

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سازه گابیونی در میزان استهلاک انرژی پایین دست سرریز اوجی با پرش مستغرق

مهدی ماجدی اصل*، رسول دانشفراز، جعفر چابکپور و برهان قربانی قاضی محله^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۹)

چکیده

در دهه اخیر استفاده از سازه‌های گابیونی در مهندسی هیدرولیک برای پایداری سازه به جهت دارا بودن چگالی و وزن زیاد، زبری برای افت انرژی و تخلخل برای زهکشی رواج زیادی یافته است. این پژوهش به ارزیابی عملکرد سازه‌های تورسنگی در شرایط ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق در استهلاک انرژی نسبی پایین دست سرریز اوجی پرداخته است. پارامترهای مورد ارزیابی در این پژوهش عبارت از: عدد فرود، ارتفاع آب پایه، ضخامت آب پایه و قطر سنگدانه‌ها است. آزمایش‌ها با سه دانه‌بندی سنگدانه با قطر متوسط ۱/۵، ۲/۲ و ۳ سانتی‌متر با سه ارتفاع آب پایه ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و Max و ضخامت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و دبی‌های ۲۰ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که در تمامی مدل‌های مورد آزمایش با کاهش قطر سنگدانه‌های آب پایه، میزان استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد، به نحوی که در آب پایه با سنگدانه به قطر ۱/۵ سانتی‌متر، مقدار استهلاک انرژی به میزان ۳/۶ درصد نسبت به سنگدانه به قطر متوسط ۳ سانتی‌متر افزایش پیدا کرده است. افزایش ارتفاع آب پایه توری سنگی تا میزانی که جریان کاملاً درون‌گذر شود، می‌تواند تا مقدار ۳۳ درصد نسبت به آب پایه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، استهلاک انرژی نسبی بیشتری داشته باشد. همچنین با افزایش قطر آب پایه از ۱۰ سانتی‌متر به ۳۰ سانتی‌متر میزان استهلاک انرژی نسبی تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی نسبی، آب پایه تورسنگی، سرریز اوجی، طول پرش هیدرولیکی نسبی

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

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: majedi@maragheh.ac.ir mehdi.majedi@gmail.com

مقدمه

استهلاک انرژی در پایین دست سرریزها از مهم ترین مسائلی است که به دلیل تأثیر آن بر پایداری سازه و بستر رودخانه، همواره مورد توجه دانشمندان علم هیدرولیک بوده است. حوضچه آرامش از جمله سازه‌هایی است که برای استهلاک انرژی در پایین دست سرریزها احداث می‌شود و هدف از ساخت آن تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش است تا جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی تغییر حالت دهد (۲). در طراحی حوضچه‌های آرامش تعیین دقیق موقعیت پرش اهمیت ویژه‌ای دارد و از این رو یکی از راه‌های کم‌هزینه برای تثبیت پرش هیدرولیکی احداث دیواره‌ای کوتاه در انتهای حوضچه آرامش به صورت آب‌پایه پیوسته است. همچنین در سال‌های اخیر روش‌هایی برای ایجاد پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش بررسی شده که استفاده از صفحات مشبک در مسیر جریان، استفاده از بلوک، استفاده از زبری‌های مصنوعی در کف حوضچه آرامش و نیز استفاده از سازه‌های گابیونی در مسیر جریان از جمله این روش‌هاست. حوضچه آرامش با توجه به ابعاد آن باید بیشترین میزان استهلاک انرژی را داشته باشد تا از نظر اقتصادی بهینه و مقرون به صرفه باشد. از این رو طراحی حوضچه آرامش، نوع و ابعاد آب‌پایه انتهای آن باید به گونه‌ای باشد که تراز پایاب همواره بزرگ‌تر یا مساوی تراز ثانویه پرش باشد، در این صورت پرش کامل در داخل حوضچه تشکیل می‌شود و بیشترین میزان استهلاک انرژی در این حالت اتفاق می‌افتد. باید توجه داشت که اگر عمق پایاب بزرگ‌تر از عمق پایاب مورد نیاز پرش آزاد باشد، پرش به شکل مستغرق شکل می‌گیرد.

سازه‌های گابیونی یا تورسنگی کاربردهای زیادی در ساختمان سدهای تأخیری، مهندسی رودخانه و حفاظت خاک دارند. از مزایای استفاده از سازه‌های تورسنگی می‌توان به انعطاف پذیر بودن در برابر نیروهای خمشی و کششی، دوام، نفوذپذیری و مقرون به صرفه بودن آن اشاره کرد (۷). بهره‌گیری از سازه‌های تورسنگی می‌تواند موجب عبور مواد آلی و معلق از بین سنگدانه‌ها و عدم ته‌نشست انباشته شده در پشت سازه شود

که این امر از لحاظ طبیعی و محیط زیستی اهمیت بسزایی دارد. همچنین باکتری‌های موجود در سطح مصالح سنگی، با وجود هوادهی ناشی از تلاطم عبور جریان از بین سنگدانه‌ها باعث تجزیه هوازی مواد آلی شده که موجب پالایش و تصفیه آب می‌شود. همچنین از سازه گابیونی می‌توان به‌عنوان یک راه حل پایدار برای استهلاک انرژی در سازه‌های هیدرولیکی استفاده کرد (۹).

اولین مطالعه در زمینه پرش هیدرولیکی مستغرق توسط راجاراتنام و گوویندا راتو (۲۳) انجام شده است که روابطی را برای محاسبه استهلاک انرژی و عمق استغراق ارائه دادند. لانگ و همکاران (۱۴) به مطالعه پرش هیدرولیکی مستغرق در پایین دست یک دریچه کشویی در کانال مستطیلی با بستر صاف پرداختند. آنها مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق شامل نیمرخ سطح آب، توزیع سرعت و نوسانات آن، تنش برشی ناشی از تلاطم و شدت تلاطم را بررسی کردند و پرش مستغرق را از نظر توسعه جریان به سه قسمت: ناحیه در حال توسعه، ناحیه توسعه یافته و ناحیه بهبود یافته تقسیم کردند. آنها همچنین فاصله بین دریچه و انتهای ناحیه توسعه یافته را طول پرش هیدرولیکی مستغرق در نظر گرفتند در این تقسیم بندی ناحیه در حال توسعه ۱۱ درصد و ناحیه توسعه یافته ۵۱ درصد طول پرش مستغرق را تشکیل می‌داد. نصرآبادی و همکاران (۲۱) خصوصیات پرش آزاد و مستغرق در بسترهای صاف و زبر در یک عمق پایاب ثابت را بررسی و به این نتیجه رسیدند که در اعداد فرود بزرگ‌تر از حدود ۴، طول پرش آزاد همواره بزرگ‌تر یا مساوی طول پرش مستغرق بوده و همچنین افت انرژی نسبی پرش مستغرق در اعداد فرود کم، همواره بزرگ‌تر یا مساوی افت انرژی نسبی پرش آزاد است. قاسمی و همکاران (۱۰) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق و توسعه روابطی جدید برای برآورد خصوصیات آن پرداختند. نتایج نشان داد که در یک عدد فرود معین، طول پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی نسبی پرش مستغرق به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش

جریان روی سرریزها و آبشکن‌های سنگریزه‌ای انجام دادند. یافته‌های آنها نشان داد که تغییرات جرم و مومتم بین جریان اصلی و جریان در محیط متخلخل اطراف زوایای بالادست و پایین دست سرریز و آبشکن غالب بوده و همچنین خطوط جریان به صورت منقبض می‌شوند. لیو و همکاران (۱۵) جریان آشفته در اطراف یک پشته سنگریزه‌ای در کف یک فلوم با جریان آزاد را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که برای سازه‌های متخلخل ناحیه چرخش در جهت پایین دست به دلیل عبور جریان از درون سرریز طولانی تر می‌شود. همچنین افزایش تخلخل سبب کاهش شدت تلاطم، انرژی جنبشی و تنش برشی رینولدز می‌شود. شرایط جریان با سطح آزاد و جریان مستغرق در گابیون‌ها توسط محمد (۱۸) مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهش که شامل سه قطر متوسط شن است، نشان داد که دو نوع جریان شامل: جریان از روی سرریز گابیونی و جریان از درون بدنه سرریز گابیونی اتفاق می‌افتد و همچنین نشان داد که میزان عمق آب ایجاد شده در بالادست گابیون کمتر از مقدار عمق ناشی از سرریز غیرقابل نفوذ با دبی یکسان است. شاکر و همکاران (۲۸) تأثیر ارتفاع گابیون و درشتی مصالح در عمق جریان بالادست را با استفاده از چهار ارتفاع گابیون و چهار دانه بندی، مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل نتایج تجربی نشان داد وقتی که دبی و درشتی دانه بندی افزایش پیدا کند، کاهش نسبی در عمق جریان بین ۱۷ تا ۳۸ درصد برای نوع جریان درون گذر متغیر 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 سانتی متر و ۳۰ سانتی متر می‌شود. واشیست (۲۹) طی یک سری مطالعات آزمایشگاهی به بررسی تأثیر استهلاک انرژی با استفاده از پارامترهای مختلف مانند سرعت جریان، مشخصه دبی، عمق جریان و استهلاک انرژی سرریز گابیونی پله‌ای پرداخت. در این پژوهش، با انجام ۲۵ آزمایش روی سرریز گابیونی پله‌ای با مدل‌های مختلف در کانال باز به طول ۵ متر و عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۳ متر این نتیجه حاصل شد که اثر

هیدرولیکی آزاد است. به علاوه اینکه برای پرش مستغرق، در یک عدد فرود معین با افزایش نسبت استغراق، طول پرش و عمق استغراق روی دریاچه افزایش و افت انرژی نسبی آن کاهش می‌یابد. پورعبدالله و همکاران (۲۲) مشخصات پرش‌های هیدرولیکی آزاد و مستغرق در حوضه های آرامش مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد عمق مستغرق نسبت به پرش کلاسیک ۲۲/۳ درصد کاهش یافته است. طول پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در مقایسه با پرش کلاسیک به ترتیب ۴۷ و ۳۲/۱ درصد کاهش یافت.

میچیکو و همکاران (۱۶) هیدرودینامیک یک پشته قلوه سنگی را به صورت نظری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و با انجام تحلیل یک بعدی روی جریان یکنواخت دائمی از میان سرریز، بیان داشتند دبی جریان، تابع پارامترهایی مانند عمق جریان در بالادست و پایین دست سرریز، تخلخل، قطر ذرات پشته سنگریزه‌ای و طول سرریز است. کلز (۱۲) جریان متغیر تدریجی از روی بند سنگریزه‌ای را برای دو شرایط جریان مختلف شامل ریزش جزئی و کامل از روی بند را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که نسبت گذر جریان از داخل بند سنگریزه‌ای به گذر جریان از روی آن در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۵ است. خیرایی و فتحی (۱۳) به بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای شیب دار تورسنگی در شرایط جریان مستغرق پرداختند. در این پژوهش، ۸ مدل مختلف سرریز گابیونی و ۳ مدل سرریز نفوذناپذیر در یک فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای دامنه وسیعی از دبی، عمق بالادست، عمق پایین دست، اندازه مصالح، شیب بالادست و شیب پایین دست انجام شد. نتایج نشان داد در تمامی مدل‌های گابیونی با افزایش نسبت عمق پایین دست به عمق بالادست سرریز (Y2/Y1) فاکتور کاهش دبی، کاهش می‌یابد. به ازای نسبت Y2/Y1 ثابت، با افزایش شیب بالادست و یا پایین دست سرریز کرامپ گابیونی، فاکتور کاهش دبی، کاهش می‌یابد. همچنین اندازه مصالح تأثیر معنی داری بر فاکتور کاهش دبی ندارد. میچیکو و همکاران (۱۷) مطالعه آزمایشگاهی در زمینه

موج دار نیم دایره، ذوزنقه و مثلثی به ترتیب موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۱۰، ۱۱ و ۱۴ درصد می شود. همچنین محدوده کاهش استهلاک انرژی برای بستر موج دار نیم دایره ۱۴٪ تا ۶۴٪ و برای بستر موج دار ذوزنقه و مثلثی به ترتیب ۱۵٪ تا ۶۵٪ و ۱۶٪ تا ۶۶٪ بوده است. مردانی و همکاران (۱۹) به بررسی میزان استهلاک انرژی و آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش در حضور بلوک و عدم حضور آن پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از بلوک با توجه به هندسه حوضچه آرامش، نحوه قرارگیری بلوک و عدد فرود می تواند به طور میانگین ۱۵٪ موجب افزایش استهلاک انرژی شود. همچنین استفاده از سطح زیر موجب کاهش عمق ثانویه بین ۱۸ تا ۳۷ درصد نسبت به سطح صاف می شود. صادق فام و همکاران (۲۶) با بررسی آزمایشگاهی رفتار صفحات متخلخل در جریان فوق بحرانی، بازه عدد فرود ۲/۵ تا ۸/۵ نشان دادند که صفحات متخلخل، نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد، افت انرژی بیشتری ایجاد می کند. همچنین آرایش دوتایی صفحات عملکرد بهتری نسبت به آرایش منفرد دارند در حالی که فاصله بین این صفحات تأثیری بر نتایج ندارد. دانشفراز و همکاران (۴) تأثیر محل قرارگیری صفحات متخلخل در میزان استهلاک انرژی را بررسی و نشان دادند که میزان استهلاک انرژی ناشی از صفحات متخلخل بیشتر از استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش آزاد است. همچنین با افزایش عدد فرود میزان استهلاک انرژی افزایش می یابد. دانشفراز و همکاران (۵) به بررسی رفتار جریان در حضور صفحات متخلخل روی پروفیل سطح آب و استهلاک انرژی در اعداد فرود در محدوده بین ۲ تا ۱۰ و صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد پرداختند. در این پژوهش مجموعه ای از معادلات در رابطه با نسبت عمق پرش هیدرولیکی از طریق صفحات متخلخل برای پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق را به دست آوردند. همچنین به بررسی تأثیر بلوک ها روی استهلاک انرژی پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش عدد فرود، درصد سهم پرش هیدرولیکی افزایش و سهم های بلوک ها و صفحات متخلخل

پارامترهای مختلف نقش بسزایی در استهلاک انرژی و در نتیجه جلوگیری از پدیده فرسایش بیش از حد ایفا می کند. همچنین مشخص شد سازه های گابیونی پله ای ممکن است حداکثر انرژی را تا حدود ۸۷ درصد مستهلک کند. دانشفراز و همکاران (۸) به بررسی آزمایشگاهی استفاده همزمان شبکه مشبک افقی و گابیون در سازه شیب شکن مایل پرداختند. به کارگیری همزمان گابیون در قسمت شیب دار و صفحات مشبک افقی در لبه شیب شکن مایل عدد فرود پایین دست را به صورت چشمگیری کاهش داد. بررسی و مقایسه نتایج مربوط با شیب شکن مایل ساده نشان داد که به کارگیری گابیون در سطح شیب دار و صفحات متخلخل در لبه شیب شکن مایل باعث افزایش استهلاک انرژی است. ماجدی اصل و همکاران (۲۰) عملکرد آب پایه تورسنگی بر میزان استهلاک انرژی پایین دست سرریزهای اوجی در پرش هیدرولیکی آزاد را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که قطر سنگدانه و میزان بازشدگی آب پایه بر استهلاک انرژی مؤثر است.

اولین مطالعه در مورد کنترل پرش هیدرولیکی با آب پایه را شکری (۲۵) انجام داد. وی با آزمایش هایی نشان داد که عدد فرود در مقاطع اولیه پرش، فاصله قرارگیری دیواره از ابتدای پرش، ارتفاع نسبی دیواره و عمق پایاب در چگونگی شکل گیری جریان عبوری از آب پایه مؤثرند. سعدی و سجادی (۲۷) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه پلکانی روزنه دار بر مشخصات پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز اوجی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از آستانه پلکانی روزنه دار اثری مثبت بر کنترل و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش دارد. همچنین آستانه با ۱۲ درصد بازشدگی به طور متوسط افت انرژی نسبی را ۱۱ درصد نسبت به پرش هیدرولیکی کلاسیک افزایش می دهد. عبدالحلیم (۱) به بررسی تأثیر بستر موج دار بر میزان استهلاک انرژی و خصوصیات پرش هیدرولیکی پرداختند. این پژوهش با ۳ شکل بستر موج دار، ۵ مقدار زبری مختلف و ۵ دبی در محدوده اعداد فرود ۲ تا ۶/۵ انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بستر

آنالیز ابعادی

برای بررسی عوامل مؤثر بر استهلاک انرژی پایین دست سرریز توسط آب پایه تورسنگی، در این پژوهش با مطالعه شرایط جریان درون محیط سنگریزه‌ای و فیزیک حاکم بر جریان عبوری از سرریز، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر استهلاک انرژی در پایین دست سرریز توسط آب پایه تورسنگی به صورت رابطه ۱ شناسایی شد:

$$f_1(\rho, \mu, g, q, y_0, y_1, y_2, y_3, L_j, h, w, d, L_s, z, E_0, E) = 0 \quad (1)$$

که در آن: ρ جرم مخصوص آب، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش زمین، q دبی واحد عرض، y_0 عمق آب قبل از سرریز، y_1 عمق آب پایین دست سرریز، y_2 عمق آب قبل از آب پایه، y_3 عمق آب بعد از آب پایه، L_j (طول پرش هیدرولیکی، h) ارتفاع آب پایه، L طول آب پایه، w عرض آب پایه، d قطر متوسط سنگ‌دانه‌ها، L_s فاصله آب پایه از سرریز، z ارتفاع سرریز، E_0 انرژی در بالادست و ΔE استهلاک انرژی است.

بر اساس قضیه پی باکینگهام پارامترهای مؤثر استخراج شده، تحلیل ابعادی صورت گرفت و معادله بدون بعد زیر، حاصل شد:

$$f_2\left(\frac{q\rho}{\mu}, \frac{q}{y_1\sqrt{gy_1}}, \frac{y_0}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_3}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{d}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{z}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{E_0}{y_1}, \frac{\Delta E}{y_1}\right) = 0 \quad (2)$$

با دقت در معادله ۲ مشخص شد که عبارت $\frac{q\rho}{\mu}$ نمایانگر عدد رینولدز است و عبارت $\frac{q}{y_1\sqrt{gy_1}}$ معرف عدد فرود است. لذا رابطه ۳ به ترتیب زیر به دست آمد:

$$f_3(\text{Re}, \text{Fr}, \frac{y_0}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_3}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{d}{y_1}, \frac{L_s}{y_1}, \frac{z}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{E_0}{y_1}, \frac{\Delta E}{y_1}) = 0 \quad (3)$$

با توجه به اینکه عبارت‌های $\frac{z}{y_1}$ و $\frac{w}{y_1}$ در تمامی مدل‌های آزمایش دارای مقداری ثابت هستند، بنابراین این دو پارامتر بررسی نخواهد شد.

کاهش می‌یابد. بنابراین در اعداد فرود بالا، صفحات متخلخل نقش تشکیل دهنده پرش هیدرولیکی تحمیلی را داشته، ولی در اعداد فرود پایین به فرایند استهلاک انرژی کمک می‌کنند. دانشفراز و همکاران (۶) به بررسی استهلاک انرژی صفحات متخلخل دوگانه افقی نصب شده بر لبه شیب‌شکن قائم پرداخته و نتایج آن با نتایج حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک، دو، سه و چهار مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله نسبی و درصد تخلخل صفحات، طول حوضچه آرامش شیب‌شکن کاهش می‌یابد. همچنین در مقایسه با حوضچه‌های آرامش نیز، به‌کارگیری صفحات مشبک افقی دوگانه سبب کاهش طول حوضچه آرامش شیب‌شکن شده و انرژی نسبی باقی‌مانده و عمق نسبی پایین دست به ترتیب بیش از ۳۵ و ۴۹ درصد کاهش یافت.

با مطالعه پیشینه پژوهش مشاهده شد که بررسی اثر سازه‌های الحاقی مستهلک کننده انرژی از جمله آستانه و صفحات متخلخل در پایین دست سرریزها و تندآب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از مسائل مهم و جدید در مهندسی هیدرولیک است. امروزه سازه‌های تورسنگی علاوه بر ارزان بودن و سهولت اجرا به علت عبور جریان به حالت درون گذر و روگذر سبب استهلاک بالای انرژی می‌شود که این خصوصیت مورد توجه پژوهشگران است. از طرفی برای جلوگیری از فرسایش و آبشستگی پایین دست سرریز اوجی و کنترل انرژی اضافی جریان بایستی تمهیداتی اتخاذ شود. بنابراین در این مطالعه تأثیر سه پارامتر دانه‌بندی، ارتفاع آب پایه و بازشدگی در عرض آب پایه بر میزان استهلاک انرژی و طول پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز اوجی با پرش مستغرق مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی عملکرد سازه‌های تورسنگی در پایین دست سرریزهای اوجی دو پارامتر استهلاک انرژی و طول پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با قرار دادن آب پایه تورسنگی در پایین دست سرریز، بخشی از استهلاک انرژی به موجب پرش هیدرولیکی ناشی از وجود مانع اتفاق می افتد و بخشی دیگر به سبب عبور جریان از داخل آب پایه تورسنگی و همچنین وجود جریان ریزشی از روی آب پایه رخ می دهد. رابطه (۱۰) نشان دهنده میزان استهلاک انرژی ناشی از آب پایه تورسنگی و رابطه (۱۱) بیانگر میزان استهلاک انرژی ناشی از آب پایه و پرش هیدرولیکی است:

$$\Delta E_1 = E_1 - E_3 \quad (10)$$

$$\Delta E_2 = E_2 - E_3 \quad (11)$$

معرفی مدل آزمایشگاهی

آزمایش های انجام شده در این پژوهش در یک کانال مستطیلی به طول ۱۳ متر، عرض ۱۲۰ سانتی متر و ارتفاع ۸۰ سانتی متر با کف فلزی و دیواره از جنس شیشه به ضخامت ۱ سانتی متر که مشاهده دقیق رفتار جریان را امکان پذیر می سازد، انجام شد. جریان مورد نیاز توسط یک پمپ با قابلیت پمپاژ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه که آب را از مخزن به داخل کانال پمپاژ می کند تأمین می شود. برای کاهش تلاطم آب در مقطع ورودی کانال دو توری فلزی تعبیه شده و همچنین در ابتدای کانال یک قطعه فوم شناور به مساحت ۲ متر مربع و ضخامت ۲۰ سانتی متر روی سطح آب قرار داده شد. آب پایه استفاده شده در این آزمایش، از میلگرد شماره ۶ به عرض ۱۲۰ سانتی متر، طول و ارتفاع متغیر ساخته شد، سپس با توری فلزی به ضخامت ۱ میلی متر و قطر چشمه ۱ سانتی متر محصور شد. در کلیه آزمایش ها شیب کانال صفر در نظر گرفته شد. شکل ۲ شکل نمادین کانال و تجهیزات نصب شده روی آن و شکل ۳ مدل ساخته شده سرریز و آب پایه تورسنگی و جریان عبوری از آن و تشکیل پرش هیدرولیکی در قبل از آب پایه را نشان می دهد.

در این پژوهش برای ساخت آب پایه تورسنگی از سنگدانه های با سه دانه بندی ریزدانه (قطر متوسط ۱/۵ سانتی متر)، متوسط (قطر متوسط ۲/۲ سانتی متر) و درشت دانه (قطر متوسط ۳ سانتی متر) مورد استفاده قرار گرفت. آب پایه در سه ارتفاع ۱۰ و ۲۰

همچنین در تمامی مدل های پژوهش جریان متلاطم است (Re=6.2×10⁵≥2000) لذا پارامتر بی بعد عدد رینولدز قابل صرف نظر است (۱۱ و ۲۴). در نهایت با ساده سازی و تقسیم برخی پارامترهای بی بعد برهم نیز رابطه استهلاک انرژی نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی را می توان به صورت تابعی از عوامل بدون بعد زیر نوشت:

$$\frac{L_j}{y_1}, \frac{\Delta E}{E_0} = f_4 \left(Fr, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_3}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{d}{y_1}, \frac{L_s}{y_1} \right) = 0 \quad (4)$$

محاسبه افت انرژی

برای محاسبه افت انرژی، می بایست انرژی مخصوص در مقاطع مختلف جریان (i) محاسبه شود. که بر اساس رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$E_i = y_i + \frac{(V_i^2)}{2g} \quad (5)$$

در این رابطه، E_i : انرژی مخصوص؛ V_i : سرعت آب و از رابطه $V_i = \frac{Q}{A}$ قابل محاسبه است؛ y_i : عمق آب و g : شتاب گرانش کره زمین است. (i=1,2,3).

به منظور محاسبه عدد فرود در پنجه سرریز می بایست میزان عمق آب و سرعت در پنجه سرریز محاسبه شود. رابطه (۶) برای محاسبه سرعت آب در پنجه استفاده می شود:

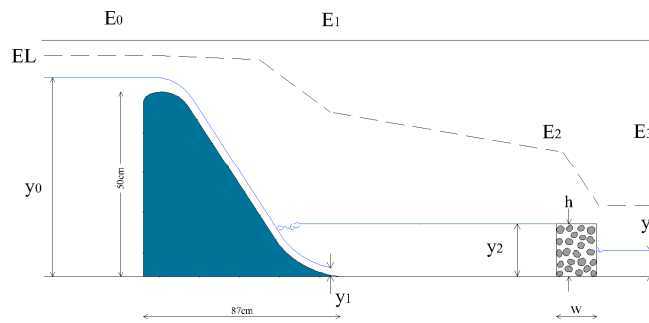
$$V_1 = \sqrt{2g \left(z - \frac{H_d}{2} \right)} \quad (6)$$

در رابطه بالا، V_1 : سرعت آب در پایین دست سرریز؛ z : اختلاف رقوم آب در سراب و پایاب و H_d : بار استاتیکی جریان روی سرریز است. در سرریزهای اوجی میزان انرژی مخصوص در پنجه سرریز و بالادست سرریز برابر فرض می شود (۳). همچنین برای محاسبه عمق آب پایین دست سرریز و عدد فرود در پنجه سرریز از روابط زیر استفاده شد:

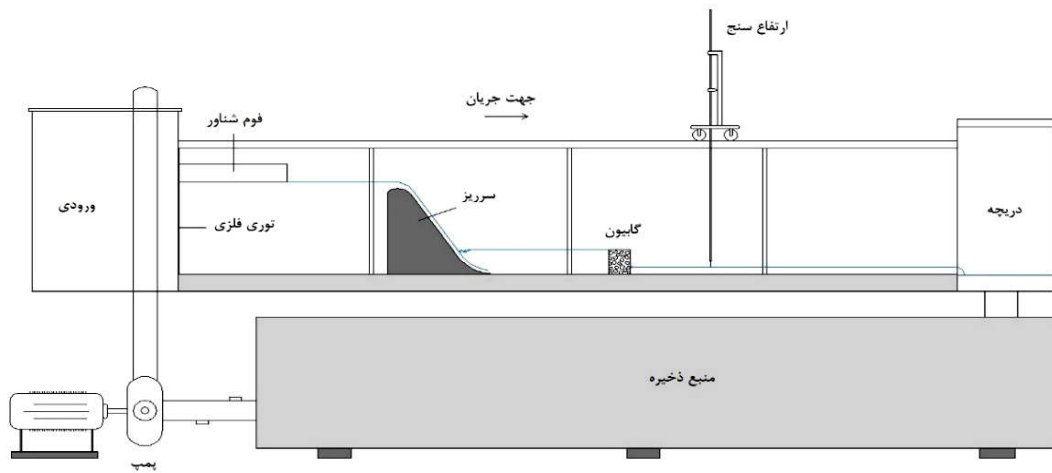
$$E_0 = E_1 \quad (7)$$

$$y_1 = E_0 - \frac{V_1^2}{2g} \quad (8)$$

$$Fr_1 = \frac{V_1^2}{\sqrt{gy_1}} \quad (9)$$



شکل ۱. نمادین مدل آزمایشگاهی و پرش هیدرولیکی مستغرق



شکل ۲. نمادین کانال و تجهیزات



شکل ۳. نمایی از تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق در پنجه سرریز با وجود آب پایه تورسنگی در پایین دست

در نتیجه کاهش عدد فرود مقدار جریان بیشتری از روی آب پایه عبور کرده و در نتیجه استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت آب پایه به علت افزایش لایه بندی و همپوشانی بیشتر سنگ‌دانه‌ها، میزان تأثیر دانه بندی کاهش یافته است. با توجه به شکل ۴-الف در شرایط آب پایه با ضخامت ۱۰ سانتی متر استهلاک انرژی نسبی ریزدانه حدود ۶/۵ درصد بیشتر از درشت‌دانه بوده که با افزایش عدد فرود اختلاف بیشتر شده است. در شکل ۴-ب برای ضخامت ۲۰ سانتی متر استهلاک انرژی نسبی ریزدانه حدود ۳/۶ درصد بیشتر از درشت‌دانه بوده است و در شکل ۴-ج برای ضخامت ۳۰ سانتی متر این اختلاف ۲/۹ درصد رسیده است.

شکل ۵ مربوط به استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش هیدرولیکی و آب پایه تورسنگی است، که در آن محور قائم استهلاک انرژی بین مقطع ۱ (پنجه سرریز) و مقطع ۲ (بعد از آب پایه) است. بررسی نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود میزان استهلاک انرژی نسبی کل افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر سنگدانه‌ها، میزان استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد، ولی به طوری که مشخص است میزان تأثیر قطر سنگدانه‌ها در میزان استهلاک انرژی نسبی کل ناچیز است. به طور کلی نتیجه‌ای که از شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت این است که با افزایش قطر سنگدانه میزان استهلاک انرژی نسبی کاهش یافته و بیشترین میزان استهلاک انرژی نسبی مربوط به دانه بندی ریزدانه است. در واقع با افزایش قطر سنگدانه، میزان جریان عبوری از میان دانه‌های سنگی و فضای متخلخل بیشتر می‌شود که به تبع آن میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. از طرفی برای دانه بندی ریز نیز با توجه به اینکه گرفتاری جریان زیاد است و فضای خالی کمتری در میان دانه‌های سنگی وجود دارد، بنابراین جریان عبوری تماس بیشتری با فضای متخلخل دارد و سبب مستهلک کردن بخش اعظم جریان می‌شود.

سهم هر کدام از عوامل پرش هیدرولیکی و آب پایه تورسنگی در استهلاک انرژی از تفاضل میانگین استهلاک انرژی کل و استهلاک ناشی از آب پایه با دانه بندی متوسط، ارتفاع و ضخامت ۲۰

سانتی متر و Max (ارتفاعی که جریان کاملاً درون‌گذر باشد) و ضخامت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر در جهت جریان ساخته شد. به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و شبیه سازی جریان عبوری از سرریز، مدل آزمایشگاهی یک سرریز از جنس ورق گالوانیزه ساخته شد. سرریز به عرض ۱۲۰ سانتی متر، ارتفاع ۵۰ سانتی متر و شعاع پنجه ۰/۲۸ متر و تاج سرریز بر اساس دبی بیشینه ۴۵ لیتر بر ثانیه طراحی و اجرا شد. فاصله آب پایه از سرریز به گونه‌ای انتخاب شد که در کوچک‌ترین حالت آن یعنی ارتفاع و ضخامت ۱۰ سانتی متری پرش هیدرولیکی از پنجه سرریز شروع شود (آستانه استغراق)، که این فاصله ۱۳۸ سانتی متر به دست آمد. بعد از روشن کردن پمپ و تنظیم و پایداری جریان، دبی عبوری توسط دستگاه دبی سنج التراسونیک قرائت شد و عمق جریان توسط عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۱ میلی متر قرائت شد. آزمایش‌ها در پنج دبی ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. جدول ۱ شامل پارامترهای مورد بررسی و تعداد آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش است.

نتایج و بحث

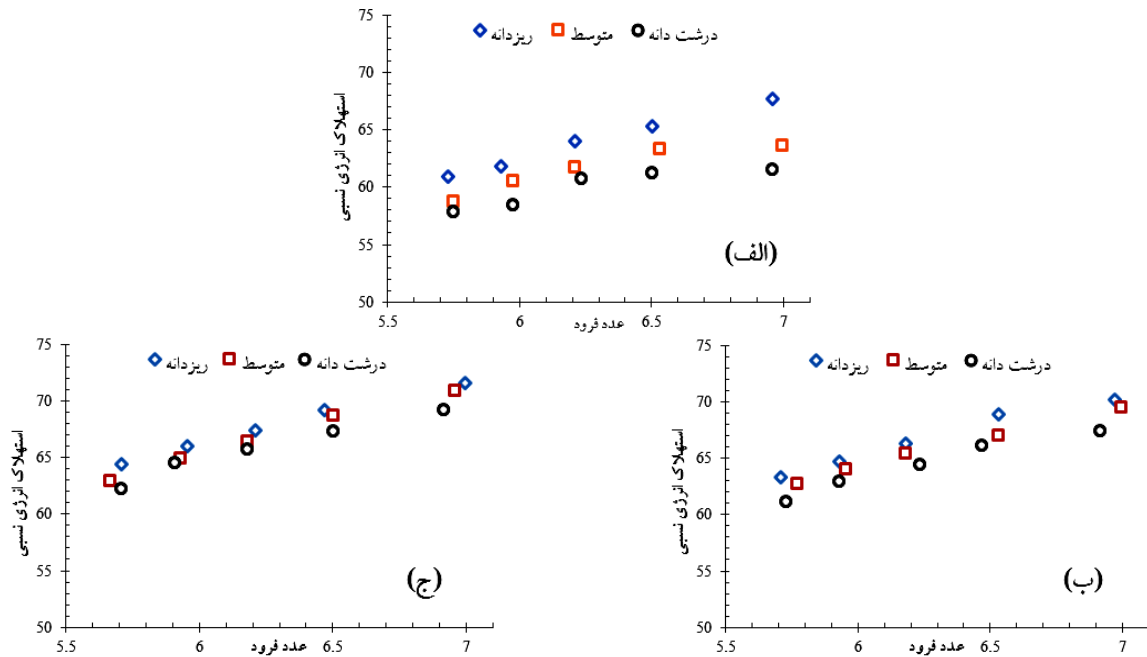
در این پژوهش، در مجموع ۲۷ مدل با ۱۳۵ آزمایش مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در زیر به بررسی تأثیر هر کدام از این متغیرها بر میزان استهلاک انرژی نسبی و طول پرش هیدرولیکی نسبی پرداخته شده است:

اثر دانه بندی

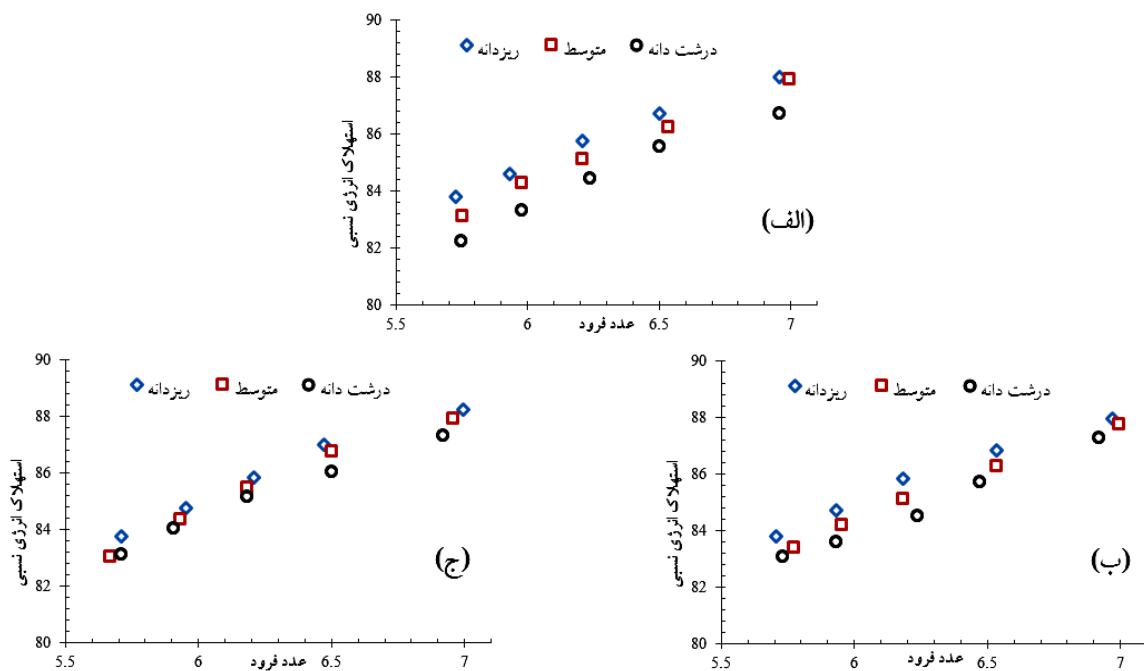
در شکل ۴ تأثیر دانه بندی بر استهلاک انرژی ناشی از آب پایه تورسنگی در سه ضخامت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر به ازای اعداد فرود مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش دبی عبوری از سرریز اوجی، میزان عمق جریان در پنجه سرریز نسبت به سرعت جریان افزایش بیشتری دارد و با افزایش دبی جریان، عدد فرود در پنجه سرریز کاهش می‌یابد. بنابراین با کاهش عدد فرود میزان استهلاک انرژی نسبی ناشی از آب پایه کاهش می‌یابد. علت این پدیده آن است که با افزایش دبی و

جدول ۱. مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شده در این پژوهش

شماره مدل	D50 (cm)	ارتفاع آب پایه (h) (cm)	ضخامت آب پایه (w) (cm)
۱	۱/۵	۱۰	۱۰
۲	۱/۵	۱۰	۲۰
۳	۱/۵	۱۰	۳۰
۴	۱/۵	۲۰	۱۰
۵	۱/۵	۲۰	۲۰
۶	۱/۵	۲۰	۳۰
۷	۱/۵	Max	۱۰
۸	۱/۵	Max	۲۰
۹	۱/۵	Max	۳۰
۱۰	۲/۲	۱۰	۱۰
۱۱	۲/۲	۱۰	۲۰
۱۲	۲/۲	۱۰	۳۰
۱۳	۲/۲	۲۰	۱۰
۱۴	۲/۲	۲۰	۲۰
۱۵	۲/۲	۲۰	۳۰
۱۶	۲/۲	Max	۱۰
۱۷	۲/۲	Max	۲۰
۱۸	۲/۲	Max	۳۰
۱۹	۳	۱۰	۱۰
۲۰	۳	۱۰	۲۰
۲۱	۳	۱۰	۳۰
۲۲	۳	۲۰	۱۰
۲۳	۳	۲۰	۲۰
۲۴	۳	۲۰	۳۰
۲۵	۳	Max	۱۰
۲۶	۳	Max	۲۰
۲۷	۳	Max	۳۰



شکل ۴. استهلاک انرژی نسبی ناشی از آب پایه با ارتفاع ۲۰ سانتی متر: الف) ضخامت ۱۰ سانتی متر، ب) ضخامت ۲۰ سانتی متر و ج) ضخامت ۳۰ سانتی متر

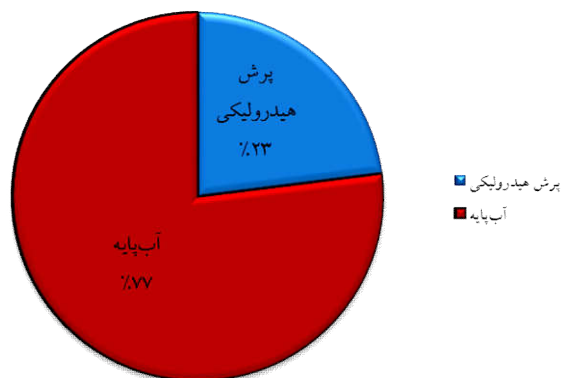


شکل ۵. استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش و آب پایه با ارتفاع ۲۰ سانتی متر: الف) ضخامت ۱۰ سانتی متر، ب) ضخامت ۲۰ سانتی متر و ج) ضخامت ۳۰ سانتی متر

اثر ارتفاع

به منظور بررسی اثر ارتفاع آب پایه روی استهلاک انرژی پایین دست سرریز، از آب پایه با سه ارتفاع ۱۰ و ۲۰ سانتی متر و Max (جریان

سانتی متر به دست می آید. با توجه به شکل ۶ مقدار سهم پرش هیدرولیکی در استهلاک انرژی ۲۳ درصد و سهم آب پایه تورسنگی ۷۷ درصد است.



شکل ۶. سهم تأثیر پرش هیدرولیکی و آب پایه بر استهلاك انرژی

آن است که به‌ازای افزایش عدد فرود به‌دلیل وجود جریان درون‌گذر بیشتر، میزان استهلاك انرژی نسبی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۸- الف در آب پایه با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر میزان استهلاك انرژی ناشی از آب پایه و پرش هیدرولیکی برای آب پایه با ارتفاع بیشینه ۰/۴ درصد از آب پایه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بیشتر است. در شکل ۸- ب آب پایه با ارتفاع بیشینه ۱/۲ درصد بیشتر از آب پایه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استهلاك انرژی داشته است و در شکل ۸- ج مربوط به آب پایه با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، ۱/۱ درصد بوده است.

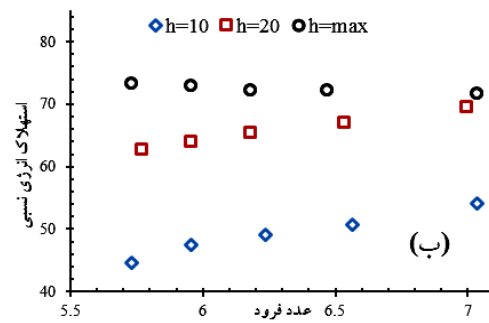
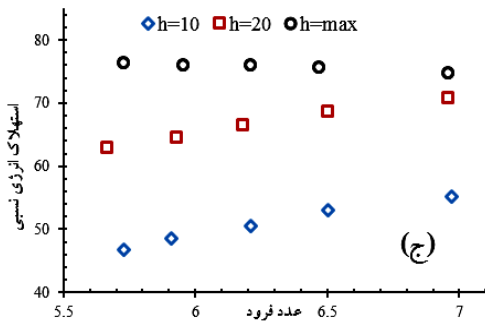
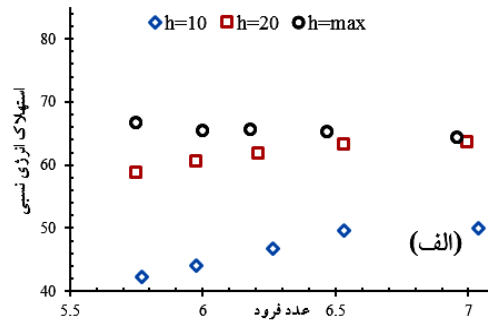
اثر ضخامت

در این پژوهش برای کنترل پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی در پایین دست سرریز اوجی، از آب پایه با سه ضخامت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد و تأثیر ضخامت بر میزان استهلاك انرژی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ بیانگر تأثیر ضخامت آب پایه بر میزان استهلاك انرژی آب پایه با سه ارتفاع ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر و بیشینه در دانه‌بندی متوسط است.

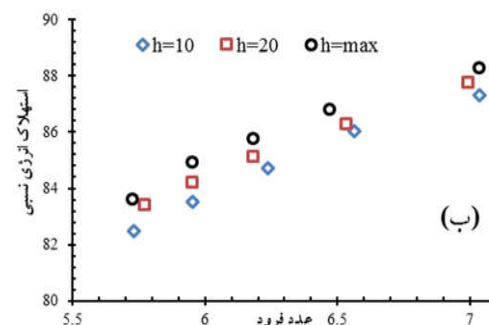
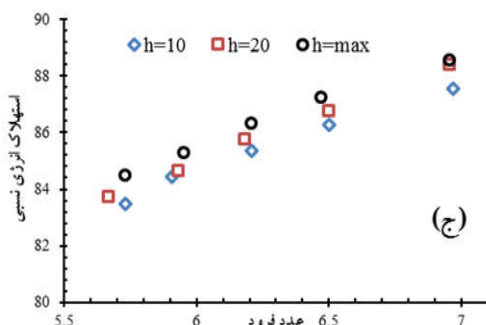
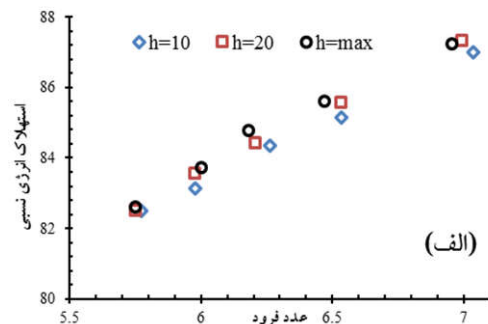
بررسی تحلیلی شکل ۹ نشان می‌دهد که آب پایه با ارتفاع ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر با افزایش عدد فرود به سبب وجود جریان روگذر میزان استهلاك انرژی افزایش می‌یابد. اما در ارتفاع بیشینه چون جریان کاملاً درون‌گذر است، این مقدار ثابت است. در شکل ۹- الف برای آب پایه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، میزان

کاملاً درون‌گذر) و در سه ضخامت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و دانه‌بندی متوسط با قطر ۲/۲ سانتی‌متر استفاده شد. شکل ۷ تأثیر ارتفاع آب پایه بر استهلاك انرژی نسبی در پایین دست سرریز اوجی را نشان می‌دهد. بررسی تحلیلی این شکل نشان می‌دهد که در آب پایه با ارتفاع ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر با افزایش عدد فرود (کاهش دبی) میزان استهلاك انرژی نسبی افزایش می‌یابد. علت اصلی این افزایش به خاطر این است که هنگام افزایش دبی، جریان بیشتری از روی آب پایه عبور کرده و استهلاك انرژی نسبی ناشی از آب پایه کاهش می‌یابد. در شکل ۷- الف برای آب پایه با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر میزان استهلاك انرژی آب پایه ۲۰ سانتی‌متری ۳۲ درصد از آب پایه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری بیشتر بوده است، برای آب پایه با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر (شکل ۷- ب) ۳۳/۷ درصد و در شکل ۷- ج مربوط به آب پایه با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر این مقدار به ۳۱/۴ درصد رسیده است. با توجه به اینکه در آزمایش‌های مربوط به آب پایه با ارتفاع بیشینه هیچ جریان روگذری وجود نداشت لذا با افزایش دبی، میزان استهلاك انرژی تغییر چندانی نداشته است. با بررسی شکل ۷ ملاحظه می‌شود که میزان استهلاك انرژی آب پایه با ارتفاع بیشینه به‌طور میانگین حدود ۱۱ درصد از آب پایه با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بیشتر بوده است.

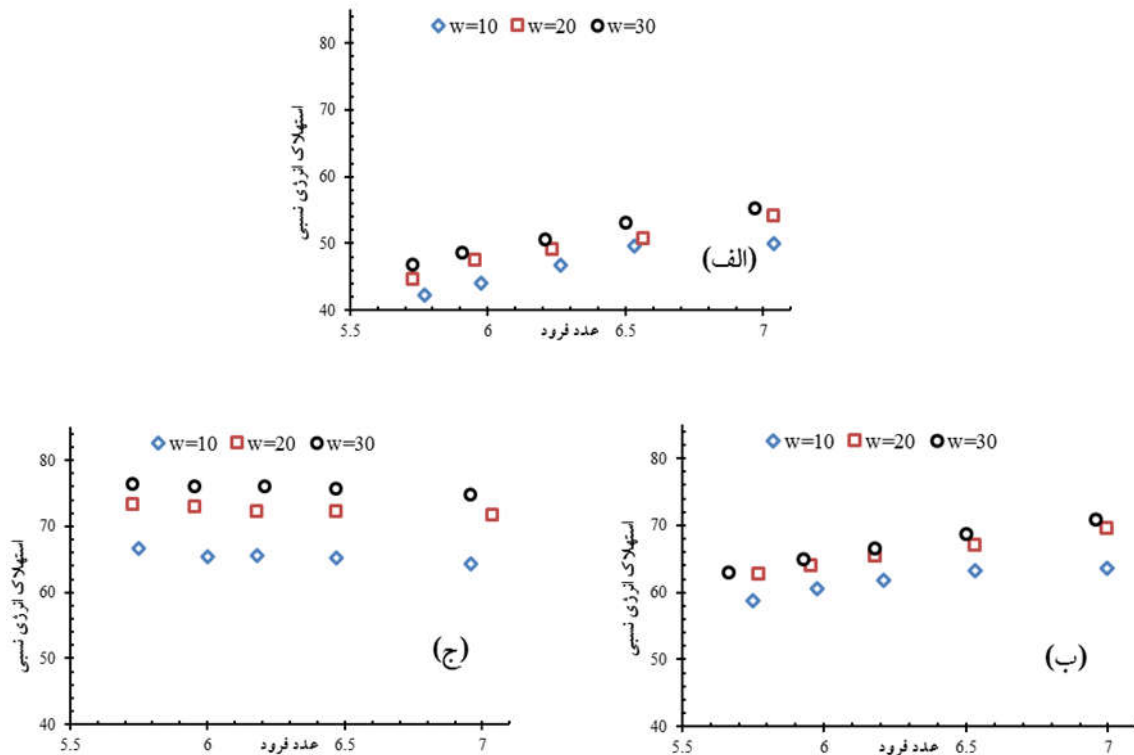
نمودارهای ارائه شده در شکل ۸ بیانگر تأثیر ارتفاع آب پایه بر استهلاك انرژی نسبی کل ناشی از آب پایه تورسنگی و پرش هیدرولیکی به‌ازای تغییرات عدد فرود است. مشاهدات حاکی از



شکل ۷. استهلاک انرژی نسبی ناشی از آب پایه با دانه بندی متوسط: الف) ضخامت ۱۰ سانتی متر، ب) ضخامت ۲۰ سانتی متر و ج) ضخامت ۳۰ سانتی متر



شکل ۸. استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش و آب پایه با دانه بندی متوسط: الف) ضخامت ۱۰ سانتی متر، ب) ضخامت ۲۰ سانتی متر و ج) ضخامت ۳۰ سانتی متر



شکل ۹. استهلاک انرژی نسبی ناشی از آب پایه با دانه بندی متوسط: الف) ارتفاع ۱۰ سانتی متر، ب) ارتفاع ۲۰ سانتی متر و

ج) ارتفاع بیشینه

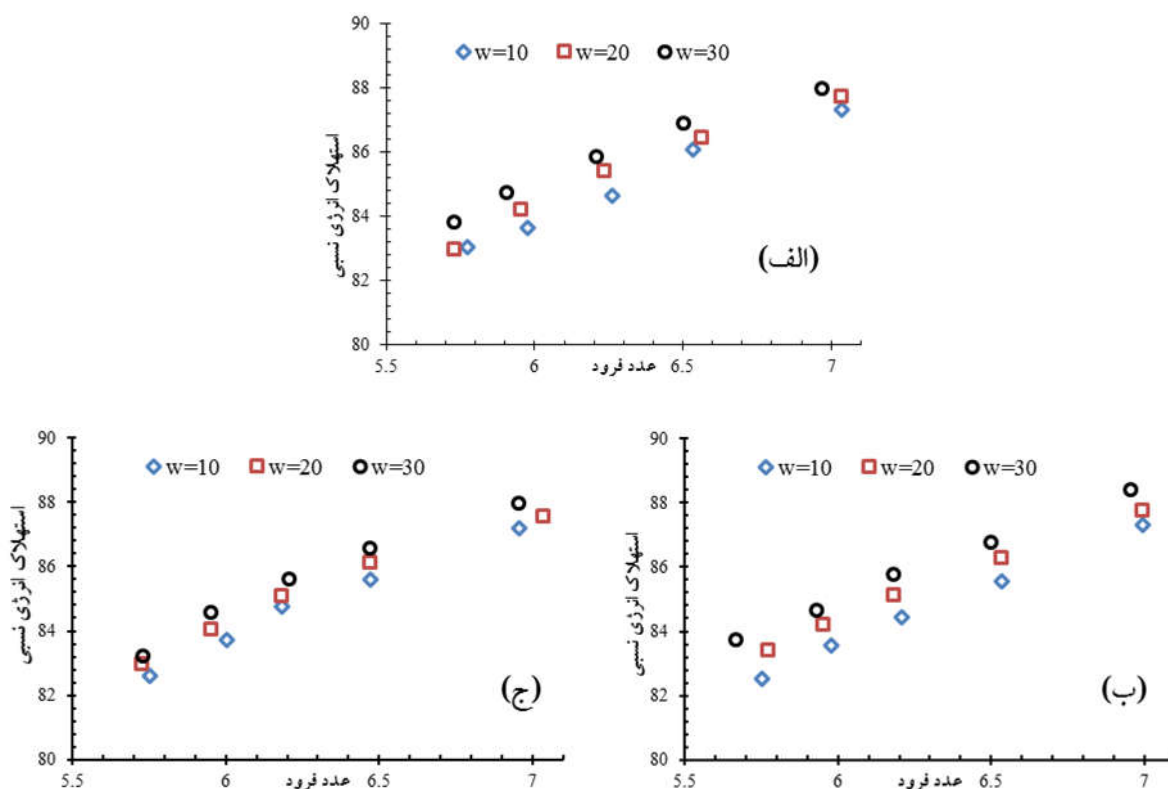
می یابد. در شکل ۱۰- ج میزان استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش و آب پایه به ضخامت ۳۰ سانتی متر به طور متوسط ۱/۰۶ درصد بیشتر از آب پایه به ضخامت ۱۰ سانتی متر است. در شکل ۱۰- ب این مقدار ۱/۴ درصد و در شکل ۱۰- ج، ۰/۹ درصد است.

نتیجه گیری

در این پژوهش با انجام ۱۳۵ آزمایش روی ۲۷ مدل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر آب پایه تورسنگی بر استهلاک انرژی پایین دست سرریز اوجی در شرایط پرش مستغرق پرداخته شد. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش قطر سنگدانه ها به سبب وجود منافذ بزرگ تر در آب پایه تورسنگی، میزان استهلاک انرژی نسبی کاهش می یابد. بیشترین میزان استهلاک انرژی مربوط به دانه بندی ریزدانه با قطر متوسط ۱/۵ سانتی متر بوده است. به طوری که آب پایه با سنگدانه به قطر

استهلاک انرژی آب پایه با ضخامت ۳۰ سانتی متر به میزان ۹/۱ درصد بیشتر از آب پایه با ضخامت ۱۰ سانتی متر است. در آب پایه با ارتفاع ۲۰ سانتی متر که نمودار آن در شکل ۹- ب نشان داده شده است، میزان استهلاک انرژی آب پایه با ضخامت ۳۰ سانتی متر، ۸/۳ درصد بیشتر از آب پایه با ضخامت ۱۰ سانتی متر بوده است و در شکل ۹- ج مربوط به آب پایه با ارتفاع بیشینه این اختلاف به ۱۵/۷ درصد رسیده است. می توان نتیجه گرفت که در آب پایه با ارتفاع بیشینه به سبب وجود جریان کاملاً درون گذر تأثیر افزایش ضخامت آب پایه به طور چشمگیری بیشتر از آب پایه با ارتفاع ۱۰ و ۲۰ سانتی متر بوده است.

تأثیر ارتفاع آب پایه بر استهلاک انرژی نسبی کل ناشی از آب پایه تورسنگی و پرش هیدرولیکی به ازای تغییرات عدد فرود در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۰ نشان می دهد که با افزایش عدد فرود میزان استهلاک انرژی ناشی از آب پایه و پرش هیدرولیکی افزایش



شکل ۱۰. استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش و آب پایه با دانه بندی متوسط (الف) ارتفاع ۱۰ سانتی متر، (ب) ارتفاع ۲۰ سانتی متر و (ج) ارتفاع بیشینه

۳۰ سانتی متر میزان استهلاک انرژی نسبی می تواند تا ۱۵ درصد افزایش یابد. نتایج حاکی از آن است که آب پایه تورسنگی تأثیر بسزایی بر میزان استهلاک انرژی در پایین دست سرریز اوجی دارد و به تبع آن هزینه های ایجاد سازه های استهلاک انرژی و حوضچه آرامش کاهش می یابد.

متوسط ۱/۵ سانتی متر حدود ۳/۶ درصد نسبت به سنگدانه به قطر متوسط ۳ سانتی متر استهلاک انرژی نسبی بیشتری داشته است. همچنین افزایش ارتفاع آب پایه به حالت بیشینه (جریان کاملاً درون گذر) موجب افزایش استهلاک انرژی نسبی به میزان ۳۳ درصد نسبت به آب پایه با ارتفاع ۱۰ سانتی متر می شود. بررسی ها نشان داد که افزایش قطر آب پایه از ۱۰ سانتی متر به

منابع مورد استفاده

1. Abdelhalim, F. S., A. Amin and H. Y. Esam. 2012. Effect of corrugated bed shape on hydraulic jump and downstream local scour. *Journal of American Science* 8(5): 1-11.
2. Bradley, J. N. and A. J. Peterka. 1957. Hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I). *Journal of the Hydraulics Division* 83(5): 1401-1411.
3. Chanson, H. 2000. Forum article. Hydraulics of stepped spillways: current status. *Journal of Hydraulic Engineering* 126(9): 636-637.
4. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and A. Rezazadeh Joudi. 2016. Laboratory investigation on the effect of screen's location on the flow energy dissipation. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 17(67): 47-62.
5. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and A. Ghahramanzadeh. 2017. Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian Journal of Civil Engineering* 44(10): 850-859.

6. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and S. Razmi. 2020. Comparison of energy dissipation by double horizontal screen and stilling basins at vertical drop downstream. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(7): 1681-1690. doi: 10.22059/ijswr.2020.294781.668444. (In Farsi).
7. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and M. Bagherzadeh. 2020. 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. (In Farsi).
8. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and M. Bagherzadeh. 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. doi: 10.22059/ijswr.2020.308412.668705. (In Farsi).
9. Daneshfaraz, R., M. Bagherzadeh, A. Ghaderi, S. Di Francesco and M. Majedi Asl. 2021. Experimental Investigation of Gabion Inclined Drops as a Sustainable Solution for Hydraulic Energy Loss. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.013>.
10. Ghassemi, A., M. Omid, M. NasrAbadi and A. Raeesi Estabragh. 2016. Evaluate and develop new relationships to estimate submerged hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47(4): 755-764. doi: 10.22059/ijswr.2016.59982. (In Farsi).
11. Hager, W. H. and R. Bremen, R. 1989. Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research* 27(5): 565-585.
12. Kells, J. A. 1993. Spatially varied flow over rockfill embankment. *Canadian Journal of Civil Engineering* 20: 820-827.
13. Kheiraei, M. and M. Fathi Moghadam. 2019. Hydraulic efficiency of crump gabion weirs under submerged flow condition. *Journal of Water Engineering* 12(42): 38-51.
14. Long, D., P. M. Steffler and N. Rajaratnam. 1990. LDA study of flow structure in submerged Hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research* 28(4): 437-460.
15. Leu, J. M., H. C. Chen and M. S. Chu. 2008. Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation* 19: 1-7.
16. Michiku, K., S. Maeno, T. Furusawa and M. Haneda. 2005. Discharge through a permeable rubble mound weir. *Journal of Hydraulic Engineering* 131(1): 1-10.
17. Michiku, K., K. Takehara and T. Etah. 2007. An experimental study on flow field in and around rubble mound river structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 25(2): 37-45.
18. Mohamed, H. 2010. Flow over gabion weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(8): 573-577.
19. Mardani, M., H. Rahimzadeh and H. Sarkardeh. 2015. Analysis and assessment of installing blocks on performance of stilling basins. *Modares Mechanical Engineering* 15(6): 31-41. (In Farsi).
20. Majedi Asl, M., R. Daneshfaraz, J. Chabokpour and B. Ghorbani. 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. doi: 10.22059/ijswr.2020.309322.668725. (In Farsi).
21. Nasrabadi, M., M. H. Omid and J. Farhoudi. 2010. Comparative study of free and submerged hydraulic jump downstream of sluice gates. In Proceeding of 9th Iranian Hydraulics Conference, Tehran, Iran. (In Farsi).
22. Pourabdollah, N., M. Heidarpour and J. Abedi Koupai. 2020. Characteristics of free and submerged hydraulic jumps in different stilling basins. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (173(3): 121-131). Thomas Telford Ltd.
23. Rajaratnam, N. and N. S. Govinda Rao. 1963. The submerged hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division* 89(1): 139-162.
24. Rajaratnam, N. 1967. Hydraulic jumps. *Advances in Hydro Science* 4: 197-280.
25. Shokry, A. 1957. The efficiency of floor sill under drowned hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division* 83(3): 1-18.
26. Sadeghfam, S., A. A. Akhtari, R. Daneshfaraz and G. Tayfur. 2015. Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 38(2): 126-138.
27. Saadi, H. and M. Sajadi. 2018. Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in ogee spillway stilling basin by perforated stepped sill. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 19(70): 85-98. (In Farsi).
28. Shaker, A. J., A. S. Sarhan, S. H. Bshkoj and M. Q. Jihan. 2019. Effect of gravel size and weir height on flow properties of gabions. *Journal of University of Babylon for Engineering Science* 27(2): 214-222.
29. Vashisth, A. 2017. Energy dissipation over stepped gabion weir. *International Journal of Dynamics of Fluids* 13(1): 153-159.

Experimental Study of the Effect of Gabion Structure on the Energy Dissipation of Submerged Hydraulic Jump Downstream of Ogee Spillway

M. Majedi-Asl^{*}, R. Daneshfaraz, J. Chabokpour and B. Gorbani Ghazimahaleh¹

(Received: May 6-2021; Accepted: July 31-2021)

Abstract

In the last decade, the use of gabion structures in hydraulic engineering for stabilizing the structure due to its high density and weight has become widespread. Also, the material's roughness and porosity cause it to be used in energy dissipation and drainage projects. This study evaluates the relative energy dissipation of gabion structures downstream of the ogee spillway in the conditions of a submerged hydraulic jump. The evaluated parameters in this study were Froude number, gabion height, gabion thickness, and material diameter. The experiments were performed with three average diameters of 1.5, 2.2, and 3 cm for rock material, three gabion heights of 10 and 20 cm, and Max. The end sill heights were 10, 20, and 30 cm. The operated discharges were regulated from 20 to 40 l/s. The results showed that by decreasing the average diameter of gabion aggregates, the amount of relative energy dissipation increases in all tested models, so that in gabion with a 1.5 cm average diameter of aggregates, the amount of energy dissipation increased by 3.6% in comparison with using the diameter of 3cm for the average diameter of the material. Increasing the height of the gabion to the extent that the flow is entirely inward can have up to 33% more relative energy dissipation than the gabion with a height of 10 cm. Also, by increasing the diameter of the gabion from 10 cm to 30 cm, relative energy dissipation increases up to 15%.

Keywords: Relative energy dissipation, Gabion, Ogee spillway, Relative length of hydraulic jump.

1. Department of Civil Engineering, Hydraulic Structures, University of Maragheh, Iran.

*: Corresponding author, Email: Mehdi.majedi@gmail.com, majedi@maragheh.ac.ir