



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پژوهش‌های آب‌نخورداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

بررسی آزمایشگاهی همکنش آبی جریان و پدیده اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی

کیوان کاظمی‌حسنوند^۱، حجت‌اله یونسی^۲، امیرحمزه حق‌آبی^۳، رسول دانشفراز^۴، بابک شاهی‌نژاد^۵

- ۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
- ۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
- ۳- استاد گروه سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
- ۴- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
- ۵- استادیار گروه سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، به‌عنوان یکی از سازه‌های نوین آبی به‌طور گسترده در طرح‌های آبخیزداری و عملیات سازه‌ای، کاربرد دارد. این سازه ترکیبی از واحدهای توری‌سنگی نفوذپذیر است که با ایجاد اختلاف تراز آبی میان بالادست و پایین‌دست، سبب کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود. عبور جریان از حفرات متخلخل سازه، شدت تنش‌های برشی بستر را کاهش و اوج آب‌دهی‌های لحظه‌ای را تعدیل می‌کند، در نتیجه نرخ فرسایش آبراه‌های کاهش می‌یابد. با توجه به محدودیت پژوهش‌های پیشین در مقایسه کارایی سازه‌های توری‌سنگی و ساده، در این پژوهش با رویکرد آزمایشگاهی رفتار جریان و اندازه اتلاف انرژی، و تحلیل تفاوت‌های کارکردی آن‌ها در مدیریت سیلاب و مهار فرسایش موضعی بررسی شد. اهمیت این سازه‌ها در بستر رودهای ناپایدار و محیط‌های آسیب‌پذیر جریان فوق بحرانی، در ارتقای پایداری آبی و زیست‌محیطی سامانه‌ها دوچندان است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه لرستان، در بازه زمانی سال‌های ۱۴۰۳ تا ۱۴۰۴، در فلومی با طول ۱۱ متر، عرض ۰/۶ متر و بلندی ۰/۵ متر انجام شد. به‌منظور تحلیل جامع رفتار آبی، در مجموع تعداد ۶۰ آزمایش روی دو گونه سازه شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی طراحی و اجرا شد. در این آزمایش‌ها سه ضخامت سازه‌ای (X_g) در اندازه ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، در ترکیب با پنج آب‌دهی جریان در اندازه ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، برای نمونه شاهد سازه، بررسی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: yonesi.h@lu.ac.ir

استناد: کاظمی‌حسنوند، ک.، یونسی، ح.، حق‌آبی، ا. ح.، دانشفراز، ر.، شاهی‌نژاد، ب. ۱۴۰۵. بررسی آزمایشگاهی همکنش آبی جریان و پدیده اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۴۵-۶۳.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2026.371743.1653

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۴۵ تا ۶۳.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



افزون بر این، در نمونه‌های توری‌سنگی، سه اندازه تخلخل مؤثر ۳۰، ۳۵ و ۴۰٪ با بهره‌گیری از سه دسته مصالح سنگریزه با ابعاد ریزدانه، میان‌دانه و درشت‌دانه که به ترتیب قطر میانگین (d_{50}) آنها برابر با ۲۱، ۳۰/۵ و ۴۲ میلی‌متر بود، به کار گرفته شد. همچنین، در تمام مدل‌ها بلندی سازه در اندازه ۳۲ سانتی‌متر ثابت در نظر گرفته شد تا بتوان شرایط را با یکدیگر مقایسه کرد.

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های به دست آمده نشان داد که در تمام مدل‌ها، رابطه میان سنجۀ اتلاف انرژی جریان و ژرفای بحرانی نسبی معکوس بود؛ به طوری که با افزایش راندمان اتلاف انرژی، ژرفای بحرانی نسبی کاهش یافت و این روند در تمام سناریوهای آزمایشی مشاهده شد. یافته‌ها نشان داد که ترکیب شیب‌شکن با بستر توری‌سنگی موجب افزایش چشمگیر راندمان اتلاف انرژی جریان (۶۰٪) در مقایسه با شیب‌شکن ساده شد. جریان عبوری از مدل‌های توری‌سنگی به دو حالت روگذر و درون‌گذر تفکیک شد که در حالت درون‌گذر، جریان شبه‌غیرداری و غیرخطی از محیط متخلخل عبور کرد و سهم اصلی اتلاف انرژی مربوط به این وضعیت بود. افزون بر این، افزایش اندازه ذرات هسته توری‌سنگی و عرض مؤثر سازه موجب افزایش فرآیند اتلاف انرژی شد. سرانجام، اندازه‌های آبدی روگذر و درون‌گذر برای تمام سناریوها محاسبه شد که می‌توان از این داده‌ها به عنوان الگوی ارزشمندی برای مدل‌سازی آبی و بهبود طراحی سازه‌های مشابه بهره برد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، همکنش آبی جریان و اتلاف انرژی در دو گونه سازه شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی به شکل آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که می‌توان با کاربرد گونه توری‌سنگی و با ایجاد محیطی متخلخل و نفوذپذیر، انرژی جریان را کاهش داد، در نتیجه نیاز به سازه‌های الحاقی مانند حوضچه‌های آرامش و صفحات مشبک نیز کاهش خواهد یافت. افزون بر این، اثر سنجه‌هایی مانند اندازه ذرات سنگدانه، تخلخل توری‌سنگی و ضخامت سازه بر کارایی اتلاف انرژی و سهم آبدی‌های درون‌گذر و روگذر قابل توجه بود. یافته‌ها بیانگر آن بود که استفاده از شیب‌شکن قائم توری‌سنگی در طرح‌های انتقال آب در مناطق شیب‌دار و کوهستانی، از دیدگاه فنی و اقتصادی کارآمدتر و پایدارتر از نمونه ساده است. افزون بر این، از نتایج این پژوهش می‌توان در بهبود طراحی شیب‌شکن‌های توری‌سنگی در طرح‌های آبخیزداری بهره برد.

واژگان کلیدی

آبدی درون‌گذر، آبدی روگذر، جریان آشفته، ژرفای بحرانی، مدل فیزیکی، مقاومت آبی

مقدمه

عمدتاً ناشی از تمرکز تنش‌های برشی، افزایش آشفستگی جریان و تشکیل گردابه‌ها در ناحیه برخورد جریان با سازه است. نتایج پژوهش‌های پیشین بیانگر آن است که این نوع آبشستگی در شرایط جریان فوق بحرانی و اندازه‌های زیاد عدد فرود، تشدید می‌شود و تحت تأثیر عامل‌هایی مانند شدت و ژرفای جریان و ویژگی‌های مصالح بستر، است. با این حال، وابستگی راهکارهای ارائه‌شده در پژوهش‌های گذشته به شرایط آزمایشگاهی خاص، سبب ایجاد محدودیت‌هایی در

شیب‌شکن‌های قائم توری‌سنگی از سازه‌های مهم مهندسی آب به شمار می‌آیند که با کاهش انرژی جریان، مهار آشفستگی، جلوگیری از فرسایش بستر و تثبیت آبراهه‌ها، در پایداری رودها و طرح‌های آبخیزداری نقش اساسی دارند. با وجود کارایی زیاد این سازه‌ها در کاهش انرژی جریان، آبشستگی موضعی در پای سازه همچنان یکی از چالش‌های اصلی است که به شکل حفره‌هایی با ژرفا و طول مشخص در پایین‌دست ظاهر می‌شود؛ این پدیده

کارایی و قابلیت تعمیم آن‌ها شده است. اگرچه کارایی کلی شیب‌شکن‌های قائم در پژوهش‌های مختلف بررسی شده، اما نقش سازه‌های قائم توری‌سنگی در اتلاف انرژی جریان و اثر همزمان شرایط آبی بر رفتار همکنشی جریان-سازه، به‌ویژه در شرایط فوق بحرانی، کمتر به‌شکل نظام‌مند بررسی شده است. نتایج پژوهش‌های مرتبط با ترکیب شیب‌شکن‌های قائم با سازه‌های الحاقی مانند حوضچه‌های آرامش و موانع تلف‌کننده جریان نشان داده‌اند که این ترکیبات بازدهی انرژی و پایداری سازه را افزایش داده‌اند. سازه‌های توری‌سنگی، با تخلخل زیاد و قابلیت عبور جریان، افزون بر بهبود اتلاف انرژی، فشار ایستایی را کاهش داده و پایداری موضعی را بهبود می‌بخشند، و ترکیب آن‌ها با سازه‌های آبی رویکردی مؤثر در مدیریت جریان و مهار انرژی مازاد است.

نخستین بار بختمف (۱۹۳۲) جریان عبوری از سازه شیب‌شکن قائم را با جریان زیر بحرانی در بالادست سازه را بررسی کرد. این پژوهشگر با فرض توزیع ایستابی فشار و توزیع یکنواخت سرعت، رابطه ۱ را با در نظر گرفتن یک حجم مهارشده مشخص و با استفاده از معادله انرژی ارائه داد.

$$V_1 = C\sqrt{2g(E_0 - y_1)} \quad (1)$$

پیراس و همکاران (۱۹۹۲) به‌منظور محاسبه اتلاف انرژی جریان از روی سازه و تعیین ابعاد هندسی حوضچه، مدل سرریزهای توری‌سنگی پلکانی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بندهای توری‌سنگی پلکانی می‌توانند تا ۳ مترمکعب در ثانیه آبدی را تحمل کنند. از سوی دیگر، مشاهده کردند که با ریختن یک لایه بتن روی پله‌ها و معکوس کردن شیب، اتلاف انرژی افزایش یافت. نتایج بررسی آزمایشگاهی جریان در استخر زیر جت در حال سقوط به‌وسیله راجارتنام و چمنی (۱۹۹۵) نشان داد تلاطم جریان در استخر عامل اصلی اتلاف انرژی در سازه‌های شیب‌شکن قائم است. این پژوهشگران با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی خود و داده‌های مور (۱۹۴۳) و رند (۱۹۵۵)، روابطی را برای پیش‌بینی ژرفای استخر و اندازه اتلاف انرژی ارائه دادند. به‌رغم ارزشمند بودن نتایج پژوهش نامبرده عمدتاً سازه‌های ساده و شرایط

آبی محدود بررسی شده و اثر تخلخل مصالح توری‌سنگی، همکنش هم‌زمان جریان و سازه نفوذپذیر، و تغییرات شرایط جریان در تحلیل اتلاف انرژی لحاظ نشده است؛ ازاین‌رو، بررسی آزمایشگاهی رفتار آبی و اتلاف انرژی در شیب‌شکن‌های قائم توری‌سنگی به منزله یک خلأ پژوهشی مطرح است. اسن و همکاران (۲۰۰۴) با در نظر گرفتن یک پله با ابعاد مربعی با نسبت محدوده بلندی نسبی پله به بلندی شیب‌شکن ۰/۱۱ تا ۰/۶۱ در پایاب سازه شیب‌شکن قائم و چسبیده به آن در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم، اتلاف انرژی کل جریان را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش بلندی پله، اتلاف انرژی و ژرفای پایین‌دست شیب‌شکن قائم نیز افزایش یافت. باگلیارا و چیواچینی (۲۰۰۶) کاهش انرژی روی شیب‌های نسبتاً کم سنگی را بررسی کردند و دریافتند با افزایش اندازه زبری، مقاومت جریان زیاد و کاهش انرژی نیز افزایش یافت. elasوند و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D جریان در شیب‌شکن‌های پله‌ای توری‌سنگی را بررسی کردند و نشان دادند که هندسه پله‌ها و زبری سطح، بر توزیع انرژی و ایجاد گردابه‌ها تأثیر قابل توجهی دارد. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش آبدی، وضعیت جریان از ناپه به روگذر تغییر یافت و اندازه اتلاف انرژی نیز وابسته به نرخ جریان و ابعاد پله‌ها بود. وسریچ و چنسون (۲۰۱۴) با بررسی سرریزهای پلکانی توری‌سنگی دریافتند که در این سرریزها رابطه میان جریان درون‌گذر و روگذر تابعی از آبدی، شکل توری‌سنگی، وضعیت جریان و الگوی چرخش است. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن چهار اندازه بلندی شیب‌شکن و سه اندازه شیب (دو، چهار و شش درصد) آزمایش‌هایی بر اساس شیب بالادست انجام دادند و دریافتند که با افزایش شیب بالادست شیب‌شکن، ژرفای آب درون استخر، زاویه برخورد جت، ژرفای لبه، ژرفای پایین‌دست و اتلاف انرژی کاهش یافت. یارمحمدی و احدیان (۲۰۱۶) اثر دیواره‌های پاراپت با و بدون شیب را بر کارایی سرریزهای کلیدپیانویی بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد استفاده از دیواره پاراپت بدون

شیب بازده سرریز را حدوداً ۲۰٪ افزایش داد و در مقایسه با سرریزهای خطی، ظرفیت تخلیه را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید، به‌طوری که در برخی حالت‌ها افزایش آبدهی تا چند برابر بود. افیلیان و احدیان (۲۰۱۶) سرریزهای کلید پیانویی و تأثیر دیواره‌های جانبی مثبت را بررسی کردند و دریافتند که نقش طراحی هندسی دیواره‌ها و تخلخل موثر، در توزیع جریان، مهار انرژی و کاهش فشار ایستایی، مهم است. نتایج این پژوهش مؤید اهمیت سنجه‌های هندسی در بهبود راندمان کارایی آبی سرریزهای کلید پیانویی است. کبیری‌سامانی و همکاران (۲۰۱۷) اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به کاهنده‌های افقی شبکه‌ای و شیاری را بررسی آزمایشگاهی کردند و گزارش کردند که استفاده از کاهنده شبکه‌ای و شیاری در لبه شیب‌شکن، اتلاف انرژی و ژرفای نسبی پایین‌دست را افزایش داد. دانشفرز و همکاران (۲۰۱۹) اتلاف انرژی جریان شیب‌شکن‌های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با سه نسبت بازشدگی درپچه و دو نسبت تخلخل در شرایط جریان فوق بحرانی را بررسی آزمایشگاهی کردند و دریافتند که به‌کارگیری صفحات مشبک باعث افزایش اتلاف انرژی جریان، ژرفای نسبی استخر و ژرفای نسبی پایین‌دست شد. افزون بر این، با افزایش عدد فرود بالادست و کاهش ژرفای بحرانی نسبی، اتلاف انرژی نیز افزایش یافت. سرکرمیان و احدیان (۲۰۲۰) نشان دادند که شیب‌شکن‌های پله‌ای با افزایش اتلاف انرژی سبب کاهش ژرفا و طول حوضچه پایین‌دست شده و از این‌رو، اقتصادی هستند. با استفاده از مدل عددی CFX می‌توان امکان تحلیل جریان پیچیده و بررسی همزمان سنجه‌های هندسی و آبی را با دقت زیاد فراهم آورد. دانشفرز و همکاران (۲۰۲۰) سنجه‌های آبی شیب‌شکن قائم را با استفاده از صفحات مشبک افقی دوبل و جریان زیر بحرانی در بالادست بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آنها نشان داد که فاصله نسبی صفحات مشبک اثری بر ژرفای نسبی و انرژی باقی‌مانده پایاب ندارد. دانشفرز و همکاران (۲۰۲۱) اثر صفحات مشبک افقی بر سنجه‌های آبی شیب‌شکن قائم را بررسی آزمایشگاهی کردند. این پژوهشگران در

مجموع تعداد ۱۰۵ آزمایش برای دو نسبت تخلخل و سه بلندی شیب‌شکن انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از صفحات مشبک افقی در شیب‌شکن قائم در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده می‌توان ژرفای نسبی استخر، ژرفای نسبی پایین‌دست و اتلاف انرژی نسبی را افزایش داد. دانشفرز و همکاران (۲۰۲۱) اثر قطر صفحات مشبک افقی بر اتلاف انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم را بررسی آزمایشگاهی کردند و دریافتند که با افزایش قطر روزنه، اندازه اتلاف انرژی جریان تغییر نکرد و بر آن بی‌اثر بود. میرزایی و همکاران (۲۰۲۱) اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندان‌های افقی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندان‌های افقی در مقایسه با نمونه ساده، اتلاف انرژی، ژرفای پایین‌دست، طول ریزش جت و شدت آشفتگی را افزایش داد. افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آن نیز اتلاف انرژی را بیشتر و محدوده عدد فرود پایاب را کاهش داد. ماجدی‌اصل و همکاران (۲۰۲۱) کارایی سازه‌های توری‌سنگی در اتلاف انرژی نسبی پایین‌دست سرریز اوجی در شرایط مختلف آبی را به‌شکل آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که طول پرش آبی نسبی و اندازه اتلاف انرژی نسبی با افزایش بلندی آب‌پایه تورسنگی، افزایش یافت. افزون بر این، با ایجاد یک بازشدگی و افزایش آن در عرض آب‌پایه دریافتند که انرژی نسبی کاهش یافت. دانشفرز و همکاران (۲۰۲۱) رفتار سنجه‌های آبی شیب‌شکن‌های مایل توری‌سنگی و ساده را بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آنها نشان داد که اندازه اتلاف انرژی نسبی جریان، با افزایش ژرفای بحرانی نسبی، کاهش یافت. افزون بر این، دریافتند که با استفاده از توری‌سنگی در قسمت شیب‌دار شیب‌شکن مایل می‌توان اندازه اتلاف انرژی جریان را به‌طور میانگین ۸۲٪ در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده افزایش داد. باقرزاده و همکاران (۲۰۲۱) سنجه‌های آبی شیب‌شکن مایل توری‌سنگی و ساده به‌همراه حوضچه آرامش در پایاب سازه را به‌شکل آزمایشگاهی مقایسه کردند و دریافتند که شیب‌شکن مایل توری‌سنگی در مقایسه با حوضچه‌های آرامش نوع یک

توری سنگی و ساده در شرایط آزمایشگاهی به شکل نظام‌مند تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه لرستان و با استفاده از فلومی با طول مؤثر ۱۱ متر انجام شد. کف و بدنه فلوم از پلکسی‌گلاس شفاف (برای به حداقل رساندن اثر زبری بر جریان) با عرض ۰/۶ متر، بلندی ۰/۵ متر و شیب طولی بستر ۰/۰۰۸۸ ساخته شد. در انتهای کانال، دریچه‌ای لولایی برای تنظیم ژرفای جریان نصب شد و به منظور برداشت دقیق داده‌های آبی، ریل‌هایی موازی روی دیواره‌های کانال تعبیه شد تا اندازه‌گیری ژرفای جریان و برداشت نیم‌رخ جریان در موقعیت‌های مشخص امکان‌پذیر باشد. به منظور یکنواخت‌سازی جریان ورودی و کاهش اثر اغتشاشات اولیه، در بالادست کانال از یک توری سنگی با ابعاد $۳۵ \times ۵۰ \times ۶۰$ سانتی‌متر پر شده با قلوه‌سنگ‌هایی با میانگین اندازه قطر ۹ سانتی‌متر و تخلخل در بازه ۳۰ تا ۴۰٪ به همراه سه لایه توری مشبک استفاده شد. به کارگیری توری سنگی به دلیل نفوذپذیری زیاد و افزایش زبری مؤثر، موجب کاهش تدریجی تلاطم جریان، تضعیف گردابه‌های ورودی و ایجاد توزیع یکنواخت‌تر سرعت پیش از ورود جریان به ناحیه مدل شیب‌شکن قائم شد. به این ترتیب از شکل‌گیری شرایط جریان غیرواقعی در ناحیه آزمایش جلوگیری شد. سامانه تأمین آب شامل یک پمپ گریز از مرکز با آبدهی ظرفیت نامی ۵۳ لیتر بر ثانیه بود که آب را از مخزن زیرزمینی به مخزن هوایی با هد ثابت منتقل کرد. سپس با دو خط لوله مجهز به شیر فلکه و آبدهی‌سنج الکترومغناطیسی واسنجی یا پایدارسازی و وارد فلوم شد. آبدهی جریان قبل از ورود به فلوم مهار و ثابت نگه‌داشته شد تا شرایط پایدار برای انجام آزمایش‌ها فراهم آید. جریان پس از خروج از کانال مجدداً به مخزن زیرزمینی بازگشت داده شد و این چرخه بسته، شرایط جریان پایدار و یکنواخت در بالادست مدل را فراهم آورد. برای هر آزمایش، آبدهی جریان بالادست با آبدهی‌سنج ثابت نگه‌داشته شد. در

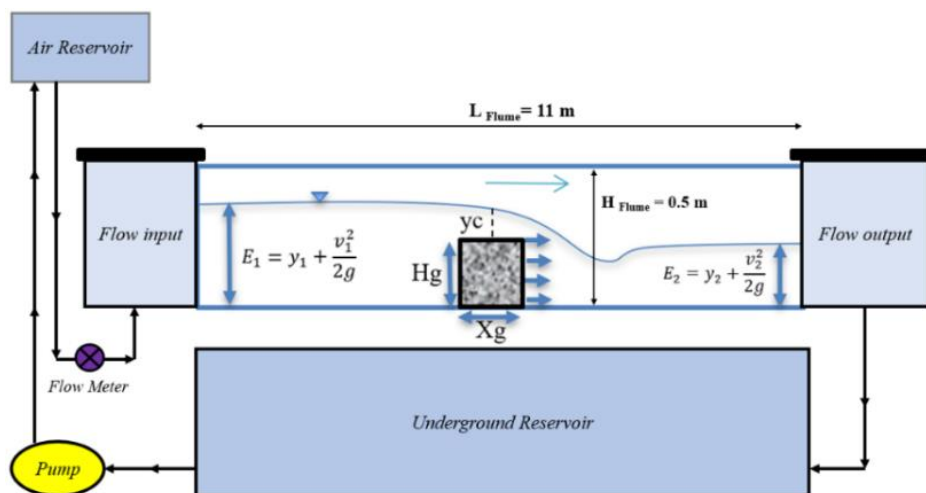
تا چهار، انرژی نسبی باقی‌مانده پایاب را به ترتیب ۳۰، ۳۳، ۳۶ و ٪ کاهش داد. این یافته‌ها در بهبود ایمنی سازه‌ها و کاهش فرسایش مؤثر است.

خیبر و همکاران (۲۰۲۱) اثر انقباض ناگهانی مقطع کانال بر راندمان آبی دریچه سالونی بیضی را بررسی آزمایشگاهی کردند. نتایج آنها نشان داد که انقباض کانال موجب کاهش قابل توجه ضریب آبدهی دریچه شد و این کاهش بسته به شرایط جریان از ۱۴ تا ۷۳٪ متغیر بود. افزون بر این، ضریب اتلاف انرژی دریچه بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به دست آوردند. این پژوهشگران با ارائه روابط تجربی توانستند آبدهی عبوری را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند. حاجی‌علی‌گل و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند که اگرچه انبساط مقطع کانال موجب افزایش اتلاف انرژی شد، اما در برخی شرایط باعث ناپایداری و ناتقارنی جریان در پایین‌دست شد. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که به کارگیری کاهنده‌های عرضی می‌تواند با بهبود یکنواختی جریان و کاهش تمرکز سرعت، ضمن حفظ مزایای انبساط مقطع، از بروز اثرات نامطلوب آبی جلوگیری کرد. خیبر و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که تغییر زاویه کانال جانبی و ابعاد سازه بر کارایی سرریزهای جانبی و ضریب آبدهی اثرگذار بود و میان آبدهی و ضریب انرژی رابطه تقریبی ارائه دادند که با داده‌های تجربی صحت‌سنجی شد. نتایج پژوهش خیبر و همکاران (۲۰۲۵) مؤید اهمیت هندسی کانال و سنجه‌های هندسی در بهبود راندمان اتلاف انرژی بود.

در این پژوهش، با هدف کمی‌سازی اندازه اتلاف انرژی و تغییرات ژرفای بحرانی جریان، اثر تلفیق شیب‌شکن قائم با سازه توری سنگی و تغییرات هندسی آن شامل اندازه تخلخل و ابعاد توری سنگی، تحت شرایط مختلف آبی (آبدهی و عدد فرود) به شکل آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج آن با شیب‌شکن قائم ساده مقایسه شد. این پژوهش با تأکید بر تحلیل سازوکار عبور درون‌گذر جریان و تضعیف تلاطم در پایین‌دست سازه که در پژوهش‌های پیشین کمتر به طور مستقیم اندازه‌گیری و تحلیل شده بود، اجرا شد. افزون بر این، همکنش آبی و اتلاف انرژی در سازه‌های شیب‌شکن قائم

شیب‌شکن قائم و اتلاف انرژی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شد. نمای فلوم استفاده‌شده در شکل ۱ نشان‌داده شده است.

پایین‌دست، ژرفای آب با استفاده از دریچه تنظیم و بر اساس رابطه مانینگ مهار شد تا شرایط پایدار شود. عدد فرود پایین‌دست در اثر تعامل جریان با



شکل ۱- نمودار کلی تجهیزات آزمایشگاهی.

Figure 1- General schematic of laboratory equipment.

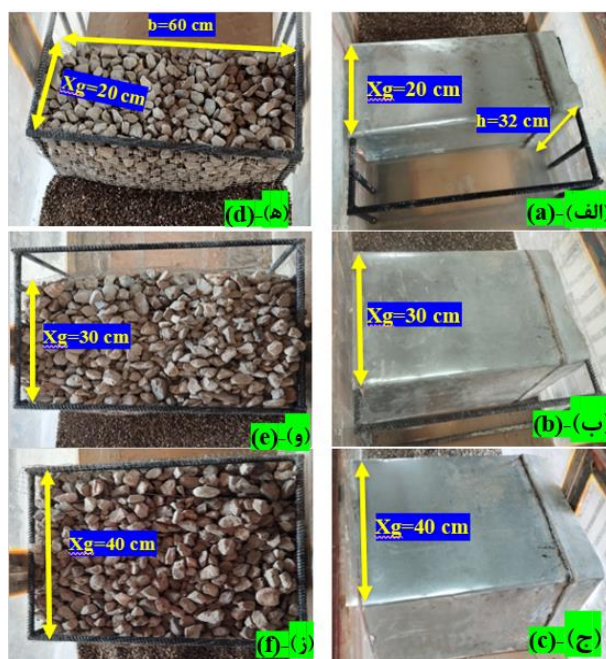


شکل ۲- نمای فلوم آزمایشگاهی.

Figure 2- View of laboratory flume.

شیب‌شکن قائم توری‌سنگی و سازه شیب‌شکن ساده در شکل ۳ نشان‌داده شده است.

نمای فلوم آزمایشگاهی که سازه در آن نصب شد در شکل ۲ و انواع مدل‌های آزمایشگاهی ساخته‌شده سازه



شکل ۳- مدل‌های آزمایشگاهی شیب‌شکن قائم ساده و توری‌سنگی

(الف)، (ب) و (ج): نمونه شاهد سازه برای اندازه‌های به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر
(ه)، (و) و (ز): مدل توری‌سنگی سازه برای اندازه‌های به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر.

Figure 3- Experimental models of simple and gabion vertical drop

(a), (b) and (c): Control sample of the structure for the cases of 20, 30 and 40 cm, respectively
(d), (e) and (f): Gabion model of the structure for the cases of 20, 30 and 40 cm, respectively.

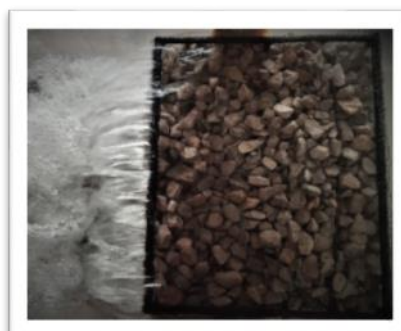
روش پژوهش

از سه نوع اندازه ریزدانه، میان‌دانه و درشت‌دانه استفاده شد که میانگین اندازه قطر آنها (D_{50}) به ترتیب ۲۱، ۳۰/۵ و ۴۲ میلی‌متر بود؛ این سنگریزه‌ها درون جعبه‌ای ساخته شده از میلگرد شماره ۱۴ ریخته شد و با تور مخصوص مهار شد تا تخلخل‌های ۳۰، ۳۵ و ۴۰٪ ایجاد شود. در حالت توری‌سنگی نیز با همان بلندی، سه ضخامت، سه دانه‌بندی و پنج آبدهی ورودی، مجموعاً ۴۵ آزمایش انجام شد تا اثر هندسه و دانه‌بندی مصالح بر جریان و اتلاف انرژی بررسی شود. دانه‌بندی مصالح مستقیماً بر تخلخل سازه و اندازه تمرکز تلاطم اثرگذار است، به طوری که سنگریزه‌های درشت‌تر باعث افزایش تخلخل و کاهش تمرکز تلاطم می‌شوند. نمایی از جریان روی سازه در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این پژوهش، آزمایش‌ها در پنج آبدهی ورودی ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ لیتر بر ثانیه انجام شد و عدد فرود بالادست جریان در تمام آزمایش‌ها حدود ۰/۲۷ تا ۰/۳ بود تا شرایط جریان پایدار و یکنواختی برای مدل آزمایشگاهی فراهم آید. برای ساخت مدل، یک چارچوب فلزی با عرض‌های قابل تغییر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، بلندی ثابت ۳۲ سانتی‌متر و طول ۵۸ سانتی‌متر استفاده شد. به منظور حفظ نسبت هندسی جریان و امکان مقایسه میان نمونه‌ها در تمام آزمایش‌ها، بلندی ثابت در نظر گرفته شد. نمونه شاهد، یعنی شیب‌شکن قائم ساده، از ورق گالوانیزه با همان ابعاد ساخته شد تا سازه کاملاً ساده باشد و جریان صرفاً از روی آن عبور کند. سپس، سازه شیب‌شکن با توری‌سنگی تلفیق شد. برای ساخت سازه توری‌سنگی،



(ب) (b)



(الف) (a)

شکل ۴- نمایی از جریان روگذر در سازه: (الف دید از بالا، ب) دید از جلو.

Figure 4- View of the overpass flow in the structure: a) Top view, b) Front view.

تجزیه و تحلیل ابعادی

به منظور بررسی اندازه اتلاف انرژی در شیب‌شکن‌های قائم توری‌سنگی، سنجه‌های موثر به شکل رابطه ۲ تعریف شد.

$$f_1 = (Q, \Delta E, \rho, \mu, g, h_g, X_g, d_{50}, y_1, y_2) = 0 \quad (2)$$

Q: آبدهی جریان، ΔE : اتلاف انرژی، ρ : جرم مخصوص آب، μ : لزجت پویایی، g : شتاب گرانش زمین، h_g : بلندی شیب‌شکن، X_g : ضخامت شیب‌شکن، d_{50} : میانگین قطر ذرات توری‌سنگی، y_1 : ژرفای بالادست سازه، y_2 : ژرفای پایین‌دست سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی است.

با تجزیه و تحلیل ابعادی با روش پی‌باکینگهام و با انتخاب سه متغیر تکراری ρ ، g و X_g و با تشابه عددی به دست آمده رابطه ۲ به شکل رابطه ۳ تغییر یافت.

$$f_2 \left(\frac{\Delta E}{X_g}, \frac{Q}{\sqrt{g} X_g^{\frac{3}{2}}}, \frac{\mu}{\rho \sqrt{g} X_g^{\frac{3}{2}}}, \frac{H_g}{X_g}, \frac{d_{50}}{X_g}, \frac{y_1}{X_g}, \frac{y_2}{X_g} \right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به متلاطم بودن جریان در تمام مدل‌های شیب‌شکن قائم توری‌سنگی و ساده ($Re_u \geq 2000$) از سنجه بی‌بعد عدد رینولدز بالادست $\frac{\mu}{\rho \sqrt{g} X_g^{\frac{3}{2}}}$ صرف نظر شد. به دلیل جریان زیربحرانی، پایدار و مهارشده در بالادست سازه، در تمام مدل‌ها، از برخی سنجه‌هایی که وابستگی زیادی به عدد فروود داشتند، در تحلیل

پایانی صرف نظر شد. این شرایط جریان، امکان بررسی دقیق اثر هندسه سازه و دانه‌بندی مصالح بر اتلاف انرژی را فراهم آورد و سبب شد تا نتایج مقایسه نمونه‌ها قابل اطمینان باشد. در این پژوهش، برای تحلیل نهایی ابعادی از رابطه‌های ۴ و ۵ استفاده شد.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f_3 \left(\frac{y_c}{X_g}, \frac{H_g}{X_g}, \frac{d_{50}}{X_g} \right) \quad (4)$$

$$\frac{y_1}{X_g} = f_4 \left(\frac{y_c}{X_g}, \frac{H_g}{X_g}, \frac{d_{50}}{X_g} \right) \quad (5)$$

y_c : ژرفای بحرانی یک سنجه وابسته است که از آبدهی (Q) و هندسه کانال محاسبه شد.

بر پایه رابطه‌های ۴ و ۵ اندازه‌های بدون بعد افت نسبی انرژی و ژرفای نسبی جریان برای تمام آزمایش‌ها محاسبه شد. نمودارهای مربوطه به منظور بررسی اثر سنجه‌های هندسی و دانه‌بندی مصالح بر اتلاف انرژی توری‌سنگی رسم و تحلیل شدند. از این رو، در رابطه‌های ۴ و ۵ ژرفای بحرانی به عنوان سنجه محاسبه‌ای لحاظ شد و متغیر مستقل نیست.

بر پایه تجزیه و تحلیل ابعادی مشخص شد که اتلاف انرژی و ژرفای نسبی در بالادست شیب‌شکن قائم توری‌سنگی تابعی از ژرفای بحرانی نسبی، بلندی نسبی سازه و دانه‌بندی مصالح توری‌سنگی است.

روابط محاسبه اتلاف انرژی

در این پژوهش اتلاف انرژی در بالادست و پایین‌دست سازه به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه شد.

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (6)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

E_1 و E_2 : به‌ترتیب انرژی در بالادست و پایین‌دست، y_1 و y_2 : به‌ترتیب ژرفای بالادست و پایین‌دست، V_1 و V_2 : به‌ترتیب میانگین سرعت در بالادست و پایین‌دست سازه و g : شتاب گرانش زمین است.

در این پژوهش اتلاف انرژی و اتلاف انرژی نسبی به‌ترتیب از رابطه‌های ۸ و ۹ محاسبه شد.

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

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (9)$$

سرانجام رابطه ۹ به‌شکل رابطه ۱۰ تغییر یافت.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \xi \quad (10)$$

ξ : جایگزین نسبت $\frac{E_2}{E_1}$ است.

تقسیم جریان میان فضای متخلخل و سطح سازه بود. از سوی دیگر، راندمان آبی آن نیز به‌طور مستقیم تحت تأثیر آبدی جریان بود. اثر دانه‌بندی مصالح نیز کاملاً قابل مشاهده بود؛ هرچه میانگین قطر دانه‌ها کمتر و مصالح ریزتر انتخاب شده بود، فضای متخلخل سریع‌تر پر شد و سازه زودتر به حالت غرقابی رسید. این موضوع باعث کاهش تمرکز تلاطم و کاهش اتلاف انرژی شد. از سوی دیگر، استفاده از مصالح درشت‌تر سرعت پر شدن فضای متخلخل را کاهش و سهم جریان درون‌گذر را افزایش داد. این موضوع باعث افزایش تمرکز تلاطم و اتلاف انرژی شد. افزون بر این، ترکیب دانه‌بندی مصالح، بلندی و ضخامت سازه و آبدی جریان تعیین‌کننده نسبت جریان درون‌گذر و روگذر و رفتار پویایی جریان در پایاب بود و امکان مهار راندمان آبی سازه با تنظیم این سنج‌ها فراهم شد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد با انتخاب مناسب دانه‌بندی مصالح و هندسه سازه توری‌سنگی می‌توان سبب بهبود راندمان آبی، کاهش تلاطم و کاهش اتلاف انرژی شد و بررسی همزمان جریان درون‌گذر و روگذر، الگوی ارزشمندی برای بهبود طراحی این نوع سازه‌ها ارائه داد.

صحت‌سنجی نمونه شاهد با نتایج پژوهش‌های پیشین

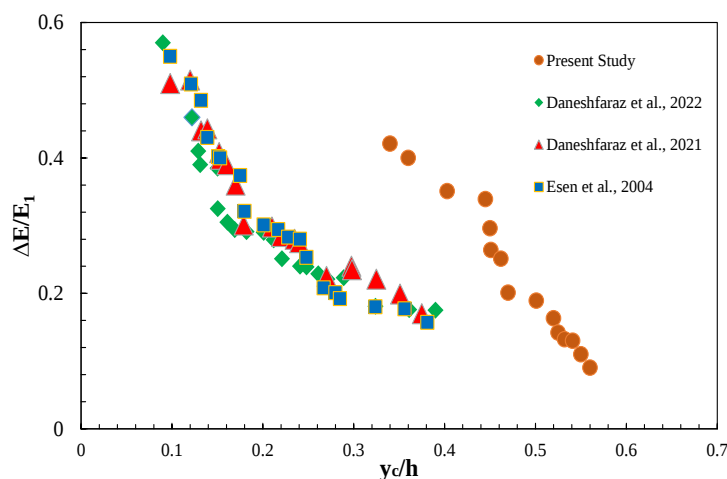
در سازه شیب‌شکن قائم، هنگامی که جریان در بالادست زیر بحرانی باشد، اتلاف انرژی عمدتاً به‌دلیل برخورد مستقیم جت با کف استخر پایین‌دست و ایجاد تلاطم و گردابه‌های محلی در استخر زیر جت رخ می‌دهد. این برخورد باعث می‌شود که انرژی جنبشی جریان به آرامی در محیط آب کاهش و شدت جریان نیز در پایاب، کاهش یابد. روند تغییرات اتلاف انرژی نسبی در برابر ژرفای بحرانی نسبی برای سازه شیب‌شکن قائم ساده در شکل ۵ نشان‌داده شده است. نتایج نشان داد که رابطه میان اتلاف انرژی نسبی و ژرفای بحرانی نسبی معکوس است؛ یعنی با افزایش ژرفای بحرانی نسبی (محور افقی نمودار)، اندازه اتلاف انرژی (محور عمودی نمودار) کاهش یافت. این رفتار نشان داد با افزایش ژرفای بحرانی، تلاطم شدیدی ایجاد نشده و انرژی جنبشی به کف نیز انتقال نیافته است در نتیجه اندازه اتلاف انرژی کاهش یافت. تحلیل

نتایج و بحث

در این پژوهش نتایج تمام آزمایش‌ها نشان‌دهنده برخورد جریان با سازه توری‌سنگی و تشکیل همزمان جریان درون‌گذر و جریان روگذر بود، به‌طوری که فضای متخلخل توری‌سنگی پر از آب شد و جریان غیرداری قابل‌توجهی از میان دانه‌های سنگی عبور کرد. با افزایش آبدی ورودی، سهم جریان روگذر در مقایسه با جریان درون‌گذر افزایش یافت، به‌طوری که بخش بزرگی از جریان افزون بر عبور از فضای دانه‌ها، از روی سطح سازه نیز عبور کرد و به پایاب ریخت. فرآیند جریان در تمام آزمایش‌ها شامل دو مرحله بود. ابتدا غرق شدن تدریجی فضای متخلخل سازه و سپس ریزش متعادل و پایدار جریان به پایاب، که در آبدی‌های بیشتر شدت بیشتری داشت و منجر به افزایش سهم جریان روگذر شد. این رفتار نشان‌دهنده نقش پویای سازه توری‌سنگی در مهارکنندگی تلاطم و

شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که روند کلی کاهش اتلاف انرژی با افزایش ژرفای بحرانی نسبی در هر سه مجموعه داده مشابه است و این تطابق هم از نظر شیب تغییرات و هم از نظر دامنه اندازه‌های تجربی قابل مشاهده بود. در این راستا نمودارها بیانگر رفتار معکوس میان ژرفای بحرانی نسبی و اندازه اتلاف انرژی در تمام داده‌ها بودند. نتایج این پژوهش با یافته‌های پیشین هم‌راستا است، به طوری که می‌توان آن را به‌عنوان یک الگوی کیفی و کمی برای اعتبار مدل آزمایشگاهی در نظر گرفت.

این روند بیانگر آن است که نقش ژرفای بحرانی در توزیع انرژی جریان و شدت تلاطم در پایاب سازه، مهم است و تغییرات آن به‌طور مستقیم بر اندازه اتلاف انرژی اثرگذار است. به‌بیان دیگر، سازه شیب‌شکن قائم در شرایط جریان زیربحرانی، با تغییر ژرفای بحرانی جریان سبب مهار تلاطم و کاهش انرژی جنبشی جریان در پایاب شد. این روند معکوس میان ژرفای بحرانی نسبی و اتلاف انرژی، شاخص قابل فهم و ملموسی برای تحلیل راندمان آبی سازه‌ها به‌شمار می‌آید. برای صحت‌سنجی، نتایج به‌دست آمده از نمونه شاهد با داده‌های آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۲) و اسن و همکاران (۲۰۰۴) مقایسه



شکل ۵- مقایسه روند تغییرات اتلاف انرژی نسبی نمونه شاهد با دیگر پژوهشگران.

Figure 5- Comparing the trend of changes in relative energy consumption of the control sample with other researchers.

اتلاف انرژی نسبی در شیب‌شکن قائم توری‌سنگی

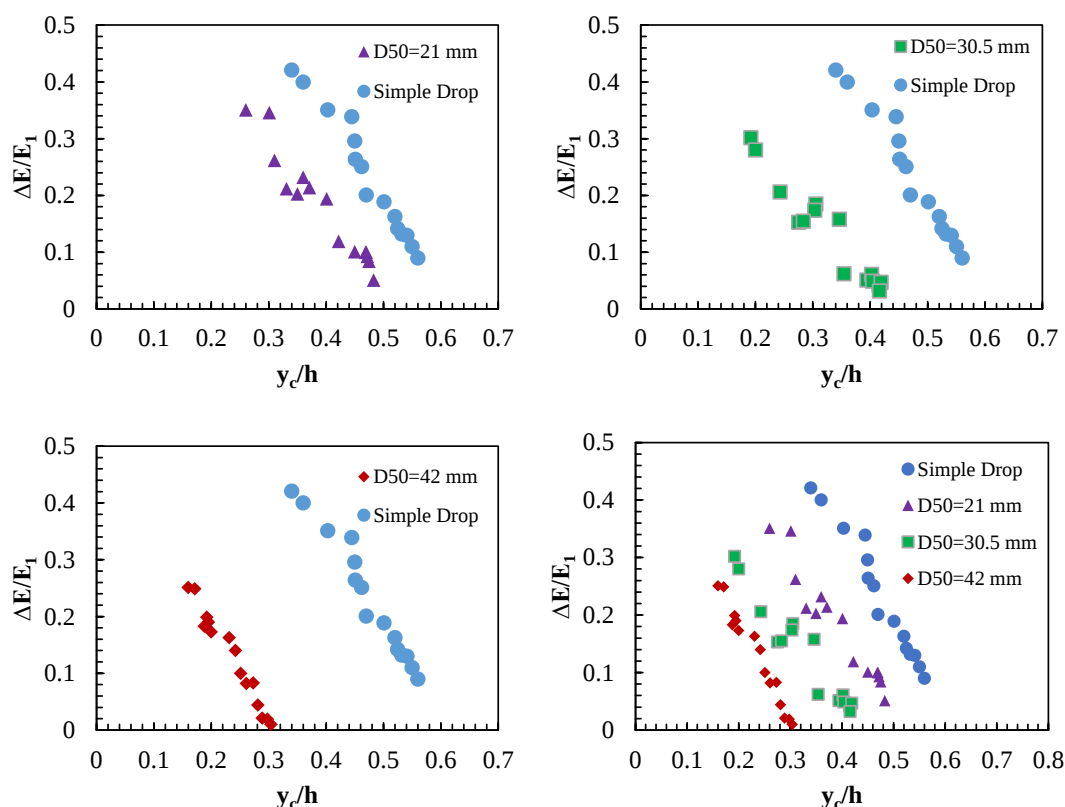
ساده مشاهده شد که اتلاف انرژی به‌طور چشمگیری افزایش یافت. بر پایه شکل ۶، برای یک اندازه ذرات توری‌سنگی ثابت با افزایش ضخامت توری‌سنگی (X_g) اندازه اتلاف انرژی افزایش یافت. افزون بر این، به ازای یک ضخامت ثابت (X_g)، با افزایش اندازه ذرات توری‌سنگی، اندازه اتلاف انرژی افزایش یافت. از این‌رو، هرچه ذرات توری‌سنگی ریزتر باشند، اندازه اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. یعنی برای یک مدل سازه توری‌سنگی با ضخامت ثابت، مدل با اندازه میانگین ذرات ۴۲ میلی‌متر در مقایسه با مدل‌های با اندازه میانگین ذرات ۳۰/۵ و ۲۱ میلی‌متر به‌دلیل این که

یکی از سنجه‌های مهم در طراحی سازه شیب‌شکن اتلاف انرژی است. در این پژوهش نتایج بررسی و مقایسه اتلاف انرژی نسبی کل برای سه ضخامت شیب‌شکن قائم برای هر دو سازه توری‌سنگی و ساده و همچنین سه نوع دانه‌بندی مختلف برای سازه توری‌سنگی در مقابل ژرفای بحرانی نسبی در شکل ۶ نشان داده شده است. بر پایه شکل ۶، روند نمودار اتلاف انرژی نسبی در برابر ژرفای بحرانی نسبی در هر دو نمونه شیب‌شکن ساده و توری‌سنگی نزولی بود و با افزایش ژرفای بحرانی نسبی، اندازه اتلاف انرژی کاهش یافت. با به‌کارگیری توری‌سنگی به جای نمونه سازه

ضخامت سازه توری‌سنگی، اندازه اتلاف انرژی افزایش یافت. یعنی مدل با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر ($X_g=40$ cm) و میانگین اندازه ذرات برابر با ۴۲ میلی‌متر ($D_{50}=42$ mm) در مقایسه با ضخامت‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر انرژی بیشتری را کاهش داد. افزون بر این، از دیدگاه مهندسی با افزایش ضخامت سازه، اندازه پایداری سازه و مهار کردن آن و هزینه اجرا و نگهداری آن نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی از میان مدل‌های بررسی‌شده در این پژوهش بهترین مدل سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی برای اتلاف انرژی، شیب‌شکن با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر ($X_g=40$ cm) بود. در مقایسه با نمونه ساده شیب‌شکن ۶۰٪ انرژی جریان را بیشتر کاهش داد و این مزیت مهمی در مقایسه با نمونه ساده بود که بسته به اندازه حساسیت طرح از دیدگاه فنی و اقتصادی، سنجه‌های نامبرده را می‌توان تغییر داد و سازه با ابعاد دیگری انتخاب کرد.

اندازه جریان درون‌گذر در مقایسه با جریان روگذر بیشتر است و سازه در بازه زمانی بیشتری مستغرق است در نتیجه اندازه اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. در حقیقت، با کاهش اندازه ذرات توری‌سنگی وضعیت جریان خیلی سریع به حالت روگذری تغییر می‌یابد. این موضوع با استغراق سازه توری‌سنگی و کاهش اتلاف انرژی همراه است.

از دیدگاه مهندسی و اقتصادی، اندازه ذرات توری‌سنگی و اندازه تخلخل سازه توری‌سنگی و کاهش یا بی‌اثر بودن و دخالت فضای متخلخل در اتلاف انرژی ویرانگر ناشی از آن، می‌تواند مدنظر مهندسان و طراحان باشد. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که هرچه ذرات توری‌سنگی درشت‌تر باشد، عبور جریان از فضای داخلی سازه آسان‌تر است و مقاومت جریان کمتر است و اندازه اتلاف انرژی در مقایسه با اندازه‌های ریزتر بهتر است. از این‌رو، گزینه مناسبی برای طراحی و ساخت است. نتایج نشان داد با افزایش



شکل ۶- نمودار روند تغییرات اتلاف انرژی و ژرفای بحرانی نسبی برای ضخامت و دانه‌بندی‌های مختلف سازه شیب‌شکن توری‌سنگی.
Figure 6- Trend chart of changes in energy dissipation and relative critical depth for different thicknesses and grain sizes of gabion drop structures.

آب‌دهی‌های درون‌گذر (Q_{in}) و روگذر (Q_{over})

در سازه‌های توری‌سنگی، خصوصاً سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، محاسبه آب‌دهی عبوری از سازه موضوع بسیار مهمی در طراحی است. افزون بر این، اندازه اتلاف انرژی نیز بسیار اثرگذار است. نتایج نشان داد در سازه نامبرده، جریان هم به‌شکل روگذر و هم به‌شکل درون‌گذر از سازه عبور کرد.

در این پژوهش به‌منظور محاسبه اندازه‌های هر دو آب‌دهی روگذر و درون‌گذر ابتدا در محدوده روی سازه به‌وسیله میکرومولینه فرآیند سرعت‌سنجی انجام شد. بر اساس عرض فلوم ۶۰ سانتی‌متری، روی سازه، در یک ژرفای مشخص، در فاصله عرضی فلوم در بازه‌های ۵ سانتی‌متری (در ابتدا و انتهای فاصله عرضی این اندازه برابر ۷/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد) و در ژرفایی در بازه ۵ میلی‌متری سرعت به‌وسیله میکرومولینه برداشت شد. سرانجام، میانگین سرعت‌ها محاسبه شد. سپس، بر اساس اندازه‌های میانگین

سرعت و سطح مقطع ($A=by$) مشخص‌شده و با استفاده از رابطه ۱۱ اندازه آب‌دهی روگذر محاسبه شد. سرانجام، با کم‌کردن اندازه آب‌دهی روگذر از آب‌دهی کل، اندازه آب‌دهی درون‌گذر با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه شد.

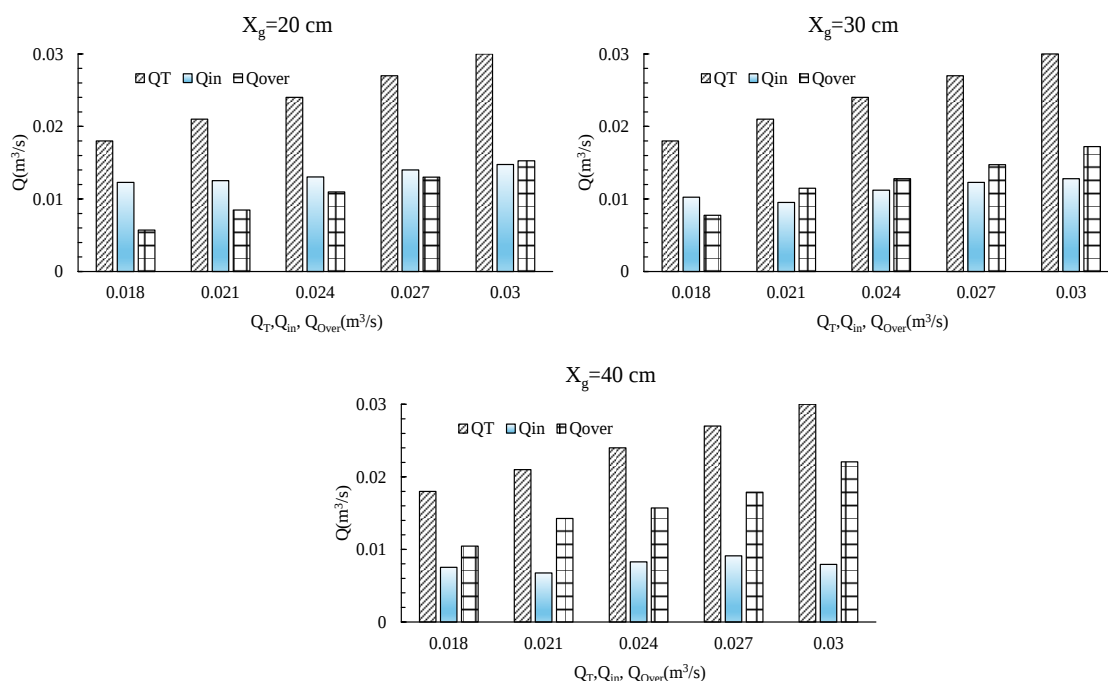
$$Q = A \cdot V \quad (11)$$

$$Q_T = Q_{in} + Q_{over} \quad (12)$$

$$Q_{in} = Q_T - Q_{over} \quad (13)$$

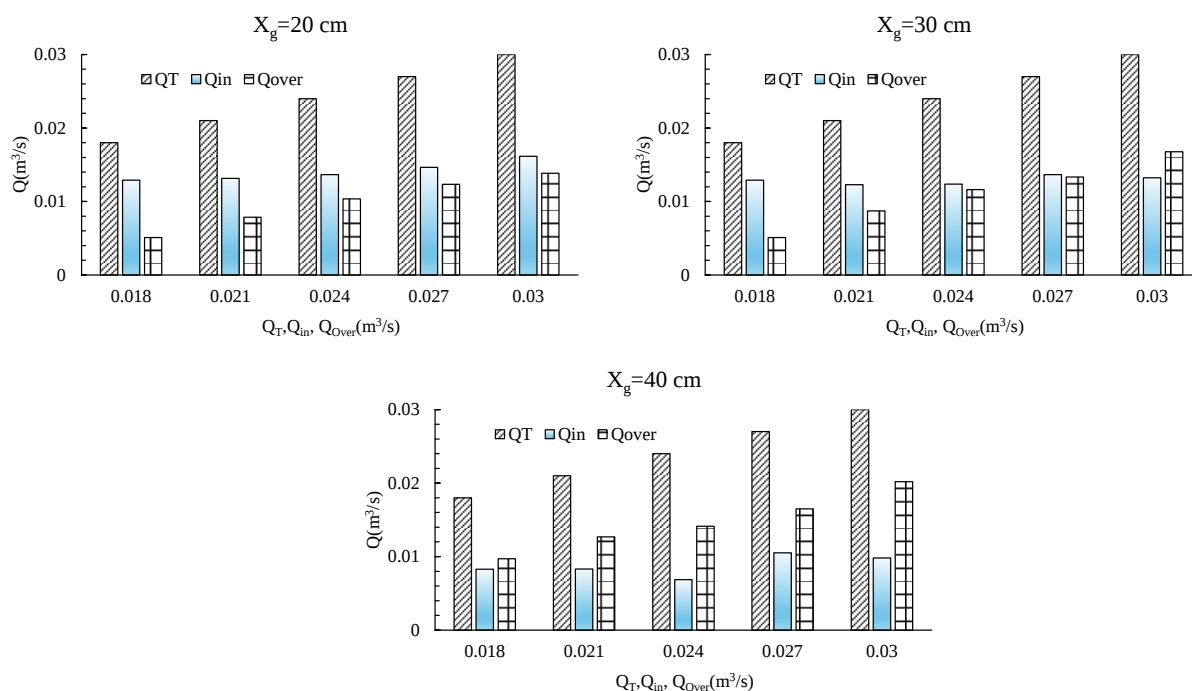
Q_T : آب‌دهی کل جریان، Q_{in} : آب‌دهی درون‌گذر از سازه و Q_{over} : آب‌دهی روگذر است.

نمودارهای مربوط به آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت‌ها و شرایط مختلف در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان‌داده شده است.

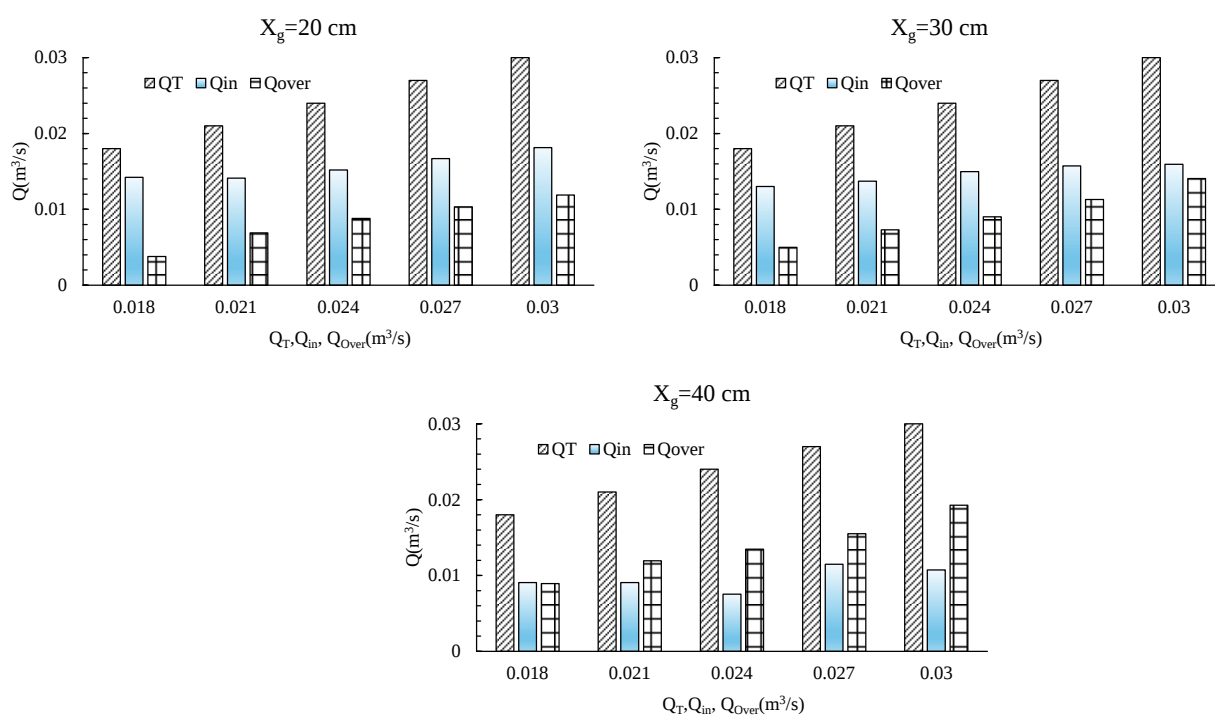


شکل ۷- نمودار مقایسه آب‌دهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت $D_{50}=21$ mm.

Figure 7- Comparison chart of Q_{in} and Q_{over} rates for the case of $D_{50}=21$ mm.



شکل ۸- نمودار مقایسه آبدهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت $D_{50}=30.5$ mm.
Figure 8- Comparison chart of Q_{in} and Q_{over} rates for the case of $D_{50}=30.5$ mm.



شکل ۹- نمودار مقایسه آبدهی‌های درون‌گذر و روگذر برای حالت $D_{50}=42$ mm.
Figure 9- Comparison chart of Q_{in} and Q_{over} rates for the case of $D_{50}=42$ mm.

شرایط آزمایشگاهی بود که جریان از داخل سازه عبور نکرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش همکنش جریان و اتلاف انرژی در سازه شیب‌شکن قائم ساده و سپس تلفیق آن با توری سنگی با مدل‌سازی فیزیکی بررسی شد. در این راستا، روی سازه شیب‌شکن قائم توری سنگی و نمونه شاهد آزمایش‌هایی انجام و نتایج با هم مقایسه شد. در این پژوهش، نتایج تجزیه و تحلیل ابعادی نشان داد که سنج‌های آبی، از جمله اتلاف انرژی نسبی و ژرفای بالادست، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، به شکل تابعی از ژرفای بحرانی نسبی، بلندی نسبی سازه، ضخامت سازه و میانگین قطر ذرات توری سنگی بودند. این رابطه‌ها نشان‌دهنده وابستگی ابعادی و روند کلی اثر سنج‌ها بر پاسخ آبی بودند و رابطه‌های فیزیکی دقیقی نیستند، بلکه می‌توان آنها را به عنوان چارچوبی برای تحلیل و تعمیم نتایج آزمایشگاهی در مقیاس مدل به کار گرفت.

نتایج این پژوهش نشان داد در تمام مدل‌های سازه شیب‌شکن قائم ساده و توری سنگی، رابطه اندازه اتلاف انرژی نسبی با ژرفای بحرانی نسبی، معکوس است. یعنی با افزایش ژرفای بحرانی نسبی اندازه اتلاف انرژی نسبی کاهش یافت. از سوی دیگر، با افزایش اندازه ذرات توری سنگی، حجم آب عبوری از محیط متخلخل سازه و به دنبال آن اندازه اتلاف انرژی افزایش یافت. یعنی، هرچه ذرات توری سنگی ریزتر بودند، اندازه اتلاف انرژی نیز کاهش یافت.

رابطه اندازه ذرات توری سنگی با زمان مستغرق شدن سازه و شروع جریان روگذر مستقیم بود. رابطه ضخامت شیب‌شکن نیز با اندازه اتلاف انرژی نیز مستقیم بود و مشاهده شد هرچه ضخامت سازه بیشتر باشد، اتلاف انرژی در مقایسه با ضخامت‌های کمتر به وسیله سازه، بیشتر است.

افزایش ضخامت شیب‌شکن باعث شد که سازه در مدت زمان کمتری مستغرق شود. از این رو، اتلاف انرژی افزایش یافت.

بر پایه نمودارها، مشخص شد که هرچه اندازه ذرات توری سنگی درشت‌تر باشد، اندازه آبدهی روگذر کاهش یافته و اندازه آبدهی درون‌گذر افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، جریان بیشتری از فضای متخلخل توری سنگی عبور کرد و سهم جریان روی سطح سازه کاهش یافت. برای نمونه، اندازه آبدهی روگذر در حالت توری سنگی ریزدانه با میانگین قطر ۲۱ میلی‌متر بیشتر از حالت میان‌دانه ۳۰/۵ میلی‌متر بود و این حالت نیز از آبدهی روگذر در حالت درشت‌دانه ۴۲ میلی‌متر بیشتر بود. این روند نشان داد که نقش اندازه ذرات و تخلخل مصالح در توزیع جریان روگذر و درون‌گذر مهم است و بر اتلاف انرژی و رفتار آبی سازه به طور مستقیم اثرگذار است. این موضوع در ارتباط با آبدهی درون‌گذر بر اساس اندازه ذرات، برعکس است. زیرا، هرچه ذرات درشت‌تر باشند، فضای خالی داخلی توری سنگی افزایش یافته و مدت زمان بیشتری لازم است تا سازه مستغرق شود، در نتیجه جریان بیشتری از داخل سازه عبور می‌کند. از این رو، سهم جریان روگذر در این حالت در مقایسه با حالت مشابه با ذرات ریزتر، کمتر شد. افزون بر این، با افزایش ضخامت توری سنگی (Xg)، آبدهی درون‌گذر کاهش و آبدهی روگذر افزایش یافت. یعنی، برای حالت توری سنگی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر اندازه آبدهی روگذر از حالت ۳۰ و ۲۰ سانتی‌متر بیشتر بود و حالت ۳۰ سانتی‌متر از حالت ۲۰ سانتی‌متر نیز بیشتر بود. زیرا، در این حالت، سازه در مدت زمان کمتری مستغرق است و سهم آبدهی روگذر در مقایسه با مدل مشابه با ضخامت کمتر، بیشتر بود و در نتیجه جریان درون‌گذر در مقایسه با روگذر کمتر شد.

افزون بر این، بدیهی است که با افزایش آبدهی نیز آبدهی‌های درون‌گذر و روگذر افزایش یافت. شایان ذکر است که در حالت نمونه شاهد یا سازه ساده، کل جریان عبوری به شکل روگذر بود. آبدهی جریان درون‌گذر در این حالت به دلیل عایق‌سازی کامل سازه و نبودن مسیر عبور برای جریان درون‌گذر، عملاً برابر با صفر در نظر گرفته شد. افزون بر این، این اندازه به طور مستقیم اندازه‌گیری نشد و به دلیل طراحی و

در میان مدل‌های بررسی‌شده در این پژوهش، بهترین مدل در اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، مدل با ضخامت ($X_g=40\text{ cm}$) و میانگین اندازه ذرات ($d_{50}=42\text{ mm}$) بود.

در تمام آزمایش‌ها، هنگام عبور جریان از روی سازه شیب‌شکن قائم توری‌سنگی، هم جریان درون‌گذر از فضای متخلخل توری‌سنگی و هم جریان روگذر از روی سطح سازه شکل گرفت. با افزایش آبدهی جریان و پرشدن فضای متخلخل، سازه تقریباً مستغرق شد، اما با این حال بخش قابل توجهی از جریان همچنان به شکل روگذر از روی سازه عبور کرد. از این رو، حتی در شرایطی که سازه کاملاً غرقایی به نظر می‌رسید، جریان درون‌گذر و روگذر به‌طور همزمان برقرار بود و سهم هر یک از این جریان‌ها بسته به آبدهی ورودی و تخلخل مصالح متفاوت بود.

تلفیق سازه توری‌سنگی با شیب‌شکن قائم در مقایسه با شیب‌شکن ساده، سبب افزایش قابل توجه اتلاف انرژی شد. در این راستا، مدل شیب‌شکن قائم توری‌سنگی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و میانگین قطر ذرات ۴۲ میلی‌متر، اتلاف انرژی جریان را تا ۶۰٪ در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داد.

در حالت کلی، ژرفای آب بالادست سازه در نمونه شیب‌شکن ساده بیشتر از نمونه توری‌سنگی بود. افزون بر این، ژرفای آب بالادست سازه توری‌سنگی به‌طور مستقیم به میانگین اندازه قطر ذرات توری‌سنگی، ضخامت سازه و آبدهی جریان ورودی بستگی داشت، به‌طوری که این رفتار در تمام آبدهی‌های بررسی‌شده ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ لیتر بر ثانیه، بود.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، انواع دیگر شیب‌شکن

(شیب‌شکن‌های مایل و لوله‌ای) و اثر تلفیق توری‌سنگی با سازه شیب‌شکن و بر اندازه آبشستگی پایین‌دست، به شکل عددی و آزمایشگاهی بررسی شوند. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود از نتایج این پژوهش در طراحی و اجرای شیب‌شکن‌های توری‌سنگی در طرح‌های آبخیزداری استفاده شود. زیرا، با بهره‌گیری از این نتایج می‌توان پایداری سازه‌های آبخیزداری را افزایش داد و ویرانی در پایین‌دست را کاهش داد. این موضوع سبب افزایش عمر مفید سازه خواهد شد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، بازبینی نتایج
نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری
نویسنده چهارم و پنجم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری

فهرست منابع

- Afzalian A, Ahadian J. 2016. Piano key weirs with positive parapet wall. *Water and Soil Science*. 25(4/2): 97-107. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4630.html?lang=en
- Alasvand K, Ahadian J, Fathian H. 2012. Modeling of pattern and dissipating energy in the gabion stepped spillway using the Flow-3D model. *Journal of Water Science and Engineering*. 1(3): 89-97. <https://sid.ir/paper/235537/en>
- Bagherzadeh M, Mohammadi M, Daneshfaraz R, Dasineh M. 2021. Comparison of hydraulic parameters of simple and Gabion inclined drops with stilling basin in the downstream of the structure. *International Science and Innovation Congress*. pp. 39-45.
- Bakhmeteff MW. 1932. *Hydraulics of open channels*, New York and London, McGraw-Hill book company, Inc.
- Castejon M, Romero-Munoz F, Garcia L. 1987. Phenology and control of Orobanchae cornea in sunflower with glyphosate. In: Weber HC, Forstreuter W, Editors. *Parasitic flowering plants*. Marburg, F.R.G. Civil Infrastructure Research pp. 121-126.
- Daneshfaraz R, Majedi-Asl M, Mortazavi AS, Bagherzadeh M. 2022. Laboratory evaluation of energy dissipation in the combined structure of the vertical drop with gabion. *Civil Infrastructure Researches*. 8(1): 45-157. <https://doi.org/10.22091/cer.2022.7720.1344>
- Daneshfaraz R, Asl MM, Razmi S, Norouzi R, Abraham J. 2020. Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*. pp. 1-10.
- Daneshfaraz R, Bagherzadeh M, Ghaderi A, Di Francesco S, Asl MM. 2021. Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*. 12(4): 3451-3459.
- Daneshfaraz R, Ghaderi A, Di Francesco S, Khajei N. 2021. Experimental study of the effect of horizontal screen diameter on hydraulic parameters of vertical drop. *Water Supply*. Volume 21, Issue 5 August 2021. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.077>
- Daneshfaraz R, Hasannia V, Norouzi R, Sihag P, Sadeghfam S, Abraham J. 2021. Investigating the effect of horizontal screen on hydraulic parameters of vertical drop. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. pp. 1-9.
- Daneshfaraz R, Majedi Asl M, Bagherzadeh M. 2020. Experimental analysis of inclined Gabion drop behavior in comparison to the standard stilling basins (USBR). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51(10): 2531-2541. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.303078.668625>
- Daneshfaraz R, Majedi Asl M, Bagherzadeh M. 2021. 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. Civil Engineering*. 53(9): 3665-3678.
- Daneshfaraz R, Majedi Asl M, Bagherzadeh M. 2021. Experimental investigation of the performance of inclined Gabion drop equipped with a horizontal screen. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(1): 81-93. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.308412.668705>
- Daneshfaraz R, Sadeghfam S, Hasanniya V. 2019. 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.
- Esen II, Alhumoud JM, Hannan KA. 2004. Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water International*. 29(4): 523-529.
- Hager WH, Bremen R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*. 27(5): 565-585.
- Hajjaligol S, Ahadiyan J, Sajjadi M, Rita Scorzini A, Di Bacco M, Shafai Bejestan M. 2021. Cross-beam dissipators in abruptly expanding channels: experimental analysis of flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 147(11): 06021012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001622](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622)
- Kabiri-Samani AR, Bakhshian E, Chamani MR. 2017. Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*. 54: 298-306.
- Liu SI, Chen JY, Hong YM, Huang HS, Raikar RV. 2014. Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*. 22(4): 476-486.
- Majedi Asl M, Daneshfaraz R, Chabokpour J, Ghorbani B. 2021. Laboratory study of the performance of Gabion sill on the energy dissipation of downstream of ogee weirs. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(1): 67-80. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.309322.668725>

- Daneshfaraz R, Bagherzadeh M, Esmaeeli R, Norouzi R, Abraham J. 2021. Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. *Water Supply*. 21(1): 217-231.
- Kheybar H, Sajjadi SM, Ahadiyan J. 2021. Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. *Irrigation and Drainage*. 70(5): 1145-1154. <https://doi.org/10.1002/ird.2622>
- Kheybar H, Sajjadi SM, Ahadiyan J, Ghomeshi M. 2025. Investigating the discharge coefficient and efficiency of the pivot side weirs with threshold. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. 3(2): 72-88. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096>
- Mirzaee R, Hosseini K, mousavi F. 2021. Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics*. 16(1): 23-36. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.256774.1486>
- Moore WL. 1943. Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 108(1): 1343-1360.
- Pagliara S, Chiavaccini P. 2006. Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 132(1): 41-48.
- Peyras LA, Royet P, Degoutte G. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of hydraulic Engineering*. 118(5): 707-717.
- Rajaratnam N, Chamani MR. 1995. Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*. 33: 373-384.
- Rand W. 1955. Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 81(9): 1-13.
- Sarkamaryan S, Ahadiyan J. 2020. Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model. *Irrigation Sciences and Engineering*. 43(1): 43-56. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22269.1593>
- USDA-National Agricultural Statistics Service. 2000. Published estimates data base (PEDB) [Online]. Available at <http://www.nass.usda.gov/81/ipedb/> (accessed 15 May 2001; verified 24 Aug. 2001. USDA-NASS, Washington, DC. USA.
- White MP. 1943. Discussion of "Energy Loss at the Base of a Free Overfall" by W. L. Moore. *Transactions of the American Society of Civil Engineers (Transactions, ASCE)*. 108: 1361-1364.
- Wüthrich D, Chanson H. 2014. Hydraulics, air entrainment, and energy dissipation on a Gabion stepped weir. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140(9): 04014046.
- Yarmohammadi B, Ahadian J. 2016. Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*. 39(4): 47-58. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12495>



Laboratory Investigation of Water Flow Interaction and Energy Dissipation Phenomenon in a Vertical Gabion Drop Structure

Keyvan Kazemi Hasanvand¹, Hojatollah Younesi^{*2}, Amir Hamzeh Haghiabi³,
Rasoul Daneshfaraz⁴, Babak Shahinezhad⁵

1- Ph.D., Student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Associate Professor in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3- Professor in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

4- Professor in Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Maragheh University, Maragheh, Iran

5- Assistant Professor in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The gabion vertical drop structure, as one of the modern hydraulic structures, is widely used in watershed management projects and structural operations. The structure is a combination of permeable rock mesh units that dissipate fluid kinetic energy by creating a water level difference between upstream and downstream. The passage of flow through the porous pores of the structure reduces the intensity of bed shear stresses and moderates the peak instantaneous discharges, thereby reducing the rate of channel erosion. Due to the limitations of previous research in comparing the performance of gabion and rigid structures, this research investigated the flow behavior and energy dissipation amount using a laboratory approach, and analyzed their functional differences in flood management and local erosion control. The importance of these structures in unstable riverbeds and vulnerable supercritical flow environments is twofold in promoting the hydrological and environmental sustainability of systems.

Materials and Methods

This research was conducted in the Hydraulic Laboratory of Lorestan University, in 2024-2025, using a flume with a length of 11 m, a width of 0.6 m, and a height of 0.5 m. To comprehensively analyze the hydraulic behavior, a total of 60 experiments were designed and conducted on two types of vertical drop structures: rigid and gabion.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** yonesi.h@lu.ac.ir

Citation: Kazemi Hasanvand, K., Younesi, H., Haghiabi, A.H., Daneshfaraz, R., Shahinezhad, B. 2026. Laboratory Investigation of Water Flow Interaction and Energy Dissipation Phenomenon in a Vertical Gabion Drop Structure. Watershed Management Research. 39(3): 45-63.

DOI: 10.22092/wmrj.2026.371743.1653

Received: 02 January 2026, **Received in revised form:** 26 February 2026, **Accepted:** 19 March 2026,

Published online: 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 45-63.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



In these experiments, three structural thicknesses (X_g) of 20, 30, and 40 cm were investigated in combination with five flow rates of 18, 21, 24, 27, and 30 $L.s^{-1}$ for the control sample. For the gabion samples, three effective porosity levels of 30, 35, and 40 percent were employed, using three categories of gravel materials—fine, moderate, and coarse—with average diameters (D_{50}) of 21, 30.5, and 42 mm, respectively. Also, in all models, the structure height was kept constant at 32 cm to ensure comparison of conditions.

Results and Discussion

Analysis of the obtained data showed that in all models, the relationship between the flow energy dissipation parameter and the relative critical depth was inverse; so that with increasing energy dissipation efficiency, the relative critical depth decreases, and this trend was observed in all experimental scenarios. The findings showed that the combining of the drop structure with a gabion bed significantly increased the energy dissipation of the flow, such that the use of gabions improved energy dissipation efficiency by approximately 60% compared to the rigid drop. The flow passing through the gabion models was divided into two modes: overpass and throughpass, in the throughpass state, the quasi-non-Darcy and nonlinear flow passed through the porous moderate, and the main contribution of energy dissipation was related to this state. Furthermore, increasing the size of the gabion core particles and the effective width of the structure enhanced the energy dissipation process. Finally, the overpass and throughpass discharge values were calculated for all scenarios, and these data can be used as a valuable template for hydraulic modeling and improving the design of similar structures.

Conclusion and Suggestions

In this study, the interaction of water flow and energy dissipation in two types of vertical drop structures: rigid and gabion, were investigated experimentally. The results showed that by using a gabions type and creating a porous and permeable environment, the flow energy can be reduced, thus reducing the need for additional structures such as stilling basins or mesh plates. Furthermore, the effect of parameters such as aggregate particle size, gabion porosity, and structure thickness on energy dissipation efficiency and the share of inflow and overflow was significant. The findings indicate that the use of vertical gabion drops in water transfer projects in steep and mountainous areas is more efficient and sustainable than the rigid model from a technical and economic perspective. In addition, the results of this research can be used to improve the design of vertical gabion drops in watershed management plans.

Keywords: Critical depth, hydraulic resistance, inpass flow, overpass flow, physical model, turbulent flow

Article Type: Research Article

Conflicts of Interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be made available to the audience by correspondence with the responsible author.

Authors' Contribution

First Author: Conceptualization, software/statistical analyses, writing the first version of the article

Second Author: Guidance, editing and reviewing the article, controlling the results

Third Author: Conceptualization, consultation, manuscript review, statistical analyses

Fourth and Fifth Authors: Conceptualization, consultation, manuscript review, statistical analyses