

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تاثیر مشخصات هندسی و آرایش بلوک‌های مکعب مستطیلی بر کنترل پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی

ابراهیم اسدی^{۱*}، علیرضا جوادی^۲، امین سیدزاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۷

چکیده

پرش هیدرولیکی به عنوان یک پدیده کلیدی در مهندسی هیدرولیک، نقش حیاتی در اتلاف انرژی و حفاظت از سازه‌های پایین دست ایفا می‌کند. این پژوهش به بررسی تجربی اثر استفاده از بلوک‌های مکعب مستطیلی با آرایش زیگزاگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی می‌پردازد. آزمایش‌ها در یک فلوم با عرض ۰/۵ متر و برای اعداد فرود اولیه بین ۱/۵ تا ۱۹/۱ انجام شد. متغیرهای مستقل شامل ارتفاع نسبی بلوک‌ها ($h/b = 2, 3, 4$) و فاصله طولی نسبی بین ردیف‌های آن‌ها ($s/b = 1, 2, 4$) بود. مقایسه‌ی کمی داده‌های آزمایشگاهی با حالت مبنا (بستر صاف) نشان داد که حضور این بلوک‌ها منجر به کاهش عمق ثانویه و طول پرش و همچنین افزایش اتلاف انرژی می‌شود. تحلیل‌ها نشان داد که پارامتر ارتفاع بلوک اثر غالب‌تری نسبت به فاصله طولی دارد، به طوری که بلوک‌های با ارتفاع نسبی ۴ در مقایسه با ارتفاع ۲، به طور متوسط باعث کاهش ۵۷ تا ۶۹ درصدی بیشتری در عمق ثانویه و کاهش ۲۴ تا ۳۲ درصدی در طول پرش شدند. بیشترین افزایش در اتلاف انرژی نسبی (۱۶/۴ درصد) نیز مربوط به پیکربندی با بیشترین ارتفاع و فاصله بود.

واژه‌های کلیدی: اتلاف انرژی، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، طول پرش، عمق ثانویه

مقدمه

برخوردار است، زیرا جریان‌های پرانرژی در پایین دست می‌توانند منجر به فرسایش شدید بستر و دیواره‌ها، کاویتاسیون و تخریب سازه شوند (Peterka, 1958; Rajaratnam, 1966). در این راستا، ایجاد شرایطی برای وقوع پرش هیدرولیکی در محدوده‌ای کنترل شده و مقاوم، از جمله اهداف اصلی طراحی حوضچه‌های آرامش است.

یکی از روش‌های مؤثر در کنترل و بهبود عملکرد پرش هیدرولیکی، استفاده از زبری‌های مصنوعی، بلوک‌های بافل و صفحه‌های مستغرق در بستر حوضچه‌های آرامش است. این عناصر با تغییر رژیم جریان و افزایش تلاطم موضعی، باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش، و در نتیجه افزایش استهلاک انرژی جریان می‌شوند (Mohamed Ali, 1991; Negm, 2002; Ead and Rajaratnam, 2002). مطالعات متعددی در دهه‌های اخیر نشان داده‌اند که نوع، اندازه، شکل و آرایش هندسی این موانع تأثیر بسزایی بر پارامترهای پرش دارند (Carollo et al., 2007; Tokyay, 2005).

پژوهش‌های کلاسیک از جمله کارهای راجاراتنام و هگر مبنای تئوریک مهمی در تحلیل روابط بین عدد فرود اولیه، اعماق مزدوج و افت انرژی ارائه کرده‌اند (Rajaratnam, 1966; Hager, 1992). با

پدیده‌ی پرش هیدرولیکی یکی از فرآیندهای اساسی در هیدرولیک جریان‌های روباز است که نقش مهمی در کنترل انرژی و پایداری سازه‌های آبی ایفا می‌کند. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که جریان فوق‌بحرانی با سرعت زیاد به جریان زیربحرانی با سرعت کمتر تبدیل شود و در این فرآیند بخش قابل توجهی از انرژی جنبشی جریان به صورت تلاطم و اغتشاش مستهلک می‌شود (Hager, 1992). در طراحی سازه‌های پایین دست سدها، سرریزها، دریچه‌ها و کانال‌های انتقال آب، مهار و کنترل این پدیده از اهمیت ویژه‌ای

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران

۴- پژوهشگر مدیریت آب در مناطق خشک، دانشگاه فسا، فسا، ایران

* نویسنده مسؤل: (Email: Asadi@azaruniv.ac.ir)

این حال، به دلیل پیچیدگی جریان سه بعدی در محدوده‌ی پرش و تأثیر مؤلفه‌های مختلف هندسی بر رفتار جریان، توسعه‌ی روش‌های نوین برای بهبود راندمان حوضچه‌های آرامش همواره مورد توجه محققان بوده است. استفاده از بسترهای زبر (Saryadi et al., 2022; Hughes and Flack, 1984)، حوضچه‌های واگرا (Eshkou et al., 2018; Omid et al., 2007)، سرریزهای پلکانی و پله‌های مثبت (Chanson, 2001; Forster and Skrinde, 1950)، و همچنین موانع مکعبی و استوانه‌ای (Pillai and Kansal, 2022; Al-Mansori et al., 2020) از جمله روش‌های متداول در بهبود عملکرد پرش بوده‌اند.

محمدعلی نشان داد که افزودن المان‌های مکعبی شکل به کف کانال مستطیلی موجب کاهش طول پرش و تثبیت محل آن می‌شود (Mohamed Ali, 1991). در ادامه، عاد و راجاراتنام با بررسی پرش بر روی بستر موج‌دار سینوسی، گزارش کردند که استفاده از زبری‌های پیوسته می‌تواند طول پرش را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهد (Ead and Rajaratnam, 2002). در همین راستا، توکیای کارولو و همکاران نیز تأکید کردند که زبری‌های مصنوعی در کاهش عمق ثانویه و افزایش افت انرژی نقش مؤثری دارند. (Tokuyay, 2005; Carollo et al., 2007) همچنین مطالعات حییب‌زاده و همکاران نشان داد که چیدمان هندسی و زاویه‌دار بلوک‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر پایداری پرش و شدت آشفتگی تأثیر بگذارد (Habibzadeh et al., 2012). الاین و سان با استفاده از بافل بلاک‌های گوه‌شکل (wedge-shaped)، کاهش در محدوده ۱۶/۵ تا ۳۰ درصدی در نسبت اعماق مزدوج و ۳۰ تا ۵۰ درصدی در طول پرش را گزارش کردند (Ellayn and Sun, 2012). به همین ترتیب، پارسامهر و همکاران با مطالعه‌ی پرش بر روی بستر زبر در شیب معکوس نشان دادند که با افزایش ارتفاع بلوک‌ها و زاویه‌ی واگرایی، عمق ثانویه تا ۵۱ درصد و طول پرش تا ۳۸ درصد کاهش می‌یابد (Parsamehr et al., 2017). نتایج مشابهی نیز در تحقیقات پادولانو و همکاران و آیدین و یولو مشاهده شده است که بیانگر اهمیت آرایش بلوک‌ها در بهبود عملکرد انرژی‌زدایی جریان هستند (Padulano et al., 2017; Aydin and Ulu, 2018). بدیخ‌زادگان و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی تأثیر انواع زبری‌های موج‌دار (سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای و نیم‌استوانه‌ای) بر مشخصات پرش هیدرولیکی به این نتیجه رسیدند که تمامی زبری‌ها تأثیر تقریباً یکسانی در کاهش عمق ثانویه و طول پرش دارند. اسدی و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی تأثیر بلوک‌های مکعب مربعی بر مشخصات پرش هیدرولیکی، به مقایسه عملکرد دو آرایش متفاوت زیگزگی و ردیفی در کاهش طول پرش و افزایش استهلاک انرژی پرداختند. نتایج نشان داد که آرایش زیگزگی در مقایسه با آرایش ردیفی عملکرد بهتری در کاهش طول نسبی پرش و افزایش نرخ استهلاک انرژی دارد. اسلام‌منش و همکاران

(۱۴۰۰) در بررسی تأثیر زبری نیم‌استوانه‌ای بر مشخصات پرش به این نتیجه رسیدند که استفاده از زبری‌های نیم‌استوانه‌ای در سه ردیف و هم عرض با عرض کانال مستطیلی، تأثیر قابل توجهی بر کاهش طول پرش و افزایش استهلاک انرژی دارد. جواد و اسدی (۱۴۰۰) تأثیر بلوک‌های مستطیلی با آرایش زیگزگی را بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای بررسی کردند. آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود ۱/۸ تا ۱۸/۸ و با سه ارتفاع و سه فاصله مختلف بلوک‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از این بلوک‌ها باعث کاهش ۶۹/۳ درصدی عمق ثانویه، کاهش ۴۹/۵ درصدی طول پرش و افزایش ۴۶/۳ درصدی اتلاف انرژی نسبت به بستر صاف می‌شود. همچنین، افزایش ارتفاع بلوک‌ها نسبت به افزایش فاصله بین آن‌ها، تأثیر مؤثرتری بر بهبود مشخصات پرش دارد. بیشینه افت انرژی جریان در این مطالعه ۸۵/۵ درصد ثبت شد. اسدی و همکاران (۱۴۰۲) در دو مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر مانع‌های مثلثی متساوی‌الساقین با چیدمان زیگزگی را بر مشخصات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در کانال دوزنقه‌ای بررسی کردند. نتایج هر دو پژوهش نشان داد که پیکربندی بهینه (ارتفاع ۴ سانتی‌متر و فاصله ۴ سانتی‌متر با نسبت $S/B=0.3$) باعث کاهش ۲۰ تا ۲۸ درصدی عمق مزدوج، کاهش ۳۵ تا ۵۰ درصدی طول پرش، افزایش ۲۲ درصدی استهلاک انرژی و بهبود ۱۸ درصدی پایداری جریان می‌شود. همچنین، چیدمان زیگزگی شدت آشفتگی را ۱۵ درصد کاهش و توزیع یکنواخت انرژی را تا ۲۰ درصد بهبود بخشید. این طراحی هزینه ساخت حوضچه آرامش را حدود ۴۰ درصد کاهش و کارایی هیدرولیکی را ۲۵ درصد افزایش داد. افزایش ارتفاع مانع‌ها نسبت به افزایش فاصله بین آن‌ها، تأثیر مؤثرتری در بهبود مشخصات پرش داشت. اسدی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی تأثیر بلوک‌های مثلثی با چیدمان زیگزگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در یک حوضچه آرامش دوزنقه‌ای پرداختند. آن‌ها دریافتند که چیدمان B (بلوک‌های به هم پیوسته) و زاویه ۴۵ درجه بلوک‌ها، بیشترین تأثیر را در کاهش طول پرش، عمق ثانویه و افزایش استهلاک انرژی دارند. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد که چگالی ۶/۷ درصد در یک چیدمان و ۱۲/۲ درصد در چیدمان دیگر، بیشترین کارایی را در کنترل پرش هیدرولیکی دارند (Asadi et al., 2025). اسدی و همکاران (۱۴۰۴) تأثیر بلوک‌های مثلثی با آرایش زیگزگی را بر پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستطیلی بررسی کردند. آن‌ها با آزمایش سه تراکم (۱۰، ۱۲/۲ و ۱۳/۳ درصد) و سه زاویه نصب (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه)، پیکربندی بهینه را تراکم ۱۲/۲ درصد با بلوک‌های ۵/۵ سانتی‌متری و زاویه ۴۵ درجه معرفی کردند که موجب کاهش ۲۴/۷ درصدی عمق ثانویه، کاهش ۲۴/۵ درصدی طول پرش و افزایش ۱۳/۴ درصدی اتلاف انرژی نسبت به بستر صاف شد. همچنین، تراکم ۱۳/۳ درصد به دلیل پدیده سایه هیدرولیکی، در برخی موارد طول پرش را افزایش داد.

مدل فیزیکی و تجهیزات آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌های این پژوهش به صورت فیزیکی در آزمایشگاه تحقیقات آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام پذیرفت. مدل فیزیکی شامل یک فلوم فلزی به طول ۶ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر با قابلیت تغییر مقطع به دو شکل مستطیلی و دوزنقه‌ای بود. در این مقاله تنها نتایج مربوط به کانال مستطیلی با عرض ۰/۵ متر گزارش می‌شود. جداره‌های جانبی فلوم از جنس پلکسی گلس شفاف جهت مشاهده و ثبت پدیده پرش هیدرولیکی بود. یک مخزن استوانه‌ای با قطر ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۱۰ سانتی‌متر در ابتدای فلوم، همراه با یک گیج با دقت ۱ میلی‌متر، برای تأمین و اندازه‌گیری هد ثابت استفاده شد. جریان آب توسط یک پمپ از یک مخزن ذخیره ۴ مترمکعبی به این مخزن تغذیه می‌گردید. برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی یکنواخت و کنترل آشفتگی، از یک جعبه جت مجهز به صفحات آرام‌کننده و یک دریچه کشویی با بازشدگی ثابت ۱۵ میلی‌متر در ابتدای فلوم استفاده شد. در شکل ۱ نمای کلی فلوم تحقیقاتی نشان داده شده است.

در کف کانال، بلوک‌های مکعب‌مستطیلی از جنس پلاستیک فشرده با طول ۸ و عرض ۱ سانتی‌متر نصب شدند. این بلوک‌ها در سه ارتفاع مختلف ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و سه فاصله طولی بین ردیف‌ها به ترتیب ۱، ۲ و ۴ سانتی‌متر قرار گرفتند. فاصله عرضی بین بلوک‌ها ۱ سانتی‌متر و فاصله بلوک‌های کناری از دیواره کانال ۳/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. چیدمان بلوک‌ها به صورت زیگزاگی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور جریان طراحی شد، به گونه‌ای که سه ردیف در راستای طول و شش ردیف در راستای عرض کانال قرار گرفتند (شکل ۲). فاصله اولین ردیف بلوک‌ها از دریچه ۵۰ سانتی‌متر بود تا اثرات آشفتگی ورودی به حداقل برسد. برای اطمینان از چسبندگی مناسب و جلوگیری از لغزش در حین آزمایش، از چسب دوقلو با سطح پرداخت‌شده استفاده شد.

که در آن y_1 عمق اولیه پرش (m)، y_2 عمق ثانویه پرش (m)، Q دبی عبوری از کانال (m³/s)، h ارتفاع بلوک‌ها (m)، s فاصله طولی بین بلوک‌ها (m)، L طول بلوک‌ها (m)، L_z طول پرش هیدرولیکی (m)، θ زاویه بلوک‌ها نسبت به محور کانال (درجه)، B عرض کانال (m)، b ضخامت بلوک‌ها (m)، w فاصله عرضی بلوک‌ها (m) و d فاصله بلوک‌های جانبی از دیواره کانال (m) است.

به منظور ایجاد عمق پایاب مناسب برای تشکیل پرش در محل مورد نظر، از پله‌های قابل تنظیم در انتهای کانال استفاده شد. این پله‌ها با ارتفاع‌های ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر قابل تنظیم بودند. ابتدا تمامی آزمایش‌ها در حالت بدون پله انجام شد و سپس، در مواردی که پرش در محل مطلوب تشکیل نمی‌شد، از پله‌ها برای افزایش عمق پایاب بهره گرفته شد.

با این حال، نوع، هندسه، چیدمان و تراکم المان‌های زبری تأثیر بسزایی در کارایی و پایداری پرش دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که المان‌های با لبه‌های تیز می‌توانند منجر به جدایش جریان و افزایش خطر کاویتاسیون شوند (Ead and Rajaratnam, 2002; Tokyay, 2005). از سوی دیگر، اگر این المان‌ها به درستی و در محل مناسب قرار نگیرند، نه تنها ممکن است اثر مطلوبی نداشته باشند، بلکه می‌توانند باعث ناپایداری پرش و توزیع نامتعادل سرعت شوند که در نهایت خطر فرسایش و تخریب سازه را افزایش می‌دهد (Maatooq, 2018). بنابراین، جستجو برای یافتن اشکال و آرایش‌های جدیدی از موانع که همزمان باعث افزایش اتلاف انرژی، کاهش ابعاد پرش و کاهش ریسک پدیده‌های مخرب شوند، همچنان یک عرصه پژوهشی فعال است.

در این راستا، استفاده از بلوک‌های مکعب‌مستطیلی و بررسی سیستماتیک پارامترهای کلیدی طراحی آن‌ها (نسبت ارتفاع به ضخامت بلوک‌ها و فاصله طولی نسبی ردیف‌ها) در یک آرایش زیگزاگی ثابت، می‌تواند به عنوان یک گام تکمیلی برای بهینه‌سازی ابعاد و کارایی اینگونه حوضچه‌ها مطرح باشد. این آرایش می‌تواند با ایجاد اغتشاش بیشتر در هسته جریان فوق‌بحرانی، تبادل مومنتوم را افزایش داده و در نتیجه راندمان استهلاک انرژی را بهبود بخشد. همچنین، توزیع زیگزاگی می‌تواند از تمرکز تنش برشی و خطر کاویتاسیون در یک نقطه خاص بکاهد. اگرچه مطالعات پراکنده‌ای بر روی تأثیر زبری‌های منظم انجام شده است (Carollo et al., 2007; Parsamehr et al. 2017; Abbaspour et al. 2009)، اما پژوهشی که به طور سیستماتیک به بررسی اثر ارتفاع و فاصله بین ردیف‌های زیگزاگی بلوک‌های مکعب مستطیلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی بپردازد، کمبود احساس می‌شود. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی تجربی اثرات استفاده از بلوک‌های مکعب مستطیلی با چیدمان زیگزاگی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، از جمله عمق ثانویه، طول پرش و میزان اتلاف انرژی در کانال‌های مستطیلی است. در این راستا، اثرات تغییرات ارتفاع و فاصله بین ردیف‌های این صفحه‌ها در محدوده وسیعی از اعداد فرود (۱/۵ تا ۱۹/۱) مورد تحلیل قرار گرفته است.

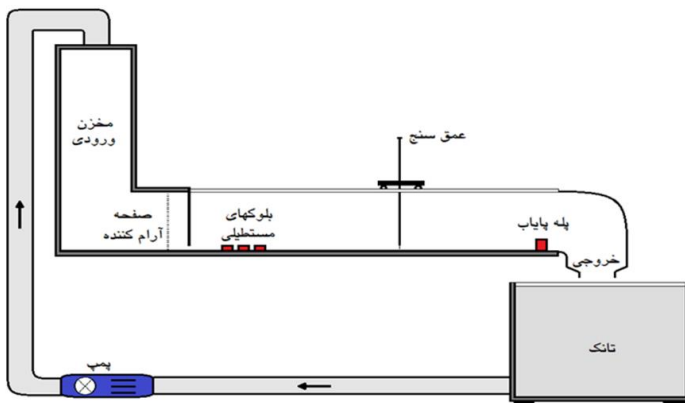
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با هدف بررسی تأثیر ارتفاع و فاصله بلوک‌های مکعب‌مستطیلی با آرایش زیگزاگی در کف کانال مستطیلی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های فیزیکی در فلوم آزمایشگاهی انجام شد.

گردید. طول پرش با استفاده از نوار مدرج نصب شده روی دیواره شفاف کانال، از محل آغاز تلاطم تا پایان ناحیه اختلاط اندازه‌گیری شد.

جدول ۱ محدوده تغییرات متغیرهای هندسی و هیدرولیکی را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها برای شش عدد فرود اولیه مختلف انجام گرفت تا رفتار پرش در شرایط مختلف جریان مورد بررسی قرار گیرد.

پارامترهای مورد نیاز شامل دبی جریان، عمق اولیه و ثانویه پرش، طول پرش و سرعت جریان در چند مقطع کلیدی اندازه‌گیری شدند. دبی جریان توسط فلومتر اولتراسونیک با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه که بر روی خط ورودی پمپ نصب شده بود، اندازه‌گیری شد. عمق جریان در مقاطع قبل و بعد از پرش به کمک عمق‌سنج مکانیکی با دقت ۰/۱ میلی‌متر و به صورت میانگین از چند قرائت متوالی تعیین



شکل ۱- شماتیک و نمای کلی فلوم تحقیقاتی و بلوک‌های مکعب مستطیلی مورد استفاده در این پژوهش

تحلیل ابعادی

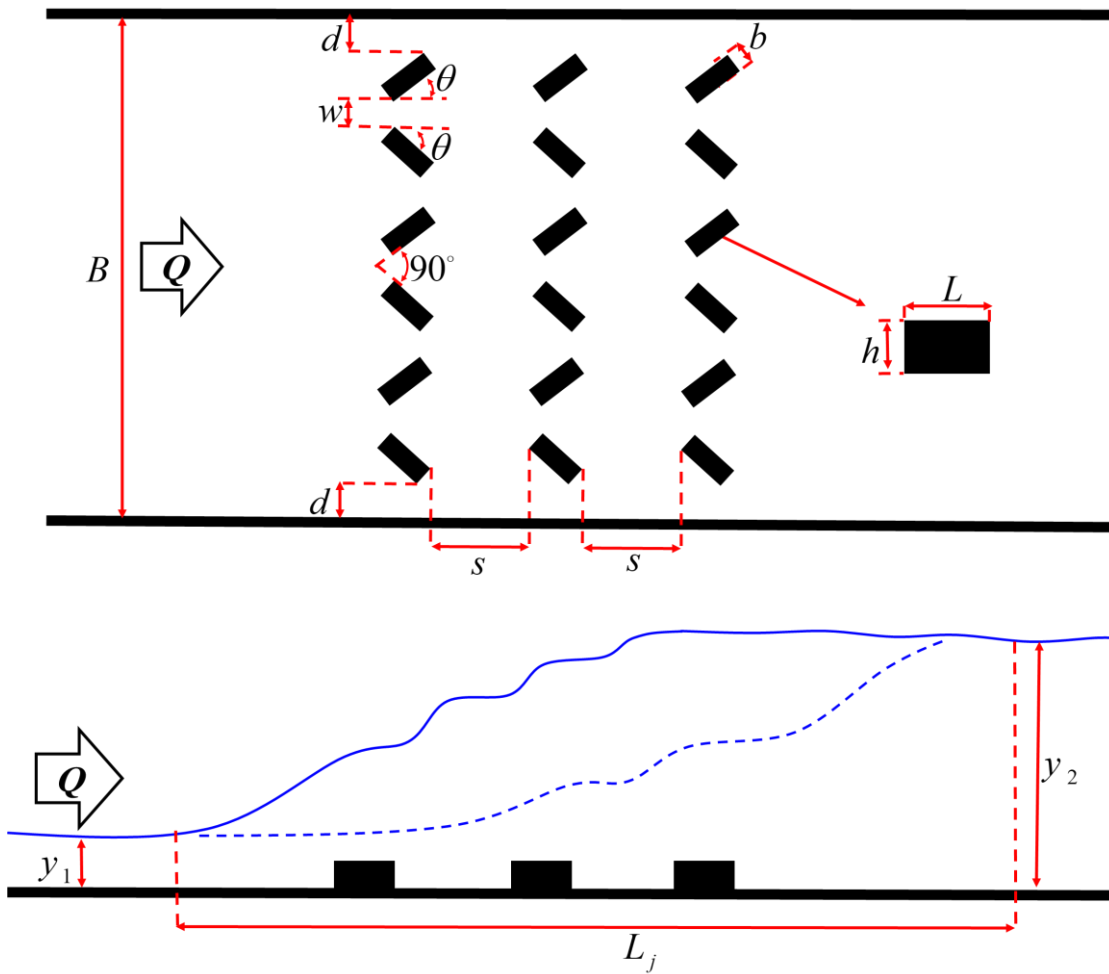
برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار پرش، از تحلیل ابعادی بر پایه تئوری پی باکینگهام (π -Buckingham) استفاده شد. پرش هیدرولیکی در حضور بلوک‌های زیگزاگی تابعی از متغیرهای زیر است:

$$f\left(y_1, y_2, Q, \rho, g, h, s, L, L_j, \theta, B, b, w, \mu, d\right) = 0 \quad (1)$$

که ρ جرم مخصوص سیال (kg/m^3)، g شتاب جاذبه (m/s^2) و μ لزجت دینامیکی سیال (kg/m.s) است.

در مجموع ۶۰ آزمایش مستقل انجام شد که شامل ۱۰ ترکیب هندسی (سه ارتفاع \times سه فاصله + حالت بدون بلوک) و شش عدد فرود مختلف بود.

ابتدا آزمایش‌های پایه (بدون بلوک) برای تعیین رفتار پرش کلاسیک انجام شد تا داده‌های مرجع به دست آید. سپس بلوک‌های زیگزاگی در کف کانال نصب و آزمایش‌ها با همان شرایط مرزی تکرار گردید. در هر آزمایش، مقادیر عمق اولیه و ثانویه جریان، طول پرش و دبی جریان ثبت شد و در ادامه برای محاسبه نسبت‌های بی‌بعد و تحلیل مقایسه‌ای مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲- نمایی از حوضچه آرامش و پرش هیدرولیکی

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای آزمایشگاهی

متغیر	نماد	دامنه تغییرات
ارتفاع بلوک (سانتیمتر)	h	۲، ۳ و ۴
فاصله بین ردیف‌های بلوک‌ها (سانتیمتر)	s	۱، ۲ و ۴
عدد فرود اولیه	Fr_1	۱/۵ - ۱۹/۱
دبی (لیتر بر ثانیه)	Q	۴/۴۸ - ۲۵/۵۹

بودن پارامترهای L, θ, B, b, w و d می‌توان از تاثیر پارامترهای بی‌بعد مربوط به این پارامترها چشم پوشی کرد. بنابراین، رابطه ۲ به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{h}{b}, \frac{s}{b}, \frac{L_j}{y_1}, Fr_1, Re\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به آشفته بودن جریان در مجاری روباز، اثر ویسکوزیته قابل چشم‌پوشی است و جریان در ناحیه پرش کاملاً آشفته در نظر گرفته شد. بر این اساس، تغییرات طول پرش و عمق ثانویه به صورت تابعی از عدد فرود اولیه و نسبت‌های هندسی بلوک‌ها تحلیل گردید

با انتخاب ρ, g و y_1 به عنوان متغیرهای تکراری، گروه‌های بی‌بعد زیر حاصل می‌شود:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{Q^2}{gy_1^5}, \frac{h}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \theta, \frac{B}{y_1}, \frac{b}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{\mu}{\rho y_1 \sqrt{gy_1}}, \frac{d}{y_1}\right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه ۲، با ادغام تعدادی از پارامترهای بی‌بعد، می‌توان پارامترهای بی‌بعد دیگری ایجاد کرد. از سوی دیگر با توجه به ثابت

(رابطه ۴)

$$\frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f\left(\frac{h}{b}, \frac{s}{b}, Fr_1\right) \quad (۴)$$

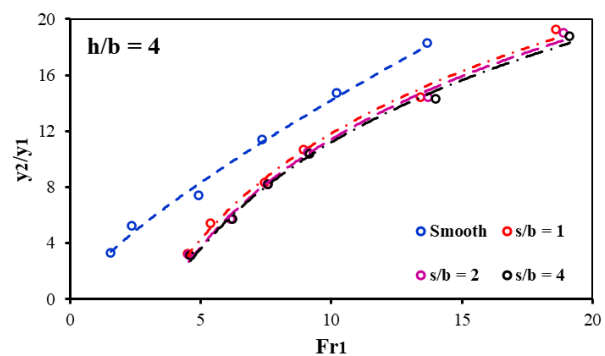
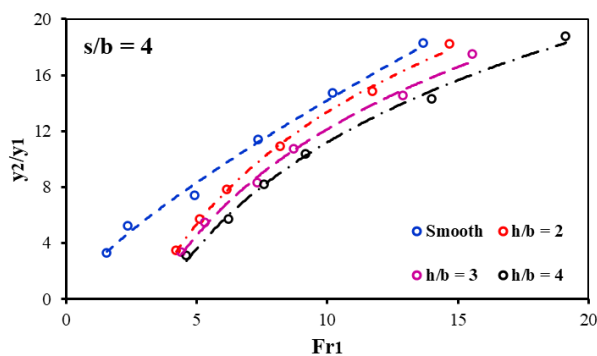
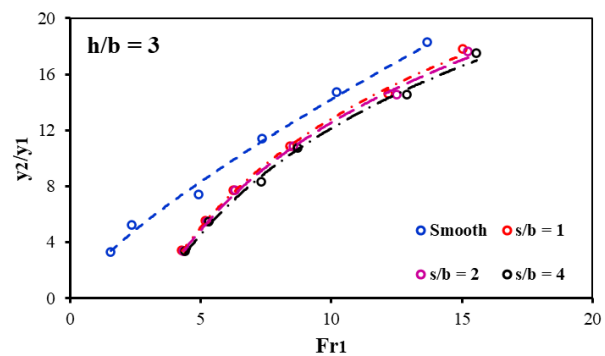
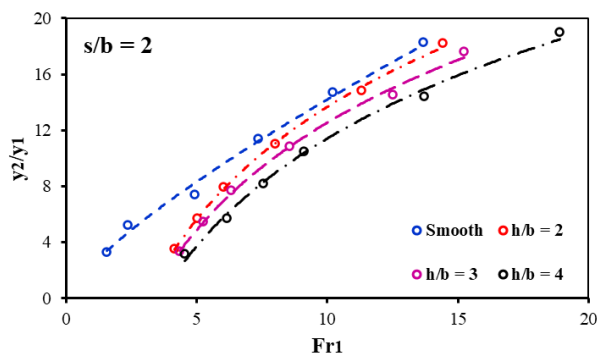
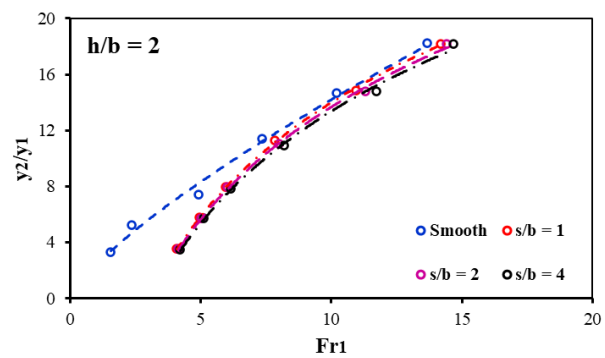
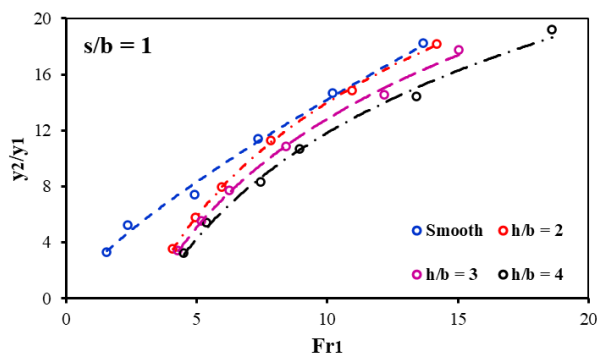
بحث قرار می‌گیرد.

بررسی تاثیر ارتفاع و فاصله طولی بلوک‌ها بر عمق ثانویه پرش

برای بررسی تاثیر ارتفاع بلوک‌ها و همچنین فاصله طولی آن‌ها بر تغییرات عمق ثانویه نسبی پرش، نمودار تغییرات این پارامتر در شرایط ثابت بودن ارتفاع بلوک‌ها و همچنین ثابت بودن فاصله طولی آن‌ها به ازای مقادیر مختلف عدد فرود رسم شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

با توجه به رابطه ۴، تغییرات عمق ثانویه و طول نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه (Fr_1) و نسبت‌های هندسی بلوک‌ها (h/b و s/b) است. در این بخش، تاثیر این پارامترها بر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل عمق ثانویه نسبی (y_2/y_1)، طول نسبی پرش (L_j/y_1) و میزان افت انرژی نسبی ($\Delta E/E_1$) به تفصیل مورد تحلیل و



الف

ب

شکل ۳- تغییرات عمق ثانویه پرش به ازای الف) ارتفاع‌های مختلف و ب) فواصل طولی مختلف بلوک‌ها در حوضچه آرامش مستطیلی

در نتیجه، انرژی جنبشی جریان سریع‌تر مستهلک شده و پرش در عمق کمتری پایدار می‌شود. این رفتار با یافته‌های عاد و راجاراتنام هم‌خوانی دارد که گزارش کردند افزایش زبری موضعی بستر موجب کاهش عمق مزدوج می‌شود (Ead and Rajaratnam, 2002).

برای بررسی کمی تاثیر مشخصات هندسی بلوک‌ها بر تغییرات عمق ثانویه پرش، در یک بازه از عدد فرود مشترک بین حالت‌های مختلف (۱۳/۵-۴/۷) روابطی با ضریب تعیین بالا از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سناریوهای مختلف برآزش داده شد. سپس تغییرات عمق ثانویه نسبی برای هر کدام از سناریوها محاسبه شد و با استفاده از رابطه ۵ میزان کاهش عمق ثانویه در هر سناریو محاسبه شد. میانگین این نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$D = 100 \left[\frac{(y_2/y_1)^* - (y_2/y_1)}{(y_2/y_1)^*} \right] \quad (5)$$

که در آن بالاوند * نشان دهنده شرایط بستر صاف است.

با توجه به شکل ۳ (الف) مشاهده می‌شود در یک مقدار ثابت فاصله طولی بلوک‌ها، با افزایش ارتفاع بلوک‌ها مقدار عمق ثانویه پرش کاهش پیدا می‌کند. به طوری که بلوک‌ها با ارتفاع نسبی ۲ و ۴ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین تاثیر در کاهش عمق ثانویه پرش می‌باشند. اما در بررسی شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود در یک بلوک‌ها با ارتفاع ثابت، چنانچه فاصله طولی آن‌ها افزایش پیدا کند، تاثیر محسوسی در کاهش عمق ثانویه پرش ایجاد نخواهد شد و هر سه فاصله طولی تقریباً دارای تاثیر مشابهی هستند. در تمامی آزمایش‌ها روند کاهش طول پرش با افزایش ارتفاع بلوک واضح‌تر از تغییرات ناشی از فاصله‌ی طولی بوده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر ارتفاع اثر غالب‌تری نسبت به فاصله طولی دارد.

این روند ناشی از تأثیر مستقیم بلوک‌ها بر ساختار جریان و نحوه‌ی تبادل مومنتوم میان جریان فوق‌بحرانی و زیربحرانی است. با افزایش ارتفاع بلوک، جریان ورودی به ناحیه‌ی پرش با جدایش‌های موضعی قوی‌تر، افزایش نوسانات سرعت و تشکیل گردابه‌های ثانویه همراه شده و باعث تشدید تبادل انرژی بین لایه‌های سیال می‌گردد.

جدول ۲- متوسط میزان کاهش عمق ثانویه نسبی در حالت‌های مختلف طول و فاصله بلوک‌ها در حوضچه آرامش مستطیلی

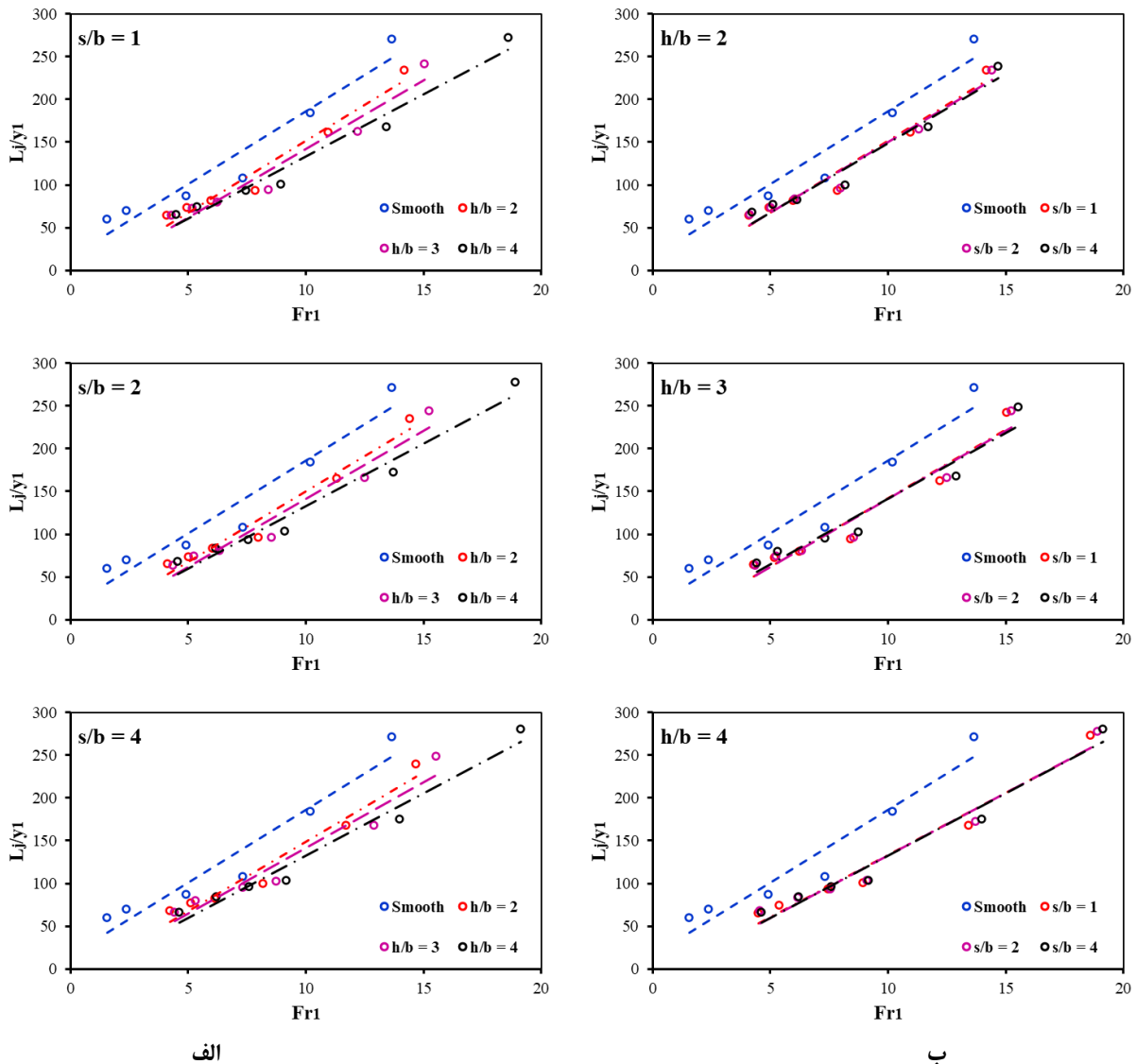
h/b	s/b	D (%)		
		متوسط	بیشینه	کمینه
۲	۱	۷/۲	۳۳/۶	۲/۱
	۲	۹/۶	۳۶/۳	۴/۳
	۴	۱۲/۰	۳۹/۹	۶/۴
۳	۱	۱۵/۸	۴۳/۶	۱۰/۱
	۲	۱۷/۸	۴۵/۸	۱۲/۰
	۴	۲۰/۹	۵۰/۱	۱۴/۶
۴	۱	۲۳/۳	۵۳/۹	۱۶/۵
	۲	۲۷/۰	۶۰/۹	۱۸/۸
	۴	۲۸/۵	۶۲/۲	۲۰/۳

کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌باشند.

بررسی تاثیر ارتفاع و فاصله طولی بلوک‌ها بر طول پرش

برای بررسی بیشتر تاثیر مشخصات هندسی بلوک‌های مکعب مستطیلی با آرایش زیگزاگی، در این قسمت، با ثابت نگه‌داشتن ارتفاع یا فواصل طولی بلوک‌ها، تأثیر این دو پارامتر بر میزان کاهش طول پرش هیدرولیکی بررسی شد که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود در یک فاصله طولی ثابت مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع بلوک‌ها به طور متوسط دارای ۲۷ تا ۶۹ درصد تاثیر در کاهش عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی است. اما در مقایسه تاثیر فواصل طولی مختلف به ازای یک ارتفاع ثابت، مشاهده می‌شود که فواصل طولی مختلف دارای حدوداً ۵-۴۰ درصد تاثیر در کاهش عمق ثانویه نسبی پرش می‌باشند. با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود بلوک‌های با ارتفاع نسبی ۲ و فاصله طولی نسبی ۱ دارای کمترین تاثیر (۷/۲ درصد) و بلوک‌های با ارتفاع نسبی ۴ و فاصله طولی نسبی ۴ دارای بیشترین (۲۸/۵ درصد) تاثیر در



شکل ۴- تغییرات طول پرش به ازای الف) ارتفاعها و ب) فواصل طولی مختلف بلوکها در حوضچه آرامش مستطیلی

فرآیند استهلاک انرژی در محدوده‌ی کوتاه‌تر است. حضور بلوکها سبب افزایش تلاطم موضعی و انحراف جریان در ناحیه‌ی ابتدایی پرش می‌شود و به دلیل درهم‌ریزی بیشتر جریان، موقعیت پایان پرش زودتر حاصل می‌گردد.

برای بررسی کمی تاثیر این پارامترها بر تغییرات طول پرش هیدرولیکی، با استفاده از رابطه ۶، مقدار کاهش طول هر سناریو در باز اعداد فرود مشترک همه سناریوها (۱۳/۵-۴/۷) محاسبه شد که میانگین آنها در جدول ۳ ارائه شده است.

$$G = 100 \left[\frac{(L_j/y_1)^* - (L_j/y_1)}{(L_j/y_1)^*} \right] \quad (۶)$$

با توجه به نتایج شکل ۴ (الف) مشاهده می‌شود در شرایط ثابت بودن مقدار فاصله طولی بلوکها، همه ارتفاع بلوکها باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی شده‌اند. در اعداد فرود پایین (کمتر از ۶)، تغییر ارتفاع بلوکها اختلاف چشمگیری بین ارتفاعهای مختلف بر کاهش طول پرش هیدرولیکی وجود ندارد. اما با افزایش عدد فرود مشاهده می‌شود که بلوک با ارتفاع نسبی ۴، دارای بیشترین تاثیر و بلوک با ارتفاع نسبی ۲ دارای کمترین تاثیر در کاهش طول پرش هیدرولیکی است. همچنین در شکل ۴ (ب) که نتایج بررسی تاثیر فواصل طولی مختلف بلوکها را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که همه فواصل دارای تاثیر نسبتاً یکسانی در کاهش طول پرش هیدرولیک هستند. کاهش طول پرش بیانگر تمرکز و تراکم بیشتر

جدول ۳- متوسط میزان کاهش طول نسبی پرش هیدرولیک در حالت های مختلف طول و فاصله بلوک‌ها در حوضچه آرامش مستطیلی

h/b	s/b	G (%)		
		متوسط	پیشینه	کمینه
۱	۱	۱۹/۴	۲۰/۳	۱۶/۳
۲	۲	۲۰/۰	۲۱/۲	۱۵/۳
	۴	۲۱/۰	۲۳/۱	۱۲/۸
۱	۱	۲۷/۳	۳۰/۰	۱۶/۶
۳	۲	۲۷/۶	۳۰/۴	۱۵/۹
	۴	۲۵/۷	۲۹/۶	۱۰/۹
۱	۱	۲۸/۴	۳۶/۷	۱۶/۴
۴	۲	۲۷/۸	۳۷/۱	۱۳/۷
	۴	۲۷/۹	۳۷/۳	۱۴/۴

پرش محاسبه شد و با استفاده از آن مقدار افت انرژی نسبی مربوط به هر سناریو محاسبه شد. نتایج تاثیر هندسه‌های مختلف بلوک‌ها بر میزان افت انرژی نسبی در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که همه ترکیبات هندسی مربوط به بلوک‌ها در اعداد فرود پایین (عدد فرود کمتر از ۱۲) دارای بیشترین تاثیر در افت انرژی نسبی هستند. اما افزایش عدد فرود میزان افت انرژی بستر صاف و زبر تقریباً یکسان می‌شود. این پدیده می‌تواند به دلیل سایه هیدرولیکی و بی تاثیر شدن زبری‌ها در ایجاد تلاطم جریان باشد. در مقایسه تاثیر ارتفاع‌های مختلف بلوک‌ها مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع بلوک‌ها افت انرژی بلوک‌ها نیز نسبت به بستر صاف افزایش پیدا می‌کند. اما در مقایسه فواصل طولی مختلف این میزان اختلاف بین فواصل مختلف مشاهده نمی‌شود و اختلاف آنها در افزایش افت انرژی نسبی تقریباً یکسان بوده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود حضور بلوک‌ها موجب کاهش قابل توجه طول پرش در مقایسه با حالت صاف شده است. بیشترین کاهش طول پرش مربوط به حالت $h/b=4$ و $s/b=1$ بوده که به طور متوسط در حدود ۲۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد، در حالی که کمترین کاهش مربوط به بلوک‌های کوتاه‌تر و با فاصله‌ی زیاد ($h/b=2, s/b=4$) بوده است. در تمامی آزمایش‌ها روند کاهش طول پرش با افزایش ارتفاع بلوک واضح‌تر از تغییرات ناشی از فاصله‌ی طولی بوده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر h اثر غالب‌تری نسبت به s دارد.

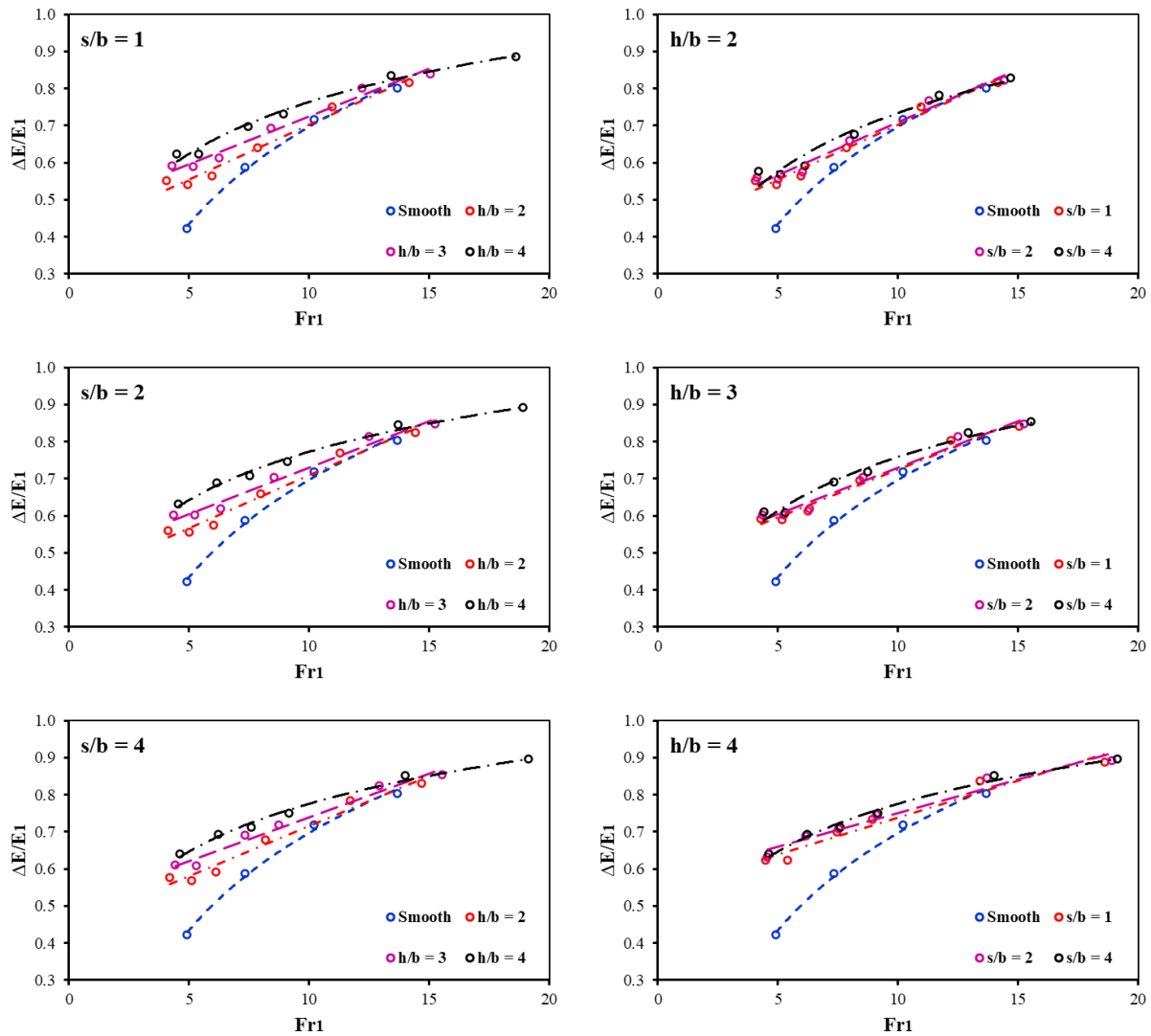
بررسی تاثیر ارتفاع و فاصله طولی بلوک‌ها بر افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی

با استفاده از مقادیر عمق اولیه و ثانویه پرش و همچنین مقدار دبی عبوری از کانال مقدار انرژی مخصوص در مقطع اولیه و ثانویه

جدول ۴- متوسط میزان کاهش افت انرژی نسبی پرش هیدرولیک در حالت های مختلف طول و فاصله بلوک‌ها در حوضچه آرامش مستطیلی در بازه

اعداد فرود ۱۳/۵-۴/۷

h/b	s/b	F (%)		
		متوسط	پیشینه	کمینه
۱	۱	۵/۴	۳۴/۷	۰/۲
۱	۲	۹/۳	۳۷/۸	۳/۸
	۴	۴/۹	۴۰/۲	۶/۲
۱	۱	۸/۶	۴۴/۷	۰/۷
۳	۲	۹/۸	۴۷/۵	۰/۳
	۴	۹/۱	۴۹/۲	۷/۲
۱	۱	۱۴/۱	۵۲/۷	۲/۶
۴	۲	۱۶/۲	۵۷/۶	۲/۹
	۴	۱۶/۴	۵۹/۱	۲/۳



الف

ب

شکل ۵- تغییرات افت انرژی نسبی به ازای الف) ارتفاعها و ب) فواصل طولی مختلف بلوکها در حوضچه آرامش مستطیلی

برای ارزیابی کمی تاثیر این پارامترها بر میزان افت انرژی نسبی، مقادیر افت انرژی ایجاد شده توسط هر کدام از سناریوهای زیری نسبت به بستر صاف با استفاده از رابطه ۷ در بازه اعداد فرود مشترک بین سناریوهای مختلف (۴/۷-۱۳/۵) محاسبه شد که میانگین مقادیر آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به همه سناریوها و همچنین با توجه به پارامترهای بی‌بعد موثر (رابطه ۴)، روابطی رگرسیونی برای تعیین مقادیر عمق ثانویه نسبی پرش، طول نسبی پرش و همچنین افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی به صورت جدول ۵ ارائه شد. در روابط توسعه داده شده از پارامتر بی‌بعد فواصل نسبی ردیفها استفاده نشد، چرا که همانطور که در قسمت‌های قبل مشاهده شد، پارامتر فواصل نسبی بین ردیفها یک پارامتر با حداقل تاثیر است.

برای ارزیابی کمی تاثیر این پارامترها بر میزان افت انرژی نسبی، مقادیر افت انرژی ایجاد شده توسط هر کدام از سناریوهای زیری نسبت به بستر صاف با استفاده از رابطه ۷ در بازه اعداد فرود مشترک بین سناریوهای مختلف (۴/۷-۱۳/۵) محاسبه شد که میانگین مقادیر آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

$$F = 100 \left[\frac{(\Delta E/E_1)^* - (\Delta E/E_1)}{(\Delta E/E_1)^*} \right] \quad (7)$$

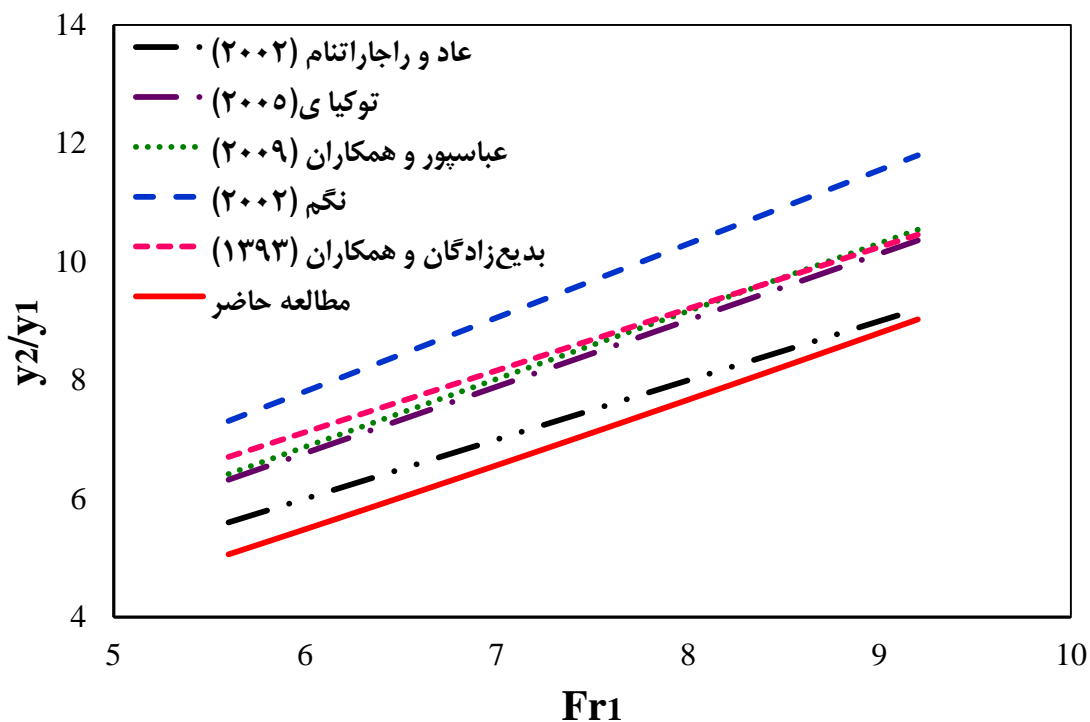
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود که در یک فاصله طولی ثابت بلوکها با افزایش ارتفاع بلوکها (در $s/b=4$) تغییر ارتفاع از $h/b=2$ به $h/b=4$ می‌توان میزان افت انرژی نسبی را به طور متوسط تا حداکثر ۷۰ درصد افزایش داد. در حالی که در یک ارتفاع ثابت با تغییر فواصل بلوکها (در $h/b=2$) تغییر فاصله طولی از

جدول ۵- روابط رگرسیونی توسعه داده شده برای تخمین مشخصات پرش هیدرولیکی تشکیل شده در همه سناریوهای مورد مطالعه

رابطه	متوسط خطای نسبی (درصد)	ضریب تعیین (R^2)
$\frac{y_2}{y_1} = (1.103Fr_1^{1.166}) / \left(\frac{h}{b}\right)^{0.350}$	۱۱/۰	۰/۹۶۰
$\frac{L_j}{y_1} = (18.356Fr_1^{0.946}) / \left(\frac{h}{b}\right)^{0.180}$	۸/۲	۰/۹۲۴
$\frac{\Delta E}{E_1} = (0.338Fr_1^{0.297}) / \left(\frac{h}{b}\right)^{0.100}$	۲/۷	۰/۹۵۶

در ادامه عملکرد موثرترین پیکربندی حوضچه آرامش ($h/b=4$) و با نتایج چندین مطالعه معتبر پیشین مقایسه گردید. هدف اصلی، سنجش تاثیرپذیری عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی در محدوده مشخصی از اعداد فرود بود. برای انجام این مقایسه، روابط تجربی مربوط به عمق ثانویه نسبی حاصل از تحقیقات عباسپور و همکاران، عاد و راجاراتنام، نگم، توکیای (Abbaspour et al., 2009; Ead and Rajaratnam, 2002; Negm, 2002; Tokyay,

و بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۳) و همچنین رابطه تجربی مربوط به افت انرژی حاصل از پژوهش اسدی و همکاران (۱۳۹۶) استخراج (جدول ۶) و با رابطه تعیین شده برای پیکربندی $h/b=4$ (جدول ۶) مقایسه شد. نتیجه این مقایسه در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- تغییرات عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر اساس مطالعات محققین مختلف

جدول ۶- روابط عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی تشکیل شده در حوضچه‌های آرامش ارائه شده توسط محققین مختلف

رابطه	ضریب تعیین رابطه (R^2)	محدوده عدد فرود	محقق
$y_2/y_1 = 1.042Fr_1 + 0.872$	۰/۹۹	۱۲-۴	بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۳)
$y_2/y_1 = 1.24Fr_1 + 0.336$	۰/۹۹	۱۰-۴	نگم (۲۰۰۲)
$y_2/y_1 \cong Fr_1$	۰/۹۹	۱۰-۴	عاد و راجاراتنام (۲۰۰۲)
$y_2/y_1 = 1.1223Fr_1 + 0.0365$	۰/۹۴	۱۲-۴	توکبای (۲۰۰۵)
$y_2/y_1 = 1.146Fr_1$	۰/۹۱	۳/۸-۸/۸	عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)

منابع

اسدی، ا.، امیدپور علویان، ت.، سلطانی ستوبادی، م. و سلمانی مطبوع، ا.ح. ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع مثلی بر پرش هیدرولیکی و توزیع عمق جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای. پژوهش‌های مهندسی آب ایران. ۳(۱): ۱-۱۶.

اسدی، ا.، سلطانی ستوبادی، م.، امیدپورعلویان، ت. و سلمانی مطبوع، ا.ح. ۱۴۰۳. بررسی استهلاک انرژی در فلوام کانال دوزنقه‌ای با موانع مثلی متساوی الساقین. پژوهش‌های مهندسی آب ایران. ۴(۱): ۱-۲۲.

اسدی، ا.، محمدزاده، س. و سیدزاده، ا. ۱۴۰۴. تأثیر بلوک‌های مثلی زیگزاگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی در حوضچه آرامش مستطیلی. دانش آب و هیدرولیک. ۳(۳): ۲۱-۳۵.

اسدی، ف.، فضل اولی، ر. و عمادی، ع.ر. ۱۳۹۶. مطالعه آزمایشگاهی استهلاک انرژی و طول پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زیر با بلوک‌های مکعبی در پایین‌دست دریچه کشویی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۴): ۵۹۷-۶۰۸.

اسلام منش، ب.، دستورانی، م. و رضانی، ی. ۱۴۰۰. اثر جت و زبری نیم استوانه‌ای بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۴): ۸۴۲-۸۵۳.

بدیع زادگان، ر.، صانعی، م. و اسماعیلی، ک. ۱۳۹۳. مقایسه مشخصات پرش هیدرولیکی روی انواع بسترهای موج‌دار. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۲): ۲۲۰-۲۳۲.

جوادی، ع.ر. و اسدی، ا. ۱۴۰۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر هندسه بلوک‌های مستطیلی زیگزاگی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای. نشریه علمی هیدرولیک. ۱۶(۲): ۳۱-۴۲.

Abbaspour, A., Dalir, A. H., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A. A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-environment Research. 3(2): 109-117.

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که حوضچه آرامش مستطیلی مورد مطالعه در این پژوهش دارای بیشترین تأثیر در کاهش عمق ثانویه نسبی پرش هیدرولیکی می‌باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، اثرات استفاده از بلوک‌های مکعب مستطیلی با آرایش زیگزاگی بر مشخصات هیدرولیکی پرش، به طور سیستماتیک مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. بر اساس تحلیل داده‌های حاصل از ۶۰ آزمایش، مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱. مشخص شد که تمامی پارامترهای اصلی پرش هیدرولیکی (عمق ثانویه، طول پرش و اتلاف انرژی) تحت تأثیر معنادار حضور بلوک‌های زیگزاگی قرار می‌گیرند. این تأثیر عمدتاً تابعی از عدد فرود اولیه و نسبت ارتفاع بلوک به عرض بلوکها (h/b) است.

۲. در میان پارامترهای هندسی مورد مطالعه، ارتفاع بلوک (h) به عنوان عامل غالب در تغییر مشخصات پرش شناسایی شد. به طوری که افزایش ارتفاع بلوک‌ها به صورت سیستماتیک منجر به کاهش عمق ثانویه و طول پرش و افزایش اتلاف انرژی نسبی گردید. در مقابل، تغییر فاصله طولی بین ردیف‌های بلوک‌ها (s) تأثیر کمی کمتری داشت.

۳. پیکربندی با بیشترین ارتفاع نسبی ($h/b=4$) در ترکیب با فاصله طولی نسبی ۴ ($s/b=4$) به عنوان مؤثرترین حالت در بهبود عملکرد پرش شناسایی شد که بیشینه کاهش در عمق ثانویه (۲۸/۵ درصد) و بیشینه افزایش در اتلاف انرژی نسبی (۱۶/۴ درصد) را در مقایسه با بستر صاف ایجاد کرد.

یافته‌ها این پژوهش مؤید این نکته است که آرایش زیگزاگی بلوک‌های مکعب مستطیلی می‌تواند به عنوان یک روش مقرون به صرفه و کارآمد برای طراحی حوضچه‌های آرامش فشرده‌تر و با راندمان بالاتر مورد استفاده قرار گیرد. این امر به ویژه در مکان‌هایی با محدودیت طولی می‌تواند راهگشا باشد.

- International Symposium on Hydraulic Structures. Aachen. Germany.
- Mohamed Ali, H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117(1): 83-93.
- Negm, A. M. 2002. Optimal roughened length of prismatic stilling basins. In *Proceedings of the 5th International Conference on Hydro-Science and Engineering*, Poland.
- Omid, M. H., Esmaeeli Varaki, M. and Narayanan, R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*. 45(4): 512-518.
- Padulano, R., Fecarotta, O., Del Giudice, G. and Carravetta, A. 2017. Hydraulic design of a USBR Type II stilling basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 143(5): 04017001.
- Parsamehr, P., Farsadzadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A., Abbaspour, A. and Nasr Esfahani, M. J. 2017. Characteristics of hydraulic jump on rough bed with adverse slope. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 23(3): 301-307.
- Peterka, A. J. 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Engineering Monograph No. 25*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- Pillai N.N. and Kansal, M.L. 2022. Stilling basins using wedge-shaped baffle blocks in 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. *Proceedings of the 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures (9th ISHS)*. IIT Roorkee, Roorkee, India.
- Rajaratnam, N. 1966. The hydraulic jump in sloping channels. *Irrigation and Power*. 32(2): 137-149.
- Sayyadi, K., Heidarpour, M. and Ghadampour, Z. 2022. Effect of bed roughness and negative step on characteristics of hydraulic jump in rectangular stilling basin. *Shock and Vibration*. 2022(1): 1-9.
- Tokyay, N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Proceedings of the Impacts of Global Climate Change*, EWRI. Anchorage. Alaska. USA.
- Al-Mansori, N. J. H., Alfatlawi, T. J. M., Hashim, K. S., and Al-Zubaidi, L. S. 2020. The effects of different shaped baffle blocks on the energy dissipation. *Civil Engineering Journal*, 6(5), 961-973.
- Asadi, E., Mohammadzadeh, S., Mirzaei, N. and Seyedzadeh, A. 2025. Hydraulic characteristics of a trapezoidal stilling basin with triangular blocks. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 31(2): 173-187.
- Aydın, M. C. and Ulu, A. E. 2018. Effects of different shaped baffle blocks on the energy dissipation and the downstream scour of a regulator. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*. 8(2): 69-74.
- Carollo, F. G., Ferro, V., and Pampalone, V. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(9): 989-999.
- Chanson, H. 2001. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*. 11(4): 205-242.
- Ead, S. A., and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(7): 656-663.
- Ellayn, A. F., and Sun, Z. L. 2012. Hydraulic jump basins with wedge-shaped baffles. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 13(7): 519-525.
- Forster, J. W., and Skrinde, R. A. 1950. Control of the hydraulic jump by sills. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 115(1): 973-987.
- Habibzadeh, A., Loewen, M. R. and Rajaratnam, N. 2012. Performance of baffle blocks in submerged hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(10): 902-908.
- Hager W.H. 1992. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. The Netherlands.
- Hughes, W. C. and Flack, J. E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic engineering*. 110(12): 1755-1771.
- Maatooq, J. 2018. The effects of baffle blocks locations and blockage ratio on the sequent depth and velocity distribution of forced hydraulic jump. 7th

Experimental Investigation of the Geometric Properties and Arrangement of Rectangular Cubical Blocks on Hydraulic Jump Control in a Rectangular Channel

E. Asadi^{1*}, A. Javadi², A. Seyedzadeh^{3,4}

Received: Nov.01, 2025

Accepted: Feb.06, 2026

Abstract

The hydraulic jump is a key phenomenon in hydraulic engineering, playing a vital role in energy dissipation and the protection of downstream structures. This study presents an experimental investigation into the effects of using rectangular cubes in a zigzag arrangement on the characteristics of a hydraulic jump in a rectangular channel. The experiments were conducted in a flume with a width of 0.5 meters for initial Froude numbers ranging from 1.5 to 19.1. The independent variables included the relative block height ($h/b = 2, 3, 4$) and the relative longitudinal spacing between their rows ($s/b = 1, 2, 4$). A quantitative comparison of the laboratory data with the baseline (smooth bed) showed that the presence of these blocks leads to a reduction in the sequent depth and jump length, as well as an increase in energy dissipation. Analysis revealed that the block height parameter has a more dominant effect than the longitudinal spacing. Specifically, blocks with a relative height of 4, compared to a height of 2, resulted on average in an additional 57% to 69% reduction in the sequent depth and an additional 24% to 32% reduction in the jump length. The maximum increase in relative energy dissipation (16.4%) was also associated with the configuration featuring the greatest height and spacing.

Keywords: Energy dissipation, Hydraulic jump, Jump length, Sequent depth, Stilling basin

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- M.Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

3- Assistant professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Fasa University, Fasa, Iran

4- Research Institute of Water Resources Management in Arid Region, Fasa University, Fasa, Iran

(*- Corresponding Author Email: Asadi@azaruniv.ac.ir)