

## بررسی آزمایشگاهی اثرات تعداد پله، شیب و اندازه ذرات بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای توری سنگی

سینا رازی، فرزین سلماسی\*، علی حسین زاده دلیر

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۰ دی ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۳ بهمن ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۹ اسفند ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

گابیون  
سرریز پله‌ای  
توری سنگی  
افت انرژی  
اندازه ذرات

**چکیده:** سرریز پله‌ای توری سنگی، سازه محیط زیست پسند و هیدرولیکی ساده‌ای است که جهت استهلاک انرژی جریان در سدهای مختلف و یا جهت کنترل فرسایش پایین دست سازه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشتر تحقیقات انجام گرفته قبلی مربوط به سرریزهای پلکانی بتنی و صلب بوده، لذا مطالعات بر روی سرریزهای پله‌ای توری سنگی بسیار اندک می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از روش آزمایشگاهی و مدل فیزیکی، مولفه‌های مختلفی که بر روی افت انرژی جریان عبوری از روی سرریزهای پله‌ای توری سنگی (گابیونی) مؤثر می‌باشند، مطالعه و با تحقیقات دیگر دانشمندان نیز مقایسات لازم صورت گرفته شده است. جریان عبوری از سرریز توری سنگی هم به صورت درون‌گذر و هم به صورت روگذر (هر دو به طور هم‌زمان) صورت گرفت و مقدار انرژی تلف شده در طول سازه بر اساس رابطه انرژی محاسبه گردید. در این تحقیق از ذرات کاملاً یکنواخت با سه قطر متوسط  $(d_{50})$  ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است. ارتفاع و عرض مدل‌های فیزیکی ساخته شده از سرریز پلکانی توری سنگی ثابت و به ترتیب ۶۰ و ۴۰ سانتی‌متر، با پله‌های ۳، ۶ و ۱۲ تایی و ارتفاع پله‌ها ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری و شیب سرریزها ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ (۲ و ۳ افقی، ۱ قائم) می‌باشد. نتایج نشان داد که در سرریزهای پله‌ای توری سنگی شیب‌نمای پایین دست سرریز تأثیر ناچیزی بر افت انرژی جریان دارد. هم‌چنین با بیشتر شدن تعداد پله‌های سازه (برای  $h/l$  ثابت) افت انرژی کاهش می‌یابد. قطر متوسط ذرات ۱۰ میلی‌متر به ازای  $y_0/H_w \leq 0.92$  و قطر متوسط ذرات ۴۰ میلی‌متر به ازای  $y_0/H_w > 0.92$  دارای بیشترین افت انرژی نسبی می‌باشند. با توجه به اینکه مصالح سنگی به کار رفته در این تحقیق از نوع شکسته می‌باشند، لذا پیشنهاد می‌گردد تا بر روی مصالح سنگی گردگوشه نیز تحقیقات بیشتری صورت بگیرد.

### ۱- مقدمه

و نفوذپذیری بالا و مقرون به صرفه بودن و مهم‌تر از همه سازگار بودن با محیط زیست می‌باشد [۴]. این نوع سرریزها از انعطاف بیشتری نسبت به نوع صلب آن برخوردار بوده و در مقابل بارهای ناشی از فشار آب، مقاوم و پایدار هستند. استهلاک انرژی جریان از روی چنین سازه‌هایی به علت وجود جریان درون‌گذر<sup>۱</sup> و روگذر<sup>۲</sup> پله‌ها زیاد بوده و لذا هزینه‌های ساخت حوضچه آرامش کاهش می‌یابد [۵]. از دیدگاه کیفیت آب، مواد فیزیکی و شیمیایی از قبیل مواد آلی معلق و ته‌نشین می‌توانند از بین دانه‌های قابل نفوذپذیر به پایین دست عبور کنند و این مسأله سرانجام رسوب و انباشت آب در آب‌گیر را به حداقل می‌رساند. مابین این سنگ‌ها باکتری‌هایی که در سطح دانه‌ای ساکن هستند، ممکن است باعث تجزیه شدن مواد آلی گردند. این واکنش بیوشیمیایی (زیستی-شیمیایی) زمانی که جریان از بین سنگ‌ها عبور می‌کند منجر به تصفیه آب رودخانه یا کانال می‌گردد. هم‌چنین تلاطم به وجود آمده در محیط سنگ‌دانه‌ای، هوادهی کل آب-هوا را با کمک تجزیه هوازی مواد آلی تقویت می‌کند. از این جهات سرریز گابیونی یک سازه با حداقل اثرات

سرریزهای پله‌ای و کانال‌های پله‌ای قدیمی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند و قدمتشان به حدود ۳۵۰۰ سال می‌رسد [۱]. سرریزهای پله‌ای در زمینه‌های عمرانی از قبیل سیستم‌های زه‌کشی در کوهستان‌ها یا سرریزهای اضطراری در پایین دست سدهای خاکی دارای مزایای بسیار است [۲]. شماری از مطالعه‌های آزمایشگاهی بر روی رفتار جریان بر روی سرریزهای پله‌ای افقی صورت گرفته و روابطی جهت طراحی هیدرولیکی در این زمینه ارائه شده است [۳]. سرریزهای گابیونی به طور وسیع در طرح‌های عمرانی به خصوص در حوضه‌های آب‌ریز جهت کنترل فرسایش سیلاب‌ها و هم‌چنین در بالا بردن سطح آب به منظور آب‌گیری در کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکثر پژوهش‌های گذشته بر روی سرریزهای صلب غیرقابل نفوذ انجام یافته است، در حالی که نوع نفوذپذیر آن که به نام گابیونی (توری سنگی) معروف است، دارای مزایایی است. از جمله مزایای این سرریزها سهولت در اجرا، استفاده از مصالح قرصه، پایداری، انعطاف‌پذیری

1 Inflow  
2 Overflow

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ferzin.salmasi@gmail.com

انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که در کم‌ترین دبی جریان برای سرریز پله‌ای غیر قابل نفوذ افت انرژی کم‌تر است. هم‌چنین نشان دادند که پله‌ها با وجوه عمودی غیرقابل نفوذ دارای افت انرژی بیشتری نسبت به وجوه افقی غیرقابل نفوذ بوده و با افزایش تخلخل و کاهش شیب، انرژی بیشتری از جریان مستهلک می‌گردد [۵].

حامدی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۱) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مطالعه‌های خود را جهت افزایش پراکنده کردن انرژی در رژیم جریان ریزشی<sup>۷</sup> روی سرریزهای پله‌ای با نصب شیب معکوس با زوایای مختلف و نصب آستانه انتهایی مختلف روی لبه پله‌ها انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از پله‌های شیب‌دار معکوس با آستانه انتهایی به طور هم‌زمان دارای بیشترین تأثیر در مقدار افت انرژی بوده و زاویه فوقانی آستانه انتهایی دارای کم‌ترین تأثیر در مقدار افت انرژی می‌باشد [۱۳]. زار و دورینگ<sup>۸</sup> (۲۰۱۲) آزمایش‌های خود را بر روی سرریزهای پله‌ای گردگوشه و سرریزهای پله‌ای معمولی (پله‌های تیز گوشه) انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سرریزهای پله‌ای گردگوشه انرژی جریان را ۳ درصد بیشتر از سرریزهای پله‌ای معمولی مستهلک می‌نماید [۱۴]. چیناراسری و ونگ‌وایز<sup>۹</sup> (۲۰۰۶) آزمایش‌های خود را بر روی سرریزهای پلکانی با شیب پله معکوس، با آستانه انتهایی و ساده انجام دادند. نتایج نشان داد که شیب‌دار کردن پله‌ها، استهلاک انرژی را تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. هم‌چنین آستانه انتهایی نیز بر روی استهلاک انرژی مؤثر بوده و هرچه ارتفاع آستانه‌ها افزایش یابد، استهلاک انرژی نیز بیشتر می‌گردد. به ازای یک مقدار مشخص از  $y_c/h$  از دیگر نتایج تحقیق مذکور می‌توان به این نکته اشاره نمود که آستانه انتهایی بیشتر از شیب پله معکوس بر استهلاک انرژی مؤثر می‌باشد [۱۵]. آل و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۷) آزمایش‌های فیزیکی خود را بر روی افت انرژی در سرریزهای پله‌ای با استفاده از موج‌شکن<sup>۱۱</sup> در دانشگاه زاگازینگ<sup>۱۲</sup> مصر انجام دادند. آن‌ها شش حالت از موج‌شکن را در نظر گرفتند. اولین حالت سرریز پله‌ای بدون موج‌شکن و حالت‌های بعدی با موج‌شکن و نسبت‌های  $h_p/h_s$ ،  $h_p/h_s$  ارتفاع موج شکن و  $h_s$  ارتفاع پله برابر با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از موج‌شکن باعث افزایش افت انرژی می‌شود و بیشترین مقدار افت انرژی در موج‌شکن با نسبت  $h_p/h_s$  برابر با ۰/۸ رخ می‌دهد [۱۶]. النیخلی<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۷) آزمایش‌های خود را بر روی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز دارای بلوک‌های استوانه‌ای انجام داد. مدل سربز ساخته شده در آزمایش‌های ایشان دارای عرض ۳۰ سانتی‌متر،

منفی بر روی محیط زیست آبی بوده که نسبت به سرریزهای غیرقابل نفوذ ساخته شده اخیر بسیار با محیط زیست سازگارتر می‌باشد [۶].

بیشتر پژوهش‌های انجام یافته تاکنون مربوط به سرریزهای پلکانی سدهای بزرگ بتنی یا سرریزهای پلکانی صلب بدون تخلخل بوده است. از آن‌جا که تاکنون جریان‌های روگذر و درون‌گذر کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است، لذا این یک موضوع ارزشمند برای مطالعه در آینده خواهد بود [۷]. سورنسون<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) آزمایش‌هایی را بر روی سرریز پله‌ای صلب با تاج اوجی انجام و نشان داد که پله‌ها به‌طور قابل توجهی انرژی جریان را نسبت به سرریزهای صاف مستهلک می‌کنند [۸]. کریستودولو<sup>۲</sup> (۱۹۹۳) آزمایش‌های خود را بر روی سرریز پله‌ای صلب با تاج اوجی انجام داد. نتایج ایشان نشان داد که مهم‌ترین پارامتر مؤثر در افت انرژی، نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله ( $y_c/h$ ) و تعداد پله‌ها ( $N$ ) می‌باشد. هم‌چنین اظهار داشت که به ازای یک مقدار دبی مشخص، با افزایش  $N.h$  (که تقریباً برابر با کل ارتفاع سرریز است)، افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد [۹]. پیراس و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۲) تحقیق‌های خود را به روش آزمایشگاهی در یک فلوم به عرض ۸۰ سانتی‌متر با شیب‌نمای پایین‌دست ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱ انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق جهت نزدیک کردن اطلاعات به دست آمده به واقعیت، مقیاس ۱:۵ (آزمایش بر روی مدل‌های بزرگ) را انتخاب کردند. پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که سرریزهای پله‌ای گابیونی می‌توانند سیلاب‌هایی در حدود "۳" مترمربع بر ثانیه را بدون آن که تخریب گردند تحمل کنند. هدف آن‌ها محاسبه استهلاک انرژی جریان از روی سازه و تعیین ابعاد هندسی حوضچه آرامش آن بود. آن‌ها چهار حالت پله به شرح زیر در نظر گرفتند: پله‌های تخت (صاف) بدون حفاظ، پله‌های دارای حفاظ بتنی، پله‌های دارای حفاظ بتنی با شیب معکوس و پله‌های دارای آستانه انتهایی. نتایج آزمایش‌های آن‌ها در مقایسه با آزمایش‌های رند (۱۹۵۵) [۱۰] که بر روی پله‌های بتنی صلب انجام داده بودند، ۱۰ درصد استهلاک انرژی بیشتری را نشان داد که علت آن را می‌توان به اختلاف در سطح زبری و نفوذپذیری گابیون و شیب سرریز نسبت داد. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد که نفوذ ناپذیر کردن کف پله‌ها از استهلاک انرژی جریان می‌کاهد [۱۱]. چمنی و راجاراتنام<sup>۴</sup> (۱۹۹۹) آزمایش‌های خود را بر روی سرریز پله‌ای صلب انجام دادند و نشان دادند که به ازای یک مقدار دبی مشخص و  $h/l$  (ارتفاع پله و  $l$  طول افقی پله) یکسان، بزرگ‌تر دارای افت انرژی بیشتری است. هم‌چنین اظهار داشتند که افت انرژی نسبی در سرریزهای پله‌ای در محدوده ۴۸ الی ۶۳ درصد می‌باشد [۱۲]. سلماسی و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) با استفاده از هشت مدل فیزیکی از سرریز پله‌ای گابیونی با تخلخل‌های ۳۸ و ۴۰ و ۴۲ درصد و شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ که وجوه عمودی پله‌ها با و بدون پوشش بودند، آزمایش‌های خود را

6 Hamedi et al.

7 Nappe flow

8 Zare and Doering

9 Chinnarasri and Wongwiset

10 Aal et al.

11 Breakers

12 Zagazig

13 Elnikhely

1 Sorensen

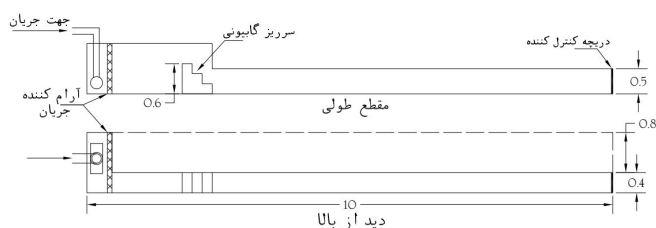
2 Christodoulou

3 Peyras et al.

4 Chamani and Rajaratnam

5 Salmasi et al.

می‌گردد، لذا عمق جریان در خروجی سرریز به فاصله سه الی چهار برابر طول پله‌ها و حداکثر به فاصله یک متر از آخرین وجه پله سرریز جایی که اختلاط آب با هوا به حداقل می‌رسد، اندازه‌گیری و محاسبه شد. این روش قبلاً هم توسط چیناراسری و ونگ‌وایز [۲]، زار و دورینگ [۱۴] و استفنسون [۱۸] نیز انجام شده است. پگرام و همکاران (۱۹۹۹) اعلام کرده‌اند که مدل‌های ساخته شده از سرریزهای پله‌ای با مقیاس ۱:۲۰ و بزرگ‌تر (یعنی ۱:۵ و ۱:۱۰) می‌تواند رفتاری درست از سرریزهای پله‌ای واقعی را ارائه دهد [۱۹]. لذا در این تحقیق با تشابه فرودی نتایج ارائه شده برای طول و ارتفاع سرریزهای واقعی حداکثر ۲۰ برابر نمونه آزمایش شده در تحقیق حاضر، محدود شده است و دبی در واحد عرض نمونه واقعی در محدوده ۰/۹ الی ۱۵ مترمربع بر ثانیه می‌باشد. ارتفاع و عرض مدل‌های فیزیکی ساخته شده از سرریز پلکانی توری سنگی ثابت و به ترتیب ۶۰ و ۴۰ سانتی‌متر، با پله‌های ۳، ۶ و ۱۲ تایی و ارتفاع پله‌ها ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری و شیب سرریزها ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ (۳ و ۲ افقی، ۱ قائم) انتخاب گردید.



شکل ۱: نمایی از فلوم آزمایشگاهی و محل قرارگیری سرریز پله‌ای توری سنگی

Fig. 1. Schematic of the elevated flume including gabion stepped spillway

### ۳- تئوری و آنالیز ابعادی

هدف از آنالیز ابعادی شناخت پارامترهای مؤثر در پدیده مورد مطالعه و تعیین نسبت‌های بدون بعد می‌باشد. اولین گام برای ایجاد یک همبستگی، انتخاب پارامترهایی است که تأثیر بیشتری در استهلاک انرژی جریان دارند. می‌توان به روش‌های مختلفی هم‌چون روش ماتریسی، روش  $\pi$ -باکینگهام، روش ریلی و غیره اشاره کرد. از آن جا که روش  $\pi$ -باکینگهام به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا در این تحقیق نیز سعی می‌شود که تحلیل‌های ابعادی بر مبنای این روش صورت پذیرد. پارامترهای مؤثر در آنالیز ابعادی عبارتند از:  $E_0$  انرژی مخصوص بالادست سرریز،  $E_1$  انرژی مخصوص پایین دست سرریز،  $g$  شتاب ثقل،  $y$  عمق جریان،  $H_w$  ارتفاع سرریز،  $N$  تعداد پله‌ها،  $h$  ارتفاع پله،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات سنگی و  $q$  دبی در واحد عرض. ضریب تصحیح انرژی جنبشی در محدوده ۱/۰۵ الی ۱/۰۸ می‌باشد و از آنجا که تأثیر چندانی در نتایج نخواهد داشت، لذا مقدار آن در این تحقیق برابر واحد در نظر گرفته شده است [۲۰].

حال با توجه به متغیرهای فوق‌الذکر می‌توان نوشت:

ارتفاع ۲۴/۵ سانتی‌متر و شیب‌نمای پایین‌دست ۳۰ درجه می‌باشد. در پایین‌دست سرریز، خاک شنی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با مشخصات  $d_{50}$  و  $d_{84}$  به ترتیب برابر با ۱/۷ و ۲/۲۸ میلی‌متر استفاده گردید. نتایج ایشان نشان داد که سرریز با بلوک‌های استوانه‌ای به ابعاد  $L/B$  و  $D/B$  به ترتیب برابر با ۰/۱۳۳ و ۰/۱ ( $L$  و  $D$  به ترتیب طول و قطر بلوک استوانه و  $B$  عرض کانال) نسبت به حالتی که سرریز صاف است، مقادیر  $d_s/y_{us}$  و  $L_s/y_{up}$  به ترتیب تا حدود ۲۵ درصد و ۲۷ درصد کاهش می‌یابد ( $d_s$  و  $L_s$  به ترتیب حداکثر عمق و حداکثر طول آب‌شستگی و  $y_{us}$  و  $y_{up}$  به ترتیب عمق آب بالادست و پایین‌دست) [۱۷].

هدف از انجام تحقیق حاضر مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیک جریان بر روی سرریز پله‌ای توری سنگی است. برای این منظور مدل‌های فیزیکی مختلفی ساخته شد. عوامل متغیر و مستقل عبارتند از اندازه ذرات سنگی به کار رفته در سازه، تعداد پله و شیب‌نمای پایین‌دست سرریز و عامل متغیر وابسته عبارت است از استهلاک انرژی جریان از درون و روی سرریز.

### ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب انجام شد. مطابق شکل ۱ آزمایش‌ها بر روی فلوم فلزی-شیشه‌ای افقی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۴ متر که ۲ متر طول اول آن دارای ارتفاع ۱ متر و مابقی طول آن به ارتفاع ۰/۵ متر می‌باشد با شیب کف ثابت صورت گرفت. جنس کف فلوم از آهن گالوانیزه و جنس دیواره‌های آن از شیشه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. نحوه گردش آب شامل مخزنی زیرزمینی است که مجهز به یک دستگاه پمپ مستغرق به قدرت ۱۰۰ اسب بخار بوده و آب را به یک مخزن هوایی به ارتفاع ۴ متر پمپاژ می‌کند. مخزن هوایی از طریق سرریزی که داخل آن تعبیه شده است تأمین کننده بار آبی ثابت می‌باشد. این سرریز، آب اضافی مخزن هوایی را به مخزن زیرزمینی برمی‌گرداند و با این کار ارتفاع و در نتیجه دبی آب در سیستم چرخش ثابت می‌ماند. جریان پس از عبور از فلوم به پایین‌دست، به سمت مخزن زیرزمینی برگشته و مجدداً به سمت مخزن اصلی هدایت می‌شود. دبی جریان در آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه اولتراسونیک که در ابتدای لوله ورودی جریان آب به کانال نصب شده بود اندازه‌گیری می‌شد. دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه اولتراسونیک با دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط سرریز مستطیلی که از قبل کالیبره شده بود مقایسه شد و میانگین اختلاف حاصله حدوداً  $\pm 5\%$  درصد بود. جهت آرام کردن جریان آب در ابتدای کانال، از یک جعبه فلزی متخلخل استفاده شده است. در این تحقیق از ذرات کاملاً یکنواخت با سه قطر متوسط ( $d_{50}$ ) ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است. دو ریل موازی در بالای بدنه کانال، جهت حرکت عمق سنج صوتی با فرکانس ۲۰ هرتز و دقت ۱۲ بیت برای اندازه‌گیری عمق آب نصب و استفاده شد. از آنجا که اندازه‌گیری عمق آب در پایین‌دست آخرین پله سرریز به دلیل تلاطم زیاد منجر به نتایج نادرست



شکل ۳. جریان انتقالی در سرریز ۶ پله‌ای با شیب ۱:۲ و  
 $Q=44 \text{ lit/s}$  ,  $d_{50}=40 \text{ mm}$

Fig. 3. Transition flow over the gabion stepped spillway with 6 steps, slope 2:1 (H:V),  $d_{50}=40 \text{ mm}$  and  $Q=44 \text{ lit/s}$



شکل ۴. جریان غیرریزشی در سرریز ۶ پله‌ای با شیب ۱:۱ و  
 $Q=55 \text{ lit/s}$  ,  $d_{50}=25 \text{ mm}$

Fig. 4. Skimming flow over the gabion stepped spillway with 6 steps, slope 1:1 (H:V),  $d_{50}=25 \text{ mm}$  and  $Q=55 \text{ lit/s}$

$$f(H_w, d_{50}, q, N, h, g, y, E_0, E_0 - E_1 = \Delta E) = 0 \quad (1)$$

پس از ساده‌سازی، پارامترهای بی‌بعد زیر به دست می‌آیند:

$$f\left(\frac{y}{N.h}, \frac{d_{50}}{y}, \frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y}{H_w}, \frac{V}{\sqrt{gH_w}}, \frac{q^2}{gH_w^3}\right) = 0 \quad (2)$$

مقدار انرژی تلف شده در طول سرریز بر اساس رابطه انرژی و از رابطه

(۴) قابل محاسبه است (V سرعت در پای سرریز):

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad (3)$$

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (4)$$

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر بر افت انرژی، اثر هر یک از پارامترها به طور جداگانه و با رسم شکل مورد بحث قرار گرفته است. در ابتدا به منظور درک بهتر، شکل‌های ۲ تا ۴ که نمونه‌هایی از سرریزهای مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشند، نشان داده شده است. شکل ۲ مربوط به جریان ریزشی در سرریز ۳ پله‌ای با شیب ۱:۲ و اندازه ذرات سنگی ۱۰ میلی‌متر، شکل ۳ مربوط به جریان انتقالی در سرریز ۶ پله‌ای با شیب ۱:۲ و اندازه ذرات سنگی ۴۰ میلی‌متر و شکل ۴ مربوط به جریان غیرریزشی در سرریز ۶ پله‌ای با شیب ۱:۱ و اندازه ذرات سنگی ۲۵ میلی‌متر می‌باشند. معیار وقوع جریان ریزشی دبی‌های کم است که در آن جریان آب از روی یک پله روی پله دیگر به صورت آبشار عمودی سقوط می‌کند. در دبی‌های بیشتر، کل پله‌ها زیر سطح آب مستغرق می‌شوند و جریان غیرریزشی اتفاق می‌افتد. بین دو حد فوق‌الذکر، جریان انتقالی رخ می‌دهد.



شکل ۲. جریان ریزشی در سرریز ۳ پله‌ای با شیب ۱:۲ و  
 $Q=33 \text{ lit/s}$  ,  $d_{50}=10 \text{ mm}$

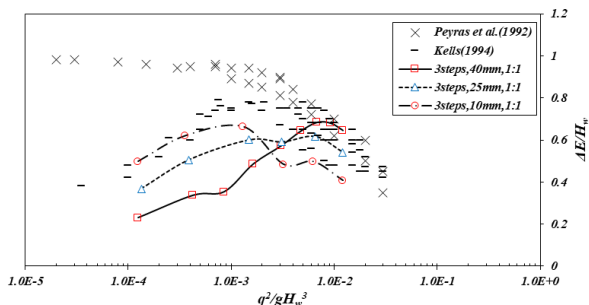
Fig. 2. Nappe flow over the gabion stepped spillway with 3 steps, slope 2:1 (H:V),  $d_{50}=10 \text{ mm}$  and  $Q=33 \text{ lit/s}$

در شکل ۵ تغییرات افت انرژی نسبی (بی‌بعد) جریان در مقابل عمق بحرانی نسبت به تعداد پله‌ها به ترتیب برای سرریز توری سنگی ۳، ۶ و ۱۲ پله‌ای با قطر متوسط ذرات ۴۰ میلی‌متر و شیب ۱:۱ رسم شده است. قابل ذکر است که علامت‌های مشخص شده در شکل‌های زیر دارای معانی زیر می‌باشند:

به عنوان مثال ۱:۲، ۴۰ mm، ۳ steps به معنی سرریز توری سنگی ۳ پله‌ای با قطر متوسط ذرات ۴۰ میلی‌متر و شیب ۱ به ۲ (عمودی به افقی) می‌باشد.

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد در سرریزهای پله‌ای توری سنگی با افزایش تعداد پله‌ها، افت انرژی نسبی به دلیل کم شدن سطح تماس بدنه سازه با آب و کم شدن مقاومت جریان و هم‌چنین سریع شکل گرفتن جریان غیرریزشی، کاهش می‌یابد. با توجه به این که در سرریز توری سنگی با شیب ۱:۱ مورد مطالعه در این تحقیق مقدار  $h/l$  (ارتفاع پله و طول پله) برابر واحد می‌باشد، لذا با توجه به ثابت بودن شیب‌نمای پایین دست سازه هرچه

علت اصلی این روند را با توجه به نتایج و رابطه  $\Delta E = E_0 - E_1$  می‌توان این‌گونه شرح داد که با افزایش دبی جریان تحت شرایط جریان درون‌گذر و روگذر،  $E_0$  و  $E_1$  هر دو افزایش می‌یابند. اما ذکر این نکته لازم است که تحت شرایط جریان درون‌گذر روند افزایشی  $E_0$  خیلی بیشتر از  $E_1$  بوده، این در حالی است که تحت شرایط جریان روگذر روند افزایشی  $E_1$  به مراتب بیشتر از  $E_0$  می‌گردد. مطابق شکل ۶ این فرآیند در آزمایش‌های کلز (۱۹۹۴) نیز مشاهده می‌گردد و اختلاف بین نتایج ایشان با نتایج تحقیق حاضر به دلیل مصالح به کار رفته در آزمایش‌های ایشان (قطر متوسط ۱۸/۶ میلی‌متر) و ارتفاع سرریز توری‌سنگی ۳۸ سانتی‌متری می‌باشد. تفاوت روند تغییرات افت نسبی انرژی در نتایج پیراس و همکاران (۱۹۹۲) با نتایج این تحقیق و کلز (۱۹۹۴) به این دلیل است که جریان در تحقیق‌های پیراس و همکاران (۱۹۹۲) از ابتدا کاملاً به صورت روگذر بوده اما از یک مقدار دبی به بعد روندی مشابه کلز (۱۹۹۴) و نتایج تحقیق حاضر به خود می‌گیرد. همچنین نتایج نشان داد که به ازای یک مقدار دبی مشخص، جریان غیرریزشی در سرریزهای با تخلخل کم‌تر (قطر متوسط ۱۰ میلی‌متر) زودتر از سرریزهای با تخلخل بیشتر (قطر متوسط ۴۰ میلی‌متر) رخ می‌دهد. علت آن را با توجه به مشاهده‌های می‌توان این‌گونه بیان کرد که در سرریزهای با تخلخل کم‌تر به دلیل نفوذپذیری کم‌تر و به تبع آن سریع تبدیل شدن جریان درون‌گذر به روگذر، لذا جریان غیرریزشی سریع‌تر از سرریزهای با تخلخل بیشتر رخ می‌دهد.

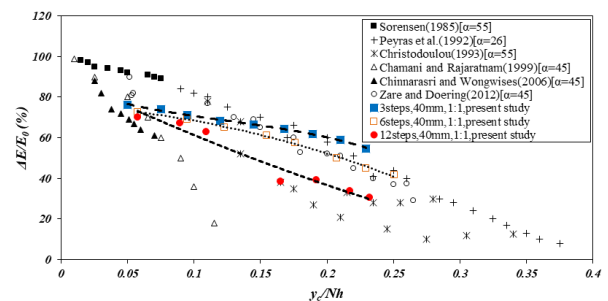


شکل ۶. تغییرات افت انرژی و دبی در واحد عرض نسبت به ارتفاع سرریز

Fig. 6. Variation of relative energy dissipation and unit discharge with height of step

شکل ۷ تغییرات بی‌بعد سرعت در پای سرریز نسبت به دبی جریان نسبی برای مصالح با ۳ قطر متوسط ۲۵، ۱۰ و ۴۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش دبی برای هر سه قطر، سرعت جریان در پایین دست سازه نیز افزایش می‌یابد. اما به ازای یک مقدار دبی معین، سرعت در مصالح کوچک‌تر، بیشتر از آن در مصالح بزرگ‌تر بوده و دلیل آن مربوط به بیشتر بودن زبری در مصالح بزرگ‌تر می‌باشد [۲۲]. لذا انتظار می‌رود که افت انرژی در سازه‌های حاوی مصالح بزرگ، بیشتر از آن در سازه‌های حاوی مصالح کوچک باشد.

تعداد پله‌ها افزایش یابد، و کوچک‌تر شده، در نتیجه سرریز پله‌ای عملاً به یک سرریز بدون پله (صاف) تبدیل می‌شود. نتایج این تحقیق با نتایج دیگر محقق‌ها نیز مطابق شکل ۵ مقایسه و بررسی شده است [۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵]. نتایج این تحقیق از یک مقدار دبی به بعد هم‌خوانی خوبی با نتایج زار و دورینگ (۲۰۱۲)، کریستودولو (۱۹۹۳) و پیراس و همکاران (۱۹۹۲) دارد. از آن‌جا که تحقیق‌های پیراس و همکاران بر روی سرریزهای پله‌ای توری‌سنگی و ذرات به کار رفته در محدوده ۳۰ الی ۴۵ میلی‌متر صورت گرفته هم‌خوانی بهتری با نتایج تحقیق حاضر دارد. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که از یک مقدار دبی به بعد با افزایش دبی عملاً از قدرت جریان درون‌گذر بر انرژی جریان کاسته می‌شود و جریان روگذر تأثیر بیشتری در استهلاک انرژی دارد. لذا مطابق شکل فوق در دبی‌های بالا، سرریزهای پله‌ای صلب و توری‌سنگی عمل‌کردی تقریباً یکسان نشان می‌دهند. با توجه به شکل فوق سرریز توری‌سنگی ۳ پله‌ای بیشترین افت انرژی نسبی را دارد. اختلافات موجود بین مطالعات دیگران با نتایج تحقیق حاضر به دلیل آن است که جریان در بیشتر مطالعات انجام شده فقط به صورت روگذر بوده؛ این در حالی است که در تحقیق حاضر جریان از ابتدا به صورت درون‌گذر/روگذر می‌باشد. در شکل ۶ تغییرات افت انرژی بی‌بعد نسبت به شدت جریان نشان داده شده است و با نتایج تحقیق‌های کلز (۱۹۹۴) [۲۱] و پیراس و همکاران (۱۹۹۲) مقایسه صورت گرفته است.



شکل ۵. تغییرات افت انرژی نسبی و عمق نسبی بحرانی با تعداد پله‌ها و مقایسه با دیگر مطالعات انجام شده

Fig. 5. Variation of relative energy dissipation and relative critical depth with number of steps and comparison with other studies

مطابق شکل ۶ در سرریزهای توری‌سنگی که از ابتدا جریان درون‌گذر به داخل سرریز وجود دارد، با افزایش دبی افت انرژی نیز افزایش می‌یابد. اما از یک مقدار دبی معین به بعد افت انرژی روندی کاهشی به خود می‌گیرد که البته این روند صعودی و نزولی بسته به قطر متوسط ذرات به کار گرفته شده در آزمایش‌ها متفاوت می‌باشد. به عبارتی دیگر روند نزولی افت انرژی نسبی در مصالح با قطر ذرات کوچک‌تر، سریع‌تر از مصالح بزرگ‌تر آغاز می‌گردد.

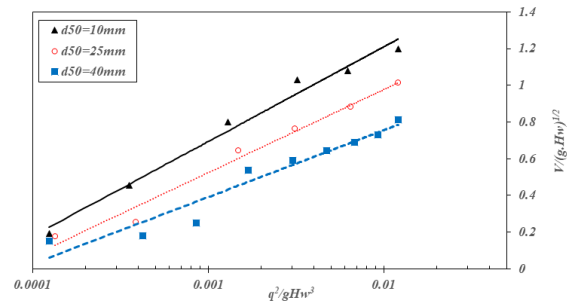
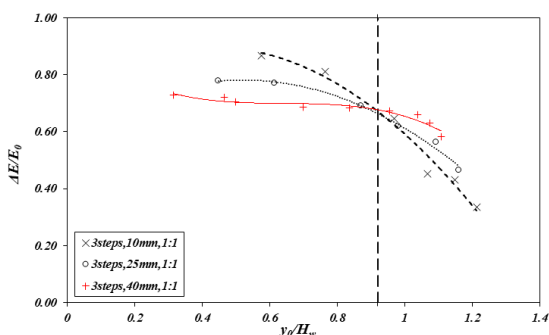
1 Kells

به ازای  $y_0/H_w > 0.92$  و با بالا رفتن سطح آب در پشت سازه و در نتیجه تبدیل شدن جریان درون گذر به روگذر، افت انرژی نسبی در مصالح با قطر متوسط ۴۰ میلی متر به ترتیب بیشتر از آن در مصالح با قطر متوسط ۲۵ و ۱۰ میلی متر می گردد. با اینکه با افزایش شدت جریان کلیه سرریزها (اعم از صلب یا توری سنگی) عملکردی تقریباً مشابه یکدیگر خواهند داشت، اما تغییرات افت انرژی در محدوده  $y_0/H_w \leq 0.92$  را می توان این گونه شرح داد که ذرات با قطر متوسط ۱۰ میلی متر که نفوذپذیری کمتری نسبت به ذرات دیگر موجود در این تحقیق دارند، تقریباً رفتاری نزدیک به سرریزهای صلب از خود نشان دادند. لذا با توجه به موارد بیان شده می توان انتظار داشت که طرح پیشنهادی (شکل ۱۰) که در آن از مصالح ریزدانه (قطر متوسط ۱۰ میلی متر) در داخل بدنه سازه و مصالح درشت دانه (قطر متوسط ۴۰ میلی متر) بر روی پله ها استفاده شده است، می تواند بیشترین کارایی را در استهلاک انرژی جریان داشته باشد. مقدار  $y_0/H_w$  در دبی حداقل و دبی حداکثر برای ذرات با قطر متوسط ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی متر به ترتیب برابر (۰/۵۷ و ۱/۲۲)، (۰/۴۵ و ۱/۱۶) و (۰/۳۱ و ۱/۱) می باشد.

شکل ۱۱ تغییرات بی بعد عمق جریان در پای سرریز پله ای توری سنگی نسبت به شدت جریان برای شیب های مختلف را نشان می دهد. همان طور که شکل ۱۱ نشان می دهد با افزایش شدت جریان (دبی) عمق جریان پایین دست سرریز نیز افزایش می یابد. از طرفی تحت شرایط یکسان (ارتفاع سرریز ثابت و دبی مشخص) مقدار عمق جریان پای سرریز در شیب ۱:۳ به ترتیب بیشتر از آن در شیب های ۱:۲ و ۱:۱ می باشد. چون با کاهش شیب نمای پایین دست سرریز از قدرت جریان کاسته شده و به تبع آن عمق جریان در پای سرریز نیز افزایش می یابد. همین روند در نتایج پیراس و همکاران (۱۹۹۲) نیز مشاهده می گردد. ذکر این نکته که علت تفاوت در جانمایی نقاط به منظور مقایسه با تحقیق های پیراس و همکاران (۱۹۹۲)، به این دلیل است که ارتفاع سازه در تحقیق های ایشان ۳ الی ۵ متر بوده اما در این تحقیق ارتفاع سازه ۶۰ سانتی متر می باشد. در شکل ۱۲ سرریزهای پله ای توری سنگی با شیب ها و دانه بندی مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار داده شده است.

شکل ۹. تغییرات بی بعد افت انرژی نسبت به عمق آب پشت سرریز

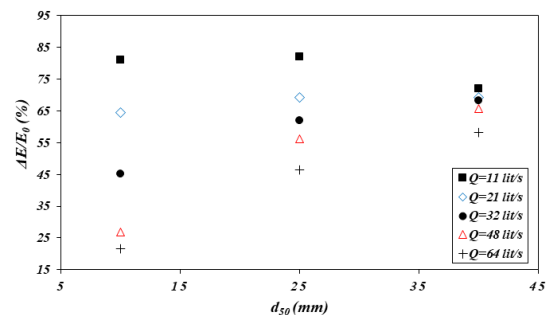
Fig. 9. Variation of relative energy dissipation with water depth upstream of spillway



شکل ۷. تغییرات نسبی سرعت نسبت به دبی برای سرریز توری سنگی ۳ پله ای با شیب ۱:۱

Fig. 7. Variation of relative velocity respect to discharge for gabion stepped spillway with 3 steps and slope 1:1

در ادامه جهت بررسی های بیشتر تأثیر اندازه ذرات بر افت انرژی، مطابق شکل ۸ تغییرات افت انرژی نسبی برای قطرهای متوسط ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی متر رسم شده است. در هر سه دانه بندی با افزایش دبی جریان، افت انرژی نسبی کاهش می یابد. اما این مقدار کاهش افت انرژی در مصالح با قطر متوسط کوچک تر مشهودتر می باشد. از طرفی با افزایش قطر متوسط ذرات از ۱۰ به ۴۰ میلی متر، افت انرژی نسبی افزایش یافته و حداکثر اختلاف افت انرژی نسبی بین این دو محدوده از مصالح در دبی حداکثر حدوداً ۳۰ درصد می باشد.



شکل ۸. تغییرات افت انرژی نسبی نسبت به قطر متوسط ذرات مختلف

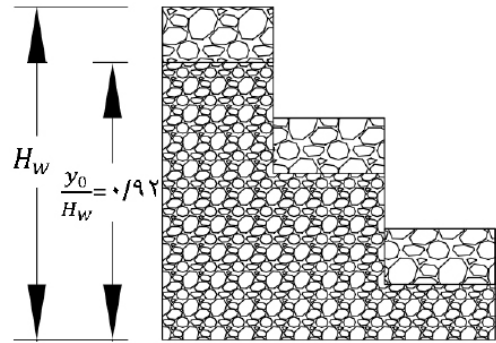
Fig. 8. Variation of relative energy dissipation with different mean stone diameters

به منظور بررسی های بیشتر در رابطه با تأثیر اندازه ذرات بر میزان افت انرژی، مطابق شکل ۹ تغییرات بی بعد افت انرژی نسبت به عمق آب پشت سازه (y0) ارائه شده است. مطابق شکل ۹ با افزایش دبی جریان، طبیعتاً عمق آب پشت سازه نیز افزایش می یابد، اما نکته ای که باید به آن اشاره کرد آن است که به ازای  $y_0/H_w \leq 0.92$  (زمانی که جریان فقط درون گذر است) افت انرژی نسبی در مصالح با قطر ۱۰ میلی متر به ترتیب بیشتر از آن در مصالح با قطر متوسط ۲۵ و ۴۰ میلی متر می باشد. اما با افزایش دبی جریان

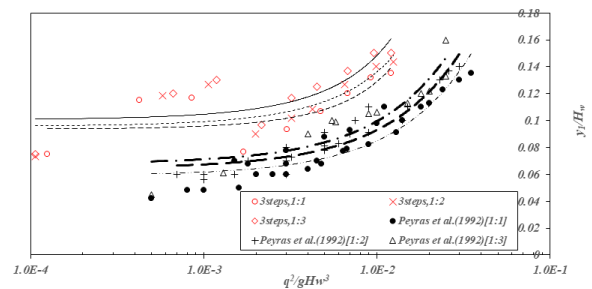
مطابق شکل ۱۲ برای قطر متوسط ۴۰ میلی‌متر، کاهش شیب سرریز تأثیر چندانی بر افت انرژی نسبی نشان نداده است. کلز (۱۹۹۴) نیز در تحقیق‌های خود که بر روی دو شیب ۱:۱ و ۱:۲ مطالعه آزمایشگاهی کرده بود، به این نتیجه دست یافت [۲۱]. اما برای قطر متوسط ۱۰ میلی‌متر، کاهش شیب سرریز از ۱:۱ به ۱:۳ تأثیر نسبتاً بیشتری بر افت انرژی نسبی نشان داد. به عبارتی دیگر هنگام استفاده از مصالح درشت‌تر، کاهش شیب سرریز تأثیر چندانی بر افت انرژی نسبی نداشته لذا جهت کاهش هزینه‌ها استفاده از سرریزهای توری سنگی ۳ پله‌ای با شیب‌نمای پایین‌دست ۱:۱ حاوی مصالح درشت‌تر با به کارگیری تمهیداتی (از قبیل آستانه انتهایی بر روی هر پله یا استفاده از حوضچه‌های آرامش) پیشنهاد می‌گردد. در سرریز ۳ پله‌ای با توجه به ثابت بودن ارتفاع سازه مقدار ارتفاع پله‌ها (h) ثابت و برابر ۲۰ سانتی‌متر بوده اما طول پله‌ها (L) برای شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ به ترتیب برابر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. لذا با توجه به شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر طول افقی پله‌ها بر استهلاک انرژی جریان ناچیز می‌باشد و این موضوع در مطالعات دیگران نیز ثابت شده است [۱۲].

#### ۵- نتیجه‌گیری

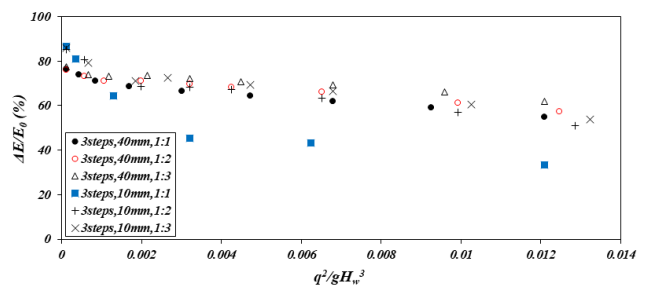
افت انرژی جریان از روی سرریز پله‌ای توری سنگی تابعی است از دبی جریان، قطر متوسط ذرات، تعداد پله‌ها، ارتفاع و شیب سرریز. به عبارتی دیگر با افزایش دبی جریان، عمق و سرعت جریان در پای سرریز نیز افزایش یافته و به تبع آن، افت انرژی جریان کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش تعداد پله‌های سرریز، افت انرژی نسبی به دلیل کم شدن سطح تماس آب با بدنه سازه و کم شدن مقاومت جریان و هم‌چنین سریع شکل گرفتن جریان غیربزشی، کاهش می‌یابد. لذا استفاده از سرریزهای توری سنگی ۳ پله‌ای در کارهای اجرایی بیشتر توصیه می‌گردد. شیب‌نمای پایین‌دست سازه‌های گابیونی تأثیر کمی بر استهلاک انرژی جریان دارد. لذا استفاده از سرریزهای توری سنگی با شیب ۱:۱ به دلیل کم‌هزینه بودن نسبت به شیب‌های کم‌تر توصیه می‌گردد. تغییرات افت انرژی در سازه‌های توری سنگی تحت شرایط جریان درون‌گذر و روگذر به ترتیب روندی صعودی و نزولی به خود می‌گیرد. قطر متوسط ذرات ۱۰ میلی‌متر به ازای  $y_0/H_w \leq 0.92$  و قطر متوسط ذرات ۴۰ میلی‌متر به ازای  $y_0/H_w > 0.92$  دارای بیشترین افت انرژی نسبی می‌باشند. لذا این مطلب باید در مسائل طراحی بسته به نوع پروژه‌های اجرایی (انتخاب اندازه مصالح بر اساس نسبت  $y_0/H_w$ ) مد نظر کارشناسان واقع گردد. در نتیجه پیشنهاد تحقیق حاضر جهت دستیابی به ایده‌آل‌ترین شکل مطابق شکل ۱۰، سرریز ۳ پله‌ای توری سنگی با شیب ۱:۱ و استفاده از مصالح با قطر متوسط کوچک (در این تحقیق ۱۰ میلی‌متر) در داخل بدنه سازه و با قطر متوسط بزرگ (در این تحقیق ۴۰ میلی‌متر) بر روی پله‌ها می‌باشد.



شکل ۱۰. نمای پیشنهادی از سرریز پله‌ای توری سنگی با مصالح ریزدانه در داخل بدنه و مصالح درشت‌دانه بر روی پله‌ها  
Fig. 10. Cross section of gabion stepped spillway with fine stones in the spillway body and coarse stones on steps



شکل ۱۱. تغییرات عمق جریان در پای سرریز توری سنگی نسبت به دبی جریان تحت شیب‌های مختلف با قطر متوسط ۲۵ میلی‌متر  
Fig. 11. Variation of water depth in toe of gabion stepped spillway respect to discharge, including different slopes with  $d_{50}=25$  mm



شکل ۱۲. تغییرات بی‌بعد افت انرژی نسبت به دبی برای حالت‌های مختلف از سرریز مورد مطالعه  
Fig. 12. Variation of relative energy dissipation with different discharge of flow over spillway

- مراجع
- [12] M. Chamani, N. Rajaratnam, Characteristics of skimming flow over stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4) (1999) 361-368.
- [13] A. Hamed, A. Mansoori, I. Malekmohamadi, H. Roshanaei, Estimating energy dissipation in stepped spillways with reverse inclined steps and end sill, in: *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability*, 2011, pp. 2528-2537.
- [14] H.K. Zare, J.C. Doering, Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(2) (2012) 140-153.
- [15] C. Chinnarasri, S. Wongwises, Flow Patterns and Energy Dissipation over Various Stepped Chutes, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(1) (2006) 70-76.
- [16] G.M.A. Aal, M. Sobeah, E. Helal, M. El-Fooly, Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers, *Ain Shams Engineering Journal*, (2017).
- [17] E. Elnikhely, Investigation and analysis of scour downstream of a spillway, *Ain Shams Engineering Journal*, (2017).
- [18] D. Stephenson, Gabion energy dissipators, in: *Proc. 13th ICOLD Congress*, 1979, pp. 33-43.
- [19] G.G. Pegram, A.K. Officer, S.R. Mottram, Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways, *Journal of hydraulic engineering*, 125(5) (1999) 500-510.
- [20] C.-I. Chen, Momentum and energy coefficients based on power-law velocity profile, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11) (1992) 1571-1584.
- [21] J. Kells, Energy dissipation at a gabion weir with throughflow and overflow, in: *Ann. Conference Can. Soc. Civ. Engrg.*, Winnipeg, Canada, June, 1994, pp. 1-4.
- [22] J.M. Leu, H.C. Chan, M.S. Chu, Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6) (2008) 331-337.
- [1] I. Ohtsu, Y. Yasuda, M. Takahashi, Flow characteristics of skimming flows in stepped channels, *Journal of hydraulic Engineering*, 130(9) (2004) 860-869.
- [2] C. Chinnarasri, S. Wongwises, Flow regimes and energy loss on chutes with upward inclined steps, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(5) (2004) 870-879.
- [3] R.M. Boes, W.H. Hager, Two-phase flow characteristics of stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9) (2003) 661-670.
- [4] C. Chinnarasri, S. Donjadee, U. Israngkura, Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8) (2008) 1147-1152.
- [5] F. Salmasi, M. Chamani, D.F. Zadeh, Experimental study of energy dissipation over stepped gabion spillways with low heights, *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 36(C2) (2012) 253.
- [6] H.I. Mohamed, Flow over gabion weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8) (2009) 573-577.
- [7] C.A. Gonzalez, M. Takahashi, H. Chanson, An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes, *Journal of Hydraulic Research*, 46(sup1) (2008) 24-35.
- [8] R.M. Sorensen, Stepped spillway hydraulic model investigation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12) (1985) 1461-1472.
- [9] G.C. Christodoulou, Energy dissipation on stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(5) (1993) 644-650.
- [10] W. Rand, Flow geometry at straight drop spillways, in: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, 1955, pp. 1-13.
- [11] L.a. Peyras, P. Royet, G. Degoutte, Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5) (1992) 707-717.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Razi, F. Salmasi, A. Hoseinzade Dalir, Laboratory Study of the Effects of Step Number, Slope and Particle Size on Energy Dissipation in Gabion Stepped Weirs, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 749-756.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13984.5527

