



بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین دست در شیب‌شکن‌های مایل گابیونی و ساده

رسول دانش‌فراز^{*}، مهدی ماجدی اصل، محمد باقرزاده

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

استهلاک انرژی
عمق نسبی پایین دست
عمق بحرانی نسبی
زاویه شیب‌شکن مایل
گابیون (تورسنگی)

خلاصه: در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی پرداخته شده است. به همین منظور ۱۲۰ آزمایش متفاوت برای دو نوع شیب‌شکن با سه زاویه و دو ارتفاع انجام شد. نتایج نشان داد که در هر دو مدل، افزایش عمق بحرانی نسبی، سبب کاهش میزان استهلاک انرژی نسبی و افزایش عمق نسبی پایین دست شده است. مقایسه نتایج مربوط به شیب‌شکن مایل گابیونی نسبت به شیب‌شکن مایل ساده نشان داد که به کارگیری گابیون در سطح شیب‌دار به طور متوسط برای سه زاویه و دو ارتفاع مورد بررسی، راندمان استهلاک انرژی ۵۶٪ و عمق نسبی پایین دست ۵۰٪ نسبت به شیب‌شکن مایل ساده افزایش یافته است. این نتیجه منجر به کاهش فرسایش بستر پایین دست سازه و در نتیجه کاهش طول حوضچه آرامش می‌گردد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه، متوسط راندمان استهلاک انرژی را کاهش و متوسط عمق نسبی پایین دست را افزایش داد. با بررسی نتایج مشخص گردید در شیب‌شکن‌های مایل گابیونی تغییر زاویه تأثیر نسبتاً کمی نسبت به مدل ساده داشته که دلیل آن را می‌توان، خصوصیات فیزیکی و اثرات هیدرولیکی پیچیده جریان عبوری از سازه متخلخل دانست. همچنین با استفاده از ۸۰٪ درصد داده‌های آزمایشگاهی روابطی جهت تخمین استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین دست در شیب‌شکن مایل گابیونی ارائه شد و با ۲۰٪ درصد داده‌ها به تست رابطه با معیارهای ارزیابی پرداخته شد.

استفاده از سازه‌های گابیونی یا تورسنگی رواج یافته که نمونه بارز آن به کارگیری در ساختمان سدهای تاخیری، سازه‌های آبی و در بنای سدهای کوچک می‌باشد. تامین مصالح سازه گابیون از مصالح طبیعی موجود در منطقه صورت می‌گیرد که علاوه بر مزایای اقتصادی و کاهش هزینه اجرا، سازگاری خوبی با محیط زیست پیرامون داشته و وجود گابیون در مسیر جریان آب به جهت عبور جریان از میان سنگ‌ریزه‌ها و یا حتی از روی سازه متخلخل استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد [۴ و ۵].

واگنر^۱ اولین مطالعه در زمینه استهلاک انرژی پایین دست شیب‌شکن مایل را انجام داد و استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های مایل رودخانه کلمبیا را محاسبه کرد [۳]. شولچین و اکیب^۲ با استفاده از عدد شیب‌شکن به تخمین طول پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب‌شکن‌های مایل پرداختند. این محققین دریافتند که برای سازه‌های شیب‌شکن مایل نمی‌توان بر اساس عدد شیب‌شکن، طول پرش هیدرولیکی را تخمین زد [۶]. مرادی سبز کوهی و همکاران سه نوع شیب‌شکن رایج شامل قائم، مایل مستطیلی و پلکانی در

۱- مقدمه: در کانال‌های زهکشی، آبیاری و مناطق کوهستانی که طراحی شیب مسیر برای احداث کانال بایستی کمتر از شیب طبیعی زمین باشد و همچنین برای اینکه جریان آب از یک تراز بالا به تراز پایین منتقل و انرژی اضافی سینماتیکی جریان مستهلک شود، از شیب‌شکن‌های مایل استفاده می‌گردد [۱]. شیب‌شکن‌ها از نظر شکل هندسی به سه دسته شیب‌شکن قائم، لوله‌ای و مایل مستطیلی تقسیم‌بندی می‌شوند. تحقیقات محدودی به دلیل استهلاک انرژی کم سازه شیب‌شکن مایل در مقایسه با دیگر سازه‌های شیب‌شکن صورت پذیرفته است [۲ و ۳]، از طرفی انجام مطالعاتی در مورد تغییر در ساختمان شیب‌شکن مایل مستطیلی به شدت حس می‌گردد. اساسی‌ترین هدف در احداث شیب‌شکن‌ها اتلاف انرژی اضافی جریان می‌باشد. به همین دلیل جهت اتلاف انرژی بیشتر می‌توان در قسمت مایل سازه شیب‌شکن مایل، تور سنگی به کار برد. در مهندسی هیدرولیک سنگ و سنگ‌ریزه برای پایداری سازه به جهت دارا بودن دانسیته و وزن زیاد، زبری برای افت انرژی و تخلخل برای زهکشی کاربرد دارد. در طی سالیان اخیر

1 Wagner
2 Sholichin & Akib

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: daneshfaraz@yahoo.com



انرژی بیشتری نسبت به سرریز پلکانی گابیونی ساده دارد. همچنین آن‌ها در ۳ شیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به تاثیر شیب سرریز در افت انرژی جریان در سرریز پلکانی گابیونی پرداختند که نشان داد سرریز پلکانی گابیونی با شیب تند افت انرژی کمتری نسبت به شیب ملایم‌تر دارد [۸]. عزیزی و همکاران با انجام آزمایش‌هایی به تاثیر تخلخل مصالح مورد استفاده بر افت انرژی جریان در سرریزهای پلکانی گابیونی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که شیب پایین‌دست کمتر از تخلخل بر افت انرژی جریان تاثیر می‌گذارد و با کاهش تخلخل، افت انرژی افزایش می‌یابد [۹]. مفتاح هلقی و همکاران مطالعه‌ای در مورد استهلاك انرژی جریان در سرریزهای پلکانی توری سنگی با به‌کارگیری صفحات نفوذناپذیر انجام دادند. نتایج آزمایش با حالت بدون استفاده از صفحه فلزی مقایسه شد و مشخص گردید که بیشترین استهلاك انرژی در دبی ۱۳/۵ لیتر بر ثانیه، شیب پایین‌دست ۱:۱ و ارتفاع صفحه ۱۰ سانتی‌متری، ۸۲/۶ درصد بوده است. همچنین راندمان افت انرژی جریان در صفحات با ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر نسبت به سایر حالات بیشتر است [۱۰]. سامانی و همکاران به بررسی تعیین دبی جریان همزمان درون‌گذر و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره‌سنگی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی با نسبت ارتفاع به بار آبی بالادست سد، نسبت استغراق پایین‌دست و اندازه مصالح بدنه سد رابطه مستقیم و با طول سد پاره‌سنگی، شیب وجوه سراب و پایاب آن رابطه معکوس دارد [۱۱]. سلماسی و همکاران به مطالعه‌ی آزمایشگاهی استهلاك انرژی جریان از روی سرریز گابیونی پله‌ای پرداختند. در این تحقیق ۹ مدل فیزیکی از سرریز گابیونی پله‌ای با ۳ تخلخل و شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ برای انجام آزمایش‌ها ساختند. نتایج نشان داد که در دبی‌های بالا که رژیم جریان غیر ریزشی یا شبه صاف اتفاق می‌افتد، استهلاك انرژی در سرریز گابیونی بیشتر است. همچنین مشاهده گردید که در دبی‌های بیشتر، جریان به دو بخش درون‌گذر و روگذر تقسیم می‌شود [۵]. وودریچ و چانسون^۳ به مقایسه دو سرریز پلکانی نفوذناپذیر و سرریز پلکانی گابیونی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که فعل و انفعالات میان جریان روگذر و درون‌گذر تابعی از شکل گابیون، دبی، رژیم جریان و الگوی چرخش می‌باشد. همچنین به دلیل وجود تخلخل پله‌های گابیونی بخشی از جریان به صورت نشت از درون گابیون عبور می‌نماید و باعث کاهش مقدار دبی عبوری از روی پله‌ها می‌گردد [۱۲]. نجاتی و همکاران مدل عددی جریان و انتقال رسوبات معلق در مخزن سد پاره سنگی را بررسی نمودند. این محققین ابتدا بر اساس حل عددی معادلات

دو ارتفاع، دو زاویه و دو عدد پله متفاوت، را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که شیب‌شکن مایل نسبت به شیب‌شکن‌های قائم و پلکانی کمترین استهلاك انرژی را داراست. همچنین نتایج نشان داد که برای تمامی مدل‌های آزمایشی با افزایش عمق بحرانی نسبی و کاهش زاویه شیب‌شکن، میزان استهلاك انرژی کل کاهش می‌یابد [۲]. نوروزی و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی استهلاك انرژی ناشی از به‌کارگیری صفحات مشبک قائم در پایین‌دست شیب‌شکن‌های مایل با روش ترکیبی شبکه عصبی-فازی تطبیق‌پذیر (ANN و ANFIS) پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک منجر به افزایش حداقل ۴۰۷ و حداکثر ۹۰۳ درصدی راندمان استهلاك انرژی نسبی کل، نسبت به شیب‌شکن مایل ساده شد. همچنین مدل عصبی-فازی تطبیق‌پذیر با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۹۶ و ۰/۰۰۶ نسبت به مقادیر مدل شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برابر ۰/۹۹۲ و ۰/۰۰۸ از قابلیت بالائی در تخمین استهلاك انرژی نسبی برخوردار می‌باشد [۴]. دانش‌فراز و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی عملکرد صفحات مشبک افقی در استهلاك انرژی شیب‌شکن‌های مایل را مورد بررسی قرار دادند. این محققین ۱۰۸ آزمایش متفاوت در محدوده دبی ۷۰۰-۲۰۰ لیتر در دقیقه بر روی مدل‌هایی در سه زاویه، دو ارتفاع شیب‌شکن و دو نسبت تخلخل صفحات مشبک انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک، استهلاك انرژی نیز افزایش می‌یابد. افزایش زاویه شیب‌شکن مایل سبب افزایش عمق نسبی پایین‌دست شد، به گونه‌ای که شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه مشبک افقی با زاویه ۴۵ درجه و تخلخل ۴۰ درصدی صفحات، بهترین عملکرد در افزایش عمق نسبی پایین‌دست را به خود اختصاص دادند. همچنین افزایش زاویه باعث کاهش متوسط راندمان استهلاك انرژی می‌شود [۱]. در شیب‌شکن‌های مایل مستطیلی زمانی که جریان از این سازه عبور می‌کند، استهلاك انرژی به دو صورت رخ می‌دهد که شامل ۱- استهلاك انرژی ناشی از نوع هندسه سازه شیب‌شکن و ۲- نمود پدیده پرش هیدرولیکی است. پیراس و همکاران^۱ مطالعاتی بر روی مدلی از سرریزهای پلکانی گابیونی با هدف محاسبه استهلاك انرژی جریان از روی سازه و تعیین ابعاد هندسی حوضچه آرامش انجام دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که بندهای پلکانی گابیونی قابلیت تحمل دبی جریان تا ۳ مترمکعب بر ثانیه در عرض واحد را دارد [۷]. چیناراسری و همکاران^۲ به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای پلکانی گابیونی پرداختند. نتایج نشان داد که سرریز پلکانی گابیونی افت

1 Peyras et al.

2 Chinnarasri et al

نسبی $\pm 2\%$ درصد صورت گرفت. جهت ساخت سازه شیب‌شکن از باکس‌های شیشه‌ای هم عرض کانال در دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری در کانال استفاده شد. در سه زاویه $۲۶/۵۶^\circ$ ، $۳۳/۷^\circ$ و ۴۵° درجه برای ایجاد سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل نیز از شیشه برای شیب‌شکن مایل ساده و ساخت باکس‌های شیب‌دار از جنس میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر برای شیب‌شکن مایل گابیونی صورت گرفت. در این تحقیق بعد از روشن نمودن پمپ با استفاده از روتامتر نصب شده دبی جریان تنظیم شد و با تثبیت کامل شرایط جریان، اقدام به اندازه‌گیری پارامترها گردید. با پایداری کامل شرایط جریان، با استفاده از عمق سنخ نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر عمق بالادست و پایین‌دست برای مدل‌های شیب‌شکن مایل ساده و گابیونی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تمامی اعماق در پنج الی ۷ نقطه از عرض کانال صورت پذیرفت و مقدار متوسط آن‌ها به عنوان عمق نهایی یادداشت گردید.

شکل ۱ شماتیک کلی فلوم، مدل، تجهیزات آزمایشگاهی، شکل ۲-الف نمایی از جریان درون گذر و شکل ۲-ب نمایی از جریان روگذر در مدل‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر را نشان می‌دهند.

۲-۲- تشابه ابعادی

برای بررسی استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی پارامترهای موثر را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای رابطه (۱) دانست که در آن:

$$f_1(Q, \Delta E, E_0, y_0, y_c, y_b, y_1, V, \Delta Z, \theta, n, \rho, \mu, g) = 0 \quad (1)$$

Q : دبی جریان، ΔE : استهلاک انرژی، E_0 : انرژی در بالادست شیب‌شکن، y_0 : عمق بالادست شیب‌شکن، y_c : عمق بحرانی، y_1 : عمق پایین‌دست شیب‌شکن، ΔZ : ارتفاع شیب‌شکن، V : سرعت جریان، θ : زاویه شیب‌شکن مایل، n : تخلخل دانه‌های سنگی، ρ : جرم مخصوص آب، μ : لزوجت دینامیکی و g : شتاب گرانش زمین می‌باشد.

با تحلیل ابعادی صورت گرفته به روش پی باکینگهام و با در نظر گرفتن متغیرهای تکراری ρ, μ, g پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه (۲) محاسبه شد.

$$f_2\left(\frac{\Delta E}{y_0}, \frac{E_0}{y_0}, \frac{\Delta Z}{y_0}, \frac{y_b}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{y_1}{y_0}, Fr_0, Fr_1, Re_0, n, \theta\right) = 0 \quad (2)$$

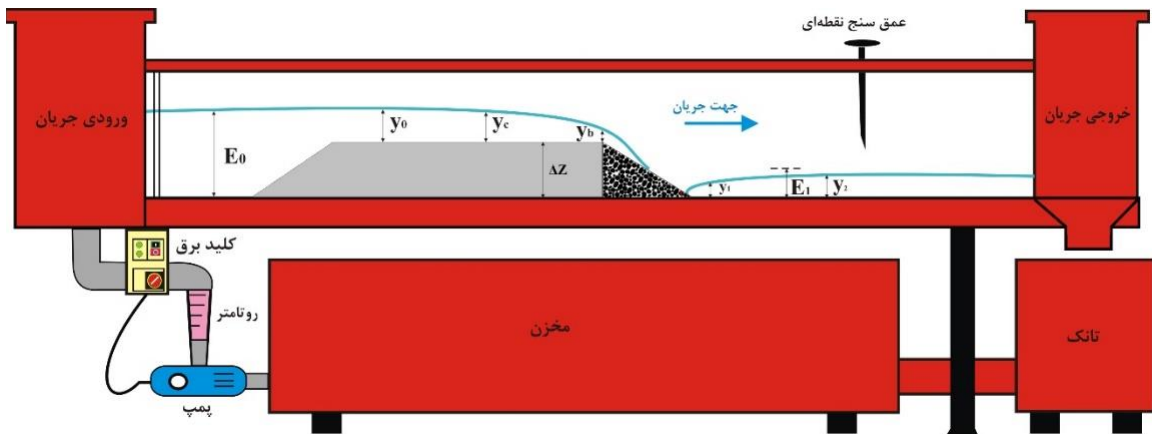
سنت و نانت به روش حجم محدود و با رویکرد کاملاً ضمنی مشخصات جریان را محاسبه و سپس با استفاده از گسسته‌سازی معادله انتقال-پخش، میزان غلظت رسوبات در نقاط مختلف مخزن را تعیین کردند. نتایج نشان داد که تطابق مناسبی بین حل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی وجود داشت [۱۳]. رازی و همکاران بررسی آزمایشگاهی تعداد پله، شیب و اندازه ذرات بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای تور سنگی را انجام دادند. نتایج نشان داد که در سرریزهای پله‌ای توری سنگی شیب نمای پایین‌دست سرریز تاثیر 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 و قطر متوسط ذرات ۴۰ میلی‌متر به ازای دارای بیشترین افت انرژی نسبی می‌باشند [۱۴].

با بررسی تحقیقات انجام گرفته در زمینه اهمیت استهلاک انرژی در بحث احداث شیب‌شکن‌ها و موضوعات مورد مطالعه قبلی، مشاهده شد که استفاده از سازه‌های الحاقی و ارائه روش‌هایی برای افزایش راندمان استهلاک در شیب‌شکن مایل، مورد توجه محققان می‌باشد. همچنین به دلیل استهلاک انرژی کم شیب‌شکن مایل مستطیلی نسبت به شیب‌شکن‌های رایج و با توجه به اینکه در پژوهش‌های گذشته تغییر در ساختمان سازه شیب‌شکن مایل مستطیلی مورد مطالعه قرار نگرفته است و از طرفی، مطالعات گذشته نشان از توجه پژوهشگران به سازه‌های گابیونی به خاطر استهلاک انرژی بالا، سادگی ساخت و هزینه کم اجرا بیشتر بوده است. به همین دلیل در مطالعه حاضر، در ساختمان سازه شیب‌شکن مایل مستطیلی سازه گابیونی (تورسنگی) استفاده گردیده و تاثیر آن بر روی مقادیر استهلاک انرژی و پارامترهای هیدرولیکی در شیب‌شکن‌های مایل گابیونی به نسبت شیب‌شکن مایل ساده برای نخستین بار بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

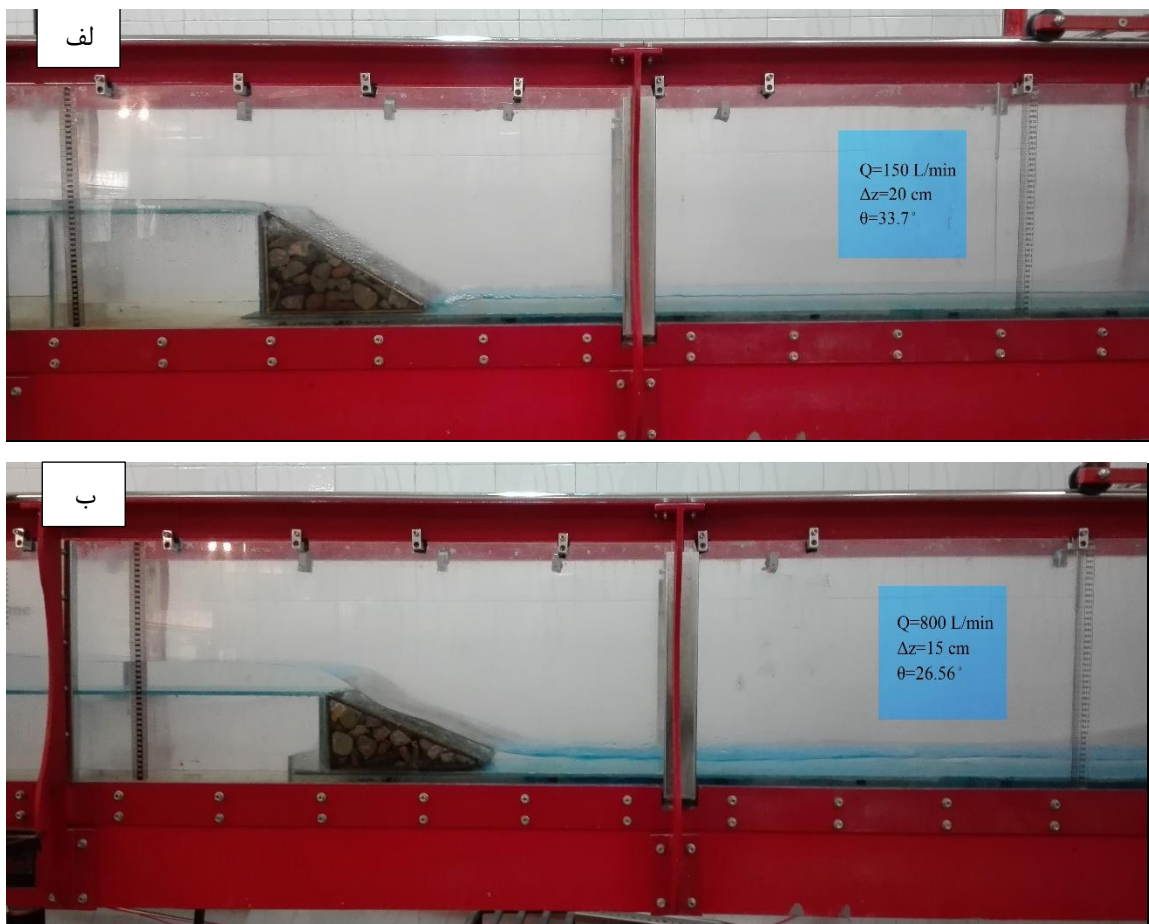
۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه، مجهز به فلوم آزمایشگاهی با جنس دیواره‌ها و کف فلوم پلکسی گلاس شفاف و بدون زبری به طول موثر ۵ متر، عرض $۰/۳$ و ارتفاع $۰/۴۵$ متر با شیب طولی صفر درجه انجام شد. جهت تامین جریان ورودی، پمپاژ آب توسط دو عدد پمپ هر کدام با دبی ۴۵۰ لیتر بر دقیقه از مخزن پایین‌دست به مخزن بالادست پس از عبور از توری آرام کننده جریان وارد فلوم می‌گردد. اندازه‌گیری دبی جریان با بهره‌گیری از روتامتر نصب شده بر پمپ با خطای



شکل ۱. شماتیک کلی فلوم، مدل، تجهیزات آزمایشگاهی تحقیق حاضر

Fig. 1. General schematic of current, model, laboratory equipment of the present study



شکل ۲. نمایی از مدل آزمایشگاهی الف) جریان درون گذر و ب) جریان روگذر از گابیون

Fig. 2. Side Views to Laboratory Model of Gabion a) Throughflow b) Overflow from the gabion

جدول ۱. خلاصه‌ای از پارامترهای متغیر و تعداد آزمایش‌های تحقیق حاضر

Table 1. Summary of variable parameters and the number of present research experiments

گستره پارامترهای مورد بررسی		
شیب‌شکن مایل ساده	شیب‌شکن مایل گابیونی	
۸۰۰ - ۱۵۰	۸۰۰ - ۱۵۰	Q (L/min)
۲۰ و ۱۵	۲۰ و ۱۵	ΔZ (cm)
۴۵ و ۳۳/۷، ۲۶/۵۶	۴۵ و ۳۳/۷، ۲۶/۵۶	θ (Degree)
۶۰	۶۰	N (تعداد آزمایش)

با ساده‌سازی رابطه (۳)، می‌توان پارامترهای وابسته بدون بعد را با تابعی از پارامترهای مستقل بدون بعد به صورت رابطه (۴) نوشت:

$$f_4\left(\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_c}{\Delta Z}, \frac{y_1}{\Delta Z}, Fr_1, \theta\right) = 0 \quad (4)$$

در رابطه فوق: $\frac{y_1}{\Delta Z}, \frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_c}{\Delta Z}$ به ترتیب عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین دست می‌باشند. با تفکیک پارامترهای وابسته و مستقل، در بالادست و پایین دست شیب‌شکن مایل می‌توان استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین دست را به صورت روابط (۵) و (۶) بیان نمود.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_5\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, Fr_1, \theta\right) \quad (5)$$

$$\frac{y_1}{\Delta Z} = f_6\left(\frac{y_c}{\Delta Z}, Fr_1, \theta\right) \quad (6)$$

خلاصه‌ای از پارامترهای متغیر و تعداد آزمایش‌های تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه گردیده است.

با تقسیم برخی از پارامترهای بی‌بعد برهم و با ساده‌سازی، رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$f_3\left(n, \theta, Fr_0, Fr_1, Re_0, \frac{y_b}{y_c}, \frac{y_c}{\Delta Z}, \frac{y_1}{\Delta Z}, \frac{\Delta E}{E_0}\right) = 0 \quad (3)$$

به جهت متلاطم بودن جریان در تمامی مدل‌ها برای شیب‌شکن مایل ساده و گابیونی ($Re_0 \geq 2000$) از پارامتر بی‌بعد عدد رینولدز بالادست Re_0 صرف نظر گردید [۱۶ و ۱۵]. به دلیل تجربه محققین قبلی در مورد تخلخل به کار رفته جهت حداکثر افت انرژی، برای همین از یک نوع دانه بندی با تخلخل ۵۰٪ (الک عبوری از $\frac{1}{2}$ و مانده روی $1''$) در مطالعه حاضر استفاده شد و پارامتر بی‌بعد n (تخلخل دانه‌های سنگی) به خاطر ثابت بودن حذف گردید [۱۷]. در حوضچه جریان، عدد فرود پایین دست موثر بوده و تغییرات آن به ترتیب برای شیب‌شکن مایل ساده و گابیونی در محدوده (۸/۸ الی ۱۷/۴) و (۴۸/۲ الی ۲۷/۱) است ولی به تبع زیر بحرانی بودن جریان در بالادست و همچنین محدوده کم عدد فرود بالادست Fr_0 (۷/۰ الی ۹/۰) در تمامی مدل‌ها از تاثیر عدد فرود بالادست می‌توان صرف نظر نمود [۱۸]. همچنین از پارامتر عمق نسبی لبه $\frac{y_b}{y_c}$ نیز به جهت تغییرات بسیار کم آن در تحقیق حاضر صرف نظر شد.

آمده از ۲۰ درصد باقی مانده از داده‌ها استفاده شد. همچنین از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی R^2 ، خطای جذر میانگین مربعات $RMSE$ و $E_{Relative\ error}$ جهت ارزیابی روابط به کار گرفته شد. در روابط زیر: N ، M_{exp} و M_{cal} به ترتیب تعداد داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر داده‌های محاسباتی است.

۲-۳- روابط مربوط استهلاك انرژی

از روابط (۷) و (۸) برای محاسبه انرژی در بالادست و پایین دست شیب‌شکن مایل به ترتیب استفاده گردید.

$$E_0 = 1.5y_c + \Delta Z \quad (7)$$

$$R^2 = \left(\frac{N \sum M_{exp} M_{cal} - (\sum M_{exp})(\sum M_{cal})}{\sqrt{N(\sum M_{exp}^2) - (\sum M_{exp})^2} \sqrt{N(\sum M_{cal}^2) - (\sum M_{cal})^2}} \right)^2 \quad (11)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (M_{exp} - M_{cal})^2} \quad (12)$$

که در آن: E_0 : انرژی در بالادست شیب‌شکن، E_1 : انرژی در پایین دست شیب‌شکن، ΔZ : ارتفاع شیب‌شکن، y_c : عمق بحرانی، y_1 : عمق پایین دست شیب‌شکن، g : شتاب گرانش زمین و q : دبی واحد عرض می‌باشد.

$$E_{Relative\ error} = \frac{|M_{exp} - M_{cal}|}{M_{exp}} \times 100 \quad (13)$$

همچنین از رابطه (۹) برای محاسبه درصد استهلاك انرژی نسبی و برای محاسبه راندمان استهلاك انرژی (λ) از رابطه (۱۰) استفاده گردید.

$$\frac{\Delta E}{E_0} \% = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100 \quad (9)$$

۳- بحث و نتایج

۳-۱- مقایسه تحقیق حاضر با محققین دیگر

در تحقیق حاضر، ابتدا آزمایشاتی جهت بررسی استهلاك انرژی نسبی و عمق نسبی پایین شیب‌شکن مایل ساده با دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی متری در محدوده دبی ۱۵۰ الی ۸۰۰ لیتر بر دقیقه انجام گرفت. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج حاصل از مطالعات دانش فراز و همکاران [۱] و مرادی سبز کوهی و همکاران [۲] مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌گردد که مقایسه نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های محققین مذکور هم‌پوشانی و انطباق مناسبی دارد، به نحوی که مقایسه استهلاك انرژی نسبی کل این تحقیق برای سه زاویه (۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه) با تحقیق دانش فراز و همکاران [۱] و برای دو زاویه (۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ درجه) با پژوهش مرادی سبز کوهی و همکاران [۲] به ترتیب دارای ضریب تعیین ۰/۹۸۴ و ۰/۹۴۱ و خطای نسبی ۷/۸۵ و ۱۸/۲ درصد می‌باشند

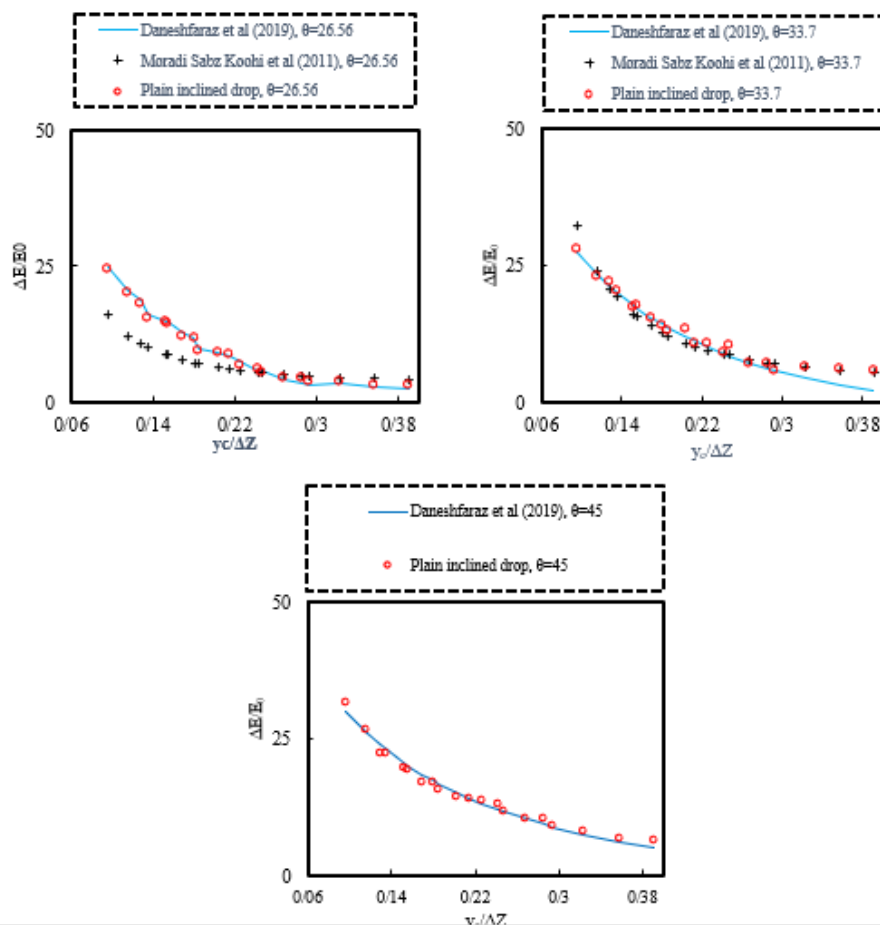
$$\lambda = \left(\frac{\Delta E_g}{\Delta E_d} - 1 \right) \quad (10)$$

که در آن:

ΔE_g : استهلاك انرژی نسبی شیب‌شکن مایل گابیونی و ΔE_d : استهلاك انرژی نسبی شیب‌شکن مایل ساده می‌باشد.

۲-۴- معیارهای ارزیابی

بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته برای تحقیق حاضر، روابطی برای تخمین استهلاك انرژی نسبی و عمق نسبی پایین دست ارائه گردید. بدین منظور، پارامتر وابسته مورد نظر به صورت تابعی از پارامترهای مستقل نظر گرفته شد. برای به دست آوردن روابط ۸۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان ورودی استفاده شدند که با بهره‌گیری از الگوریتم GRG Nonlinear در برنامه اکسل به صورت سعی و خطا نیز ضرایب و توان هر یک به دست آمدند. برای صحت سنجی معادلات به دست

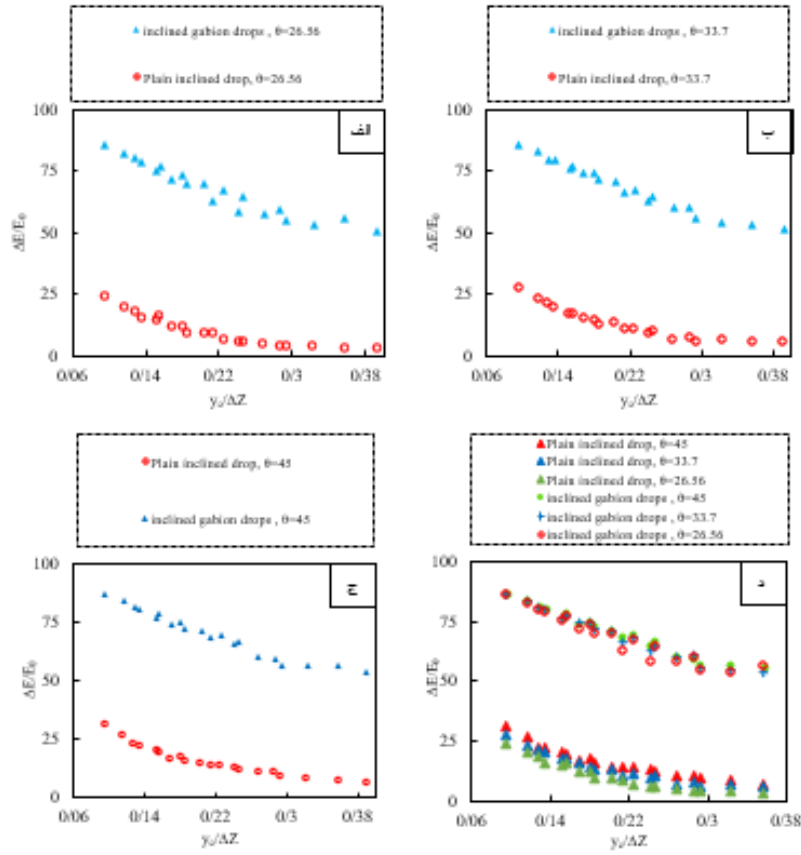


شکل ۳. مقایسه تغییرات استهلاک انرژی نسبی کل تحقیق حاضر با مطالعات دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۹) و مرادی سبز کوهی و همکاران (۲۰۱۱)

Fig. 3. Compares the relative energy dissipation changes of the research studies Danshfaraz et al. (2019) with Moradi Sabz Koohi et al. (2011)

آنجایی که استهلاک انرژی کل با افزایش عمق بحرانی نسبی روند کاهشی دارد، برای همین افزایش ارتفاع شیب‌شکن برای یک دبی ثابت موجب افزایش استهلاک انرژی کل می‌گردد. میزان استهلاک انرژی برای یک عمق بحرانی نسبی ثابت (دبی ثابت) با افزایش شیب و ارتفاع شیب‌شکن، افزایش می‌یابد. شکل ۴-د برای بررسی بهتر تاثیر زاویه در استهلاک انرژی نسبی کل ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی با افزایش زاویه، میزان استهلاک انرژی نسبی کل نیز افزایش می‌یابد که این موضوع را دانش‌فراز و همکاران [۱] و همچنین مرادی سبز کوهی و همکاران [۲] در تحقیقات خود گزارش نمودند. برای شیب‌شکن‌های مایل گابیونی با تغییر دبی، نوع جریان نیز تغییر می‌یابد، به

۳-۲- بررسی استهلاک انرژی نسبی کل در شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی
 نتایج حاصل از بررسی و مقایسه تغییرات استهلاک انرژی نسبی کل برای سه زاویه شیب‌شکن در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل‌های مذکور، برای شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی در تمامی زاوایا مقادیر استهلاک انرژی نسبی کل با افزایش عمق بحرانی نسبی، کاهش می‌یابد و به کارگیری گابیون در قسمت مایل سازه شیب‌شکن باعث افزایش چشمگیر استهلاک انرژی در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده گردیده است. برای یک دبی ثابت با مشخص بودن عمق بحرانی آن، با افزایش ارتفاع شیب‌شکن پارامتر عمق بحرانی نسبی کاهش می‌یابد و از



شکل ۴. تغییرات استهلاک انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی

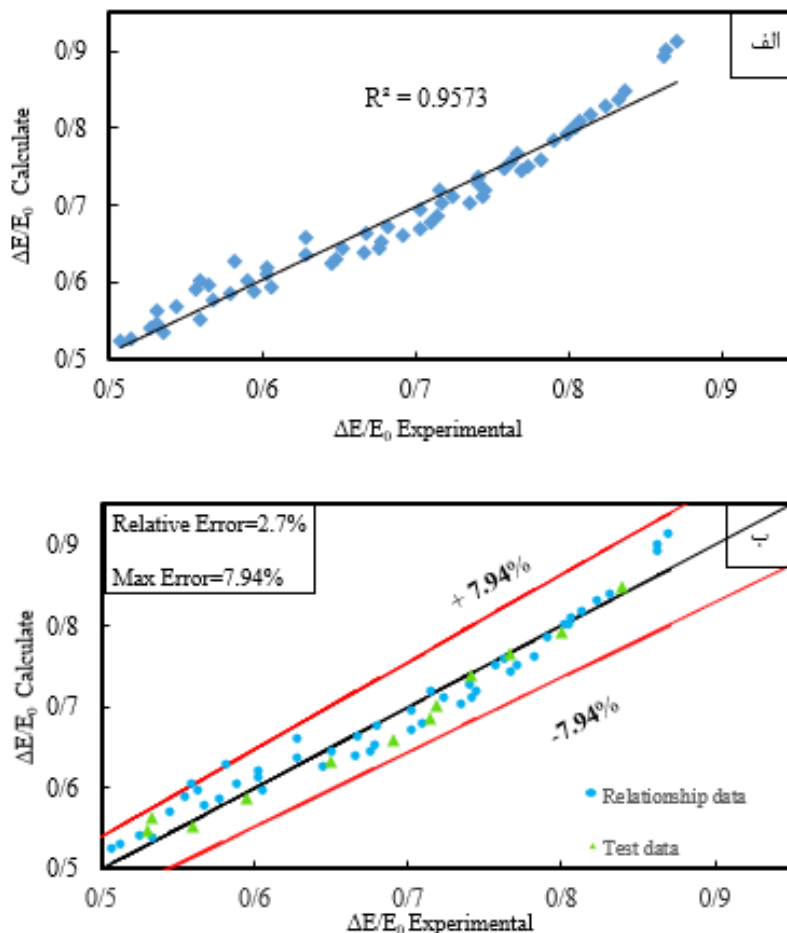
Fig. 4. Changes in relative energy dissipation versus relative critical depth

تحقیق حاضر با در نظر گرفتن ۸۰٪ درصد داده‌های آزمایشگاهی رابطه (۱۴) با معیارهای ارزیابی قابل قبول برای محاسبه استهلاک انرژی پایین دست شیب‌شکن‌های مایل گابیونی ارائه گردید.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = a \left(\frac{y_c}{\Delta Z} \right)^b (\theta)^c \quad (14)$$

که در آن مقادیر $a = 0.3786$ ، $b = -38.03/0$ و $c = 0.441/0$ با استفاده از الگوریتم GRG Nonlinear در برنامه اکسل به صورت سعی و خطا محاسبه شده است. همچنین مقایسه مقادیر آزمایشگاهی استهلاک انرژی

گونه‌ای که در دبی‌های پایین به علت اینکه بخش اعظم جریان به صورت درون‌گذر بوده و نفوذ جریان به داخل گابیون موجود به نحو احسن صورت می‌گیرد به همین دلیل در این حالت به خاطر گرفتار نمودن جریان و اصطکاک سنگدانه‌های موجود در سازه متخلخل شیب‌شکن استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش دبی، جریان درون‌گذر به آرامی تبدیل به جریان روگذر می‌شود که باعث کاهش تاثیر زبری محیط متخلخل و کاهش نفوذ جریان به این محیط می‌گردد. همچنین به دلیل وجود رابطه مستقیم بین تلاطم و آشفته‌گی جریان با میزان استهلاک انرژی، در نتیجه نسبت به دبی‌های پایین درون‌گذری جریان کاهش و به سبب آن استهلاک انرژی نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه در این حالات شاهد استهلاک انرژی بالایی نخواهیم بود. در



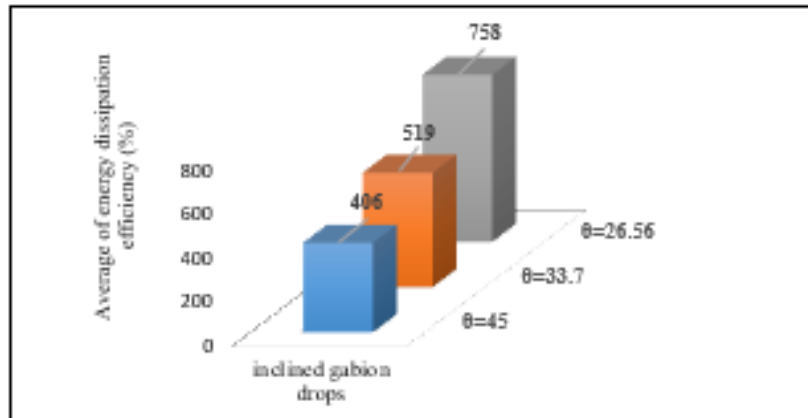
شکل ۵. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی $\Delta E/E_0$ با مقادیر محاسباتی الف) ضریب همبستگی ب) درصد خطای نسبی

Fig. 5. Comparison of $\Delta E/E_0$ laboratory values and computational values a) The correlation coefficient b) Percentage of relative error

با استفاده از رابطه (۴) به منظور بررسی بیشتر زوایا در استهلاک انرژی نسبی، راندمان استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل گابیونی برای سه زاویه در شکل ۶ ارائه شده است. با دقت در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که راندمان استهلاک انرژی با افزایش زاویه رابطه معکوس داشته و کاهش می‌یابد. از دلایل مهم افزایش راندمان استهلاک انرژی همزمان با کاهش زاویه را می‌توان بیشتر بودن طول سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل با زاویه ۲۶/۵۶

نسبی شیب‌شکن مایل گابیونی با مقادیر پیش‌بینی شده آن نشان داد که رابطه دارای ضریب تعیین آن $R^2 = 0.9573$ ، خطای جذر میانگین مربعات $RMSE = 2/21$ ، متوسط خطای نسبی ۲/۷ درصد و حداکثر درصد خطای نسبی موجود ۷/۹۴ درصد می‌باشد.

همچنین شکل ۵ صحت سنجی و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر و مقادیر محاسباتی ارائه شده توسط رابطه (۱۴) را نشان می‌دهد.



شکل ۶. متوسط راندمان استهلاک انرژی تحقیق حاضر برای سه زاویه (۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه)

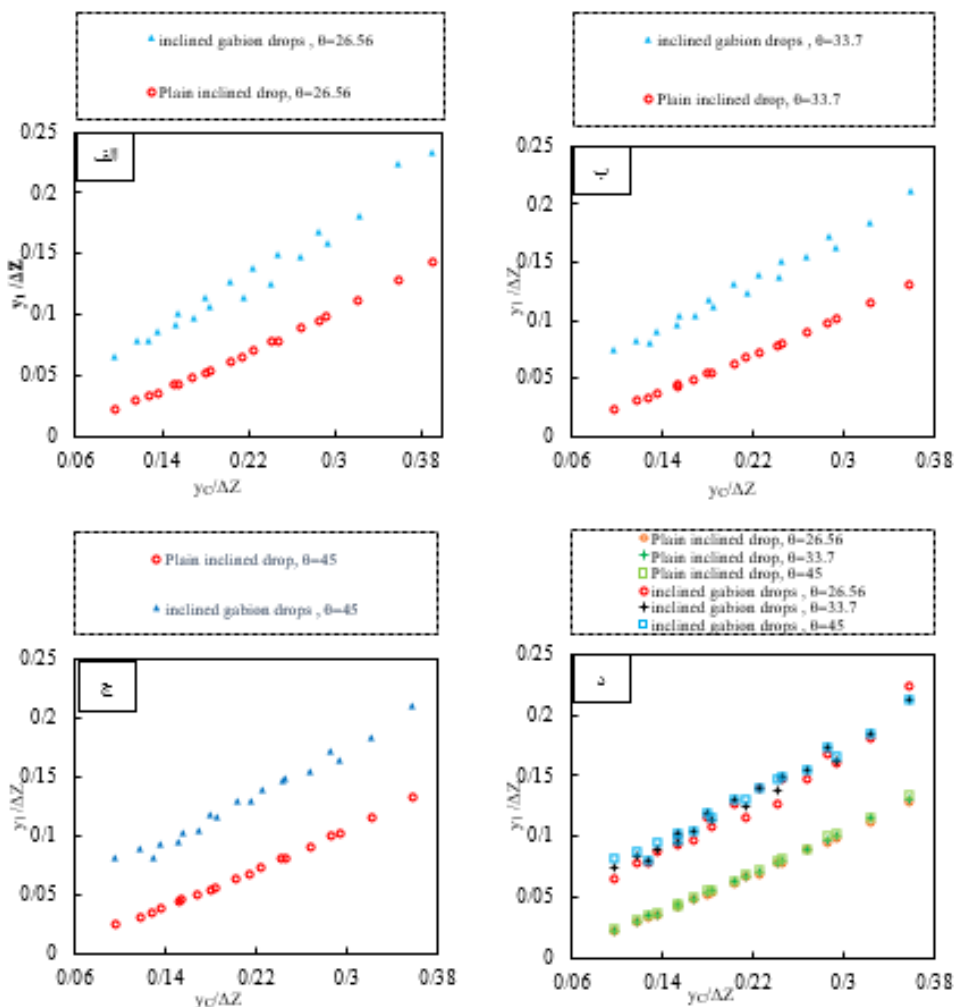
Fig. 6. Average energy dissipation efficiency of the present study with three angles of (26.56, 33.7 and 45 degrees)

عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل ساده و گابیونی دارد. افزایش زاویه شیب شکن باعث می گردد نیروی ثقل و به تبع آن نیروی مقاومت هوا بیشتر شده و در نتیجه عمق نسبی پایین دست افزایش یابد که این تاثیر در دبی های پایین قابل بیان بوده و برای دبی های بالا رفتار جریان پیچیده می باشد. در دبی های بالا به دلیل متقارن بودن دو جریان درون گذر و روگذر ورود هوا در سطح آب تغییراتی ایجاد می نماید که اندازه گیری جریان را با خطا همراه نموده و به دنباله آن محاسبه استهلاک انرژی جریان نیز با خطا همراه خواهد بود. افزایش زاویه همزمان با کاهش طول وجه شیب دار همراه بوده برای همین سقوط جت ریزشی داخل سازه متخلخل کمی سریع اتفاق می افتد. در نتیجه آن نفوذ جریان آب به داخل گابیون بهتر رخ داده و اصطکاک ایجاد شده میان جریان و محیط متخلخل منجر به افزایش استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین دست می شود. جهت محاسبه عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل گابیونی با استفاده از داده های آزمایشگاهی رابطه (۱۴) با ضریب تعیین $R^2 = 0.9804$ ، خطای جذر میانگین مربعات $RMSE = 0.6220$ ، متوسط خطای نسبی ۳/۹۱ درصد و حداکثر خطای نسبی موجود ۹/۶۶ درصد می باشد که از لحاظ معیارهای ارزیابی دارای مقادیر قابل قبول بوده و می توانند تخمین درستی از داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر را ارائه دهند. در رابطه (۱۵) با بهره گیری از الگوریتم GRG Nonlinear در برنامه اکسل به صورت سعی و خطا ضرایب و توان تعیین شد که مقادیر عبارت از

درجه نسبت به زوایای ۳۳/۷ و ۴۵ درجه و همچنین تماس زیاد جریان و درگیری بیشتر جریان با سطح متخلخل که در زاویه ۲۶/۵۶ در مقایسه با زوایای ۳۳/۷ و ۴۵ درجه دانست.

۳-۳- بررسی عمق نسبی پایین دست در شیب شکن های مایل ساده و گابیونی

مطابق آنالیز ابعادی انجام گرفته و براساس رابطه (۱۰)، عمق نسبی پایین دست تابعی از عمق بحرانی نسبی می باشد، لذا به ازای سه زاویه مختلف، تغییرات عمق نسبی در شکل ۷ بر اساس عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ برای شیب شکن های مایل ساده و گابیونی برای سه زاویه مورد بررسی، عمق نسبی پایین دست با افزایش عمق بحرانی نسبی روندی صعودی داشته است. افزایش عمق نسبی پایین دست برای شیب شکن مایل گابیونی به ازای تمامی زوایا در مقایسه با شیب شکن مایل ساده قابل توجه است. عمده دلیل این افزایش، استفاده از سازه متخلخل در قسمت مایل شیب شکن که خصوصیات و رفتار جریان را تغییر داده و در این محدوده جریان را گرفتار می نماید. سازه گابیونی مورد استفاده همزمان باعث افزایش دو پارامتر استهلاک انرژی جریان و عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل گابیونی نسبت به شیب شکن مایل ساده می گردد. همچنین ملاحظه می شود که تغییر زاویه (طول شیب شکن) تاثیر محسوس در افزایش



شکل ۷. تغییرات عمق نسبی پایین‌دست در مقابل عمق بحرانی نسبی

Fig. 7. Changes of downstream relative depth versus relative critical depth

عمق نسبی پایین‌دست در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده شده است، به همین منظور درصد افزایش عمق نسبی شیب‌شکن مایل گابیونی نسبت به شیب‌شکن مایل ساده محاسبه شده و در شکل ۹ نمایش شده است. برای محاسبه درصد افزایش عمق نسبی پایین‌دست برای شیب‌شکن مایل گابیونی در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده از رابطه (۱۶) استفاده شده است.

$$(16) \quad \text{درصد افزایش عمق نسبی پایین‌دست} = ((Y1_G - Y1_P) / Y1_G) * 100$$

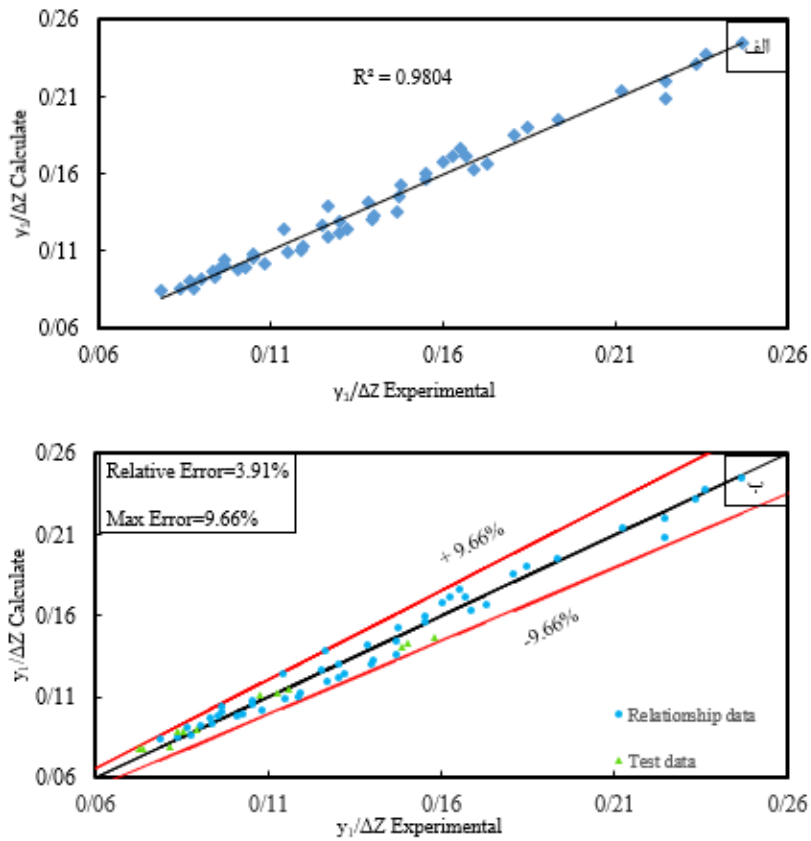
$d = 0.0609$ و $c = 0.1452$, $b = 1.6384$, $a = 0.1895$ است.

$$(15) \quad \frac{y_1}{\Delta Z} = a \left(\frac{y_c}{\Delta Z} \right)^b (\theta)^c + d$$

همچنین جهت مقایسه مقادیر رابطه ارائه شده با مطالعه آزمایشگاهی

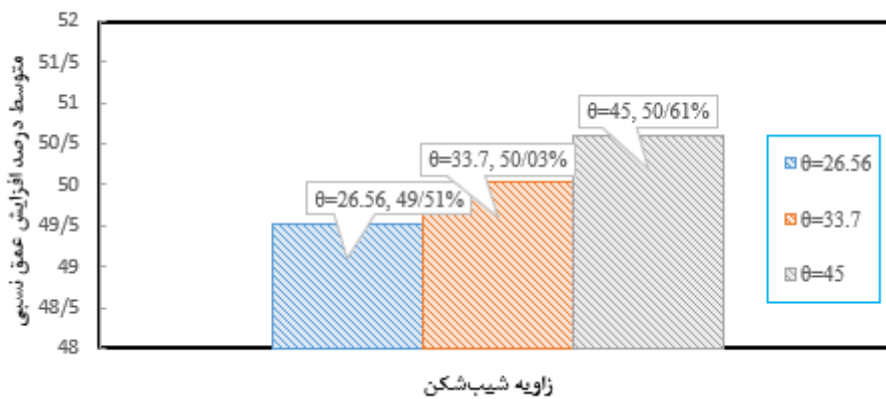
حاضر شکل ۸ ارائه شده است.

از آنجایی که به کارگیری سازه متخلخل، استهلاک انرژی و تلاطم در پایین‌دست شیب‌شکن مایل گابیونی را افزایش داده و موجب افزایش



شکل ۸. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی $Y_1/\Delta Z$ مقادیر محاسباتی الف) ضریب همبستگی ب) درصد خطای نسبی

Fig. 8. Comparison of $\Delta E/E_0$ laboratory values and computational values a) The correlation coefficient b) Percentage of relative error



شکل ۹. متوسط افزایش عمق نسبی پایین دست برای شیب شکن مایل گابیونی به نسبت شیب شکن مایل ساده

Fig. 9. An average increase of downstream relative depth for the Sloped Gabion Drops and Simple Drops

ارائه شد و با ۲۰٪ درصد مابقی به تست رابطه با معیارهای ارزیابی مناسبی پرداخته شد. با توجه به تجربیات حاصل از تحقیق حاضر پیشنهاد می‌گردد که جهت ادامه تحقیق حاضر به بررسی پایداری سازه‌های سازه شیب‌شکن مایل گابیونی، تاثیر رسوبات بالادست بر عملکرد سازه گابیونی و مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر پرداخته شود.

منابع

- [1] R. Daneshfaraz, M. Majedi Asl, A. Bazyar, Experimental investigation of the effect of the horizontal Screen on the energy dissipation in inclined drop, Iranian Journal of Soil and Water Research, (2019) -(in Persian).
- [2] A. Moradi Sabz Koochi, S. S.M. Kashefipour, M. Bina, Experimental Comparison of Energy Dissipation on Drop Structures, Journal of Water and Soil Science, 15(56) (2011) 209-223(in Persian).
- [3] W.E. Wagner, Hydraulic Model Studies of the Check Intake Structure-Potholes East Canal, Bureau of Reclamation Hydraulic Laboratory Report Hyd, (1956) 411.
- [4] R. Norouzi Sarkarabad, R. Daneshfaraz, A. Bazyar, The Study of Energy Depreciation due to the use of Vertical Screen in the Downstream of Inclined Drops by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Amirkabir Journal of Civil Engineering, (2019).(in Persian).
- [5] F. Salmasi, D. Farsadzade, H. Mohit, Experimental Evaluation of Energy Dissipation over Gabion Stepped Spillway, Water and Soil Science, 21(4) (2011) 152-164. (in Persian).
- [6] M. Sholichin, S. Akib, Development of drop number performance for estimate hydraulic jump on vertical and sloped drop structure, Int J Eng Sci, 5(11) (2011) 1678-1687.
- [7] L.a. Peyras, P. Royet, G. Degoutte, Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs, Journal of Hydraulic Engineering, 118(5) (1992) 707-717.
- [8] C. Chinnarasri, S. Donjadee, U. Israngkura, Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs, Journal of Hydraulic Engineering, 134(8) (2008) 1147-1152.

در رابطه (۱۶): Y_{1G} : عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن مایل گابیونی با زاویه θ و Y_{1p} : عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن مایل ساده با زاویه θ می‌باشد.

با مشاهده شکل ۹ می‌توان استنباط نمود که افزایش زاویه تاثیر محسوس در افزایش عمق نسبی پایین‌دست دارد و در شیب‌شکن مایل گابیونی به خاطر خصوصیت جریان عبوری از سازه گابیونی در قیاس با شیب‌شکن مایل ساده تاثیر کمتری داشته است. به طور متوسط در شیب‌شکن مایل گابیونی برای زوایای ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه نسبت به شیب‌شکن مایل ساده به ترتیب ۴۹/۵۱، ۵۰/۰۳ و ۵۰/۶۱ درصد عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری کلی

تحقیق حاضر جهت بررسی پارامترهای هیدرولیکی برای سه زاویه، دو ارتفاع و دو نوع شیب‌شکن مایل ۱- ساده و ۲- گابیونی انجام شد. در مجموع با انجام ۱۲۰ آزمایش متفاوت برای هر دو نوع شیب‌شکن مایل ساده و گابیونی پارامترهای استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو مدل مورد آزمایش، افزایش عمق بحرانی نسبی، کاهش ارتفاع و زاویه شیب‌شکن سبب کاهش میزان استهلاک انرژی نسبی گردیده است که در میان پارامترها، پارامتر عمق بحرانی نسبی تاثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها داشت. شیب‌شکن مایل گابیونی در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده به جهت به کارگیری گابیون در سطح شیب‌دار سازه، میزان افزایش استهلاک انرژی نسبی چشمگیری داشته است که به دلیل خصوصیات فیزیکی گابیون و وجود جریان درون‌گذر و روگذر بوده است. از طرفی سازه گابیونی با عبور دادن جریان از خود سازه، با ایجاد تلاطم و گرفتاری جریان عبوری در این ناحیه سبب افزایش استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب‌شکن مایل ساده شده است. این میزان استهلاک منجر به کاهش هزینه ساخت و طول حوضچه آرامش، کاهش فرسایش بستر و جلوگیری از ایجاد گودال در پایین‌دست سازه خواهد شد. مشخص گردید که افزایش ارتفاع و زاویه شیب‌شکن در هر دو مدل تأثیر افزایشی بر میزان استهلاک انرژی دارد. با بررسی عمق نسبی پایین‌دست می‌توان بیان نمود که برای هر دو مدل شیب‌شکن مایل، عمق نسبی پایین‌دست با افزایش عمق بحرانی نسبی روندی صعودی دارد. همچنین برای نخستین بار با استفاده از ۸۰٪ درصد داده‌های آزمایشگاهی روابطی جهت تخمین استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین‌دست در شیب‌شکن مایل گابیونی

- [14] 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 Spillways, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(4) (2018) 101-110. (in Persian).
- [15] N. Rajaratnam, *Turbulent jets* (Vol. 5). , Elsevier, (1976).
- [16] W.H. Hager, R. Bremen, Classical hydraulic jump: sequent depths, *Journal of Hydraulic Research*, 27(5) (1989) 565-585.
- [17] R. Nasser, S.M. Kashefipour Dezfouli, The effect stepped spillway procity with gabion on weir energy dissipation and characteristics of downstream hydraulic jump, *Irrigation Sciences and Engineering*, (2019) .(in Persian).
- [18] R. Daneshfaraz, M.M. Asl, S. Razmi, R. Norouzi, J. Abraham, Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop, *International Journal of Environmental Science and Technology*, (2020) 1-10.
- [9] A. Azizi, M. Meftah Helaghi, M.K. Ziatabar ahmadi, S.H. Golmaei, Evaluating the affection of used material porosity on energy dissipation in gabion stepped weirs, *Journal of agricultural sciences and natural resources*, 15(1) (2008) -(in Persian).
- [10] M. Meftah halaghi, a. Azizi, a.A. Deghani, n. Alhoseini, Energy dissipation of gabion stepped weirs by using impermeable plates, *Journal of agricultural sciences and natural resources*, 16((special issue 2)) (2009) -(in Persian).
- [11] J. M. V. Samani, H. Riahi Madvar, S.A. Ayyoubzadeh, Experimental Investigation of Erosion and Sedimentation at Unequal Bed Level River Confluence, *Iran Water Resources Research*, 5(1) (2009) 58-68. (in Persian).
- [12] D. Wüthrich, H. Chanson, Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a Gabion stepped weir, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9) (2014) 04014046.
- [13] A. Nejati, M. Heydari, J. Sadeghiyan, R. Daneshfaraz, Numerical Model of Flow and Suspended Sediment Transport in the Reservoir of Rockfill Dam, *Iran Water Resources Research*, 14(2) (2018) 53-69. (in Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Daneshfaraz, M. Majedi Asl, M. Bagherzadeh , *Experimental Investigation of the Energy Dissipation and the Downstream Relative Depth of Pool in the Sloped Gabion Drop and the Sloped simple Drop*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 3665-3678.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18059.6751](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18059.6751)

