

بررسی آزمایشگاهی اثر طول آستانه در پرتاب‌کننده‌های مثلثی روی آبشستگی در پایین دست

صالح عبداللہی، علیرضا مسجدی*، محمد حیدرنژاد، علی افروس و مهدی اسدی لور^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۹)

چکیده

استفاده از سازه‌های پرتاب‌کننده مزایای اقتصادی و ایمنی مناسبی در مقایسه با سایر سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی دارند. در این پژوهش به منظور بررسی اثر طول آستانه پرتاب‌کننده مثلثی روی آبشستگی در پایین دست آن، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیل‌شکل از جنس پلاکسی گلاس انجام گرفت. در این پژوهش با استفاده از پرتاب‌کننده مثلثی با طول و زاویه آستانه و عدد فرود مختلف، آبشستگی در پایین دست پرتاب‌کننده مثلثی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش طول آستانه در پرتاب‌کننده مثلثی، استهلاک انرژی در پرتاب‌کننده مثلثی افزایش یافته و عمق آبشستگی در پایین دست آن کاهش می‌یابد. همچنین در طول نسبی آستانه ۰/۲۱ و زاویه آستانه ۴۵ درجه بیشترین کاهش عمق آبشستگی به میزان ۸۵ درصد دیده شد. به منظور تعیین بیشترین عمق آبشستگی نسبی، رابطه‌ای ارائه شد که ضریب همبستگی نتایج حاصل از این معادله با نتایج آزمایشگاهی حدود ۰/۹۲ است.

واژه‌های کلیدی: پرتاب‌کننده مثلثی، عمق آبشستگی، رودخانه، طول آستانه

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: drmasjedi.2007@yahoo.com

مقدمه

با احداث سد های بلند در مسیر رودخانه ها، سیلاب مازاد بر گنجایش مخزن سد به وسیله سرریزها تخلیه می شود. با توجه به اینکه جریان در سرریزها فوق بحرانی است، در نتیجه انرژی جنبشی جریان در انتهای سرریز بسیار زیاد است و می تواند موجب فرسایش در پایین دست سرریز شود؛ بنابراین یک سرریز نیاز به سازه مستهلک کننده انرژی در قسمت انتهایی دارد تا از انرژی مازاد خروجی کاسته و میزان فرسایش و آبستگی در پایین دست سرریز به کمترین مقدار برسد. آبستگی پایین دست سازه های هیدرولیکی از مسائل عمده ای است که همواره مورد توجه مهندسان و طراحان بوده است. حفره آبستگی ایجاد شده در پایین دست سازه های هیدرولیکی موجب افزایش جریان زیر سازه ای و در نتیجه پیشرفت حفره آبستگی به سمت سازه می شود که می تواند پایداری سد، سرریز و سازه های مرتبط را تهدید کرده و حتی منجر به شکست آن ها شود. پناهی و همکاران (۱۰) روش های مختلفی برای جلوگیری و کاهش آبستگی در سازه های هیدرولیکی پیشنهاد کرده اند که می توان آن ها را به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم بندی کرد. در روش مستقیم مقاومت بستر در مقابل تنش های وارده افزایش می یابد. این کار با تقویت مصالح موجود به مصالح مقاومت تر انجام می شود که از روش های معمول و اقتصادی استفاده از بلوک های بتنی و سنگ چین است. در روش غیرمستقیم با اصلاح الگوی جریان در اطراف سازه مدنظر باعث کاهش نیروی مخرب و کاهش آبستگی می شود. در سالهای اخیر استفاده از پرتاب کننده های جامی به دلیل مزایای اقتصادی این سازه در مقایسه با سایر مستهلک کننده ها مثل حوضچه آرامش بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. باوان و ماچلا (۱) بیان کردند، پرتاب کننده جامی ساده و جامی دندانهای در حالت مستغرق به دلیل شرایط مناسب تر استهلاک انرژی بهتر از حالت آزاد یا فیلپ عمل می کند و آبستگی کمتری را ایجاد می کند. براورز و رادکیوی (۲) عنوان کردند، برای جلوگیری از ایجاد آبستگی موضعی در پایین دست سازه های هیدرولیکی

تخلیه کننده جریان، کاربرد روش های مختلف استهلاک انرژی موجب حفاظت پی سازه هیدرولیکی در مقابل آبستگی می شود. ویچر و هاگر (۱۳)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر سری دندانهای منشوری روی پرتاب کننده جامی شکل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سری دندانهای منشوری با عرض قاعده کمتر و تعداد بیشتر دندان در یک مسیر پرتاب، تأثیر بیشتری روی عمق آبستگی دارد و همچنین چیدمان دندانها روی پرتاب کننده بسیار مهم است. مازورک و راجاراتنام (۶)، آبستگی ناشی از جت مدور با ریزش قائم را روی مصالح غیر چسبنده با پایاب کوچک بررسی کردند. نتایج نشان داد، عمق آبستگی تابعی از عدد فرود ذره است. هگر و مینوز (۵)، تغییرات آبستگی را در شرایط حضور و عدم حضور جت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وقتی جریان جت برقرار است، عمق آبستگی بیشتر است و این موضوع باید در طراحی ها مد نظر قرار گیرد. ده مرده و همکاران (۳)، آبستگی در پایین دست سرریز پلکانی در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، ابعاد آبستگی با افزایش اندازه رسوبات و عدد فرود ذرات کاهش و عمق بحرانی کاهش می یابد. با کاهش عدد فرود ذرات، عمق آبستگی نسبی، فاصله بیشترین عمق آبستگی و طول نسبی آبستگی به ترتیب ۶/۶ درصد، ۷۵/۶ درصد و ۷۳/۴ درصد کاهش یافت. همچنین معادله تجربی تحلیل رگرسیون برای تخمین آبستگی را ارائه دادند. یوبران و همکاران (۱۴)، شبیه سازی عددی روی زاویه گسترش در سرریز جامی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات نشان می دهد، زاویه جهش در مکان های مختلف بخش خروجی سرریز متفاوت است، اما توزیع ویژه سرعت بخش خروجی نامشخص است. در این پژوهش، درجه انحراف سرعت جریان در قسمت خروجی سرریز در جهت جانبی با زاویه گسترش کمی سازی می شود. نتایج نشان داد، ویژگی های توزیع و بیشترین مقدار زاویه گسترش تحت تأثیر تغییر اندازه جام سرریز و شرایط جریان نزدیک قرار می گیرد و معادلات را برای محاسبه بیشترین زاویه پرتاب جریان از جام سرریز ارائه شده است. شفق

کاهش آبشستگی ایجاد می‌کنند. همان‌طور که اشاره شد، مطالعه‌های گسترده‌ای روی پدیده آبشستگی در پایین دست پرتاب‌کننده‌ها انجام شده است؛ ولی تاکنون مطالعات جامعی در مورد اثر طول آستانه پرتاب‌کننده مثلی روی پدیده آبشستگی در پایین دست آن انجام نشده است. در این پژوهش علاوه بر انجام آزمایش‌ها مختلف روی مدل‌های گوناگون، رابطه‌ای برای تخمین عمق آبشستگی در پایین دست پرتاب‌کننده مثلی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

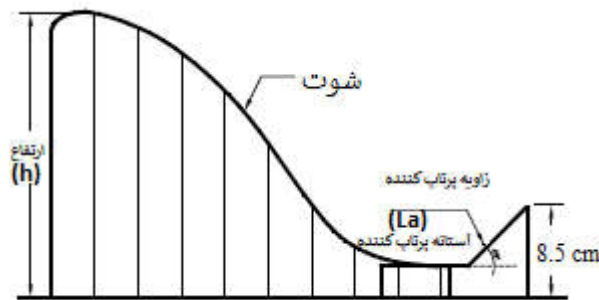
به منظور بررسی اثر طول آستانه پرتاب‌کننده مثلی بر میزان آبشستگی رسوبات در پایین دست آن، پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن جریان دائمی و ثابت بودن خصوصیات سیال، رابطه زیر بین پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلی در حالت تعادل برقرار است:

$$f1 = (ds, \Delta E, H, q, L_a, \alpha, h, d_{50}, G_s, \rho_w, \nu, g, S) \quad (1)$$

در رابطه ۱ بیشترین عمق آبشستگی، ΔE افت انرژی در سرریز است که برابر است با $(E - E_1)$ که E انرژی اولیه در بالادست سرریز که برابر است با $(E = y + V^2/2g)$ که در آن y عمق جریان در بالادست سرریز و V سرعت جریان در بالادست سرریز و E_1 برابر با انرژی جریان در پایان مسیر پرتابه که تقریباً برابر است با انرژی جریان در عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پائین دست سرریز که برابر است با $(E_1 = y_1 + V_1^2/2g)$ که در آن y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی و V_1 سرعت جریان عمق اولیه پرش هیدرولیکی، H ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب سطح مخزن و پایاب، q دبی در واحد عرض، L_a طول آستانه، α زاویه آستانه، h ارتفاع پرتاب‌کننده، d_{50} قطر متوسط رسوبات، G_s چگالی رسوبات، ρ_w جرم مخصوص سیال، ν لزجت سینماتیکی سیال، g شتاب ثقل و S شیب کف کانال است (شکل ۱).

لورن و همکاران (۱۲)، در خصوص عبارات صریح پیش‌بینی‌کننده از مدل‌های داده محور برای تخمین عمق آبشستگی در سرریزهای جامی اسکی استفاده کردند. در این پژوهش روش‌های پیشنهادی معادلات صریح و واضح با کاربردهای ساده برای تخمین عمق آبشستگی ارائه کردند. برای ارزیابی‌های کمی فرمول‌های توسعه یافته، سه معیار آماری رایج، یعنی از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (CC) استفاده شد.

مؤمنی و صالحا و همکاران (۸)، آبشستگی ناشی از جت‌های دوزنقه‌ای در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل با مصالح غیریکنواخت را بررسی کردند و نشان دادند، مدل‌های رگرسیونی خطی و توانی ارائه شده توسط آن‌ها در پیش‌بینی بیشترین عمق آبشستگی موفق است. مهر کیا و همکاران (۷)، معادلات حاکم بر آبشستگی در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل را با به‌کارگیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در تمامی روابط ارائه شده و رابطه پیشنهادی، دبی در واحد عرض و ارتفاع هد پرتابی با میزان آبشستگی رابطه مستقیم دارد. پیرستانی و ریاضی (۹)، بررسی آزمایشگاهی اثر دندان‌ها و میزان بازشدگی دریچه را در جام پرتابی بر شکل نیمرخ بستر با مصالح غیرچسبنده را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند، با افزایش شدت جریان ابعاد حفره آبشستگی افزایش یافته ولی عمق پایاب روند کاهشی دارد. صفرنژادی و همکاران (۱۱)، پژوهشی در خصوص اثر مانع با دندان‌ها در پرتاب‌کننده جامی شکل روی آبشستگی پایین دست انجام دادند. نتایج نشان داد، وجود دندان‌ها به شکل مثلی باعث کاهش ۱۲/۷ درصد آبشستگی در پایین دست می‌شود. اسکندری و همکاران (۴)، پژوهشی روی تأثیر هندسه پایین دست پرتابه جامی شکل بر میزان آبشستگی پایاب آن انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داد که وجود دندان‌ها در پرتاب‌کننده باعث کنترل عمق آبشستگی در پایین دست می‌شود. همچنین پرتاب‌کننده جامی شکل با دندان‌های مستطیلی حدود ۱۳ درصد



شکل ۱. نمای از پرتاب کننده مثلثی

بحرانی (u_c) که از رابطه شیلدز به دست آمد و همچنین باتوجه به اینکه آبشستگی در آب زلال در $u/u_c \leq 1$ به وقوع می پیوندد، انتخاب شد. به منظور تعیین زمان انجام هر آزمایش، ضروریست که زمان تعادل اندازه گیری شود. زمان تعادل زمانی است که حفره آبشستگی در رسوبات به حالت تعادل می رسد. برای اندازه گیری زمان تعادل یک سری آزمایش با دبی بیشینه ۱۲ لیتر بر ثانیه انجام شد و در زمان های مختلف عمق حفره آبشستگی برداشت شد. در نهایت در زمان ۱۲۰ دقیقه عمق آبشستگی تقریباً ثابت مانده و به حالت تعادل رسید (شکل ۳)؛ بنابراین در کلیه آزمایش ها از این زمان به عنوان زمان تعادل استفاده شد و در هر آزمایش بعد از ۱۲۰ دقیقه، پمپ خاموش و پس از زهکشی کامل رسوبات، برداشت نقاط انجام شد. در این پژوهش از ۴ شدت جریان در بازه ۴ تا ۱۲ لیتر بر ثانیه استفاده شد. کمترین دبی بر مبنای شروع تغییرات توپوگرافی پایین دست پرتاب کننده و بیشینه دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه باتوجه به توان خروجی پمپ و شرایط آزمایشگاه انتخاب شد. به منظور انجام آزمایش ها، در مقطعی از فلوم به طول ۱ متر، عرض ۵۰ سانتی متر و عمق ۱۵ سانتی متر بعد از سرریز رسوبات هم تراز با کف سرریز قرار داده شد. سپس سطح رسوبات توسط تسطیح کننده چوبی صاف شد و سپس توسط متر لیزری به عنوان سطح مبنای برداشت شد. در ابتدای هر آزمایش مدل پرتاب کننده در فاصله ۴ متری از ابتدای فلوم نصب شد. عمق آب در بالادست سرریز توسط عمق سنج لیزری با درصد خطای ۲ درصد میلی متر اندازه گیری شد.

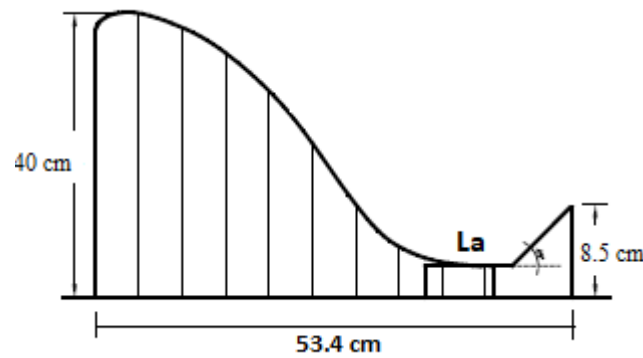
با صرف نظر کردن از پارامترهای ثابت در رابطه ۱، با استفاده از تئوری باکینگهام رابطه ۲ بصورت زیر بدون بعد می شود:

$$f_2 = \left(\frac{ds}{H}, \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{L\alpha}{h}, \alpha, \frac{\Delta E}{E} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ds/H بیشترین عمق نسبی آبشستگی، $Fr = q/\sqrt{gH^3}$ عدد فرود، $L\alpha/h$ طول نسبی آستانه، α زاویه آستانه و $\Delta E/E$ افت نسبی انرژی در سرریز است.

آزمایش های این پژوهش به صورت هیدرولیکی در فلوم آزمایشگاهی واقع در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به طول ۸، عرض ۵/۰ و ارتفاع ۶/۰ متر انجام شد. دیواره های فلوم شفاف و از جنس پلکسی گلاس ساخته شد و در نتیجه شرایط جریان قابل مشاهده بود. کف فلوم صاف و ثابت و بدون شیب در نظر گرفته شد. مدل سرریز مثلثی شکل طبق استاندارد USBR با ارتفاع ۴۰ سانتی متر و طول ۵۳/۴ سانتی متر ساخته شد. در این پژوهش از چهار مدل سرریز با طول آستانه ۲/۵، ۴/۵، ۶/۵ و ۸/۵ سانتی متر و چهار زاویه آستانه سرریز ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه از جنس پلکسی گلاس ساخته شد. در کلیه ماکت ها پاشنه انتهایی پرتاب کننده ۸/۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. همچنین ۶۴ آزمایش باتوجه به متغیرهای مدنظر در آزمایش انجام شد. (شکل ۲).

رسوبات استفاده شده در این پژوهش از مصالح طبیعی غیر چسبنده با چگالی ثابت ۱/۷ با اندازه قطر متوسط ۵ میلی متر استفاده شد. این اندازه باتوجه به سرعت جریان (u) و سرعت



شکل ۲. پرتاب‌کننده مثلی



شکل ۳. موقعیت پرتاب‌کننده مثلی در فلوم آزمایشگاهی و رسوبات در پایین‌دست آن

پایین‌دست به مخزن پمپاژ شد. در انتهای زمان تعادل پمپ خاموش و دریچه انتهایی به آرامی باز شد تا مصالح زهکشی شوند. سپس توسط متر لیزری برداشت توپوگرافی از سطح رسوبات انجام شد.

بحث و نتایج

در همه آزمایش‌ها پس از تنظیم دبی، عمق جریان بر روی پرتاب‌کننده مثلی اندازه‌گیری شد. پارامترهای اثرگذار بر شدت جریان عبوری از پرتاب‌کننده، طول آستانه پرتاب‌کننده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های هیدرولیکی پرتاب‌کننده مثلی در جدول ۱ ارائه شده است.

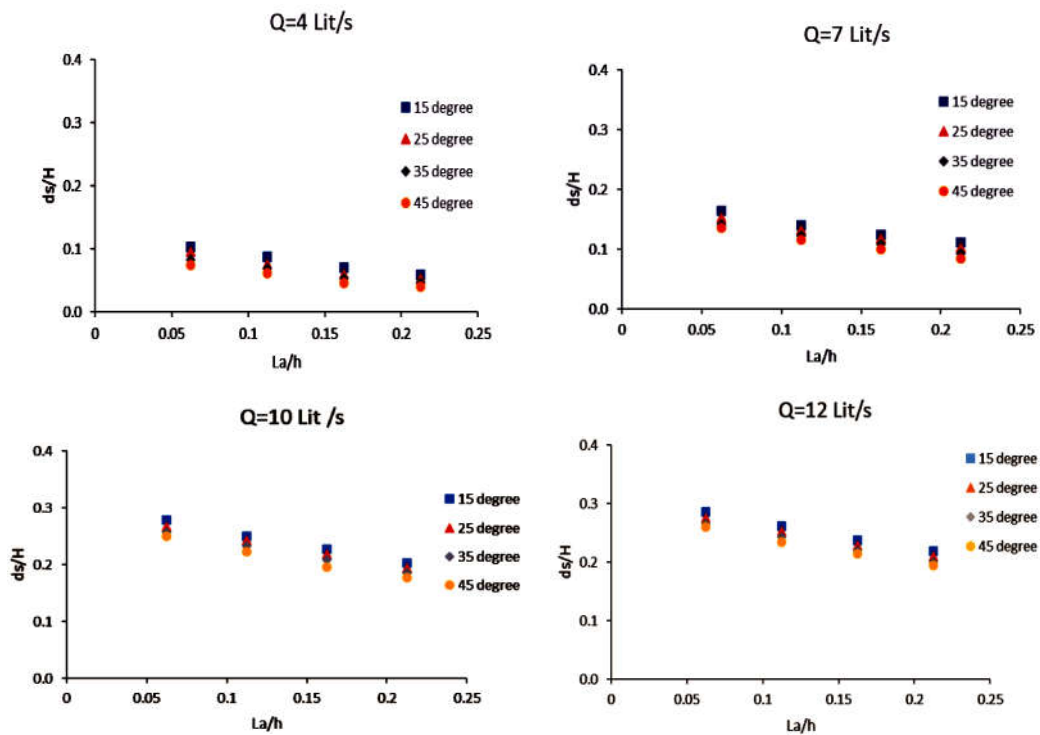
همچنین توسط سرریز لبه تیز مثلی در بالادست، دبی جریان در فلوم اندازه‌گیری شد. به‌منظور کالیبراسیون سرریز لبه مثلی از روش حجمی استفاده شد. عمق آب در پایین‌دست پرتاب‌کننده توسط دریچه‌ای در انتهای فلوم تنظیم شد. عمق پایاب در این آزمایش‌ها ثابت و به‌اندازه پاشنه انتهایی پرتاب‌کننده در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. جریان آب ابتدا از طریق پمپ از مخزن زمینی به سمت مخزن آرام‌کننده ورودی در بالادست فلوم هدایت شد. جریان ورودی پس از عبور از روی سرریز و پرش از روی پرتاب‌کننده مثلی به داخل حوضچه رسوبات برخورد کرده و چاله آبستگگی به وجود آمد (شکل ۳). جریان آب پس از عبور از سرریز و حوضچه رسوبات از طریق کانال

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی پرتاب‌کننده مثلثی و آبشستگی در پایین‌دست

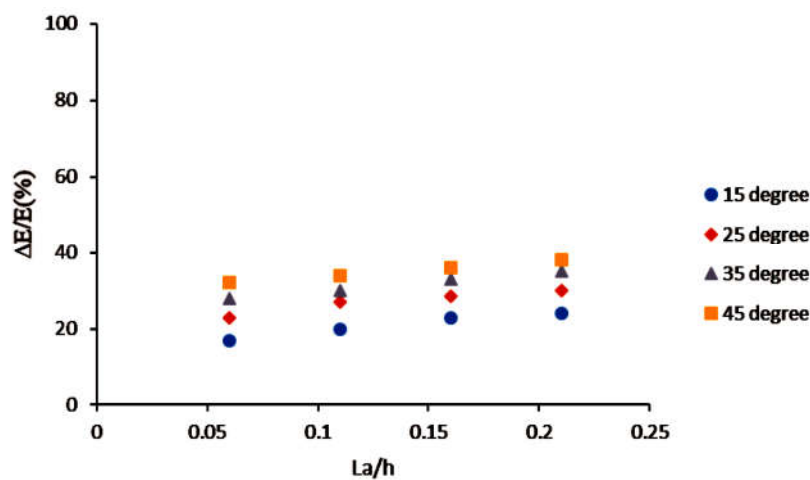
La/h=۰/۰۶			La/h=۰/۱۱			La/h=۰/۱۶			La/h=۰/۲۱		
α (deg.)	Fr	ds/H	α (deg.)	Fr	ds/H	α (deg.)	Fr	ds/H	α (deg.)	Fr	ds/H
۱۵	۰/۰۲۲	۰/۱۰۴	۱۵	۰/۰۱۹	۰/۰۸۹	۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۷۰	۱۵	۰/۰۱۴	۰/۰۵۹
۱۵	۰/۰۳۰	۰/۱۶۴	۱۵	۰/۰۲۷	۰/۱۴۰	۱۵	۰/۰۲۵	۰/۱۲۵	۱۵	۰/۰۲۳	۰/۱۱۲
۱۵	۰/۰۴۳	۰/۲۷۸	۱۵	۰/۰۳۹	۰/۲۵۰	۱۵	۰/۰۳۵	۰/۲۲۸	۱۵	۰/۰۳۱	۰/۲۰۳
۱۵	۰/۰۴۷	۰/۲۸۷	۱۵	۰/۰۴۲	۰/۲۶۳	۱۵	۰/۰۳۹	۰/۲۳۸	۱۵	۰/۰۳۵	۰/۲۱۹
۲۵	۰/۰۲۲	۰/۰۹۶	۲۵	۰/۰۱۹	۰/۰۷۷	۲۵	۰/۰۱۶	۰/۰۶۰	۲۵	۰/۰۱۴	۰/۰۵۳
۲۵	۰/۰۳۰	۰/۱۵۴	۲۵	۰/۰۲۷	۰/۱۳۳	۲۵	۰/۰۲۵	۰/۱۱۹	۲۵	۰/۰۲۳	۰/۱۰۳
۲۵	۰/۰۴۳	۰/۲۶۸	۲۵	۰/۰۳۹	۰/۲۴۳	۲۵	۰/۰۳۵	۰/۲۱۹	۲۵	۰/۰۳۱	۰/۱۹۴
۲۵	۰/۰۴۷	۰/۲۷۷	۲۵	۰/۰۴۲	۰/۲۵۳	۲۵	۰/۰۳۹	۰/۲۲۹	۲۵	۰/۰۳۵	۰/۲۱۱
۳۵	۰/۰۲۲	۰/۰۸۳	۳۵	۰/۰۱۹	۰/۰۶۹	۳۵	۰/۰۱۶	۰/۰۵۳	۳۵	۰/۰۱۴	۰/۰۴۷
۳۵	۰/۰۳۰	۰/۱۴۳	۳۵	۰/۰۲۷	۰/۱۲۳	۳۵	۰/۰۲۵	۰/۱۰۹	۳۵	۰/۰۲۳	۰/۰۹۴
۳۵	۰/۰۴۳	۰/۲۵۷	۳۵	۰/۰۳۹	۰/۲۳۳	۳۵	۰/۰۳۵	۰/۲۰۹	۳۵	۰/۰۳۱	۰/۱۸۶
۳۵	۰/۰۴۷	۰/۲۶۷	۳۵	۰/۰۴۲	۰/۲۴۴	۳۵	۰/۰۳۸	۰/۲۲۱	۳۵	۰/۰۳۵	۰/۲۰۰
۴۵	۰/۰۲۲	۰/۰۷۵	۴۵	۰/۰۱۹	۰/۰۶۲	۴۵	۰/۰۱۶	۰/۰۴۷	۴۵	۰/۰۱۴	۰/۰۴۱
۴۵	۰/۰۳۱	۰/۱۳۶	۴۵	۰/۰۲۷	۰/۱۱۷	۴۵	۰/۰۲۵	۰/۱۰۰	۴۵	۰/۰۲۳	۰/۰۸۵
۴۵	۰/۰۴۳	۰/۲۵۰	۴۵	۰/۰۳۹	۰/۲۳۳	۴۵	۰/۰۳۵	۰/۲۰۳	۴۵	۰/۰۳۱	۰/۱۷۸
۴۵	۰/۰۴۷	۰/۲۶۰	۴۵	۰/۰۴۲	۰/۲۳۴	۴۵	۰/۰۳۹	۰/۲۱۵	۴۵	۰/۰۳۵	۰/۱۹۴

استهلاک انرژی در سرریز می‌شود که در نتیجه جریان با انرژی کمتر به پایین‌دست منتقل می‌شود و عمق آبشستگی کمتری در پایین‌دست پرتاب‌کننده ایجاد می‌شود؛ به طوری که در طول نسبی آستانه ۰/۲۱ و زاویه آستانه ۴۵ درجه بیشترین کاهش عمق آبشستگی به میزان ۸۵ درصد و کمترین میزان کاهش عمق آبشستگی در طول نسبی آستانه ۰/۰۶ و زاویه آستانه ۱۵ درجه حدود ۶ درصد به دست آمده است. افزایش طول نسبی آستانه به میزان ۷۰ درصد یعنی طول آستانه ۲/۵ به ۸/۵ سانتی‌متر (La/h=0.06 تا La/h=0.21) در زاویه آستانه ۴۵ درجه، کاهش عمق آبشستگی حدود ۸۸ درصد ایجاد می‌شود.

تأثیر طول نسبی آستانه در پرتاب‌کننده مثلثی بر عمق آبشستگی شکل ۴ نمودارهای بدون بعد طول نسبی آستانه و عمق نسبی آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده مثلثی با طول نسبی ۰/۰۶، ۰/۱۱، ۰/۱۶ و ۰/۲۱ و زاویه آستانه ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه برای شدت جریان در بازه ۴ تا ۱۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴ در کلیه زاویه آستانه و شدت جریان ها، با افزایش طول نسبی آستانه پرتاب‌کننده، عمق نسبی آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۵ افزایش طول آستانه پرتاب‌کننده باعث افزایش طول مسیر حرکت جریان در روی پرتاب‌کننده شده و این موضوع باعث افزایش



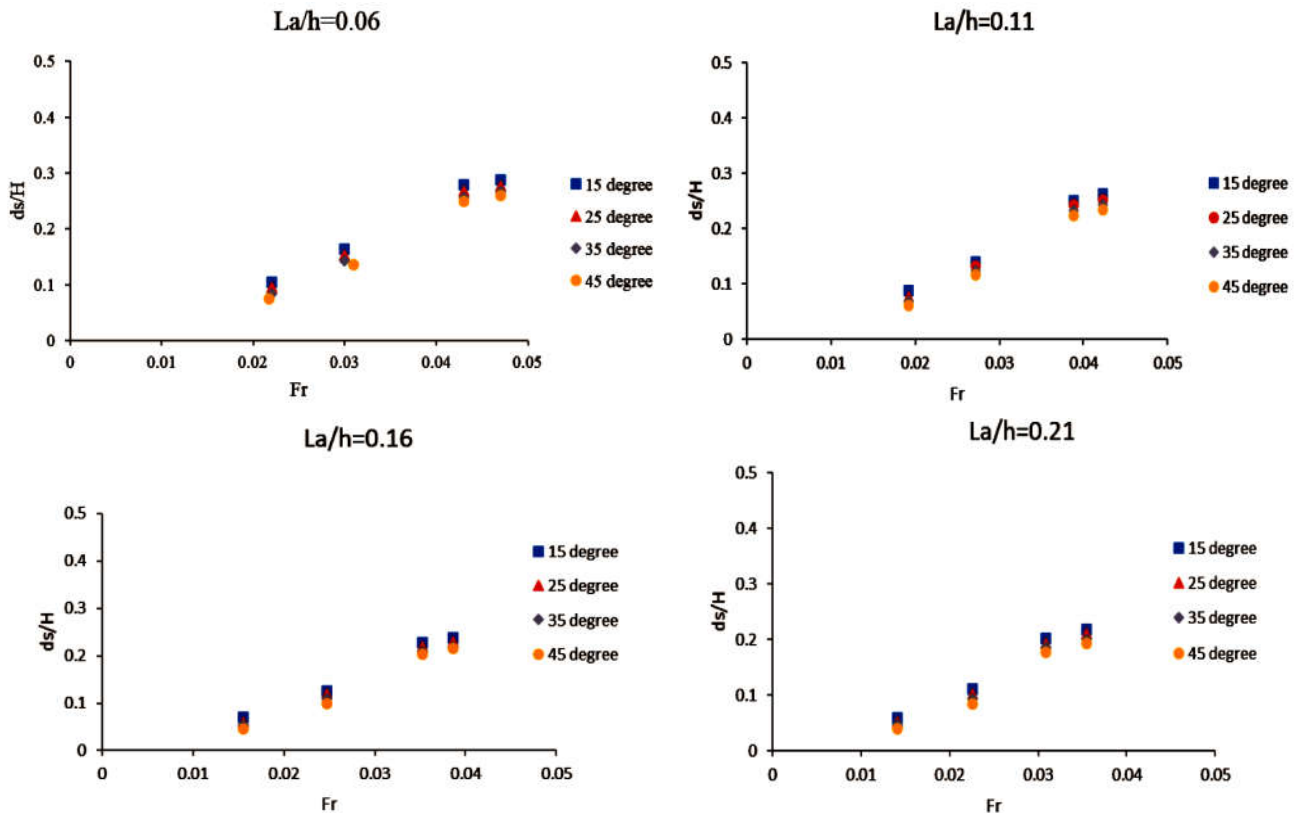
شکل ۴. طول نسبی آستانه پرتاب‌کننده و آبشستگی در پایین‌دست



شکل ۵. تلفات نسبی انرژی در پرتاب‌کننده مثلی در طول نسبی آستانه مختلف

و طول آستانه، با افزایش عدد فرود، عمق نسبی آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده افزایش می‌یابد. این عمق در مدل‌های مختلف با طول و زوایای مختلف آستانه در پرتاب‌کننده متفاوت است. افزایش عدد فرود باعث افزایش سرعت جریان روی پرتاب‌کننده می‌شود و انرژی در پرتاب‌کننده افزایش می‌یابد

تأثیر عدد فرود در پرتاب‌کننده مثلی بر عمق آبشستگی شکل ۶ نمودارهای بدون بعد عدد فرود و عمق نسبی آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده مثلی با طول نسبی ۰/۰۶، ۰/۱۱، ۰/۱۶ و ۰/۲۱ و زاویه آستانه ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه برای اعداد فرود مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل در کلیه زاویه



شکل ۶. عدد فرود و آبشستگی در پایین دست

تعیین مقادیر تجربی در رابطه ۳ ارائه شد.

سپس مدل با ۸۵ درصد داده‌ها ساخته شد و با ۱۵ درصد آنها صحت سنجی انجام گردید. آنالیز آماری مربوط به ارزیابی رابطه ۴ با ۱۵٪ داده‌هایی که در توسعه این مدل‌ها استفاده نشده بودند با $R^2 = 0.92$ و $RMSE = 0.8356$ به دست آمد.

$$\frac{ds}{H} = 60.487(Fr)^{1.524}(\alpha)^{-0.118}\left(\frac{La}{h}\right)^{0.108} \quad (4)$$

به منظور همبستگی میان مقادیر ضریب جریان اندازه گیری شده و مقادیر محاسبه شده در رابطه ۴، نمودار شکل ۷ نسبت به خط ۴۵ درجه با ۳ درصد خطا ارائه شد.

نتیجه گیری

در این پژوهش آزمایش‌ها برای بررسی عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلثی در فلوم مستطیلی آزمایشگاهی با طول نسبی ۰/۰۶، ۰/۱۱، ۰/۱۶ و ۰/۲۱ و زاویه آستانه ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه برای

در نتیجه جریان آب با انرژی زیاد در پایین دست، باعث افزایش عمق آبشستگی می‌شود. افزایش عدد فرود به میزان ۶۰ درصد در طول آستانه ۸/۵ سانتی‌متر و در زاویه آستانه ۴۵ درجه، کاهش عمق آبشستگی حدود ۷۴ درصد ایجاد می‌شود.

ارائه رابطه برای تخمین عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلثی

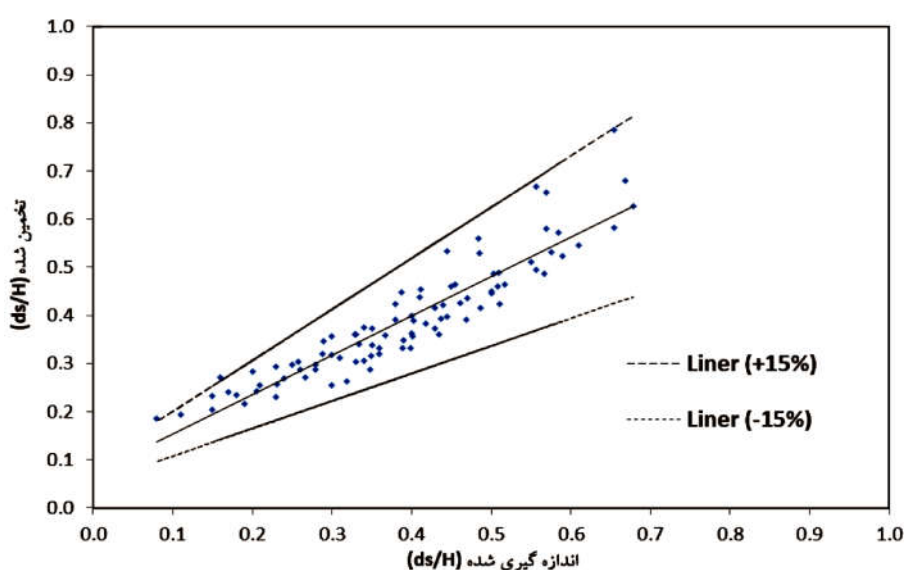
به منظور تخمین عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلثی، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، رابطه ۳ با استفاده از رگرسیون غیرخطی بین عدد فرود، زاویه آستانه و طول نسبی آستانه در پرتاب‌کننده مثلثی ایجاد شد.

$$\frac{ds}{H} = a(Fr)^b \times (\alpha)^c \times \left(\frac{La}{h}\right)^d \quad (3)$$

در رابطه ۳، a, b, c, d مقادیر تجربی بوده که بر اساس روش کمترین مربعات محاسبه شد. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به کمک آنالیز رگرسیون غیرخطی مقادیر جدول ۲ برای

جدول ۲. آنالیز آماری برای تخمین ضرایب و توان های رابطه ۳

پارامتر	مقدار	انحراف استاندارد	محدوده اطمینان ۹۵٪	
			حداقل	حداکثر
a	۶۰/۴۸۷	۹/۱۹۲	۴۲/۱۰۱	۷۸/۸۳
b	۱/۵۲۴	۰/۰۳۶	۱/۴۵۲	۱/۵۹۷
c	-۰/۱۱۸	۰/۰۱۷	-۰/۱۵۳	-۰/۰۸۴
d	۰/۱۰۸	۰/۰۴۷	۰/۰۷۴	۰/۱۴۲



شکل ۷. همبستگی مقادیر عمق آبشستگی نسبی اندازه گیری شده و محاسبه شده توسط رابطه ۴

فرود و عمق نسبی آبشستگی رابطه مستقیمی وجود دارد؛ به طوری که با افزایش عدد فرود در عمق نسبی آبشستگی افزایش می یابد. به منظور تخمین عمق آبشستگی در پایین دست پرتاب کننده مثلثی، با استفاده از نرم افزار آماری SPSS رابطه ای با استفاده از رگرسیون غیرخطی بین عدد فرود، زاویه آستانه و طول نسبی آستانه در پرتاب کننده مثلثی ایجاد شد که ضریب همبستگی نتایج حاصل از این معادله با نتایج آزمایشگاهی حدود ۰/۹۲ به دست آمد.

شدت جریان مختلف انجام گرفت. متغیرهای مؤثر در این پژوهش طول نسبی آستانه، زاویه آستانه و شدت جریان بود. نتایج این پژوهش نشان داد، بین طول نسبی آستانه و عمق نسبی آبشستگی رابطه معکوس وجود دارد؛ به طوری که افزایش طول نسبی آستانه به میزان ۷۰ درصد باعث کاهش عمق نسبی آبشستگی حدود ۸۸ درصد می شود. در طول نسبی آستانه ۰/۲۱ و زاویه آستانه ۴۵ درجه، بیشترین کاهش عمق آبشستگی به میزان ۸۵ درصد دیده شد. همچنین بین عدد

منابع مورد استفاده

1. Bhavan, M. and B. Shahzafar marge. 2010. Bureau of Indian Standards: Central for Hydraulic Design of Bucket.
2. Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring Hydraulic Structures Design Manual Series 2. CRC Press, Taylor and Francis, United States.
3. Dah-Mardeh, A., G. Azizyan, M. S. Bejestan, A. Parsaie and S. H. Rajaei. 2023. Laboratory investigation of scour downstream of the Stepped spillway. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03587-w>.
4. Eskandari A., A. Masjedi, M. H. Pourmahammadi and A. A. Kamanbedast. 2019. The Experimental Study of the Effect of the Geometry of the Downstream Flip Bucket on the Scouring of Tail Water. *Water Resources Engineering* 42(12): 65-77 (in Farsi).
5. Hager, W. H. and H. E. Minor. 2004. Plunge Pool Scour in Prototype and Laboratory. In: Proceeding of International Conference, Hydraulics of Dam and River Structures, Tehran, Iran.
6. Mazurek, K. A. and N. Rajaratnam. 2003. Erosion of Sand by Circular Impinging Water Jets Whit Small Tail water. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 139(3): 225-229.
7. Mehrkia, M., M. Majdzadeh and M. Kavianpour. 2012. Assessment of the Equations Governing Distribution in the Downstream of the Flip bucket by applying field and experimental data. In: Proceeding of 11th Hydraulic Conference of Iran. Oromieh, Iran.
8. Momeni Vesalian, R., H. Mousavi Jahromi and M. Shafae Bejestan. 2008. Local Scour Due to Rectangular Jet Downstream of Flip-Bucket Spillways With No uniform Bed Sediment. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources* 15(2):1-15. (in Farsi).
9. Pirestani, M. and R. Reyazi. 2016. Laboratory Investigation of the Effect of the Valve Opening Rate in the Throwing Cup on the Shape of the Profile of the Bed With Non-uniform Materials. *Journal of Research of Iran Water* 9(3):131-140. (in Farsi).
10. Panahi, S. and D. Farsadzadeh and A. Hosseinzadeh Delir and J. Karimi. 2011. Effect of Flow Characteristics on Downstream Scour of a Submerged Cup-Launching Structure, 6th National Civil Engineering Congress, Semnan, Iran (in Farsi).
11. Safarinejadi, G., M. Heidarnejad, A. Bordbar, M. H. Pourmohammadi and A. Kamanbedast. 2019. An Experimental Study of the Effect of Barrier with Trapezoidal and Triangular Slots in a Flip Bucket Jet on Downstream Scour Using a Physical Model. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, Special Issue of Flood and Soil Erosion 23(4): 243-254 (in Farsi).
12. Shafagh Loron, R., M. Samadi and A. Shamsai. 2023 Predictive explicit expressions from data-driven models for estimation of scour depth below ski-jump bucket spillways. *Water Supply* 23 (1):304–316.
13. Vischer, D. L. and W. H. Hager. 1995. Energy Dissipators. Hydraulic Structures Design Manual 9. A.A. Balkema. Rotterdam. The Netherlands.
14. Ran, Y. B., C. Liu, J. Deng, W. R. Wei and Q. Long. 2023 .Numerical simulation study on spread angle in oblique cut flip bucket. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 17(1): 2236673. DOI:10.1080/19942060.2023.2236673.

Laboratory Investigation of the Effect of Sill Length in Flip Bucket Spillway on Scour at the Bottom of Downstream

S. Abdollahi, A. R. Masjedi*, M. Haidarnejad, A. Afros and M. Asadilor¹

(Received: August 30-2023 ; Accepted: November 20-2023)

Abstract

The use of structures has economic and safety advantages compared to other energy-consuming structures. In this research, to investigate the effect of the length of the sill of the flip bucket spillway on the scour downstream, experiments were conducted in a rectangular laboratory flume made of Plexiglas. The scouring downstream of the flip bucket spillway was investigated using a flip bucket spillway with four relative sill lengths and four threshold angles at four current intensities in the channel in this research. The results of this research showed that by the increase in the length of the sill in the flip bucket spillway, the energy consumption in the spillway increased and the scour depth downstream decreased. Also, increasing the relative length of the sill by 70% at the sill angle of 45 degrees, the scouring depth is reduced by about 88%. Also, a relationship was presented to determine the maximum depth of relative scour, and the correlation coefficient of the results obtained from this equation with the laboratory results is about 0.92.

Keywords: Flip bucket spillway, Scour depth, River, Sill length

1. Department of Water Science and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding author, Email: drmasjedi.2007@yahoo.com