

## بررسی آزمایشگاهی اثر مانع با دندان‌های دوزنقه‌ای و مثلثی در پرتابه جامی شکل روی آبشستگی پایین دست با استفاده از مدل فیزیکی

غلامرضا صفرنژادی<sup>۱</sup>، محمد حیدرنژاد<sup>۲\*</sup>، امین بردبار<sup>۲</sup>، محمدحسین پورمحمدی<sup>۳</sup> و امیرعباس کمان‌بدست<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۹)

### چکیده

استفاده از جت‌های پرتابی آزاد در سازه‌های پرتاب‌کننده جامی همراه با حوضچه استغراق وابسته، در صورت برقراری شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی و هیدرولیکی مناسب، مزایای اقتصادی و ایمنی چشمگیری در مقایسه با سایر انواع سازه‌های استهلاک انرژی دارد. در پژوهش حاضر پدیده آبشستگی پایین دست یک پرتابه جامی شکل در شرایط آزاد و همچنین در شرایط وجود دندان با اشکال دوزنقه‌ای و مثلثی در پایاب با فواصل چیدمان مختلف در ۹ دبی و در مجموع ۴۵ آزمایش بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که وجود دندان چه اثراتی بر گستره و عمق آبشستگی می‌گذارد، بدین ترتیب که پرتابه جامی شکل با دندان‌های مثلثی یک در میان نسبت به حالت بدون دندان حدود ۱۲/۷ درصد کاهش آبشستگی را سبب می‌شود، همچنین حداکثر عمق آبشستگی در حالت باکت با دندان‌های دوزنقه‌ای یک در میان در بازه مطلوب‌تر از مابقی مدل‌ها به وقوع می‌پیوندد. سپس نتایج حاصل با تعدادی از فرمول‌های تجربی مقایسه و مشخص شد رابطه ورونس A نتایج نزدیک‌تری به مقادیر واقعی به دست می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پرتابه‌های جامی شکل، مستهلک‌کننده انرژی، عمق آبشستگی، دندان‌های دوزنقه‌ای و مثلثی

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

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

۳. گروه علوم و مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

\*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mo\_he3197@yahoo.com

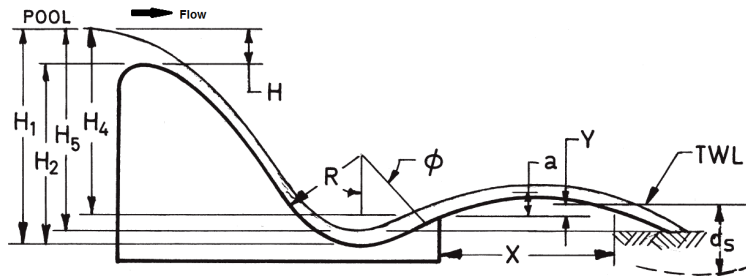
## مقدمه

باعث ایجاد جت‌های کوچکی می‌شوند که این جت‌ها نیز به‌نوبه خود در بین یکدیگر اصطکاک ایجاد می‌کنند که در نهایت استهلاك انرژی آب را بالا می‌برد (۴ و ۱۹).

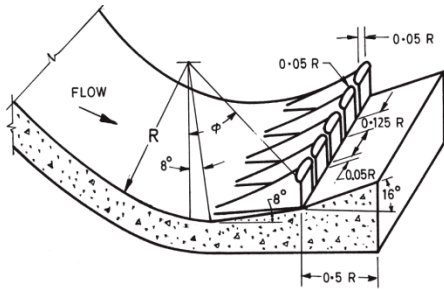
در پژوهش حاضر روی پدیده آبشستگی پایین‌دست پرتابه جامی شکل در حالت بدون دندانه، دندانه‌دار ذوزنقه‌ای و مثلثی با فواصل چینش متفاوت دندانه‌ها (دو حالت) تحقیق شده است. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای روی پدید آبشستگی انجام شده است. از جمله مارتین (۹) نسبت به جمع‌آوری رابطه‌های تجربی بر پایه آزمایش‌ها و همچنین مشاهدات صحرایی برای برآورد عمق آبشستگی پایین‌دست سرریزهای جامی شکل اقدام کرد و نشان داد حداکثر عمق آبشستگی با متوسط قطر دانه‌ها رابطه معکوس دارد. براورز و رادکیوی (۵) عنوان می‌کنند که برای جلوگیری از ایجاد آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی تخلیه‌کننده جریان، کاربرد روش‌های مختلف استهلاك انرژی موجب حفاظت پی‌سازه هیدرولیکی در مقابل آبشستگی شده که مشهورترین آنها می‌توان به استفاده از سرریز با پرتابه جامی شکل اشاره کرد. ویچر و هاگر (۲۱) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر سری دندانه‌های منشوری روی پرتابه جامی شکل (فلیپ باکت) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سری دندانه‌های منشوری با عرض قاعده کمتر و تعداد بیشتر دندانه در یک مسیر پرتاب، تأثیر بیشتری روی عمق آبشستگی دارد و همچنین چیدمان دندانه‌ها روی پرتابه بسیار مهم بوده است و جای پژوهش دارد. امانیان (۲) پدیده آبشستگی پایین‌دست سرریزهای جامی شکل را بررسی کرد و نتیجه گرفت هرچقدر زاویه برخورد جت با بستر پایین‌دست بزرگ‌تر باشد، عمق آبشستگی زیادتری ایجاد خواهد کرد و هرچقدر زاویه پرتاب جت کوچک‌تر باشد، طول حفره آبشستگی افزایش پیدا خواهد کرد. سعیدی‌نژاد (۱۷) با انجام آزمایش‌های روی سرریز ریزشی آزاد با مصالح یکنواخت نشان داد که عمق پایاب بر مقدار حداکثر آبشستگی اثر افزایشی - کاهشی دارد. مازورک و راجاراتنام (۱۱) آبشستگی ناشی از جت مدور با ریزش قائم را روی مصالح غیرچسبنده با پایاب

پدیده فرسایش از مسائل مهمی است که در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل به‌وقوع می‌پیوندد. برخورد جت آب خارج شده از خروجی این نوع سازه‌ها سبب ایجاد فرسایش و جابه‌جایی مصالح بستر و در نتیجه تغییر توپوگرافی رودخانه می‌شود. این امر اثرات منفی بسیاری به دنبال دارد که مهم‌ترین آنها ناپایداری بدنه سد و در نتیجه احتمال تخریب سازه در اثر گسترش ابعاد حفره آبشستگی است. از این رو پیش‌بینی و تخمین میزان آبشستگی در پایین‌دست سازه‌ها همواره یکی از زمینه‌های پژوهش پژوهشگران علم هیدرولیک بوده است. شکل (۱) شمای کلی آبشستگی در پایین‌دست پرتابه جامی شکل را نشان می‌دهد (۴).

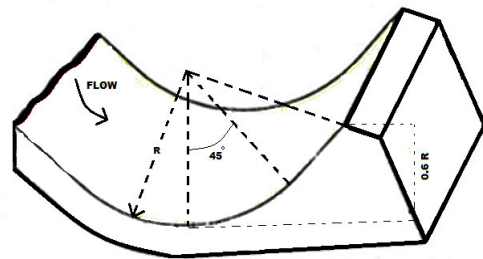
پرتابه‌های جامی شکل به دو دسته باکت کاملاً پیوسته (Solid Bucket) و باکت دندانه‌دار (Slotted Bucket) تقسیم می‌شوند که در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است (۴). در باکت پیوسته تمامی آب به‌طرف بالا هدایت شده است و انرژی اضافی آب در اثر برخورد با آب اطراف تلف می‌شود. این امر همچنین باعث ایجاد مقداری جوشش در سطح آب می‌شود. در این نوع باکت چنانچه عمق آب در پایین‌دست کم باشد، جوشش زیادی در سطح آب ایجاد می‌شود. همچنین مواد کف و بستر رودخانه در پایین‌دست سازه حرکت می‌کند که در نتیجه آبشستگی ایجاد می‌شود. این مواد از پایین‌دست به‌طرف لبه باکت حرکت می‌کنند و در این محل ته‌نشین می‌شوند، همچنین بعضی از ذرات نیز در اثر برخورد با سازه ایجاد خراش خواهند کرد. در باکت دندانه‌دار، زائده‌هایی دندانه‌مانند قبل از انتهای آن است که در نتیجه مقداری از جریان از بین دندانه‌ها عبور کرده و به‌صورت جت‌هایی پخش می‌شوند، مابقی جریان توسط دندانه‌ها به‌طرف بالا هدایت می‌شوند. بنابراین جریان آب در سطح وسیع‌تری پخش و پراکنده می‌شود که از نظر استهلاك انرژی راندمان بیشتری دارد. همچنین دارای جوشش کمتر در سطح آب شده و پروفیل سطح آب از ثبات بیشتری برخوردار است. توضیح اینکه این دندانه‌ها



شکل ۱. شمای کلی آبستگي در پایین دست پرتابه جامی شکل



شکل ۳. باکت دندان‌دار (شکاف دار)



شکل ۲. باکت پیوسته

سرریز، میزان دبی و عمق پایاب است. اکبری و همکاران (۱) آبستگي پایین دست پرتابه‌های جامی شکل را بررسی کردند و نتیجه گرفتند بهترین پیشگویی برای تخمین آبستگي توسط مدل مارتینز B ارائه شده است. مهرکیا و همکاران (۱۲) معادلات حاکم بر آبستگي 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 آبستگي رابطه مستقیم دارد. پیرستانی و ریاضی (۱۵) بررسی آزمایشگاهی اثر دندانه و میزان بازشدگی دریچه در جام پرتابی بر شکل پروفیل بستر با مصالح غیریکنواخت را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند با افزایش دبی، ابعاد حفره آبستگي افزایش یافته ولی عمق پایاب روند کاهشی نشان می‌دهد. به‌طورکلی پژوهشگران در تحقیقات خود سعی می‌کردند عمق آبستگي پایین دست سرریزها را به روش‌های مختلفی مانند بسته فرمول‌های تجربی، به‌کارگیری مدل‌های فیزیکی و غیره به‌دست آورند. برخی از معادلات معمول برای پیش‌بینی عمق آبستگي ( $d_s$ ) در جدول (۱) آمده است (۳، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۸

کوچک بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عمق آبستگي تابعی از عدد فرود ذره است. هگر و مینور (۸) تغییرات آبستگي را در شرایط حضور و عدم حضور جت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وقتی جریان جت برقرار است، عمق آبستگي بیشتر است و این موضوع باید در طراحی‌ها مدنظر قرار گیرد. پروشی و رضایی (۱۴) روی تأثیر زاویه لبه پرتاب سیستم مستهلک‌کننده انرژی از نوع فیلپ باکت روی حفره آبستگي تحقیقات انجام دادند و نتیجه گرفتند که زاویه لبه پرتاب در سرریزهای با پرتابه جامی شکل روی ابعاد حفره آبستگي مؤثر است. مؤمنی و صالحیان و همکاران (۱۳) آبستگي ناشی از جت‌های دوزنقه‌ای در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل با مصالح غیریکنواخت را بررسی کردند و نشان دادند که مدل‌های رگرسیونی خطی و توانی ارائه شده توسط آنها در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگي موفق است. پیرستانی و همکاران (۱۶) آزمایش‌هایی برای تأثیر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبستگي ناشی از جت ریزشی جامی شکل دندان‌دار با سه عمق پایاب مختلف و رسوبات یکنواخت انجام دادند و نتیجه گرفتند که ابعاد حفره آبستگي، وابسته به پارامترهای ارتفاع آب بالادست

جدول ۱. برخی از روابط موجود برای محاسبه حداکثر عمق آبستنگی

رابطه	پژوهشگر	رابطه	پژوهشگر
$D = 1/663 q^{0/6} H^{0/2} / d_m^{0/1}$	چی و پادیر	$D = 0/521 q^{0/57} H^{0/2} / d_{90}^{0/32}$	شوکلچ
$D = 1/5 q^{0/6} H^{0/1}$	مارتینز B	$D = 0/202 q^{0/54} H^{0/255} / d_m^{0/42}$	ورونس A
$D = 0/652 q^{0/5} H^{0/5}$	دامل A	$D = 1/9 q^{0/54} H^{0/255}$	ورونس B
$D = 0/543 q^{0/5} H^{0/5}$	دامل B		
$\frac{D}{h_t} = 6/916 \left( \frac{q}{\sqrt{gh_t}} \right)^{0/694} \left( \frac{H}{h_t} \right)^{0/915} \left( \frac{R}{h_t} \right)^{-0/233} \left( \frac{d_{50}}{h_t} \right)^{0/196} \phi^{0/196}$		عظمت‌اله	
$D = kq^x H^y h^w / g^v d^z$			
$k = (6/42 - 3/1/H^{0/1}), x = (0/6 - H/300), y = (0/15 - H/200), v = 0/3, w = 0/15, z = 0/1$			
d = d <sub>50</sub> : برای مدل			
d = 0/25: برای پروتوتایپ			

$\rho_s$ : جرم حجمی مصالح بستر،  $\rho_w$ : جرم حجمی آب،  $\mu$ : لزجت دینامیکی،  $g$ : شتاب ثقل،  $b$ : ضخامت جت در جام سرریز،  $H$ : ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب سطح مخزن و پایاب،  $D$ : بیشترین عمق آبستنگی که از سطح اولیه بستر اندازه‌گیری می‌شود،  $\theta$ : زاویه برخورد جت به پایاب،  $R$ : شعاع پرتابه جامی‌شکل،  $\phi$ : زاویه پرتابه جامی‌شکل،  $Y$ : فاصله عمودی بین لبه 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 آنجایی که هدف این پژوهش، بررسی آبستنگی در حالت تعادل است، بنابراین عامل زمان از رابطه بالا حذف می‌شود و همچنین به نظر نمی‌رسد  $b$  برای دبی‌های مورد مطالعه تغییرات زیادی داشته باشد، بنابراین، این پارامتر نیز حذف می‌شود. از طرفی به دلیل اینکه محاسبه  $\theta$  به سختی امکان‌پذیر است و وجود آن در رابطه نهایی کاربری آن را مشکل می‌کند، از آن صرف‌نظر می‌شود (۱۳) چون در این آزمایش‌ها جریان آشفته بوده و دارای تلاطم زیادی است،  $\mu$  نیز حذف می‌شود. 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  $q, \rho_w, h$  و با استفاده از تئوری

و (۲۰). در روابط زیر تراز مخزن و پایاب ( $H$ )، دبی در واحد عرض ( $q$ )، سایز دانه‌بندی مصالح بستر ( $d$ )، عمق پایاب ( $h_t$ ) و زاویه پرتابه جامی‌شکل ( $\phi$ ) است.

همان‌طور که در بالا اشاره شد مطالعات گسترده‌ای روی پدیده آبستنگی انجام شده است ولی تاکنون مطالعات جامعی در مورد اثر دندانه با اشکال مختلف و فواصل متفاوت در پرتابه جامی‌شکل روی پدیده آبستنگی در پایین‌دست این نوع سازه انجام نشده است. در این پژوهش علاوه بر انجام آزمایش‌ها مختلف روی مدل‌های گوناگون روی پدیده آبستنگی پایین‌دست پرتابه جامی‌شکل، نسبت به مقایسه نتایج به‌دست آمده با برخی از روابط تجربی موجود اقدام شده است.

## مواد و روش‌ها

### آنالیز ابعادی

در این پژوهش با توجه به پارامترهای مؤثر بر پدیده آبستنگی، مکانیسم آبستنگی و تغییرات بستر ناشی از آن نسبت به شناسایی و استخراج پارامترهای بی‌بعد اقدام شد. در شکل (۱) نحوه شکل‌گیری پدیده آبستنگی و پارامترهای مؤثر بر آن نشان داده شد. پارامترهای متعددی در ایجاد پدیده آبستنگی در زیر جت‌ها دخالت دارند که عبارت‌اند از:  $q$ : دبی در واحد عرض،



شکل ۵. سرریز اوجی با پرتابه جامی شکل



شکل ۴. نمای کلی از فلوم آزمایشگاهی

نوع روگذر آزاد (ogee) و از جنس پلکسی گلاس است که در انتهای آن یک پرتابه جامی شکل به شعاع ۰/۱۶ متر تعبیه شد شکل (۵). طراحی مدل سرریز با توجه به شرایط فلوم، بیشترین دبی آن و طبق استاندارد USBR و به عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۴۰ متر انجام گرفت. آزمایش‌ها در حالت باکت ساده (Solid Bucket) و دندان‌دار (Slotted Bucket) با اشکال دوزنقه‌ای و مثلثی (هرکدام دو حالت مختلف از نظر فواصل دندان‌ها) انجام شد.

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

#### زمان تعادل آزمایش‌ها

تعیین مدت زمان آزمایش یکی از مراحل حساس در انجام آزمایش‌ها است چون عامل زمان را می‌خواهیم حذف کنیم پس باید برداشت‌ها زمانی انجام گیرد که حفره آبشستگی در حال تعادل است. برای رسیدن به زمان تعادل یک‌سری آزمایش‌ها با دبی حداکثر طرح (۲۱ لیتر بر ثانیه) انجام شد و در زمان‌های مختلف عمق حفره آبشستگی برداشت شد. مشخص شد در زمان ۱۲۰ دقیقه عمق آبشستگی تقریباً ثابت مانده و به تعادل رسیده است شکل (۶). از این‌رو این زمان را به‌عنوان زمان تعادل تلقی

باکینگهام، معادله بدون بعد زیر به دست می‌آید:

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

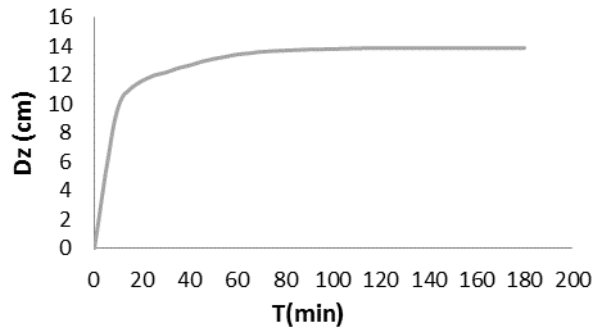
در پژوهش حاضر از  $\rho_s$ ,  $\rho_w$ ,  $d_s$ ,  $R$ ,  $Y$  و  $\cos \varphi$  به علت ثابت بودن در فرایند آزمایش صرف نظر می‌شود، در نهایت تابعی به شکل رابطه (۴) برای بیشترین عمق آبشستگی  $D/H$  می‌توان ارائه کرد.

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

از طرفی در کل آزمایش‌ها عمق آب پایین دست ( $h_t$ ) ثابت در نظر گرفته می‌شود، پس تنها پارامتر بی بعد فقط پارامتر  $\frac{q}{\sqrt{gH^3}}$  یا همان عدد فرود به دست می‌آید که مبنای این پژوهش در نظر گرفته شده است.

#### تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور انجام مطالعات و رسیدن به اهداف پژوهش از یک فلوم مستقیم به طول ۱۵ و عرض و ارتفاع ۰/۶ متر واقع در مجتمع آزمایشگاهی معاونت حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب سازمان آب و برق خوزستان - ایران استفاده شد شکل (۴). این فلوم در ابتدا مجهز به دبی‌سنج دیجیتال در لوله ورودی به فلوم و در انتهای آن یک مانومتر همراه با سرریز مثلثی لبه تیز در حوضچه خروجی برای تنظیم دبی است. در انتهای فلوم به منظور تنظیم سطح آب پایین دست و کنترل آن از یک دریچه استفاده شد. مدل سرریز ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها از



شکل ۶. گراف زمان تعادل برای عمق آبشستگی



شکل ۷. پرتابه جامی شکل با دندان‌های الف) مثلثی و ب) دوزنقه‌ای کامل (طبق استاندارد USBR)

دندان‌ها ۰/۰۵ شعاع پرتابه جامی شکل و محل قرارگیری دندان‌ها ۰/۵ برابر شعاع پرتابه جامی شکل از انتهای جام محاسبه شد (۱۹). حالت اول شکل (۷) چیدمان دندان‌ها طبق استاندارد USBR و حالت دوم شکل (۸) طبق روش ابداعی پژوهشگران به صورت یک در میان اجرا شد بدین ترتیب که با توجه به ابعاد مدل در حالت اول طبق استاندارد USBR تعداد ۱۷ دندان و در حالت دوم طبق روش ابداعی محققین تعداد ۹ دندان روی پرتابه تعبیه شد.

#### روند انجام آزمایش

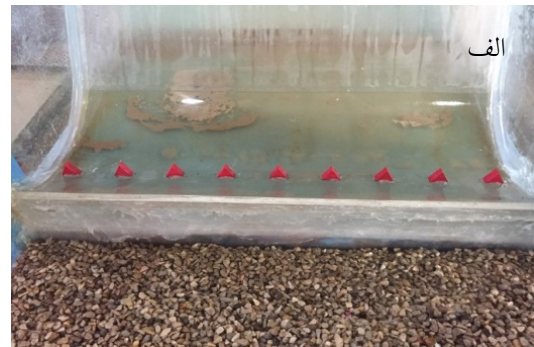
در مقطعی از فلوم به طول ۲ متر و عرض ۰/۶ متر و عمق ۰/۱۵ متر که بلافاصله پس از سرریز قرار دارد رسوبات ریخته می‌شود. سپس سطح مصالح با تسطیح‌کننده چوبی صاف می‌شود. برای ایجاد تراکمی یکنواخت به منظور حصول اطمینان از شرایط و عدم وقوع تغییرات موضعی غیرقابل پیش‌بینی، سطح

کرده و تمام آزمایش‌ها تا ۱۲۰ دقیقه ادامه داده شد و آنگاه برداشت نقاط انجام شد.

#### روش انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش از ۹ دبی در بازه ۱۳ تا ۲۱ لیتر بر ثانیه استفاده شد. تعیین حداقل دبی (۱۳ لیتر بر ثانیه) بر مبنای شروع تغییرات توپوگرافی پایین‌دست پرتابه و در نتیجه آبشستگی قابل مشاهده و تأثیرگذار و همچنین حداکثر دبی (۲۱ لیتر بر ثانیه) با توجه به توان خروجی پمپ و شرایط آزمایشگاه انتخاب شد. مدل‌های به کار رفته در این پژوهش شامل پنج مدل پرتابه جامی شکل در حالت بدون دندان، دندان‌دار دوزنقه‌ای و مثلثی هر کدام در دو حالت از نظر چیدمان دندان‌ها است که در نهایت کل آزمایش‌ها به ۴۵ آزمایش رسید. طراحی و ابعاد دندان‌ها طبق استاندارد USBR صورت گرفت، بدین ترتیب که عرض دندان‌ها برابر ۰/۱۲۵ شعاع پرتابه جامی شکل (R) و فاصله بین





شکل ۸. پرتابه جامی شکل با دندان‌های الف) مثلثی یک در میان و ب) ذوزنقه‌ای (پژوهش حاضر)



شکل ۹. نحوه برخورد جت با مصالح و ایجاد حفره آبستگي

### نتایج و بحث

#### تغییرات عمقی چاله آبستگي

با افزایش جریان ورودی به سرریز عمق چاله آبستگي افزایش می‌یابد. در این پژوهش مشخص شد که این عمق در مدل‌های مختلف با دندان‌های با شکل‌ها و فواصل چیدمان مختلف، متفاوت است. ابتدا اثر شکل و فاصله دندان‌ها در هر مدل بررسی می‌شود. در جدول (۲) نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای عمق آبستگي برحسب سانتی‌متر در مدل‌های مختلف و در بازه دبی ۱۳ تا ۲۱ لیتر بر ثانیه بیان شده است.

با توجه به تأثیر دبی، شکل دندان و فاصله آنها از یکدیگر روی چاله آبستگي نتایج زیر حاصل شد. بر اساس نتایج جدول (۲) و شکل‌های (الف-۱۰)، (ب-۱۰) و (ج-۱۰) با افزایش دبی عمق چاله آبستگي در همه حالات افزایش

مصالح با الوار کوبیده و سپس توسط متر لیزری به‌عنوان سطح مبنا برداشت می‌شود. سپس دبی موردنظر به‌وسیله دبی‌سنج الکترومغناطیس تنظیم شده و جریان می‌یابد. از طرف دیگر عمق آب پایین‌دست سرریز توسط یک دریچه‌ای در انتهای فلوم تنظیم می‌شود. عمق پایاب در این آزمایش‌ها ثابت و به اندازه پاشنه انتهایی پرتابه یعنی هشت سانتی‌متر در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. جریان ورودی به داخل فلوم پس از عبور از روی سرریز و پرش از روی پرتابه جامی شکل به داخل حوضچه رسوبات برخورد کرده و چاله آبستگي به‌وجود می‌آید (شکل ۹). پس از اتمام زمان آزمایش جریان ورودی قطع شده و مصالح زهکشی می‌شوند. سپس به‌وسیله متر لیزری برداشت توپوگرافی از سطح رسوبات انجام می‌گیرد.

جدول ۲. عمق آبشستگی برحسب سانتی‌متر

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

به وجود می‌آورد. در نتیجه عمق چاله آبشستگی کاهش می‌یابد. طبق شکل (۱۰-د) و با مشخص شدن حالت بهینه می‌توان گفت شکل مثلثی برای دندان‌ها بهتر از دوزنقه‌ای است. با توجه به روند افزایش عمق آبشستگی مشخص شد که حالت دندان‌دار مثلثی یک در میان با وجود اینکه تا عدد فرود ۰/۴ میزان آبشستگی تقریباً بیشتری نسبت به شکل دوزنقه‌ای دارد ولی پس از آن کمتر از حالت دوزنقه‌ای می‌شود به طوری که در نهایت در دبی پیک به میزان ۱۲/۷ درصد کمتر از حالت شاهد آبشستگی به دست آمد در صورتی که این میزان در دندان‌دار دوزنقه‌ای حدود ۹/۷ درصد نسبت به حالت شاهد به دست آمد، پس می‌توان نتیجه گرفت حالت دندان‌دار یک در میان مثلثی بهترین عملکرد را نسبت به سایر حالات به دست آورد.

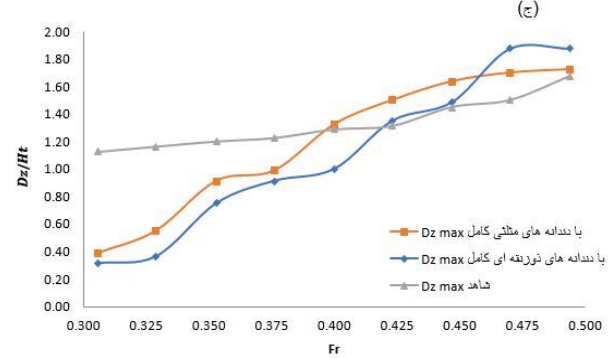
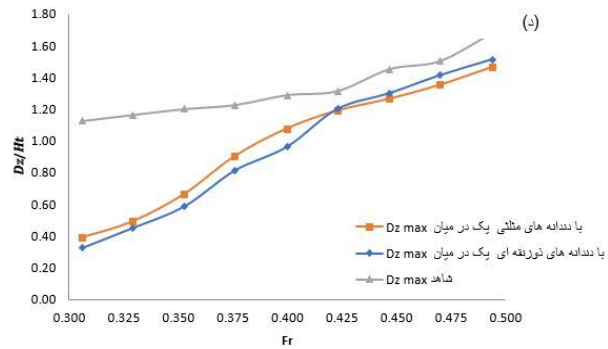
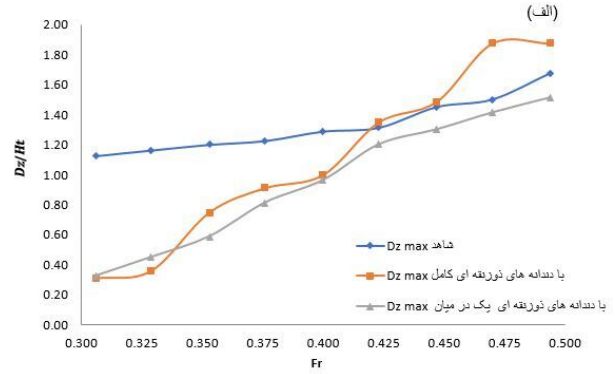
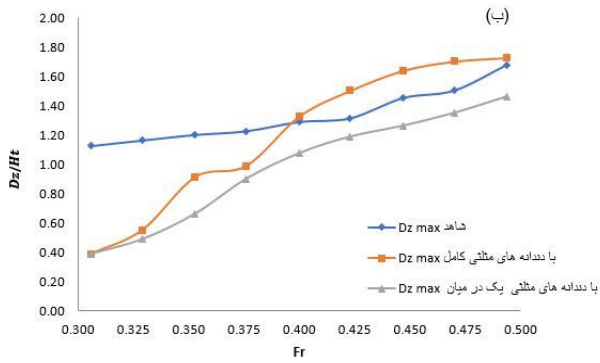
#### مقایسه نتایج با روابط تجربی

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

در حالت شاهد؛ روابط مارتینز B و میسن  $R^2=0/9037$  و در حالت دندان‌دار دوزنقه‌ای یک در میان؛ رابطه ورونس A با  $R^2=0/9907$  و در حالت دندان‌دار مثلثی یک در میان؛ رابطه ورونس A با  $R^2=0/9795$  بهترین عملکرد را در بین فرمول‌های تجربی داشته‌اند.

می‌یابد. حال آنکه در حالت دندان‌دار دوزنقه‌ای و مثلثی کامل (طبق روش USBR) تا فرود ۰/۴ و ۰/۴۲۵ کمتر ولی از این عدد به بعد بیشتر از حالت شاهد می‌شود. وجود دندان‌های کامل باعث ایجاد انسداد در باکت شده است 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 غلطابه ایجاد شده پیرامون آنها و همچنین دندان‌ها برخورد کرده و با افزایش جریان فواره‌ای با ارتفاع بیشتر نسبت به حالت شاهد ایجاد می‌کند، در نتیجه طول فواره نسبت به حالت شاهد کمتر شده است ولی با ارتفاع بیشتری به سطح آب پایین دست برخورد می‌کند (شکل ۱۱-الف). در نتیجه همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق چاله آبشستگی در حالت دندان‌دار کامل دوزنقه‌ای و مثلثی افزایش می‌یابد. حال آنکه براساس شکل (۱۰-د) در حالت دندان‌دار یک در میان دوزنقه‌ای و مثلثی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد، زیرا با کاهش دندان‌ها انسداد حاصل از اثر دندان‌ها و ایجاد غلطابه پیرامون آنها کمتر و جریان پس از رسیدن به دندان‌ها به دو فواره تبدیل می‌شود. یک فواره با ارتفاع زیاد و طول کم که حاصل برخورد جریان با دندان‌ها است و یک فواره با ارتفاع کم و طول بیشتر که حاصل عبور آب از شکاف بین دندان‌ها است (شکل ۱۲-الف). فواره حاصل از برخورد با دندان‌ها قبل از فرود به سطح رسوبات به فواره حاصل از عبور از شکاف بین دندان‌ها برخورد کرده است و عامل جدیدی علاوه بر اصطکاک فواره با سطح آزاد هوا و همچنین عمق آب پایین دست برای مستهلک شدن انرژی جریان





شکل ۱۰. تغییرات عمق چاله آبستگي در شرایط مختلف: الف) حداکثر عمق آبستگي در سه حالت شاهد و با دندان دوزنقه‌ای کامل و یک در میان، ب) حداکثر عمق آبستگي در سه حالت شاهد و با دندان مثلی کامل و یک در میان، ج) حداکثر عمق آبستگي در سه حالت شاهد و با دندان دوزنقه‌ای و مثلی کامل و د) حداکثر عمق آبستگي در سه حالت شاهد و با دندان دوزنقه‌ای و مثلی یک در میان



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. الف) شکل و ارتفاع فواره و ب) شکل چاله آبستگي ایجاد شده در حضور دندان‌های کامل دوزنقه‌ای

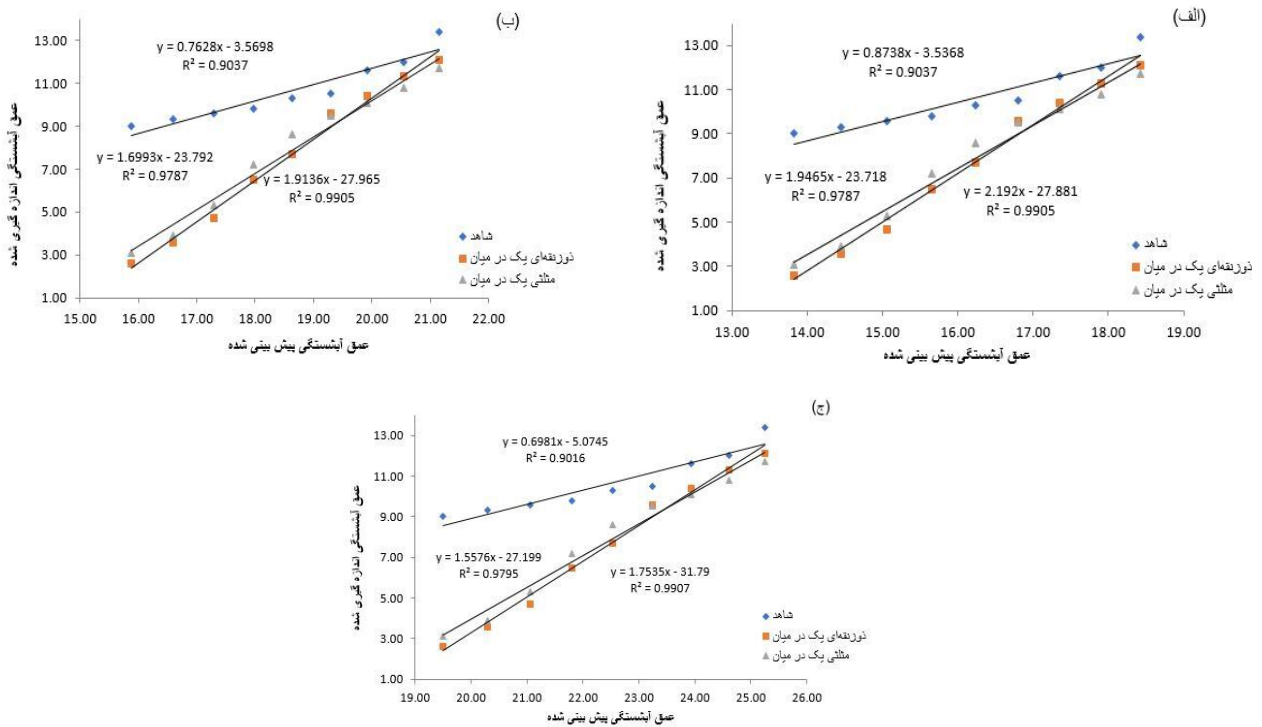


(ب)



(الف)

شکل ۱۲. الف) شکل و ارتفاع فواره و ب) شکل چاله آبستگي ایجاد شده در حضور دندان‌های یک در میان دوزنقه‌ای



شکل ۱۳. مقایسه فرمول‌های تجربی با نتایج حاصل از سه حالت شاهد و با دندان دوزنقه‌ای کامل و یک در میان: الف) رابطه مارتینز B، ب) رابطه میسن و ج) رابطه ورونس A

## نتیجه‌گیری

عمق آبشستگی در دبی پیک نسبت به شاهد حدود ۱۲/۷ درصد کاهش می‌یابد. درباره نقطه اثر بیشترین محل وقوع آبشستگی می‌توان گفت در حالت دوزنقه‌ای یک در میان نسبت به سایر مدل‌ها نتایج مطلوب‌تری از نظر گستره طولی آبشستگی و همچنین فاصله محل آبشستگی از بدنه سازه نتایج قابل قبول‌تر از سایر مدل‌ها به دست آمد. در مورد مقایسه نتایج پژوهش با سه فرمول تجربی که توسط سایر پژوهشگران ارائه شد (شکل ۱۳) می‌توان گفت در هر سه فرمول مقادیری بیش از مقدار واقعی به دست آمد ولی در کل فرمول ورونس A مقادیری نزدیک‌تر به واقعیت ارائه می‌دهد.

از آنجا که هدف اصلی انجام این پژوهش بررسی اثر دندان بر تغییرات توپوگرافی بستر با مصالح یکنواخت ناشی از جت ریزشی از سرریز با پرتابه جامی شکل است، آزمایش‌ها براساس دبی، شکل و فاصله قرارگیری دندان‌ها نسبت به یکدیگر در پنج حالت بدون دندان (شاهد)، دندان‌دار، دوزنقه‌ای و مثلثی (هرکدام دو حالت از نظر فاصله دندان از یکدیگر) صورت گرفت. نتایج نشان داد در هر پنج حالت با افزایش دبی جریان عمق آبشستگی بیشتر می‌شود ولی روند افزایش عمق آبشستگی در حالت باکت دندان‌دار مثلثی یک در میان کمتر از سایر مدل‌ها به دست آمد، به طوری که حداکثر

## منابع مورد استفاده

1. Akbari, G. H., M. R. Kavianpour Esfahani and E. Soltani Samani. 2014. Laboratory study of downstream scouring of the flip bucket. *Journal Management System*7 (20): 51-64 (In Farsi).

2. Amanian, N. 1993. Scour Below a Flip Bucket Spillway. Phd thesis, Utah State University. Department of Civil and Environmental Engineering. Logan, Utah, United States.
3. Azmathullah, H. M. D., M. C. Deo and P. B. Deolalikar. 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 131(10): 898-908.
4. Bhavan, M. and B. Shahzafar marg. 2010. Bureau of Indian Standards. Central for Hydraulic Desing of Bucket Type Energy Dissipators. Second Revision. New Delhi.
5. Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring Hydraulic Structures Design Manual Series 2. CRC Press, Taylor and Francis, United States.
6. Chee, S. P. and P. V. Padiyar. 1969. Erosion at the Base of Flip Buckets. *Engineering Journal Canada* 52(11): 22-24.
7. Damle, P. M., C. P. Venkatraman and S. C. Desai. 1966. Evaluation of Scour below Ski-jump Buckets of Spillways. CWPRS Golden Jubilee Symposia, Poona, India.
8. 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.*
9. Martin, R. B. F. 1975. Scouring of rocky river beds by free jet spillway. *Water Power and Dams Construction* 152-153.
10. Mason, P. J. 1984. Erosion of plunge pools downstream of dams due to the action of free trajectory jets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 76(5): 523-537.
11. Mazurek, K. A. and N. Rajaratnam. 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets whit small tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 139(3): 225-229.
12. 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 11<sup>th</sup> Hydraulic Conference of Iran. Oromieh, Iran.*
13. 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).
14. Parivashi, A. and H. Rezaei. 2008. The Effect of the jump lip of flip bucket type energy deterioration system on the scour hole. *In: Proceeding of 3<sup>th</sup> Iranian Water Resources Management Conference, Tabriz University, Iran. (In Farsi).*
15. Pirestani, M. and R. Riazi. 2015. Experimental study of the effect of the slot and the degree of opening of the valve in the flip bucket on the shape of the substrate profile with non-uniform materials. *Iranian Journal of Water Research* 18(3): 131-140. (In Farsi).
16. Pierestani, M. R., A. Mansouri and S. Shafiei Hasanabadi. 2009. Laboratory investigation of the effect of the depth of tail water on the dimensions of the scour hole due to the flip slotted falling jet. *In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Hydraulic Society of Iran and the Faculty of Engineering of Tehran University in Tehran, Iran. (In Farsi).*
17. Saeedinejad, M. 2005. Analysis of scour of downstream of rectangular flow spillway. MSc. Thesis. Engineering Faculty. Tehran University, Iran.
18. Schoklitsch, A. 1935. Prevention of Scour and Energy Dissipation—Translated at the USBR, USA.
19. US Bureau of Reclamation. 1987. Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication. Third Edition, United States Department of the Interior (USBR).
20. Veronese, A. 1937. Erosioni de fondo a valle diuno scarico. *Annali dei Lavori Pubblici* 75(9): 717-726.
21. Vischer, D. L. and W. H. Hager. 1995. Energy Dissipators. Hydraulic Structures Design Manual 9. A.A. Balkema. Rotterdam. The Netherlands.

## 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

Gh. Safarnejadi<sup>1,2</sup>, M. Heidarnejad<sup>2\*</sup>, A. Bordbar<sup>2</sup>,  
M. H. Pourmohammadi<sup>3</sup> and A. Kamanbedast<sup>2</sup>

(Received: October 26-2017; Accepted: June 30-2018)

### Abstract

The use of free launch jets in flip bucket structures with associated submerged ponds, in the appropriate geological, and topographic and hydraulic conditions, could have significant economic and safety benefits. In this research, the downstream scour phenomenon of a flip bucket jet was investigated in free conditions, as well as in the presence of a trapezoidal and triangular slot in the coastal manner with different layout intervals at flow rate of 9, with a total of 45 experiments. The results of this study showed that the presence of the slot had significant effects on the depth and range of scour, so that the flip bucket jet with alternate triangular slots reduced the scour by about 12.7%, as compared to the no slot mode. Moreover, the maximum scour depth occurred in the bucket mode with the alternate trapezoidal slots in the more favorable interval than the rest of the models. Then, the results were compared with several empirical formulas and Veronesi A relation showed closer results to the actual values.

**Keywords:** Flip bucket jet, Energy dissipaters, Scour depth, Trapezoidal and triangular slots

---

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

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

3. Department of Water Science Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: mo\_he3197@yahoo.com