

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی اثر اندازه دانه بندی مصالح سنگی بر میزان تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی

منصور ترکمن سرابی^۱، سید حسین رجائی^{۲*}، حمید رضا گل کار حمزی یزد^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۴

چکیده

در این مقاله موضوع تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی و اثر اندازه دانه بندی مصالح سنگی بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. مدل های آزمایشگاهی سرریزهای به کار رفته با مقیاس $L_r = \frac{1}{5}$ برای حالت ۲ و ۳ پله به ترتیب دارای ارتفاع ۴۰ و ۶۰ سانتی متری ساخته شد. مصالح سنگی به صورت سنگ های گرد گوشه از منابع قرضه بر اساس مقیاس مدل با اندازه های ۴، ۶ و ۸ سانتی متر معادل اندازه متعارف سنگ های به کار رفته در سازه های گابیونی تهیه شد. مدل ها در فلولم هیدرولیکی به عرض ۵۰ سانتی متر با ظرفیت دبی تا ۶۵ لیتر بر ثانیه نصب گردید. نتایج تحقیق نشان داد، تلفات انرژی در سنگ هایی با قطر ۴ سانتی متر بیشتر از سایر موارد است. همچنین با افزایش تعداد پله از ۲ به ۳ پله در سرریزهای گابیونی، بازده تلفات انرژی افزایش می یابد. در کلیه موارد با افزایش دبی عبوری بازده تلفات انرژی در این سرریزها کاهش می یابد. ساخت سرریزهای پلکانی گابیونی حداکثر تا ۳ پله باعث افزایش بازده تلفات انرژی در محیط آزمایشگاه و به تبع آن در طبیعت خواهد شد.

واژه های کلیدی: تلفات انرژی، دانه بندی، سرریز پلکانی گابیونی، طراحی هیدرولیکی

مقدمه

سازه به درستی مشخص نیست، بنابراین در این تحقیق تأثیر نوع و اندازه دانه بندی بر میزان افت انرژی در سرریزهای گابیونی پلکانی مورد بررسی قرار می گیرد. در سال های اخیر اغلب پژوهش های صورت گرفته در خصوص سرریزهای پلکانی به شکل آزمایشگاهی و با ساخت مدل های متنوعی از آن انجام شده است. سرریزهای پلکانی را می توان به لحاظ شکل اجرایی و هیدرولیکی آن، به سرریزهای پلکانی کوتاه و بلند دسته بندی نمود. تفاوت عمده سرریزهای پلکانی کوتاه و بلند بیشتر در تعداد پله، جنس بدنه، ارتفاع سرریز و میزان دبی عبوری است. به طوری که برای سرریز سدهای بزرگ به دلیل تعداد پله ها زیاد، بدنه صلب (بتنی، سنگ و سیمان) و همچنین ارتفاع سد و دبی عبوری که معمولاً در دوره بازگشت های بلند مدت اتفاق می افتد، رژیم جریان در سه حالت ریزشی، انتقالی و رویه ای قابل مشاهده است. در وضعیت جریان رویه ای، پلکان معمولاً نقش بستر زبر را ایفا می کند (Chamani and Rajaratnam, 1999)، (Chanson and Toombes, 2004) و (Renna et al., 2011). در صورتی که در سرریزهای گابیونی کوتاه جریان عبوری، شرایط تشکیل و تفکیک سه حالت فوق را نمی یابد. به عنوان مثال در تشکیل جریان رویه ای لازم است لایه ی مرزی از ابتدای سرریز توسعه یافته و به سطح جریان برسد که این شرایط معمولاً در ۲ تا ۳ پله اول رخ نمی دهد

سازه های آبی بسته به نوع کاربرد به انواع سازه های ذخیره ای، کنترلی، حفاظتی، سازه های انتقال و توزیع دسته بندی می شوند. این دسته بندی فارغ از جنس مصالح صرفاً بر اساس کاربرد سازه در یک طرح آبی - خاکی بیان شده است. در فرم دیگری از دسته بندی با توجه به جنس مصالح نام گذاری هایی نظیر سازه های بتنی، سنگ و سیمانی، خاکی، گابیونی و ... انجام می شود. یکی از شکل های سازه ای که با توجه به نوع مصالح در دسترس و کم هزینه بودن، در طیف گسترده ای از اهداف اجرایی مورد استفاده قرار می گیرد، سازه های گابیونی هستند. در این پژوهش سعی شده با توجه به تعدد اجرای سازه های گابیونی در پروژه های مهندسی آب نسبت به شناخت ویژگی های هیدرولیکی سرریزهای گابیونی پلکانی اقدام شود. موضوع افت انرژی در این نوع

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فردوس
 - ۲- دکتری علوم و مهندسی آب- سازه های آبی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
 - ۳- استادیار گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فردوس
- (*)- نویسنده مسئول: (Email: h.rajaei@areeo.ac.ir)

(Chanson, 2004), (Hunt et al., 2010a & 2010b). اولین تحقیقات را استفسون با مدل آزمایشگاهی به مقیاس ۱:۱۰ برای یک سرریز پلکانی ۴ متری و پله‌هایی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه طراحی نمود. وی نشان داد شیب بدنه سرریز در بالادست بر تلفات انرژی مؤثر بوده و با کاهش این شیب، افت انرژی نیز کاهش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد پله تا ۳ پله موجب افزایش تلفات انرژی می‌شود و در نهایت سرریزهای گابیونی به‌طور متوسط ۱۰ درصد تلفات انرژی بیشتری نسبت به سرریزهای صلب ایجاد می‌کنند (Stephenson, 1979). پیراس و همکاران هیدرولیک جریان روی سرریزهای گابیونی پلکانی را در چهار حالت؛ سرریز پلکانی ساده بدون پوشش حفاظتی، سرریز پلکانی با پوشش حفاظتی روی سطح افقی پله‌ها، سرریز پلکانی با پوشش روی سطح پله با شیب سطح منفی و سرریز پلکانی با آستانه انتهایی در لبه پله را برای شیب‌هایی با نسبت‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ مورد بررسی قرار دادند. بر اساس تحقیقات آن‌ها سرریز گابیونی پلکانی به نسبت سرریزهای پلکانی با مصالح صلب ۱۰ درصد افت انرژی بیشتری دارد و کم کردن شیب پائین‌دست سرریز موجب افزایش افت انرژی می‌شود. همچنین شیب معکوس سطح پله و اجرای آستانه انتهایی در جریان ریزشی موجب بهبود تشکیل پرش هیدرولیکی می‌گردد (Peyras et al., 1992). کیلز با مقیاس آزمایشگاهی $L_r = \frac{1}{8}$ مدل‌هایی از سرریز پلکانی گابیونی با ۳ پله را با شیب پائین‌دست به مقیاس ۱:۱ و ۱:۲ (قائم به افق) را مورد بررسی قرار داد. همچنین با پوشش‌دار کردن بخشی از سطوح پلکان در هر یک از این دو شیب، چهار حالت دیگر را ایجاد نمود. این حالت‌ها عبارت است از؛ گابیون ساده بدون پوشش، گابیون با پوشش نفوذناپذیر در وجه قائم بالادست، گابیون با پوشش نفوذناپذیر در وجه بالادست و تاج هر پله و گابیون با پوشش نفوذناپذیر در تاج پله‌ها. برای اولین بار کیلز موضوع جریان از داخل بدنه سرریزهای گابیونی را بررسی نمود و نشان داد جریان در داخل بدنه سرریز گابیونی از معادله دارسی برای محیط‌های متخلخل پیروی نمی‌کند. همچنین تفکیک جریان درون‌گذر و روگذر در سازه‌های گابیونی جهت تحلیل هیدرولیکی لازم است. وی نشان داد جریان درون‌گذر نقش مهمی در افزایش تلفات انرژی دارد (Kells, 1993). کاظمی نسبان و شفاعی بجستان (۱۳۷۶) ضمن بررسی میزان استهلاک انرژی در سرریزهای گابیونی در سه شیب مختلف، رابطه‌ای برای شیب پله پایین‌دست ۱:۳،۵ ارائه کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد؛ افزایش عدد شیب‌شکن (آبشار) موجب کاهش درصد تلفات انرژی می‌شود، افزایش تعداد پله‌ها تا ۳ عدد موجب افزایش تلفات انرژی و پس از آن، این روند کاهش می‌یابد، جریان ریزشی تلفات بیشتری دارد، شیب ملایم پایین‌دست تلفات انرژی بیشتری دارد و افزودن آستانه انتهایی موجب افزایش تلفات انرژی می‌شود. ابراهیمی

و همکاران (۱۳۸۴) با انجام سه مدل آزمایشگاهی در حالت‌های گابیون ساده، گابیون با صفحه نفوذناپذیر قائم و گابیون با صفحه نفوذناپذیر افقی روی سطح پله و در سه شیب مختلف پائین‌دست ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ موضوع تلفات انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد؛ حداقل سرعت پایاب در مدل با شیب پائین‌دست ۱:۳ مشاهده شد. کاهش شیب پائین‌دست موجب افزایش افت انرژی می‌شود. افزایش دبی موجب کاهش درصد تلفات انرژی خواهد شد. صفحات نفوذناپذیر قائم در بالادست موجب افزایش افت انرژی خواهد شد. کمترین میزان افت انرژی در مدل با شیب ۱:۲ مشاهده شد. عزیزی و همکاران (۱۳۸۷) موضوع تخلخل مصالح مورد استفاده در سازه‌ی گابیونی و اثر آن بر میزان استهلاک انرژی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که؛ افزایش تخلخل سازه موجب کاهش تلفات انرژی می‌شود. افزایش دبی عبوری از روی سرریز موجب کاهش درصد تلفات انرژی می‌شود. همچنین جریان روگذر افت انرژی بیشتری نسبت به جریان درون‌گذر دارد و کاهش شیب پایین‌دست سازه موجب افزایش میزان افت انرژی می‌شود. مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۸۸) به‌کارگیری صفحات نفوذناپذیر را در داخل سرریز گابیونی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که افزایش ارتفاع صفحه موجب افت انرژی بیشتر در سازه خواهد شد. سلماسی، فرسادی‌زاده و محیط (۱۳۹۰) در یک تحقیق آزمایشگاهی میزان تلفات انرژی در سازه‌های گابیونی با ۳ پله و در چهار حالت؛ ۱. سازه بدون حفاظت، سازه با دیوار نفوذناپذیر قائم، سازه با دیوار نفوذناپذیر افقی و سازه با ترکیب دیوار نفوذناپذیر افقی و قائم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نتایج نشان داد تفاوت معنی‌داری بین چهار حالت مختلف آزمایش وجود ندارد و تنها در حالت سازه با ترکیب دیوار نفوذناپذیر افقی و قائم، استهلاک انرژی تا حدودی کمتر از سایر موارد است. همچنین در تمام موارد افزایش دبی موجب کاهش درصد تلفات انرژی خواهد شد. چناراسری و همکاران به بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی و تأثیر پارامترهایی نظیر شیب سرریز، تعداد پله، قطر سنگ‌ها و عدد شیب‌شکن (عدد آبشار $(\frac{q^2}{gH})$) بر افت انرژی پرداختند. با توجه به نتایج ارائه شده در گزارش، سرریزهای گابیونی در مقایسه با سرریزهای صلب حدود ۱۰ درصد تلفات انرژی بیشتری ایجاد می‌کنند، تأثیر قطر سنگ‌ها بر میزان تلفات انرژی اثبات نشد و همچنین اثر تعداد پله و عدد آبشار در تلفات انرژی سازه‌های گابیونی مشاهده نشد (Chinnarasri et al., 2008). داتراک در بحثی پیرامون مقاله چناراسری و همکاران تنها رابطه‌ی پیشنهادی وی را با نمودار جدیدی اصلاح نمود (Dhatrak, 2009). سلماسی، چمنی و فرسادی‌زاده (۲۰۱۲) ضمن مقایسه‌ی کارهای سلماسی و همکاران (۱۳۹۰) با نتایج کارهای پیراس و همکاران (Peyras et al., 1992)، کیلز

(Kells, 1993) و چیناراسری (Chinnarasri, 2008) در خصوص میزان تلفات انرژی مطابقت خوبی را بین نتایج کار سلماتی و همکاران با نتایج کارهای پیراس و کیلز نشان دادند. نظری و غلامی (۲۰۱۴) ضمن بررسی آزمایشگاهی سرریزهای پلکانی گابیونی، وضعیت تلفات انرژی و همچنین نرخ برداشت رسوبات در پنجه سرریز را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از سه مدل آزمایشگاهی دارای ۴ پله به ارتفاع ۱۰ سانتی متر استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که؛ میزان تلفات انرژی رابطه مستقیمی با عمق جریان پایین دست (TW) دارد، میزان تلفات انرژی رابطه معکوسی با دبی جریان در کانال دارد، میزان آب شستگی پای سرریز رابطه مستقیمی با (TW) دارد، میزان آب شستگی با میزان دبی جریان در کانال رابطه معکوس دارد و پارامتر عمق جریان در کانال پایین دست (TW) در میزان تلفات انرژی و میزان آب شستگی پایین دست سرریز از اهمیت بیشتری برخوردار است. وودریچ و چانسون در پژوهش خود با انجام یک سری آزمایش در خصوص سرریز پلکانی گابیونی با تعداد ۱۰ پله در چهار حالت بررسی خود را انجام دادند؛ سرریز پلکانی به صورت بدنه صلب غیر گابیونی (مدل ۱)، سرریز پلکانی به صورت گابیونی با قرار دادن یک باکس گابیونی روی هر پله در مرحله قبل (مدل ۲)، قرار دادن پوشش نفوذناپذیر در سطح پله در ۹ پله‌ی پایین دست (مدل ۳) و قرار دادن پوشش نفوذناپذیر بر روی تمام ۱۰ پله (مدل ۴). در پژوهش آن‌ها سعی شده است در هر یک از حالت‌های چهارگانه فوق انواع رژیم جریان روی سرریز پلکانی شامل جریان ریزشی (Nappe Flow)، جریان انتقالی (Transition Flow) و جریان رویه‌ای (Skimming Flow) در دبی‌های مختلف تفکیک شود. نتایج نشان داد بیشترین میزان افت انرژی به ترتیب مربوط به مدل ۴، ۳، ۲ و ۱ است و در هر حالت گابیونی، افت انرژی از حالت سرریزهای صلب ناتراوا بیشتر است (Wuthrich and Chanson, 2014). پاگلریا و همکاران در بررسی ساختار هیدرودینامیکی و فرساینده‌ی سازه‌های مستهلک کننده انرژی مدل سرریز گابیونی با سه پله را به عنوان یکی از مدل‌های آزمایشگاهی خود مورد ارزیابی قرار دادند. مقایسه انجام شده در تحقیق آن‌ها بین سازه‌های خشکه چین و گابیونی انجام شد (Pagliara et al., 2015). زانگ و چانسون در خصوص موضوع اختلاط هوا در جریان عبوری از سرریزهای گابیونی و تعیین سطح جریان روی سرریز و جریان درون گذر از داخل گابیون مطالعات تکمیلی انجام دادند. همچنین ضریب اصطکاک داری وایسباخ برای جریان مخلوط آب و هوا در سرریز گابیونی و سرریز صلب برای دو فرم رژیم جریان انتقالی و رویه‌ای را مورد بررسی قرار دادند (Zhang and Chanson, 2016). رجائی و همکاران (۱۳۹۶). اثر تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی با توجه به کاربرد آن در بندهای انحرافی و سازه‌های اصلاحی را بررسی نمودند. نتایج تحقیق

آن‌ها نشان داد فرم سازه‌های پلکانی گابیونی در حالت دو و سه پله بر اساس دبی عبوری به طور متوسط ۱۶٫۹ و ۱۶٫۳ درصد تلفات انرژی را نسبت به سازه‌های صلب بیش تر می‌کند. همچنین افزایش دبی جریان عبوری درصد تلفات انرژی را کاهش می‌دهد. روند نتایج سازه‌ی گابیونی با یک پله را نمی‌توان به صورت سرریز پلکانی تحلیل نمود. افزایش تعداد پله‌ها به ۲ و ۳ پله موجب افزایش تلفات انرژی می‌شود. تأثیر پله دوم در میزان افزایش تلفات انرژی نسبت به پله سوم بیش تر است و علت این امر می‌تواند به دلیل تشکیل رژیم جریان ریزشی بر روی پلکان باشد. در تحقیق رجائی و همکاران (۱۳۹۶). ب) بررسی وضعیت تلفات انرژی در حالت سرریزهای پلکانی گابیونی بدون انباشتگی رسوبات و با انباشتگی رسوبات در بالادست سازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد، جریان درون گذر در سازه‌های گابیونی نقش مهمی در تلفات انرژی دارد. افزایش دبی و افزایش عدد شیب‌شکن در حالت جریان درون گذر در سرریزهای گابیونی بدون رسوب موجب افزایش بازده تلفات انرژی تا حدود ۷۵ درصد تلفات انرژی می‌شود. آن‌ها در تکمیل تحقیقات خود سعی کردند با ارائه رابطه مناسب میزان تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی به صورت تابعی از عدد شیب‌شکن و تعداد پله ارائه کنند. همچنین بر اساس نظر آن‌ها عملکرد گابیون‌های دارای یک پله بیشتر به صورت یک شیب‌شکن خواهد بود (Rajaei et al., 2019). سوابق تحقیق در خصوص سرریزهای پلکانی با مصالح گابیونی نشان می‌دهد برخی تحقیقات موجود در راستای توسعه‌ی کاربرد سرریزهای پلکانی در سدهای بزرگ انجام شده است. مثلاً در مدل‌سازی آزمایشگاهی کارهای چیناراسری (Chinnarasri, 2008)، وودریچ و چانسون (Wuthrich and Chanson, 2014) و زانگ و چانسون (Zhang and Chanson, 2016) تعداد پله‌ها زیاد در نظر گرفته شده است. متأسفانه با استفاده از ضوابط و معیارهای طراحی سازه‌های یکپارچه صلب برای سرریزهای گابیونی به دلیل ساختار متفاوت بدنه اشکالات عمده‌ای را برخی طرح‌های اجرا شده، به وجود آورده است. در سرریزهای گابیونی کوتاه علاوه بر شرایط محیط متخلخل بدنه‌ی سازه، محدود بودن تعداد پله که به طور عمده ۲ تا ۳ پله را شامل می‌شود شرایط متفاوتی را نسبت به سازه‌هایی با محیط یکپارچه (صلب) ایجاد می‌کند. تأثیر نوع دانه بندی (اندازه دانه بندی سنگ‌ها) بر میزان افت انرژی در سرریزهای گابیونی پلکانی، بر اساس تشابه هیدرولیکی بین پروتوتیپ و مدل ساخته شده در آزمایشگاه از اهداف این تحقیق است.

مواد و روش‌ها

سرریزهای گابیونی پلکانی اغلب در سازه‌های کوتاه نظیر

فلوم آزمایشگاهی از نوع بدنه شیشه‌ای بر روی شاسی فولادی با طول مفید ۱۱ متر (عمق ۱ متر در طول ۴ متر اولیه و ۰/۵ متر در ادامه‌ی کانال)، عرض ۵۰ سانتی‌متر، مخزن به حجم ۸ مترمکعب، سیستم ایجاد هد ثابت با کمک مخزن ذخیره (سرج تانک) در ابتدای کانال، قابلیت شیب‌پذیری بین ۰/۵- تا ۲/۵ درصد توان تولید دبی حداکثر ۶۵ لیتر بر ثانیه را دارد. شکل ۲ نمایی از وضعیت فلوم را نشان می‌دهد.

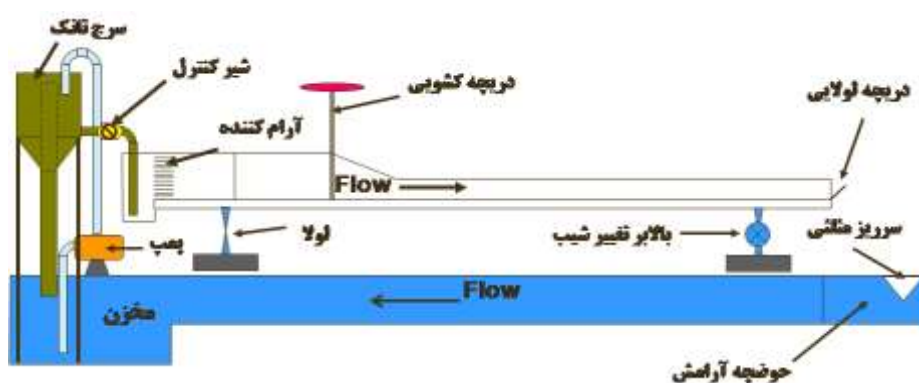
بر اساس اصول مدل‌سازی هیدرولیکی، سعی شد مدل آزمایشگاهی نمونه‌ای مناسب از پروتوتیپ باشد. در مرور منابع گذشته موضوع مقیاس مدل (Lr) آزمایشگاهی و رابطه‌ی آن با مقیاس پروتوتیپ در مقاله‌های مربوط به تحقیقات استفنسون (Stephenson, 1979)، پیراس و همکاران (Peyras et al., 1992) و رجائی و همکاران (۱۳۹۶-۲۰۱۹) مطرح شده است. در این تحقیق‌ها پروتوتیپ به‌عنوان یک سازه‌ی اجرایی دارای ۴ پله است.

بندهای انحرافی و سازه‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سرریزها به‌طور معمول به تعداد ۱، ۲ و ۳ پله با ارتفاع متوسط ۱ متر در طبیعت ساخته می‌شوند شکل ۱ سازه سرریز گابیونی با دو پله را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سازه سرریز گابیونی با دو پله

مراحل آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی انجام شده است.



شکل ۲- نمای کلی فلوم هیدرولیکی

مورد استفاده در این تحقیق و ابعاد معمول سازه‌های گابیونی اجرا شده در طبیعت، مقیاس مدل در این تحقیق $Lr = \frac{1}{5}$ انتخاب گردید. از آن جایی که معمولاً ارتفاع پله‌های اجرایی در طبیعت (پروتوتیپ) ۱ متر و شیب بدنه در پایین‌دست ۱:۱ انتخاب می‌شود، بنابراین بر اساس تشابه فرودی، ارتفاع پله‌ها در مدل ۲۰ سانتی‌متر به دست خواهد آمد. مطابق رابطه ۱ دبی مدل را نیز بر اساس تشابه فرودی به دست آمده است.

(۱)

$$\left. \begin{aligned} Q_r &= L_r^{5/2} \\ q_r &= \frac{Q_r}{L_r} = L_r^{3/2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_r = \frac{q_m}{q_p} = 0.20^{1.5} \Rightarrow q_p = 11.18 q$$

در رابطه فوق، q دبی در واحد عرض و اندیس‌های m و r به

در کار استفنسون مقیاس مدل $Lr = \frac{1}{10}$ و در کار پیراس و

همکاران (۱۹۹۲) و رجائی و همکاران (۱۳۹۶) $Lr = \frac{1}{5}$ انتخاب شده

است. در اغلب پژوهش‌ها به بحث مدل‌سازی هیدرولیکی و رعایت تشابه هندسی و نیز به تناسب ابعاد سنگ‌ها بین مدل (m) و پروتوتیپ (P) اشاره‌ای نشده است. بر اساس مشاهدات میدانی، سازه‌های گابیونی اغلب با سنگ‌هایی به ابعاد ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر پر می‌شوند. بنابراین با توجه به معیارهای مدل‌سازی هیدرولیکی انواع سازه‌ها در مجاری روباز می‌توان بر مبنای تشابه فرودی مقیاس مدل را تعیین نمود. این مقیاس بر اساس توصیه‌های چانسون برای مدل‌سازی سرریزهای پلکانی می‌تواند تا $Lr = \frac{1}{10}$ انتخاب شود (Chanson, 2001). بنابراین با در نظر گرفتن شرایط ابعادی فلوم

سنگ‌های به کار رفته در مدل نیز با قطر ۴ تا ۸ سانتی‌متر انتخاب شده که در طبیعت (پروتوتیپ) معرف سنگ‌هایی با قطر ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر است. با توجه به شبیه‌سازی‌های فوق و در نظر گرفتن امکانات و قابلیت‌های فلوم آزمایشگاهی، آزمایش‌ها بر روی دانه‌بندی با سایزهای ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر و با تعداد ۲ و ۳ پله انجام شد. شکل‌های ۳ و ۴ نمایی از سرریزهای گابیونی ۲ و ۳ پله را نشان می‌دهد.

ترتیب معرف پروتوتیپ، مدل و نسبت تشابه هستند. با توجه به رابطه ۱ و همچنین قابلیت دبی حداکثر فلوم برای عرض ۵۰ سانتی‌متر، دبی در واحد عرض پروتوتیپ مطابق رابطه ۲ قابل شبیه‌سازی است.

$$q_m = \frac{Q_m}{b_m} = \frac{65 \times 10^{-3}}{0.5} = 0.13 \frac{m^3}{m.s} \Rightarrow q_p = 1.453 \frac{m^3}{m.s} \quad (2)$$

نکته حائز اهمیت آن است که، این دبی بیش از دبی طراحی در بیشتر سازه‌های گابیونی موجود در عرصه‌های اجرایی است.



شکل ۳- نصب مدل سرریز گابیونی ۲ پله در فلوم آزمایشگاهی



شکل ۴- نصب مدل سرریز گابیونی ۳ پله در فلوم آزمایشگاهی

هیدرولیکی سرریز گابیونی پلکانی بازده افت انرژی (η) در سازه‌های گابیونی تابعی از پارامترهای بدون بُعدی برای محاسبه بازده افت انرژی (η) به دست آمد. با توجه به مرور تحقیقات گذشته می‌توان گفت در یک سرریز گابیونی پلکانی، متغیرهای دبی در واحد عرض (q)، ارتفاع پلکان (H)، شتاب ثقل (g)، شیب بدنه سرریز در پایین‌دست (i) و تخلخل مصالح بدنه (n) مؤثر است. بنابراین تحلیل به صورت رابطه ۳ خواهد شد:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 = f(q, H, g, i, n) \quad (3)$$

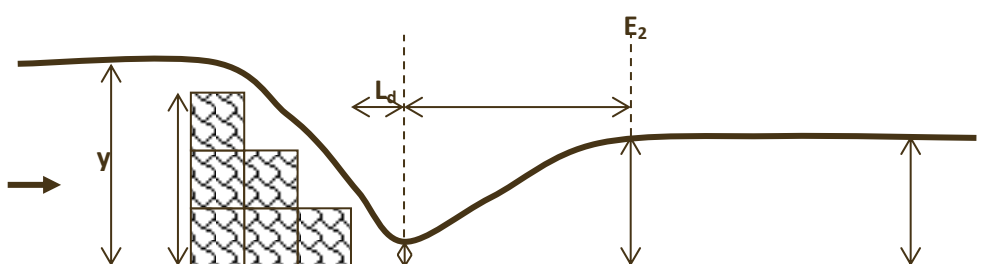
در بین متغیرهای فوق، مقادیر i و n متغیرهای بدون بُعد هستند. بنابراین به عنوان عوامل بدون بُعد پذیرفته می‌شوند. با توجه به تعداد سه متغیر باقی‌مانده که دارای دو بُعد هستند نیاز به یک عامل بدون

با در نظر گرفتن ارتفاع هر پله برابر ۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع سرریز گابیونی پلکانی (H) برای ۲ و ۳ پله به ترتیب برابر ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر خواهد بود. همچنین در هر مرحله از آزمایش مقدار دبی (Q) عمق جریان در بالادست سرریز (y₁)، عمق جریان فوق بحرانی در پایین‌دست سرریز (y₂) و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (y₃) در کانال اندازه‌گیری شده است. دبی کانال به کمک سرریز مثلی انتهای کانال اندازه‌گیری شده و محاسبه‌ی عمق جریان بعد از مدل سرریز به دلیل تلاطم جریان، بر اساس محاسبه‌ی عمق اولیه پرش هیدرولیکی متناظر با (y₂) به دست خواهد آمد. تثبیت پرش در پنج سرریز به کمک دریچه لولایی انتهای فلوم انجام شد. در هر آزمایش انرژی اولیه‌ی جریان (E₁) و انرژی جریان بعد از مدل سرریز (E₂) و میزان تلفات (E) محاسبه گردید. برای تحلیل

با توجه به این که در این تحقیق مدل آزمایشگاهی بر اساس تشابه فرودی مدل سازی شده و ابعاد سنگ ها و تخلخل در طول هر مرحله از آزمایش ها تغییری نکرده و همچنین شیب بدنه سرریز گابیونی در پایین دست مشابه سازه های تیپ و با شیب ۱:۱ اجرا شده است، مقادیر i و n در طول آزمایش ها ثابت خواهد ماند. بنابراین تغییرات بازده تلفات انرژی صرفاً تابعی از عدد شیب شکن خواهد بود. پس از ساخت مدل و نصب آن در فلوم آزمایشگاهی، متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در آزمایش ها مطابق شکل ۵ برداشت شد.

بعد دیگر وجود دارد. پس از محاسبه، متغیر سوم به صورت $\frac{q^2}{gH^3}$ به دست آمد. این عامل در کتاب های هیدرولیکی طراحی شیب شکن ها به نام عدد شیب شکن یا عدد آشمار شناخته می شود. بر این اساس بازده افت انرژی (η) در سازه های گابیونی تابعی از متغیرهای عدد شیب شکن ($\frac{q^2}{gH^3}$)، تخلخل مصالح (n) و شیب پایین دست سازه (i) است (رابطه ۴).

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 = f\left(\frac{q^2}{gH^3}, i, n\right) \quad (4)$$



شکل ۵- متغیرهای اندازه گیری در مدل آزمایشگاهی

$$D = \frac{q^2}{g.H^3} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (11)$$

تعداد کل آزمایش های انجام شده برای هر دو حالت سرریز گابیونی ۲ و ۳ پله با شیب بالادست قائم و شیب پایین دست ۱:۱ برابر ۲۲۰ آزمایش است. شکل های ۶ و ۷ نمونه ای از آزمایش های مربوط به سرریز گابیونی ۲ و ۳ پله را نشان می دهد.

با توجه به شکل ۵ محاسبات مربوط به متغیرهای مختلف از رابطه های ۵ تا ۱۱ به دست می آید:

$$Q = A_1.V_1 = 0.5 \times y_1 \times V_1 \quad (5)$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (6)$$

$$y_1 = \frac{y_2}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1) \quad (7)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (8)$$

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (9)$$



شکل ۶- سرریز گابیونی ۲ پله در فلوم آزمایشگاهی



شکل ۷- سرریز گابیونی ۳ پله در فلوم آزمایشگاهی

به صورت نمایه (اندیس) قرار می‌گیرد. به عنوان مثال مدل $G_{3,4}$ مربوط به آزمایش سرریز گابیونی پلکانی با سه پله و دانه‌بندی با قطر ۴ سانتی‌متر است. جدول ۲ نام‌گذاری آزمایش‌های انجام شده به صورت علائم اختصاری را نشان می‌دهد.

به منظور نام‌گذاری هر دسته از آزمایش‌ها از علائم اختصاری استفاده گردید. حرف لاتین G (Gabion) معرف آزمایش‌های پلکان گابیونی است. اعداد تعداد پله (۲ و ۳ پله) و قطر دانه‌بندی (قطرهای ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر) در مدل به ترتیب در سمت راست حرف G و

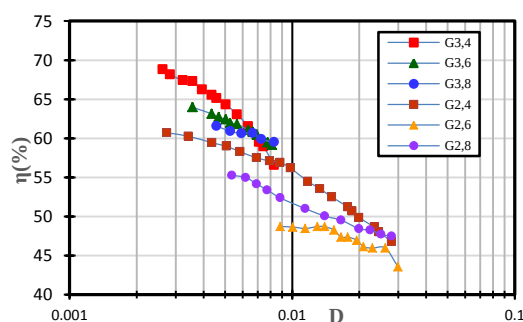
جدول ۲- نام‌گذاری آزمایش‌های انجام شده

ردیف	شرح حالت / مدل	حروف اختصاری
۱	گابیون دو پله با دانه‌بندی به قطر ۴ سانتی‌متر	$G_{2,4}$
۲	گابیون دو پله با دانه‌بندی به قطر ۶ سانتی‌متر	$G_{2,6}$
۳	گابیون دو پله با دانه‌بندی به قطر ۸ سانتی‌متر	$G_{2,8}$
۴	گابیون سه پله با دانه‌بندی به قطر ۴ سانتی‌متر	$G_{3,4}$
۵	گابیون سه پله با دانه‌بندی به قطر ۶ سانتی‌متر	$G_{3,6}$
۶	گابیون سه پله با دانه‌بندی به قطر ۸ سانتی‌متر	$G_{3,8}$

نتایج و بحث

شیب‌شکن (عدد آبشار) است، بنابراین کلیه‌ی شکل‌ها بر اساس این دو متغیر محاسبه و ترسیم شده‌اند. بررسی تغییرات بازده تلفات انرژی در مقابل عدد شیب‌شکن در حالت دو و سه پله با دانه‌بندی‌های ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر برای جریان روگذر در شکل ۸ ارائه شده است.

در این بخش از تحقیق به بررسی تأثیر اندازه سنگ‌ها (دانه‌بندی) بر میزان تلفات انرژی برای جریان روگذر پرداخته می‌شود. با توجه به آن که تحلیل ابعادی نشان می‌دهد بازده تلفات انرژی تابعی از عدد



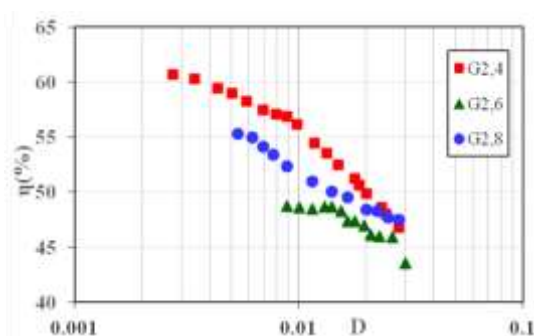
شکل ۸- بازده تلفات انرژی نسبت به عدد شیب‌شکن در حالت دو و سه پله با دانه‌بندی ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر در جریان روگذر

نیز به صورت تفکیک شده قابل مشاهده است. از مقایسه گراف‌های حالت دو پله و سه پله برای دانه‌بندی ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر در جریان روگذر می‌توان نتیجه گرفت که؛ مقادیر تلفات انرژی با افزایش عدد

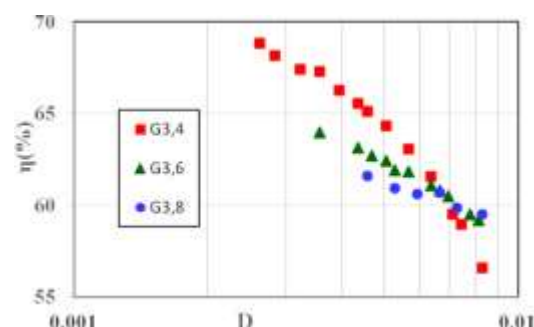
در شکل ۸ علاوه بر اثر اندازه دانه‌بندی، اثر افزایش و یا کاهش تعداد پله نیز به طور هم‌زمان نمایان می‌گردد. این مقایسه علاوه بر شکل ۸ که به صورت تجمعی نشان داده شده در شکل‌های ۹ و ۱۰

سرریز گابیونی پلکانی و نیز با ادامه دار شدن روند افزایش عدد شیب شکن (افزایش دبی)، بازده تلفات انرژی در جریان روگذر به تدریج کاهش یافته است. همچنین گراف های حالت سه پله $G_{3,6}$, $G_{3,4}$ و $G_{3,8}$ از گراف های حالت دو پله $G_{2,6}$, $G_{2,4}$ و $G_{2,8}$ در سطح بالاتری قرار دارند که به صورت مجدد دلیل قبلی در خصوص افزایش بودن درصد بازده تلفات انرژی در مقابل افزایش عدد شیب شکن در جریان های درون گذر و روند کاهشی آن در زمان تبدیل جریان روگذر را نیز برای ارتقاء از پله دوم به پله سوم تأیید می نماید.

شیب شکن برای دانه بندی با اندازه ۴ سانتی متر ($G_{2,4}$ و $G_{3,4}$) در مقایسه با دیگر دانه بندی ها با اندازه های ۶ و ۸ سانتی متر ($G_{2,6}$, $G_{2,8}$, $G_{3,6}$ و $G_{3,8}$) از درصد بازده بالاتری برخوردار است. به عبارت ساده تر با وجود کاهشی بودن روند بازده تلفات انرژی نسبت به افزایش عدد شیب شکن در تمامی گراف ها، مشهود است که این روند به طور استثناء برای گراف های $G_{2,4}$ و $G_{3,4}$ از مقادیر درصد بالاتری در حال شروع به کاهش یافتن است. این امر نشان می دهد که ابتدا در جریان درون گذر با افزایش دبی و به دنبال آن افزایش عدد شیب شکن، اثر بازده تلفات انرژی افزایشی بوده و پس از سرریز شدن جریان از روی



شکل ۹- بازده تلفات انرژی نسبت به عدد شیب شکن در حالت دو پله با دانه بندی ۴، ۶ و ۸ سانتی متر در جریان روگذر

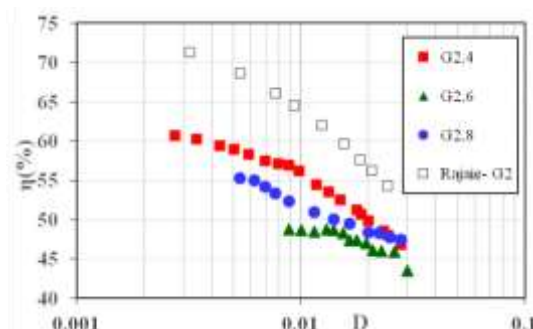


شکل ۱۰- بازده تلفات انرژی نسبت به عدد شیب شکن در حالت سه پله با دانه بندی ۴، ۶ و ۸ سانتی متر در جریان روگذر

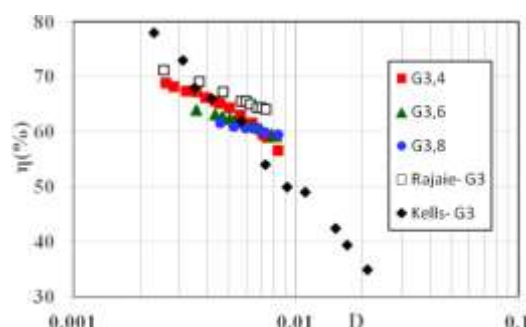
نشان می دهد که نتایج تحقیق حاضر به نتایج تحقیق رجائی و همکاران نزدیک بوده و پایین تر بودن اندک سطح نتایج به دلیل آن است که؛ نوع دانه بندی در تحقیق رجائی و همکاران به صورت مخلوطی از سنگ هایی با اندازه های مختلف انتخاب شده است در حالی که در تحقیق حاضر اندازه دانه بندی در هر حالت ثابت و یکنواخت است (۴، ۶ و ۸ سانتی متر). همچنین در تحقیق آن ها از سنگ های تیز گوشه استفاده شده در حالی که در تحقیق حاضر از سنگ های گرد گوشه استفاده شده است. این امر باعث می شود خطوط جریان در بین سنگ های گرد گوشه آشفتگی کمتری داشته باشد و بنابراین افت انرژی کمتری ایجاد خواهد شد.

به طور کلی تمامی گراف های جریان روگذر، روند کاهشی بازده تلفات انرژی نسبت به افزایش عدد شیب شکن برای گابیون های ۲ و ۳ پله با دانه بندی ۴، ۶ و ۸ سانتی متر را نشان می دهند. در ادامه به دلیل مشابهت نتایج (به لحاظ ابعادی و شرایط آزمایشگاهی) این تحقیق با نتایج تحقیقات کیلز (Kells, 1993) و رجائی و همکاران (۲۰۱۹)، نتایج در قالب شکل های ۱۱ و ۱۲ ارائه و با یکدیگر مقایسه گردید.

با توجه به آن که تحقیقات کیلز (Kells, 1993) بر روی سرریز گابیونی ۳ پله انجام شده، بنابراین در شکل ۱۱ تنها مقایسه نتایج تحقیق رجائی و همکاران (۲۰۱۹) صورت گرفته است. شکل ۱۱



شکل ۱۱- مقادیر بازده تلفات انرژی نسبت به عدد شیب شکن بر روی سرریز گابیونی دو پله با جریان روگذر



شکل ۱۲- مقادیر بازده تلفات انرژی نسبت به عدد شیب شکن بر روی سرریز گابیونی سه پله با جریان روگذر

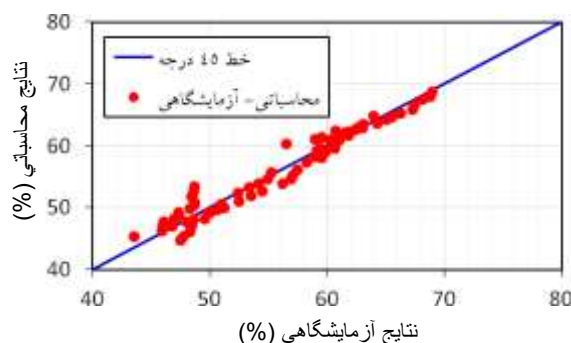
در شکل ۱۲، نزدیکی نتایج تحقیقات کیلز (Kells, 1993) و رجائی و همکاران (۲۰۱۹) با نتایج این تحقیق در حالت سرریز گابیونی ۳ پله بیشتر از نتایج شکل ۱۱ مشهود است. هر چند دلایل مطرح شده در فوق برای شکل ۱۲ نیز قابل تعمیم است ولی اهمیت پله سوم که به عنوان مانعی باعث تلفات انرژی بیشتری نسبت به پله دوم و متعاقب آن کاهش سطح تخلخل شده است را نمی توان، نادیده گرفت. از مقایسه شکل های ۱۱ و ۱۲ می توان گفت در سرریزهای گابیونی پلکانی با ارتقاء پله دوم به پله سوم، آهنگ تغییرات تلفات انرژی با افزایش عدد شیب شکن یک روند افزایشی است. نتایج دیگر محققین از جمله استیونسون (Stephenson, 1979)، رجائی و همکاران (۲۰۱۹) و ... نیز مؤید تأثیر بهینه افزایش تعداد پله ها (حداکثر تا سه پله) بر میزان افزایش تلفات انرژی است.

$$\eta = -6.64 \ln(D) - 11.25 \left(\frac{d_{50}}{h} \right) + 5.326(N) + 14.8 \quad (12)$$

در رابطه فوق، η بازده افت انرژی، D عدد شیب شکن $\left(D = \frac{q^2}{g.H^3} \right)$ ، d_{50} قطر متوسط سنگ ها، h ارتفاع هر پله، N تعداد پله، q دبی در واحد عرض جریان، H ارتفاع کلی سرریز و g شتاب ثقل است.

برای تعیین دقت رابطه تابع ۱۲، ابتدا مقادیر بازده تلفات انرژی (η) به کمک رابطه ۱۲ محاسبه و سپس نتایج آن را می بایست نسبت به مقادیر بازده تلفات انرژی (η) حاصل از آزمایش ها ترسیم نمود. شکل ۱۳ مقایسه نتایج محاسبه پارامتر بازده تلفات انرژی از رابطه ۱۲ با نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد.

به منظور یافتن رابطه مشترک برای تمامی آزمایش های انجام شده در این تحقیق، می بایست مقادیر پارامتر η را تابعی از سه متغیر بدون بعد عدد شیب شکن (D)، تعداد پله (N) و نسبت قطر متوسط سنگ ها به ارتفاع هر پله $\left(\frac{d_{50}}{h} \right)$ در نظر گرفت (



شکل ۱۳- مقایسه نتایج محاسبه پارامتر بازده تلفات انرژی از رابطه ۱۲ با نتایج آزمایشگاهی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق موضوع تأثیر اندازه دانه‌بندی بر تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی (با ۲ و ۳ پله) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی بدین ترتیب است: در سرریزهای گابیونی پلکانی (با ۲ و ۳ پله) با افزایش میزان تخلخل، مقادیر دبی عبوری به‌صورت جریان درون‌گذر افزایش یافته و متعاقب آن بازده افت انرژی نیز کاهش خواهد یافت. در دانه‌بندی با قطر ۴ سانتی‌متر بازده تلفات انرژی به‌مراتب از دانه‌بندی با قطرهای ۶ و ۸ سانتی‌متر بیشتر است (مشروط به ثابت بودن اندازه دانه‌بندی). با افزایش دبی جریان عبوری در سرریزهای پلکانی گابیونی، درصد تلفات انرژی کاهش می‌یابد و با افزایش تعداد پله (حداکثر تا سه پله) در سرریزهای گابیونی پلکانی، بازده تلفات انرژی افزایش می‌یابد. به دلیل نوع جزییات اجرایی مدل (سرریز گابیونی دو و سه پله‌ای) در این تحقیق، کلیه آزمایش‌ها در رژیم جریان ریزشی (Nappe Flow) مشاهده شده است. در سازه‌های گابیونی عمده‌ترین علت افزایش تلفات انرژی وجود جریان درون‌گذر در بدنه سرریز است. این امر در صورت استفاده از مصالح گرد گوشه بیشتر نیز خواهد بود. هم‌چنین پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی؛ انجام آزمایش‌های مشابه برای سرریزهای گابیونی با بدنه شیب‌دار در پایین‌دست، بررسی تأثیر اندازه دانه‌بندی با سنگ‌های تیز گوشه و گرد گوشه به‌صورت مخلوط‌های غیریکنواخت بر میزان بازده تلفات انرژی در سازه‌های پلکانی گابیونی، تعیین آستانه تغییر رژیم جریان از حالت ریزشی به جریان انتقالی و رویه‌ای، بررسی اثر رسوبات با شکل و اندازه غیریکنواخت برای مدل آزمایشگاهی در بالادست سرریز مورد توجه قرار گیرد.

منابع

مفتاح هلقی، م. و بیات، ح. ۱۳۷۵. اثر پلکانی نمودن بالادست سرریزهای توری سنگی بر روی پراکنش انرژی جریان. مجله علمی کشاورزی و منابع طبیعی. ۴: ۵۵-۶۱.

کاظمی‌نسیان، غ. و شفاعی بجستان، م. ۱۳۷۶. بررسی آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی. اولین کنفرانس (اجلاس) ملی هیدرولیک ایران. تهران، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی. ۷۸-۹۶.

ابراهیمی، ن.ق.، کاشفی‌پور، م. و ابراهیمی، ک. ۱۳۸۴. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی مدل سرریز توری سنگی پلکانی. پنجمین کنفرانس (اجلاس) هیدرولیک ایران. خردادماه، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.

چانسون، ه. ۱۳۸۴. هیدرولیک شوت‌ها و سرریزهای پلکانی، ترجمه ابوالفضل شمسایی، فرزاد پاک‌نهاد دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی. ۵۱۸.

عزیزی، ا.، مفتاح هلقی، م.، تبار احمدی، ض. و گلماهی، ح. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر تخلخل مصالح مورد استفاده بر افت انرژی جریان در سرریزهای پلکانی گابیونی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گرگان. ۱۵: ۱۵۰-۱۵۸.

مفتاح هلقی، م.، عزیزی، ا.، دهقانی، ا. و الحسینی، ن. ۱۳۸۸. استهلاک انرژی جریان در سرریزهای پلکانی توری سنگی با به‌کارگیری صفحات نفوذناپذیر. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گرگان. ۱۶: ۲۰۱-۲۳۴.

سلماسی، ف.، فرسادی‌زاده، د. و محیط، ح. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان از روی سرریز گابیونی پله‌ای. نشریه دانش آب و خاک. ۲۱: ۴۰-۱۵۲.

علاسوند، ک.، احدیان، ج. و فتحیان، ح. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر زبری بر روی استهلاک انرژی و سرریزهای گابیونی با استفاده از مدل FLOW-3D. فصلنامه‌ی تخصصی علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان. ۳: ۸۹-۹۷.

رجائی، س.ج.، خداشناس، س.ر. و اسماعیلی، ک. ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی کوتاه و

- Geoplanet, Earth and Planetary Sciences. 1:267-274.
- Renna, F.M., Frantion, U., Takahashi, M., and Ohtsu, I. 2011. Nappe flow over horizontal stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 49, 6: 826-829.
- Salmasi, F., Chamani, M.R and Farsadizade, D. 2012a. Experimental study of energy dissipation over stepped gabion spillways with low heights. *IJST, Transactions of Civil Engineering*. 36.2: 253- 264.
- Pagliara, S., and Palermo, M. 2013. Rock grade control structures and stepped gabion weirs: Scour analysis and flow features. *Acta Geophysica*. 61.1: 126- 150.
- Khatibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M.A., and Asadi, H. 2014. Modelling Energy Dissipation Over Stepped-gabion Weirs by Artificial Intelligence. *Water resources management*. 28.7:1807-1821.
- Nazari, S., and Gholami, R. 2014. Laboratory evaluation of Scour rate and energy dissipation in Gabion Stepped Weirs with considering the effect of Discharge and tail water depth. *Journal of Applied Science and Agriculture*. 9.4:1424- 1439.
- Wuthrich, D., and Chanson, H. 2014b. Hydraulics, Air Entrainment, and Energy Dissipation on a Gabion Stepped Weir". *Journal of Hydraulic Engineering*. 140.
- Peyras, L., Royet Pagliara, S., Palermo, M., Kurdistan, S.M., and Sagvand Hassanabadi, L. 2015. Erosive and hydrodynamic processes downstream of low-head control structures. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. 3.2:122- 131.
- Zhang, G., and Chanson, H. 2016. Gabion Stepped Spillway: Interactions between Free-Surface, Cavity, and Seepage Flows. Technical Note. *Journal of Hydraulic Engineering*. 142.
- Rajaie, S.H., Khodashnas, S.R., and Esmaili, K. 2019. Comparative Evaluation of Energy Dissipation over Short Stepped Gabion and Rigid Spillways. *Journal of Hydraulic Research*. 1- 12.
- مقایسه آن با سرریزهای صلب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱: ۲. ۱۸۱-۱۹۱.
- رجائی، س.ح، خدشناس، س.ر، و اسماعیلی، ک. ۱۳۹۶. تحلیل آزمایشگاهی تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی در شرایط بدون رسوب و با رسوب گذاری در بالادست سازه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱: ۵. ۹۰۰-۹۱۰.
- Kells, J.A. 1993. Spatially varied flow over rockfill embankments. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 20.5:820- 827.
- Kells, J.A. 1994. Energy dissipation at a gabion weir with throughflow and overflow. In *Ann. Conference Can. Soc. Civ. Engrg.*, Winnipeg, Canada, June. 1-4.
- Chamani, M.R., and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 4: 361-368.
- Chanson, H. 2001. Historical development of stepped cascades for the dissipation of hydraulic energy. *Transactions, Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology*. 71.2:295- 318.
- Chanson, H., and Toombes, L. 2004. Hydraulics of stepped chutes: The transition flow. *Journal of Hydraulic Research*, 42, 1: 43-54.
- Hunt, S.L., and Kadavy, K.C. 2010a. Energy dissipation on flat-sloped stepped spillways: Part 1. Upstream of the inception point. *Transactions of the ASABE*. 53, 1: 103-109.
- Hunt, S. L., and Kadavy, K. C. 2010b. Energy dissipation on flat-sloped stepped spillways: Part 2. Downstream of the inception point. *Transactions of the ASABE*. 53, 1: 111-118.
- Shafai Bejestan, M., and Kazemi Nasaban, Gh. 2011. Experimental Study on Gabion Stepped Spillway. *Experimental Methods in Hydraulic Research*

The Effect of Stone Aggregate Size on Energy Loss in Gabion Stepped Spillway

M. Torkaman Sarabi¹, S.H. Rajaei^{2*}, H.R. Gol Kar.H Y³

Recived: Mar.14, 2020

Accepted: May.24, 2020

Abstract

In this paper, the issue of energy losses in Gabion Stepped Spillway and the effect of grain size on stone materials on it have been investigated. Laboratory models of the $L_r = \frac{1}{5}$ scale overflows for steps 2 and 3 were 40 and 60 cm high, respectively. The stone materials were prepared as round stones from borrowed sources based on the scale model with dimensions of 4, 6 and 8 cm, equivalent to the normal size of the stones used in gabion structures. The models were installed in a 50 cm wide hydraulic flow with a discharge capacity of up to 65 liters per second. The results show that energy losses in rocks with a diameter of 4 cm are higher than in other cases. Also, by increasing the number of steps from 2 to 3 steps in Gabion Weirs, the efficiency of Energy losses increases. In all cases, the efficiency of energy losses in these overflows decreases with increasing flow rate. Construction of gabion stairwells up to 3 steps will increase the efficiency of energy losses in the laboratory environment and consequently in nature.

Keywords: Gabion Stepped Spillway, Hydraulic Design, Grading, Energy Loss

1- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Ferdows Branch, Islamic Azad University, Ferdows, Iran

2- Ph.D. in Hydraulic Engineering-Water Structures, Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research and Education Center

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Ferdows Branch, Islamic Azad University, Ferdows, Iran

(* - Corresponding Author Email: h.rajaei@areeo.ac.ir)