

## مطالعه‌ی آزمایشگاهی تاثیر هندسه‌ی پائین دست پرتابه‌ی جامی شکل بر میزان آبشستگی پایاب آن

امین اسکندری<sup>۱</sup>، محمد حیدرنژاد<sup>۲\*</sup>، علیرضا مسجدی<sup>۳</sup>، محمد حسین پورمحمدی<sup>۴</sup>، امیرعباس کمان بدست<sup>۵</sup>

### چکیده

به کارگیری پرتابه‌های جامی شکل در سدها، که جزء مستهلک‌کننده‌های جریان به‌صورت عمودی هستند، موجب استهلاک کارمایه ناشی از عبور سیلاب می‌شود. از این سازه به منظور کاهش هزینه‌ها در مقایسه با سایر مستهلک‌کننده‌های کارمایه استفاده می‌شود. برخورد افشانه آب با بستر منجر به ایجاد چاله‌ی آبشستگی شده، که این امر می‌تواند پایداری سد و سازه‌های مرتبط را به خطر بیاندازد. در تحقیق حاضر، پدیده‌ی آبشستگی پائین دست یک پرتابه‌ی جامی شکل در شرایط آزاد، و همچنین در شرایط وجود دندانان مستطیلی و مثلثی در پایاب با فواصل چیدمان مختلف در ۹ بده، و مجموعاً ۴۵ آزمایش، بررسی شد. نتایج نشان دادند که وجود دندانان‌های جام اثر زیادی بر گستره و عمق آبشستگی می‌گذارد، بدین ترتیب که پرتابه‌ی جامی شکل با دندانان‌های مستطیلی یک در میان نسبت به حالت بدون دندانان حدود ۱۳ درصد کاهش آبشستگی را سبب می‌شود. همچنین، حداکثر عمق آبشستگی در حالت جام با دندانان‌های مستطیلی یک در میان در بازه‌ی مطلوب تر از مابقی نمونه‌های آزمایشگاهی به‌وقوع می‌پیوندد. سپس نتایج حاصل با تعدادی از رابطه‌های تجربی مقایسه شده و مشخص گردید که رابطه‌ی مارتینز B نتایج نزدیکتری را به مقادیر واقعی به‌دست می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** پرتاب های جامی شکل، مستهلک‌کننده‌ی کارمایه، عمق آبشستگی، دندانان های مستطیلی و مثلثی

<sup>۱</sup> گروه علوم و مهندسی آب، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

<sup>۲</sup> گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

<sup>۳</sup> گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

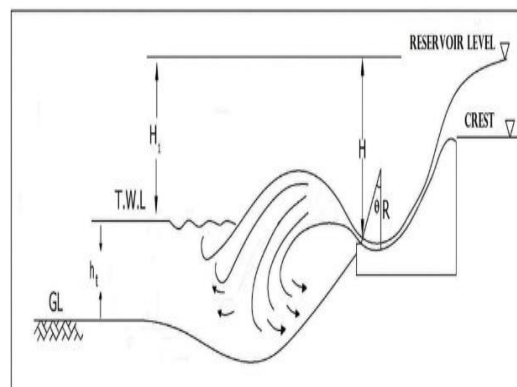
<sup>۴</sup> گروه علوم و مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

<sup>۵</sup> گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: 09113919533.mo\_he3197@yahoo.com

## مقدمه

آب یکی از منابع محدود طبیعی است که بدون آن زندگی غیرممکن است. بدین دلیل احداث سدها بر روی رودخانه‌ها و حفاظت سدها از اهمیت خاصی برخوردار است. در سالهای اخیر نیاز به کاهنده‌های کارمایه جنبشی به منظور استهلاک کارمایه جنبشی افشانه ناشی از سیلاب‌هایی که از روی سدها عبور می‌کنند توجه شده است. جهت کاهش اثرات تخریبی جریان با سرعت خیلی زیاد از روی سرریزها از سازه‌های مستهلک‌کننده کارمایه استفاده می‌شود. انواع این سازه‌ها عبارتند از حوضچه‌های آرامش، جام غلطابی، و همچنین جام پرتابی که در جام پرتابی استهلاک کارمایه جریان آب با انجام یک پرش اسکی به صورت افشانه به پائین‌دست پرتاب می‌گردد تا اثرات فرسایش جریان در پائین‌دست سد و سازه‌های مهم اطراف آن به وسیله ی پرتاب آب و برخورد با هوا، و همچنین برخورد با آب پائین‌دست سدکاسته شود. پرتابه‌های جامی شکل یکی از کم‌هزینه‌ترین سازه‌های استهلاک کارمایه هستند. چنانچه بستر در پائین‌دست این سازه آبرفتی باشد آبشستگی در پائین‌دست آن موجب افزایش جریان زیرسازه‌ای و پیشرفت حفره آبشستگی و در نهایت تخریب سازه می‌شود. روش‌های مهار کردن و جلوگیری از پدیده‌ی آبشستگی بر اساس تخمین ابعاد حفره‌ی آبشستگی قبل از احداث سازه است. شکل ۱ طرح واره‌ی کلی آبشستگی را در پائین‌دست پرتابه جامی شکل نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح واره‌ی کلی آبشستگی در پائین

دست پرتابه‌ی جامی شکل

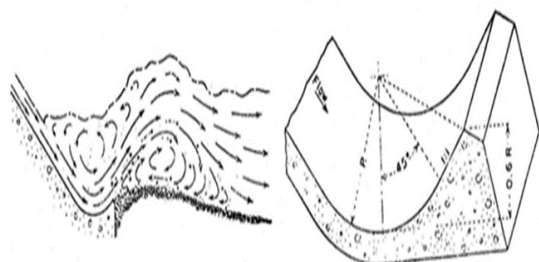
پرتابه‌های جامی شکل به دو دسته تقسیم می‌شوند:

## ۱- باکت کاملاً پیوسته (solid bucket):

شکل ۲ نوع باکت پیوسته را نشان می‌دهد. در این نوع باکت تمامی آب به طرف بالا هدایت شده و انرژی جنبشی اضافی آب بر اثر برخورد با آب اطراف تلف می‌شود. این امر همچنین باعث ایجاد مقداری جوشش در سطح آب می‌گردد. در این نوع باکت چنانچه عمق آب در پایین‌دست کم باشد، جوشش زیادی در سطح آب ایجاد می‌گردد. همچنین مواد کف و بستر در پایین‌دست سازه حرکت کرده که در نتیجه آبشستگی ایجاد می‌شود. این مواد از پایین‌دست به طرف لبه‌ی باکت حرکت کرده و در این محل ته‌نشین می‌شوند. همچنین بعضی از ذرات نیز در اثر برخورد با سازه ایجاد خراش خواهند نمود.

## ۲- باکت دندانه دار (slotted bucket):

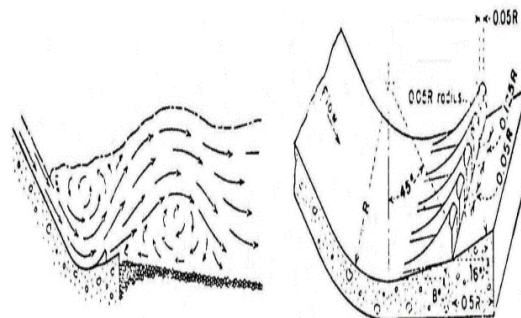
این نوع باکت دارای زائده‌هایی دندانه‌مانند، قبل از انتهای آن می‌باشد که در نتیجه مقداری از جریان از بین دندانه‌ها عبور کرده و به صورت افشانه‌هایی پخش می‌گردند و بقیه بوسیله‌ی دندانه‌ها به طرف بالا هدایت می‌گردند. بنابراین جریان آب در سطح وسیعتری پخش و پراکنده می‌گردد که از نظر استهلاک انرژی بازده بیشتری دارد. همچنین دارای جوشش کمتر در سطح آب شده و پروفیل سطح آب از ثبات بیشتری برخوردار است. توضیح اینکه این دندانه‌ها باعث ایجاد افشانه‌های کوچکی می‌شوند که این افشانه‌ها نیز به نوبه خود در بین یکدیگر اصطکاک ایجاد می‌نمایند که در نهایت بازده اتلاف انرژی جنبشی آب را بالا می‌برد. در این نوع باکت همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است مواد بستر رودخانه از محل خود به مقدار بسیار کمتری شسته شده و کمتر در قسمت لبه‌ی باکت ته‌نشین می‌شوند (یواس بی آر، ۱۹۸۷؛ باوان و شاهزادفرمگ، ۲۰۱۰).



شکل ۲- جام پیوسته

بر روی مشاهدات آزمایشگاهی خود رابطه‌ای برای تخمین حداکثر عمق آبستگي ناشی از افشانه‌های ریزشی آزاد قائم ارائه کرده است. همچنین ایشان اثر عمقیاب بر روی میزان آبستگي را بررسی کرده و مشاهده کرد که افزایش عمق پایاب باعث افزایش حداکثر عمق آبستگي می‌گردد. همچنین افزایش پایاب روی شکل حفره‌ی آبستگي و تپه‌ی به‌وجود آمده از مواد فرسایش یافته موثر بوده، به‌طوری که هر چقدر عمق پایاب زیادتر گردد شکل تپه حاصله از دوزنقه‌ای به مثلثی نزدیک‌تر می‌گردد و همچنین ارتفاع تپه افزایش پیدا می‌کند. مازورک و راجاراتنام (۲۰۰۳) آبستگي ناشی از افشانه‌ی مدور با ریزش قائم را بر روی مصالح غیرچسبنده با پایاب کوچک بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عمق آبستگي تابعی از عدد فرود ذره است. هگر و مینور (۲۰۰۴) تغییرات آبستگي را در شرایط حضور و عدم حضور افشانه بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وقتی جریان افشانه برقرار است، عمق آبستگي بیشتر است و این موضوع باید در طراحی‌ها مد نظر قرار گیرد.

مومنی و صالیان و همکاران (۱۳۸۷) آبستگي ناشی از افشانه‌های مستطیلی در پائین‌دست پرتابه‌های جامی‌شکل با مصالح غیر یکنواخت را بررسی کرده و نشان دادند که نمونه‌ی آزمایشگاهی وایازی خطی و توانی ارائه شده بوسیله‌ی آنها در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي موفق است. پیرستانی و شفیعی (۱۳۸۸) آزمایش‌هایی برای تاثیر عمق پایاب بر ابعاد حفره‌ی آبستگي ناشی از افشانه ریزشی جامی شکل دنداندار با سه عمق پایاب مختلف و مواد معلق یکنواخت انجام دادند و نتیجه گرفتند که ابعاد حفره‌ی آبستگي، وابسته به فراسنج‌های ارتفاع آب بالادست سرریز، میزان بده و عمق پایاب است. مهرکیا و همکاران (۱۳۹۱) معادلات حاکم بر آبستگي در پائین‌دست پرتابه‌های جامی شکل را با بکارگیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که در تمامی روابط ارائه شده و رابطه‌ی پیشنهادی، بده در واحد عرض و ارتفاع بار آبی پرتابی با میزان آبستگي رابطه‌ی مستقیم دارد. اکبری و همکاران (۱۳۹۳) آبستگي پائین‌دست پرتابه‌های جامی شکل را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که بهترین پیشگویی برای تخمین آبستگي به‌وسیله‌ی نمونه



شکل ۳- جام دندانه‌دار (شکافدار)

در تحقیق حاضر بر روی پدیده آبستگي پائین دست پرتابه‌ی جامی شکل در حالت بدون دنداندار دنداندار مستطیلی و مثلثی با فواصل چینش متفاوت دنداندارها (دو حالت) تحقیق شده است. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی پدیده آبستگي انجام شده از جمله مسن و آروموگام (۱۹۸۵) آبستگي ناشی از افشانه‌ی آزاد در پائین‌دست پرتابه‌های جامی شکل را بررسی کرده و عنوان کردند جام انتهایی موجب هدایت جریان آب با سرعت بالا (افشانه) به قسمت دورتر از محل سازه شده که با ایجاد تغییر در زاویه‌ی لبه‌ی پرتابی، جریان خروجی از انتهای جام و میزان استهلاک تحت تاثیر آن قرار می‌گیرد که نسبت به آرام کننده‌ها و سایر مستهلک کننده‌های کارمایه می‌توانند عملکرد مناسب‌تری داشته باشند. ویچر و هاگر (۱۹۹۵) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر گروه دنداندارهای منشوری روی جام انتهایی (آرام کننده جام) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که گروه دنداندارهای منشوری با عرض قاعده‌ی کمتر و تعداد بیشتر دنداندار در یک مسیر پرتاب، تاثیر بیشتری بر روی عمق آبستگي دارد و همچنین چیدمان دنداندارها بر روی پرتابه، بسیار مهم بوده و جای پژوهش دارد. امانیان (۱۹۹۳) پدیده‌ی آبستگي پائین‌دست سرریزهای جامی شکل را بررسی کرده و نتیجه گرفت هر چقدر زاویه برخورد افشانه با بستر پائین‌دست بزرگتر باشد عمق آبستگي زیادتری ایجاد خواهد کرد و هر چقدر زاویه پرتاب افشانه کوچکتر باشد طول حفره‌ی آبستگي افزایش پیدا خواهد کرد. هافمن و همکاران (۱۹۹۸) با بکار بردن قانون دوم نیوتن رابطه‌ای نیمه تحلیلی برای تخمین حداکثر عمق آبستگي ارائه نمود. محبوبی (۱۳۷۵) آبستگي حاصل از افشانه‌های ریزشی آزاد قائم را بررسی کرده و با استفاده از رگرسیون آماری

به‌کارگیری نمونه‌های آزمایشگاهی فیزیکی و غیره به دست آورند. برخی از معادلات معمول برای پیش‌بینی عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در جدول ۱ آمده است (چی و پادیار، ۱۹۶۹؛ دمل و همکاران، ۱۹۶۶؛ میسن، ۱۹۸۴؛ ورونس، ۱۹۳۷؛ شوکلیچ، ۱۹۳۵؛ عظمت اله و همکاران، ۲۰۰۵). در روابط جدول ۱، تراز مخزن و پایاب ( $H$ )، بده در واحد عرض ( $q$ )، اندازه‌ی دانه بندی مصالح بستر ( $d$ )، عمق پایاب ( $h_t$ ) و زاویه پرتابه جامی شکل ( $\theta$ ) است.

آزمایشگاهی مارتینز B ارائه شده است. پیرستانی و ریاضی (۱۳۹۴) بررسی آزمایشگاهی اثر دندانان و میزان بازشدگی دریچه را در جام پرتابی بر شکل نیمرخ بستر با مصالح غیر یکنواخت را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش بده، ابعاد حفره آبشستگی افزایش یافته ولی عمق پایاب روند کاهشی نشان می‌دهد. به‌طور کلی محققان در تحقیقات خود سعی می‌کردند عمق آبشستگی پائین‌دست سرریزها را به روش‌های مختلفی مانند استفاده از رابطه‌های تجربی،

جدول ۱- برخی از روابط موجود جهت محاسبه‌ی حداکثر عمق آبشستگی

محقق	رابطه	محقق	رابطه
شوکلچ	$D = 0.521q^{0.57}H^{0.2}/d_{90}^{0.32}$	چی و پادیر	$D = 1.663q^{0.6}H^{0.2}/d_m^{0.1}$
ورونس A	$D = 0.202q^{0.54}H^{0.255}/d_m^{0.42}$	مارتینز B	$D = 1.5q^{0.6}H^{0.1}$
ورونس B	$D = 1.9q^{0.54}H^{0.255}$	دامل A	$D = 0.652q^{0.5}H^{0.5}$
		دامل B	$D = 0.543q^{0.5}H^{0.5}$
عظمت‌اله	$\frac{D}{h_t} = 6.916 \left( \frac{q}{\sqrt{gh_t^3}} \right)^{0.694} \left( \frac{H}{h_t} \right)^{0.0815} \left( \frac{R}{h_t} \right)^{-0.233} \left( \frac{d_{50}}{h_t} \right)^{0.196} \phi^{0.196}$		
	$D = kq^x H^y h^w / g^v d^z$		
میسن	$k = (6.42 - 3.1/H^{0.1}), x = (0.6 - H/300), y = (0.15 - H/200), v = 0.3, w = 0.15, z = 0.1$		
	d = $d_{50}$ : برای نمونه آزمایشگاهی		
	d = $0.25$ : برای پروتوتایپ		

شد. فراسنج‌های متعددی در ایجاد پدیده‌ی آبشستگی در زیر افشانه‌ها دخالت دارند که عبارتند از:  $q$ : بده در واحد عرض،  $\rho_s$ : جرم حجمی مصالح بستر،  $\rho_w$ : جرم حجمی آب،  $\mu$ : لزافشانه دینامیکی،  $g$ : شتاب ثقل،  $b$ : ضخامت افشانه در جام سرریز،  $H$ : ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب سطح مخزن و پایاب،  $D$ : حداکثر عمق آبشستگی که از سطح اولیه‌ی بستر اندازه‌گیری می‌شود،  $\theta$ : زاویه برخورد افشانه به پایاب،  $R$ : شعاع پرتابه‌ی جامی شکل،  $\phi$ : زاویه‌ی پرتابه‌ی جامی شکل،  $Y$ : فاصله‌ی عمودی بین لبه‌ی پرتاب‌کننده و سطح اولیه  $t$ : زمان. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$f(q, \rho_s, \rho_w, D, d_s, h_t, g, b, Y, H, R, t, \theta, \mu, \cos\phi) = 0 \quad (1)$$

از آنجائیکه در این پژوهش هدف بررسی آبشستگی در حالت تعادل است لذا عامل زمان از رابطه‌ی فوق حذف می‌شود، همچنین به نظر نمی‌رسد  $b$  برای بده‌های مطالعه شده تغییرات زیادی داشته باشد، پس این فراسنج نیز حذف می‌گردد. از طرفی به دلیل اینکه محاسبه‌ی  $\theta$

همان طور که در بالا اشاره شد، مطالعات گسترده‌ای درباره‌ی پدیده آبشستگی انجام شده ولی تاکنون مطالعات جامعی در باره‌ی اثر دندانان با اشکال مختلف و فواصل متفاوت در پرتابه جامی شکل برای پدیده‌ی آبشستگی در پائین‌دست این نوع سازه انجام نشده است. در این تحقیق علاوه بر انجام آزمایش‌ها مختلف برای نمونه‌های آزمایشگاهی گوناگون برای پدیده‌ی آبشستگی پائین دست پرتابه‌ی جامی شکل، نسبت به مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده با برخی از روابط تجربی موجود اقدام شده است.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

در این پژوهش با توجه به فراسنجهای موثر بر پدیده آبشستگی، ساز و کار آبشستگی و تغییرات بستر ناشی از آن نسبت به شناسایی و استخراج فراسنجهای بی‌بعد اقدام گردید. در شکل ۱ نحوه‌ی شکل‌گیری پدیده‌ی آبشستگی و فراسنجهای موثر بر آن نشان داده

### تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور انجام مطالعات و رسیدن به اهداف تحقیق از یک نهر پایه دار مستقیم الخط به ابعاد  $۱۲^*۰/۶^*۰/۶$  متر واقع در مافشانهمع آزمایشگاهی معاونت حفاظت و بهره برداری از منابع آب سازمان آب و برق خوزستان- ایران استفاده شد (شکل ۴). نهر پایه دار از ورق فلزی با جداری شیشه ای ساخته شد. این نهر پایه دار در ابتدا مجهز به بده سنج عددی در لوله ی ورودی به نهر پایه دار و در انتهای آن یک فشار سنج همراه با سر ریز مثلثی لبه تیز در حوضچه خروجی جهت تنظیم بده است. در انتهای نهر پایه دار جهت تنظیم سطح آب پائین دست و تنظیم آن از یک دریچه استفاده شد. نمونه آزمایشگاهی سرریز ساخته شده برای انجام آزمایشها از نوع روگذر آزاد (منحنی پیوند) است که در انتهای آن یک پرتابه ی جامی شکل به شعاع  $۱/۱۶$  متر تعبیه شد (شکل ۵). طراحی نمونه آزمایشگاهی سرریز با توجه به شرایط نهر پایه دار و حداکثر بده آن و طبق معیار USBR و به عرض  $۰/۶$  متر و ارتفاع  $۰/۴۰$  متر انجام گرفت. آزمایشها در حالت جام ساده (solid bucket) و دندانه دار (slotted bucket) با اشکال مستطیلی و مثلثی (هر کدام دو حالت مختلف از نظر فواصل دندانه ها) انجام گرفتند.



شکل ۵- سر ریز منحنی پیوند با پرتابه ی جامی شکل

### زمان تعادل آزمایشها

تعیین مدت زمان آزمایش یکی از مراحل حساس در انجام آزمایشها است چون عامل زمان را می خواهیم حذف کنیم پس باید برداشت ها زمانی انجام گیرد که حفره ی آبشستگی در حال تعادل است. برای رسیدن به زمان تعادل گروهی آزمایشها با بده حداکثر طرح (۲۱ لیتر بر ثانیه) انجام گردید و در زمانهای مختلف عمق حفره ی آبشستگی برداشت شد. مشخص گردید در زمان

به سختی امکان پذیر است، و وجود آن در رابطه ی نهایی کاربری آن را مشکل می کند، از آن صرف نظر می شود (مؤمنی و صالحیان و همکاران، ۱۳۸۷). همچنین در این آزمایشها جریان آشفته بوده و دارای تلاطم زیادی است لذا  $\mu$  نیز حذف می گردد. در نتیجه تابع مذکور به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$f(q, \rho_s, \rho_w, D, d_s, h_t, g, Y, H, R, \cos\phi) = 0 \quad (2)$$

با انتخاب سه متغیر تکراری  $\rho_w, q, h$  و بکار بردن نظریه ی باکینگهام، معادله ی بدون بعد زیر به دست می آید:

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{d_s}{H}, \frac{D}{H}, \frac{h_t}{H}, \frac{R}{H}, \frac{Y}{H}, \cos\phi\right) = 0 \quad (3)$$

در تحقیق حاضر از  $\rho_s, \rho_w, R, Y, \cos\phi$  به علت ثابت بودن در فرایند آزمایش صرف نظر می شود، در نهایت تابعی به شکل رابطه ی (۴) را برای بیشترین عمق آبشستگی  $\frac{D}{H}$  می توان ارائه کرد:

$$f\left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{h_t}{H}\right) \quad (4)$$

از طرفی در کل آزمایشها عمق آب پائین دست ( $h_t$ ) ثابت در نظر گرفته می شود پس تنها فراسنج بی بعد  $\frac{q}{\sqrt{gH^3}}$  یا همان عدد فرود به دست می آید که مبنای این پژوهش در نظر گرفته شده است.

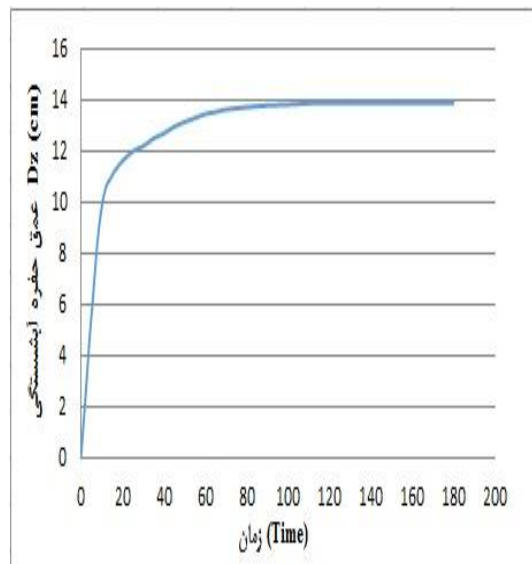


شکل ۶- نمای کلی از نهر پایه دار آزمایشگاهی

در این آزمایشها از یک نمونه مصالح با قطر متوسط ذرات ۵ میلی متر استفاده شد که با توجه به سرعت جریان ( $u$ ) و سرعت بحرانی ( $u_c$ ) که از رابطه ی شیلدز به دست می آید و در نهایت با توجه اینکه آبشستگی در آب زلال در  $1 \geq \frac{u}{u_c}$  به وقوع می پیوندد، این اندازه برای قطر متوسط ذرات در نظر گرفته شد ( =  $d_m d_{50} = 5mm$ ).

در این تحقیق از ۹ بده در بازه‌ی ۱۳ تا ۲۱ لیتر برثانیه استفاده شد. تعیین حداقل بده (۱۳ لیتر بر ثانیه) بر مبنای شروع تغییرات پستی و بلندی پائین دست پرتابه و در نتیجه آبستگي قابل مشاهده و تأثیر گذار و همچنین حداکثر بده (۲۱ لیتر بر ثانیه) با توجه به توان خروجی پمپ و شرایط آزمایشگاه انتخاب گردید. نمونه‌ی آزمایشگاهی بکار رفته در این تحقیق شامل ۵ نمونه آزمایشگاهی پرتابه جامی شکل در حالت بدون دندان، دنداندار مستطیلی و مثلثی هر کدام در دو حالت از نظر چیدمان دندانها است که در نهایت کل آزمایش‌ها به ۴۵ رسید. طراحی و ابعاد دندانها طبق استاندارد USBR صورت گرفت بدین ترتیب که عرض دندانها برابر ۰/۱۲۵، شعاع پرتابه‌ی جامی شکل (R)، فاصله‌ی بین دندانها ۰/۰۵، شعاع پرتابه جامی شکل و محل قرارگیری دندانها ۰/۵ برابر شعاع پرتابه‌ی جامی شکل از انتهای جام محاسبه گردید (یو اس بی آر، ۱۹۸۷). حالت اول (شکل ۷) چیدمان دندانها طبق معیار USBR و حالت دوم (شکل ۸) طبق روش ابداعی محققین به صورت یک در میان اجرا شد، بدین ترتیب که با توجه به ابعاد نمونه آزمایشگاهی در حالت اول طبق معیار USBR تعداد ۱۷ دندان و در حالت دوم طبق روش ابداعی محققین تعداد ۹ دندان بر روی پرتابه تعبیه گردید.

۱۲۰ دقیقه عمق آبستگي تقریباً ثابت مانده و به تعادل رسیده است (شکل ۶). لذا این زمان را به‌عنوان زمان تعادل تلقی نموده و تمام آزمایشات تا ۱۲۰ دقیقه ادامه داده شد و آنگاه برداشت نقاط انجام گردید.



شکل ۶- نمودار زمان تعادل برای عمق آبستگي

## روش انجام آزمایش‌ها



(ب)



(الف)

شکل ۷- پرتابه‌ی جامی شکل با دندانهای مستطیلی (الف) و مثلثی کامل (ب) (طبق معیار USBR)



(ب)



(الف)

شکل ۸- پرتابه‌ی جامی شکل با دندان‌های مستطیلی و مثلثی یک در میان (تحقیق حاضر)



شکل ۹- نحوه‌ی برخورد افشانه با مصالح و ایجاد حفره‌ی آبستگی

### روند انجام آزمایش

در مقطعی از نهر پایه‌دار به طول ۲ متر و عرض ۰/۶ متر و عمق ۰/۱۵ متر که بلافاصله پس از سرریز قرار دارد مواد معلق ریخته می‌شود. سپس سطح مصالح با تسطیح‌کننده‌ی چوبی صاف می‌گردد. برای ایجاد تراکمی یکنواخت به منظور حصول اطمینان از شرایط و عدم وقوع تغییرات موضعی غیر قابل پیش بینی، سطح مصالح با الوار کوبیده شده و سپس بوسیله‌ی متر لیزری به عنوان سطح مبنا برداشت می‌شود. سپس بده مورد نظر به وسیله‌ی بده‌سنج الکترومغناطیس تنظیم شده و جریان می‌یابد. از طرف دیگر عمق آب پائین‌دست سرریز بوسیله‌ی یک دریچه‌ای در انتهای نهر پایه‌دار تنظیم می‌شود. عمق پایاب در این آزمایش‌ها ثابت و به اندازه پاشنه انتهایی پرتابه یعنی ۸ سانتی‌متر در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. جریان ورودی به داخل نهر پایه‌دار پس از عبور از روی سرریز و پرش از روی پرتابه جامی شکل به داخل حوضچه مواد معلق برخورد کرده و چاله آبستگی به وجود می‌آید (شکل ۹). پس از اتمام زمان آزمایش جریان ورودی قطع شده و مصالح زهکشی می‌شوند. سپس به وسیله‌ی متر لیزری برداشت پستی و بلندی از سطح مواد معلق انجام می‌گیرد.

### نتایج و بحث

#### تغییرات عمقی چاله آبستگی

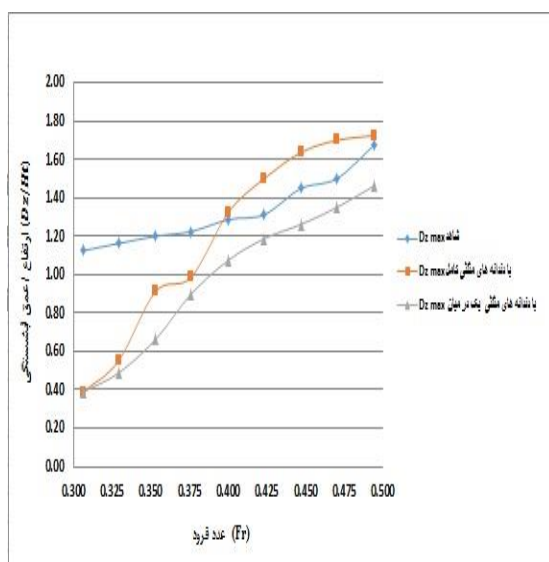
با افزایش جریان ورودی به سرریز عمق چاله آبستگی افزایش می‌یابد. در این پژوهش مشخص گردید که این عمق در نمونه آزمایشگاهی مختلف با دندان‌های مختلف الشكل و فواصل چیدمان مختلف متفاوت است. ابتدا اثر شکل و فاصله دندان‌ها در هر نمونه آزمایشگاهی بررسی می‌شود. در جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای عمق آبستگی بر حسب سانتی‌متر در نمونه آزمایشگاهی مختلف و در بازه‌ی بده ۱۳ تا ۲۱ لیتر بر ثانیه بیان شده است.

جدول ۲- عمق آبستگی بر حسب سانتی‌متر

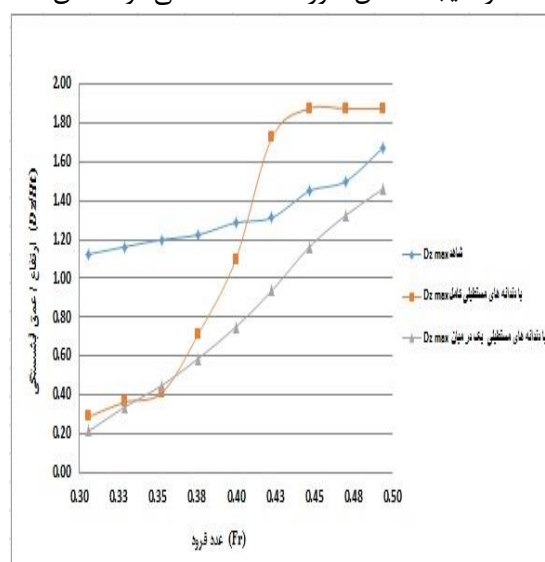
نوع نمونه آزمایشگاهی	بده (لیتر بر ثانیه)								
	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
شاهد	۹	۹/۳	۹/۶	۹/۸	۱۰/۳	۱۰/۵	۱۱/۶	۱۲	۱۳/۴
مستطیلی کامل	۲/۳	۲/۹	۳/۳	۵/۷	۸/۸	۱۳/۸	۱۵	۱۵	۱۵
مستطیلی یک در میان	۱/۷	۲/۷	۳/۶	۴/۷	۶	۷/۵	۹/۳	۱۰/۶	۱۱/۷
مثلثی کامل	۳/۱	۴/۴	۷/۳	۷/۹	۱۰/۶	۱۲	۱۳/۱	۱۳/۶	۱۳/۸
مثلثی یک در میان	۳/۱	۳/۹	۵/۳	۷/۲	۸/۶	۹/۵	۱۰/۱	۱۰/۸	۱۱/۷

چاله‌ی آبشستگی در حالت دندان‌دار کامل مستطیلی و مثلثی افزایش می‌یابد. حال آنکه براساس شکل ۱۰ (د) در حالت دندان‌دار یک در میان مستطیلی و مثلثی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد، زیرا با کاهش دندان‌ها انسداد حاصل از اثر دندان‌ها و ایجاد غلطابه حول آنها کمتر شده و جریان پس از رسیدن به دندان‌ها به دو فواره تبدیل می‌شود. یک فواره‌ی با ارتفاع زیاد و طول کم که حاصل برخورد جریان با دندان‌هاست و یک فواره با ارتفاع کم و طول بیشتر که حاصل عبور آب از شکاف بین دندان‌هاست (شکل ۱۲ الف). فواره حاصل از برخورد با دندان‌ها قبل از فرود به سطح مواد معلق به فواره حاصل از عبور از شکاف بین دندان‌ها برخورد کرده و عامل جدیدی علاوه بر اصطکاک فواره با سطح آزاد هوا و همچنین عمق آب پائین‌دست برای مستهلک شدن کارمایه جریان به وجود می‌آورد. در نتیجه عمق چاله آبشستگی کاهش می‌یابد.

براساس نتایج حاصل با توجه به تأثیر بده، شکل دندان‌ها و فاصله آنها از یکدیگر برای چاله آبشستگی نتایج زیر حاصل شد. بر اساس شکل ۱۰ (الف، ب و ج) با افزایش بده عمق چاله‌ی آبشستگی در حالت دندان‌دار مستطیلی و مثلثی کامل (طبق روش USBR) تا فرود ۰/۴ کمتر ولی از این عدد به بعد بیشتر از حالت دندان‌دار یک در میان می‌شود. وجود دندان‌های کامل باعث ایجاد انسداد در جام شده و غلطابه به وجود آمده مانع عبور مطلوب آب از میان شکاف بین دندان‌ها می‌شود. از طرفی جریان پس از عبور از سرریز و رسیدن به دندان‌ها به غلطابه‌ی ایجاد شده حول آنها و همچنین دندان‌ها برخورد کرده و با افزایش جریان فواره‌ای با ارتفاع بیشتر نسبت به حالت شاهد را ایجاد می‌کند، در نتیجه، طول فواره نسبت به حالت شاهد کمتر شده ولی با ارتفاع بیشتری به سطح آب پائین‌دست برخورد می‌کند (شکل ۱۱ الف). در نتیجه، همان‌طور که مشاهده می‌شود، عمق

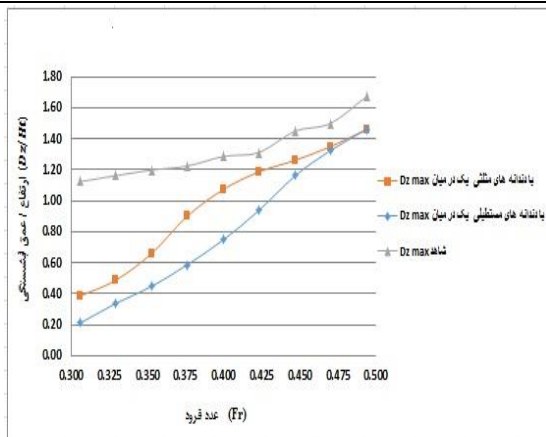


ب- حداکثر عمق آبشستگی در سه حالت شاهد و با دندان‌های مثلثی کامل و یک در میان



الف- حداکثر عمق آبشستگی در سه حالت شاهد و با دندان‌های مستطیلی کامل و یک در میان

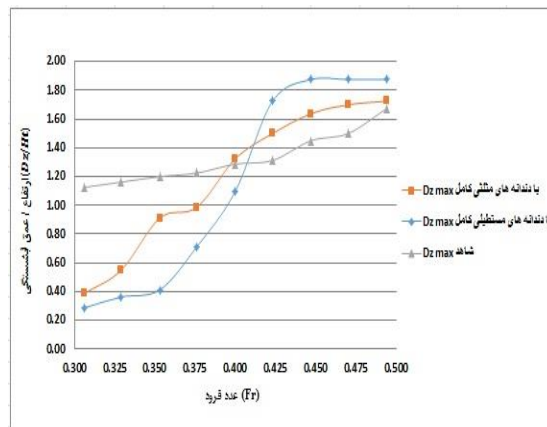




د- حداکثر عمق آبشستگی در سه حالت شاهد و با دندانهای مستطیلی و مثلثی یک در میان

شکل ۱۰- تغییرات عمق چاله‌ی آبشستگی در شرایط مختلف (الف، ب، ج و د)

نتیجه‌ی بهتری نسبت به شاهد و مثلثی دارد، به طوری که عمق آبشستگی در حالت مستطیلی یک در میان ۱۳٪ کمتر از حالت بدون دندان به دست آمد.



ج- حداکثر عمق آبشستگی در سه حالت شاهد و با دندانهای مستطیلی و مثلثی کامل

طبق شکل ۱۰ (د) و با مشخص شدن حالت بهینه می‌توان گفت که شکل مستطیلی برای دندانها بهتر از مثلثی است. با توجه به روند افزایش عمق آبشستگی مشخص شد که حالت دندان دار مستطیلی یک در میان



ب- شکل چاله آبشستگی



الف- شکل و ارتفاع فواره

شکل ۱۱- فواره و چاله‌ی ایجاد شده در حضور دندانهای کامل مستطیلی



ب- شکل چاله آبشستگی



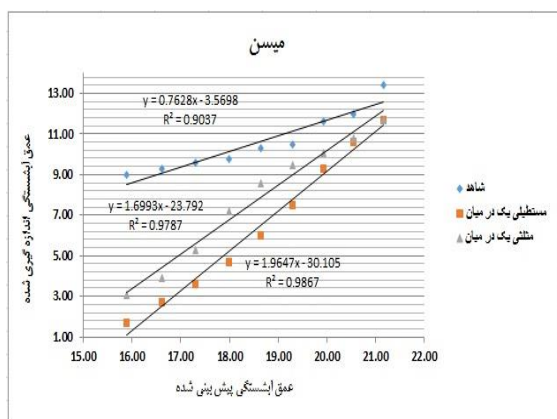
الف- شکل و ارتفاع فواره

شکل ۱۲- فواره و چاله‌ی ایجاد شده در حضور دندانهای یک در میان مستطیلی

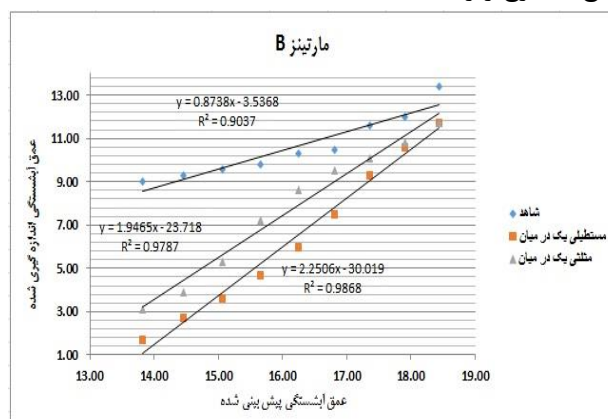
مقایسه‌ی نتایج با روابط تجربی

طبق نتایج حاصل، در حالت شاهد روابط مارتینز B و میسن  $R^2 = 0/9037$  و در حالت دندان‌دار مستطیلی یک در میان رابطه‌ی مارتینز B با  $R^2 = 0/9868$  و در حالت دندان‌دار مثلثی یک در میان رابطه‌ی ورونس A با  $R^2 = 0/9795$  بهترین عملکرد را در بین رابطه‌های تجربی داشته‌اند. (جدول ۳)

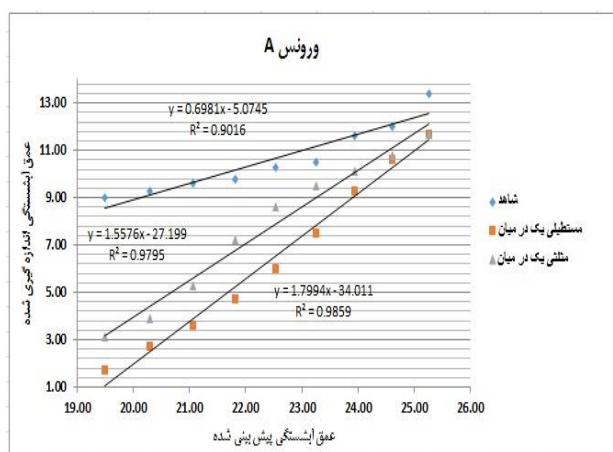
همانطور که در جدول ۱ ذکر شد رابطه‌های تجربی متعددی برای تخمین حداکثر عمق آبستگي موجود است. در این تحقیق با توجه به امتیازدهی سایر محققین، نسبت به مقایسه سه رابطه‌ی مارتینز B (Martins)، میسن (Mason) و ورونس A (Veronese) که بیشترین امتیاز را داشته‌اند با نتایج حاصل از تحقیق حاضر اقدام و نتایج به شرح زیر به دست آمدند:



ب- رابطه‌ی میسن



الف- رابطه‌ی مارتینز B



ج- رابطه‌ی ورونس A

شکل ۱۳- مقایسه‌ی رابطه‌های تجربی با نتایج حاصل از سه حالت شاهد و با دندان‌های مستطیلی کامل و یک در میان الف-

رابطه‌ی مارتینز B، ب-رابطه‌ی میسن، ج-رابطه‌ی ورونس A

جدول ۳- جدول مقایسه‌ی نتایج با رابطه‌های تجربی

نوع نمونه آزمایشگاهی	$R^2$		
	مارتینز B	میسن	ورونس A
شاهد	۰/۹۰۳۷	۰/۹۰۳۷	۰/۹۰۱۶
مستطیلی یک در میان	۰/۹۸۶۸	۰/۹۸۶۸	۰/۹۸۵۹
مثلثی یک در میان	۰/۹۷۸۷	۰/۹۷۸۷	۰/۹۷۹۵

یکنواخت ناشی از افشانه ریزشی از سرریز با جام انتهایی بود آزمایش‌ها براساس بده و شکل و فاصله قرارگیری دندان‌ها نسبت به یکدیگر در ۵ حالت بدون دندان

### نتیجه‌گیری

به دلیل آنکه هدف اصلی انجام این پژوهش بررسی اثر دندان‌ها بر تغییرات پستی و بلندی بستر با مصالح

جامی شکل با بکارگیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه ارومیه و انجمن هیدرولیک ایران. ۱۶-۱۸ آبان‌ماه، ارومیه.

۷) آبستگي در بده اوج نسبت به شاهد حدود ۱۳ درصد کاهش یافت. درباره‌ی نقطه اثر بیشترین محل وقوع آبستگي می‌توان گفت در حالت مستطیلی یک در میان

8) Amanian N. 1993. Scour Below a Flip Bucket Spillway. Utah State University. Department of Civil and Environmental Engineering. 252 p.

9) Azmathullah H.Md., Deo M.C., Deolalikar P.B. 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. J. Hydraul. Eng., (ASCE). 131(10): 898-908.

10) Bhavan M., SHahzafar marg B. 2010. Bureau of Indian Standards. Central for Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators. Second Revision. New Delhi.

11) Chee S.P., Padiyar P.V. 1969. Erosion at the Base of Flip Buckets. Can. Engng. J., November, 22-24.

12) Damle P.M., Venkatraman C.P., Desai S.C. 1966. Evaluation of Scour below Ski-jump Buckets of Spill-ways. In: CWPRS Golden Jubilee Symposia, Poona, India, I: 154-163.

13) Hager W.H., Minor, H.E. 2004. Plunge pool scour in prototype and laboratory. Proceeding of 2004 International hydraulics of dam and river structures, April 29-28, Tehran, Iran.

14) Hoffmans G.J.C.M., Verheij H.J. 1997. Scour Manual: A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 205p.

15) Martin R. B. F. 1975. Scouring of Rocky River Beds by Free Jet Spillway Water Power and Dams Construction. 53 p.

16) Mason P.J. 1984. Erosion of Plunge Pools Downstream of Dams due to the Action of Free Trajectory Jets. Proc. Inst. Civil Engineers, I 76(5): 523-537.

17) Mason P.J., Arumugam K. 1985. Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets. J. Hydraul. Eng., (ASCE), 111(2): 220-235.

(شاهد) و دنداندار مستطیلی و مثلثی (هر کدام دو حالت از نظر فاصله دنداندار از یکدیگر) انجام شدند. نتایج نشان دادند که در هر ۵ حالت با افزایش بده جریان عمق آبستگي بیشتر می‌شود ولی روند افزایش عمق آبستگي در حالت جام دنداندار مستطیلی یک در میان کمتر از سایر نمونه آزمایشگاهی به‌دست آمد، به‌طوری‌که که حداکثر عمق نسبت به سایر نمونه آزمایشگاهی نتایج مطلوب‌تری از نظر گستره‌ی طولی آبستگي و همچنین فاصله‌ی محل آبستگي از بدنه‌ی سازه نتایج قابل قبول‌تر از سایر نمونه‌های آزمایشگاهی به‌دست آمد. درباره‌ی مقایسه‌ی نتایج پژوهش با سه رابطه‌ی تجربی که به‌وسیله‌ی سایر پژوهشگران ارائه شده است می‌توان گفت در هر سه رابطه‌ی مقادیری بیش از مقدار واقعی به‌دست آمد ولی در کل رابطه‌ی مارتینز B مقادیری نزدیک‌تر به واقعیت را به‌دست می‌دهد.

## منابع

- ۱) اکبری غ، کاویانپور م، سلطانی سامانی ا، ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی آبستگي پائین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل. مجله مهندسی منابع آب. ۷(۲۰): ۵۱-۶۵.
- ۲) پیرستانی م، ریاضی ر، ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر دنداندار و میزان بازشدگی دریچه در جام پرتابی بر شکل نیمرخ بستر با مصالح غیر یکنواخت. مجله پژوهش آب ایران. ۹(۳): ۱۳۱-۱۴۰.
- ۳) پیرستانی م، شفیعی س. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی تاثیر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبستگي ناشی از افشانه ریزشی جامی شکل دنداندار. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک. دانشگاه تهران ۴-۲.
- ۴) محبوبی ا. ۱۳۷۵. اثر قطر مصالح بر میزان آبستگي ناشی از افشانه‌های ریزشی آزاد. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده عمران، ۱۱۰ صفحه.
- ۵) مومنی وصالیان ر، موسوی جهرمی س. ح، شفاعی بجستان م، ۱۳۸۷. آبستگي ناشی از افشانه‌های مستطیلی پائین‌دست پرتابه جامی شکل با مصالح غیر یکنواخت. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵(۲): ۲۰۳-۲۱۶.
- ۶) مهرکیا م، مجدزاده م. کاویانپور م، ۱۳۹۱. ارزیابی معادلات حاکم بر آبستگي در پائین‌دست پرتابه‌های

- 18) Rajaratnam N., Mazurek K.A. 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater. *J. Hydraul. Eng., (ASCE)*. 129 (3): 225-229.
- 19) Schoklitsch A. 1935. Prevention of Scour and Energy Dissipation—Translated at the USBR, USA.
- 20) US Bureau of Reclamation. 1987. Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication. United States Department of the Interior (USBR). Third Edition.
- 21) VVeronese A. 1937. Erosioni de fondo a valle diuno scarico. *Annali dei Lavori Pubblici*. 75 (9): 717-726.
- 22) Vischer D.L., Hager W.H. 1995. Energy Dissipators. Hydraulic Structures Design Manual. No.9. A. A. Balkema. Rotterdam. The Netherlands. 208 p.