

## بررسی آزمایشگاهی اثر دندان‌ها و میزان بازشدگی دریچه در جام پرتابی بر شکل پروفیل بستر با مصالح غیریکنواخت

محمدرضا پیرستانی<sup>۱\*</sup> و رسول ریاضی<sup>۲</sup>

### چکیده

با احداث سدهای بلند به طور معمول از سرریزهای جامی شکل با جریان پرتابی آزاد استفاده می‌شود. این نوع سازه‌ها در صورت بررسی دقیق و شرایط توپوگرافی مناسب ناشی از جریان ریزشی، در مقایسه با سایر انواع مستهلک کننده‌ها عملکرد مناسب‌تری دارند. بدین منظور در این پژوهش با انجام یکسری آزمایش‌ها، تأثیر عملکرد یک دندان در انتهای جام پرتابی، تغییرات توپوگرافی بستر در پایین‌دست با تغییرات دبی، میزان بازشدگی دریچه سرریز و عمق پایاب بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی، ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد ولی عمق پایاب روندی کاهشی نشان می‌دهد. همچنین به دلیل تأثیر دندان جام انتهایی، در مقایسه با حالت نرمال (بدون دندان) با افزایش میزان بازشدگی دریچه به میزان ۳۳٪ (۲ سانتی‌متر نسبت به حداکثر میزان بازشدگی دریچه)، حجم حفره ۱۲۵/۶۴٪ افزایش یافته و برای میزان ۶۶٪ (۴ سانتی‌متر بازشدگی دریچه نسبت به حداکثر میزان بازشدگی دریچه)، حجم حفره ۴۵/۹۲٪ کاهش و برای میزان ۹۹٪ (۶ سانتی‌متر بازشدگی دریچه نسبت به حداکثر میزان بازشدگی دریچه) نیز، حجم حفره ۲۲/۸۵٪ کاهش نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌شستگی، جام پرتابی دندان‌دار، جریان ریزشی آزاد، سرریز، میزان بازشدگی دریچه.

**ارجاع:** پیرستانی م. ر. و ریاضی ر. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر دندان‌ها و میزان بازشدگی دریچه در جام پرتابی بر شکل پروفیل بستر با مصالح غیریکنواخت. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱۳۱-۱۴۰.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.  
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

\* نویسنده مسئول: [mrpirestani@azad.ac.ir](mailto:mrpirestani@azad.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۸

## مقدمه

یکی از روش‌های رایج برای هدررفت انرژی جریان عبوری از روی سرریزها، استفاده از جام پرتابی برای ایجاد جریان ریزشی آزاد بر روی حوضچه استغراق پایین‌دست سرریز است. اگرچه این روش از نظر اجرایی متداول است، ولی ریزش جت و برخورد آن با بستر پایین‌دست، سبب ایجاد تغییرات توپوگرافی ناشی از آب‌شستگی شده که ایمنی سازه هیدرولیکی را به خطر می‌اندازد. از جمله این موارد، ریزش جریان از روی سرریزهای جام پرتابی و برخورد آن با بستر قابل فرسایش پایین‌دست است که سبب ایجاد آب‌شستگی و تغییرات توپوگرافی پایین‌دست می‌شود. هندرسن (۱۹۶۶) توجه ویژه به شکل حفره آب‌شستگی را برای ایمنی و پایداری سازه‌های هیدرولیکی لازم می‌داند. وی در این مورد زاویه انتهایی جام را برابر ۴۵ درجه پیشنهاد کرد، که در آن زاویه بیشترین مقدار انرژی جریان با اصطکاک و حرکت روی سرریز مستهلک می‌شود.

مارتین (۱۹۷۵) نسبت به جمع‌آوری رابطه‌های تجربی بر پایه آزمایش‌ها و همچنین مشاهدات صحرایی برای برآورد عمق آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای جامی شکل اقدام نمود و نشان داد حداکثر عمق آب‌شستگی با متوسط قطر دانه‌ها، رابطه معکوس دارد. مسن و آروموگام (۱۹۸۵) عنوان می‌کند. جام انتهایی موجب هدایت جریان آب با سرعت بالا (جت) به قسمت دورتر از محل سازه شده که با ایجاد تغییر در زاویه لبه پرتابی، جریان خروجی از انتهایی جام و میزان استهلاک تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد که نسبت به آرام کننده‌ها، یا حوضچه‌های آرامش و سایر مستهلک کننده‌های انرژی عملکرد مناسب‌تری می‌تواند داشته باشد. براورز و راودکیوی (۱۹۹۱) عنوان می‌کند برای جلوگیری از ایجاد آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی تخلیه‌کننده جریان، کاربرد روش‌های مختلف استهلاک انرژی موجب حفاظت پی سازه هیدرولیکی در مقابل آب‌شستگی شده که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به استفاده از سرریز با جام انتهایی اشاره کرد. امانیان (۱۹۹۳) پدیده آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای جامی شکل را با انجام ۶۴ آزمایش و انتخاب دو نوع قطر مصالح، سه زاویه پرتابی لبه جام و پنج عمق پایاب بررسی کرد و مدل فیزیکی را از بهترین روش‌های بررسی بیان کرد. ویچر و هاگر (۱۹۹۵) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر سری دندانان منشوری روی جام

انتهایی (فلیپ باکت) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سری دندانان منشوری با عرض قاعده کمتر و تعداد بیشتر دندانان در یک مسیر پرتاب، تأثیر بیشتری بر روی عمق آب‌شستگی دارد و اینکه چیدمان دندانانها بر روی قاشقک پرتاب بسیار مهم بوده و جای پژوهش دارد.

محبوبی (۱۳۸۱) و پس از آن آذر (۱۳۸۶) با انجام آزمایش‌هایی دانه‌بندی مصالح بستر را بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد مؤثر می‌داند. جوان و هاگر (۲۰۰۰) به بررسی مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی پرش در جام انتهایی پرداختند. گلزاری (۲۰۰۴) با انجام آزمایش‌هایی به تأثیر ترتیب جایگذاری ۵ دندانان با زوایای مختلف بر روی انتهایی جام پرتابی پرداخت و رابطه‌های تجربی را برای حداکثر عمق آب‌شستگی ارائه کرد. قدسیان و همکاران (۲۰۰۶) با انجام آزمایش‌هایی عمق پایاب و تپه پایین‌دست حفره را در شکل حفره آب‌شستگی ناشی از جریان ریزشی دارای اهمیت می‌دانند. پرویشی و رضایی (۱۳۸۷) بیان می‌کنند که زاویه لبه پرتاب در سرریزهای با جام انتهایی بر روی ابعاد حفره آب‌شستگی مؤثر است.

کسب صالح و رضایی (۱۳۸۸) به تأثیر تراز پایاب سیستم مستهلک کننده انرژی از نوع جام انتهایی روی حفره آب‌شستگی پرداخته‌اند. ایشان با مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعه تجربی مسن و آروموگام (۱۹۸۵) عنوان می‌دارند که با افزایش تراز پایاب در دبی‌های مختلف، حجم حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد و بهترین زاویه انتهایی نیز ۴۵ درجه است که کمترین مساحت طولی حفره آب‌شستگی را حاصل می‌کند.

پیرستانی و شفیعی (۱۳۸۸)، آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر عمق پایاب بر ابعاد حفره آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی جامی شکل دنداندار با سه عمق پایاب مختلف و رسوبات یکنواخت انجام داده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ابعاد حفره آب‌شستگی، وابسته به پارامترهای ارتفاع آب بالادست سرریز، میزان دبی و عمق پایاب است. بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد به دلیل پیچیدگی جریان و رسوب و تأثیر عامل‌های مختلف هندسی- هیدرولیکی بر تغییرات پروفیل بستر ناشی از جریان ریزشی از سرریزهای با جام انتهایی، نیاز به مطالعات بیشتری است.

## مواد و روش‌ها

## تجزیه و تحلیل ابعادی

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد متغیرهای هندسی و هیدرولیکی زیادی در ایجاد تغییرات بستر در پایین‌دست پرتاب کننده‌های جامی مؤثر هستند (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲). مهم‌ترین این متغیرها عبارتند از سرعت جریان آب ورودی فلوم (V)، عمق پایاب (Y<sub>t</sub>)، چگالی سیال (ρ<sub>w</sub>)، لزجت سینماتیک (ν)، شتاب ثقل زمین (g)، قطر مشخصه ذرات بستر یا قطر متوسط (d<sub>50</sub>)، چگالی ذرات رسوبی بستر (ρ<sub>s</sub>)، ارتفاع ریزش جریان آب از لبه جام تا سطح رسوبات (H<sub>w</sub>)، میزان بازشدگی دریچه (L)، ارتفاع دندان جام (h)، ضریب زبری بدنه شوت (n)، شعاع جام پرتابی (R)، پارامتر زمان (t)، عرض حوضچه رسوب (B) و انحراف معیار هندسی مصالح غیریکنواخت (σ). اگر ψ نشان دهنده ابعاد تغییرات پروفیل بستر، ناشی از آب‌شستگی باشد، با توجه به آنکه پارامترهای h, n, R, t, B و σ در تمام آزمایش‌ها ثابت است، ابعاد تغییرات پروفیل بستر تابعی از پارامترهای زیر است:

$$\psi = f(V, Y_t, \nu, \rho_w, \rho_s, L, H_w, d_{50}, g) \quad (1)$$

با استفاده از تحلیل ابعادی و ترکیب پارامترهای بی‌بعد، عدد فرود دنسیمتریک (Fr<sub>d</sub>) نتیجه می‌شود:

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{g \times d_{50} \times (G_s - 1)}} \quad (2)$$

بنابراین برای متغیرهای بدون بعد تابع زیر حاصل می‌شود:

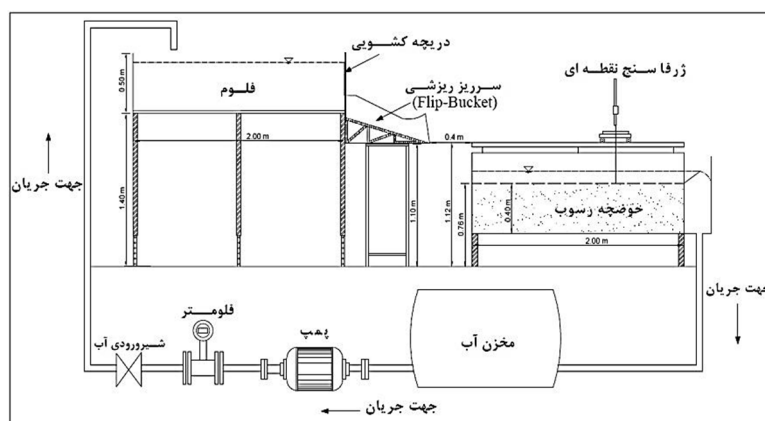
$$\frac{\psi}{H_w} = f\left(Fr_d, \frac{Y_t}{H_w}, \frac{L}{H_w}\right) \quad (3)$$

در این پژوهش پس از ترسیم تغییرات پروفیل طولی ناشی از جریان ریزشی، ابتدا به روند تغییرات پارامترهای بی‌بعد به دست آمده از تحلیل ابعادی پرداخته شده سپس با

انجام تحلیل آماری، رابطه‌های تجربی برای برآورد عمق حفره آب‌شستگی و ارتفاع تپه پایین‌دست آن ارائه شده است.

## تجهیزات آزمایشگاهی

برای بررسی اثر دندان در جام انتهایی و میزان بازشدگی دریچه در بالادست بر روی تغییرات توپوگرافی بستر، ناشی از جریان ریزشی، جریان در بالادست از فلوم مستقیمی به ابعاد ۰/۵×۰/۵×۲ متر بر روی سرریزی از نوع جام انتهایی تخلیه شد که میزان خروجی جت آب توسط دریچه‌های کشویی در ابتدای آن کنترل می‌شد (شکل ۱-الف). سپس جت خروجی بر روی یک حوضچه رسوب به ابعاد ۲ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۰/۷ متر عمق که در پایین‌دست سرریز جام پرتابی قرار دارد، برخورد می‌کند. تنظیم عمق پایاب با دریچه‌ای در انتهای حوضچه رسوب انجام شد. سرریز و جام پرتابی مشابه سرریز سد کارون (III) با مقیاس ۱/۱۶۵ مدل‌سازی شد (شکل ۱-ب). آزمایش‌ها برای دو حالت نرمال یا بدون دندان (Simple) و دندانه‌دار (Slotted) روی لبه جام پرتابی انجام شد. ابعاد دندان بر روی جام براساس توصیه USBR (۱۹۸۷) به ارتفاع ۲ سانتی‌متر انتخاب شد (شکل ۲-الف). تنظیم رقم سطح آب مورد نظر پشت سرریز در هر دبی با دریچه‌ای بر روی مانند شکل (۲-ب) انجام شد. برای بررسی تغییرات توپوگرافی بستر، حوضچه رسوب تا عمق ۴۰ سانتی‌متر از مصالح غیریکنواخت با جنس سیلیس به قطر متوسط ذرات (d<sub>50</sub>) 2.76mm انحراف معیار هندسی ۲/۱۱، ضریب یکنواختی (Cu) ۴/۰۷، چگالی (ρ<sub>s</sub>) ۱/۵۲ gr/cm<sup>3</sup> براساس منحنی دانه‌بندی شکل ۳ پر شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱- مدل فیزیکی (الف) و طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی (ب)

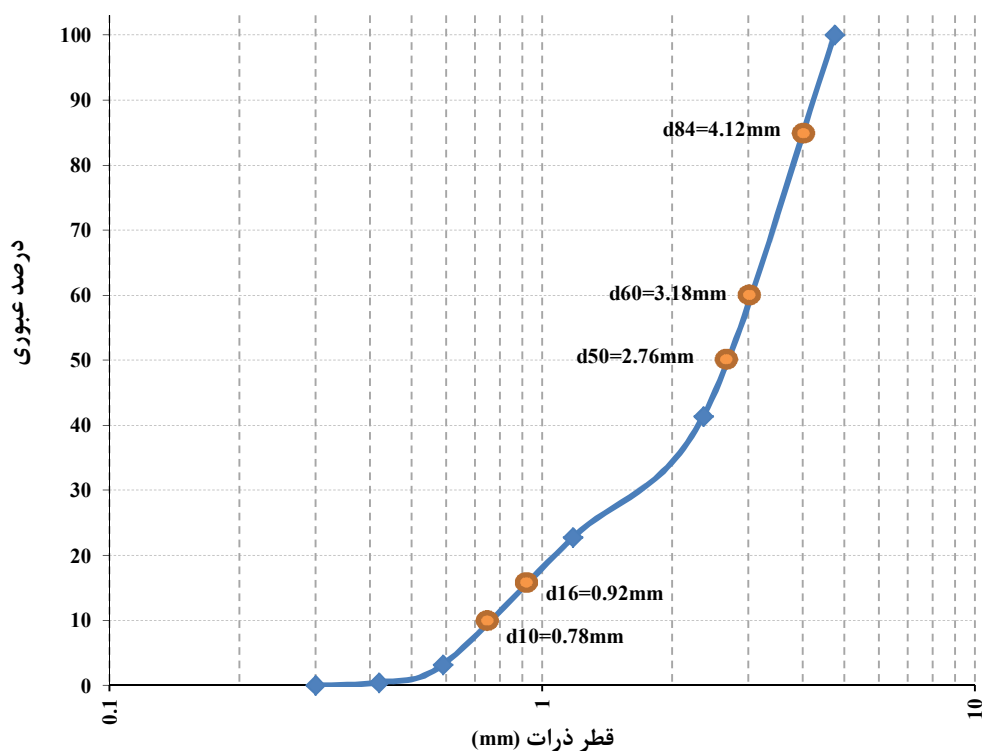


(ب)



(الف)

شکل ۲- نمایی از دندانه نصب شده در انتهای جام (الف) و دریچه کشویی بر روی سرریز (ب)

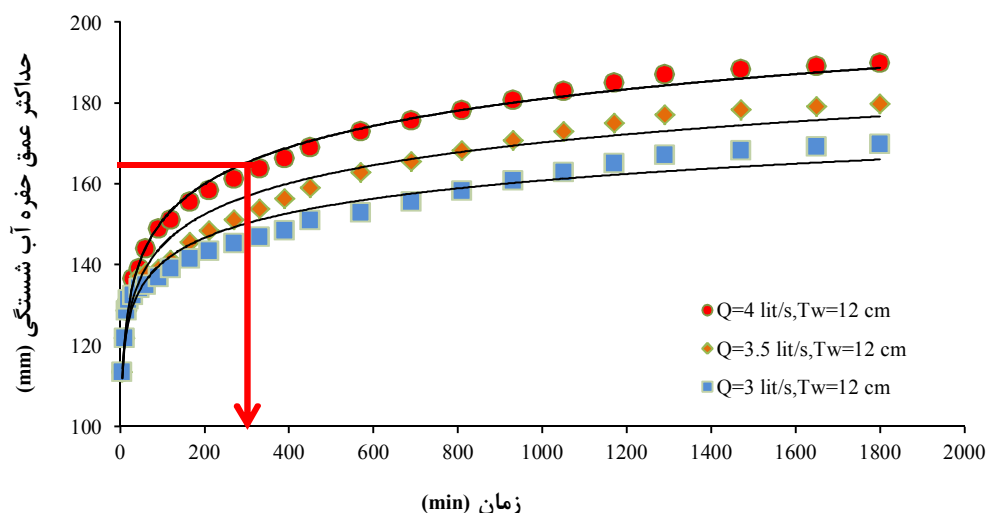


شکل ۳- منحنی دانه‌بندی رسوبات غیریکنواخت

ساعت، معادل ۸۸٪ کل ابعاد عمق آب‌شستگی برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. بنابراین در این پژوهش محدوده متغیرها، به تعداد ۵۴ آزمایش، جهت انجام براساس جدول ۱ ارائه شده است. بنابراین جت آب از ارتفاع ۵۷ سانتی‌متر نسبت به تراز انتهای جام نسبت به سطح تراز حوضچه رسوبات بستر با مصالح غیریکنواخت رها شد و به مدت ۳۶۰ دقیقه هرکدام از آزمایش‌ها انجام گردید. پس از انجام هر آزمایش، تغییرات توپوگرافی بستر با یک عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

### روش انجام آزمایش‌ها

در ابتدای هر آزمایش، باید از تراز بودن سطح رسوبات بستر اطمینان حاصل کرد. سپس دبی مورد نظر با دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیس تنظیم شده و با دریچه کشویی، میزان ارتفاع آب پشت سرریز (H) کنترل شود. از طرف دیگر عمق پایاب توسط دریچه حوضچه رسوب تثبیت و در نهایت جت ریزشی به داخل حوضچه رسوب برخورد می‌کند. برای تعیین زمان تعادل آزمایش‌ها، تعدادی آزمایش مقدماتی با دبی‌ها و زمان‌های مختلف انجام شد. با ترسیم منحنی‌های زمان تعادل براساس شکل ۴، زمان ۳۰۰ دقیقه معادل ۶



شکل ۴- منحنی‌های تعادل برای عمق حفره آب‌شستگی

کاهش ارتفاع آب پشت سرریز، قدرت جت خروجی سرریز افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد، میزان بازشدگی تا اندازه مشخصی مؤثر بوده و پس از آن نقش چندانی در استهلاک انرژی جت ریزشی و میزان کاهش ابعاد آب‌شستگی نخواهد داشت. بدین ترتیب براساس شکل (۵- ه و و) با افزایش میزان بازشدگی (L) در هر دو حالت نرمال و دنداندار، عمق حفره آب‌شستگی و ارتفاع تپه افزایش یافته ولی طول مؤثر کلی تغییرات بستر تفاوت چندانی نداشته و این در حالی است که در حالت نرمال، این طول نسبت به افزایش  $Q$  و  $Y_t$  کاهش بسیار زیادی داشته است. مشاهدات آزمایشگاهی و تغییرات بستر ترسیم شده در شکل (۵- ه و و) نشان می‌دهد در حالت جام انتهایی بدون دندان، میزان بازشدگی  $33\%$  ( $L=2\text{cm}$ ) نسبت به  $66\%$  ( $L=4\text{cm}$ ) و  $99\%$  ( $L=6\text{cm}$ ) دارای جریانی تیغ‌های بوده و جت خروجی آن دارای عمق حفره و ارتفاع تپه کمتری است ولی با افزایش بازشدگی درجه به میزان  $66\%$  و  $99\%$  جریان با توان پرتاب بیشتری ایجاد شده که پدیده آب‌شستگی با شدت بیشتری را حاصل کرده در نتیجه تغییرات بستر بیشتری را ایجاد می‌کند.

پس از برداشت تغییرات بستر در پایان هر آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Surfer v9.0، تغییرات بستر ایجاد شده ناشی از برخورد جریان ریزشی از سرریز با جام انتهایی ترسیم شد. با محاسبه حجم تغییرات توپوگرافی، می‌توان به تأثیر دندان در میزان کاهش حجم برداشت مصالح ناشی از آب‌شستگی در مقایسه با حالت نرمال در شرایط یکسان پی برد. با افزایش

جدول ۱- متغیرهای در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش

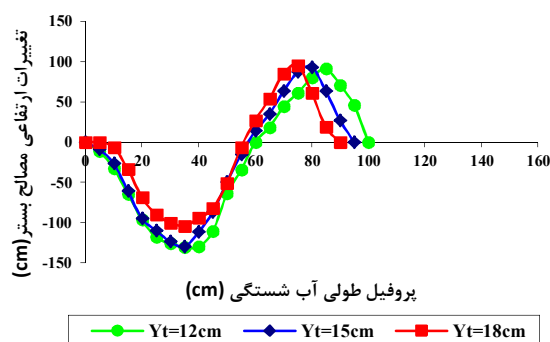
دنداندار	وضعیت جام انتهایی
نرمال (بدون دندان)	
۶-۹۹	
۴-۶۶	میزان بازشدگی درجه (cm-%)
۲-۳۳	
۱۸	
۱۵	عمق پایاب (cm)
۱۲	
۴	
۳/۵	دبی جریان (lit/sec)
۳	

### نتایج و بحث

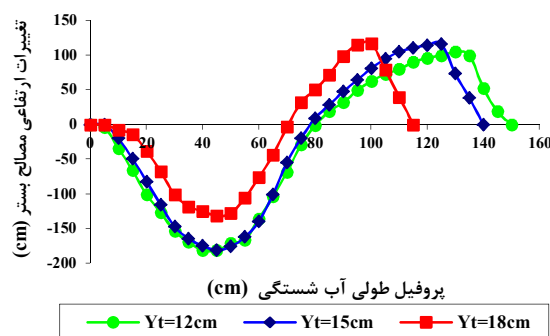
با توجه به تأثیر دبی، عمق پایاب و میزان بازشدگی درجه بر ابعاد حفره آب، در نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، شکل توپوگرافی بستر با تغییر این پارامترها دارای روندی مشابه است. شکل (۵- الف و ب) نشان می‌دهد هرچند با افزایش عمق پایاب ( $Y_t$ ) در هر دو حالت نرمال و دنداندار، عمق حفره آب‌شستگی کاهش و ارتفاع تپه افزایش یافته ولی طول حفره، طول تپه و بنابراین طول مؤثر کلی در حالت نرمال نسبت به دنداندار بیشتر است. براساس شکل (۵- ج و د) با افزایش دبی جریان ( $Q$ )، در حالت نرمال و دنداندار، عمق حفره و ارتفاع تپه افزایش یافته در صورتی که در حالت نرمال، نسبت به حالت دنداندار، طول مؤثر این تغییرات (L) بیشتر است. همچنین با افزایش میزان بازشدگی درجه، با توجه به

بازشدگی ۲ سانتی‌متر (۳۳٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی) بیشتر است ولی برای میزان بازشدگی‌های ۴ سانتی‌متر (۶۶٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی) و ۶ سانتی‌متر (۹۹٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی) وضعیتی عکس را نشان می‌دهد. دلیل این مسئله را چنین می‌توان بیان کرد که برای یک مقدار دی و عمق پایاب ثابت، با میزان بازشدگی کم، عمق جریان کاهش یافته، سرعت جریان ایجاد شده بر روی سرریز افزایش یافته و دندانه موجب تشدید قدرت جت پرتابی بر روی حوضچه رسوب شده که با افزایش میزان بازشدگی دریچه این وضعیت کاهش می‌یابد.

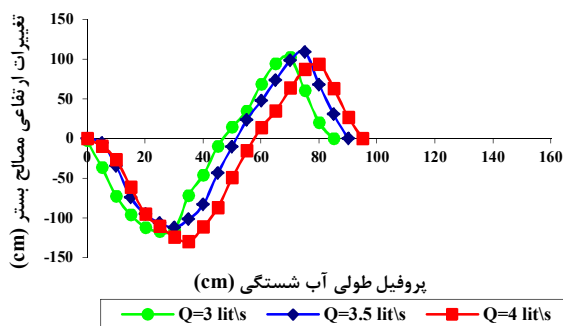
بازشدگی دریچه، تأثیر دندانه بیشتر شده به طوری که جریان ریزشی رها شده از جام را به طرفین پخش می‌کند. هرچند این وضعیت موجب افزایش هرچه بیشتر عرض حفره آب‌شستگی و تپه پایین‌دست آن نسبت به طول مؤثر و عمق آب‌شستگی می‌شود ولی حجم رسوبات برداشت شده در مقایسه با حالت نرمال کمتر می‌شود. در این خصوص میزان تغییرات عمق حفره و ارتفاع تپه براساس میزان بازشدگی‌های مختلف دریچه برای حالت‌های نرمال و دندانه‌دار در جدول ۲ ارائه شده است. براساس جدول ۲ هرچند ابعاد هندسی حفره و تپه پایین‌دست در حالت دندانه‌دار نسبت به نرمال در میزان



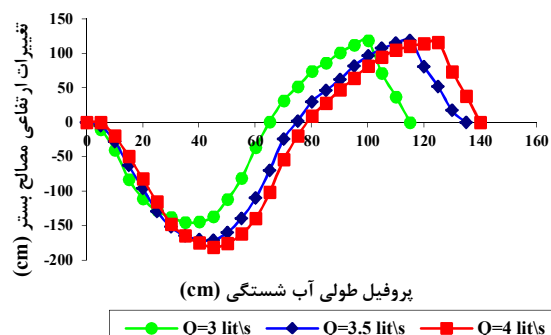
ب- تغییرات ( $Y_t$ ) در شرایط Q و L ثابت در حالت دندانه‌دار



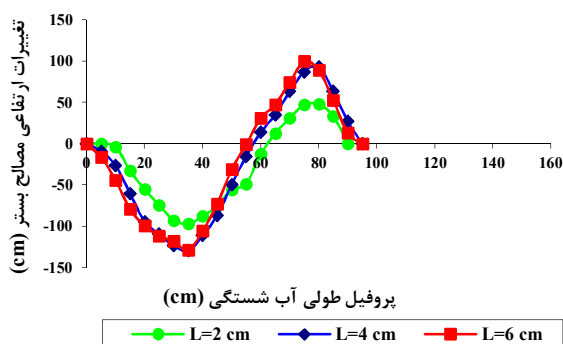
الف- تغییرات ( $Y_t$ ) در شرایط Q و L ثابت در حالت نرمال



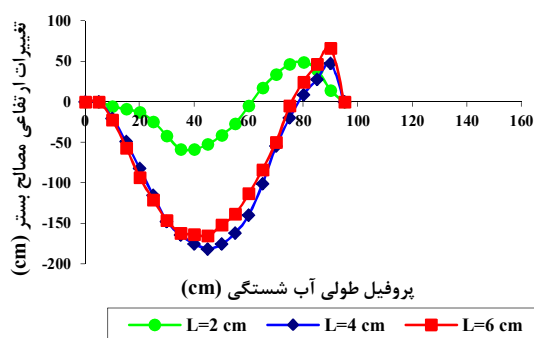
د- تغییرات (Q) در شرایط ( $Y_t$ ) و L ثابت در حالت دندانه‌دار



ج- تغییرات (Q) در شرایط ( $Y_t$ ) و L ثابت در حالت نرمال



و- تغییرات (L) در شرایط ( $Y_t$ ) و Q ثابت در حالت دندانه‌دار



ه- تغییرات (L) در شرایط ( $Y_t$ ) و Q ثابت در حالت نرمال

شکل ۵- تغییرات رقوم ارتفاعی پروفیل طولی آب‌شستگی در شرایط مختلف

جدول ۲- درصد تغییرات عمق حفره ( $h_s$ ) و ارتفاع تپه ( $h_h$ ) و حجم ( $v$ ) برای میزان بازشدگی‌های مختلف دریچه

L(cm-%)	Q(lit/s)	$Y_t$ (cm)	$(\frac{h_{s\text{simple}}}{h_{s\text{slotted}}})\%$	$(\frac{h_{h\text{simple}}}{h_{h\text{slotted}}})\%$	$(\frac{v\text{simple}}{v\text{slotted}})\%$
۲-۳۳	۳	۱۲	-۱۱/۸۷	۴/۰۱	۱۳/۴۲
	۳	۱۵	۷/۷۲	۱/۸۷	-۵/۸۸
	۳	۱۸	۵۶/۶۵	۶۲/۵۳	-۱۹۸/۲۱
	۳/۵	۱۲	۸/۱۹	۲۰/۶۰	-۴۶/۰۱
	۳/۵	۱۵	۴/۲۶	۹/۹۸	-۵۷/۶۱
	۳/۵	۱۸	۱۰۵/۳۳	۱۲۸/۰۳	-۵۰۱/۴۹
	۴	۱۲	-۰/۹۶	۱۳/۴۰	-۲۹/۴۱
	۴	۱۵	۱۱/۰۶	۳۱/۷۶	-۷۱/۴۷
۴-۶۶	۳	۱۲	-۲۵/۰۳	۱/۵۴	-۹۷/۵۷
	۳	۱۵	-۲۳/۶۷	-۹/۷۳	۲۴/۲۲
	۳	۱۸	-۲۴/۵۰	-۱۵/۰۴	۳۵/۴۹
	۳/۵	۱۲	-۲۸/۹۶	۰/۰۱	۴۵/۷۸
	۳/۵	۱۵	-۲۸/۶۰	-۷/۳۴	۴۹/۰۳
	۳/۵	۱۸	-۲۹/۸۲	-۱۳/۶۰	۳۳/۶۷
	۴	۱۲	-۲۹/۰۱	-۷/۰۰	۴۳/۱۴
	۴	۱۵	-۲۶/۹۵	-۱۴/۱۶	۵۰/۵۹
۶-۹۹	۳	۱۲	-۲۱/۹۱	-۲/۱۷۰	۳۳/۸۲
	۳	۱۲	-۱۴/۵۷	-۰/۳۱	۳۰/۷۱
	۳	۱۵	-۲۱/۸۸	-۲/۷۹	۲۱/۶۳
	۳	۱۸	-۹/۷۰	-۰/۸۶	۰/۳۷
	۳/۵	۱۲	-۳۰/۱۸	۱/۸۶	۳۶/۶۵
	۳/۵	۱۵	-۲۰/۷۹	-۶/۶۳	۲۶/۰۹
	۳/۵	۱۸	-۱۳/۲۸	-۰/۹۱	۶/۱۱
	۴	۱۲	-۳۱/۹۲	-۱/۷۰	۳۷/۹۶
	۴	۱۵	-۲۳/۱۳	-۳/۹۹	۲۲/۱۷
	۴	۱۸	-۲۳/۹۶	-۱۱/۵۷	۲۴/۰۲

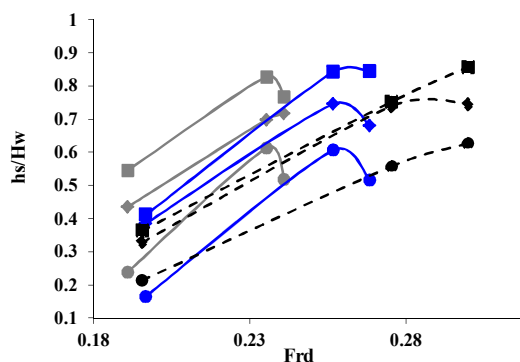
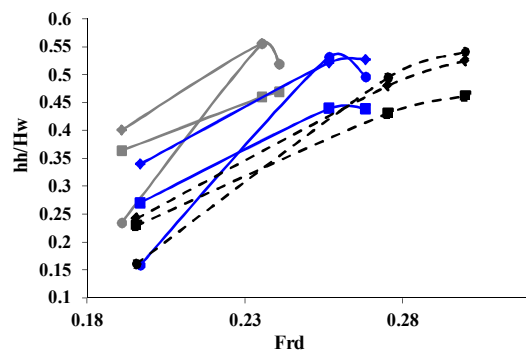
افزایش  $(h_s/H_w)$ ،  $h_s$  افزایش خواهد یافت. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، میزان بازشدگی دریچه (L) بر عمق بالادست تأثیر زیادی دارد، به طوری که از مقدار ۲ سانتی‌متر (معادل ۳۳٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی) تا میزان بازشدگی ۴ سانتی‌متر (معادل ۶۶٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی)،  $H_w$  کاهش یافته پس پارامترهای بی‌بعد  $(h_s/H_w)$  و  $(h_h/H_w)$  با نرخ بیشتری روبه افزایش بوده، در صورتی که از مقدار بازشدگی ۴ سانتی‌متر (معادل ۶۶٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی) تا میزان ۶ سانتی‌متر (معادل ۹۹٪ بازشدگی دریچه نسبت به کل بازشدگی)،  $H_w$  کاهش کمتری داشته بنابراین پارامترهای بی‌بعد  $(h_s/H_w)$  و  $(h_h/H_w)$  کاهش کمتری خواهند داشت. بنابراین شیب تغییرات کاهشی مقدار، برای میزان بازشدگی از ۳۳٪ به ۶۶٪ بیشتر از میزان  $H_w$  بازشدگی ۶۶٪ به ۹۹٪ است. با در نظر گرفتن نسبت تغییرات حفره آب‌شستگی و تپه پایین دست آن در رابطه ۲ فرود

پس از بررسی اثر عامل‌های در نظر گرفته شده در آزمایش‌ها، با استفاده از رابطه‌های بی‌بعد به دست آمده از انجام تحلیل ابعادی روند تغییرات این پارامترها برای تمام حالت‌های آزمایشگاهی بررسی شد. بدین منظور با توجه به رابطه بی‌بعد فرود (رابطه ۲) به دست آمده از انجام تحلیل ابعادی، با افزایش میزان بازشدگی دریچه (L)، میزان عمق آب در بالادست دریچه ( $H_w$ ) کاهش یافته بنابراین عدد بی‌بعد ( $Fr_d$ ) افزایش یافته که با توجه به ثابت بودن مشخصات ذرات رسوبی، این افزایش ناشی از افزایش سرعت جریان بر روی سرریز خواهد بود.

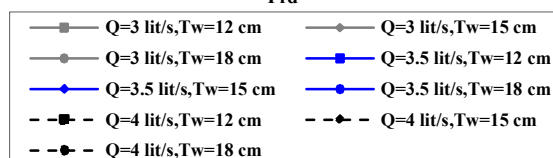
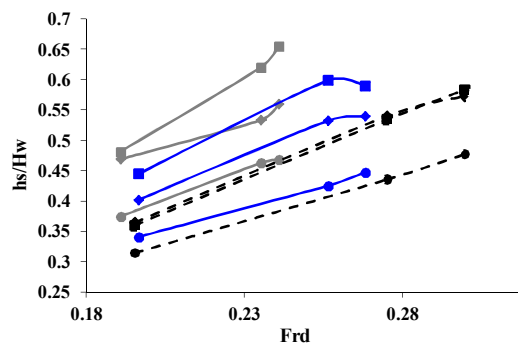
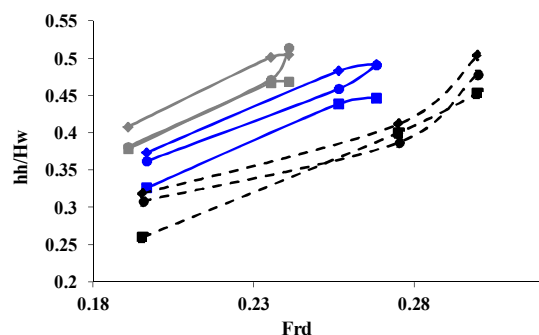
بر اساس شکل ۶ نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نشان می‌دهد، با افزایش عدد بی‌بعد ( $Fr_d$ ) پارامترهای بی‌بعد  $(h_s/H_w)$  و  $(h_h/H_w)$  که مشخصه نسبت عمق آب‌شستگی ( $h_s$ ) به عمق جریان بالادست دریچه ( $H_w$ ) و ارتفاع بالا آمدگی تپه ناشی از تجمع رسوبات در پایین دست حفره ( $h_h$ ) به عمق جریان بالادست دریچه ( $H_w$ ) روندی به نسبت افزایشی خواهد داشت. بنابراین با کاهش ( $H_w$ ) و

(B) و دبی (Q) عدد  $Fr_d$  به تنهایی متأثر از عمق آب بالادست دریچه ( $H_w$ ) بوده که بر روی تغییرات پروفیل بستر مؤثر خواهد بود.

دنسیمتریک ( $Fr_d$ )، نسبت‌های  $h_s$  و  $h_h$  مطابق منحنی‌های ارائه شده در شکل ۶ روندی افزایشی را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به رابطه (۲)، با ثابت بودن  $g$ ،  $d_{50}$  و  $G_s$  مطابق رابطه پیوستگی،  $V = \frac{Q}{(B \times H_w)}$  با ثابت بودن عرض فلوم



(الف)



(ب)

شکل ۶- تأثیر عدد ( $Fr_d$ ) بر تغییرات عمق حفره آب‌شستگی و ارتفاع تپه پایین دست آن در حالت نرمال (بدون دندانه) (الف) و دندانه دار (ب)

آب‌شستگی و تپه پایین دست آن ناشی از تغییرات توپوگرافی بستر بوده که وابسته به داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر محاسباتی به گونه‌ای برازش شده است که مجموع مربعات بین مقادیر مشاهداتی (داده‌های آزمایشگاهی) و محاسباتی به حداقل ممکن برسد. در جدول ۳ رابطه‌های تجربی برای برآورد عمق حفره آب‌شستگی و ارتفاع تپه ارائه شده است.

براساس جدول ۴، دقت رابطه‌های تجربی به دست آمده براساس آزمون‌های آماری سنجیده می‌شود. در این آزمون‌ها، کمینه و بیشینه باقیمانده‌ها به ترتیب بیانگر بیشینه و کمینه

با انجام تجزیه و تحلیل آماری، ارتباط بین پارامترها با استفاده از رگرسیون چند متغیره برآورد شد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌های بی‌بعدی براساس تشابه ابعادی به شکل کلی رابطه (۴)، برای برآورد تغییرات توپوگرافی بستر به دست آمد.

$$\frac{\psi}{H_w} = K \times (Fr_d)^a \times \left(\frac{Y_t}{H_w}\right)^b \times \left(\frac{L}{H_w}\right)^c \quad (4)$$

که در آن نسبت  $\frac{\psi}{H_w}$ ، معرف پارامتر بی‌بعد ابعاد حفره آب‌شستگی و تپه پایین دست در این مطالعه است. ضریب  $K$  و توان‌های  $a$ ،  $b$  و  $c$  بسته به اندازه ابعاد حفره



برای برآورد دقت در تحلیل آماری، خطای کمتر بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی، نشان دهنده نزدیکی مقدار برآورد شده با مقادیر مشاهده‌ای است، که با توجه به جدول ۴ مقادیر خطا به دست آمده نشان دهنده میزان دقت رابطه تجربی به دست آمده است.

اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (به دست آمده از رابطه‌های استخراج شده) است. مقدار کمینه، بیانگر اطمینان بیشتر در برآورد ابعاد تغییرات است. همچنین مقادیر P-value بیانگر مقدار درصد خطایی است که برای رد و یا قبول فرض صفر به کار برده می‌شود. هرچه این مقدار از عدد ۰/۰۵ کمتر باشد، میزان رد شدن فرض صفر (تصادفی بودن ارتباط بین متغیر وابسته و مستقل) را نشان می‌دهد.

جدول ۳- رابطه‌های کلی بین پارامترها در دو حالت جام پرتابی نرمال و دنداندار

حالت دنداندار	حالت نرمال
$\frac{hs}{Hw} = 0.579 \times (Frd)^{-0.230} \times \left(\frac{Y_t}{Hw}\right)^{-0.490} \times \left(\frac{L}{Hw}\right)^{-0.402}$	$\frac{hh}{Hw} = 2.168 \times (Frd)^{-0.516} \times \left(\frac{Y_t}{Hw}\right)^{-0.713} \times \left(\frac{L}{Hw}\right)^{-0.508}$
$\frac{hh}{Hw} = 0.521 \times (Frd)^{-0.259} \times \left(\frac{Y_t}{Hw}\right)^{0.204} \times \left(\frac{L}{Hw}\right)^{0.251}$	$\frac{hh}{Hw} = 1.332 \times (Frd)^{0.327} \times \left(\frac{Y_t}{Hw}\right)^{0.330} \times \left(\frac{L}{Hw}\right)^{0.293}$

جدول ۴- کلیه پارامترهای آماری مورد قبول آزمون جهت تخمین معادلات

تعداد آزمایش (n)	رابطه	درصد خطا		پیشینه باقیمانده‌ها	کمینه باقیمانده‌ها	ضریب تبیین	P-Value (Significance F)
		میانه	-				
۲۷	حفره- نرمال	۱۹/۱۷	-۲۳/۵۳	۱۳/۱۷	۰/۱۶۶۵	-۰/۱۷۳	۲/۳۴ E-۰۹
۲۷	تپه- نرمال	۱۵/۵۵	-۱۹/۸۱	۱۰/۹۷	۰/۰۹۸۵	-۰/۱۴۷۷	۴/۲۶ E-۰۹
۲۷	حفره- دنداندار	۷/۴۶	-۸/۷۲	۶/۲۹	۰/۷۷۲۳	-۰/۰۹۰۴	۱/۶۵ E-۰۹
۲۷	تپه- دنداندار	۴/۸۵	-۴/۸۵	۴/۸۶	۰/۰۴۵۳	-۰/۰۵۳۵	۱/۴۶ E-۱۲

ارتفاع تپه افزایش می‌یابد. در حالت دنداندار، به علت تأثیر دندان روی جام بر افزایش میزان استهلاک جت خروجی، هرچند با افزایش دبی اندازه عمق حفره و ارتفاع تپه زیاد می‌شود ولی این تغییرات نسبت به حالت نرمال کمتر است. با توجه به کاهش ارتفاع آب بالادست دریچه، افزایش میزان بازشدگی دریچه موجب افزایش قدرت جت خروجی می‌شود. نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها نشان می‌دهد، میزان بازشدگی تا اندازه مشخصی مؤثر بوده و پس از آن نقش چندانی در استهلاک انرژی جت ریزشی و میزان کاهش ابعاد آب‌شستگی نخواهد داشت. با کاهش میزان بازشدگی در هر دو حالت نرمال و دنداندار، عمق حفره آب‌شستگی و ارتفاع تپه کاهش می‌یابد، به دلیل اینکه جریان تیغه‌ای تر شده و سرعت و قدرت جت خروجی برای پرتاب افزایش می‌یابد، در نتیجه جت خروجی با طول بیشتری پرتاب شده ولی طول مؤثر کل تغییرات بستر تفاوت چندانی نمی‌کند و این در حالی است که در حالت نرمال، این طول نسبت به افزایش دبی و عمق پایاب، کاهش

### نتیجه‌گیری

به دلیل آنکه هدف اصلی انجام این پژوهش بررسی اثر میزان بازشدگی دریچه و دندان بر تغییرات توپوگرافی بستر با مصالح غیریکنواخت ناشی از جت ریزشی از سرریز با جام انتهایی بود آزمایشاتی براساس دبی و عمق پایاب مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق پایاب ( $Y_t$ ) در هر دو حالت نرمال و دنداندار، استهلاک انرژی بیشتر شده، قدرت جت ریزشی در ایجاد حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد در نتیجه اندازه عمق حفره آب‌شستگی کاهش یافته ولی ارتفاع تپه ناشی از تجمع رسوبات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق پایاب، طول آب‌شستگی در حالت دنداندار به دلیل پخش‌شدگی جریان ریزشی، نسبت به حالت نرمال کمتر بوده ولی عرض حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، طول حفره، طول تپه و در نتیجه طول مؤثر کلی در حالت نرمال نسبت به دنداندار بیشتر است.

افزایش دبی جریان (Q) سبب افزایش قدرت جت خروجی شده بنابراین در هر دو حالت نرمال و دنداندار، عمق حفره و

- کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز. ۱-  
۳.  
۶. محبوبی ا. ۱۳۸۱. تأثیر اندازه ذرات رسوبی بر  
آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی آزاد. کارشناسی‌ارشد،  
دانشگاه علم و صنعت، تهران. ۱۳۰ ص.
7. Amanian N. 1993. Scour Below a Flip Bucket Spillway. Utah State University. Department of Civil and Environmental Engineering. 252 p.
  8. Breusers H. N. C. and Raudkivi A. J. 1991. Scouring Hydraulic Structures Design Manual Series. No 2. Taylor and Francis. p. 116-121.
  9. Bureau Reclamation. 1987. Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication. United States Department of the Interior (USBR). Third Edition. 398-406
  10. Ghodsian M. Melville B. and Tajkarimi D. 2006. Local Scour due to Free Over Fall Jet. Journal of Water Management. WM4. 253-260.
  11. Golzari F. 2004. Effect of Using Dentate Ski Jump Spillways on Scouring Profile. The 2nd International Conference of Scouring and Erosion. Singapore.
  12. Henderson F. M. 1966. Open Channel Flow. Macmillan Company. New York. 523 p.
  13. Juon R. and Hager W. H. 2000. Flip Bucket without and with Deflectors. Journal of Hydraulic Engineering. 126(11): 837-845.
  14. Mason P. J. and Arumugam K. 1985. Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 111(2): 220-235.
  15. Martin R. B. F. 1975. Scouring of Rocky River Beds by Free Jet Spillway. Water Power and Dams Construction. 53 p.
  16. Vischer D. L. and Hager W. H. 1995. Energy Dissipators. Hydraulic Structures Design Manual. No.9. A. A. Balkema. Rotterdam. The Netherlands. 208 p.

زیادی خواهد داشت. اثر دندانه با افزایش میزان بازشدگی و عبور جریان جت به طرفین پس از پرتاب از جام سرریز، عرض حفره و همچنین عرض تپه نسبت به نرمال افزایش می‌یابد. همچنین افزایش میزان بازشدگی به میزان ۳۳٪ (L=2cm) حجم حفره را ۱۲۵/۶۴٪ افزایش، برای میزان بازشدگی ۶۶٪ (L=4cm) حجم حفره را ۴۵/۹۲٪ کاهش و برای میزان بازشدگی ۹۹٪ (L=6cm) حجم حفره را ۲۲/۸۵٪ کاهش می‌دهد. کاهش میزان بازشدگی موجب کاهش پدیده آب شستگی شده اما هنگامی که جریان تیغ‌های شود به علت افتراق بیش از حد جریان به طرفین، نتیجه معکوس داشته که موجب افزایش پدیده آب‌شستگی می‌شود. اثر دندانه روی تاج موجب استهلاک جت خروجی و انتقال جت به طرفین شده در نتیجه در طول و حجم حفره، آب‌شستگی کاهش بیشتری خواهد داشت.

### سپاس‌گزاری

پژوهش با شماره (۶۵۹-۱۶ب) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی- تهران جنوب انجام شده است.

### منابع

۱. آذر ا. ۱۳۸۶. اثر دانه‌بندی مصالح بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک. دانشگاه شهرکرد. ۳-۴.
۲. پرویشی ع. و رضایی ح. ۱۳۸۷. تأثیر زاویه لبه پرتاب سیستم مستهلک‌کننده انرژی از نوع فیلپ باکت روی حفره آب شستگی. مجموعه مقالات سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز. ۲-۴.
۳. پیرستانی م. و شفیعی س. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی تأثیر عمق پایاب بر ابعاد حفره آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی جامی شکل دندانه‌دار. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک. دانشگاه تهران. ۲-۴.
۴. شفاعی بجستان م. ۱۳۹۲. هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم. ۵۴۸ ص.
۵. کسب صالح ع. و رضایی ح. ۱۳۸۸. تأثیر تراز پایاب سیستم مستهلک‌کننده انرژی از نوع فیلپ باکت روی حفره آب‌شستگی. مجموعه مقالات هشتمین