

## بررسی آبی سرریز منحنی پیوند در شرایط قوسی محوری: مطالعه‌ی موردی سد گرمی‌چای

سجاد کیانی<sup>۱\*</sup>، صلاح کوچک‌زاده<sup>۲</sup>، سید احمد حسینی<sup>۳</sup>

### چکیده

سرریز اوجی با مقطع افقی قوسی نسبت به سرریز با تاج خطی، دارای طول تاج بیشتری است؛ از این رو، در یک رقوم معین دریاچه، قادر به تخلیه‌ی بدهی بالاتری نسبت به سرریز مستقیم است؛ به این دلیل، در طرحهایی که استفاده از آنها میسر است، ارجحیت دارد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر انحنای تاج سرریز بر پدیده حفره سازی و خصوصیات آبی جریان در سرریز سد گرمی‌چای می‌باشد. بنابراین، این بررسی در مورد نمونه‌ی فیزیکی سرریز سد گرمی‌چای و ضمایم آن، که در پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، وزارت جهاد کشاورزی ساخته شده بود، صورت گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که به دلیل بالا بودن بارآبی فشار روی بدنه سرریز، عدد حفره سازی سرریز در بده‌های مختلف بالاتر از مقدار بحرانی است. همچنین، داده‌ها نشان دادند که در طول تاج یکسان، ضریب بده این سرریز در حالت آزاد کمتر از ضریب بده در سرریزهای منحنی پیوند با محور مستقیم است.

**واژه‌های کلیدی:** مقطع افقی قوسی، ضریب بده، عدد حفره سازی، بارآبی فشار.

Archive of SID

<sup>۱</sup> - فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> - استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> - استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

\* - نویسنده مسوول مقاله: sajad.kiani508@gmail.com

## مقدمه

برای عبور آبهای اضافی و سیلابها از سراب به پایاب سدها از سازه‌ای به نام سرریز استفاده می‌شود. سرریزها برای منظوره‌های مختلفی ساخته می‌شوند که از جمله مهمترین این ابارآبیاف می‌توان به گذر آبهای اضافی ناشی از سیلاب، عبور دادن جریانهای مازاد بر ظرفیت انتقال نهرهای آبیگیر، بالا آوردن و تثبیت تراز سطح آب برای ورود به نهرهای انحرافی، تعدیل شیب مسیله‌ها به وسیله‌ی احداث متوالی سرریزها و اندازه‌گیری بده اشاره کرد. با توجه به حساس بودن کاری که سرریزها انجام می‌دهند، سرریزها باید از سازه‌ای قوی، مطمئن و با بازدهی بالا احداث شوند که هر لحظه بتوانند برای بهره‌وری آمادگی داشته باشند.

سرریزها را می‌توان بر اساس شکل، به دو گروه عمومی سطحی (منحنی پیوند، جانبی، کنگره‌ای و پلکانی) و زیرسطحی (نیلوفری، شتر گلوبی و آبرو) تقسیم نمود. سرریز مورد مطالعه در این پژوهش، سرریز Ogee با قوس محوری بوده، و به نوعی ترکیبی از سرریزهای منحنی پیوند و نیلوفری (یک سوم سرریز نیلوفری) می‌باشد.

ضرایب طراحی سرریزهای تخلیه منحنی پیوند که در مراجع معیار طراحی در دسترس است مربوط به سرریزهایی است که امتداد آنها عمود بر جهت جریان است. بسیاری از سایتها، طراحی سرریزهای با انحنا در مقطع افقی را پیشنهاد می‌کنند. در چنین شرایطی، توزیع جریان در طول سرریز می‌تواند انحراف قابل توجهی را از فرضیه‌ای که در طراحی در نظر گرفته شده است تجربه کند. این پدیده به نوبه‌ی خود می‌تواند رفتار آبی نهر رسیش، فشار و سرعت جریان روی بدنه سرریز را به شدت تحت تأثیر قرار داده، و احتمال وقوع پدیده حفره‌سازی و تخریب سرریز وجود خواهد داشت. چنین تأثیری اگر در زمان طراحی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار نگرفته و مسائل ناشی از آن حل نشوند، شرایط بهره‌برداری نامطلوبی را ایجاد می‌کند که می‌تواند عملکرد متداول سازه را به مخاطره اندازد.

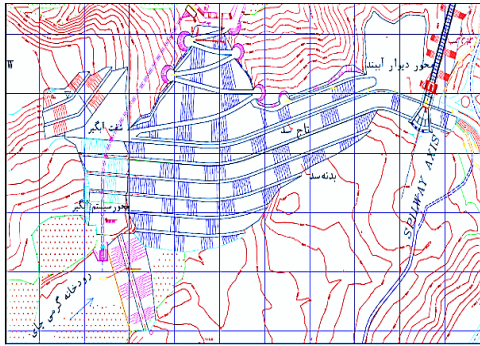
تحقیقات متعددی درباره سرریزهای منحنی پیوند با محور مستقیم گزارش گردیده اند. از جمله بازین (برگرفته از هندرسون ۱۹۶۶) از سال ۱۸۸۶ تا ۱۸۸۸

تحقیقات آزمایشگاهی جامعی را برای تعیین شکل تیغه‌ی آب روی سرریز لبه تیز انجام داد و اولین مطالعه در مورد شکل منحنی پیوند سرریز به وسیله‌ی نامبرده انجام گرفت. آزمایشهای گسترده‌ای به وسیله‌ی USBR (۱۹۷۶) از سال ۱۹۳۲ تا ۱۹۴۸ در مورد نیمرخ تیغه‌ی آب ریزی از سرریز لبه تیز برای شیبهای مختلف دیواره بالادست سرریز انجام گرفت. پس از آن USACE (۱۹۹۰) چندین حالت معیار را برای سرریز منحنی پیوند معرفی کرد. از دهه‌ی ۶۰ به بعد محققین تلاش کردند تا تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته را با روشهای عددی شبیه‌سازی و حل کنند. خسروجردی و همکاران (۱۳۸۰)، مبادرت به شبیه‌سازی میدان جریان عبوری از روی سرریز منحنی پیوند به کمک نرم‌افزار فلونت در شرایط سه‌بعدی کردند و فراسنجهایی را از قبیل ضریب آبگذری، عمق بحرانی و نیمرخ سطح آب را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشها نشان دادند که عامل قوس محوری در جهت بالادست باعث افزایش ضریب آبگذری سرریز می‌شود. سوامی و همکاران (۲۰۱۱)، خصوصیات بدهی جریان را بر روی سرریزهای مورب بررسی کردند. آنها رابطه‌ی جدیدی را برای محاسبه بدهی جریان در این نوع از سرریزها ارائه دادند، بطوری که این رابطه تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. کیانی و همکاران (۱۳۹۲)، با بررسی نمونه‌ی فیزیکی سرریز قوسی سد گرمی‌چای، فراسنجهای مؤثر بر ضریب بدهی این سرریز را مورد بررسی و تحلیل قرار داده، و روابطی را برای محاسبه ضریب بدهی جریان در این سرریز ارائه کردند. با توجه به این که تحقیقات آزمایشگاهی محدودی بر تأثیر انحنا در مقطع افقی سرریز منحنی پیوند صورت گرفته است، در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی پدیده حفره‌سازی و شناختن رفتار آبی جریان در سرریز منحنی پیوند با مقطع افقی قوسی طراحی گشته پرداخته شده است.

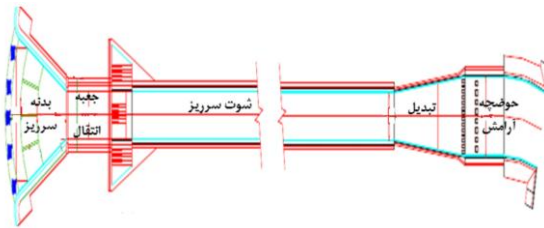
## مواد و روشها

## معرفی سد گرمی‌چای

سد مخزنی گرمی‌چای در استان آذربایجان شرقی، و در فاصله‌ی ۵۳ کیلومتری شمال شرق میانه بر روی رودخانه گرمی‌چای از سرشاخه‌های سفیدرود در حال



شکل ۱- جانمایی بدنه‌ی سد و سازه‌های وابسته



شکل ۲- مقطع افقی سرریز سد گرمی‌چای

### مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی

آزمایشگاه‌های مربوط به این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری تهران انجام گردید. نمونه‌ی آبی با مقیاس ۱:۲۵ شامل نهر ریش، سرریز منحنی پیوند از جنس فایبرگلاس و جعبه‌ی انتقال از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شد. به‌منظور از بین بردن تلاطم آب ورودی و آرام کردن جریان ورودی به سرریز برای برداشت بار آبی در بالادست جریان، یک مخزن به طول ۵ متر، عرض ۴ متر و ارتفاع ۱/۴ متر در بالادست نهر پایه دار آزمایشگاهی احداث شد. انتقال آب از مخزن ذخیره به آبگیر بالادست سرریز و ایجاد سامانه‌ی بسته‌ی بازچرخانی آب با کاربرد چهار تلمبه‌ی گریز از مرکز انجام می‌گرفت. برای اندازه‌گیری بدهی جریان از یک سرریز مستطیلی لبه تیز به عرض ۱۲۰ سانتیمتر با فشردگی جانبی دوطرفه‌ی ۱۲/۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۳ سانتیمتر در پایین دست جعبه انتقال استفاده گردید. سرریز یادشده در جا و با روش حجمی واسنجی شد. نمایی توصیفی از نهر پایه دار آزمایشگاهی ساخته شده، در شکل (۳) نشان داده شده است.

احداث می‌باشد. در شکل (۱) نمایی از سد مزبور و سازه‌های وابسته به آن نشان داده شده است. بدنه‌ی سد از نوع خاکی با هسته‌ی رسی است، که ارتفاع آن از پی سنگی و کف رودخانه به ترتیب ۸۶ و ۶۲ متر می‌باشد. طول تاج سد نیز برابر با ۷۳۰ متر است. حجم مخزن سد گرمی‌چای ۴۰/۳ میلیون مترمکعب، و گنجایش مفید و مرده‌ی آن به ترتیب ۳۳/۵ و ۶/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد، مساحت سطح مخزن در تراز بهنجار برابر با ۱/۸ کیلومترمربع است. هدف از اجرای این سد، ذخیره و تنظیم ۴۶ میلیون مترمکعب از آورد سالانه‌ی رود برای آبیاری ۱۶۰۰ هکتار از اراضی پایاب سد، و همچنین تأمین آب شرب میانه است.

سامانه‌ی تخلیه‌ی سیلاب سد گرمی‌چای، سرریز منحنی پیوند از نوع مقطع افقی قوسی با طول مؤثر ۴۲ متر و ارتفاع ۷ متر می‌باشد. بدهی طراحی سرریز برابر با ۳۳۸ مترمکعب بر ثانیه، معادل نصف بیشترین سیلاب محتمل<sup>۱</sup> می‌باشد. ضخامت تیغه‌ی آب عبوری از لبه‌ی سرریز برای بدهی طراحی، طبق محاسبات نظری ۳ متر خواهد بود. انتهای مسیر منحنی پیوند سرریز به جامی افقی به طول ۲۰/۲۵ متر ختم می‌شود. برای بارآبیایی و انتقال آب از نمونه‌ی فیزیکی سد گرمی‌چای به سمت سرریز سد، از نهر ریش به طول ۳۵/۲۵ متر و عرض متغیر (۱۲۳/۲۵ در ابتدا و ۳۴/۷۵ متر در انتها) استفاده شده است. جریان پس از عبور از جام سرریز وارد جعبه‌ی بتنی به عرض ۹، ارتفاع ۸/۴ و طول ۷۰ متر با شیب ۶ درصد می‌شود. انتهای جعبه مذکور به سرسره به عرض ۹ و طول ۵۰۰ متر با شیب ۶ درصد متصل گردیده است. جریان عبوری از مسیر سرسره وارد تبدیلی به طول ۴۸/۳ متر با شیب متغیر و عرض انتهایی ۲۰ متر شده و به حوضچه آرامش منتهی گردیده است. شکل (۲) نقشه‌ی مسطحه‌ی سرریز سد گرمی‌چای را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Probable Maximum Flood (FMD)

### مبانی نظری

یکی از شاخصهایی که برای تعیین محل احتمال وقوع حفره سازی در سرریزها به کار می‌رود، مقایسه‌ی عددهای حفره سازی جریان و حفره سازی بحرانی می‌باشد که با تعریف عدد حفره سازی  $C_n^1$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. عدد حفره سازی  $C_n$  به صورت ذیل تعریف می‌گردد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۰):

$$C_n = \frac{P_{abs} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

که در آن  $P_{abs}$  فشار مطلق،  $P_v$  فشار بخار آب اشباع،  $\rho$  جرم مخصوص سیال و  $V$  سرعت جریان می‌باشد. به طوری که:

$$P_{abs} = P_{atm} + P \quad (2)$$

$P$  فشار در نقطه‌ی بحرانی،  $P_{atm}$  فشار نیوار (با احتساب اختلاط جوی و اثرات ارتفاع).

هنگامی که عدد حفره سازی از مقدار بحرانی کمتر شود، پدیده حفره سازی اتفاق می‌افتد. این مقدار بحرانی بستگی به شکل هندسی سرریز و شرایط جریان (فشار و سرعت جریان) دارد. مطابق با مطالعات USBR، چنانچه عدد حفره سازی بحرانی بیشتر از ۰/۲۵ باشد پدیده حفره سازی به وجود نمی‌آید، ولی در مناطقی که این نمایه کمتر از ۰/۲۵ باشد، احتمال وقوع حفره سازی بسیار زیاد بوده، و بایستی روشهایی برای جلوگیری از پیدایش آن ابداع گردد. تجربیات اخیر نشان می‌دهند که چنانچه عدد حفره سازی بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ باشد هوادهی<sup>۲</sup> برای جلوگیری از زیانهای احتمالی حفره سازی ضروری به نظر می‌رسد. در صورتی که عدد حفره سازی جریان کمتر از ۰/۱ باشد سرریز باید مجدداً طراحی شود.

از آن جا که محل طرح در ارتفاع تقریبی ۱۲۰۰/۹ متر بالای سطح دریا قرار دارد، لذا فشار معادل در دما محیط، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (وایت، ۲۰۰۱):



شکل ۳- نمای سه بعدی از نمونه‌ی آزمایشگاهی

برای برداشت نیمرخ سطح آب بر روی بدنه سرریز و بار آبی در بالادست سرریز مستطیلی از عمق سنج‌هایی (Point Gage) با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر استفاده شد. همچنین، برای اندازه‌گیری فشار در این نمونه، فشارسنج‌هایی در سرتاسر سرریز از نقطه شروع سرریز منحنی پیوند در محورهای وسط و کناره نصب گردیدند. در قسمت‌های منحنی شکل، و یا به عبارت دیگر مناطقی که تغییرات ناگهانی ارتفاعی و عرضی دارند (تاج و منحنی سرریز) فشارسنج‌هایی با تراکم بیشتر و در مناطق که شکل و شیب یکنواخت (دهانه ورودی جعبه‌ی انتقال) دارند با تراکم کمتر اجرا شدند. تمام فشارسنجها، به لوله‌ی قابل رابط و با اتصال به انتساع نصب شده بر روی تابلوی قرائت، فشار در نقاط فوق برداشت می‌شود. برای پژوهش حاضر، در مجموع از ۶۶ فشارسنج نصب گردیده در بدنه‌ی سرریز و دهانه‌ی ورودی جعبه‌ی انتقال استفاده شد. برای برداشتن رقوم کف سرریز از صفر فشارسنجها عکس تهیه شد، سپس این عکسها در نرم‌افزار Grapher رقومی می‌گردیدند. شکل (۴) محل قرارگیری فشارسنجها را در بدنه‌ی سرریز نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۴- محل‌های نصب فشارسنجها در بدنه‌ی

سرریز

<sup>1</sup> Cavitation Number

<sup>2</sup> Aeration

محاسبه گردیده و با تقسیم بده جریان بر سطح مقطع، سرعت متوسط جریان محاسبه می‌شود.

در این پژوهش، برای افزایش ضریب اطمینان از رخ ندادن پدیده‌ی حفره سازی، بیشترین مقدار سرعت جریان به دست آمده از دو روش بالا را برای محاسبه عدد حفره سازی انتخاب می‌شود.

در این پژوهش برای برداشت نیمرخ سطح آب، فشار وارده بر سرریز و ضریب حفره سازی، آزمایشها با ۶ بدهی مختلف به شرح زیر، انجام گرفتند:

۱. بدهی ۲۱۲/۵ مترمکعب بر ثانیه (۰/۶۳ بدهی طراحی)
  ۲. بدهی ۲۸۱/۲۵ مترمکعب بر ثانیه (۰/۸۳ بدهی طراحی)
  ۳. بدهی ۳۳۸ مترمکعب بر ثانیه (بدهی طراحی)
  ۴. بدهی ۴۰۶/۲۵ مترمکعب بر ثانیه (۱/۲ بدهی طراحی)
  ۵. بدهی ۴۸۴/۴ مترمکعب بر ثانیه (۱/۴۳۵ بدهی طراحی)
  ۶. بدهی آستانه استغراق دهانه ورودی جعبه‌ی انتقال (۵۶۵/۶ مترمکعب بر ثانیه - ۱/۶۷۶ بده طراحی)
- برای محاسبه‌ی ضریب بدهی سرریز منحنی پیوند از رابطه‌ی ارائه شده برای سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز، که به شرح زیر می‌باشد، استفاده شده است:

$$C_d = \frac{q}{\frac{2}{3}\sqrt{2g}H^{\frac{3}{2}}} \quad (۵)$$

$C_d$  ضریب بدهی جریان،  $q$  بدهی عرض واحد و  $H$  بار آبی بالادست سرریز.

### نتایج و بحث

**الف) نیمرخ سطح آب و ضریب بدهی جریان**  
در شکل (۵) تغییرات نیمرخ سطح آب از تاج سرریز تا دهانه‌ی ورودی جعبه‌ی انتقال برای بخش میانی نمونه-ی سرریز نشان داده شده اند (نقاط قرمز رنگ محل قرارگیری فشارسنجهایی میانی است).

$$P_{atm-correct} = P_{atm} \left( 1 - \frac{BZ_{sea}}{T_0} \right)^{\frac{g}{R_0 B}} \quad (۳)$$

این رابطه برای تعیین فشار در منطقه‌ی معروف به تروپوسفر<sup>۱</sup> (هوای بالای سطح زمین نام دارد و ارتفاع آن در حد هزار کیلومتر تخمین زده شده است) تعریف شده که در آن با افزایش ارتفاع از سطح دریا، فشار و دما کاهش می‌یابند. که در آن:

$P_{atm}$ : فشار جو در سطح دریا بر حسب پاسکال (۱۰۱/۳۵ پاسکال)،  $Z_{sea}$ : ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر،  $P_{atm-correct}$ : فشار محیط در ارتفاع مورد نظر،  $T_0$ : دمای معیار در سطح دریا بر حسب کلوین ( $C$ )  $15 = 288/16 K$ ،  $B$ : ضریبی معیاری است که مقدار آن تا ارتفاع ۳۶۰۰ فوت برابر با  $(K/m)$  ۰/۰۶۵ است،  $g$ : شتاب گرانش  $(m/s^2)$  ۹/۸۱ و  $R_0$ : ضریبی ثابتی است برابر با  $(\frac{m^2}{s^2 K})$  ۲۸۷.

بنابراین فشار محیط در ارتفاع مورد نظر برابر با ۸۷/۷۲ کیلو پاسکال خواهد شد. مقدار فشار بخار آب در هر طرح بسته به دما و اختلاف ارتفاع منطقه‌ی رقوم از سطح دریا تعیین می‌شود؛ در نتیجه، در درمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد،  $P_v = ۲/۳۳۷$  کیلو پاسکال می‌باشد.

مطابق با فراسنجهای معادله‌ی (۱)، برای محاسبه‌ی عدد حفره سازی نیاز به سرعت جریان روی بدنه سرریز منحنی پیوند است. در این پژوهش برای اطمینان از درستی سرعت جریان محاسباتی، سرعت روی بدنه سرریز به دو روش تعیین می‌شود:

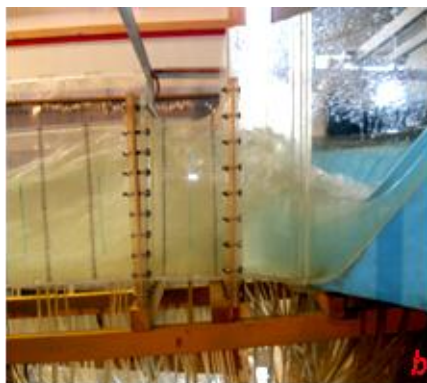
الف) سرعت جریان در بالادست سرریز محاسبه گردیده و با نوشتن معادله‌ی کارمایه کل بین محل قرارگیری فشار سنج و بالادست سرریز بدون در نظر گرفتن افت کارمایه در نهر ریش و سرریز منحنی پیوند، سرعت متوسط در محل مورد نظر محاسبه می‌شود:

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (۴)$$

$E$ : کارمایه کل،  $Z$ : اختلاف ارتفاع نقطه‌ی مورد نظر از سطح مبنا.

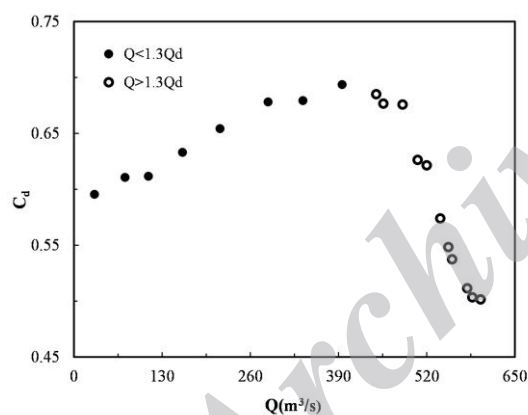
ب) عمق جریان در محل قرارگیری فراسنج با کاربرد عمق سنج برداشت شده، سپس سطح مقطع جریان

<sup>1</sup> Troposphere



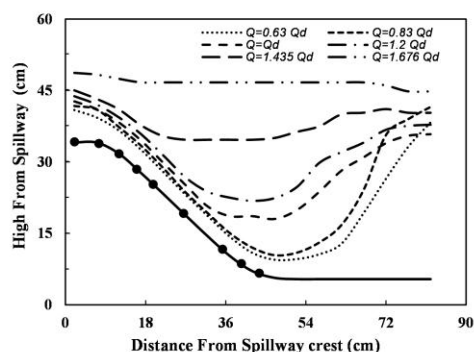
شکل ۶- نمایشی از پرش آبی دم‌خروسی (a) و مستغرق (b)

به دلیل تفاوت در ماهیت پرش آبی در بده‌های کمتر و بیشتر از بده طراحی، ضریب بدهی جریان در بده‌های کمتر از  $1/3$  بدهی طراحی با افزایش بده روند صعودی داشته اما در بده‌های بالاتر، استغراق پایین دست سرریز بر بار آبی بالادست سرریز تأثیرگذار بوده، و باعث کاهش ضریب تخلیه می‌شود. نمودار ضریب بدهی به دست آمده از بده‌های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- تغییرات ضریب بدهی سرریز منحنی پیوند

در شکل (۸) مقایسه‌ای بین ضریب بده نمونه‌ی سرریز سد گرمی‌چای با سرریز در شرایط محور مستقیم تحت طول مؤثر و بدهی طراحی یکسان (تحت شرایط آزاد) صورت گرفته است. ضریب بدهی سرریز در شرایط محور مستقیم با سعی و خطا بر اساس نمودارهای معرفی شده به وسیله‌ی USBR به دست آمده است.



شکل ۵- نیمرخ سطح آب در نمونه‌ی سرریز

از شکل (۵) استنباط می‌شود که در بده‌های کمتر از بده طراحی، پرش آبی در پنجه‌ی سرریز رخ می‌دهد، و در بده‌های بیشتر از آن، به دلیل کمتر بودن کارمایه از مقدار کارمایه کمینه‌ی لازم برای عبور از دهانه ورودی، جعبه‌ی انتقال، پرش آبی به شکل مستغرق اتفاق افتاده، و قبل از رسیدن به دهانه‌ی ورودی مجرا به اتمام می‌رسد. در بده‌های پایین به دلیل همگرایی سرریز، خطوط جریان در پنجه‌ی سرریز تداخل داشته و باعث تشکیل پرش آبی به صورت دم‌خروسی<sup>۱</sup> می‌گردد، به طوری که کارمایه جنبشی جریان به کارمایه توانی تبدیل می‌شود (پاگلیارا و همکاران، ۲۰۱۱، رین‌آور و هگر ۱۹۹۴). در شکل (۶) نمایشی از پرش آبی دم‌خروسی و مستغرق نشان داده شده است.



<sup>1</sup> Rooster tail



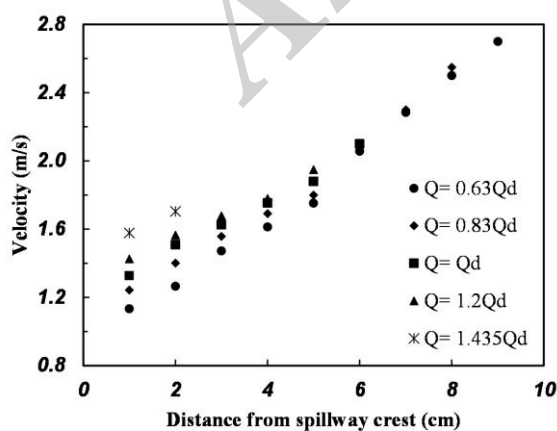
پنجه سرریز (فشارسنج ۱۰)، فشار کاهش یافته است، این امر نشان‌دهنده‌ی تأثیر ملموس نیروی گریز از مرکز در انحناى کاو شکل در پنجه‌ی سرریز می‌باشد (به‌خصوص قسمت انتهایی سرریز) بطوری که نیروی گریز از مرکز در جهت نیروی گرانش عمل کرده و فشار در هر نقطه از فشار ایستایی بیشتر است. مقدار افزایش فشار حاصل از نیروی گریز از مرکز در معادله‌ی (۶) نشان داده شده است (چو، ۱۹۵۹). در بده‌های بیشتر از بده‌ی طراحی (در حالت مستغرق)، علاوه بر تأثیر نیروی گریز، مستغرق شدن بخشی از بدنه سرریز نیز باعث افزایش فشار شده است.

$$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{correct} = \left(\frac{P}{\gamma}\right) + \frac{h V^2}{g R} \quad (6)$$

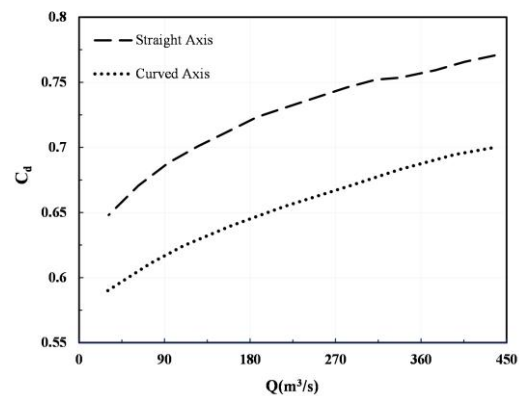
$h$ : عمق جریان و  $R$  شعاع انحنا کف سرسره.

از مقایسه نیمرخ سطح آب (شکل ۵) با فشار اندازه‌گیری شده از پنجه‌ی سرریز تا ابتدای دهانه‌ی ورودی جعبه‌ی انتقال، نتیجه گرفته می‌شود که بارآبی فشار به دلیل وجود هوا در داخل جریان، کمتر از عمق جریان است. همچنین، به دلیل جدا شدن نیمرخ زیرین سطح آب ریزشی از تاج سرریز در بده‌های بیشتر از بده‌ی طراحی، بار فشار در فشارسنجهایی ۱ و ۲ با افزایش بده کاهش می‌یابد (در حالت عدم استغراق).

ج) تغییرات سرعت جریان در سرریز منحنی پیوند در شکل (۱۰) تغییرات سرعت جریان (در مقیاس نمونه) برای فشارسنجهایی مستغرق نگشته، در بده‌های مختلف آورده شده‌اند.



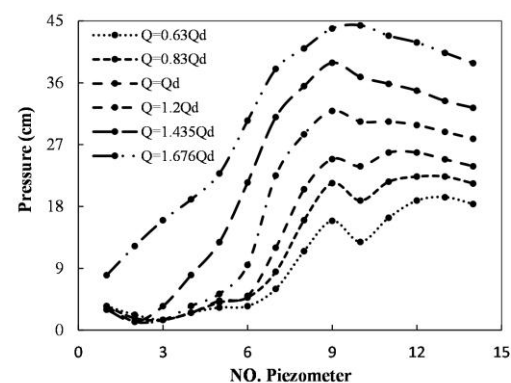
شکل ۱۰- تغییرات سرعت جریان در نمونه سرریز



شکل ۸- مقایسه‌ی ضریب بده سرریز در شرایط مختلف محور سرریز

ب) تغییرات فشار

شکل (۹)، روند تغییرات بار فشار را (در مقیاس نمونه) در فشارسنجهایی میانی نشان می‌دهد. موقعیت و شماره‌ی فشارسنجهایی میانی در شکل (۴) نشان داده شده است (به دلیل یکنواختی تغییرات بار فشار در فشارسنجهایی که در یک راستا قرار دارند، فقط فشارسنجهایی که شماره‌گذاری شده‌اند مورد تحلیل قرار گرفته‌اند).

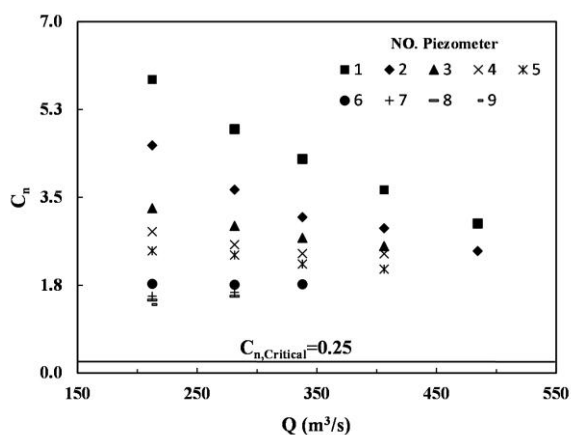


شکل ۹- تغییرات بار فشار در قسمت میانی نمونه‌ی سرریز

با توجه به تغییرات بار فشار از شکل (۹) استنباط می‌شود که:

در بده‌های کمتر از بده‌ی طراحی، با افزایش بده‌ی جریان، بار فشار روی بدنه سرریز منحنی پیوند افزایش می‌یابد، به نحوی که بار فشار تا پنجه‌ی سرریز سیر صعودی داشته است، سپس در اولین فشارسنج بعد از

سرعت به وسیله‌ی معادله‌ی کارمایه وجود داشته، نشان داده شده است.



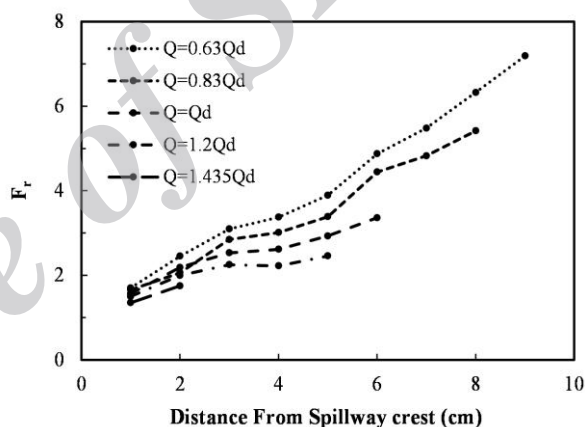
شکل ۱۲- مقایسه مقادیر نمایه حفره سازی نسبت به حد بحرانی

با توجه به شکل (۱۲) مقادیر نمایه حفره سازی برای بده‌های مختلف از حد بحرانی ( $C_n=0.25$ ) بزرگتر بوده و احتمال تشکیل پدیده‌ی خلا‌زایی در بدنه سرریز وجود ندارد.

### نتیجه‌گیری

همان‌گونه که اشاره شد، حفره سازی یک پدیده‌ی شایع و درعین حال مخرب برای سازه‌های آبی، از جمله سرریز سدها به شمار می‌آید. این پدیده پایداری سازه‌ی سرریز را تهدید کرده و گاهی زیانهای جبران‌ناپذیری را به سازه وارد می‌کند. به‌منظور ممانعت از وقوع این پدیده بایستی از کاهش فشار آب در طول سرریز تا حد فشار بخار آب جلوگیری به عمل آید. نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که به دلیل به زیر آب رفتن سرریز در بده‌های بالا، فشار روی بدنه‌ی سرریز افزایش یافته، در نتیجه با فاصله گرفتن از فشار نیواری، نمایه‌ی حفره سازی بازا تمامی بده‌ها، بزرگتر از مقدار بحرانی می‌باشد. از طرفی، نتایج نشان دادند که ضریب بده‌ی سرریز سد گرمی چای (در شرایط قوسی) همانند سرریزهای غیرخطی، به دلیل تداخل خطوط جریان و افزایش افت کارمایه، کمتر از سرریزهای محور مستقیم است. همچنین با استغراق سرریز، ضریب بده‌ی سرریز روند کاهشی دارد.

با توجه به شکل (۱۰)، سرعت جریان از تاج تا پنجه‌ی سرریز روند صعودی داشته، و با افزایش بده مقدار آن افزایش می‌یابد. همچنین در شکل (۱۱)، تغییرات عدد فرود جریان در راستای محور طولی سرریز برای مقاطعی از سرریز که مستغرق نگردیده آورده شده‌اند. مطابق با این شکل، عدد فرود جریان تا قبل از مستغرق شدن سرریز به صورت فوق بحرانی بوده بطوری که روند صعودی در راستای محور طولی سرریز دارد. همچنین، با افزایش بده‌ی جریان، مقدار عدد فرود کاهش یافته است، که این مطلب بیانگر آن است که نرخ رشد عمق جریان نسبت به سرعت آن بیشتر بوده است. قابل ذکر است که، در مقطعی که بدنه‌ی سرریز مستغرق گردیده (شکل ۵)، وضعیت جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌کند.



شکل ۱۱- تغییرات عدد فرود جریان در امتداد محور طولی نمونه‌ی سرریز

### (د) عدد حفره سازی

همان‌طور که اشاره شد، برای ارزیابی وقوع حفره-سازی از فراسنج عدد حفره سازی ( $C_n$ ) که بنا بر تعریف معادل نسبت فشار مطلق به فشار آب پویایی می‌باشد استفاده می‌شود. بر این اساس نمایه‌ی حفره سازی با استفاده از فشارهای اندازه‌گیری شده و سرعت جریان محاسباتی در هر بده به دست آمده و با عدد حفره سازی بحرانی مقایسه گردیده تا احتمال وقوع حفره سازی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در شکل (۱۲)، نمایه‌ی حفره سازی برای فشارسنجهایی که مستغرق نگردیده و امکان محاسبه‌ی



## منابع

۱. خسروجردی، ا. م. کاویانپور، ا. شمسایی، و ع. دائمی، ۱۳۸۰. بررسی آبی سرریزهای لبه پهن و اثر قوس محوری. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.
۲. شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۰. نمونه‌های فیزیکی و آبی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۳۲۸ ص.
۳. کیانی، س. ص. کوچک‌زاده، و ا. حسینی، ۱۳۹۲. اثر انحناى سرریز تخلیه بر ضریب بده و رفتار آبی نهر رَسِش: مطالعه موردی سد گرمی چای. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. (در دست چاپ).
۴. نیک صفت، غ. ۱۳۸۰. نظری و کاربرد نمونه‌های هیدرولیک در طراحی سازه‌های آبی. کمیته ملی سدهای بزرگ ایران. نشریه شماره ۴۱. ۴۰۳ ص.
5. Chow, V. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company. New York, 680p.
6. Henderson, F.M. 1966. Open channel flow. Macmillan Publishing Co. New York, 513p.
7. Pagliara, S, S. Kurdistani, and T. Roshni. 2011. Rooster tail wave hydraulics of chutes. J. Hydraul. Eng. 137: 1085-1088
8. Reinauer, R, and W. Hager, 1994. Supercritical flow behind chute piers. J. Hydraul. Eng. 120:1292-1308.
9. Swamee, P.K., Shekhar, C.H. and M. Talib. 2011. Discharge characteristics of skew weirs. J. Hydraul. Res, 49: 818-820.
10. U.S. Army Corps of Engineers, 1990. Engineering and design: hydraulic design of spillways. Washington D.C.
11. U.S. Bureau of Reclamation. 1976. Design of gravity Dams. Water resources technical publication. Colorado. 553p.
12. White, F.M. 2001. Fluid mechanics. McGraw-Hill Book Company, New York, 768p.