



بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در سرریزهای پله ای توری سنگی

سینا رازی، فرزین سلماسی*، علی حسین زاده دلیر

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

توری سنگی
سرریز پله ای
آستانه مستطیلی
آستانه شیب دار
اُفت انرژی

خلاصه: در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی، مؤلفه های مختلفی که بر روی اُفت انرژی جریان عبوری از روی سرریزهای پله ای توری سنگی مؤثر هستند، مطالعه و با نتایج دیگر محققان نیز مقایسه صورت گرفته است. جریان عبوری از سرریز توری سنگی هم به صورت درون گذر و هم به صورت روگذر انجام گرفت. دامنه دبی بکار رفته در این تحقیق در محدوده ۵ الی ۶۵ لیتر بر ثانیه است. از ذرات یکنواخت با سه قطر متوسط ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی متر استفاده شد. ارتفاع و عرض مدل های فیزیکی ساخته شده از سرریز پلکانی توری سنگی به ترتیب ۶۰ و ۴۰ سانتی متر، با پله های ۳ تایی و شیب نمای پایین دست سرریزها (افقی: عمودی) ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ هستند. آستانه های انتهایی به کار گرفته شده مستطیلی و شیب دار هستند. نتایج نشان داد که تأثیر آستانه ها در سرریزهای پله ای توری سنگی با شیب نمای پایین دست کمتر، بیشتر از حالتی است که سرریز دارای شیب نمای پایین دست تندتر است. تأثیر آستانه ها بر اُفت انرژی جریان در سرریز با مصالح ۴۰ میلی متر و شیب نمای پایین دست ۱:۲ حدود ۱۰ درصد بیشتر از همان سرریز با شیب نمای پایین دست ۱:۱ بوده و در سرریز با مصالح ۱۰ میلی متر و شیب نمای پایین دست ۱:۲ حدود ۳۰ الی ۳۵ درصد بیشتر از همان سرریز با شیب نمای پایین دست ۱:۱ است. لذا وجود آستانه ها در سرریز پله ای با بدنه مصالح ۱۰ و ۴۰ میلی متر به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر اُفت انرژی جریان دارند. از طرفی تأثیر آستانه مستطیلی بر اُفت انرژی جریان حدود ۳ الی ۴ درصد بیشتر از تأثیر آستانه مثلثی است.

۱- مقدمه

[۱]. سرریزهای توری سنگی در حوضه های آبریز برای کنترل فرسایش سیلاب ها و بالا بردن سطح آب برای آبیاری در کانال های آبیاری مورد استفاده قرار می گیرند. بیشتر مطالعات انجام شده، بر روی سرریزهای صلب نفوذ ناپذیر بوده است و بر روی سرریزهای توری سنگی (نفوذپذیر) که دارای مزایای بسیاری است، تحقیق های کمتری صورت گرفته است. از جمله مزایای سرریزهای توری سنگی سهولت در اجرا، استفاده از مصالح قرضه، پایداری، انعطاف پذیری، نفوذ پذیری بالا، مقرون به صرفه بودن و مهم تر از همه سازگار بودن با محیط زیست است [۲]. این نوع سرریزها از انعطاف بیشتری نسبت به نوع صلب آن برخوردار بوده و در مقابل بارهای ناشی از فشار

سرریزهای پله ای مجموعه ای از پله هایی است که از تاج سرریز شروع و تا پنجه پایین دست آن ادامه می یابد. به دلیل تأثیر پله ها بر افزایش میزان استهلاک انرژی جریان، در سال های اخیر توجه زیادی به این نوع سرریزها شده است. میزان استهلاک زیاد انرژی توسط سرریزهای پله ای باعث کاهش عمق حفاری، طول و ارتفاع حوضچه های آرامش و در نتیجه کاهش هزینه های ساخت حوضچه می شود. سرریزهای پله ای و کانال های پله ای قدیمی ترین سازه های هیدرولیکی هستند و قدمت آنها به حدود ۳۵۰۰ سال می رسد

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Salmasi@tabrizu.ac.ir

داد. ایشان مهم ترین پارامتر مؤثر در اُفت انرژی را نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله (y/h) و تعداد پله ها (N) اعلام کردند. همچنین نشان دادند که به ازای یک مقدار دبی معین، با افزایش Nh (که تقریباً برابر با کل ارتفاع سرریز است)، اُفت انرژی نسبی کاهش می یابد [۸]. چمنی و راجاراتنام^۶ (۱۹۹۹) اظهار داشتند که اُفت انرژی نسبی در سرریزهای پله ای در محدوده ۴۸ الی ۶۳ درصد است. همچنین اعلام کردند که به ازای یک مقدار دبی مشخص و h/l (ارتفاع پله و l طول افقی پله) یکسان، h بزرگ تر دارای اُفت انرژی بیشتری است [۹]. فراتینو و پیکینی^۷ (۲۰۰۰) آزمایش های خود را بر روی سرریزهای پله ای و در زوریخ سوئیس انجام دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با کاهش شیب نمای پایین دست سرریز، زمانی که رژیم جریان انتقالی و غیرریزشی است، انرژی بیشتری از جریان مستهلک می شود [۱۰]. چاتورابول^۸ (۲۰۰۲) آزمایش هایی برای بررسی اُفت انرژی و سرعت جریان در کانال های پله ای با آستانه انتهایی^۹ و با ارتفاع پله های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متر انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که وجود آستانه انتهایی باعث افزایش اُفت انرژی نسبی تا حدود ۸ درصد می شود [۱۱]. چیناراسری و ونگ وایز^{۱۰} (۲۰۰۶) آزمایش هایی بر روی سرریزهای پله ای با شیب پله معکوس، با آستانه انتهایی و ساده انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد که پله های شیب دار، استهلک انرژی را تا ۱۰ درصد افزایش می دهد و آستانه انتهایی بیشتر از شیب پله معکوس بر استهلک انرژی مؤثر است. همچنین ایشان ثابت کردند که هرچه ارتفاع آستانه افزایش یابد، به تناسب آن استهلک انرژی نیز بیشتر می شود. نتایج آن ها نشان داد که به ازای یک مقدار مشخص از y/h (عمق بحرانی)، اُفت انرژی نسبی با افزایش پله ها افزایش می یابد [۱۲]. حامدی و همکاران (۲۰۱۱) سرریزهای پله ای با شیب معکوس و با آستانه انتهایی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که بکارگیری هم زمان پله های شیب دار معکوس با آستانه انتهایی دارای بیشترین تأثیر در مقدار اُفت انرژی بوده و زاویه فوقانی آستانه انتهایی دارای کم ترین تأثیر در مقدار اُفت انرژی جریان است [۱۳]. سلماسی و همکاران (۲۰۱۲) آزمایش هایی را بر روی سرریز پله ای توری سنگی با تخلخل های ۳۸ و ۴۰ و ۴۲ درصد

آب، مقاوم و پایدار هستند. استهلک انرژی جریان از روی چنین سازه هایی به دلیل وجود جریان درون گذر^۱ و روگذر^۲ پله ها زیاد بوده و لذا هزینه های ساخت حوضچه آرامش کاهش می یابد [۳]. از دیدگاه کیفیت آب، مواد فیزیکی و شیمیایی از قبیل مواد آلی معلق و ته نشین می توانند از بین دانه های نفوذپذیر به پایین دست عبور کنند و این روند، رسوب و انباشت آب در آبگیر را به حداقل می رساند. لابه لای این سنگ ها باکتری هایی که در سطح دانه ای ساکن هستند، ممکن است باعث تجزیه شدن مواد آلی گردند. این واکنش بیوشیمیایی (زیستی- شیمیایی) زمانی که جریان از بین سنگ ها عبور می کند، منجر به تصفیه آب رودخانه یا کانال می شود. همچنین تلاطم به وجود آمده در محیط سنگ دانه ای، هوادهی کل آب- هوا را با کمک تجزیه هوازی مواد آلی تقویت می کند. از این رو، سرریز گابیونی یک سازه با حداقل اثرات منفی بر روی محیط زیست آبی بوده که نسبت به سرریزهای غیرقابل نفوذ ساخته شده اخیر، بسیار با محیط زیست سازگارتر است [۴].

سورنسون^۳ (۱۹۸۵) آزمایش های خود را بر روی سرریز پله ای صلب با تاج اوجی انجام داد و بیان کرد که پله ها به میزان چشم گیری انرژی جریان را نسبت به سرریزهای صاف مستهلک می کنند [۵]. پیراس و همکاران^۴ (۱۹۹۲) تحقیق های خود را در یک فلوم به عرض ۸۰ سانتی متر با شیب نمای پایین دست ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱ انجام دادند. هدف آن ها تخمین اُفت انرژی جریان و تعیین ابعاد هندسی حوضچه آرامش در پایین دست سرریز بود. آن ها چهار مدل از پله ها را مورد مطالعه قرار دادند: پله های تخت (صاف) بدون حفاظ، پله های دارای حفاظ بتنی، پله های دارای حفاظ بتنی با شیب معکوس و پله های دارای آستانه انتهایی. نتایج آزمایش های آن ها در مقایسه با آزمایش های رند (۱۹۵۵) [۶] که بر روی پله های بتنی صلب انجام شده بود، ۱۰ درصد استهلک انرژی بیشتری را نشان داد که علت آن را می توان به اختلاف در سطح زبری و نفوذپذیری گابیون و شیب سرریز نسبت داد. هم چنین نتایج آن ها نشان داد که نفوذناپذیر کردن کف پله ها از استهلک انرژی جریان می کاهد [۷]. کریستودولولو^۵ (۱۹۹۳) آزمایش های خود را بر روی سرریز پله ای صلب با تاج اوجی انجام

6 Chamani and Rajaratnam
7 Fratino and Piccinni
8 Chaturabul
9 End sill
10 Chinnarasri and Wongwiset

1 Inflow
2 Overflow
3 Sorensen
4 Peyras et al.
5 Christodoulou

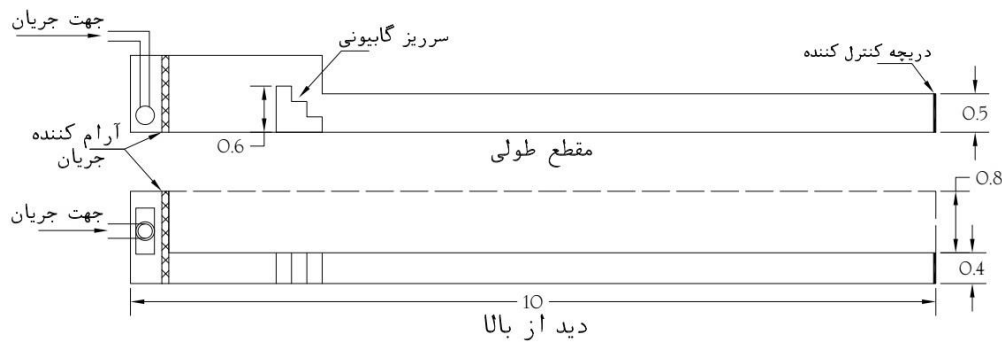
جریان کمتر می‌شود و اُفت انرژی در دبی‌های بزرگ‌تر در سرریز پله‌ای توری سنگی کمتر از آن در سرریز پله‌ای غیرقابل نفوذ است [۱۸]. ژانگ و چانسون^۵ (۲۰۱۶) آزمایش‌های خود را برای بررسی مقاومت جریان بر روی سرریز پله‌ای توری سنگی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب اصطکاک تحت شرایط یکسان در سرریز پله‌ای توری سنگی حدوداً نصف آن مقدار در سرریز پله‌ای صاف می‌باشد و این مقدار با افزایش شدت جریان افزایش یافته و مقدار آن در جریان‌های غیرریزشی بیشتر از جریان‌های انتقالی می‌گردد [۱۹]. توضیح این‌که کاهش استهلاک انرژی برای سرریزهای گابیونی پله‌ای نسبت به پله‌های صاف، تحت شرایط جریان غیرریزشی رخ می‌دهد. فرض محققان نامبرده بر این بوده که در جریان غیرریزشی با افزایش دبی، حرکت چرخشی حفره‌ای تحت تأثیر نشت دبی از داخل سازه به حفره‌های پله و سطح پله، تغییر کرده (از بین می‌رود و یا کمتر می‌شود) و این مسأله منجر به کاهش مقاومت جریان و کاهش اُفت انرژی در سرریزهای پله‌ای توری سنگی نسبت به سرریزهای صاف می‌گردد. در سرریزهای پله‌ای صاف، جریان چرخشی زیاد در فضای مثلثی شکل پای هر پله، عامل مهمی در افزایش استهلاک انرژی تشخیص داده شده است که در سرریزهای گابیونی به دلیل نفوذ آب به حفره‌ها، اثر چرخشی آب کاهش می‌یابد. البته لازم به یادآوری است که این یافته‌ها برای خود محققین نیز غیرمنتظره بوده است و به نظر می‌رسد که تحقیقات بیشتری در این خصوص لازم خواهد بود. اسدی و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش‌هایی را بر روی یک سرریز ۶۱ پله‌ای با شیب‌نمای پایین دست ۳۳ درصد انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اُفت انرژی نسبی به پارامترهایی نظیر شدت جریان، ارتفاع و طول آستانه بستگی دارد و بهترین آستانه که دارای بیشترین اُفت انرژی در سرریز پله‌ای است، دارای ارتفاعی معادل ۰/۴ برابر ارتفاع پله سرریز و ۰/۲۵ برابر طول پله سرریز است. همچنین با نصب آستانه بر روی هر پله، مقدار اُفت انرژی حدود ۴ الی ۱۱ درصد نسبت به حالت پله بدون آستانه افزایش می‌یابد [۲۰]. النیخلی^۶ (۲۰۱۷) آزمایش‌های خود را بر روی سرریز دارای بلوک‌های استوانه‌ای انجام داد و میزان آب شستگی رخ داده در پایین دست سرریز را مورد مطالعه قرار داد. سرریز مورد مطالعه در کارایشان دارای عرض ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۴/۵ سانتی‌متر و شیب‌نمای پایین دست ۳۰ درجه

و شیب‌نمای پایین دست ۱:۱ و ۱:۲ که وجوه عمودی و افقی پله‌ها با و بدون پوشش بودند، انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پله‌ها با وجوه عمودی غیرقابل نفوذ دارای اُفت انرژی بیشتری نسبت به وجوه افقی غیرقابل نفوذ بوده و با افزایش تخلخل و کاهش شیب، اُفت انرژی جریان نیز افزایش می‌یابد [۳].

تیونا (۲۰۱۲) و تیونا و امیراگلو^۱ (۲۰۱۳) آزمایش‌های خود را بر روی آب شستگی موضعی در پایین دست سرریزهای پله‌ای انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب سرریز و شدت دبی جریان، عمق آب شستگی در پایین دست سرریز نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت ارتفاع پله به طول پله، تأثیر قابل توجهی بر گسترش آب شستگی دارد. برای کمترین نسبت ارتفاع پله به طول پله برابر با ۰/۵۷۷ بیشترین میزان آب شستگی رخ می‌دهد [۱۴، ۱۵]. زار و دورینگ^۲ (۲۰۱۲) آزمایش‌هایی را بر روی سرریزهای پله‌ای گردگوشه و سرریزهای پله‌ای معمولی (پله‌های تیز گوشه) انجام دادند. نتایج نشان داد که سرریزهای پله‌ای گردگوشه انرژی جریان را ۳ درصد بیشتر از سرریزهای پله‌ای معمولی مستهلک می‌کنند [۱۶]. فلدر و چانسون^۳ (۲۰۱۴) آزمایش‌های خود را بر روی سرریز پله‌ای با شیب‌نمای پایین دست ۲۶/۶ درجه که در انتهای پله‌ها سه آستانه انتهایی با تخلخل‌های مختلف صفر، ۵ و ۳۱ درصد قرار داشت، انجام دادند. نتایج نشان داد که انرژی باقیمانده در سرریز پله‌ای با آستانه‌های انتهایی دارای تخلخل ۵ و ۳۱ درصد به ترتیب حدود ۱/۳ و ۱/۵ الی ۲ برابر بیشتر از انرژی باقیمانده در سرریز پله‌ای با آستانه‌های انتهایی بدون تخلخل است. همچنین استفاده از صفحات صاف (بدون آستانه) را به دلیل ثبات جریان و عملکرد بهتر استهلاک انرژی پیشنهاد دادند [۱۷] واثریک و چانسون^۴ (۲۰۱۴) آزمایش‌های خود را بر روی سرریز پله‌ای توری سنگی با و بدون مانع صلب بر روی پله‌ها انجام دادند و میزان هوادهی در این سرریزها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در دبی‌های کمتر، تولید هوادهی در پله‌های توری سنگی افزایش می‌یابد و با افزایش دبی و شکل‌گیری جریان غیرریزشی، تولید هوادهی در سرریزهای پله‌ای صاف غیرقابل نفوذ بیشتر می‌شود. همچنین اعلام کردند که در سرریزهای پله‌ای توری سنگی میزان تعداد حباب‌ها و شدت تلاطم

- 1 Tuna and Emiroglu
- 2 Zare and Doering
- 3 Felder and Chanson
- 4 Wuthrich and Chanson

5 Zhang and Chanson
6 Elnikhely



شکل ۱. نمایی از فلوم آزمایشگاهی و محل قرارگیری سرریز پله‌های توری‌سنگی (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 1. View of the laboratory flow and location of the stepped gabion spillway (dimensions in meters)

منابع طبیعی خراسان رضوی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دبی، تلفات انرژی در سرریزهای توری‌سنگی بدون رسوبات بیشتر از آن در سرریزهای توری‌سنگی دارای رسوبات است [۲۳]. صدریان زاده و همکاران (۱۳۹۶) مطالعات خود بر روی غلظت هوای مخلوط با جریان آب در نقاط مختلف روی سرریز پله‌ای در جریان غیر ریزشی با مدل فلوئنت و مدل فیزیکی انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، غلظت هوای محلول در آب کاهش می‌یابد [۲۴].

مطابق توضیحات بالا، بیشتر مطالعات صورت گرفته شده بر روی سرریزهای پله‌ای صلب بوده است. از طرفی اهمیت سرریزهای توری‌سنگی در بخش محیط زیست و کاربردی بودن این سازه‌ها در پروژه‌های مهندسی رودخانه واضح است. لذا هدف از انجام این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیک جریان از روی سرریزهای پله‌ای توری‌سنگی، مطالعه آستانه‌های مستطیلی و شیب دار توری‌سنگی به عنوان جنبه‌های نوآوری مورد نظر در این تحقیق و تأثیر آن‌ها بر تغییرات افت انرژی جریان و ارائه روابط ریاضی برای تشخیص جریان غیرریزشی و تخمین افت انرژی جریان است.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز، 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 است، با شیب کف ثابت صورت گرفت. جنس کف فلوم از آهن گالوانیزه و جنس

بود. در پایین دست سرریز، خاک شنی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با مشخصات d_{84} و d_{50} به ترتیب برابر با ۱/۷ و ۲/۲۸ میلی‌متر استفاده شد. 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_{us} به ترتیب تا حدود ۲۵ درصد و ۲۷ درصد کاهش می‌یابد (L_s و d_s به ترتیب حداکثر عمق و حداکثر طول آبستگي و y_{us} و y_{up} به ترتیب عمق آب بالادست و پایین دست) [۲۱]. آل و همکاران^۱ (۲۰۱۷) تحقیقات آزمایشگاهی خود را بر روی سرریزهای پله‌ای موج‌شکن دار مستطیلی به منظور تخمین افت انرژی مورد مطالعه قرار دادند. اولین حالت سرریز پله‌ای بدون موج‌شکن و حالت‌های بعدی با موج‌شکن و نسبت‌های h_b/h_s (h_b ارتفاع موج‌شکن و h_s ارتفاع پله) برابر با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که سرریزهای پله‌ای موج‌شکن دار افت انرژی جریان را افزایش داده و وجود حفره (کوچک یا بزرگ) در داخل موج‌شکن‌ها نتایجی بهتر از موج‌شکن‌های بدون حفره یا سرریز پله‌ای کلاسیک (بدون موج‌شکن) داشت. همچنین نشان دادند که بیشترین مقدار افت انرژی در سرریز پله‌ای موج‌شکن دار با مشخصات h_b/h_s برابر با ۰/۸ رخ می‌دهد و وجود سه حفره در داخل موج‌شکن‌ها دارای بیشترین افت انرژی خواهد بود [۲۲].

رجایی و همکاران (۱۳۹۶) آزمایش‌های خود را بر روی سرریزهای پله‌ای توری‌سنگی تحت شرایط بدون رسوب و با رسوب گذاری در بالادست سرریز در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات کشاورزی و

جدول ۱. جزئیات ابعادی آستانه های مستطیلی و شیبدار به کار گرفته شده در تحقیق حاضر

Table 1. Details of geometrical dimensions used in this study for rectangular and inclined sills

آستانه مستطیلی	h_b/h_s	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۵
	l_b/h_s	-	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
آستانه شیبدار	h_a/h_s	-	۰	۰/۲۵	۰/۵
	l_a/h_s	-	-	۰/۵	۰/۵

جدول ۲. تعداد آزمایش های انجام شده و محدوده متغیرها

Table 2. Number of experimental data and limit of variables

تعداد کل آزمایش ها	عدد فرود	عدد رینولدز	تغییرات دبی (لیتر بر ثانیه)
۳۹۱	۰/۴-۴/۸	$۵ \times 10^{-5} - ۱۰^۴ \times ۱/۳$	۵-۶۵

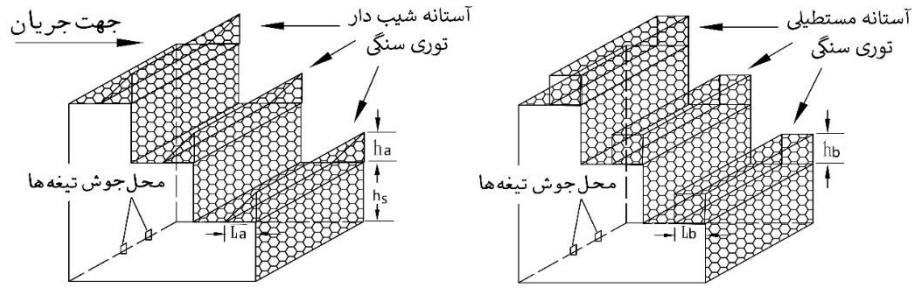
و ونگ وایز [۲۵]، زار و دورینگ [۱۶] و استفنسون^۱ [۲۶] نیز انجام شده است. ارتفاع و عرض مدل های فیزیکی ساخته شده از سرریز پلکانی توری سنگی ثابت و به ترتیب ۶۰ و ۴۰ سانتی متر، با پله های ۳ تایی و شیب نمای پایین دست سرریزها ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ (۲ و ۳ افقی، ۱ قائم) است. آستانه های انتهایی بکار گرفته شده در این تحقیق مستطیلی و شیب دار (به صورت توری سنگی) هستند که جزئیات آنها در جدول ۱ و شکل ۱ آمده است. تعداد کل آزمایش های انجام شده و محدوده تغییرات متغیرها در جدول ۲ ارائه شده است (لزجت سینماتیکی آب در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد معادل $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ فرض شده است).

در جدول ۲، اعداد فرود و رینولدز نیز به ترتیب از روابط $F_r = V_f / (gy)^{0.5}$ و $R_e = V_f R_f / \nu$ تعیین شدند. در روابط مذکور V_f و γ_f به ترتیب سرعت و عمق جریان در پایین دست سرریز، R_f شعاع هیدرولیکی، g شتاب ثقل زمین و ν لزجت سینماتیکی آب است.

مطابق جدول ۲، جریان زیر بحرانی در بالادست سرریز هنگام عبور از روی سرریز، به جریان فوق بحرانی تبدیل می شود و اعداد فرود بیشتر از یک را بدست می دهند. البته اعداد فرود بیشتر از یک مربوط به دبی های زیاد است و چون جریان درون گذر هم اتفاق افتاده، لذا اعداد فرود کمتر از یک نیز مربوط به دبی های کمتر و اُفت زیاد سرعت در برخورد جریان با ذرات سنگ داخل گابیون می باشد.

دیواره های آن از شیشه با ضخامت ۱۰ میلی متر است. دبی جریان در آزمایش ها با استفاده از دستگاه اولتراسونیک که در ابتدای لوله ورودی جریان آب به کانال نصب شده بود، اندازه گیری شد. دبی های اندازه گیری شده توسط دستگاه اولتراسونیک با دبی های اندازه گیری شده توسط سرریز مستطیلی که از قبل کالیبره شده بود، مقایسه شد و میانگین اختلاف حاصله حدوداً ۵ درصد بدست آمد. برای آرام کردن جریان آب در ابتدای کانال، از یک جعبه فلزی متخلخل استفاده شد. در این تحقیق از ذرات کاملاً یکنواخت با سه قطر متوسط (d_{50}) ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی متر استفاده شده است. دو ریل موازی در بالای بدنه کانال، برای حرکت عمق سنج صوتی با فرکانس نمونه برداری ۲۰ هرتز و دقت اندازه گیری ۱۲ بیت برای اندازه گیری عمق آب نصب و استفاده شد. نحوه کالیبره کردن عمق سنج صوتی به این شکل است که ابتدا چند جعبه با ابعاد مشخص را زیر عمق سنج قرار داده سپس ارتفاع مربوط به جعبه های مذکور به نرم افزار مخصوص عمق سنج معرفی شد و ضرایب مربوط به کالیبره را بعد از چند بار آزمون و خطا و با استفاده از روابط ارائه شده توسط شرکت سازنده آن و به صورت دستی محاسبه و در پایان به نرم افزار معرفی شد. از آنجا که اندازه گیری عمق آب در پایین دست آخرین پله سرریز به دلیل تلاطم زیاد، منجر به نتایج نادرست می شود، لذا عمق جریان در پایین دست سرریز به فاصله سه الی چهار برابر طول پله ها و حداکثر به فاصله یک متر از آخرین وجه پله سرریز، جایی که اختلاط آب با هوا به حداقل می رسد، اندازه گیری شد. این روش قبلاً توسط چیناراسری

1 Stephenson



شکل ۲. نمایی کلی از جزئیات سرریز پله‌ای و آستانه‌های مستطیلی و شیب‌دار
Fig. 2. 3D view of gabion stepped spillway details including rectangular and inclined end sills

۳- تئوری و آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر در آنالیز ابعادی شامل عوامل مربوط به خصوصیات هندسی و هیدرولیکی جریان از روی سرریزهای پله‌ای هستند. پارامترهای مربوط به خصوصیات هندسی عبارتند از: ارتفاع آستانه مثلثی (h_a)، ارتفاع آستانه مستطیلی (h_b)، ارتفاع سرریز (H_w)، طول پله (l_s)، ارتفاع پله (h_s)، طول آستانه مستطیلی (l_b)، طول آستانه مثلثی (l_a) و قطر متوسط ذرات سنگی (d_{50}).

پارامترهای مربوط به خصوصیات هیدرولیکی عبارتند از: عمق بحرانی (y_c)، عمق آب بالادست سرریز (y)، سرعت آب بالادست سرریز (V)، جرم مخصوص آب (ρ)، لزجت سینماتیکی آب (ν)، کشش سطحی آب (σ)، دبی در واحد عرض (q)، ضریب تصحیح انرژی جنبشی (α) و شتاب ثقل (g).

ضریب تصحیح انرژی جنبشی (α) در محدوده ۱/۰۵ الی ۱/۰۸ است و از آنجا که تأثیر چندانی در نتایج نخواهد داشت، لذا مقدار آن در این تحقیق برابر واحد در نظر گرفته شده است [۲۷]. لازم به ذکر است که این محدوده برای ضریب تصحیح انرژی جنبشی مربوط به اعداد معمول در کانال‌ها است.

حال با توجه به متغیرهای فوق‌الذکر می‌توان نوشت:

$$f(h_a, h_b, y_c, g, y, V, H_w, l_s, h_s, l_b, l_a, d_{50}, \rho, \nu, \sigma, q) = 0 \quad (1)$$

در معادله (۱) تعداد ۱۶ متغیر وجود دارد. با در نظر گرفتن عوامل V, y به عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از تئوری π باکینگهام، تعداد ۱۳ پارامتر بی بعد زیر بدست می‌آیند:

$$f\left(\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{q^2}{gH_w^3}, \frac{d_{50}}{y_c}, \frac{y_c}{H_w}, \frac{y_c}{h_s}, \frac{h_s}{l_s}, \frac{h_a}{h_s}, \frac{h_b}{h_s}, \frac{l_a}{l_s}, \frac{l_b}{l_s}, \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{vy}{v}, \frac{\rho V^2 y}{\sigma}\right) = 0 \quad (2)$$

در معادله (۲)، E_0 عبارت است از انرژی مخصوص قبل از سرریز در بالادست، E_1 انرژی مخصوص بعد از سرریز در پایین دست و E نشان‌دهنده استهلاک انرژی بین بالادست و پایین دست سرریز هستند. همچنین $S = h_s/l_s$ شیب نمای پایین دست سرریز، $F_r = V/\sqrt{gy}$ نشان‌دهنده عدد فرود، $R_e = Vy/\nu$ نشان‌دهنده عدد رینولدز و $W_n = V^2 y/\nu$ نشان‌دهنده عدد وبر هستند. در معادله (۲) عدد وبر (W_n) به دلیل کم بودن اثر کشش سطحی قابل حذف است. همچنین عدد رینولدز (R_e) به دلیل متلاطم بودن جریان قابل صرف نظر است. در معادله (۲) عوامل بی بعد l_b/l_s و l_a/l_s در مدل‌های فیزیکی ثابت بوده و لذا در این مطالعه حذف شده‌اند.

عوامل E_0, E_1, E به شرح معادلات (۳) تا (۵) تعریف می‌شوند.

$$E_0 = H_w + y + \frac{V_0^2}{2g} = H_w + y + \frac{q^2}{2gy^2} = H_w + 1.5y_c \quad (3)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (4)$$

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (5)$$

با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، معادله نهایی برای محاسبه استهلاک انرژی به صورت معادله (۶) خلاصه می‌شود.



شکل ۳. سرریز ۳ پله‌ای با شیب ۱:۳ و $Q=66$ lit/s، $d_{50}=25$ mm با آستانه‌های مستطیلی ($d_a=40$ mm، $h_b/h_s=0.4$)

Fig. 3. Spillway with 3 steps, slope=1:3 ($V: H$) and $Q=66$ lit/s, $d_{50}=25$ mm including rectangular sills ($d_{50}=40$ mm, $h_b/h_s=0.4$)



شکل ۴. سرریز ۳ پله‌ای با شیب ۱:۲ و $Q=45$ lit/s، $d_{50}=10$ mm با آستانه‌های شیب‌دار ($d_a=10$ mm، $h_a/h_s=0.25$)

Fig. 4. Spillway with 3 steps, slope=1:2 ($V: H$) and $Q=45$ lit/s, $d_{50}=10$ mm including inclined sills ($d_{50}=10$ mm, $h_a/h_s=0.25$)

رژیم جریان بر روی سرریزها را می‌توان به دو بخش ریزشی^۱ و غیرریزشی^۲ تقسیم بندی کرد. در جریان ریزشی، آب از پله‌ای به پله دیگر سقوط می‌کند. در این جریان، آب بر روی پله‌ها ضربه وارد کرده و اُفت انرژی بر اثر این ضربه و اختلاط جت آب بر روی هر یک از پله‌ها به وجود می‌آید و پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. برای ایجاد جریان ریزشی ارتفاع پله‌ها باید نسبتاً زیاد در نظر گرفته شود و این حالت برای دبی‌های کم و سرریزهای با شیب کم رخ می‌دهد.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_1 \left(\frac{q^2}{gH_w^3}, \frac{d_{50}}{y_c}, \frac{y_c}{H_w}, \frac{y_c}{h_s}, \frac{h_a}{h_s}, \frac{h_b}{h_s}, S \right) \quad (6)$$

۴- نتایج و بحث

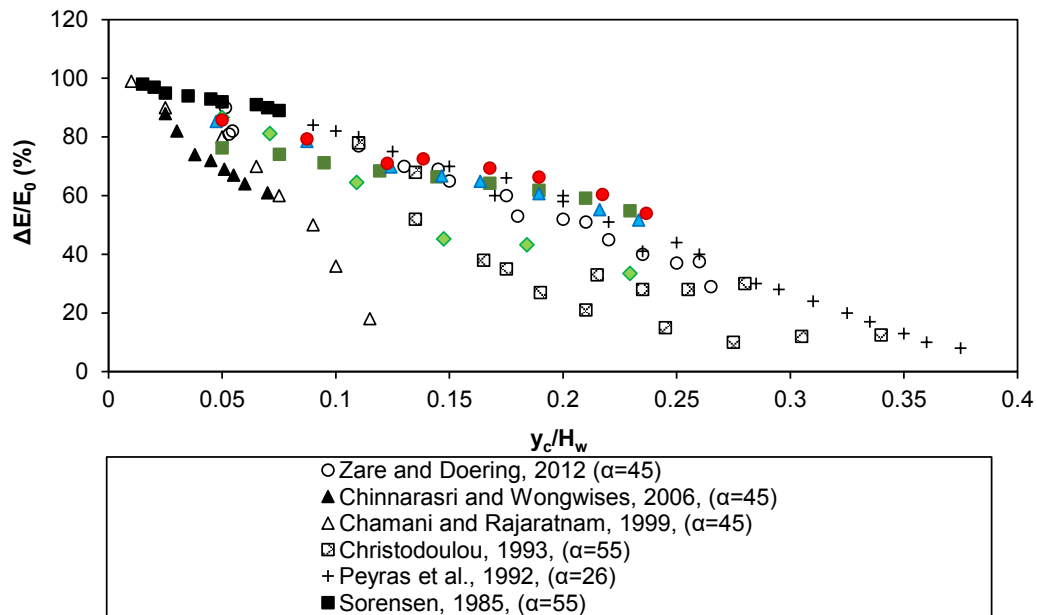
در شکل‌های ۳ الی ۵ جریان از روی سرریزهای توری سنگی با شرایط هیدرولیکی متفاوت ارائه شده است. از طرفی پارامترهای مؤثر بر اُفت انرژی جریان به طور جداگانه بررسی و با دیگر مطالعات انجام شده، مقایسه‌های لازم صورت گرفته و یک رابطه تجربی بر اساس شرایط زبری که در ادامه به آن اشاره شده است، ارائه شده است.

1 Nappe Flow
2 Skimming Flow



شکل ۵. سرریز ۳ پله‌ای با شیب ۱:۱ و $Q=55$ lit/s، $d_{50}=40$ mm آستانه‌های شیبدار ($d_{50}=40$ mm، $h_a/h_s=0.5$)

Fig. 5. Spillway with 3 steps, slope=1:1 ($V: H$) and $Q=55$ lit/s، $d_{50}=40$ mm including inclined sills ($d_{50}=40$ mm، $h_a/h_s=0.5$)

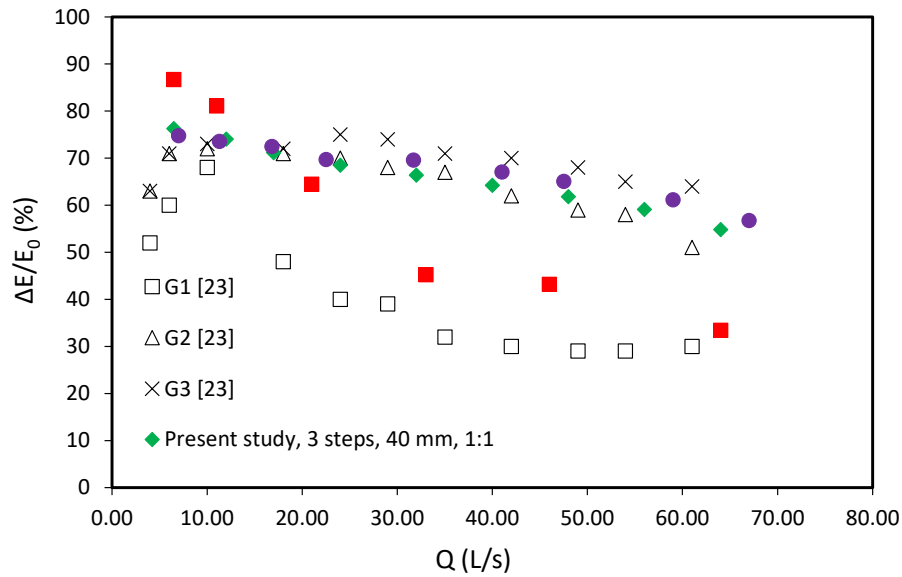


شکل ۶. تغییرات اُفت انرژی نسبی و عمق نسبی بحرانی و مقایسه با دیگر مطالعات انجام شده

Fig. 6. Variation of relative energy dissipation vs. relative critical depth and comparison with other studies

بحرانی برای سرریزهای توری سنگی ۳ پله‌ای با قطر متوسط ذرات ۱۰ و ۴۰ میلی‌متر و شیب‌نماهای پایین دست ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ رسم شده است. همچنین مقایسه‌های لازم با سایر مطالعات انجام شده، نشان داده شده است. قابل ذکر است که علامت‌های مشخص شده در شکل‌های زیر دارای معانی زیر هستند:

در جریان غیرریزشی، آب کاملاً از روی پله‌ها عبور می‌کند. جریان غیرریزشی در دبی‌های بالا رخ داده؛ لذا طراحی سرریزهای پلکانی بر اساس رژیم جریان غیرریزشی صورت می‌گیرد که در ادامه روابطی برای تشخیص رژیم جریان ارائه شده است. در شکل ۶ تغییرات نسبی اُفت انرژی جریان در مقابل عمق نسبی



شکل ۷. مقایسه بین نتایج این پژوهش با تحقیق آزمایشگاهی رجایی و همکاران (۱۳۹۶)
 Fig. 7. Comparison of results of this study with Rajaei *et al.* (2017) studies

جدول ۳. داده های آزمایشگاهی مربوط به آغاز رژیم جریان غیرریزشی

Table 3. Experimental data for onset of skimming regime

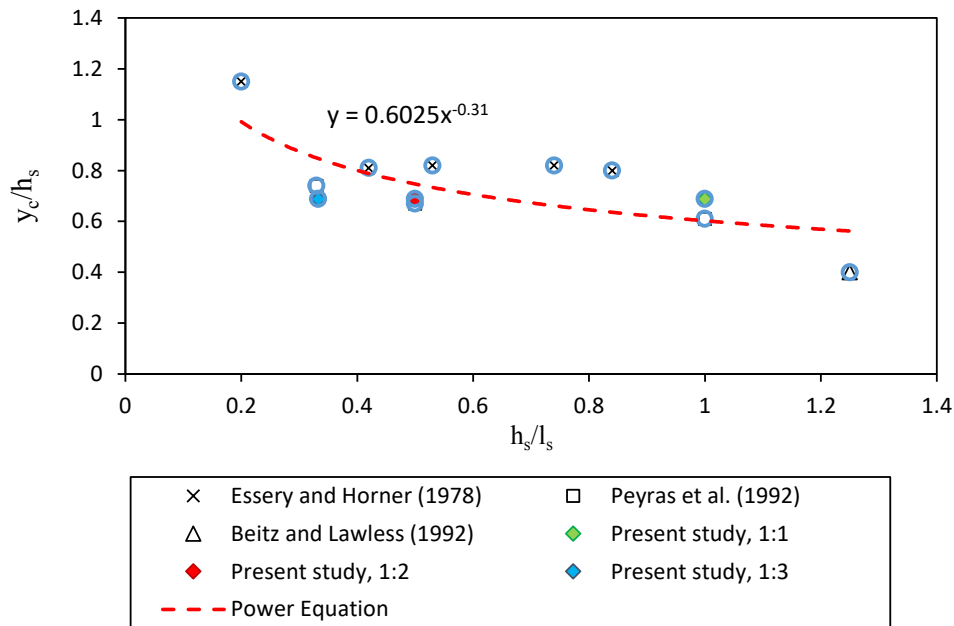
y_c/h_s	h_s/l_s	منبع
۱/۱۵	۰/۲۰	
۰/۸۴	۰/۴۲	
۰/۸۲	۰/۵۳	اسری و هورنر ^۱ (۱۹۷۸) [۳۱]
۰/۸۲	۰/۷۴	
۰/۸۰	۰/۸۴	
۰/۷۴	۰/۳۳	
۰/۶۷	۰/۵۰	پیراس و همکاران (۱۹۹۲) [۷]
۰/۶۱	۱/۰۰	
۰/۴۰	۱/۲۵	بیتز و لاولس ^۲ (۱۹۹۲) [۳۲]
۰/۶۸۸	۱/۰۰	
۰/۶۸۸	۰/۵۰	تحقیق حاضر
۰/۶۸۸	۰/۳۳	

^۱ Essery and Horner

^۲ Beitz and Lawless

۱۰ میلی متر تا یک مقدار دبی مشخص بیشتر از آن برای ذرات با قطر متوسط ۴۰ میلی متر است. همچنین با افزایش شدت جریان از قدرت جریان درون گذر کاسته شده و این جریان روگذر است که نقش اصلی را در استهلاك انرژی جریان ایفا می کند. لذا مطابق شکل می توان گفت که با افزایش شدت جریان، سرریزهای پله ای صلب و

به عنوان مثال ۱:۲، ۱۰ mm، ۳spets به معنی سرریز توری سنگی ۳ پله ای با قطر متوسط ذرات ۱۰ میلی متر و شیب نمای پایین دست ۱ به ۲ (عمودی به افقی) است. مطابق شکل ۶ با افزایش میزان دبی از میزان استهلاك انرژی جریان کاسته شده و این میزان تغییرات برای ذرات با قطر متوسط



شکل ۸. شروع رژیم جریان غیر ریزشی در سرریزهای پله‌ای
 Fig. 8. Onset of skimming regime in stepped spillways

قرار دادند.

مطابق شکل ۷ تلفات انرژی در سرریزهای گابیونی بدون رسوبات تا حداکثر ۷۵ درصد به دست می‌آید. استهلاک انرژی در آزمایش‌های رجایی و همکاران (۱۳۹۶) برای سرریز گابیونی با یک پله نسبت به دو و سه پله‌ای کمتر بوده، ولی این مقدار برای سرریزهای دو و سه پله‌ای تقریباً برابر است. هرچند کمی برای سرریز سه پله‌ای نسبت به دو پله‌ای افزایش نشان داده است. مطابق شکل فوق نتایج این تحقیق همخوانی بسیار خوب و نزدیکی با نتایج تحقیقات رجایی و همکاران (۱۳۹۶) برای سرریزهای دو و سه پله‌ای دارد و اندک اختلاف موجود می‌تواند ناشی از اختلاف در اندازه ذرات سنگی بکار رفته در بدنه سرریز باشد.

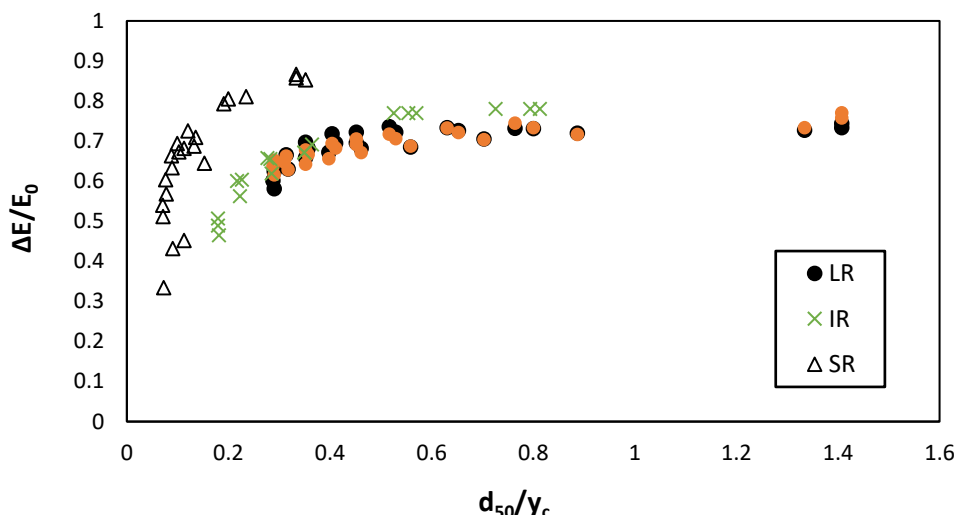
تحقیقات نشان داده است که افزایش دبی یا افزایش شیب نمای پایین دست سرریز منجر به شکل‌گیری جریان غیرریزشی می‌شود. مهم‌ترین پارامتر به عنوان معیار جریان غیرریزشی، y_c/h پیشنهاد شده است [۲۹، ۲۸، ۲۵]. چانسون (۱۹۹۴) و چیناراسری (۲۰۰۲) با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی از مطالعات انجام گرفته شده بر روی سرریزهای پله‌ای نشان دادند که جریان غیرریزشی تابعی از دبی، ارتفاع و طول پله‌های سرریز است [۳۰، ۲۸].

طبق روابط ارائه شده توسط این دانشمندان (روابط (۵) و (۷) در

توری سنگی عمل کردی تقریباً یکسان خواهند داشت. علاوه بر آن، کمترین استهلاک انرژی در سرریز ۱:۱، ۱۰ mm، ۳spets رخ داده است. همچنین شیب نمای پایین دست سرریزهای توری سنگی تأثیر چندانی بر استهلاک انرژی جریان ندارد.

مطابق شکل ۶، نتایج این تحقیق با داده‌های حاصل از مطالعات سایر محققین مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج این تحقیق با نتایج زار و دورینگ (۲۰۱۲)، کریستودولو (۱۹۹۳) و پیراس و همکاران (۱۹۹۲) همخوانی قابل قبولی دارد. اختلافات موجود بین مطالعات انجام شده توسط محققین مذکور با نتایج تحقیق حاضر به این دلیل است که جریان در اکثر آزمایش‌های سایر محققان فقط به صورت جریان روگذر بوده، اما در تحقیق حاضر جریان از ابتدا به صورت درون‌گذر/ روگذر صورت گرفته است.

در شکل ۷ مقایسه بین نتایج این پژوهش با تحقیق آزمایشگاهی رجایی و همکاران (۱۳۹۶) ارائه شده است. رجایی و همکاران (۱۳۹۶) مدل آزمایشگاهی سرریزهای پلکانی گابیونی در سه حالت ۱، ۲ و ۳ پله $G : Gn$ معرف مدل گابیونی و n معرف تعداد پله‌ها و ارتفاع هر پله ۲۰ سانتی‌متر است) با شیب بدنه در بالادست قائم و در پایین دست ۱:۱ را ساختند و در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۵۰ سانتی‌متر و طول ۱۱ متر تحت دبی‌های مختلف مورد آزمایش



شکل ۹. تغییرات نسبی اُفت انرژی نسبت به زبری نسبی

Fig. 9. Variation of relative energy dissipation vs. relative roughness

جدول ۴. روابط ارائه شده جهت تشخیص رژیم جریان غیرریزشی

Table 4. Produced equations for determination of skimming regime

رابطه	شماره رابطه	منبع
$\frac{(d_c)_{onset}}{h} \geq 1.057 - 0.465 \frac{h}{l}$	(۷)	جانسون (۱۹۹۴) [۲۸]
$\frac{(y_c)_{onset}}{h_s} \geq 0.972 - 0.364 \frac{h_s}{l_s}$	(۸)	تحقیق حاضر (رابطه خطی)
$\frac{d_c}{h} \geq 0.80 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.22}$	(۹)	چینناراسری (۲۰۰۲) [۳۰]
$\frac{y_c}{h_s} \geq 0.602 \left(\frac{h_s}{l_s}\right)^{-0.31}$	(۱۰)	تحقیق حاضر (رابطه توانی)

می‌کند. مشاهده‌ها در سرریزهای پله‌ای توری سنگی نشان داد که جدا از نوع مصالح بکار گرفته شده در بدنه سرریز (d_{50}), زمانی که شیب نمای پایین دست سرریز پله‌ای ۱:۱ است، جریان غیرریزشی در حداکثر دبی ۶۵ لیتر بر ثانیه رخ می‌دهد. اما با کمتر شدن شیب نمای پایین دست سرریز (۱:۲ و ۱:۳)، با توجه به این میزان دبی، جریان غیرریزشی شکل نگرفت و شکل‌گیری چنین جریانی مستلزم شدت جریان بیشتر است. لذا با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق‌های قبلی و مقایسه آن‌ها با تحقیق حاضر، روابطی جهت شناسایی رژیم جریان غیرریزشی در جدول ۴ ارائه می‌شود.

ذکر این نکته لازم و ضروری است که روابط (۸) و (۱۰) برای h_s/l_s در محدوده ۰/۲ الی ۱/۳ حاصل شده است. لذا خارج از این محدوده باید

جدول ۴) جریان غیرریزشی در دبی‌های بزرگ‌تر از مقدار بحرانی تعریف شده (y_c/h) رخ می‌دهد. در تحقیق حاضر نیز سعی شده است تا صحت روابط مذکور برای شناسایی جریان غیرریزشی بررسی شده و با مشاهده‌های به دست آمده در این تحقیق مقایسه شود. در جدول ۳ داده‌های مربوط به مقادیر دبی بحرانی که در آن رژیم جریان غیرریزشی شروع می‌شود، توسط دانشمندان قبلی ارائه شده است.

در شکل ۸ سعی بر آن شده است تا با استفاده از پارامترهای h_c/l_s و y_c/h_s (عمق بحرانی، h_s و l_s به ترتیب ارتفاع و طول پله سرریز) رابطه‌ای به منظور تشخیص رژیم جریان غیرریزشی^۱ ارائه شود. در رژیم جریان غیرریزشی جریان آب کاملاً از روی پله‌ها عبور

1 Skimming flow

جدول ۵. شرایط زبری در تحقیق حاضر و دیگر مطالعه های انجام شده

Table 5. Roughness conditions in this study and the other conducted studies

شرایط زبری	تحقیق حاضر	پاگیلاریا و همکاران (۲۰۰۶) [۳۵]	بازرست (۱۹۷۸)
زبری با مقیاس بزرگ (LR)	$0.75 < y_c/d_{50} < 2.99$	$h_c/d_{50} < 2.5$	$h_u/d_{84} < 1.2$
زبری با مقیاس متوسط (IR)	$2.99 < y_c/d_{50} < 5.50$	$2.5 < h_c/d_{50} < 6.6$	$1.2 < h_u/d_{84} < 4.0$
زبری با مقیاس کوچک (SR)	$5.50 < y_c/d_{50} < 13.76$	$6.6 < h_c/d_{50} < 42$	$h_u/d_{84} > 4.0$

جدول ۶. ضرایب ثابت در رابطه (۹) با توجه به شرایط زبری

Table 6. Constant coefficients in Eq. (9) regarding to roughness conditions

زبری	C	B	A	R ²
زبری با مقیاس بزرگ (LR)	-۰/۰۳۲۳	-۰/۰۴۳۶	۰/۷۶۶	۰/۸۳
زبری با مقیاس متوسط (IR)	-۰/۰۲۲۱	-۰/۰۶۸۶	۰/۸۶۸	۰/۹۷۵
زبری با مقیاس کوچک (SR)	-۰/۱۳۶	-۰/۰۳۴۲	۰/۸۷۱	۰/۸۷

با احتیاط رفتار کرد (شکل ۸).

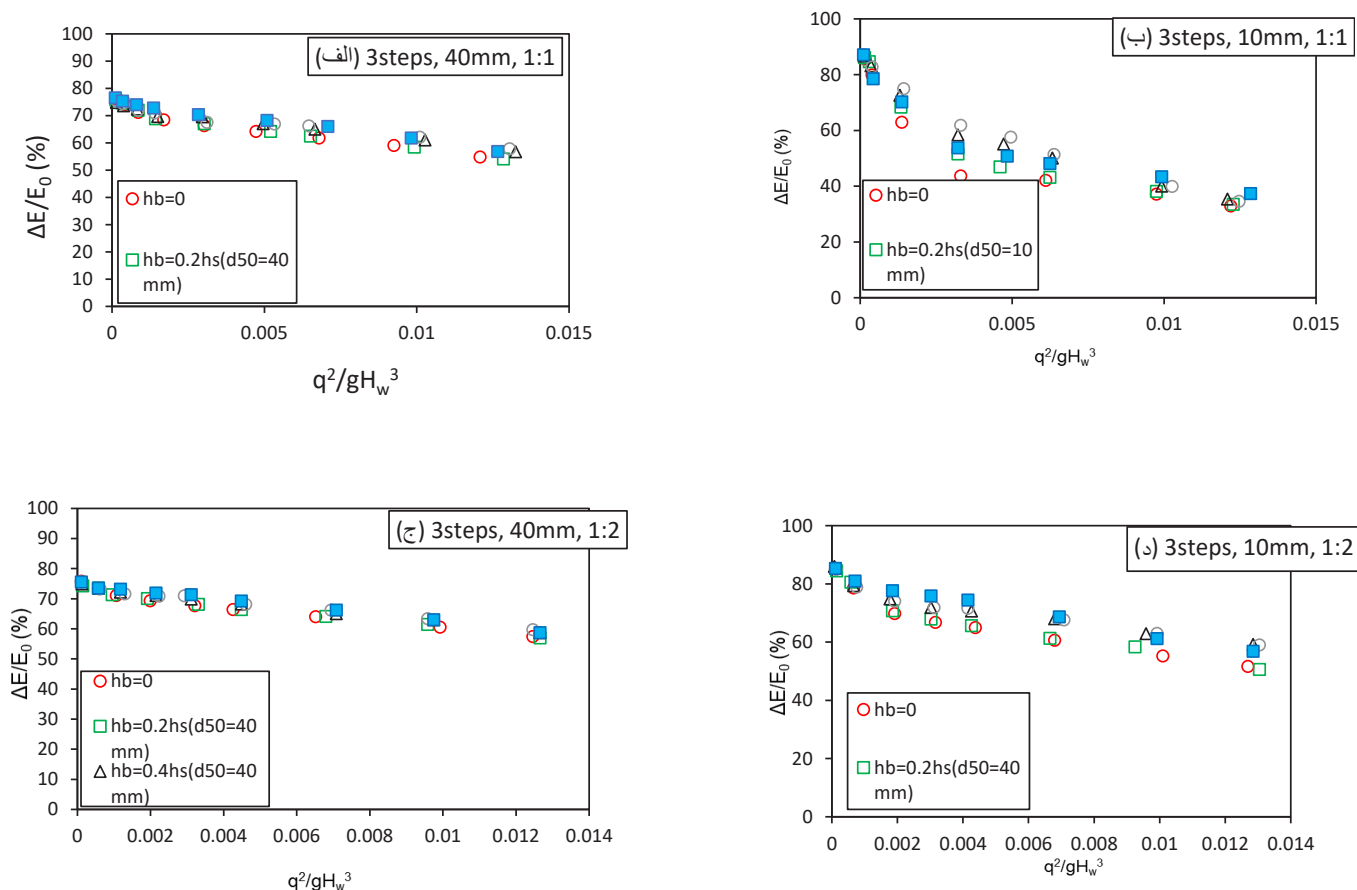
در شکل ۹ تغییرات نسبی اُفت انرژی نسبت به زبری نسبی مصالح بکار گرفته شده در بدنه سرریز ارائه شده است. شکل ۹ نشان می دهد که تغییرات نسبی اُفت انرژی با افزایش دبی برای زبری با مقیاس بزرگ تدریجی است. اما این تغییرات برای زبری با مقیاس کوچک ناگهانی است. همچنین شکل نشان می دهد که تا یک مقدار مشخص دبی، اُفت انرژی نسبی برای قطر متوسط ذرات با مقیاس کوچک (۱۰ میلی متر) به ترتیب بیشتر از آن برای قطر متوسط ذرات با مقیاس متوسط و بزرگ (۲۵ و ۴۰ میلی متر) است و از یک مقدار دبی مشخص به بعد، اُفت انرژی نسبی برای قطر متوسط ذرات با مقیاس بزرگ (۴۰ میلی متر) به ترتیب بیشتر از آن برای قطر متوسط ذرات با مقیاس متوسط و کوچک (۲۵ و ۱۰ میلی متر) می شود. دلیل اصلی این روند به میزان نفوذپذیری مصالح بکار رفته در بدنه سرریز مربوط می شود. به عبارتی دیگر، طبق مشاهده ها زمانی که مصالح بدنه سرریز ۱۰ میلی متر است، با افزایش دبی، سطح آب پشت سرریز توری سنگی سریع تر از حالتی که مصالح بدنه سرریز ۴۰ میلی متر است، بالا می آید و جریان روگذر شکل می گیرد و همین امر (نفوذپذیری پایین ذرات با قطر کوچک) باعث تغییرات ناگهانی اُفت

انرژی نسبی در زبری با مقیاس کوچک است.

سه محدوده مختلف از شرایط زبری مصالح در رودخانه ها که برای اولین بار توسط بازرست^۱ (۱۹۷۸) و بازرست و همکاران (۱۹۸۱) تقسیم بندی و معرفی شده است شامل: زبری با مقیاس بزرگ (LR)^۲، زبری با مقیاس متوسط (IR)^۳ و زبری با مقیاس کوچک (SR)^۴ است [۳۳، ۳۴].

در این تحقیق سعی بر آن شده است تا برای مصالح بکار گرفته شده در بدنه سرریزهای پله ای توری سنگی، شرایط زبری بر اساس مؤلفه بی بعد d_{50}/y_c مطابق جدول ۵ ارائه شود. همچنین سعی شده است تا یک رابطه تجربی برای محاسبه اُفت انرژی نسبی جریان بر اساس شرایط زبری تعریف شده در جدول ۵ و شیب نمای پایین دست سرریزهای پله ای ارائه شود. لذا بدین منظور رابطه (۱۱) و ضرایب ثابت آن در جدول ۶ ارائه شده است (در جدول مذکور R^2 ضریب همبستگی است). در رابطه (۱۱)، S شیب نمای پایین دست سرریز بوده و محدوده تغییرات آن بین ۰/۳۳ الی ۱ است.

1 Bathurst
2 Large scale roughness
3 Intermediate scale roughness
4 Small scale roughness



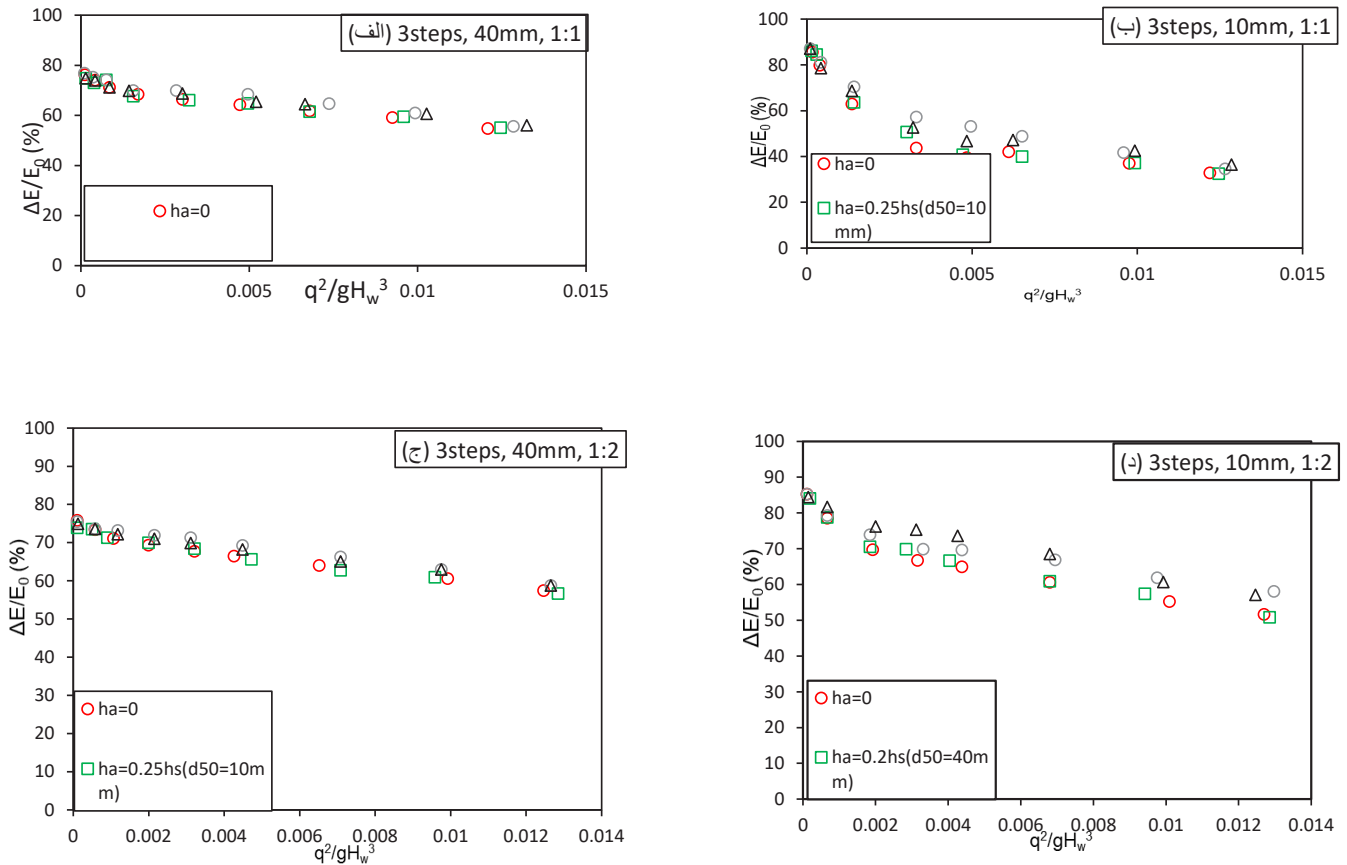
شکل ۱۰. تغییرات افت انرژی نسبی نسبت به دبی جریان برای آستانه های مستطیلی توریسنگی با قطر متوسط ذرات مختلف

Fig. 10. Variation of relative energy dissipation vs. discharge for rectangular gabion end sills including different sand diameters

می‌کند. اما این انرژی جریان به دلیل نفوذپذیری کمتر جریان آب از لابه‌لای ذرات ریزدانه (۱۰ میلی‌متر) کمتر مستهلک شده است. لذا می‌توان گفت که استفاده از آستانه (مستطیلی یا شیب‌دار) در سرریزهای پله‌ای توری‌سنگی با قطر متوسط ذرات درشت‌تر عملاً تأثیر چندانی در استهلاک انرژی جریان نداشته و تأثیر استفاده از آستانه با کم شدن شیب نمای پایین دست سرریز تقریباً قابل اغماض می‌شود (شکل‌های ۱۰ ج و ۱۱ ج). بنابراین می‌توان انتظار داشت که تأثیر آستانه (مستطیلی یا شیب‌دار) بر استهلاک انرژی جریان در سرریزهای پله‌ای صلب بیشتر از سرریزهای پله‌ای توری‌سنگی باشد. مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ با بزرگ‌تر شدن آستانه‌های مستطیلی و شیب‌دار (بزرگ شدن نسبت‌های h_a/h_s و h_b/h_s) افت انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۱۰ ب و ۱۰ د که آزمایش‌ها بر روی سرریز ۳ پله‌ای با قطر متوسط ذرات ۱۰ میلی‌متر در بدنه و شیب نمای پایین دست ۱:۱ و ۱:۲ صورت گرفته، در یک محدوده

$$\frac{\Delta E}{E_0} = A + \frac{B}{(d_{50}/y_c)} + C \times \ln(S) \quad (11)$$

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات نسبی افت انرژی نسبت به شدت جریان بر روی سرریزهای پله‌ای توری‌سنگی با آستانه‌های مستطیلی و شیب‌دار توری‌سنگی ارائه شده است. مطابق شکل‌های ۱۰ (الف و ج) و ۱۱ (الف و ج) زمانی که قطر متوسط ذرات مصالح در بدنه سرریز پله‌ای ۴۰ میلی‌متر است، آستانه (مستطیلی و شیب‌دار) توری‌سنگی تأثیر قابل توجهی بر افت انرژی نسبی نشان نداد. اما مطابق شکل‌های ۱۰ (ب و د) و ۱۱ (ب و د) زمانی که قطر متوسط ذرات مصالح در بدنه سرریز پله‌ای ۱۰ میلی‌متر است، تأثیر آستانه توری‌سنگی بر استهلاک انرژی جریان مشهودتر است. دلیل اصلی آن را با توجه به مشاهده‌ها این‌گونه می‌توان توضیح داد که در ذرات با قطر متوسط بزرگ‌تر (۴۰ میلی‌متر) با عبور کردن جریان آب از لابه‌لای ذرات درشت‌دانه سهم بیشتری از انرژی جریان را مستهلک



شکل ۱۱. تغییرات افت انرژی نسبی نسبت به دبی جریان برای آستانه های شیبدار توریسنگی با قطر متوسط ذرات مختلف

Fig. 11. Variation of relative energy dissipation vs. discharge for inclined gabion end sills including different sand diameters

متوسط ۱۰ میلی متر شد و با افزایش دبی تأثیرش بیشتر شد. با توجه به مشاهده ها، در دبی های کم به دلیل نفوذپذیری بالای آستانه های حاوی ذرات درشت دانه، انرژی کمتری از جریان مستهلک شد. اما زمانی که شدت جریان بیشتر شد و بخش بیشتری از جریان به صورت روگذر از سرریز پله ای توری سنگی عبور کرد، در اثر برخورد جریان آب با مصالح درشت دانه (۴۰ میلی متری) انرژی بیشتری از جریان نسبت به ذرات ریزدانه مستهلک شد.

از طرفی زمانی که شیب نمای پایین دست سرریز پله ای با قطر متوسط ۴۰ میلی متر کم می شود، تأثیر آستانه ها (مستطیلی یا شیب دار) با هر قطر متوسطی بر افت انرژی جریان به دلیل نفوذپذیری بالای مصالح درشت دانه کم رنگ تر می شود (مقایسه شکل های ۱۰ج و ۱۱ج). اما با کاهش شیب نمای پایین دست در سرریزهای پله ای با قطر متوسط ۱۰ میلی متر به دلیل نفوذپذیری پایین مصالح ریزدانه، تأثیر آستانه با هر قطر متوسطی بر افت انرژی جریان پررنگ تر شده

از دبی تأثیر آستانه مستطیلی با مشخصات $d_{50}=10, h_b=0.5h_s$ بیشتر از آستانه مستطیلی با مشخصات $d_{50}=40, h_b=0.5h_s$ است. اما با افزایش دبی این روند برعکس می شود. لازم به ذکر است که این روند در خصوص آستانه های شیب دار نیز صدق می کند (شکل های ۱۱ب و ۱۱د). دلیل چنین روندی را می توان با توجه به مشاهده ها چنین توصیف کرد که زمانی که شدت جریان کم است به دلیل نفوذپذیری کم آستانه های (مستطیلی یا شیب دار) حاوی ذرات با قطر متوسط ۱۰ میلی متر، آب بیشتری در پشت آستانه ها جمع شده و بیشتر شبیه به یک حوضچه آرامش عمل می کنند و تا یک مقدار از شدت جریان می توانند انرژی بیشتری از جریان را مستهلک کنند. ولی با افزایش دبی، از میزان کارایی آستانه ها کاسته می شود. در مقابل، زمانی که از آستانه های (مستطیلی یا شیب دار) حاوی ذرات با قطر متوسط ۴۰ میلی متر استفاده شد، در دبی های کم تأثیر آستانه بر افت انرژی نسبی کمتر از آستانه های حاوی ذرات با قطر

۱۰ میلی متر به دلیل نفوذپذیری پایین، بخشی از انرژی باقی مانده جریان روگذر توسط آستانه های توری سنگی مستهلک شد. در سرریز با مصالح ۱۰ میلی متر در یک محدوده از دبی (۴۵ لیتر بر ثانیه) تأثیر آستانه مستطیلی با مشخصات $h_b=0.5h_s$, $d_{50}=10$ mm بیشتر از آستانه مستطیلی با مشخصات $h_b=0.5h_s$, $d_{50}=40$ mm می باشد. اما با افزایش دبی این روند برعکس می شود.

• تأثیر آستانه ها بر افت انرژی جریان در سرریز با مصالح ۴۰ میلی متر و شیب نمای پایین دست ۱:۲ حدود ۱۰ درصد بیشتر از همان سرریز با شیب نمای پایین دست ۱:۱ بوده و در سرریز با مصالح ۱۰ میلی متر و شیب نمای پایین دست ۱:۲ حدود ۳۰ الی ۳۵ درصد بیشتر از همان سرریز با شیب نمای پایین دست ۱:۱ است. لذا وجود آستانه ها در سرریز پله ای با بدنه مصالح ۱۰ و ۴۰ میلی متر به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر افت انرژی جریان دارند. تأثیر آستانه های مستطیلی بر افت انرژی جریان حدود ۳ الی ۴ درصد بیشتر از تأثیر آستانه های شیب دار است. لذا بسته به نوع کاربرد، در صورت استفاده از سرریز با مصالح بزرگ مقیاس، نیازی به آستانه های انتهایی بر روی پله های سرریز نبوده است؛ اما در صورت استفاده از سرریز با مصالح کوچک دانه (که عملکردی مشابه سرریزهای صلب دارند) استفاده از آستانه های مستطیلی بر روی پله های سرریز برای دست یافتن به حداکثر استهلاک انرژی لازم و ضروری می باشد.

• اندازه گرداب های چرخشی و جت آب ناشی از برخورد جریان با آستانه ها در سرریزهای پله ای با آستانه مستطیلی به ترتیب بزرگ تر و کوچک تر از آن در سرریزهای پله ای با آستانه شیب دار است.

مراجع

- [1] Ohtsu, Y. Yasuda, M. Takahashi, Flow characteristics of skimming flows in stepped channels, Journal of Hydraulic Engineering, 9(130) (2004) 869-860.
- [2] C. Chinnarasri, S. Donjatee, U. Israngkura, Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs, Journal of Hydraulic Engineering, 8(134) (2008) 1152-1147.
- [3] 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.
- [4] H.I. Mohamed, Flow over gabion weirs, Journal of

است (مقایسه شکل های ۱۰ و ۱۱). به عبارتی دیگر می توان انتظار داشت که در سرریزهای پله ای صلب با شیب نمای پایین دست کم، تأثیر آستانه (مستطیلی و شیب دار) بر افت انرژی جریان بیشتر از آن در سرریزهای پله ای با شیب نمای پایین دست زیاد باشد. همچنین نتایج نشان داد که تأثیر آستانه مستطیلی بر افت انرژی جریان بیشتر از آستانه شیب دار بوده و اندازه گرداب های چرخشی و جت آب (جهش آب) در پله های دارای آستانه مستطیلی به ترتیب بزرگ تر و کوچک تر از آن در پله های دارای آستانه شیب دار است

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل های فیزیکی مختلفی از سرریزهای پله ای توری سنگی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. هدف بررسی میزان افت انرژی جریان در سرریزهای پله ای توری سنگی است. متغیرهای طراحی شامل دبی جریان، شیب نمای پایین دست سرریز، آستانه انتهایی پله ها و شرایط زبری مصالح به کار رفته در بدنه سرریز هستند. نتایج نشان داد که:

- با افزایش شدت جریان افت انرژی جریان کاهش می یابد و با توجه به رابطه (۱۱) شرایط زبری بیشترین نقش را در برآورد افت انرژی جریان ایفا می کند.
- تغییرات نسبی افت انرژی جریان با افزایش دبی برای زبری با مقیاس بزرگ، تدریجی و این تغییرات برای زبری با مقیاس کوچک ناگهانی است.
- رژیم جریان غیرریزشی تابعی از دبی جریان، طول و ارتفاع پله های سرریز است.
- افزایش دبی و یا افزایش شیب نمای پایین دست سرریز، شکل گیری جریان غیرریزشی را سهل می کند. شکل گیری جریان غیرریزشی در سرریزهای با شیب نمای پایین دست کم مستلزم دبی بیشتر است.
- سرریز سه پله ای با زبری بزرگ مقیاس (۴۰ میلی متری) حدوداً ۲۳ درصد بیشتر از همان سرریز با زبری کوچک مقیاس (۱۰ میلی متری) انرژی جریان را مستهلک می کند. در سرریزهای پله ای توری سنگی با مصالح ۴۰ میلی متر به دلیل نفوذپذیری بالا، آستانه (مستطیلی یا شیب دار) توری سنگی تأثیر چندانی بر افت انرژی نسبی جریان ندارد. اما در سرریزهای پله ای توری سنگی با مصالح

- for Science and Engineering, 3(38) (2013) 588-579.
- [16] H.K. Zare, J.C. Doering, Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics, Canadian Journal of Civil Engineering, 2(39) (2012) 153-140.
- [17] S. Felder, H. Chanson, Effects of Step Pool Porosity upon Flow Aeration and Energy Dissipation on Pooled Stepped Spillways, Journal of Hydraulic Engineering, 4(140) (2014) 04014002.
- [18] D. Wuthrich, H. Chanson, Aeration performances of a gabion stepped weir with and without capping, Environmental Fluid Mechanics, 4(15) (2014) 730-711.
- [19] G. Zhang, H. Chanson, Gabion stepped spillway: interactions between free-surface, cavity, and seepage flows, Journal of Hydraulic Engineering, 5(142) (2016) 06016002.
- [20] E. Asadi, A.H. Dalir, D. Farsadizadeh, Y. Hassanzadeh, F. Salmasi, Energy dissipation of skimming flow with different sill dimensions in stepped spillway model, International Journal of Agriculture and Biosciences, 3(4) (2015) 121-118.
- [21] E.A. Elnikhely, Investigation and analysis of scour downstream of a spillway, Ain Shams Engineering Journal, 4(9) (2018) 2282-2275.
- [22] G.M.A. Aal, M. Sobeah, E. Helal, M. El-Fooly, Improving energy dissipation on stepped spillways using breakers, Ain Shams Engineering Journal, (2017).
- [23] S.H. Rajaei, S.R. Khodashenas, K. Esmaili, Laboratory Analysis of Energy Losses in Gabion Steeped Spillways With and Without Sedimentation at Upstream, Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 5(11) (2017) 910-900 (In Persian).
- [24] M. Sadriazadeh, M. Mahmoudian, A. Fathi, H. Eslami, Investigation of the Concentration of Mixed Air With the Flow of Water at Different Points on the Stepped Spillway in the Flow Non-falling With the FLUENT Model and a Physical Model, Journal of Water Engineering, 2(4) (2016) 58-50 (In Persian).
- [25] C. Chinnarasri, S. Wongwises, Flow regimes and energy loss on chutes with upward inclined steps, Canadian Journal of Civil Engineering, 5(31) (2004) 879-870.
- Irrigation and Drainage Engineering, 8(136) (2009) -573 577.
- [5] R.M. Sorensen, Stepped spillway hydraulic model investigation, Journal of Hydraulic Engineering, 12(111) (1985) 1472-1461.
- [6] W. Rand, Flow geometry at straight drop spillways, in: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, 1955, pp. 13-1.
- [7] L.A. Peyras, P. Royet, G. Degoutte, Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs, Journal of Hydraulic Engineering, 5(118) (1992) 717-707.
- [8] G.C. Christodoulou, Energy dissipation on stepped spillways, Journal of Hydraulic Engineering, 5(119) (1993) 650-644.
- [9] M. Chamani, N. Rajaratnam, Characteristics of skimming flow over stepped spillways, Journal of Hydraulic Engineering, 4(125) (1999) 368-361.
- [10] U. Fratino, A. Piccinni, G. de Marinis, Dissipation efficiency of stepped spillways, in: H.-E. Minor and W. Hager, Proceeding of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, IAHR, AA Balkema/ Rottersam/Brookfield, Zurich, Switzerland, 2000.
- [11] T. Chaturabul, Experimental study of flow behavior through stepped channels with end sills, MS Thesis, King Mongkut's University of Technology, Thailand, 2002.
- [12] C. Chinnarasri, S. Wongwises, Flow Patterns and Energy Dissipation over Various Stepped Chutes, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1(132) (2006) 76-70.
- [13] A. Hamedi, 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, -2528 2537.
- [14] M. Tuna, Effect of offtake channel base angle of stepped spillway on scour hole, Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering, 36(C2) (2012) .239
- [15] M.C. Tuna, M.E. Emiroglu, Effect of step geometry on local scour downstream of stepped chutes, Arabian Journal

- [32] E. Beitz, M. Lawless, Hydraulic model study for dam on GHFL 3791 Isaac River at Burton Gorge, Water Resources Commission Report, (1992).
- [33] J.C. Bathurst, Flow resistance of large-scale roughness, *Journal of Hydraulics Division*, 12(104) (1978) 1603-1587.
- [34] J.C. Bathurst, D.B. Simons, R.-M. Li, Resistance equation for large-scale roughness, *Journal of Hydraulics Division*, 12(107) (1981) 1613-1593.
- [35] S. Pagliara, P. Chiavaccini, Energy dissipation on block ramps, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1(132) (2006) 48-41.
- [26] D. Stephenson, Gabion energy dissipators, in: Proc. 13th ICOLD Congress, 1979, pp. 43-33.
- [27] C.I. Chen, Momentum and energy coefficients based on power-law velocity profile, *Journal of Hydraulic Engineering*, 11(118) (1992) 1584-1571.
- [28] H. Chanson, Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways, *Journal of Hydraulic Research*, 3(32) (1994) 460-445.
- [29] N. Rajaratnam, Skimming flow in stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 4(116) (1990) 591-587.
- [30] C. Chinnarasri, Assessing the flow resistance of skimming flow on the step faces of stepped spillways, *Dam Engineering*, 4(12) (2002) 322-303.
- [31] I.T.S. Essery, M.W. Horner, The hydraulic design of stepped spillways, Construction Industry Research and Information Association, 1971.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Salmasi, S. Razi, A. Hosseinzadeh Dalir, Laboratory Study of the Hydraulics of Flow in Gabion Stepped Weirs, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3169-3186.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17256.6502](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17256.6502)



