

بررسی آزمایشگاهی افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی کوتاه و مقایسه آن با سرریزهای صلب

سید حسین رجائی¹، سعیدرضا خداشناس^{2*}، کاظم اسماعیلی³

تاریخ دریافت: 1395/4/15 تاریخ پذیرش: 1395/10/14

چکیده

سرریزهای پلکانی علاوه بر سازه‌های بلند در بندهای انحرافی و سازه‌های حفاظتی رودخانه‌ها مورد استفاده زیاد قرار می‌گیرند. باتوجه به این‌که سازه‌های گابیونی در بسیاری از موارد به عنوان یک گزینه مناسب و مستقل با ارتفاعی بین 1 تا 3 متر و معمولاً بصورت تیپ ساخته می‌شوند، در این پژوهش تحلیل افت انرژی در این نوع سازه و مقایسه آن با سازه‌های صلب بصورت آزمایشگاهی انجام شده است. بدین منظور سرریزهای صلب و گابیونی با ابعاد هندسی مشابه ساخته و در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض 50 سانتی‌متر و طول 11 متر تحت دبی‌های مختلف بالادست مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد حداکثر راندمان تلفات انرژی در سرریزهای صلب به ترتیب برای حالت یک پله 25/8 درصد، دو پله 56/6 درصد و در حالت سه پله 65/2 درصد به دست آمد. این مقادیر برای حالت گابیونی و به ترتیب از یک تا سه پله معادل 49/9، 71/3 و 73/5 درصد بدست آمده است. این تحقیق نشان داد که سازه‌های پلکانی گابیونی در حالت دو و سه پله بطور متوسط 16/9 و 16/3 درصد راندمان تلفات انرژی را نسبت سازه‌های صلب افزایش می‌دهد. همچنین افزایش دبی جریان عبوری راندمان تلفات انرژی را کاهش داد. علاوه بر این افزایش تعداد پله‌ها موجب افزایش تلفات انرژی شد. تاثیر پله دوم در میزان افزایش راندمان تلفات انرژی نسبت به پله سوم بیش تر بود.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، سرریز پلکانی، سرریز گابیونی، سرریزهای صلب، گابیون

مقدمه

طرح سرریزهای پلکانی به شواهد موجود در نقاط مختلف جهان دارای سابقه طولانی است. این نوع سازه‌ها به دلیل افت انرژی زیادی که در مسیر جریان ایجاد می‌کنند در بسیاری از سازه‌های آبی به کار گرفته می‌شوند. در اواخر قرن بیستم به دلیل گسترش استفاده از بتن غلطکی (RCC)، ساخت سرریزهای پلکانی برای سدهای بلند مورد توجه قرار گرفت و در نتیجه پژوهش‌های گسترده‌ای در این خصوص انجام شده است. یکی از بیش‌ترین کاربردهای سرریز پلکانی که در گذشته نیز مرسوم بوده است استفاده در بندهای انحرافی کوچک و همچنین سازه‌های حفاظتی و تاخیری در آبراهه‌ها و پروژه‌های آبخیزداری است. در بندهای انحرافی که دارای ارتفاع کم هستند، استفاده از سرریز پلکانی کاربرد زیادی دارد. در خصوص مصالح بکار

رفته در این سازه‌ها علاوه بر مصالح صلب نظیر بتن، سنگ و ملات، استفاده از مصالح گابیونی خصوصاً در طرح‌های آبخیزداری کاربرد زیادی دارد. موضوع افت انرژی در این نوع سازه به درستی مشخص نیست بنابراین در این تحقیق وضعیت جریان در سرریزهای گابیونی و مقایسه آن با سازه‌های صلب مورد بررسی قرار گرفت.

پژوهش در خصوص سرریز پلکانی در طی سال‌های اخیر عمدتاً بصورت آزمایشگاهی و ساخت مدل‌های متنوع سرریز پلکانی انجام شده است. در بیش‌تر موارد سرریزهای پلکانی در سازه‌های بلند و با بدنه صلب (بتنی، سنگ و سیمان) مورد بررسی قرار گرفته است. چانسون گزارش کاملی از مبانی هیدرولیکی و طراحی سرریزهای پلکانی صلب را تدوین کرده است (Chanson., 2001). در خصوص بررسی وضعیت سرریز پلکانی در سازه‌های گابیونی تحقیقات محدودتری انجام شده است. در اولین تحقیقات استیونسون از مدل آزمایشگاهی با مقیاس 1:10 استفاده کرد و برای یک سرریز پلکانی 4 متری مدل آزمایشگاهی طراحی نمود. نتایج نشان داد شیب سازه در بالادست بر رژیم جریان از روی سرریز موثر است به نحوی که هر چقدر این شیب کاهش یابد افت انرژی نیز کاهش خواهد یافت. هم-چنین افزایش تعداد پله‌ها تا 3 عدد موجب افزایش افت انرژی می‌شود

1- دانشجوی دوره دکتری رشته علوم و مهندسی آب، سازه‌های آبی، پردیس بین‌الملل دانشگاه فردوسی مشهد
2- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(* - نویسنده مسئول: Email: hodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

تأثیر قطر سنگ‌ها بر میزان تلفات انرژی اثبات نشد و هم‌چنین اثر تعداد پله و هم‌چنین عدد آبشار در تلفات انرژی سازه‌های گابیونی مشاهده نشد (Chinnarasri et al., 2008). داتراک در بحثی پیرامون مقاله چیناراسری و همکاران رابطه‌ی پیشنهادی وی را با نمودار جدیدی اصلاح کرد (Dhatrak., 2009). سلماسی، چمنی و فرسادی‌زاده ضمن مقایسه‌ی کارهای سلماسی و همکاران (1390) 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 سلماسی و همکاران با نتایج کارهای پیراس و کیلز نشان دادند (Salmasi, Chamani and Farsadizade., 2012). سلماسی، ستاری و پال با بررسی نتایج آزمایشگاهی سلماسی و همکاران (1390) و پیراس و همکاران (Peyras, et al., 1992) فرایند تصمیم‌گیری در خصوص میزان تلفات انرژی در مدل‌های مختلف آزمایش شده را در قالب یک شبکه یا درخت تصمیم‌گیری بیان کردند (Salmasi, Sattari and Pal., 2012). نظری و غلامی 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 4 پله به ارتفاع 10 سانتی‌متر استفاده کردند. نتایج نشان داد میزان تلفات انرژی رابطه مستقیمی با عمق جریان پایین‌دست (TW) دارد، میزان تلفات انرژی رابطه‌ی معکوسی با دبی جریان در کانال دارد (Nazari and Gholami., 2014). خطیبی و همکاران با روش شبکه عصبی و هوش مصنوعی سعی کردند رابطه‌ی برای تخمین تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی ارائه دهند (Khatibi et al., 2014). وودریچ و چانسون در پژوهش خود با انجام یک سری آزمایش در خصوص سرریز پلکانی گابیونی با تعداد 10 پله در چهار حالت زیر بررسی خود را انجام دادند. سرریز پلکانی بصورت بدنه صلب غیر گابیونی (مدل 1)، سرریز پلکانی بصورت گابیونی با قراردادن یک باکس گابیونی روی هر پله در مرحله قبل (مدل 2)، قرار دادن پوشش نفوذناپذیر در سطح پله در 9 پله‌ی پایین‌دست (مدل 3) و قرار دادن پوشش نفوذناپذیر بر روی تمام 10 پله (مدل 4) (Wuthrich and Chanson., 2014). 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 4، 3، 2 و 1 است و در هر حالت گابیونی، افت انرژی از حالت سرریزهای صلب ناتراوا بیش‌تر است. در این تحقیق بحث میسوطی در خصوص اختلاط هوا در جریان عبوری سرریز شده است. پاگلریا و همکاران در بررسی ساختار هیدرودینامیکی و فرساینده‌ی سازه‌های

(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 مورد بررسی قرار دادند. بر اساس تحقیقات وی سرریز پلکانی گابیونی به نسبت سرریزهای پلکانی با مصالح صلب بیش از 10 درصد افت انرژی بیش‌تر دارد و کم کردن شیب پایین‌دست سرریز موجب افزایش افت انرژی می‌شود. هم‌چنین شیب معکوس سطح پله و اجرای آستانه انتهایی در جریان ریزشی موجب بهبود تشکیل پرش هیدرولیکی می‌شود (Peyras et al., 1992). شفاعی بجستان و کاظمی نسیان ضمن بررسی میزان استهلاک انرژی در سرریزهای گابیونی در سه شیب مختلف، رابطه‌ی برای شیب پله پایین دست 1:3/5 ارائه کردند (Shafai-Bejestan and Kazemi-Nasaban., 2011). ابراهیمی و همکاران (1384) 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، موضوع تلفات انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که کاهش شیب پایین‌دست موجب افزایش افت انرژی می‌شود، افزایش دبی موجب کاهش راندمان تلفات انرژی خواهد شد و صفحات نفوذناپذیر قائم در بالادست موجب افزایش افت انرژی می‌شود. عزیززی و همکاران (1387) موضوع تداخل مصالح مورد استفاده در سازه‌ی گابیونی و اثر آن بر میزان استهلاک انرژی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که افزایش تداخل سازه موجب کاهش تلفات انرژی می‌شود. مفتاح هلقی و همکاران (1388) بکارگیری 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 (1390) در یک تحقیق آزمایشگاهی میزان تلفات انرژی در سازه‌های گابیونی با 3 پله و در چهار حالت مختلف را مورد بررسی قرار دادند. این چهار حالت عبارتند از سازه بدون حفاظت (G)، سازه با دیوار نفوذناپذیر قائم (GV)، سازه با دیوار نفوذناپذیر افقی (GH) و سازه با ترکیب دیوار افقی و قائم (GHV). نتایج نشان داد تفاوت معنی‌داری بین چهار حالت مختلف آزمایش وجود ندارد و فقط در حالت GHV استهلاک انرژی تا حدودی کم‌تر از سایر موارد بود. چیناراسری و همکاران به بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی و تأثیر پارامترهایی نظیر شیب سرریز، تعداد پله، قطر سنگ‌ها و عدد آبشار یا عدد شیب‌شکن $\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)$ بر افت انرژی پرداختند.

باتوجه به نتایج ارائه شده در گزارش، سرریزهای گابیونی در مقایسه با سرریزهای صلب حدود 10 درصد تلفات انرژی بیش‌تر ایجاد می‌کنند،



شکل 2: سازه سرریز پلکانی صلب (مصالح سنگ و سیمان)

مراحل اجرایی طرح در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی انجام شد. مدل مطالعاتی در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض 50 سانتی متر، طول 11 متر و ارتفاع 1 متری با دبی حداکثر 65 لیتر بر ثانیه انجام شد. شکل 3 وضعیت فلوم مذکور را نشان می‌دهد.

با توجه به این که هدف این تحقیق مقایسه شرایط سرریزهای پلکانی گابیونی در سازه‌های کوتاه بوده است بر اساس اصول مدل‌سازی هیدرولیکی، سعی شد مدل آزمایشگاهی نمونه‌ای مناسب از پروتوتیپ باشد. در مرور تحقیقات گذشته موضوع مقیاس مدل (L_r) آزمایشگاهی و رابطه‌ی آن با پروتوتیپ صرفاً در دو مقاله‌ی مربوط به تحقیقات استیونسون (Stephenson., 1979) و پیراس و همکاران (Peyras et al., 1992) مطرح شده است. در این دو تحقیق پروتوتیپ به عنوان یک سازه‌ی اجرایی دارای 4 پله بوده است. در کار

استیونسون مقیاس مدل $L_r = \frac{1}{10}$ و در کار پیراس $L_r = \frac{1}{5}$

انتخاب شده است. در سایر پژوهش‌ها به بحث مدل‌سازی هیدرولیکی و رعایت تشابه هندسی مدل (m) و پروتوتیپ (P) اشاره‌ای نشده است. نکته‌ی دیگر در خصوص پژوهش‌های انجام شده، عدم اشاره به تناسب ابعاد سنگ‌ها در مدل و سازه‌ی اصلی است. با توجه به نوع سازه‌های گابیونی، ابعاد سنگ‌ها معمولاً بین 20 تا 40 سانتی متر است.

بر اساس معیارهای مدل‌سازی هیدرولیکی سازه‌ها در مجاری روباز بر مبنای تشابه فرودی مقیاس مدل تعیین می‌شود. این مقیاس بر اساس توصیه‌ی چانسون برای مدل‌سازی سرریزهای پلکانی می‌تواند تا

$L_r = \frac{1}{10}$ انتخاب شود (Chanson., 2001). با توجه به شرایط

فلوم بکار رفته در این تحقیق و ابعاد آن و همچنین با توجه به ابعاد معمول سازه‌های گابیونی اجرا شده در عرصه‌های اجرایی، مقیاس

مدل در این تحقیق $L_r = \frac{1}{5}$ انتخاب شد. از آنجا که معمولاً ارتفاع

پله‌های اجرایی در عرصه 1 متر و شیب بدنه در پایین دست 1:1

مستهلک‌کننده 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 خشکه‌چین و گابیونی انجام شد (Pagliaraa et al., 2015). زانگ و چانسون موضوع اختلاط هوا در جریان عبوری از سرریزهای گابیونی و تعیین سطح جریان روی سرریز و جریان درون‌گذر از داخل گابیون را مورد بررسی قرار دادند (Zhang and Chanson., 2016).

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)، وووریچ و چانسون (Wuthrich and Chanson., 2014) و زانگ و چانسون (Zhang and Chanson., 2016). تعداد پله‌ها زیاد در نظر گرفته شده است. استفاده ضوابط و معیارهای طراحی سازه‌های یکپارچه صلب برای سرریزهای گابیونی به دلیل ساختار متفاوت بدنه از اشکالات برخی طرح‌های اجرا شده است. در سرریزهای گابیونی کوتاه علاوه بر شرایط محیط متخلخل بدنه‌ی سازه، محدود بودن تعداد پله که عمدتاً 2 تا 3 پله را شامل می‌شود شرایط متفاوتی را نسبت به سازه‌های با محیط یکپارچه ایجاد می‌کند. شناخت وضعیت افت انرژی در سرریزهای گابیونی کوتاه با توجه به گستردگی کاربرد آن‌ها به کمک مدل ساخته شده بر اساس تشابه هیدرولیکی و مقایسه هم‌زمان با مدل سازه صلب در شرایط یکسان آزمایشگاهی از اهداف این تحقیق است.

مواد و روش‌ها

سرریزهای پلکانی گابیونی که در سازه‌های کوتاه نظیر بندهای انحرافی و سازه‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد بسته به ارتفاع مورد نظر دارای 1، 2 و یا 3 پله با ارتفاع متوسط 1 متری هستند. شکل 1 نمونه‌ای از این سازه‌ها را نشان می‌دهد. شکل شماره 2 نیز یک سرریز پلکانی با بدنه صلب را نشان می‌دهد.



شکل 1- سازه سرریز گابیونی با یک پله

1 و همچنین قابلیت دبی حداکثر فلوم برای عرض 50 سانتی‌متر، دبی در واحد عرض پروتوتیپ تا $q_p = 1.45 \frac{m^3/s}{m}$ قابل شبیه‌سازی است. این دبی بیش از دبی طراحی در عمده‌ی سازه‌های گابیونی موجود در عرصه‌های اجرایی است. هم‌چنین در خصوص سنگ‌های بکار رفته در مدل، باتوجه به مقیاس مدل‌سازی از سنگ‌های با قطر بین 4 تا 8 سانتی‌متر که معرف سنگ‌های با قطر 20 تا 40 سانتی‌متر در پروتوتیپ است استفاده شده است.

می‌باشد بنابراین ارتفاع و طول پله‌ها در مدل 20 سانتی‌متر بدست خواهد آمد.

در خصوص دبی مدل بر اساس تشابه فرودی خواهیم داشت:

$$\left. \begin{aligned} Q_r &= L_r^{5/2} \\ q_r &= \frac{Q_r}{L_r} = L_r^{3/2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_r = \frac{q_m}{q_p} = 0.2^{1.5}$$

$$\therefore q_p = 11.18 q_m \quad (1)$$

در این روابط q دبی در واحد عرض و اندیس‌های P ، m و r به ترتیب معرف پروتوتیپ، مدل و نسبت تشابه هستند. باتوجه به رابطه



شکل 3- فلوم هیدرولیکی آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی



شکل 4- مدل سرریز پلکانی صلب



شکل 5- مدل سرریز پلکانی گابیونی

با توجه به امکانات موجود و قابلیت‌های فلوم آزمایشگاهی دو سری مدل سرریز پلکانی طراحی و ساخته شد. سری اول سرریز پلکانی با ورق‌های فلزی به منظور شبیه‌سازی سازه‌های صلب (S) و سری دوم سرریزهای پلکانی گابیونی (G). شکل‌های 4 و 5 مدل‌های مذکور را نشان می‌دهد.

آزمایش‌های سرریز پلکانی گابیونی و صلب در سه وضعیت 1، 2 و 3 پله انجام شد و ارتفاع هر پله 20 سانتی‌متر بود. بنابراین ارتفاع مدل (H) در سه حالت فوق 20، 40 و 60 سانتی‌متر بدست آمد. در هر آزمایش مقدار دبی (Q)، عمق جریان در بالادست سرریز (d_1)، عمق جریان فوق بحرانی در پایین دست سرریز (d_2) و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (d_3) در کانال اندازه‌گیری شد. دبی کانال به کمک سرریز مثلی انتهای کانال اندازه‌گیری شده و محاسبه‌ی عمق جریان بعد از مدل سرریز به دلیل تلاطم جریان، براساس محاسبه‌ی عمق اولیه‌ی پرش هیدرولیکی متناظر با d_3 بدست آمد. تثبیت پرش در پنجه سرریز به کمک دریچه لولایی انتهای فلوم انجام شد. در هر آزمایش انرژی اولیه‌ی جریان (E_1) و انرژی جریان بعد از مدل سرریز (E_2) و تلفات (E) محاسبه شد.

راندمان افت انرژی (η) در سازه‌های گابیونی تابعی از پارامترهای عدد شیب‌شکن $(\frac{q^2}{gH^3})$ ، تخلخل مصالح (n) و شیب پایین دست سازه (i) است (رابطه 3).

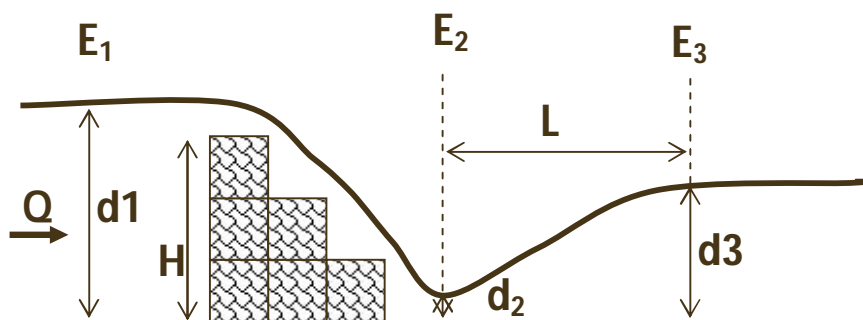
$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 = f\left(\frac{q^2}{gH^3}, i, n\right) \quad (3)$$

با توجه به این که در این تحقیق مدل آزمایشگاهی بر اساس تشابه فرودی مدل‌سازی شده و ابعاد سنگ‌ها و تخلخل در طول آزمایش‌ها تغییر نکرده و همچنین شیب بدنه سرریز گابیونی در پایین دست مشابه سازه‌های تپ و با شیب یک به یک اجرا شده است، مقادیر i و n در طول آزمایش‌ها ثابت است و بنابراین تغییرات راندمان تلفات انرژی صرفاً تابعی از عدد شیب‌شکن خواهد بود. پس از ساخت مدل و نصب آن در فلوم آزمایشگاهی پارامترهای اندازه‌گیری مطابق شکل 6 استخراج شد.

برای تحلیل هیدرولیکی افت انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی در ابتدا سعی شد بر اساس تئوری باکینگهام پارامترهای بدون بعدی برای محاسبه راندمان افت انرژی (η) بدست آید. باتوجه به مرور تحقیقات گذشته می‌توان گفت در یک سرریز پلکانی گابیونی پارامترهای دبی در واحد عرض (q)، ارتفاع پلکان (H)، شتاب ثقل (g)، شیب بدنه سرریز در پایین دست (i) و تخلخل مصالح بدنه (n) موثر است. بنابراین تحلیل بصورت رابطه 2 خواهد شد:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 = f(q, H, g, i, n) \quad (2)$$

در بین پارامترهای فوق مقادیر i و n پارامترهای بدون بعد هستند بنابراین به عنوان عوامل بدون بعد پذیرفته می‌شوند. باتوجه به تعداد سه متغیر باقی مانده که دارای دو بعد هستند نیاز به یک عامل بدون بعد دیگر وجود دارد. پس از محاسبه پارامتر سوم بصورت $\frac{q^2}{gH^3}$ بدست آمد. این عامل در کتاب‌های هیدرولیکی طراحی شیب‌شکن‌ها به نام عدد شیب‌شکن یا عدد آبشار شناخته می‌شود. بر این اساس



شکل 6- پارامترهای اندازه‌گیری در مدل آزمایشگاهی

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (\text{راندمان تلفات انرژی}) \quad (10)$$

در طول آزمایش‌ها برای هر دو حالت سرریز با بدنه صلب و سرریز با بدنه گابیونی در سه وضعیت 1، 2 و 3 پله با شیب بالادست قائم و شیب پایین دست 1 به 1 مجموعاً تعداد 56 آزمایش انجام و برای کلیه آزمایش‌ها مقادیر انرژی اولیه قبل از سرریز و انرژی جریان پس از سرریز و تلفات انرژی محاسبه شد. برای کلیه آزمایش‌ها عدد شیب‌شکن و عدد فرود در مقاطع مختلف محاسبه شد بر اساس آن تحلیل‌های لازم انجام شده است. شکل‌های 7 و 8 نمونه‌ای از آزمایش‌های مربوط به سرریز صلب و سرریز گابیونی را نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل 6 محاسبات مربوط به پارامترهای مختلف از روابط 4 تا 10 بدست می‌آید:

$$Q = A_i V_i = 0.5 \times d_i \times V_i \quad (4)$$

$$Fr_i = \frac{V_i}{\sqrt{gd_i}} \quad (5)$$

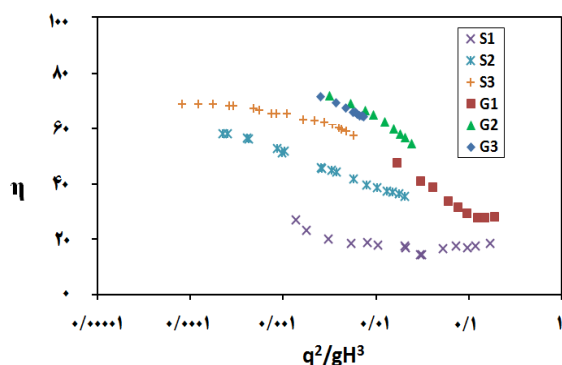
$$d_2 = \frac{d_3}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_3^2} - 1) \quad (6)$$

$$E_i = d_i + \frac{V_i^2}{2g} \quad (7)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad (8)$$

$$\text{عدد شیب‌شکن} = \left(\frac{q^2}{gH^3}\right) \quad (9)$$

در شکل 9 داده‌های مربوط به سرریز گابیونی که برای سه حالت یک پله (G_1)، دو پله (G_2) و سه پله (G_3) معرفی شده‌اند ارایه شده است. در این شکل راندمان تلفات انرژی (η) بر حسب درصد در مقابل عدد شیب شکن ($\frac{q^2}{gH^3}$) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود داده‌های گابیون G_1 پراکندگی بیشتری نسبت به دو حالت دیگر دارد. می‌توان علت آن را عدم تشکیل پلکان در این فرم دانست و عملاً یک پله را باید به عنوان یک شیب شکن تحلیل نمود. به منظور مقایسه بهتر، مدل سرریزهای صلب نیز مورد آزمایش قرار گرفت و برای سه حالت یک پله (S_1)، دو پله (S_2) و سه پله (S_3) مشابه سرریزهای گابیونی آزمایش‌های دیگر انجام شد. شکل 10 مقایسه وضعیت سازه‌های گابیونی با سازه‌های صلب را نشان می‌دهد.



شکل 10 - مقادیر درصد افت انرژی براساس عدد شیب‌شکن در مدل‌های سرریز پلکانی صلب و گابیونی

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود افت انرژی در سازه‌های گابیونی در کلیه گروه‌های متناظر بیشتر از سازه‌های صلب است. در سازه‌های صلب نیز تحلیل سازه یک پله‌ای باید بصورت جداگانه انجام شود.

در ادامه نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مربوط به مدل سرریز گابیونی با نتایج سایر محققین مقایسه شد. در این قسمت با توجه به این‌که مدل‌های ساخته شده در این تحقیق مشابه آزمایش‌های سازه‌های گابیونی در کارهای پیراس و همکاران (Peyras, et al., 1992) و سلماسی (1390) بود و همچنین بخشی از داده‌های مربوط به کار وو در ریچ و چانسن (Wuthrich and Chanson., 2014) با این مدل مشابهت داشت نتایج در یک نمودار ارایه و با یکدیگر مقایسه شد. شکل 11 وضعیت این داده‌ها را نشان می‌دهد.



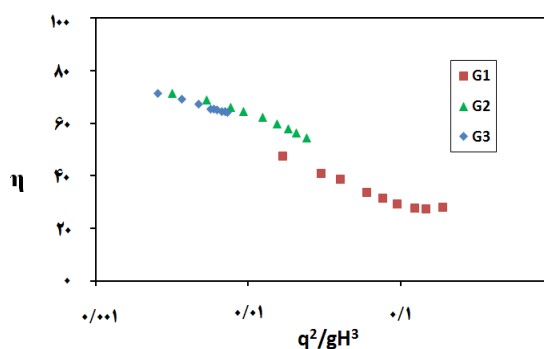
شکل 7- نمونه آزمایش بر روی مدل سرریز پلکانی صلب



شکل 8- نمونه آزمایش بر روی مدل سرریز پلکانی گابیونی

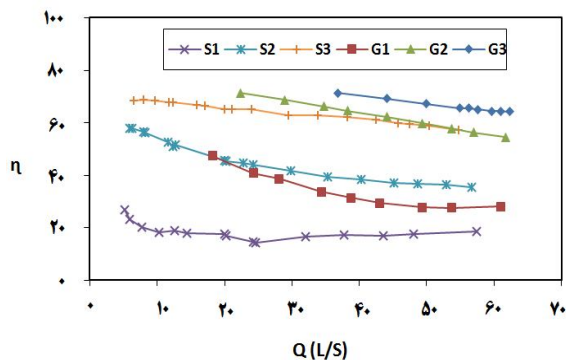
نتایج و بحث

با توجه به این‌که براساس تحلیل ابعادی در این تحقیق تلفات انرژی تابعی از عدد شیب‌شکن بدست آمده است، ابتدا برای کلیه آزمایش‌های انجام شده درصد تلفات انرژی و عدد شیب‌شکن متناظر هر یک محاسبه شد و بر این اساس نمودار شکل 9 ترسیم شد.



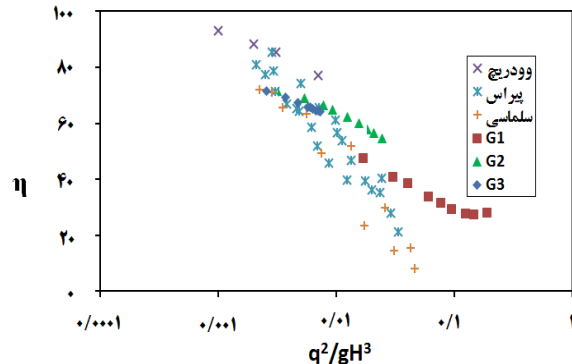
شکل 9- درصد تلفات انرژی بر اساس عدد شیب‌شکن در آزمایش‌های سرریز گابیونی

در سرریزهای پلکانی صلب و گابیونی با افزایش تعداد پله‌ها درصد افت انرژی در سرریز بیش‌تر می‌شود. بررسی شکل‌های فوق نشان می‌دهد تلفات انرژی در مدل یک پله برای هر دو حالت صلب و گابیونی روند متفاوتی با پلکان دو و سه پله دارد. همچنین اثر پله دوم در افزایش راندمان تلفات انرژی در مقایسه نتایج مربوط به مدل G_1 و G_2 به خوبی مشاهده می‌شود، به نحوی که افزودن پله دوم که عملاً فرم سازه را از حالت شیب شکن به پلکان تغییر می‌دهد، تلفات انرژی را در سازه صلب در مواردی تا $2/5$ برابر و در سازه‌ی گابیونی تا 2 برابر افزایش می‌دهد. در این خصوص با توجه به رژیم جریان در سرریزهای پلکانی که به سه حالت رژیم جریان ریزشی (Nappe Flow)، انتقالی (Transition Flow) و رویه‌ای (Skimming Flow) تقسیم می‌شود، می‌توان گفت با افزودن پله دوم، شرایط ایجاد رژیم جریان ریزشی فراهم شده و در این حالت تلفات انرژی بطور محسوسی افزایش می‌یابد. این روند در پله سوم با شدت کمتری مشاهده می‌شود. این نتایج مؤید نظر استیونسون (Stephenson, 1979) است که افزایش تعداد پله‌ها بر میزان تلفات انرژی را تا سه پله موثر می‌داند. به منظور مقایسه بین داده‌های سرریزهای صلب و گابیونی با یکدیگر مجموع نتایج در شکل 14 ارائه شده است.



شکل 14 - مقایسه نتایج افت انرژی در سرریزهای گابیونی صلب

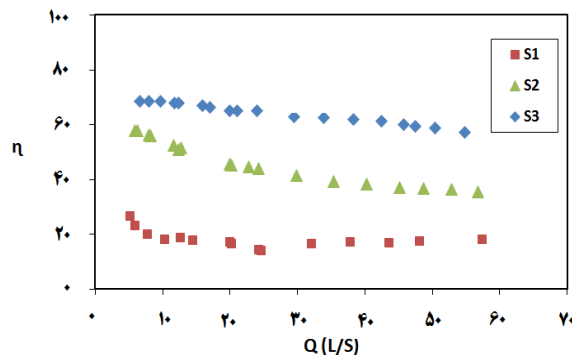
شکل 14 نشان می‌دهد به جز سریز S_1 سایر سرریزها با افزایش دبی میزان درصد افت انرژی جریان کاهش می‌یابد. البته روند کاهشی در سازه‌های گابیونی اندکی تندتر است. حداکثر تلفات انرژی در سازه‌های صلب به ترتیب برای حالت یک پله $25/8$ درصد، سازه دو پله $56/6$ درصد و در سازه سه پله $65/2$ درصد محاسبه شده است. این مقادیر برای حالت گابیونی و به ترتیب از یک تا سه پله معادل $49/9$ ، $71/3$ و $73/5$ درصد بدست آمده است. مقایسه داده‌های سازه‌های صلب و گابیونی نشان داد، بطور متوسط افت انرژی در سازه‌های گابیونی نسبت به سازه‌های صلب در حالت یک پله $11/3$ درصد، در سازه دو پله $16/9$ درصد و در سازه سه پله $16/3$ درصد بیش‌تر است.



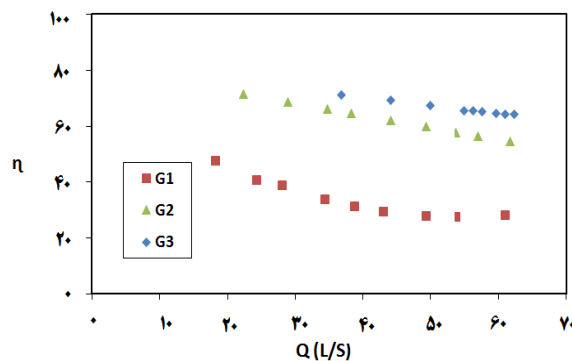
شکل 11 - مقایسه نتایج تحقیق حاضر با کارهای محققین گذشته در خصوص افت انرژی در سرریزهای گابیونی

این نمودار نشان دهنده مطابقت نتایج تحقیق حاضر با نتایج کارهای محققین قبلی است. البته پراکندگی نتایج مدل G_1 در این نمودار در مقایسه با سایر نتایج نمایان‌تر است.

از آن‌جا که در مقایسه داده‌های افت انرژی در نمودارهای فوق تعداد پله در محاسبه عدد شیب‌شکن نقشی ندارد به منظور تحلیل بهتر نتایج و مقایسه میزان افت در دبی‌های مختلف نمودار افت انرژی بر حسب دبی جریان برای کلیه آزمایش‌ها ترسیم شد که بصورت شکل‌های 12 و 13 است.



شکل 12 - راندمان افت انرژی بر اساس دبی عبوری در سرریزهای صلب



شکل 13 - راندمان افت انرژی بر اساس دبی عبوری در سرریزهای گابیونی

محققین مختلف از پراکندگی کمتری برخوردار است بنابراین برای مجموع داده‌های استخراج شده در این دو حالت رابطه شماره 13 ارایه می‌شود:

$$\eta = -9.12 \ln\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) + 18.44 \quad (13)$$

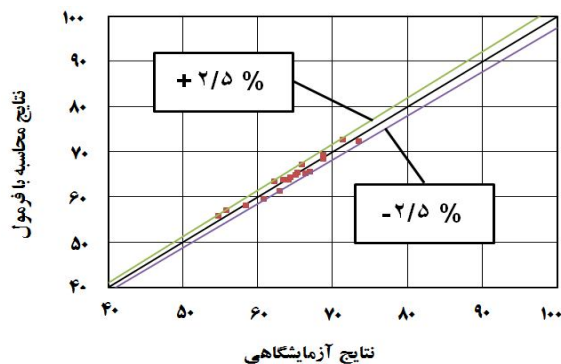
$$R^2 = 0.92$$

بررسی آماری رابطه 13 نشان می‌دهد در مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از رابطه مذکور در برخی موارد حداکثر تا 7/2 درصد خطا وجود دارد. از آنجا که در این رابطه پارامتر تعداد پله (N) دخالت داده نشده است با وارد کردن این پارامتر و تحلیل مجدد نتایج رابطه 14 برای مجموع نتایج بصورت زیر حاصل شد:

$$\eta = -8.318 \ln\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) - 2.243(N) + 29.09 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.96$$

در این رابطه q دبی در واحد عرض، H ارتفاع سرریز پلکانی و N تعداد پله‌ها است. اختلاف نتایج حاصل از این رابطه با نتایج آزمایشگاهی حداکثر به 2/4 درصد می‌رسد. نمودار شکل 17 مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از فرمول 14 را با خطوط $\pm 2.5\%$ خطا نسبت به محور نشان می‌دهد. یادآوری این نکته ضروری است که رابطه 16 برای N برابر با 2 و 3 پله ارایه شده است. افزودن پارامتر N به رابطه 16 بیانگر اثبات تاثیر یکسان تعداد پله بر میزان تلفات انرژی نیست و صرفاً در جهت بهبود ضریب همبستگی به رابطه افزوده شده است و مشاهده می‌شود که در این رابطه ضریب پارامتر N یک عدد ثابت است و به عبارتی با افزودن هر پله مقدار ثابتی معادل 2/24 درصد از میزان تلفات محاسبه شده در بخش اول رابطه کاسته می‌شود. در صورتی که نتایج آزمایش‌ها میزان اثر پله دوم و سوم را بصورت یکسان نشان نمی‌هد.

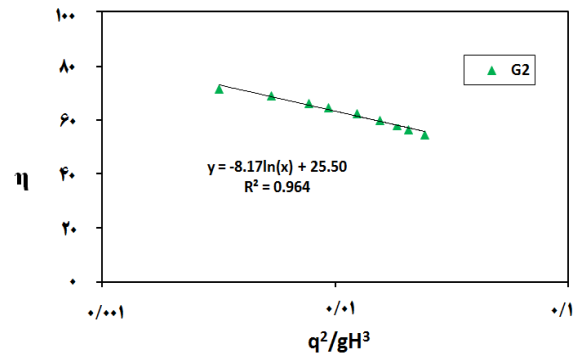


شکل 17 - مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از فرمول 14

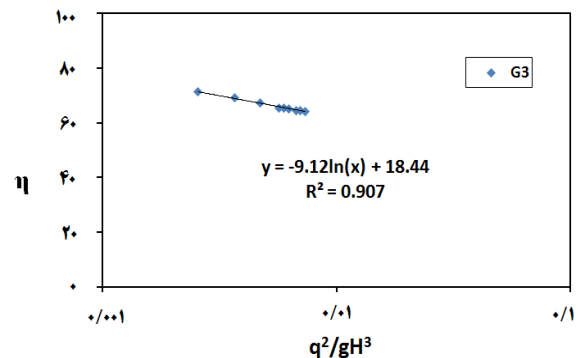
نتیجه گیری

در این تحقیق تلفات انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی باتوجه

برای یافتن روابطی برای محاسبه افت انرژی در سرریزهای گابیونی با توجه به روندهای مشاهده شده در نتایج این تحقیق و مقایسه با کارهای محققین گذشته، ابتدا برای نتایج فرم‌های G_2 و G_3 شکل‌های 15 و 16 ارایه شده است. در این شکل‌ها باتوجه به بی‌بودن پارامتر عدد شیب‌شکن $\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)$ روابط 11 و 12 ارایه شده است.



شکل 15 - رابطه افت انرژی بر حسب عدد شیب‌شکن در مدل G_2



شکل 16 - رابطه افت انرژی بر حسب عدد شیب‌شکن در مدل G_3

برای سازه‌های پلکانی گابیونی به فرم G_2 رابطه 11 بدست آمد:

$$\eta = -8.17 \ln\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) + 25.50 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.96$$

و برای سازه‌های پلکانی گابیونی به فرم G_3 رابطه 12 ارایه می‌شود:

$$\eta = -9.12 \ln\left(\frac{q^2}{gH^3}\right) + 18.44 \quad (12)$$

$$R^2 = 0.91$$

بررسی نتایج این تحقیق نشان داد باتوجه به نمودار شکل 11 پراکنش داده‌های سرریز گابیونی G_2 و G_3 نسبت به نتایج کارهای

دانشگاه گرگان. 15. 1: 150-158.

مفتاح هلقی، م.، عزیزی، ا.، دهقانی، ا. و الحسینی، ن. 1388. استهلاک انرژی جریان در سرریزهای پلکانی توری سنگی با به کارگیری صفحات نفوذناپذیر. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گرگان. 16. 2: 234-241.

کاظمی نسبان، غ. و شفاعی بجستان، م. 1376. بررسی آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی. اولین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران. تهران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. ص 78-96.

Chamani, M.R and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125.4: 361-368.

Chanson, H. 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*. 32.2: 213-218.

Chanson, H. 2001. *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Balkema, Lisse, The Netherlands (ISBN 90 5809 352 2)

Chinnarasri, C., Donjadee, S., Israngkura, U. 2008. Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134.8: 1147-1152

Dhatrak, A.I., Tatewar, S.P. 2009. Discussion of "Hydraulic Characteristics of Gabion-Stepped Weirs by Chaiyuth Chinnarasri, Somachai Donjadee, and Udomsak Israngkura. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135.10: 871-872

Kells, J. A. 1993. Spatially varied flow over rockfill embankments. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 20.5: 820-827.

Khatibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M.A., Asadi, H. 2014. Modelling Energy Dissipation Over Stepped-gabion Weirs by Artificial Intelligence. *Water resources management*. 28.7: 1807-1821.

Nazari, S., 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

Pagliarara, S., Palermo, M., Kurdistania, S.M., Sagvand Hassanabadi, L. 2015. Erosive and hydrodynamic processes downstream of low-head control structures. *Journal of Hydraulic Research*. 3.2: 122-131.

Peyras, L., Royet, P., Degoutte, G. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118.5: 707-717.

Salmasi, F., Sattari, M.T., Mahesh, P. 2012. Application of data mining on evaluation of energy dissipation

به کاربرد این نوع سازه در بندهای انحرافی و سازه‌های اصلاحی بررسی شده است. باتوجه به این که در بسیاری از کارهای اجرایی سرریزهای پلکانی گابیونی با 1، 2 و 3 پله بصورت تیپ ساخته می شود، در این پژوهش تلفات انرژی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد فرم سازه‌های پلکانی گابیونی در حالت دو و سه پله بر اساس دبی عبوری بطور متوسط 16/9 و 16/3 درصد تلفات انرژی را نسبت به سازه‌های صلب بیش تر می کند. همچنین افزایش دبی جریان عبوری درصد تلفات انرژی را کاهش می دهد. روند نتایج سازه‌ی گابیونی با یک پله را نمی توان بصورت سرریز پلکانی تحلیل نمود. افزایش تعداد پله‌ها به 2 و 3 پله موجب افزایش تلفات انرژی می شود. تاثیر پله دوم در میزان افزایش تلفات انرژی نسبت به پله سوم بیش تر است. علت این امر می تواند به دلیل تشکیل رژیم جریان ریزشی بروی پلکان باشد. روابط 11 و 12 به ترتیب برای محاسبه تلفات انرژی بر اساس عدد بی بعد شیب شکن برای گابیون‌های دارای 2 و 3 پله ارائه شده است و همچنین رابطه 14 برای مجموع نتایج این تحقیق در سرریزهای گابیونی دارای 2 و 3 پله ارائه گردید.

پیشنهاد می شود موارد زیر در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد:

انجام آزمایش برای سرریزهای 4 و 5 پله‌ای با هدف مشخص نمودن اثر تعداد پله‌ها.

انجام آزمایش با شیب‌های مختلف بدنه در پایین دست سرریز.

بررسی وضعیت حوضچه آرامش سرریزهای گابیونی.

بررسی اثر تغییرات تخلخل بدنه گابیونی سرریز بر تلفات انرژی.

منابع

ابراهیمی، ن.ق.، کاشفی پور، م. و ابراهیمی، ک. 1384. بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی مدل سرریز توری سنگی پلکانی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، خرداد ماه، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.

چانسون، ه. 1384. هیدرولیک شوت‌ها و سرریزهای پلکانی، ترجمه ابوالفضل شمسایی، فرزاد پاک‌نهاد، دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی 518 صفحه

سلماسی، ف.، فرسادی زاده، د. و محیط، ح. 1390. بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان از روی سرریز گابیونی پله‌ای. نشریه دانش آب و خاک. 21. 4: 164-152.

عزیزی، ا.، مفتاح هلقی، م.، تبار احمدی، ض. و گلماهی، ح. 1387. بررسی تاثیر تخلخل مصالح مورد استفاده بر افت انرژی جریان در سرریزهای پلکانی گابیونی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی،

- Dissipation over Stepped Gabion Spillways: a Physical Study. School of Civil Engineering, The University of Queensland. REPORT No. CH92/13. ISBN 9781742720944
- Wuthrich,D., Chanson,H. 2014. Hydraulics, Air Entrainment, and Energy Dissipation on a Gabion Stepped Weir. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140.
- Zhang,J., Chen,J., Wang,Y. 2012. Experimental study on time-averaged pressures in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research*. 50.2: 236-240
- Zhang,G., Chanson,H. 2016. Gabion Stepped Spillway: Interactions between Free-Surface, Cavity, and Seepage Flows. Technical Note. *Journal of Hydraulic Engineering*., Vol. 142. Issue 5.
- over low gabion-stepped weir *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 36. 95-106.
- Salmasi,F., Chamani,M.R., Farsadizade,D. 2012. Experimental study of energy dissipation over stepped gabion spillways with low heights. *IJST, Transactions of Civil Engineering*. 36. 2: 253-264 Printed in The Islamic Republic of Iran, Shiraz University
- Shafai-Bejestan,M., Kazemi-Nasaban,G.h. 2011. Experimental Study on Gabion Stepped Spillway. *Experimental Methods in Hydraulic Research Geoplanet, Earth and Planetary Sciences*. 1: 267-274
- Stephenson,D. 1979. Gabion Energy Dissipators. Proc 13th ICOLD Congress, New Delhi, India, 50(R3), 33-43
- Wuthrich,D., Chanson,H. 2014. Aeration and Energy

Laboratory Investigation of Head loss in Gabion steeped spillways and Comparing with rigid stepped spillways

S.H. Rajaei¹, S.R. Khodashenas^{2*}, K. Esmaili³

Received: May.07, 2016

Accepted: Dece.05, 2016

Abstract

Stepped spillways are used in high dams, diversio dams and in watershed structures. Since gabion structures in many places is a good option, Gabion stepped spillways are being built with a height between 1 to 3 meters and these structures usually can be built with the same form. In this research compare the energy loss in gabion stepped spillways and rigid stepped spillways is done. To reach this goal, models of rigid stepped spillways and gabion stepped spillways was built with the same geometric dimensions and was installed in a laboratory flume with 50^{cm} width and 11^m length. Spillways have 1, 2 and 3 steps. Flow with different discharges was flowed in the flume. The results showed that the maximum efficiency of energy losses in the first case (one step) of rigid stepped spillways is 25/8%, the second case (two step) is 56/6% and the third case (three step) is 65/2%. Also the amount of maximum energy losses for the first case (one step) of gabion spillway is 49/9%, the second case (two step) is 71/3% and 73/5% for the third case (three step) respectively. This research showed that stepped gabion structures in the case of 2 and 3 steps have 16/9% and 16/3% (in average) efficiency of energy losses more than rigid structures. Also increasing the flow discharge, reduced the efficiency of energy losses. Further more increase the number of steps increases the energy losses. The effect of the second step in increasing the efficiency of energy losses was more than third step.

Keywords: Gabion, Head loss, Rigid stepped spillways, Steeped spillways

1- Ph.D Student of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor , Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor , Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*-Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)