تأثیر زبری بر افت نسبی انرژی در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳

حداکثر افت ۶۴ درصد از میان تمام هندسه‌های مورد مطالعه مناسب‌ترین عملکرد را دارد. بررسی مقادیر افت‌های نسبی نشان می‌دهد که ایجاد کنگره در سرریز با شیب ۱:۱، نسبت به شیب ۱:۳، به افزایش بیشتر استهلاک انرژی می‌انجامد. بنابراین، این هندسه با توجه به طول کمتری که نسبت به شیب ۱:۳ دارد، از نظر هیدرولیکی و اقتصادی گزینه‌ای مناسب‌تر برای احداث خواهد بود.

در جدول ۲، مقادیر افت نسبی انرژی برای سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای در حالت صاف آورده شده است. مشاهده می‌شود که از میان هندسه‌های مختلف مورد بررسی، سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ مناسب‌ترین عملکرد را دارد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای S3H2L2b1 و S2H5L5b1 با افت نسبی انرژی ۱۸ و ۶۱ درصد به ترتیب کمترین و بیشترین میزان حداقل افت نسبی را دارند. سرریز S2H5L5b1 با ایجاد

جدول ۲- مقادیر افت انرژی در سرریزهای مورد مطالعه

شماره سرریز	حداقل افت نسبی انرژی (درصد)	متوسط افت نسبی انرژی (درصد)	حداکثر افت نسبی انرژی (درصد)
S ₁	۳۱	۳۹	۴۴
S ₁ H ₁ L ₁ b ₁	۳۷	۴۸	۵۳
S ₁ H ₂ L ₂ b ₁	۴۴	۵۲	۵۶
S ₁ H ₃ L ₃ b ₁	۳۱	۴۴	۴۹
S ₂	۴۹	۵۵	۶۱
S ₂ H ₁ L ₁ b ₂	۵۰	۵۸	۶۱
S ₂ H ₂ L ₂ b ₂	۵۷	۵۹	۶۲
S ₂ H ₃ L ₃ b ₂	۵۶	۶۰	۶۲
S ₂ H ₄ L ₄ b ₁	۶۰	۶۲	۶۳
S ₂ H ₅ L ₅ b ₁	۶۱	۶۳	۶۴
S ₃	۲۱	۳۹	۴۹
S ₃ H ₁ L ₁ b ₁	۲۱	۴۰	۴۹
S ₃ H ₂ L ₂ b ₁	۱۸	۴۰	۵۰
S ₃ H ₃ L ₃ b ₂	۲۴	۴۰	۵۰
S ₃ H ₄ L ₄ b' ₁	۲۵	۴۳	۵۳
S ₃ H ₅ L ₅ b' ₁	۲۵	۴۳	۵۱
S ₃ H ₆ L ₆ L' ₆ b' ₁	۲۴	۴۳	۵۰
S ₃ H ₇ b' ₁	۲۷	۴۳	۵۳

نتیجه‌گیری

می‌شود. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که ایجاد کنگره در سرریز ۱:۲ نیز باعث افزایش افت نسبی انرژی می‌گردد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کنگره‌هایی با طول h در این شیب با ایجاد متوسط افزایش افت نسبی انرژی ۹/۹ درصد عملکرد مؤثرتری نسبت به کنگره‌هایی با طولی برابر $2h$ (برابر با طول پله) دارند. بررسی‌ها همچنین نشان داده است که ایجاد زبری بر این سرریز در حالت بدون کنگره باعث کاهش افت نسبی انرژی و در حالت کنگره‌ای باعث افزایش ۲-۳ درصد در میزان افت نسبی انرژی می‌گردد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نصب کنگره بر سرریز پلکانی با شیب ۱:۳، افت نسبی انرژی را به‌طور متوسط ۳ درصد افزایش می‌دهد. کنگره‌های نصب شده به‌صورت هم لبه با وجه پایین دست پلکان‌ها عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر گزینه‌ها دارد. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که ایجاد آستانه یکپارچه روی لبه پلکان ($S_3H_7b'_1$) با

در این تحقیق تأثیر تغییر شیب، ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۷۵ و ۰/۵ ارتفاع پله، فواصل کارگذاری h و $2h$ و طول‌های مختلف، اعمال زبری‌های با متوسط قطر ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ متر بر افت نسبی انرژی در سرریز پلکانی با شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ بررسی شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در سرریز با شیب ۱:۱، ایجاد کنگره با افزایش متوسط افت انرژی به میزان ۸/۶ درصد موجب بهبود عملکرد سازه نسبت به حالت بدون کنگره شده است. در این شیب از سرریز پلکانی-کنگره‌ای، هندسه $S_1H_2L_1b_1$ با ایجاد افت نسبی انرژی به میزان ۵۲ درصد و ۱۲/۷ درصد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون کنگره مناسب‌ترین عملکرد را از بین کنگره‌های مورد بررسی دارد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ایجاد زبری در این شیب در تمامی هندسه‌ها باعث کاهش افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون کنگره

ایجاد افت نسبی ۴۳ درصد و افزایش افت ۴ درصد زبری تأثیری محسوس بر افت انرژی در سرریزهای مورد
مؤثرترین هندسه در این شیب است و نیز اینکه ایجاد بررسی در این شیب ندارد.

مراجع

- Azizi, A., Meftah, H. M. Ahmadi, M. Z. and Golmayie, S. A. 2008. Evaluating the affection of used material porosity on energy dissipation in gabion stepped weirs. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 15(1): 150-158.
- Carlos, A., Gonzalez, M., Takahashi, M. and Chanson, H. 2008. An Experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. *J. Hydraul. Res.* 46(1): 24-35.
- Chamani, M. R. and Rajaratnam, N. 1994. Jet flow on stepped spillways. *J. Hydraul. Eng.* 120(2): 254-259.
- Chanson, H. 1993. Stepped spillway flows and air entrainment. *Can. J. Civil Eng.* 20(3): 422-435.
- Chinnarasri, C., Donjadee, S. and Israngkura, U. 2008. Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. *J. Hydraul. Eng.* 134(8): 871-872.
- Ebrahimi, N., Kashefipoor, M. and Ebrahimi, K. 2005. Evaluating the hydraulic flow characteristics on the model of stepped Gabion weirs. *Proceedings of the Fifth Conference of Iranian Hydraulic Association. Shahid Bahonar University of Kerman. Nov. 8-10. Kerman, Iran. (in Persian)*
- Essery, I. T. S., and Horner, M. W. 1971. *The hydraulic design of stepped spillways, Rep. 33. Construction Industry Research Information Associate. London, U.K.*
- Felder, S. and H. Chanson. 2011. Energy dissipation down a stepped spillway with non-uniform step height. *J. Hydraul. Eng.* 137(11): 543-548.
- Khatsuria, R. M. 2005. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipaters. Marcel Dekker, New York.*
- Meftah-Halaghi, M. and Bayat, H. 2008. Energy loss on stepped gabion weirs. *Proceeding of the 3rd Conference of Watersheds, Soil and Water Resources Management. Shahid Bahonar University of Kerman. Jan. 10-12. Kerman, Iran. (in Persian)*
- Moore, W. L. 1943. Energy loss at the base of a free overfall. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 108(1): 1343-1360.
- Novak, P., Maffat, A. I. Nalluri, C. and Narayanan, R. 1990. *Hydraulic Structures. The Academic Division of Uniwin Ltd.*
- Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G. 1991. Flows and dissipation of energy on gabion weirs. *J. La Houille Blanche.* 1, 34-47.
- Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *J. Hydraul. Eng.* 118(2): 707-717.
- Salmasi, F., Farsadizade, D. and Mohit, H. 2010. Experimental evaluation of energy dissipation over gabion stepped spillway. *J. Water Soil Sci.* 21(2): 152-164.
- Subramanya, K. 1986. *Flow in Open Channel. Second Ed. Tata McGraw-Hill, New Delhi.*
- Wuthrich, D. and Chanson, H. 2014. Air entrainment and energy dissipation on gabion stepped weirs. *J. Hydraul. Eng.* 140(9): 04014046.

Experimental Investigation of Energy Dissipation over Stepped-Labyrinth Weirs

M. Keshavarz-Eskandari and M. Esmaeili-Varaki*

*Corresponding Author: Associate Professor, Water Engineering Department, Agricultural Faculty, and Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

Received: 20 October 2017, Accepted: 13 May 2018

Flow water passing through spillways of dams has a high level of kinetic energy, which can lead to extensive damage to downstream facilities and bring about severe erosion of river beds. Energy dissipation would usually be accomplished by creating structures such as still basins at downstream of weirs, flip buckets, or steps in weirs. Stepped spillways are one of the common structures for energy dissipation, as well as reduction of the dimensions of still basins. The effects of labyrinths on total energy dissipation at downstream of the stepped spillways with slopes of 1:1, 1:2 and 1:3 was investigated; the height of labyrinths was 0.5 and 0.75 of the height of steps (h), working interspaces were equal to two times of the height of steps, and three roughness heights on the step face were 0.002, 0.004 and 0.006 m. The results showed that in first case, 1:1 slope of the stepped spillway, a labyrinth with height of 0.5h, working interspaces of 2h and equal length of the steps caused an increase of 12.7 percent in dissipation of relative energy. The comparison of results showed that for slope of stepped weir of 1:2, installation of a labyrinth with a height of 0.75h, interspaces of 2h and equal length to the height of the steps, the relative energy dissipation increased by 8.4 percent. When stepped weirs with slopes equal to 1:3 were used, results indicated that installation sill with a length h, a height of 0.5h instead of labyrinths on steps, caused an increase of 4.7 percent in relative energy dissipation. Result showed that increase surface roughness of studied weirs reduced the relative energy dissipation by 3.6 percent.

Keywords: Energy Dissipation, Flow Regime, Labyrinth Weir, Roughness, Stepped Weir