

## بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی و کانال پایین دست در شرایط قوس محوری

طاهره عشرتی<sup>1</sup> - رامین فضل اولی<sup>2\*</sup> - مجتبی صانعی<sup>3</sup> - علیرضا عمادی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1392/08/01

تاریخ پذیرش: 1394/03/04

### چکیده

سرریزها یکی از سازه‌های متداول برای تخلیه و اندازه‌گیری جریان می‌باشند. به همین جهت این نوع سازه‌های هیدرولیکی بسته به هدف از استفاده، دارای اشکال مختلفی هستند. در برخی از موارد به دلیل محدودیت‌های اجرایی، سرریزهای بانحن در پلان ساخته می‌شوند. در چنین شرایطی مطالعه توزیع جریان در طول سرریز و دیگر پارامترهای مربوط به آن، حائز اهمیت خواهد بود. در این پژوهش یک مدل فیزیکی از سرریز سد که از نوع اوجی آزاد با پلان قوسی است، مورد آزمایش قرار گرفت. هم‌چنین به منظور بررسی اثر انحنا بر عملکرد جریان، مدل دوم سرریز در شکل نرمال و با شرایط هندسی و هیدرولیکی مشابه، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مربوط به مدل اول نشان داد که با افزایش نسبت هد جریان به هد طراحی ضریب دبی سرریز تا مقدار 1/72 افزایش یافته و پس از آن استغراق سرریز رخ داده و ضریب دبی تا مقدار 1/23 کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش سرعت در هر دبی و کاهش فشار در طول سرریز، امکان خلأزایی و خوردگی سازه افزایش و ضریب خوردگی که معرف آن شاخص خلأزایی می‌باشد، کاهش یافت. بررسی نتایج مربوط به کارایی سرریز نشان داد برای مدل سرریز در شکل نرمال، استغراق سریع‌تر و به ازای مقادیر دبی یکسان با سرریز قوسی، مقدار ضریب دبی برای سرریز در شکل نرمال، کمتر خواهد بود. در این پژوهش میزان تأثیر افزایش ضریب دبی در سرریز با قوس محوری در مقایسه با سرریز با تاج مستقیم و در شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه، برابر 21 درصد محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: انحنا، سرریز، خلأزایی، سرریز اوجی، ضریب دبی، همگرایی جریان

### مقدمه

محدودیت‌های اجرایی و طراحی، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای، سرریزهای جانبی و هم‌چنین سرریزهای قوسی در پلان اجتناب‌ناپذیر است. در چنین شرایطی توزیع جریان در طول سرریز می‌تواند انحراف قابل توجهی از فرض‌هایی که در طراحی در نظر گرفته شده‌است، بوجود آورد. چنین تأثیری اگر در زمان طراحی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار نگیرد و مسائل ناشی از آن حل نشود شرایط بهره‌برداری نامطلوبی ایجاد می‌کند که می‌تواند عملکرد متداول سازه را به مخاطره اندازد. از این‌رو نادیده گرفتن مسئله و عدم پرداخت به آن در زمان طراحی می‌تواند هزینه‌های هنگفت اصلاح شرایط جریان را در زمان بهره‌برداری تحمیل کند.

معمول‌ترین و در عین حال ارزان‌ترین سرریز که بتواند مقدار زیادی آب را از روی خود عبور دهد، سرریز آبریز یا همان سرریز اوجی است. هم‌چنین از این نوع سرریز در سدهای انحرافی به منظور بالا آوردن سطح آب و انحراف آن به مزرعه استفاده می‌شود. این سرریزها براساس محاسبات هیدرولیکی مربوط به سرریزهای با تاج مدور به گونه‌ای طراحی می‌شوند که نیمرخ تاج و جلو ساختمان آن‌ها منطبق بر سطح زیرین آب لبریز شده از یک سرریز لبه‌تیز مستطیلی با همان

هنگامی که ارتفاع سطح آب دریاچه‌ی پشت سد به حداکثر مقدار خود برسد و در همین زمان سیل دیگری اتفاق بیفتد، بایستی وسیله‌ای در سد تعبیه شده باشد که بتواند این آب اضافی را از دریاچه سد خارج کند. ساختمان هیدرولیکی را که بدین منظور، یعنی دفع آب اضافی به کار می‌رود سرریز می‌نامند؛ به عبارت دیگر یکی از کاربردهای مهم سرریزها، کنترل ارتفاع و حجم آب دریاچه‌ی پشت سد است که در این حالت شکل و ابعاد سرریز تابعی از موقعیت جغرافیایی و هیدرولوژیکی منطقه خواهد بود. علاوه بر این در شبکه‌های آبیاری از سرریزها برای کنترل سطح آب و اندازه‌گیری شدت جریان استفاده می‌شود. در برخی از موارد به دلیل

1، 2 و 4 - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
\* - نویسنده مسئول: (Email: raminfazl@yahoo.com)  
3 - دانشیار سازه‌های آبی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آب خیزداری، تهران، ایران

پارامترهای محاسبه شده از مدل عددی بر اساس داده‌های به‌دست آمده از یک مدل فیزیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج مربوط به نیمرخ سرعت نشان داد که مقدار حداکثر سرعت در وجه میانی سرریز رخ داده و این ناحیه با کاهش ارتفاع سرریز در دبی ثابت، به سمت بالادست و با کاهش دبی در ارتفاع ثابت سرریز به سمت پایین دست حرکت می‌کند. شیخ کاظمی و صانعی (13) به مطالعه تأثیر کانال نزدیک شونده در ضریب دبی سرریز اوجی با قوس محوری و دیواره‌های همگرا پرداختند. آزمایش‌ها روی مدل فیزیکی سرریز گرمی‌چای میانه و در مقیاس 1:75 انجام شد. نتایج به‌طور کلی نشان داد با افزایش عرض کانال نزدیک شونده به میزان 52 درصد، 11 درصد از عمق جریان روی تاج کاهش و ضریب دبی 22 درصد افزایش خواهد داشت. خسروچردی (5)، سرریزهای لبه‌پهن را در حالت مستقیم و قوس‌دار مورد مطالعه قرار داد. در این پژوهش نشان داده شد که عامل قوس محوری علاوه بر پایداری سازه‌ای در جهت بالادست، باعث افزایش ضریب دبی سرریز می‌شود. خسروچردی و مهرچردی (6) طی پژوهشی میدان جریان عبوری از روی سرریز اوجی را به کمک نرم‌افزار فلونتت در شرایط سه‌بعدی برای دو حالت محور مستقیم و محور قوس‌دار شبیه‌سازی نمودند. براساس نتایج به‌دست آمده ضریب دبی و فشار استاتیکی و سرعت جریان در محدوده‌ی مقطع اوجی مربوط به انحنای سرریز به سمت بالادست نسبت به حالت‌های انحنای محور سرریز به سمت پایین دست و امتداد مستقیم دارای مقدار بیش‌تری می‌باشد. فرودی و همکاران (3) یک مطالعه روی مدل فیزیکی سرریز سد گرمی‌چای میانه که از نوع اوجی آزاد با دیواره‌های متقارب می‌باشد، در مقیاس 1:50 انجام دادند. آزمایش‌ها به‌ازای 8 دبی شامل مقادیر 25 تا 150 درصد دبی طراحی انجام شد. نتایج به‌طور کلی نشان داد با افزایش دبی، نیمرخ فشار در طول تاج در حال کاهش و در طول شوت افزایش دارد. هم‌چنین عملکرد سرریز در دبی کوچکتر از 1/13 برابر دبی طراحی مناسب بوده و برای دبی‌های بزرگتر استغراق و کاهش کارایی آن اتفاق می‌افتد. مقایسه پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد به‌طور کلی بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی در شکل قوس‌دار و به‌طور خاص سرریز با دیواره‌های جانبی همگرا، کم‌تر صورت گرفته است. هم‌چنین در مطالعات انجام شده تمرکز کار بیشتر روی نتایج مدل عددی بوده و مقایسه نتایج آزمایشگاهی موجود نیست. بنابراین هدف از تحقیق حاضر مطالعه اثر انحنا و همگرایی جریان بر عملکرد هیدرولیکی سرریز در شرایط قوس محوری می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

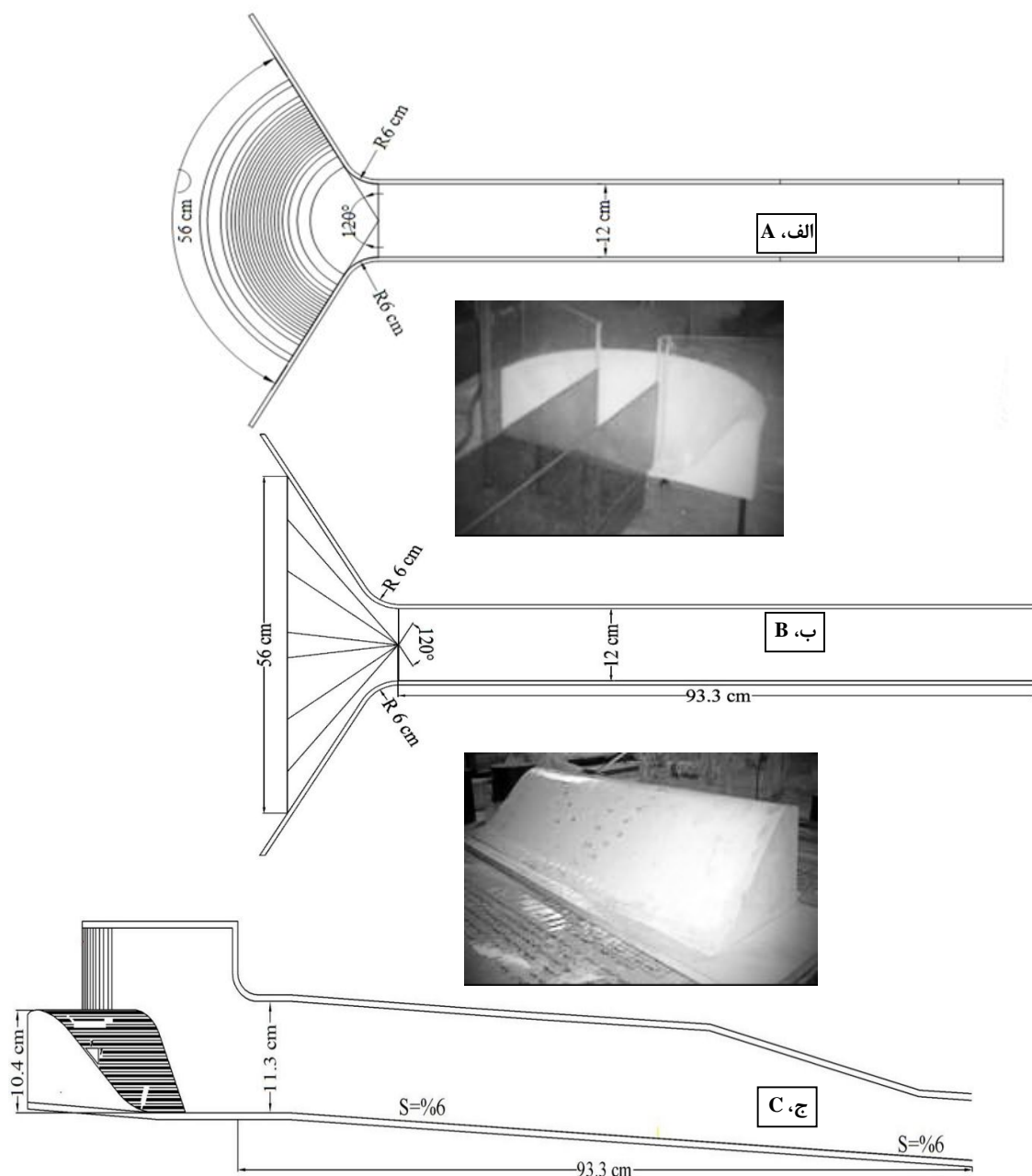
مدل مورد مطالعه، مدل فیزیکی سرریز سد گرمی‌چای در شهرستان میانه می‌باشد که در مقیاس 1:75 طراحی و ساخته و در

مشخصات مورد نیاز در بالادست سرریز اصلی باشد (11). رفتار جریانبر روی سرریزها به‌طورگسترده‌ای در اوایل 1950 توسط سازمان مهندسين ارتش آمریکا (USACE<sup>1</sup>) و مطالعه تجربی گسترده‌ای در طراحی هیدرولیک سرریزها در سال 1977 توسط سازمان عمران و آبادانی آمریکا (USBR<sup>2</sup>) انجام شد (15 و 16). برادلی (1)، چهار نوع مشخص برای جریان روی سرریز با نیمرخ اوجی را تعریف نمود. جریان نوع 1، یک جریان سریع فوق بحرانی روی سرریز؛ نوع 2، یک پرش هیدرولیکی ثابت روی سرریز؛ نوع 3، یک پرش مستغرق و نوع 4 استغراق سرریز را توصیف می‌کند. سویچ و جانسون (12) یک مطالعه برای مقایسه پارامترهای جریان در یک سرریز اوجی استاندارد بدون در نظر گرفتن پایاب، با استفاده از مدل فیزیکی، مدل ریاضی و سوابق پژوهشی موجود (9) (USACE) USBR 1977/1987, Maynard 1985 انجام دادند. در نهایت یک هماهنگی قابل قبول بین مدل‌های فیزیکی و عددی مشاهده شد. جانسون و سویچ (4) به مقایسه عددی و فیزیکی جریانروی سرریز اوجی با در نظر گرفتن پایاب پرداختند و اطلاعات به‌دست آمده از دو مدل فیزیکی را با نتایج حاصل از بررسی عددی دو سرریز اوجی مقایسه کردند. در این پژوهش نیمرخ سطح آب و ضرایب دبی برای مدل آزمایشگاهی با دقت 1/5 تا 2/9 درصد، وابسته به هد آب موجود روی سرریز، پیش‌بینی شد. تولیس و نیلسون (14) عملکرد سرریز اوجی مستغرق و روابط دبی‌اشل آن را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق چهار رابطه برای جریان مستغرق و یک رابطه برای جریان آزاد با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و به‌منظور پیش‌بینی تراز آب در بالادست در شرایط استغراق، مورد ارزیابی قرار گرفت. از نتایج این تحقیق می‌توان به این مطلب اشاره کرد که برای درجه استغراق‌های کم‌تر از 0/8، داده‌های دبی‌اشل در حالت مستغرق با استفاده از رابطه‌ی دبی‌اشل در حالت آزاد به بهترین حالت پیش‌بینی می‌شود. کومار و همکاران (7) به مطالعه ویژگی‌های دبی سرریز لبه-تیز در شرایط قوس محوری به‌سمت بالادست پرداختند. در این پژوهش یک معادله کلی برای این نوع سرریز وابسته به زاویه رأس و نسبت هد موجود به ارتفاع سرریز ارائه شد. نتایج به‌طور کلی نشان داد که راندمان سرریز با افزایش نسبت هد موجود به ارتفاع سرریز، به دلیل تداخل امواج عرضی ناشی از همگرایی جریان در مقادیر بزرگ‌تر دبی، کاهش می‌یابد. هم‌چنین برای سرریز با زاویه رأس 90 درجه، یک افزایش 40 درصدی در دبی جریان روی سرریز، در مقایسه با شکل نرمال سرریز اتفاق می‌افتد. مورالس و همکاران (10) به بررسی عملکرد سرریز اوجی یک سد انحرافی و نیمرخ سرعت و جریان روی آن با استفاده از مدل سه‌بعدی CFD پرداختند.

1- U.S. Army Corp of Engineers  
2- U.S. Bureau of Reclamation

11/3 سانتی‌متر و عرض 12 سانتی‌متر با شیب 6 درصد می‌شود. ابتدای کانال به طول 6/5 سانتی‌متر به صورت افقی می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از اثر پایاب در عملکرد سرریز، جریان پس از عبور از کانال وارد فلومی به طول 4 متر، عرض و ارتفاع 0/6 متر می‌شود.

پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری جهاد کشاورزی مورد آزمایش قرار گرفت. مدل سرریز از نوع اوجی آزاد با پلان قوسی با طول مؤثر 56 سانتی‌متر و ارتفاع 10/4 سانتی‌متر است که در انتهای مسیر اوجی، جریان وارد کانالی به طول 93 سانتی‌متر، ارتفاع



شکل 1- مدل‌های مورد آزمایش - الف. پلان سرریز اوجی همگرا و کانال پایین‌دست در شکل صاف، ج. مقطع طولی مدل‌های مورد مطالعه

Figure 1- Test models- A. Plan of Converge ogee spillway and downstream canal, B. Plan of Converge ogee spillway and downstream canal in straight shape, C. Longitudinal sections of the studied models

فلزی مشبک انباشته از مصالح درشت‌دانه استفاده شد. در شکل 2 نمایی از مدل‌های مورد آزمایش نشان داده شد.

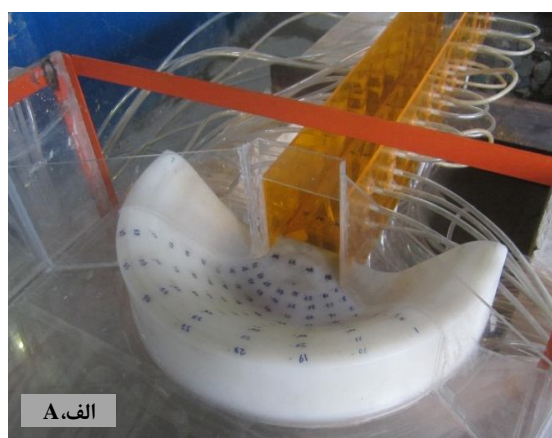
برای بررسی تغییرات فشار و کنترل وقوع خلأزایی، نیاز به اطلاعاتی نظیر ارتفاع جریان، سرعت متوسط و فشار وارده بر کف در قسمت‌های مختلف سازه می‌باشد. برای این منظور تعداد ده مقطع در طول مدل اول، برای اندازه‌گیری پارامترهای مذکور در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع جریان، قرائت عمق سنج در شش قطاع روی بدنه سرریز به زوایای 7/5، 37/5، 52/5، 67/5، 97/5 و 112/5 درجه و برای ده نقطه در هر قطاع، با مختصات مشخص، انجام شد. برای اندازه‌گیری توزیع فشار پیزومترهایی در همین نقاط تعبیه شده که فشار استاتیک را نشان می‌دهد. اولین قطاع در زاویه 7/5 درجه از جناحین، برای جلوگیری از تأثیر دیواره‌ها انتخاب شد. برای رفع خطای ناشی از نوسانات سطح آب در نواحی آشفتنه جریان، مقادیر میانگین در قرائت نیمرخ سطح آب و ارتفاع فشار ثبت شد. برای محاسبه ضریب دبی، ارتفاع جریان در بالادست سرریز در فاصله افقی 4 برابر هد طراحی از آن، برای جلوگیری از اثر انحنای تاج، اندازه‌گیری شد. برای بررسی خلأزایی که یکی از عوامل مهم در ایجاد اختلال در عملکرد هیدرولیکی سرریزهاست می‌توان از معیاری به نام شاخص خلأزایی - فالوی (1990) - استفاده کرد (2). بر اساس این تعریف شاخص خلأزایی به‌عنوان نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب به پتانسیلکاهش فشار جریان از طریق انرژی جنبشی، به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma = \frac{P-P_v}{\rho V^2/2} \quad (1)$$

از آنجا که از اهداف پژوهش، بررسی اثر انحنای سرریز اوجی در عملکرد جریان می‌باشد، یک مدل آزمایشگاهی از سرریز در شکل نرمال و شرایط هندسی و هیدرولیکی مشابه با مدل فیزیکی، مورد مقایسه قرار گرفت. مدل اول سرریز (سرریز قوس‌دار)، با استفاده از مصالح ضدآب (پلیمری با نام تجاری تفلون) و مدل دوم (سرریز نرمال)، از جنس پلاستیک فشرده (پی.وی.سی) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. طراحی سرریزها براساس استاندارد فنی USBR (16)، برای عمق طراحی معادل 4 سانتی‌متر در مدل و وجه قائم در بالادست انجام شده است. در شکل 1، الف و ب پلان سرریزها و در ج، مقطع طولی سرریزها نشان داده شد. همچنین تصویری از هر مدل، در ذیل پلان سرریزهای مورد آزمایش آورده شد.

همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود بدنه سرریز دارای قوس 120 درجه در محور عرضی خود می‌باشد که برای همگرایی جریان روی آن از دیواره‌های با زاویه 60 درجه در جناحین استفاده شد. لازم به ذکر است در مدل دوم با داشتن طول تاج سرریز اصلی و زاویه همگرایی برابر، شرایط هندسی مشابه به‌منظور مقایسه عملکرد جریان ایجاد شد.

آزمایش‌ها در مخزنی به طول 1/2 متر، عرض 0/7 متر و ارتفاع 0/50 متر از جنس دیواره‌های شفاف (پلکسی‌گلاس) انجام شد. به دلیل اینکه جریان در ورودی مخزن دارای یک سطح ناآرام می‌باشد، چندین آرام‌کننده در ابتدای مخزن سرریز برای آرام کردن جریان تعبیه شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی لبه‌تیز با زاویه رأس 90 درجه در قسمت خروجی کانال استفاده شد که برای آرام کردن جریان ریزشی از سرریز در فلوم پایین دست نیز از یک سبد



شکل 2- نمایی از مدل‌های مورد آزمایش - الف. مدل قوس‌دار، ب. مدل در شکل نرمال  
Figure 2- View of the test models- A. Converge model, B. Model in normal shape

عمق طراحی ( $t/H_d$ ) و به صورت یک مقدار میانگین از ارتفاع فشار در هر قطاع، محاسبه شد. حداقل ارتفاع فشار محاسبه شده در مقایسه با دبی‌های مورد آزمایش در نسبت  $0/28$  از  $y_c/H_d=0/53$  ( $h/H_d=0/53$ ) و برابر  $0/4$  سانتی‌متر ارتفاع آب محاسبه شد. برای شرایط استغراق سرریز ( $0/81$ )  $y_c/H_d=0/81$  و  $h/H_d=1/44$ ، حداقل فشار در ایستگاه اول از هر قطاع و روی تاج سرریز ( $t/H_d=6/36$ )، مشاهده شد.

اندیس خلاءزایی ( $\sigma$ ) با جای‌گذاری مقادیر فشار مطلق در محل آزمایش ( $P$ )، فشار بخار مایع در دمای محیط ( $P_v$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho$ ) و سرعت متوسط جریان ( $V$ ) در رابطه 1 به دست می‌آید. با در نظر گرفتن آب 10 درجه در محاسبات، مقادیر فشار بخار و جرم مخصوص آب به ترتیب برابر  $1/23$  کیلوپاسکال و  $999/7$  کیلوگرم بر مترمکعب خواهد شد (8). فشار مطلق از جمع جبری فشار اتمسفر در محل آزمایش و فشار نسبی اندازه‌گیری شده و سرعت جریان از تقسیم مقدار دبی در واحد عرض در هر مقطع بر عمق جریان در هر ایستگاه اندازه‌گیری به دست می‌آید. با جای‌گذاری مقادیر عددی مذکور در هر مقطع اندازه‌گیری، مقدار شاخص خلاءزایی در آن مقطع محاسبه می‌شود. در شکل 8 تغییرات این شاخص به ازای مقادیر  $h/H_d \leq 1/08$  ( $y_c/H_d \leq 0/72$ ) نشان داده شد.

همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، برای مقادیر بزرگ‌تر از نسبت  $h/H_d$  و با افزایش عمق جریان روی تاج سرریز، مقدار شاخص خلاءزایی روی تاج افزایش و با افزایش سرعت و کاهش فشار در هر دبی و در امتداد طولی سرریز، مقدار آن کاهش می‌یابد. براساس ضوابط طراحی برای پیشگیری از خسارات خلاءزایی، مقدار بحرانی شاخص خلاءزایی که برای مقادیر کوچک‌تر از آن نیاز به اصلاح طراحی می‌باشد، برابر  $0/25$  پیشنهاد شده است. محاسبات مربوط به شاخص خلاءزایی نشان داد که مقدار شاخص خلاءزایی برای دبی‌های مورد آزمایش، در همه مقاطع بزرگ‌تر از مقدار بحرانی آن می‌باشد. کم‌ترین مقدار این شاخص برای نسبت  $0/28$   $y_c/H_d=0/53$  ( $h/H_d=0/53$ )، در مقطع انتهایی سرریز (ایستگاه دهم و در نسبت  $1/9$  از  $t/H_d$ ) برابر  $1/45$  و به صورت یک مقدار میانگین در مقطع محاسبه شد. برای مقادیر  $0/44$  و  $0/58$  از نسبت  $y_c/H_d=0/90$  ( $h/H_d=0/74$ )، حداقل شاخص خلاءزایی در مقطع انتهایی شوت سرریز با شیب 1:1 (ایستگاه ششم در هر قطاع در نسبت  $3/9$  از  $t/H_d$ ) و برای دبی طراحی ( $0/72$ )  $y_c/H_d=0/72$ ،  $h/H_d=1/08$ )، در ایستگاه پنجم از هر قطاع و در نسبت  $4/4$  از  $t/H_d$ ، مشاهده شد. هم‌چنین مقدار حداکثر سرعت به صورت میانگین در هر مقطع نیز برای مقاطع مذکور مشاهده شد. مقادیر محاسبه‌ای حداقل شاخص خلاءزایی، حداقل فشار و حداکثر سرعت در این مقاطع برای نسبت‌های مورد آزمایش  $h/H_d$ ، در جدول 1 ارائه شد:

که در آن  $P$  فشار مطلق در محل آزمایش،  $P_v$  فشار بخار مایع در دمای محیط،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $V$  سرعت جریان و  $\sigma$  شاخص خلاءزایی (ضریب خوردگی) است. فالوی (2) به این نکته اساسی اشاره می‌کند که لزوماً حداکثر دبی، حداقل عدد خلاءزایی را منجر نمی‌شود و بنابراین کم‌ترین عدد خلاءزایی باید برای تمام شرایط محاسبه گردد (8).

اندازه‌گیری‌ها در مدل اول به‌ازای پنج دبی شامل مقادیر  $2/1$ ،  $4/1$ ،  $6/2$ ،  $8/6$  و  $10/3$  لیتر بر ثانیه (نسبت عمق بحرانی به عمق طراحی شامل مقادیر  $0/28$ ،  $0/44$ ،  $0/58$ ،  $0/72$  و  $0/81$ ) انجام شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی اثر انحنا، عملکرد جریان در دو مدل برای شش دبی  $3/1$ ،  $5/1$ ،  $7/6$ ،  $9/2$ ،  $9/6$  و  $10/6$  لیتر بر ثانیه (نسبت عمق بحرانی به عمق طراحی شامل مقادیر  $0/36$ ،  $0/51$ ،  $0/66$ ،  $0/76$ ،  $0/78$  و  $0/83$ )، مورد مقایسه قرار گرفت.

## نتایج و بحث

براساس مشاهدات آزمایش در مقادیر  $0/28$  و  $0/44$  از نسبت عمق بحرانی به عمق طراحی ( $y_c/H_d$ )  $0/53$  و  $0/74$  ( $h/H_d=0/74$ )، یک جریان سریع فوق‌بحرانی به شکل پیوسته روی بدنه سرریز جریان دارد که در این شرایط به‌دلیل همگرایی جریان، در پایین‌دست پرش دم خروسی<sup>1</sup> اتفاق می‌افتد (شکل 3). در مقادیر  $0/58$  و  $0/66$   $y_c/H_d=0/66$  ( $0/90$  و  $h/H_d=1/08$ )، یک جریان فوق‌بحرانی روی سرریز و یک پرش هیدرولیکی ثابت که روی بدنه سرریز تشکیل می‌شود، مشاهده شد (شکل 4). با افزایش دبی محل وقوع پرش هیدرولیکی روی تنداب سرریز و در جهت بالادست حرکت می‌کند. برای  $0/81$   $y_c/H_d=0/81$  ( $h/H_d=1/44$ )، جت جریان روی سرریز شکسته شده و سرریز در این حالت در یک درجه استغراق بالا قرار دارد که در این شرایط جریان در ورودی کانال به دام افتاده و به اصطلاح به‌وسیله پیشانی سرریز مسدود شده و مقطع پایین‌دست به شکل یک روزنه عمل می‌کند (شکل 5). شرایط جریان به‌ازای دبی‌های مورد آزمایش - جریان فوق‌بحرانی روی سرریز و پرش هیدرولیکی روی بدنه تا استغراق کامل - را می‌توان براساس تعریف برادلی (1)، به چهار نوع مختلف جریان روی سرریز اوجی طبقه‌بندی کرد. در شکل 6 مقایسه نیمرخ‌های سطح آب برای این شرایط نشان داده شد.

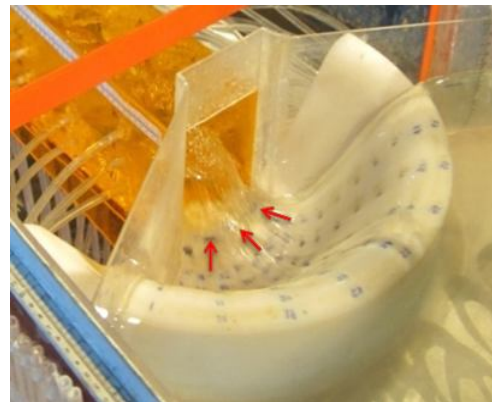
در شکل 7 توزیع فشار روی سرریز برای این شرایط و براساس موقعیت مقاطع اندازه‌گیری در امتداد محور طولی سرریز نشان داده شد. براساس اندازه‌گیری‌های مربوط به فشار استاتیک، حداقل فشار در هر دبی تا قبل از استغراق سرریز، در مقطع انتهایی نیمرخ اوجی (ایستگاه سوم از هر قطاع)، در نسبت  $5/4$  از شعاع مرکزی کمان به

1- Rooster Tail



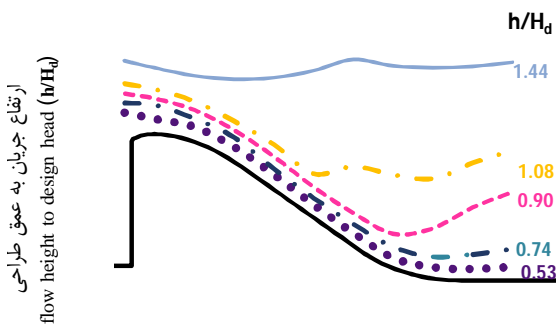
شکل 4- تشکیل پرش هیدرولیکی در پای سرریز

Figure 4- Formation of hydraulic jump at the end of spillway



شکل 3- تشکیل پرش دم خروسی در پایین دست سرریز

Figure 3- Formation of rooster tail in downstream of spillway



فاصله از تاج سرریز به عمق طراحی  
Distance from the crest of the spillway to design head (X/H<sub>d</sub>)

شکل 6- مقایسه نیمرخ سطح آب به ازای دبی های مختلف

Figure 6- Comparison of water surface profile for different discharges



شکل 5- استغراق سرریز

Figure 5- Submergence of spillway

جدول 1- نتایج مربوط به میانگین حداقل فشار، حداکثر سرعت و حداقل شاخص خلأزایی روی سرریز

Table 1- Results of the average minimum pressure, maximum velocity and minimum of Cavitation Index on spillway

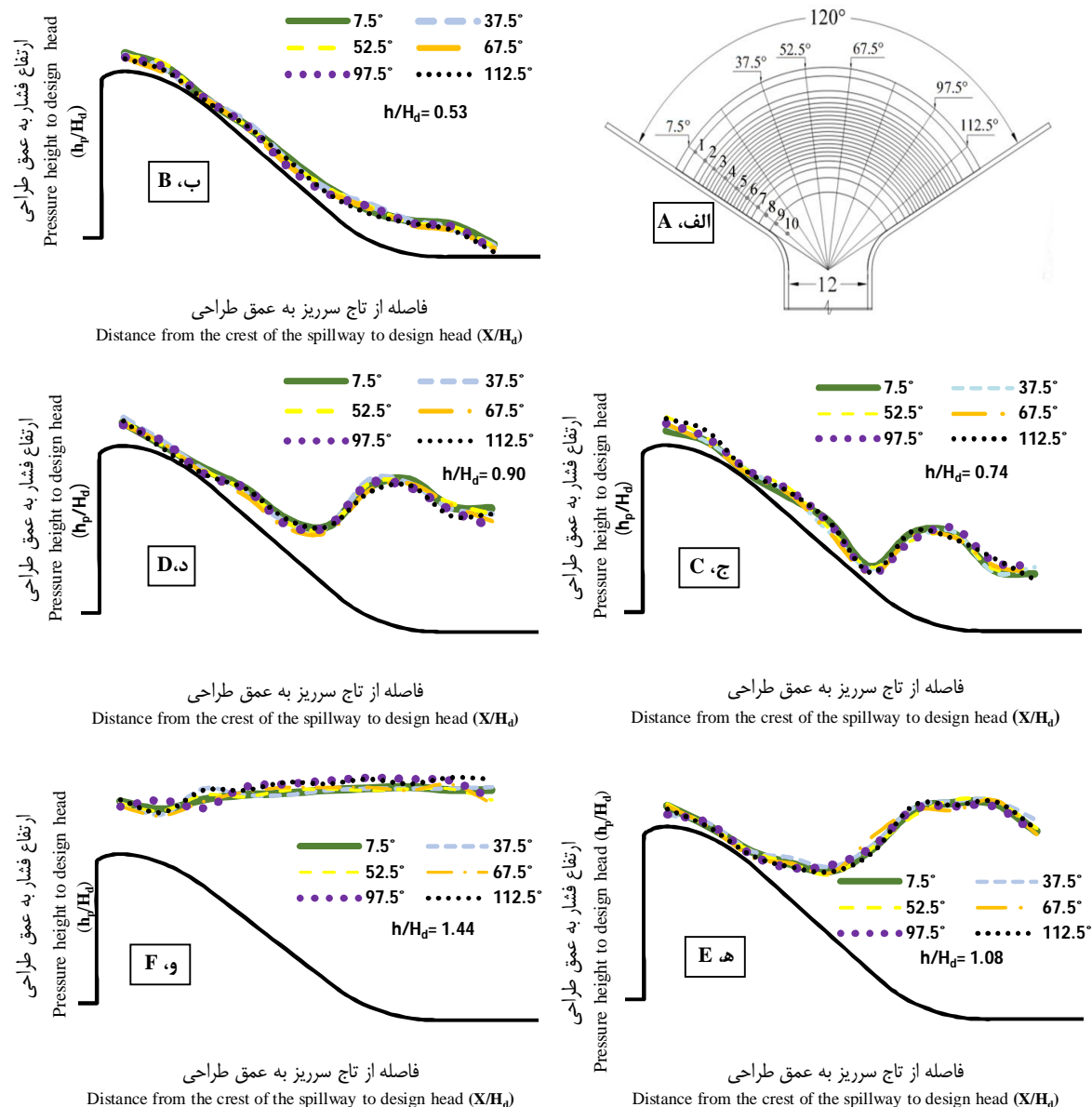
عمق جریان به هد طراحی Flow depth to design head (h/H <sub>d</sub> )	میانگین حداقل فشار Average min Pressure (cm)	میانگین حداکثر سرعت Average max. velocity (m/s)	حداقل شاخص خلأزایی Min of Cavitation Index
0.53	0.37	1.30	1.45
0.74	0.50	1.18	1.71
0.90	0.52	1.10	2.35
1.08	0.54	1.06	2.58

در مدل دوم جریان سریع فوق بحرانی روی بدنه سرریز و پرش هیدرولیکی در پایین دست برای مقادیر 0/28، 0/36 و 0/44 از  $y_0/H_d$  اتفاق می افتد. از دیگر مواردی که در مدل اول نیز دیده شد، افزایش عمق جریان در کناره دیواره ها بود، با این تفاوت که در مدل اول افزایش عمق در سراسر دیواره با اختلاف ثابت از نیمرخ اصلی جریان داشت ولی در مدل دوم نیمرخ سطح آب نشان داد عمق جریان در

برای مدل سرریز در شکل نرمال مانند مدل اول یک جریان سریع فوق بحرانی روی بدنه سرریز و یک پرش هیدرولیکی در پایین دست و در نهایت استغراق سرریز اتفاق می افتد با این تفاوت که در مدل دوم پرش روی بدنه سرریز ثابت نبوده و یک شکل نوسانی دارد. از طرفی مقادیر ارتفاع جریان روی سرریز به ازای دبی متناظر بیشتر و استغراق سرریز و کاهش کارایی آن نیز سریع تر اتفاق می افتد. در واقع

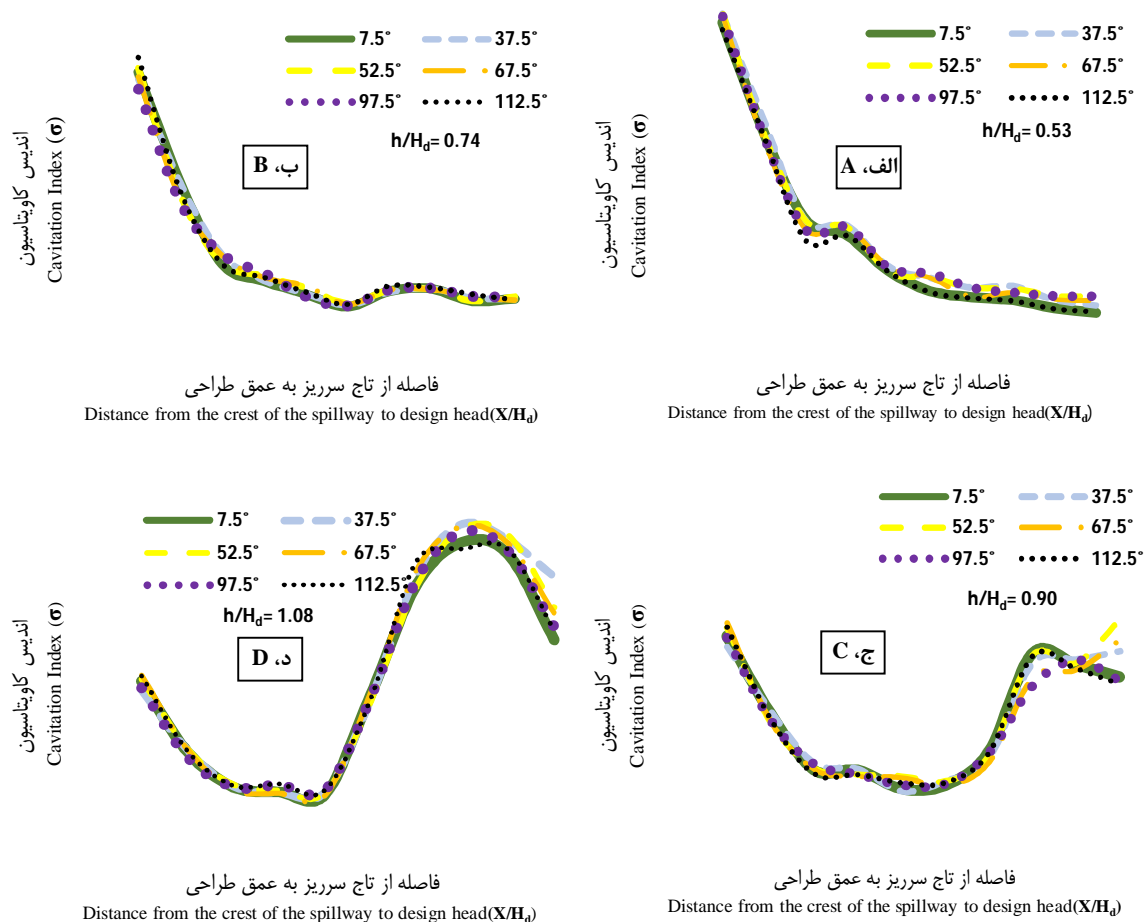
کناره دیواره در ابتدای بخش همگرا کمی افزایش یافته و با رسیدن

جریان به پایین دست به سرعت افزایش می یابد.



شکل 7- مقادیر فشار استاتیکی بی بعد شده روی سرریز در محورهای مختلف - الف. موقعیت مقاطع اندازه گیری در امتداد محور طولی سرریز، ب. تا و. توزیع فشار روی سرریز به ازای مقادیر مورد آزمایش از عمق جریان روی سرریز به عمق طراحی

Figure 7- Non dimensioned value of static pressure on spillway in different Axes- A. The position of measured sections along the longitudinal axis of spillway, B. to F. Pressure distribution on spillway for tested values of flow depth over spillway into the depth of design head



شکل 8- مقادیر شاخص خلأزایی روی سرریز در محورهای مختلف - الف. تا د. تغییرات شاخص خلأزایی روی سرریز به ازای مقادیر مورد آزمایش از عمق جریان روی سرریز به عمق طراحی

Figure 8- Value of Cavitation Index on spillway in different Axes- A. to D. Changes of Cavitation Index on spillway for tested values of flow depth over spillway into the depth of design head

### تغییرات ضریب دبی

از آن جا که نیمرخ سرریزهای اوجی با استفاده از منحنی سطح زیرین آب جاری از روی سرریز لبه تیز مستطیلی به دست می آید، می توان برای تعیین دبی و ضریب آن از معادله دبی سرریزهای لبه تیز مستطیلی به شکل رابطه زیر استفاده کرد.

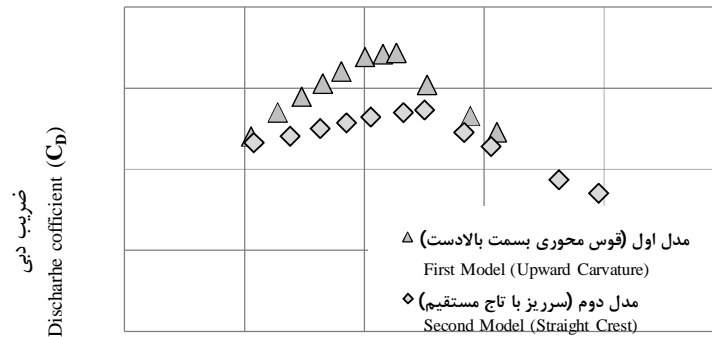
$$Q = C_D L_e H^{1.5} \quad (2)$$

که در آن Q دبی سرریز بر حسب مترمکعب بر ثانیه، C<sub>D</sub> ضریب سرریز، L<sub>e</sub> طول مؤثر سرریز بر حسب متر و H عمق جریان در بالادست سرریز بر حسب متر می باشد. همان طور که در شکل 1 مشاهده شد، طول مؤثر سرریز برابر 0/56 متر بوده که با جای گذاری مقادیر دبی و هد جریان در رابطه 1، ضریب دبی برای هر آزمایش

در واقع به نظر می رسد جریان در کناره دیواره با یک اختلاف در زاویه مسیر جریان به دیواره برخورد کرده و به مسیر اصلی بازمی گردد که در اثر برخورد جریان برگشتی به جریان عبوری از روی سرریز افزایش عمق بیشتری اتفاق می افتد، چنانچه مشاهده می شود برای دبی های بزرگتر (مقادیر 0/51، 0/58، 0/66 و 0/72 از y/H<sub>d</sub>)، بالادستی جریان در کناره دیواره و در انتهای بخش همگرا با پرش هیدرولیکی ادغام می شود. برای مقادیر 0/76، 0/78، 0/81 و 0/83 از y/H<sub>d</sub> مدل دوم به شکل مستغرق درآمده و کارایی آن کاهش می یابد در صورتی که در مدل اول استغراق سرریز در 0/81 و 0/83 از y/H<sub>d</sub> مشاهده شد.



محاسبه خواهد شد. شکل 9 تغییرات این ضریب را نشان می‌دهد.



نسبت عمق آب روی سرریز به عمق طراحی  
Ratio of flow depth on spillway to design head ( $h/H_d$ )

شکل 9- تغییرات ضریب دبی سرریز در مقابل نسبت عمق آب روی سرریز به عمق طراحی

Figure 9- Changes of discharge coefficient versus ratio of depth over spillway into the depth of design head

بدنه سرریز، انجام شد. نتایج مربوط به توزیع فشار و تغییرات شاخص خلاءزایی در مدل اول نشان داد، حداقل ارتفاع فشار در هر دبی در مقطع انتهایی اوجی سرریز و حداقل مقدار شاخص خلاءزایی در مقطع انتهایی پایین دست و برای  $h/H_d=0/53$  اتفاق می‌افتد. همچنین برای دبی‌های مورد آزمایش در این پژوهش، حداکثر سرعت و حداقل شاخص خلاءزایی برای هر دبی در مقاطع یکسان و در مقطع وقوع پرش هیدرولیکی محاسبه می‌شود. از طرفی مشاهده شد که با افزایش دبی، مقطع بحرانی مذکور در جهت بالادست و روی بدنه سرریز، حرکت می‌کند. همچنین با افزایش سرعت در هر دبی و کاهش فشار در طول سرریز، مقدار شاخص خلاءزایی کاهش و احتمال خوردگی افزایش می‌یابد. حداقل مقدار محاسبه شده برای اندیس خلاءزایی برابر  $1/45$  بوده که این مقدار بزرگ‌تر از مقدار بحرانی آن می‌باشد. به منظور بررسی اثر انحنا، عملکرد جریان و تغییرات ضریب سرریز برای پنج دبی اولیه (نسبت عمق بحرانی به عمق طراحی شامل مقادیر  $0/28, 0/44, 0/58, 0/72$  و  $0/81$ ) و شش دبی دیگر (نسبت مذکور شامل مقادیر  $0/36, 0/51, 0/66, 0/76, 0/78$  و  $0/83$ ) در هر دو مدل، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مربوط به کارایی سرریز، به طور کلی نشان داد که با افزایش نسبت عمق بحرانی به عمق طراحی ( $y_c/H_d$ ) ضریب سرریز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش نسبت  $h/H_d$  و افزایش دبی تا دبی طراحی میزان تخلیه بیشتر و کارایی سرریز در هر دو مدل بالا می‌رود. برای دبی‌های بزرگ‌تر، جریان توسط پیشانی سرریز مسدود شده و کاهش کارایی سرریز به دلیل استغراق و پس‌زدگی جریان اتفاق می‌افتد. نتایج به دست آمده از مقایسه دو مدل نشان می‌دهد که برای سرریز در شکل نرمال و با شرایط هندسی و هیدرولیکی مشابه، استغراق سریع‌تر و ضریب دبی

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود به طور کلی با افزایش نسبت  $h/H_d$ ، افزایش ضریب دبی و پس از آن استغراق سرریز و کاهش ضریب مقدار اتفاق می‌افتد ولی در مدل دوم به‌ازای مقادیر قبلی دبی، عمق جریان بیشتری روی سرریز قرائت شده است که این عامل سبب می‌شود ضریب دبی به‌طور میانگین مقادیر کمتری نسبت به مدل اول داشته باشد و استغراق سرریز سریع‌تر اتفاق بیافتد. همچنین برای مدل دوم ضریب دبی در دبی‌های قبل از استغراق یک افت مشخصی از مقادیر متناظر با دبی در مدل اول دارد ضمن اینکه عمق جریان بیشتر روی سرریز باعث ایجاد یک فاصله در محور افقی بین مقادیر دو گراف شده است. در واقع با توجه به اینکه در مقادیر کوچک‌تر از نسبت  $h/H_d$  همگرایی جریان روی بالادست تأثیری ندارد، به نظر می‌رسد اثر انحنای بالادست سرریز در جهت افزایش ضریب دبی و کارایی سرریز عمل می‌کند، چنانچه با برداشتن انحنا و ایجاد شرایط یکسان در مدل دوم نسبت به مدل اول کاهش ضریب و استغراق در دبی‌های کمتر مشاهده می‌شود.

### نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر عملکرد هیدرولیکی سرریز با نیم‌رخ اوجی و پلان قوسی به منظور بررسی توزیع فشار و احتمال خلاءزایی و به‌طور خاص نتایج مربوط به عملکرد جریان و اثر انحنای سرریز بر کارایی آن، با استفاده از دو مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها در مدل اول برای پنج دبی و پنج مقدار از نسبت  $h/H_d$  شامل مقادیر  $0/53, 0/74, 0/90, 1/08$  و  $1/44$  و در شش قطاع روی

قوس محوری به سمت بالادست باعث افزایش ضریب دبی و کارایی سرریز می‌شود. میزان تأثیر افزایش ضریب دبی برای سرریز با قوس محوری در مقایسه با سرریز با تاج مستقیم و در شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه در این پژوهش، برابر 21 درصد محاسبه شد.

به‌ازای دبی‌های برابر مقدار کمتری به‌دست می‌دهد. به طوری که افزایش ضریب در سرریز قوسی تا مقدار 0/81 از نسبت  $y_0/H_d$  (در دبی 10/3 لیتر بر ثانیه) و در سرریز صاف تا مقدار 0/72 از  $y_0/H_d$  (در دبی 9/2 لیتر بر ثانیه) اتفاق می‌افتد. بنابراین به نظر می‌رسد که عامل

## منابع

- 1- Bradley J.N. 1945. Studies of Flow Characteristics, Discharge and Pressures Relative to Submerged Dams. Hydraulic Laboratory Rep. No. 182, Denver.
- 2- Falvey H.T. 1990. Cavitation in Chutes and Spillways. USBR Engrg. Monograph, No.42, Denver, Colorado, USA, 160 p.
- 3- Froudi A. Saneie M., and Moghadam M.A. 2014. Experimental Study on Hydraulic Performance in Ogee Spillway with Arc Angle and Converge Walls. Journal of Experimental Research in Civil Engineering, 1 (2): 81-88.(in Persian with English Abstract)
- 4- Johnson M.C., and Savage B.M. 2006. Physical and Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater. Journal of Hydraulic Engineering, 132(12): 1353-1357.
- 5- Khosrojerdi A. 1997. Study on Discharge Coefficient of Broad-Crested Weirs with Axial Arch Using Hydraulic Model. Master's Thesis of Irrigation Facilities. Islamic Azad University, Science & Research. 125 p. (In Persian)
- 6- Khosrojerdi A., and Mehrjerdi M. 2008. Hydraulic Study of Ogee Spillway with Axial Arc. The 9<sup>th</sup> National Seminar of Irrigation and Reduce Evapotranspiration. 5-7 Feb. 2008. Shahid Bahonar University, Kerman, IR. (In Persian)
- 7- Kumar S., Ahmad Z., Mansoor T., and Himanshu S.K. 2012. Discharge Characteristics of Sharp Crested Weir of Curved Plan-form. Research Journal of Engineering Sciences, Res. J. Engineering Sci, 1(4): 16-20.
- 8- Lesleighter E.J. 1988. Cavitation in Hydraulic Structures, Prototype Correlation of Hydraulic Structures. Colorado Springs, Colorado, Pp: 74-94.
- 9- Maynard S. T. 1985. General spillway investigation. Tech. Rep. HL-85-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- 10- Morales V., Tokyay T.E., and Garcia M. 2012. Numerical Modeling of Ogee Crest Spillway and Tainter Gate Structure of a Diversion Dam on Canar River. XIX International Conference on Water Resources. 17-22 June. 2012. University of Illinois at Urbana-Champaign, Ecuador, USA.
- 11- Najmaie M. 1995. Applied hydraulics. University of Science and Technology, IR. 416 p. (In Persian)
- 12- Savage B.M., and Johnson C.M. 2001. Flow over Ogee Spillway Physical and Numerical Model Case Study. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127(8): 640-649.
- 13- Sheikh Kazem J. and Saneie M. 2014. The Effect of Approach Channels on the Discharge Coefficient of Ogee Spillway in the Axial Arc Condition with Convergent Sidewalls. Journal of Middle East Applied Science and Technology (JMEAST), 22 (2): 119-123.
- 14- Tullis B.P. and Neilson J. 2008. Performance of Submerged Ogee-Crest Weir Head-Discharge Relationships, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 134(4): 486-491.
- 15- United States Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (USACE-WES). 1952. Corps of Engineers Hydraulic Design Criteria, revised in subsequent years.
- 16- U.S. Bureau of Reclamation. 1987. Design of Small Dams, Water Resources Technical Rep., 3rd Ed., Pp: 339-434.



## Laboratory Study of Hydraulic Performance of Ogee Spillway and Downstream Canal with Axial Arc

T. Eshrati<sup>2</sup>- R. Fazlola<sup>2\*</sup>- M. Sanei<sup>3</sup>- A. Emadi<sup>4</sup>

Received: 23-10-2013

Accepted: 25-05-2015

**Introduction:** Weirs are one of the common structures for discharge and flow measurement. Therefore, these types of hydraulic structures depending on the purpose of use have different shapes. In some cases, due to practical constraints, spillways with curvature in plan are designed. In such situations study of flow distribution over the spillway and other related parameters, will be important. In this study, a physical model of dam spillway, which is type of ogee-crested weir with curvature in plan, were tested. Also in order to investigate the effects of curvature on the performance of the flow, the second model of spillway in normal shape, with similar geometric and hydraulic conditions, were compared.

**Materials and Methods:** First physical model of prototype is built at the scale of 1:75 and the second model was constructed in straight form (without curvature in plan) with similar geometric conditions to the first model. Spillways have been designed according to USBR standard for design head at value of 4 cm in model and vertical upstream face. Experiments were performed in Soil Conservation and Watershed Management Research Institute at reservoir with dimensions 1.2 m length, 0.70 m width and 0.5 m height walls of Plexiglas. To measure the flow discharge, a sharp triangular weir with apex angle of 90° in the output of channel was used. Measurements in first model were conducted with five discharges and five values of  $h/H_d$  (0.53, 0.74, 0.90, 1.08 and 1.44) and for six sectors on spillway body. To evaluate the effect of curvature, flow performance and discharge coefficient changes were compared for five early discharges (ratio of critical depth to design head at value of 0.28, 0.44, 0.58, 0.72 and 0.81) and six other discharge (mentioned ratio at value of 0.36, 0.51, 0.66, 0.76 and 0.83) in both models.

**Results and Discussion:** The results related to the first model showed that by increasing the ratio of head to design head ( $h/H_d$ ), rate of spillway discharge coefficient increases to the value of 1.72 and decreases to 1.23, when the weir was submerged. It also observed that with increase in flow rate of each discharge and reducing the pressure along the spillway, possibility of vacuum-creation and corrosion of structure increased and the corrosion rate which introduced by Cavitation Index decreased. The minimum value for Cavitation Index that has been calculated was 1.45 that is greater than the critical value of it. The results of the pressure distribution and changes of Cavitation Index in first model showed, the minimum height of the pressure for each discharge occurred at the end of ogee profile and the minimum value of the Cavitation Index occurred at the last section of spillway in downstream for the value of  $h/H_d=0.53$ . As well as for all test cases in this study, the maximum velocity and minimum of Cavitation Index were calculated at the same section of spillway where hydraulic jump was observed. On the other hand, it was observed that with increasing flow rate, the critical section moves upward on the spillway body. The results related to the spillway efficiency generally indicated that by increasing the ratio of critical depth to design head ( $y_c/H_d$ ) discharge coefficient increases. In fact, by increasing the ratio of  $h/H_d$  and increase the discharge rate up to design discharge, the amount of evacuation and efficiency of both models goes up. For larger discharges, the flow is blocked by the spillway forehead and model efficiency will decrease due to submersion and flow rejection. Results obtained from comparison of two models indicated for the spillway in normal shape submergence of the weir occurred faster and discharge coefficient of each test achieved in lesser value per test, So that the discharge coefficient increasing in curved spillway continued until the value of 0.81  $y_c/H_d$  (at 10.3 lit/s of discharge) and in normal shape until the value of 0.72  $y_c/H_d$  (at 9.2 lit/s of discharge). Therefore it seems that the upward central arch factor will increase the discharge coefficient and efficiency of spillway.

1, 2, 4- M.Sc Graduated, Assistant Professor and Associate Professor of Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Respectively

(\*- Corresponding Author Email: raminfazl@yahoo.com)

3- Associate Professor of Hydraulic Structures, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

**Conclusion:** In the present research the hydraulic performance of ogee spillway with curved plan to investigate the pressure distribution and the vacuum-creation and in particular to compare the results related to flow performance and the effect of spillway curvature on its performance were studied using two experimental models. The impact of increasing the discharge coefficient for the weir with upward central arch compared to weir with straight crest, in terms of similar geometric and hydraulic conditions, was calculated to the value of 21 percent, in this study.

**Keywords:** Cavitation, Discharge Coefficient, Flow Convergence, Ogee Spillway, Spillway Curvature