

## Experimental Analysis of Inclined Gabion Drop Behavior in Comparison to the Standard Stilling Basins (USBR)

RASOUL DANESHFARAZ<sup>1\*</sup>, MAHDI MAJEDI ASL<sup>1</sup>, MOHAMMAD BAGHERZADEH<sup>1</sup>

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

(Received: May. 19, 2020- Revised: July. 24, 2020- Accepted: July. 27, 2020)

### ABSTRACT

Controlling relative residual energy values, relative depth, and downstream Froude numbers are important issues faced by designers of inclined drop structures. In this study, 60 different experiments including three angles and two drop heights with subcritical flow at upstream were performed to investigate the effect of using gabion structure in inclined structure in comparison with using the stilling basin downstream of this structure. The results showed that for all experiments, increasing the relative critical depth increases the relative residual energy values and downstream relative depth. Relative energy values and relative downstream depth were significantly reduced when the gabion structure was used in inclined drop and the inclined gabion drop was constructed. The inclined gabion drop reduced the relative energy remained at downstream by 30, 33, 30, and 36 percent as compared to the standard type one, two, three and four stilling ponds, respectively. The average relative depth of downstream was also reduced 37, 40, 37 and 43% as compared to the standard type one, two, three and four stilling ponds, respectively. The range of Froude numbers reduced from 4.49-8.35 to 1.28-2.64. Also, some relationships were presented for estimating relative residual energy and relative depth at downstream of the gabion inclined drop structure.

**Keywords:** Additional Structures, Gabion Structure, Relative Critical Depth, Residual Energy, Stilling Basin.

## تحلیل آزمایشگاهی رفتار شیب شکن های مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه های آرامش استاندارد (USBR)

رسول دانشفراز<sup>\*</sup>، مهدی ماجدی اصل<sup>۱</sup>، محمد باقر زاده<sup>۱</sup>

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۳۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۶

### چکیده

کنترل مقادیر انرژی نسبی باقی مانده، عمق نسبی و عدد فرود پایین دست، جزو مسائل مهمی هستند که طراحان سازه های شیب شکن مایل با آن مواجه هستند. در این تحقیق ۶۰ آزمایش متفاوت شامل سه زاویه و دو ارتفاع شیب شکن با جریان زیر بحرانی در بالادست با هدف بررسی تاثیر بکارگیری سازه گابیونی در سازه شیب شکن مایل در مقایسه با استفاده از حوضچه آرامش در پایین دست این سازه انجام شد. نتایج نشان داد برای تمامی مدل های تحقیق حاضر، افزایش عمق بحرانی نسبی سبب افزایش مقادیر انرژی نسبی باقی مانده و عمق نسبی پایین دست می گردد. مقادیر انرژی نسبی باقی مانده و عمق نسبی پایین دست، هنگام بکارگیری سازه گابیونی در ساختمان شیب شکن مایل و ایجاد شیب شکن مایل گابیونی با کاهشی چشمگیر همراه بود. شیب شکن مایل گابیونی به ترتیب باعث کاهش ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ درصدی انرژی نسبی باقی مانده پایین دست در مقایسه با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار گردید. استفاده از شیب شکن مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار به ترتیب باعث کاهش ۳۷، ۴۰، ۳۷ و ۴۳ درصدی مقادیر متوسط عمق نسبی پایین دست شد و عدد فرود از بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ به بازه ۱/۲۸ الی ۲/۶۴ کاهش یافت. همچنین روابطی جهت تخمین انرژی نسبی باقی مانده و عمق نسبی پایین دست شیب شکن مایل گابیونی ارائه شد.

**واژه های کلیدی:** انرژی نسبی باقی مانده، سازه گابیونی، حوضچه آرامش، سازه های الحاقی، عمق بحرانی نسبی.

### مقدمه

یکی از مرسوم ترین سازه های هیدرولیکی مستهلک کننده انرژی شیب شکن ها می باشند که در زمینه های تصفیه آب، آبراهه های فرسایش پذیر، سیستم جمع آوری و دفع فاضلاب و شبکه آبیاری بکار گرفته می شود. ایجاد سازه شیب شکن در مسیر جریان عبوری از کانال باعث تغییر ناگهانی در عمق جریان می گردد که به سبب آن، انرژی جنبشی مخرب اضافی پدید می آید. این انرژی ایجاد شده باعث فرسایش دیواره و بستر کانال و تخریب سازه های پایین دست می شود. همواره طراحان جهت کاهش و کنترل انرژی مخرب اضافی شیب شکن ها از حوضچه های آرامش با قابلیت ایجاد پرش هیدرولیکی در آن استفاده نموده اند، از طرفی در طی سالیان اخیر استفاده از سازه های گابیونی به جهت اتلاف انرژی بالا و همچنین بکارگیری سازه های الحاقی در مهندسی هیدرولیک رواج یافته است.

Peterka (1958) در مطالعه ای آزمایشگاهی با ایجاد تغییرات مختلف بر روی پارامترهای دبی، اندازه، ارتفاع و فواصل موانع از یکدیگر بر روی یک مدل شیب شکن مانع دار علاوه بر بدست آوردن میزان استهلاک انرژی در هر آزمایش، سرعت

جریان را در هر حالت توسط ابزارهای آزمایشگاهی محاسبه کرد و پیشنهاداتی برای ضوابط طراحی ارائه نمود. Sholichin and Akib (2010) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر عدد شیب شکن برای تخمین پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب شکن قائم و مایل با سه زاویه و محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۱ تا ۰/۶ پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که عدد شیب شکن برای پیش بینی طول پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب شکن های قائم موثر بوده ولی برای شیب شکن مایل کاربرد ندارد. بنابراین توسعه معادله ای برای برآورد پرش هیدرولیکی در سازه های شیب شکن مایل مورد نیاز بود که با تجزیه و تحلیل روابط غیر مستقیم بر اساس معادلات ریاضی بدست آوردند. Moradi Sabz Koochi et al. (2011) به بررسی سه نوع شیب شکن رایج شامل قائم، مایل مستطیلی و پلکانی در دو ارتفاع، دو زاویه و دو عدد پله متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد که شیب شکن قائم و مایل به ترتیب بیشترین و کمترین استهلاک انرژی را دارا هستند. (Norouzi Sarkarabad et al. (2019) به بررسی استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن های مایل ناشی از بکارگیری صفحات مشبک قائم با روش ترکیبی شبکه عصبی-فازی تطبیق پذیر (ANN)

و تنش برشی رینولدزی با افزایش تخلخل سازه، کاهش می‌یابند. همچنین در سازه‌های با تخلخل  $47/5\%$ ، بیشترین کاهش سرعت در حدود  $45\%$  در مقایسه با سازه صلب می‌باشد. Meftah halaghi (2009) *et al.* استهلاک انرژی جریان در سرریزهای پلکانی توری سنگی را با به‌کارگیری صفحات نفوذناپذیر بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افت انرژی جریان درون‌گذر به مراتب از جریان روگذر کمتر است و بیشترین استهلاک انرژی در دبی  $13/5$  لیتر بر ثانیه، شیب پایین‌دست  $1:1$  و ارتفاع صفحه  $10$  سانتی‌متری،  $82/6\%$  درصد بوده است. (Mohamed (2010) در تحقیقی آزمایشگاهی جریان بر روی سرریز گابیونی را مورد مطالعه قرار داد. این محقق دریافت که نوع جریان از روی سرریز گابیونی با سرریز صلب متفاوت می‌باشد. جریان شامل دو قسمت، جریان از روی سرریز و دیگری از میان خلل و فرج سرریز گابیونی است و استفاده از معادلات سرریز صلب برای سرریز گابیونی باعث ایجاد خطا در محاسبه دبی می‌شود. همچنین معادلات رگرسیونی چندگانه برای پیش‌بینی دبی سرریز گابیونی در شرایط آزاد و مستغرق ارائه نمود. (Salmasi *et al.* (2011) با بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی جریان از روی سرریز گابیونی پله‌ای نشان دادند که در دبی‌های بالا که رژیم جریان غیر ریزشی یا شبه صاف اتفاق می‌افتد، استهلاک انرژی در سرریز گابیونی بیشتر است که این قضیه بایستی در طراحی مدنظر گرفته شود. همچنین مشاهده گردید که در دبی‌های بالا، جریان به دو بخش درون‌گذر و روگذر تقسیم می‌شود. افزایش بزرگی سنگدانه‌ها (افزایش تخلخل) و کاهش شیب سرریز نیز موجب افزایش استهلاک انرژی می‌شوند. (Wüthrich and Chanson (2014) در مطالعه‌ای دو سرریز پلکانی نفوذناپذیر و سرریز پلکانی گابیونی را مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که فعل و انفعالات میان جریان روگذر و درون‌گذر تابعی از شکل گابیون، دبی، رژیم جریان و الگوی چرخش می‌باشد. بخشی از جریان به‌صورت نشت از درون گابیون عبور می‌نماید که دلیل اصلی آن وجود تخلخل پله‌های گابیونی است و همچنین باعث کاهش مقدار دبی عبوری از روی پله‌ها می‌گردد. همچنین در رژیم روبه‌ای نرخ اتلاف انرژی سرریز پلکانی گابیونی نسبت به مدل نفوذناپذیر اندازه‌گیری شد و سرریز پلکانی گابیونی کمترین تاثیر را در استهلاک انرژی، به جز در دبی‌های کوچک دارد. (Nejati *et al.* (2018) به بررسی مدل عددی جریان و انتقال رسوبات معلق در مخزن سد پاره سنگی پرداختند. این محققین ابتدا براساس حل عددی معادلات سنت و نانت به روش حجم محدود و با رویکرد کاملاً ضمنی مشخصات جریان (سرعت و عمق) را محاسبه و سپس با استفاده از گسسته‌سازی معادله انتقال - پخش، میزان غلظت رسوبات در نقاط مختلف مخزن را

و ANFIS) پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک منجر به افزایش حداقل  $407$  و حداکثر  $903$  درصدی راندمان استهلاک انرژی نسبی کل، نسبت به شیب‌شکن مایل ساده شد. (Daneshfaraz *et al.* (2019a) با استفاده از بلوک در بستر با یک تنگ شدگی ناگهانی به بررسی استهلاک انرژی پرداختند. آنها نشان دادند که استهلاک انرژی در بستر با بلوک به مراتب بیشتر از بستر صاف با مقطع منشوری است. (Daneshfaraz *et al.* (2020a) با در نظر گرفتن شیب مثبت برای صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست نشان دادند که در نظر گرفتن شیب مثبت برای صفحات مشبک افقی در مقایسه با حالت بدون شیب، تاثیری بر استهلاک انرژی جریان ندارد. (Daneshfaraz *et al.* (2020b) با انجام  $108$  آزمایش متفاوت عملکرد صفحات مشبک افقی در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های مایل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول نسبی خیس شده صفحات مشبک، استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زاویه باعث کاهش متوسط راندمان استهلاک انرژی می‌شود.

به دلیل استهلاک انرژی کم سازه شیب‌شکن مایل نسبت به دیگر سازه‌های شیب‌شکن تحقیقات محدودی انجام شده است، از طرفی هدف اصلی احداث شیب‌شکن استهلاک انرژی است. به همین دلیل جهت کاهش انرژی نسبی باقی مانده می‌توان تلفیقی از شیب‌شکن مایل به همراه سازه گابیونی (تور سنگی) استفاده نمود. استفاده از سازه‌های گابیونی به دلیل کاهش هزینه‌های اجرایی، وجود مصالح ارزان و موجود در دسترس و همچنین ترکیب مناسب با محیط زیست رواج یافته است. وجود سازه گابیونی در مسیر جریان عبوری به علت تخلخل موجود مصالح باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش انرژی نسبی باقی‌مانده می‌شود.

(Azizi *et al.* (2008) به بررسی تاثیر تخلخل مصالح مورد استفاده بر افت انرژی جریان در سرریزهای پلکانی گابیونی پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که شیب پایین‌دست، کمتر از تخلخل بر افت انرژی جریان تاثیر می‌گذارد و با کاهش تخلخل، افت انرژی افزایش می‌یابد و همچنین از تخلخل  $38$  درصد به بالا، افت انرژی به شدت کاهش می‌یابد. (Chinnarasri *et al.* (2008) مشخصات هیدرولیکی سرریزهای پلکانی گابیونی را بررسی نمودند. این پژوهشگران نشان دادند که سرریز پلکانی گابیونی افت انرژی بیشتری نسبت به سرریز پلکانی ساده دارد. (Leu *et al.* (2008) مطالعه‌ای در زمینه جریان متلاطم در نزدیکی سازه‌های سنگریزه‌ای نصب شده در کف یک فلووم با شرایط جریان آزاد انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که سرعت جریان، شدت تلاطم

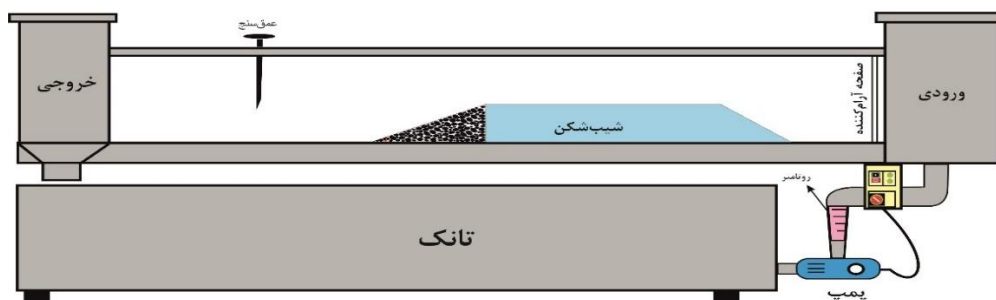
## مواد و روش‌ها

### شرح مدل و تجهیزات آزمایشگاهی

فلوم آزمایشگاهی بکار رفته در تحقیق حاضر، دارای طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر با کف و دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس شفاف می‌باشد. آب ورودی به فلوم از طریق دو عدد پمپ، هر یک با توان ۴۵۰ لیتر بر دقیقه تامین می‌گردید. در ابتدای مخزن یک صفحه آرام کننده جریان با روزهایی دایره‌ای شکل جهت جلوگیری از آشفتگی جریان قرار داده شده است. دبی جریان با استفاده از دو شیر متصل به دو روتامتر با خطای نسبی  $\pm 2\%$  درصد واقع در خروجی پمپ‌ها تنظیم می‌شد. همچنین عمق جریان توسط عمق سنج نقطه‌ای با دقت یک میلی‌متر در پنج نقطه از عرض کانال اندازه‌گیری می‌گردید. به دلیل تلاطم زیاد جریان روی وجه شیبدار سازه متخلخل و نبود امکانات و تجهیزات لازم آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری مناسب جریان در این ناحیه با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای، عمق در بالادست و پایین دست اندازه‌گیری شد و به تبع آن عدد فرود بالادست و پایین دست محاسبه و تاثیر بکارگیری گابیون کاملاً مشخص شد. از تلفیق باکس شیشه‌ای و باکس‌های شیبدار از جنس میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر در سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه، دو ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متری و هم‌عرض کانال (۰/۳ متر) برای ساخت مدل شیب‌شکن مایل گابیونی استفاده شد. جهت پر نمودن داخل باکس‌های شیبدار از دانه‌بندی با تخلخل ۵۰٪ (الک عبوری از  $1\frac{1}{2}$ " و مانده روی 1") استفاده و توسط تور فلزی پوشانده شد. در تحقیق حاضر برای هر مدل آزمایشگاهی تعداد ۱۰ دبی با محدوده ۱۵۰ الی ۸۰۰ لیتر بر دقیقه و در مجموع ۶۰ آزمایش متفاوت برای مدل شیب‌شکن مایل گابیونی جهت بررسی تاثیر استفاده از سازه گابیونی بر روی مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده، عمق نسبی و عدد فرود پایین دست و تعیین نوع حوضچه آرامش شیب‌شکن مایل گابیونی با جریان زیربحرانی در بالادست انجام شد. در شکل (۱) شماتیک نمای کلی جریان و تجهیزات آزمایشگاهی و در شکل (۲) نمایی از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارائه شده است.

تعیین کردند. (Aal et al. (2019) استهلاک انرژی و ضریب دبی سرریزهای گابیونی پلکانی را بررسی نمودند. آن‌ها پس از تجزیه و تحلیل ابعادی برای ارتباط پارامترهای مختلف موثر بر پدیده مورد نظر انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از ذرات بزرگ باعث افزایش استهلاک انرژی و ضریب دبی می‌شود و همچنین با افزایش ارتفاع دیواره پایه‌ها، ضریب دبی کاهش می‌یابد. (Shaker et al. (2019) تاثیر ارتفاع گابیون و درشتی مصالح در عمق جریان بالادست را با استفاده از چهار ارتفاع گابیون و چهار دانه‌بندی، مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل نتایج تجربی نشان داد وقتی که دبی و درشتی دانه‌بندی افزایش پیدا کند، کاهش نسبی در عمق جریان بین ۱۷ تا ۳۸ درصد برای نوع جریان درون گذر متغییر است. در رژیم جریان انتقالی، افزایش درشتی مصالح و دبی جریان باعث کاهش عمق جریان نسبی به ترتیب ۶/۶ درصد و ۴/۴ درصد برای ارتفاع گابیون ۱۵ سانتی‌متر و ۳۰ سانتی‌متر می‌شود. (Daneshfaraz et al. (2020c) به مطالعه آزمایشگاهی شیب‌شکن مایل گابیونی با سه زاویه و دو ارتفاع مختلف و مقایسه آن با شیب‌شکن مایل ساده پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که شیب‌شکن مایل گابیونی باعث افزایش راندمان استهلاک انرژی و عمق نسبی پایین‌دست در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده می‌گردد.

با بررسی تحقیقات انجام گرفته در زمینه شیب‌شکن‌های مایل و استفاده از سازه‌های الحاقی مشخص گردید که مطالعات محدودی صورت گرفته است. همواره ارائه روش‌هایی توسط طراحان برای افزایش راندمان استهلاک انرژی و کاهش انرژی نسبی باقی‌مانده در شیب‌شکن‌ها مورد توجه بوده است. با دقت بر این موضوع که تابه‌حال مطالعه‌ای در زمینه تغییر ساختمان سازه شیب‌شکن مایل مستطیلی توسط پژوهشگران حوزه هیدرولیک صورت پذیرفته است. به همین دلیل تحقیق حاضر برای نخستین بار استفاده از سازه گابیونی (تورسنگی) در ساختمان سازه شیب‌شکن مایل مستطیلی و تاثیر آن بر روی مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده، عمق نسبی و عدد فرود پایین‌دست و مقایسه نتایج حاصل شده با بکارگیری حوضچه آرامش در پایین‌دست را مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۱- طرح کلی از کانال آزمایشگاهی



شکل ۲- نمایی از مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر

با ساده سازی و تفکیک پارامترهای وابسته و مستقل، در بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن مایل می‌توان انرژی نسبی باقی‌مانده و عمق نسبی پایین‌دست را به صورت روابط (۳) و (۴) بیان نمود.

$$\frac{E_d}{E_u} = c_3 \left( \frac{y_c}{\Delta Z}, Fr_d, \theta \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{y_d}{\Delta Z} = c_4 \left( \frac{y_c}{\Delta Z}, Fr_d, \theta \right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه فوق:  $\frac{E_d}{E_u}, \frac{y_d}{\Delta Z}, \frac{y_c}{\Delta Z}, Fr_d, \theta$  به ترتیب زاویه شیب‌شکن مایل گابیونی، عدد فرود پایین‌دست، عمق بحرانی نسبی، عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده می‌باشند.

#### روابط مربوط به محاسبه استهلاک انرژی

برای محاسبه انرژی در بالادست شیب‌شکن مایل گابیونی از رابطه (۵) و برای محاسبه انرژی مخصوص پایین‌دست از رابطه (۶) استفاده گردید.

$$E_u = 1.5y_c + \Delta Z \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$E_d = y_d + \frac{q^2}{2gy_d^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن  $E_u$ : انرژی در بالادست شیب‌شکن،  $E_d$ : انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن،  $\Delta Z$ : ارتفاع شیب‌شکن،  $y_c$ : عمق بحرانی،  $y_d$ : عمق پایین‌دست شیب‌شکن،  $g$ : شتاب گرانش زمین و  $q$ : دبی واحد عرض می‌باشد.

#### معیارهای ارزیابی

در تحقیق حاضر، روابطی برای تخمین انرژی نسبی باقی‌مانده و عمق نسبی پایین‌دست ارائه گردید. بدین منظور، پارامتر وابسته مورد نظر به صورت تابعی از پارامترهای مستقل در نظر گرفته شد. برای به‌دست آوردن روابط ۷۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی به

#### آنالیز ابعادی

پارامترهای موثر در شیب‌شکن‌های مایل ساده و گابیونی را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای رابطه (۱) دانست.

(رابطه ۱)

$$c_1(Q, E_d, E_u, y_u, y_c, y_b, y_d, V, \Delta Z, \theta, n, \rho, \mu, g) = 0$$

که در آن  $Q$ : دبی جریان،  $E_u$ : انرژی در بالادست شیب‌شکن،  $E_d$ : انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن،  $y_u$ : عمق بالادست شیب‌شکن،  $y_c$ : عمق بحرانی،  $y_b$ : عمق لبه شیب‌شکن،  $y_d$ : عمق پایین‌دست شیب‌شکن،  $\Delta Z$ : ارتفاع شیب‌شکن،  $V$ : سرعت متوسط جریان،  $\theta$ : زاویه شیب‌شکن مایل،  $n$ : تخلخل دانه‌های سنگی،  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $\mu$ : لزوجت دینامیکی و  $g$ : شتاب گرانش زمین می‌باشد.

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

(رابطه ۲)

$$c_2 \left( \frac{E_d}{E_u}, \frac{E_u}{y_u}, \frac{\Delta Z}{y_u}, \frac{y_b}{y_u}, \frac{y_c}{y_u}, \frac{y_d}{y_u}, Fr_u, Fr_d, Re_u, n, \theta \right) = 0$$

در تمامی مدل‌ها برای شیب‌شکن مایل گابیونی از پارامترهای بی‌بعد  $n$  به جهت استفاده از یک نوع دانه‌بندی با تخلخل ۵۰٪ درصد و ثابت بودن نوع دانه‌بندی، عدد رینولدز بالادست  $Re_u$  به جهت متلاطم بودن جریان ( $Re_u \geq 2000$ )، پارامتر عمق نسبی لبه  $\frac{y_b}{y_c}$  به دلیل تغییرات بسیار کم و همچنین

پارامتر عدد فرود بالادست  $Fr_u$  به سبب تغییرات محدوده کم آن (۰/۹ الی ۰/۷) در تحقیق حاضر صرف نظر گردیدند (Nayebzadeh et al., 2019, Daneshfaraz et al., 2019b, 2019c, 2020d).

که این موضوع را (Salmasi et al. (2011) نیز در مطالعات خود گزارش کرده‌اند. جریان هنگام عبور از فضای متخلخل گابیون به علت وجود اصطکاک میان سنگدانه‌های مورد استفاده در سازه گابیونی دچار نوعی سایش و گرفتاری می‌گردد که در نتیجه آن انرژی نسبی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. افزایش مقدار دبی سبب ایجاد روندی صعودی برای انرژی نسبی باقی‌مانده در پی خواهد داشت و عمده دلیل این پدیده این است که در دبی‌های پایین نفوذ جریان به سازه گابیونی به صورت درون‌گذر بوده و با توجه به اینکه در دبی‌های بالا جریان به صورت روگذر تبدیل می‌شود و تاثیر زبری محیط متخلخل کمی کاهش می‌یابد. زاویه شیب‌شکن بر انرژی نسبی باقی‌مانده تاثیر خیلی کمی دارد، به همین دلیل در تحقیق حاضر به مقایسه متوسط کاهش انرژی نسبی باقی‌مانده سه زاویه شیب‌شکن مایل گابیونی نسبت به حوضچه‌های آرامش استاندارد پرداخته شد. شیب‌شکن مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه آرامش نوع یک، دو، سه و چهار به ترتیب باعث کاهش ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ درصدی انرژی نسبی باقی‌مانده پایین‌دست می‌گردد.

همچنین رابطه (۱۰) با استفاده از ۷۰٪ درصد داده‌های آزمایشگاهی، برای محاسبه انرژی نسبی باقی‌مانده پایین دست شیب‌شکن‌های مایل گابیونی ارائه شد. صحت‌سنجی رابطه با ۳۰٪ درصد باقی‌مانده داده‌ها با معیارهای ارزیابی انجام گرفت.

$$\frac{E_d}{E_u} = 0.914917 \left( \frac{y_c}{\Delta Z} \right)^{0.79093} (\theta)^{-0.0578} \quad (\text{رابطه } 10)$$

جهت بررسی مقادیر آزمایشگاهی انرژی نسبی باقی‌مانده شیب‌شکن مایل گابیونی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط شاخص‌های ارزیابی نشان داد که رابطه دارای ضریب تعیین آن  $R^2 = 0.9875$ ، خطای جذر میانگین مربعات  $RMSE = 0.9891$ ، متوسط خطای نسبی ۲/۸ درصد و حداکثر درصد خطای نسبی موجود ۷/۷ درصد می‌باشد. همچنین صحت‌سنجی و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر و مقادیر محاسباتی در شکل (۴) ارائه شده است.

#### عمق نسبی و عدد فرود پایین‌دست

بر اساس آنالیز ابعادی صورت گرفته، عمق نسبی پایین‌دست تابعی از عمق بحرانی نسبی، زاویه شیب‌شکن و عدد فرود می‌باشد. در شکل (۵) تغییرات عمق نسبی شیب‌شکن مایل گابیونی و انواع حوضچه آرامش در مقابل عمق بحرانی نسبی ارائه شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص می‌گردد که در تمامی مدل‌ها برای شیب‌شکن مایل گابیونی و انواع حوضچه آرامش عمق نسبی

صورت تصادفی انتخاب و به عنوان ورودی استفاده شدند که با بهره‌گیری از دستور Solver در برنامه اکسل به صورت سعی و خطا نیز ضرایب و توان هریک به دست آمدند. همچنین از ۳۰ درصد باقی‌مانده از داده‌ها برای صحت‌سنجی معادلات بدست آمده استفاده شد و از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی  $R^2$ ، خطای جذر میانگین مربعات RMSE و  $E_{Relative\ error}$  جهت ارزیابی روابط بهره گرفته شد.

(رابطه ۷)

$$R^2 = \left( \frac{(N \sum M_{exp} M_{cal}) - (\sum M_{exp})(\sum M_{cal})}{\sqrt{N(\sum M_{exp}^2) - (\sum M_{exp})^2} \sqrt{N(\sum M_{cal}^2) - (\sum M_{cal})^2}} \right)^2 \quad (\text{رابطه } 8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (M_{exp} - M_{cal})^2} \quad (\text{رابطه } 9)$$

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

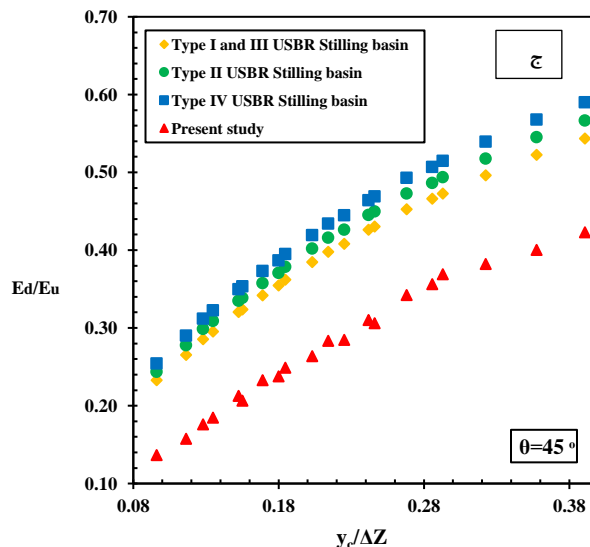
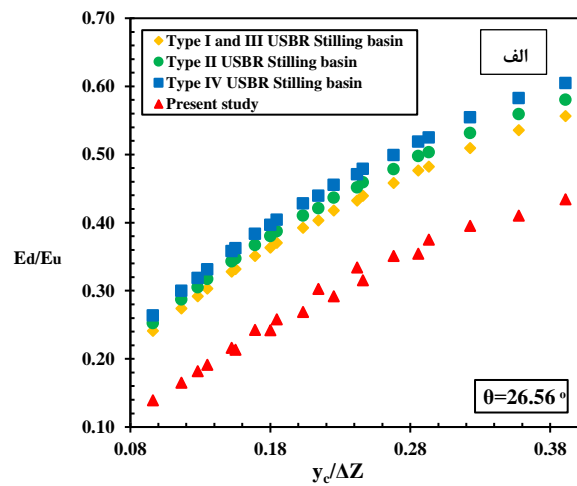
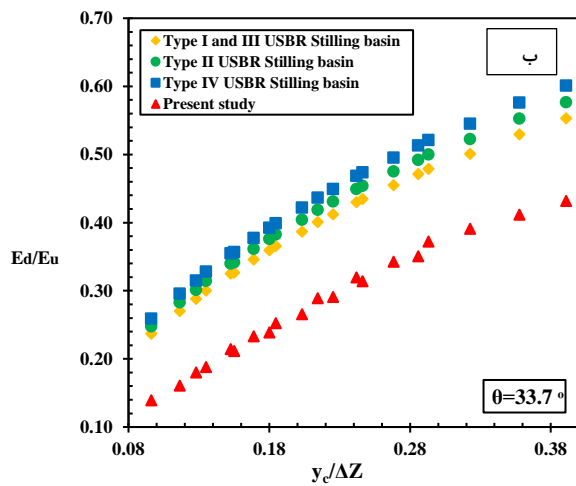
## بحث و نتایج

### انرژی نسبی باقی‌مانده

در شکل (۳) مقایسه نتایج تغییرات انرژی نسبی باقی‌مانده در مقابل عمق بحرانی نسبی برای سه زاویه شیب‌شکن حاصل از تحقیق حاضر و شیب‌شکن مایل مجهز به حوضچه‌های آرامش ارائه شده است. با توجه به شکل‌ها ملاحظه گردید که تمامی مدل‌های بررسی شده دارای رفتاری مشابه هم می‌باشند. در تمامی زاویای مورد بررسی با افزایش عمق بحرانی نسبی، مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده نیز افزایش می‌یابد. استفاده و بهره‌گرفتن از سازه گابیونی در ساختمان شیب‌شکن مایل به نسبت شیب‌شکن مایل ساده مجهز به حوضچه‌های آرامش سبب کاهش چشمگیر مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده گردیده است که نمود این کاهش برای عمق‌های بحرانی بالا واضح‌تر می‌باشد. با افزایش ارتفاع شیب‌شکن پارامتر عمق بحرانی نسبی به ازای یک دبی ثابت کاهش می‌یابد و از طرفی عمق بحرانی نسبی با انرژی نسبی باقی‌مانده رابطه مستقیمی دارد، در نتیجه در یک دبی ثابت انرژی نسبی باقی‌مانده با افزایش ارتفاع شیب‌شکن کاهش می‌یابد. در شیب‌شکن مایل گابیونی، مقادیر انرژی نسبی باقی‌مانده با کاهش زاویه شیب‌شکن، افزایش خواهد یافت و نوع جریان با تغییر دادن دبی متفاوت می‌گردد به نحوی که در دبی‌های بالا جریان به صورت روگذر و در دبی‌های پایین به صورت درون‌گذر می‌باشد

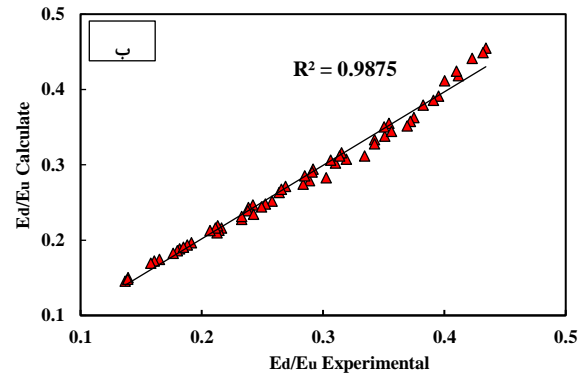
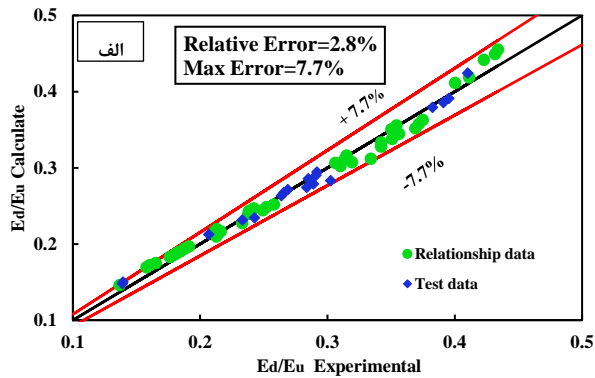
این کاهش شیب کاملاً مشهود است. سازه گابیونی با اثری که بر عملکرد، رفتار و خصوصیت جریان می‌گذارد باعث گرفتاری جریان شده و در نتیجه عمق نسبی کمی شاهد خواهیم بود. برای تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه‌های آرامش نیاز به عمق پایاب و در نظر گرفتن تمهیداتی همچون استفاده از آب پایه، افزایش یا کاهش تراز کف حوضچه و غیره می‌باشد این در حالی است که با استفاده از شیب‌شکن مایل گابیونی در دبی‌های پایین با تشکیل پرش‌های هیدرولیکی ضعیف، جریان زیر بحرانی می‌گردد. متوسط عمق نسبی پایین‌دست سه زاویه شیب‌شکن مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار به ترتیب باعث کاهش ۳۷، ۴۰، ۳۷ و ۴۳ درصدی مقادیر عمق نسبی پایین‌دست می‌گردد. این موضوع می‌تواند در طراحی اقتصادی حوضچه‌های آرامش مد نظر طراحان و مشاورین باشد.

پایین‌دست با عمق بحرانی نسبی رابطه‌ای مستقیم داشته و با افزایش عمق بحرانی نسبی، بر مقادیر عمق نسبی پایین‌دست نیز افزوده می‌گردد. در شکل‌های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) مشخص است که عمق نسبی پایین‌دست برای سه زاویه مورد بررسی شیب‌شکن مایل گابیونی به نسبت انواع حوضچه‌های آرامش دارای مقادیر بسیار کمتری می‌باشد و عمق نسبی پایین‌دست کاهش چشمگیر داشته است و افزایش زاویه شیب‌شکن مایل گابیونی، عمق نسبی پایین‌دست را کاهش می‌دهد. با دقت در نتایج ملاحظه می‌گردد با اینکه عمق نسبی پایین‌دست در کل مدل‌های تحقیق حاضر روندی صعودی دارد ولی افزایش این پارامتر برای شیب‌شکن مایل گابیونی با شیب کمتری در مقایسه با انواع حوضچه‌های آرامش رخ داده است. بکارگیری سازه متخلخل در قسمت مایل سازه شیب‌شکن و نقش استفاده از سازه گابیونی در

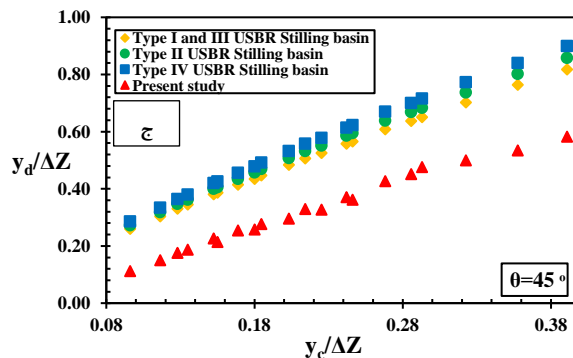
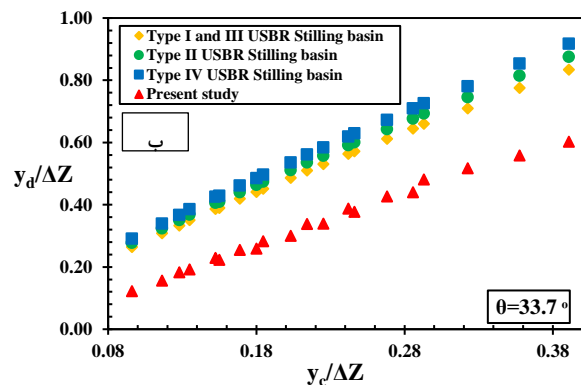
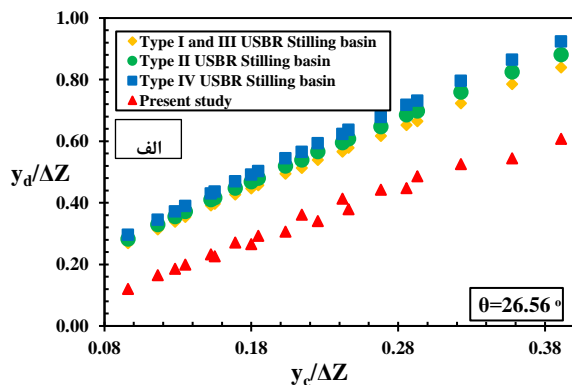


شکل ۳- تغییرات انرژی نسبی باقی‌مانده در مقابل عمق بحرانی نسبی





شکل ۴- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $E_d/E_u$  با مقادیر محاسباتی (الف) درصد خطای نسبی (ب) ضریب همبستگی



شکل ۵- تغییرات عمق نسبی پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی

داده‌ها به صحت سنجی و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر با مقادیر محاسباتی مطابق شکل (۶) پرداخته شد.

#### عدد فرود پایین دست

شکل (۷)، بررسی تغییرات عدد فرود پایین دست به ازای عمق بحرانی نسبی برای شیب‌شکن مایل گابیونی به نسبت شیب‌شکن مایل ساده در سه زاویه مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های (۷-الف)، (۷-ب) و (۷-ج) مشاهده می‌گردد مقادیر عدد فرود پایین دست برای شیب‌شکن مایل ساده با افزایش عمق بحرانی نسبی روندی کاهشی دارد و به عبارت دیگر با افزایش دبی جریان، مقدار عدد فرود پایین دست کاهش می‌یابد. این در حالی است که با دقت به شکل‌ها می‌توان بیان نمود که در تمامی مدل‌ها عدد فرود پایین دست برای شیب‌شکن مایل گابیونی تقریباً

همچنین برای تخمین عمق نسبی پایین دست شیب‌شکن‌های مایل گابیونی رابطه (۱۱) ارائه شد.

(رابطه ۱۱)

$$\frac{Y_d}{\Delta Z} = 1.47301 \left( \frac{y_c}{\Delta Z} \right)^{0.701093} (\theta)^{-0.04696} - 0.17779$$

جهت بررسی مقادیر آزمایشگاهی عمق نسبی پایین دست شیب‌شکن مایل گابیونی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط معیارهای ارزیابی نشان داد که رابطه دارای ضریب تعیین آن  $R^2 = 0.9929$ ، خطای جذر میانگین مربعات  $RMSE = 1/19$ ، متوسط خطای نسبی ۲/۷ درصد و حداکثر درصد خطای نسبی موجود ۶/۸ درصد می‌باشد. همچنین با استفاده از ۷۰٪ درصد داده‌های آزمایشگاهی جهت ارائه رابطه و ۳۰٪ درصد باقی‌مانده

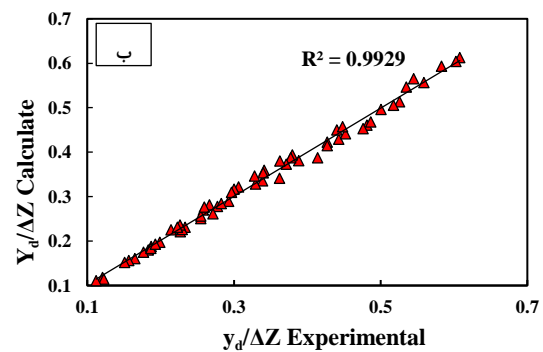
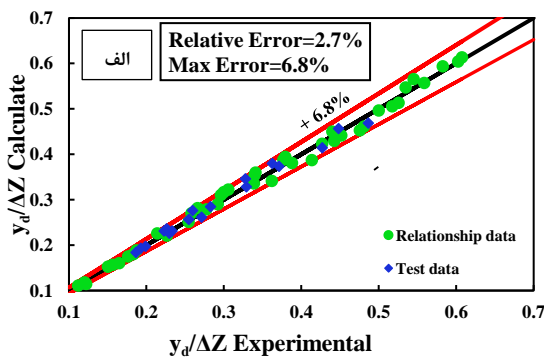


۵۸/۳۹ سانتی‌متر کاهش یافت.

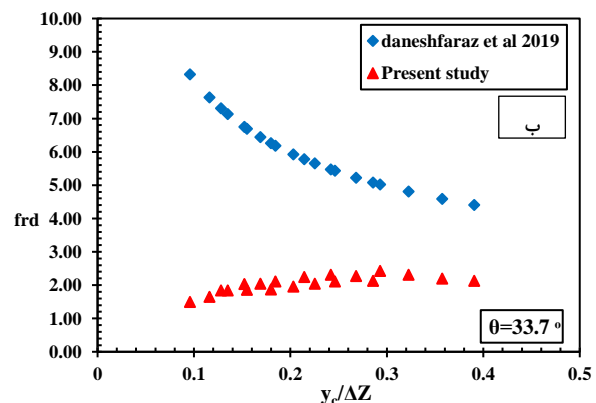
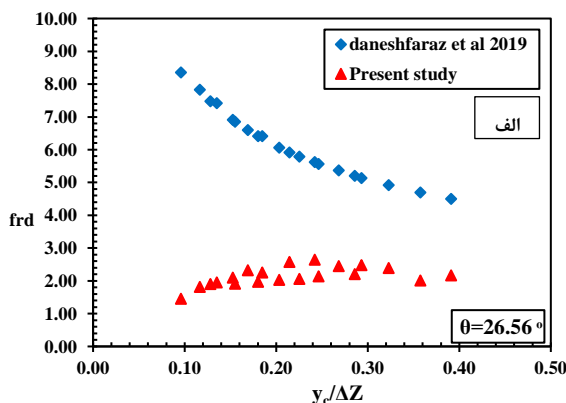
$$L_j = 6y_2 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

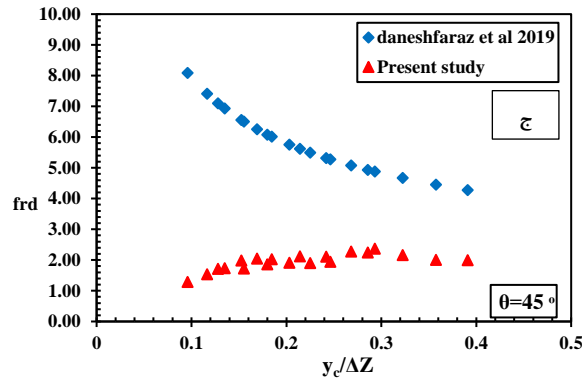
به لحاظ اینکه برای شیب‌شکن مایل ساده در دو ارتفاع و سه زاویه شیب‌شکن بازه عدد فرود پایین‌دست از ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ و طول پرش هیدرولیکی از محدوده ۴۰/۰۲ الی ۶۸/۸۷ سانتی‌متر می‌باشد، از این رو به منظور استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن مایل ساده با محدوده اعداد یاد شده، معمولاً حوضچه آرامش نوع ۲ و نوع ۳ پیشنهاد می‌شود. در مطالعه حاضر برای شیب‌شکن مایل گابیونی عدد فرود و طول پرش هیدرولیکی به ترتیب بازه ۱/۲۸ الی ۲/۶۴ و محدوده ۱۵/۶۸ الی ۵۸/۳۹ به‌دست آمده است، لذا توصیه می‌گردد که با توجه به اینکه عدد فرود و طول پرش هیدرولیکی کاهش پیدا کرده است می‌توان حوضچه آرامش نوع ۲ یا ۳ را با ابعادی کمتر و اقتصادی‌تر اجرا کرد.

روندی افزایشی و همراه با تغییرات کمی همراه می‌باشد. مشاهده می‌شود برای تمامی مدل‌های آزمایشگاهی عدد فرود پایین‌دست شیب‌شکن مایل گابیونی در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده با کاهشی چشمگیر همراه است. با توجه به شکل‌ها ملاحظه می‌گردد که با کاهش زاویه شیب‌شکن برای مدل آزمایشگاهی شیب‌شکن مایل گابیونی، عدد فرود پایین‌دست افزایش یافته است. بکارگیری سازه گابیونی در قسمت مایل سازه شیب‌شکن در سه زاویه مورد بررسی سبب گردیده که بازه عدد فرود از ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ به بازه ۱/۲۸ الی ۲/۶۴ نسبت به شیب‌شکن مایل ساده کاهش پیدا کرده است، به نحوی که میزان کاهش عدد فرود برای زوایای شیب‌شکن ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه به ترتیب و به‌طور متوسط برابر ۶۳/۷۴، ۶۴/۴۶ و ۶۵/۰۹ درصد به‌دست آمد. همچنین با استفاده از رابطه پترکا، رابطه (۱۲) طول پرش هیدرولیکی کلاسیک محاسبه شد. مقادیر طول پرش هیدرولیکی از محدوده ۴۰/۰۲ الی ۶۸/۸۷ سانتی‌متر به محدوده ۱۵/۶۸ الی



شکل ۶- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $y_d/\Delta Z$  با مقادیر محاسباتی الف) درصد خطای نسبی ب) ضریب همبستگی





شکل ۷. تغییرات عدد فرود پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای انرژی نسبی باقی مانده، عمق نسبی و عدد فرود پایین دست شیب شکن مایل گابیونی در سه زاویه و دو ارتفاع شیب شکن و در مجموع ۶۰ آزمایش متفاوت پرداخته شد و نتایج به دست آمده از شیب شکن مایل گابیونی با نتایج حاصل از به کارگیری حوضچه های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

در تمامی مدل های مورد بررسی با افزایش عمق بحرانی نسبی، مقادیر انرژی نسبی باقی مانده و عمق نسبی پایین دست افزایش می یابد.

استفاده از سازه گابیونی در ساختمان شیب شکن مایل و ایجاد شیب شکن مایل گابیونی در مقایسه با شیب شکن مایل ساده مجهز به حوضچه های آرامش سبب کاهش چشمگیر مقادیر انرژی نسبی باقی مانده و عمق نسبی پایین دست گردیده است.

به ازای یک دبی ثابت، با افزایش ارتفاع شیب شکن پارامتر عمق بحرانی نسبی کاهش می یابد و افزایش زاویه شیب شکن مایل گابیونی، پارامترهای انرژی نسبی باقی مانده و عمق نسبی پایین دست کاهش می یابند.

شیب شکن مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه آرامش نوع

یک، دو، سه و چهار به ترتیب باعث کاهش ۳۰، ۳۳، ۳۰ و ۳۶ درصدی انرژی نسبی باقی مانده پایین دست می گردد.

متوسط عمق نسبی پایین دست سه زاویه شیب شکن مایل گابیونی در مقایسه با حوضچه های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار به ترتیب باعث کاهش ۳۷، ۴۰، ۳۷ و ۴۳ درصدی مقادیر عمق نسبی پایین دست می گردد.

برای تمامی مدل های آزمایشگاهی عدد فرود پایین دست شیب شکن مایل گابیونی در مقایسه با شیب شکن مایل ساده با کاهشی چشمگیر همراه است که استفاده از سازه گابیونی عدد فرود شیب شکن مایل ساده با بازه ۴/۴۹ الی ۸/۳۵ را به بازه ۱/۲۸ الی ۲/۶۴ کاهش داده است.

با توجه به طول پرش هیدرولیکی و بازه عدد فرود تحقیق حاضر، کاهشی قابل توجه داشته است لذا می توان حوضچه آرامش نوع ۲ یا ۳ را با ابعادی کمتر و اقتصادی تر طراحی و اجرا نمود.

روابطی برای تخمین پارامترهای انرژی نسبی باقی مانده، عمق نسبی پایین دست در شیب شکن مایل گابیونی با معیارهای ارزیابی ارائه شد. روابط با استفاده از ۷۰ درصد داده های آزمایشگاهی ارائه شد و با ۳۰ درصد داده های باقی مانده به تست روابط با معیارهای ارزیابی قابل قبول پرداخته شد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Aal, G. M. A., Fahmy, M. R., Elnikhely, E. A., & El-Tohamy, E. (2019). Energy dissipation and discharge coefficient over stepped gabion and buttress gabion spillway. *Technology*, 10(4), 260-267.
- Azizi, A., Meftah, H. M., Ziatabar, A. M., & Golmae, S. (2008). Evaluating the Affection of Used Material Porosity on Energy Dissipation in Gabion Stepped Weirs. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(1), (In Farsi)
- Chinnarasri, C., Donjadee, S., & Israngkura, U. (2008). Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8), 1147-1152.
- Daneshfaraz, R., Mirzaee, R., ghaderi, A., Majedi Asl, M. (2019). The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin, *AUT Journal of Civil Engineering*, (), pp. -. doi: 10.22060/ajce.2019.16427.5586
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Hasanniya, V. (2019b).

- Experimental Investigation of Energy Dissipation in Vertical Drops Equipped with a Horizontal Screen under Supercritical Flow, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1421-1436.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Mirzaeereza, R. (2019c). Experimental Study of Expanding Effect and Sand-Roughened Bed on Hydraulic Jump Characteristics, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), pp. 885-896. (In Farsi).
- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R., Bazayar, A. (2020a). Experimental investigating effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2499-2509.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Bazayar, A. (2020b). Experimental investigation of the effect of the horizontal Screen on the energy dissipation in inclined drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2), pp. 441-453. doi: 10.22059/ijswr.2019.288653.668312
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Bagherzadeh, M. (2020c). Experimental Investigation of the Energy Dissipation and the Downstream Relative Depth of Pool in the Sloped Gabion Drop and the Sloped simple Drop. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (), -. doi: 10.22060/ceej.2020.18059.6751
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R., & Abraham, J. (2020d). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17 (5), 2927-2936.
- Leu, J. M., Chan, H. C., & Chu, M. S. (2008). Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6), 331-337.
- Meftah Halaghi, M., Azizi, A., Dehghani, A. A., & Alhoseini, N. (2009). Energy Dissipation Of Gabion Stepped Weirs By Using Impermeable Plates. *Journal Of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 16(Special Issue 2), -(In Farsi)
- Moradi Sabz Koochi, S. Kashefipour, S.M. & M. Bina. (2011). Experimental Comparison of Energy Dissipation on Drop Structures. *Journal of Water and Soil Science*, 15(56), 209-223. (In Farsi)
- Mohamed, H. I. (2010). Flow over gabion weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136(8), 573-577.
- Nayebzadeh, B., Lotfollahi-yaghin, M.A. and Daneshfaraz, R., 2019. Experimental study of energy dissipation at a vertical drop equipped with vertical screen with gradually expanding at the downstream. *AUT Journal of Civil Engineering*.
- Nejati, A., Heydari, M., Sadeghiyan, J., Daneshfaraz, R. (2018). Numerical Model of Flow and Suspended Sediment Transport in the Reservoir of Rockfill Dam. *Iran Water Resources Research*, 14(2), 53-69. (In Farsi)
- Norouzi Sarkarabad, R., Daneshfaraz, R., Bazayar, A. (2019). 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*, (), -. doi: 10.22060/ceej.2019.16694.6305. (In Farsi)
- Peterka, A. J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters engineering monograph No. 25. *US Bureau of Reclamation, Denver Colorado*.
- Salmasi, F., Farsadzade, D., Mohit, H. (2011). Experimental Evaluation of Energy Dissipation over Gabion Stepped Spillway. *Water and Soil Science*, 21(4), 152-164. (In Farsi)
- Sholichin, M., & Akib, S. (2010). Development of drop number performance for estimate hydraulic jump on vertical and sloped drop structure. *International Journal of Physical Sciences*, 5(11), 1678-1687.
- Shaker A. Jalil, Sarhan A. Sarhan, Bshkoj S. Hussein, Jihan M. Qasim. (2019). Effect of Gravel Size and Weir Height on Flow Properties of Gabions. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 27(2).
- Wüthrich, D., & Chanson, H. (2014). Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a Gabion stepped weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9), 04014046.