

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

صالح عبداللهی^۱، علیرضا مسجدی^{۱*}، محمد حیدرنژاد^۱، علی افروس^۲ و مهدی اسدی لور^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۵)

چکیده

استفاده از سازه‌های پرتاب‌کننده مزایای اقتصادی و ایمنی مناسبی در مقایسه با سایر سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی دارند. در این تحقیق به منظور بررسی اثر طول آستانه پرتاب‌کننده مثلثی روی آبشستگی در پایین دست آن، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیل شکل از جنس پلاکسی گلاس انجام گرفت. در این تحقیق 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 تحقیق 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 مشاهده شد. به منظور تعیین حداکثر 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.

۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد دزفول، 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 حداقل برسد. آبستگی پایین دست سازه های هیدرولیکی از مسائل عمده ای است که همواره مورد توجه مهندسین 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 آنها شود. پناهی و همکاران (۱۰)، روش های مختلفی برای جلوگیری و کاهش آبستگی در سازه های هیدرولیکی پیشنهاد شده است که می توان آنها 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، 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 مورد نظر باعث کاهش نیروی مخرب و کاهش آبستگی می شود. در سال های 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)، 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 تحقیق 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 حداکثر عمق آبستگی و طول نسبی آبستگی به ترتیب ۶۸/۶ درصد، ۷۵/۶ درصد و ۷۳/۴ درصد کاهش یافت. همچنین معادله تجربی تحلیل رگرسیون جهت تخمین آبستگی ارائه دادند. یوبوران و همکاران (۱۴)، شبیه سازی عددی روی زاویه گسترش در سرریز جامی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات نشان می دهد که زاویه جهش در مکان های مختلف بخش خروجی سرریز متفاوت است، اما توزیع ویژه سرعت بخش خروجی نامشخص است. در این تحقیق، درجه انحراف سرعت جریان در قسمت خروجی سرریز در جهت جانبی با زاویه گسترش کمی سازی می شود. نتایج نشان داد که ویژگی های توزیع و حداکثر مقدار زاویه گسترش تحت تأثیر تغییر اندازه جام سرریز و شرایط جریان نزدیک قرار می گیرد و معادلات را برای محاسبه حداکثر زاویه

کاهش آبشستگی ایجاد می‌کنند. همان طور که اشاره شد مطالعات گسترده‌ای روی پدیده آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده‌ها انجام شده است ولی تاکنون مطالعات جامعی در مورد اثر طول آستانه پرتاب‌کننده مثلثی روی پدیده آبشستگی در پایین‌دست آن انجام نشده است. در این تحقیق علاوه بر انجام آزمایش‌ها مختلف روی مدل‌های گوناگون، رابطه‌ای جهت تخمین عمق آبشستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده مثلثی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

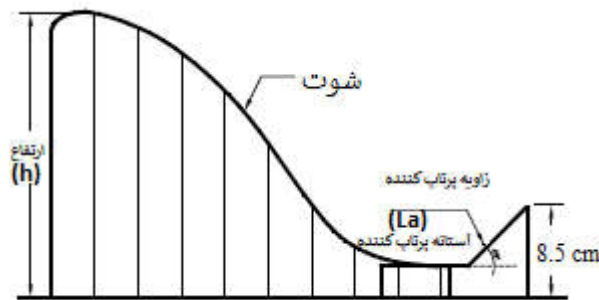
به منظور بررسی اثر طول آستانه پرتاب‌کننده مثلثی بر میزان آبشستگی رسوبات در پایین‌دست آن، پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن جریان دائمی و ثابت بودن خصوصیات سیال رابطه ذیل بین پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلثی در حالت تعادل برقرار است:

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

در رابطه ۱ ds ماکزیم 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، S شیب کف کانال است (شکل ۱).

پرتاب جریان از جام سرریز ارائه شده است. شفق لورن (۱۲)، و همکاران در خصوص عبارات صریح پیش‌بینی‌کننده از مدل‌های داده محور برای تخمین عمق آبشستگی در سرریزهای جامی اسکی استفاده کردند. در این تحقیق 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.

مومنی و صالحیا و همکاران (۸)، آبشستگی ناشی از جت‌های دوزنقه‌ای در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل با مصالح غیر یکنواخت را بررسی کردند و نشان دادند که مدل‌های رگرسیونی خطی و توانی ارایه شده توسط آن‌ها در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی موفق است. مهر کیا و همکاران (۷)، معادلات حاکم بر آبشستگی در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل را با به کارگیری 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 دندان‌ه و میزان بازشدگی دریچه را در جام پرتابی بر شکل نیمرخ بستر با مصالح غیر چسبنده را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش شدت جریان ابعاد حفره آبشستگی افزایش یافته ولی عمق پایاب روند کاهشی دارد. صفرنژادی و همکاران (۱۱)، تحقیقی در خصوص اثر مانع با دندان‌ه در پرتاب‌کننده جامی شکل روی آبشستگی پایین‌دست انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد وجود دندان‌ه به شکل مثلثی باعث کاهش ۱۲/۷ درصد آبشستگی در پایین‌دست می‌شود. اسکندری و همکاران (۴)، تحقیقی بر روی تأثیر هندسه پایین‌دست پرتابه جامی شکل بر میزان آبشستگی پایاب آن انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد که وجود دندان‌ه در پرتاب‌کننده باعث کنترل عمق آبشستگی در پایین‌دست 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 با توجه 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 حداکثر 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). لذا در کلیه آزمایش ها از این زمان بعنوان 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 تحقیق از ۴ شدت جریان در بازه ۴ تا ۱۲ لیتر بر ثانیه استفاده شد. حداقل دبی بر مبنای شروع تغییرات توپوگرافی پایین دست پرتاب کننده و حداکثر دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه با توجه 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.

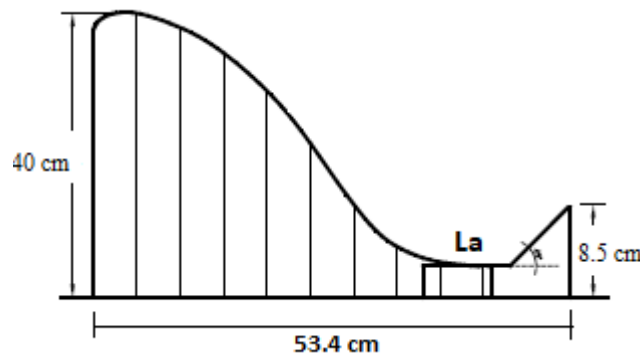
با صرف نظر کردن از پارامترهای ثابت در رابطه ۱، با استفاده از تئوری بایکنگهام رابطه ۲ بصورت زیر بدون بعد می شود:

$$f2 = \left(\frac{ds}{H}, \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{La}{h}, \alpha, \frac{\Delta E}{E} \right) \quad (2)$$

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

آزمایش های این تحقیق به صورت هیدرولیکی در فلوم آزمایشگاهی واقع در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به طول ۸، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۶ 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 تحقیق 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 ماکتها پاشنه انتهایی پرتاب کننده ۸/۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق ۶۴ آزمایش با توجه به متغیرهای مورد نظر در آزمایش انجام شد. (شکل ۲).

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



شکل ۲. پرتاب‌کننده مثلثی



شکل ۳. موقعیت پرتاب‌کننده مثلثی 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 مثلثی اندازه‌گیری شد. پارامترهای اثر گذار بر شدت جریان عبوری از پرتاب‌کننده، طول آستانه پرتاب‌کننده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های هیدرولیکی پرتاب‌کننده مثلثی در جدول ۱ ارائه شده است.

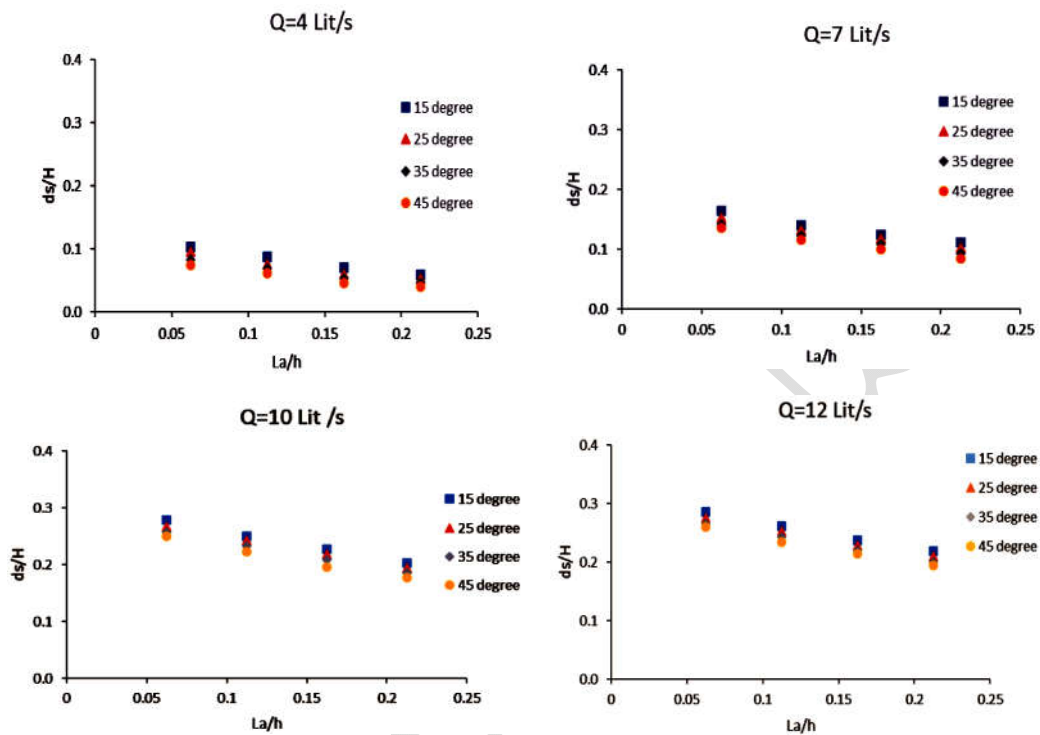
همچنین توسط سرریز لبه تیز مثلثی در بالادست، دبی جریان در فلوم اندازه‌گیری شد. به منظور کالیبراسیون سرریز لبه مثلثی از روش حجمی استفاده شد. عمق آب در پایین‌دست پرتاب‌کننده توسط دریچه‌ای در انتهای فلوم تنظیم شد. عمق پایاب در این آزمایش‌ها ثابت و به اندازه پاشنه انتهایی پرتاب‌کننده در تمام آزمایش‌ها ثابت 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 مثلثی 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

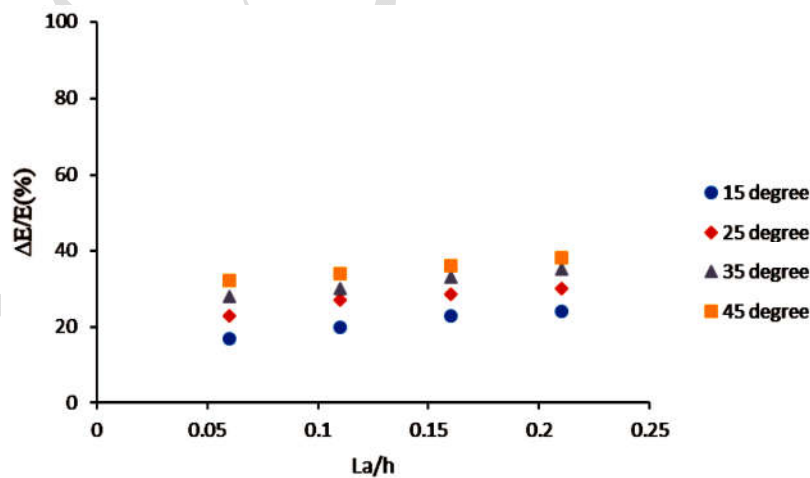
| La/h=۰/۰۶ | | | La/h=۰/۱۱ | | | La/h=۰/۱۶ | | | La/h=۰/۲۱ | | |
|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| α (deg.) | Fr | ds/H | α (deg.) | Fr | ds/H | α (deg.) | Fr | ds/H | α (deg.) | Fr | 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



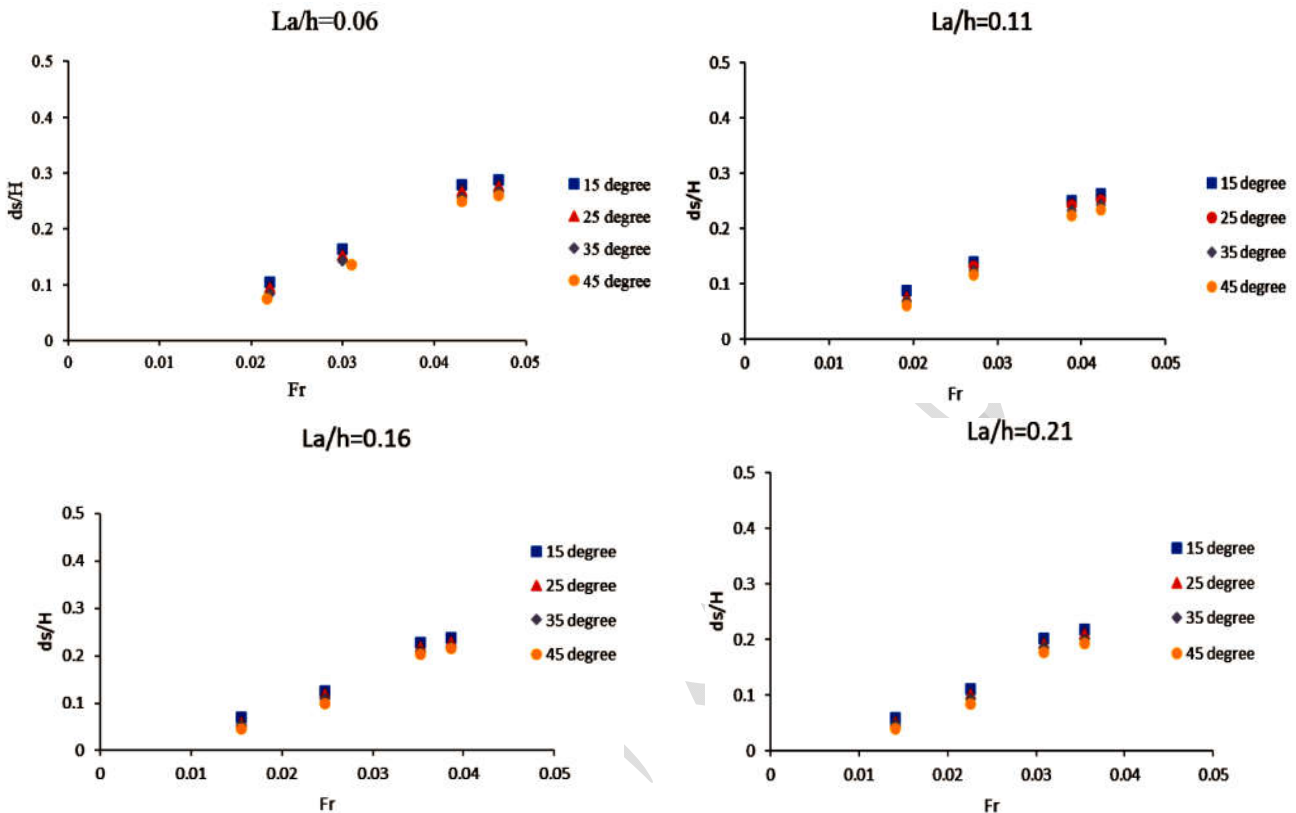
شکل ۴. طول نسبی آستانه پرتاب‌کننده و آبشستگی در پایین دست



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

و طول آستانه، با افزایش عدد فرود، عمق نسبی آبشستگی در پایین دست 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 بر 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 پایین دست 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 اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده در رابطه ۴ نمودار شکل ۷ نسبت به خط ۴۵ درجه و محدوده ۳ درصد خطا ارائه شد.

نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌ها جهت بررسی عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلی 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.

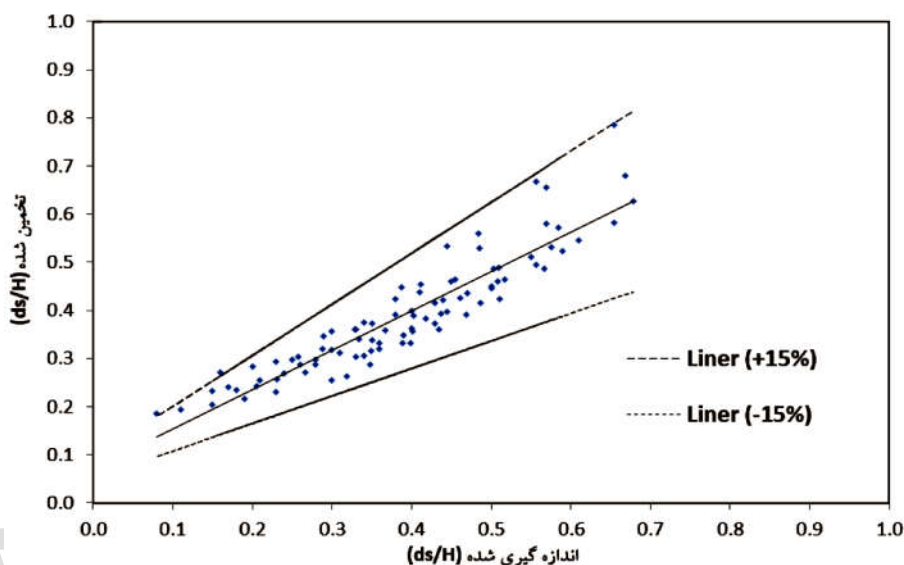
ارائه رابطه جهت تخمین عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلی به منظور تخمین عمق آبشستگی در پرتاب‌کننده مثلی، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، رابطه ۳ با استفاده از رگرسیون غیر خطی بین عدد فرود، زاویه آستانه و طول نسبی آستانه در پرتاب‌کننده مثلی ایجاد شد.

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

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 غیر خطی مقادیر جدول ۲ جهت

جدول ۲. آنالیز آماری جهت 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

شدت جریان مختلف انجام گرفت. متغیرهای مؤثر در این تحقیق طول نسبی آستانه، زاویه آستانه و شدت جریان بود. نتایج این تحقیق نشان داد که 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 مشاهده شد. همچنین بین عدد 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 پرتای کننده مثلثی، با استفاده از نرم افزار آماری SPSS رابطه ای با استفاده از رگرسیون غیر خطی 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 تحقیق طول نسبی آستانه، زاویه آستانه و شدت جریان بود. نتایج این تحقیق نشان داد که 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 مشاهده شد. همچنین بین عدد

منابع مورد استفاده

1. Bhavan, M and Shahzafar marge B (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., Azizyan, G., Bejestan, M.S., Parsaie, A. and Rajaei, S.H., 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., Masjedi A., Pourmohammadi M.H., Kamanbedast A.A. 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), pp.65-77. (In Persian).
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 Persian).
9. Pirestani, M. and Reyazi, R. 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 Persian).
10. Panahi, S. and Farsadizadeh, D. and Hosseinzadeh Delir, A. and Karimi, J., 2011, Effect of Flow Characteristics on Downstream Scour of a Submerged Cup-Launching Structure, 6th National Civil Engineering Congress, Semnan. (In Persian).
11. Safarinejadi G., Heidarnejad M., Bordbar A., Pourmohammadi M.H., Kamanbedast A., 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, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 23(4), pp.243-254. (In Persian).
12. Shafagh Loron, R., Samadi, M. & Shamsai, A. 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. Yu-bo Ran, Chao Liu, Jun Deng, Wang-ru Wei, Qiang Long, 2023 , Numerical simulation study on spread angle in oblique cut flip bucket, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, DOI:10.1080/19942060.2023.2236673