

## بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در سرریزهای اوجی متأثر از تقرب دیواره‌های هدایت کننده (مطالعه موردی: سد گرمی چای)

کیومرث روشنگر<sup>۱</sup>، علی فرودی خور<sup>۲\*</sup>، مجتبی صانعی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکترای عمران (سازه‌های هیدرولیکی)، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

aliforudi.civil@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۳/۲۱]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۲/۰۳]

### چکیده

سرریزهای اوجی به دلیل اقتصادی بودن و سهولت طراحی و اجرا به عنوان یکی از سازه‌های متداول برای تخلیه و اندازه‌گیری جریان استفاده می‌شود. در این پژوهش روی طرح اولیه مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۷۵ سرریز سد گرمی چای که از نوع اوجی و دیواره‌های هادی متقارب به سمت پایین‌دست است انجام گرفت و تأثیر تغییرات زاویه همگرایی دیواره‌های هادی سرریز در بازه ۰ تا ۱۲۰ درجه بر پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل ضریب دبی، پروفیل سطح آب، عمق و فشار بررسی شد. دلیل استفاده از این نوع سرریز، کاهش عرض سرریز در پنجه نسبت به طول تاج آن به مقدار ۷۸٪ در طرح اولیه (زاویه ۱۲۰) بدلیل شرایط خاص منطقه‌ای است. مشاهدات نشان داد تا قبل از استغراق، برای همه زوایا با افزایش بار آبی بالادست، ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد. همچنین تغییر زاویه همگرایی دیواره‌های هادی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب دبی سرریز ندارد اما هنگامی که سرریز در مرحله استغراق قرار می‌گیرد، هر چه زاویه بزرگتر باشد نرخ کاهشی ضریب دبی بیشتر است. بر این اساس، زاویه صفر درجه غیر مستغرق بالاترین ضریب دبی نسبی با مقدار ۱/۰۷ را در بین تمامی زوایای همگرایی به خود اختصاص داد. تنها زوایای صفر و ۶۰ درجه در بین زوایای مذکور توان عبور حداکثر دبی سیلاب محتمل ( $Q_{PMF}$ ) در حداکثر ارتفاع مجاز آب بالادست ( $H_{max}$ ) را دارا بودند که از این بین زاویه ۶۰ درجه با توجه به عرض کمتر در قسمت پنجه، ۶۹ درصد کاهش عرض در این ناحیه نسبت به زاویه صفر درجه، به عنوان زاویه مناسب در بین این زوایا انتخاب شد.

**واژگان کلیدی:** سرریز اوجی، عملکرد هیدرولیکی، زاویه تقرب، دیواره‌های هادی متقارب

### ۱- مقدمه

داده شده است و ایمنی سدها به طور اهم ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با کفایت ظرفیت سرریز دارد. سرریز باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با کارایی بالا انتخاب شود تا در هر لحظه بتواند برای بهره برداری آمادگی داشته باشد [1]. سرریز

سرریز یکی از کلیدی‌ترین اجزای سد به شمار می‌رود. شکست بسیاری از سدها به عدم کفایت سرریز شان نسبت

اوجی به دلیل راندمان بالای تخلیه از جمله پرکاربردترین سرریزها در طراحی سازه‌های هیدرولیکی است. در برخی از موارد به محدودیت‌های اجرایی و طراحی، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای، سرریزهای جانبی و همچنین سرریزهای قوس در پلان اجتناب ناپذیر است. در چنین شرایطی واضح به نظر می‌رسد که عملکرد هیدرولیکی جریان روی سرریز می‌تواند تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای از فرض‌های اولیه‌ای که در طراحی برای آن منظور شده است، داشته باشد. چنین تاثیری اگر در زمان طراحی مورد بررسی دقیق قرار نگیرد و مسائل ناشی از آن حل نشود، شرایط بهره‌برداری نامطلوبی ایجاد می‌کند که می‌تواند عملکرد سازه را به مخاطره اندازد. مدل فیزیکی هیدرولیکی سرریزها معمولاً با اندازه کوچک‌تر از نمونه اصلی ساخته و در آزمایشگاه در شرایط کنترل شده بررسی می‌شود تا رفتار نمونه اصلی سرریزها پیش بینی شود [2]. رفتار جریان بر روی سرریزها به طور گسترده ای در اوایل ۱۹۵۰ توسط سازمان مهندسين ارتش آمریکا (USACE) و مطالعات تجربی گسترده‌ای در طراحی هیدرولیک سرریزها در سال ۱۹۷۷ توسط سازمان عمران و آبادانی آمریکا (USBR) انجام شد [3, 4]. خسروجردی و مهرجردی طی پژوهشی میدان جریان عبوری از روی سرریز اوجی را به کمک نرم افزار فلوئنت در شرایط سه بعدی برای دو حالت محور مستقیم و محور قوس‌دار شبیه‌سازی نمودند. براساس نتایج به دست 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 پایین‌دست و امتداد مستقیم دارای مقدار بیشتری است [5]. کومار و همکاران به مطالعه ویژگی‌های دبی سرریز لبه‌تیز با قوس در پلان به سمت 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 آزمایشگاهی حاصله 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 ۹۰ درجه، یک افزایش ۴۰ درصدی در دبی جریان روی سرریز، در مقایسه با شکل نرمال سرریز اتفاق می‌افتد [6]. مورالس و همکاران به بررسی عملکرد سرریز اوجی یک سد انحرافی و نیمرخ سرعت پرداختند. CFD جریان روی آن با استفاده از مدل سه بعدی پارامترهای محاسبه شده از مدل عددی بر اساس داده‌های به دست آمده از یک مدل فیزیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج مربوط به نیمرخ سرعت نشان داد که مقدار بیشینه 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 پایین‌دست حرکت می‌کند [7]. شیخ‌کاظمی و صانعی به مطالعه تأثیر کانال نزدیک شونده در بالادست سرریز بر ضریب دبی سرریز اوجی قوس محور با دیواره‌های همگرا پرداختند. آزمایش‌ها روی مدل فیزیکی سرریز گرمی‌چای و در مقیاس ۱:۷۵ انجام شد. نتایج به‌طور کلی نشان داد با افزایش عرض کانال نزدیک شونده به میزان ۵۲ درصد، ۱۱ درصد از عمق جریان روی تاج کاهش و ضریب دبی ۲۲ درصد افزایش خواهد داشت [8]. صانعی و همکاران در پژوهشی به تأثیر مقیاس در تعیین ضریب دبی در سرریزهای اوجی پرداختند، نتایج بررسی‌های آنان نشان می‌دهد که با مدل‌سازی سرریز اوجی با انحنای در پلان با دیواره جانبی همگرا می‌توان در اعداد رینولدز بزرگتر از  $3 \times 10^4$  از اثر لزوجت و در اعداد وبر بزرگتر از ۲۷۰ از اثر کشش سطحی چشم‌پوشی کرد [9]. عشرتی و همکاران در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی و کانال پایین‌دست در شرایط قوس محوری پرداختند، در این پژوهش میزان تأثیر افزایش ضریب دبی در سرریز قوس محور در مقایسه با سرریز محور مستقیم، در شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه، برابر ۲۱ درصد محاسبه شد [10]. روشنگر و همکاران نیز طی تحقیقاتی به مدل‌سازی و تعیین پارامترهای تأثیر گذار بر ضریب دبی سرریزهای اوجی قوس‌محور با تقرب دیواره‌های هادی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی پرداختند و با استفاده از

می‌توان  $C_d$  را تابعی از متغیرهای بی‌بعد در نظر گرفت (رابطه ۳).

$$\psi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}) = 0 \quad (۳)$$

در رابطه ۳،  $\psi$  یک نماد کاربردی دیگر و  $\Pi_1$  تا  $\Pi_{10}$  گروه‌های بی‌بعد است. با توجه به در نظر گرفتن  $H$ ،  $Q$  و  $\rho$  به عنوان پارامترهای دارای بعد تکراری مستقل، همان‌گونه که در مرجع [13] پیشنهاد شده است. پارامترهای بدون بعد به شکل زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{gH^5}{Q^2}, \quad \Pi_2 = \frac{H}{P}, \quad \Pi_3 = \frac{H}{H_d}, \quad \Pi_4 = \frac{h_d}{H}, \quad \Pi_5 = \frac{L}{H}, \\ \Pi_6 &= \frac{d + h_d}{H}, \quad \Pi_7 = \frac{\mu H}{\rho Q}, \quad \Pi_8 = \frac{\sigma H^3}{\rho Q^2}, \quad \Pi_9 = \theta, \quad \Pi_{10} = \alpha \end{aligned} \quad (۴)$$

باتوجه به اینکه اعداد بی‌بعد می‌توانند با یکدیگر ترکیب شوند تا گروه‌های بی‌بعد جدیدی را بوجود آورند که در هیدرولیک نیز دارای معنای فیزیکی باشند، رابطه ۴ می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

$$\frac{3\sqrt{3}}{2\Pi_5(2\Pi_1)^{0.5}} = \xi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_6, \frac{1}{\Pi_7}, \frac{\Pi_8}{\Pi_1}, \Pi_9, \Pi_{10}) \quad (۵)$$

باجایگذاری روابط  $\Pi_1$  تا  $\Pi_{11}$  از رابطه ۴ در معادله ۵ خواهیم داشت:

$$\frac{Q}{\frac{2}{3}LH\sqrt{\frac{2}{3}gH}} = \xi\left(\frac{H}{P}, \frac{H}{H_d}, \frac{h_d}{H}, \frac{d+h_d}{H}, \frac{\rho Q}{\mu H}, \frac{\sigma}{\rho g H^2}, \theta, \alpha\right) \quad (۶)$$

که در این رابطه  $\xi$  یک نماد کاربردی است. در معادله ۶، سمت چپ این معادله بیانگر رابطه ضریب دبی است. پنجمین و ششمین ترم سمت راست معادله مذکور نیز به ترتیب نشان دهنده اعداد رینولدز و وبر است. اگر بار آبی روی سرریز دارای مقادیر کوچکی باشد، ممکن است نیروی کشش سطحی با معنی باشد و عدد وبر بر ضریب دبی تأثیر گذارد، اما با توجه به کوچک نبودن محدوده عمق جریان روی تاج سرریز، از تأثیر عدد وبر چشم‌پوشی شده است. همچنین از آنجا که جریان عبوری از کانال رسش و سرریز، در محدوده جریان کاملاً متلاطم قرار دارد، عدد بی‌بعد رینولدز از تحلیل داده‌ها کنار گذاشته می‌شود [14]. در این پژوهش، زاویه وجه بالادست سرریز قائم بوده ( $\alpha=90^\circ$ ).

هوش مصنوعی رابطه جدیدی برای محاسبه ضریب دبی در این نوع سرریزها ارائه دادند [11, 12]. هدف از تحقیق حاضر که بصورت آزمایشگاهی ارائه شد، بررسی اثر زاویه همگرایی دیواره‌های هادی بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای اوجی استاندارد (WES) است که به صورت مطالعه موردی سرریز سد گرمی‌چای مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- قواعد حاکم بر تئوری مسأله و آزمایشگاه

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

با توجه به هندسه خاص دیواره‌های هادی سرریز موجود نسبت به سرریزهای اوجی استاندارد تعیین اثر هندسه خاص سرریز بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان، امری مهم به نظر می‌رسد. با توجه به این مطلب یک پارامتر هیدرولیکی مهم مانند ضریب دبی به نمایندگی از سایر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، انتخاب و آنالیز ابعادی روی آن انجام گرفت. پیچیدگی مهم این ضریب این است که معمولاً برای انواع مختلف سرریزها، مقدار ثابت ندارد و علاوه بر وابستگی به هندسه کانال و سرریز، به بار آبی روی سرریز نیز وابسته است که محاسبه آن را در شرایط کلی مشکل می‌نماید. دبی در سرریزهای اوجی را می‌توان با استفاده از رابطه مقابل بدست آورد.

$$Q = \frac{2}{3}C_d LH \sqrt{\frac{2}{3}gH} \quad (۱)$$

که در این رابطه  $Q$  = ظرفیت تخلیه سرریز؛  $C_d$  ضریب دبی؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $L$  = طول تاج سرریز و  $H$  = بار آبی کل بالادست سرریز است. با توجه به رابطه ۱ دبی در سرریز اوجی را می‌توان وابسته به متغیرهای رابطه ۲ در نظر گرفت:

$$\Phi(Q, H, L, P, H_d, g, \rho, \mu, \sigma, h_d, d, \alpha, \theta) = 0 \quad (۲)$$

که در این رابطه  $\Phi$  یک نماد کاربردی؛  $P$  = ارتفاع سرریز؛  $H_d$  = بار طراحی؛  $\rho$  = جرم مخصوص سیال؛  $\mu$  = لزوجت سیال؛  $\sigma$  = کشش سطحی؛  $h_d$  = اختلاف رقوم سطح آب در سراب و پایاب سرریز؛  $d$  = عمق آب در پایاب؛  $\alpha$  = زاویه وجه بالادست سرریز و  $\theta$  = زاویه همگرایی دیوار هادی سرریز است. با استفاده از آنالیز ابعادی و قضیه  $\pi$  باکینگهام

شد، برای ساخت دیواره‌ها و کانال نیز از پلکسی گلاس استفاده شد. در جریان‌های کانال باز یعنی جریان سطح آزاد، اثر نیروی ثقل حاکم و عدد فرود همیشه غالب و معیار شبیه سازی است. مقیاس هندسی طول ( $L$ )، سطح ( $A$ ) و حجم ( $V$ ) به ترتیب در روابط ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. زیر نویس‌های  $p$  و  $m$  به ترتیب نسبت مقیاس، مدل و نمونه اصلی را مشخص می‌کند. استفاده از دو پارامتر بی‌بعد (به عنوان نمونه عدد فرود و عدد رینولدز) هم‌زمان در مقیاس یک مدل امکان‌پذیر نیست. برای نمونه اگر  $Fr_m = Fr_p$  شود آنگاه  $Re_m \neq Re_p$  می‌شود. مدل فیزیکی از سرریز می‌تواند از تشابه فرودی استفاده کند، مشروط بر آنکه عدد رینولدز از حد خاصی ( $10^4$ ) بزرگتر بوده تا اثر لزجت قابل صرف‌نظر باشد. [9, 11-12]

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (8)$$

$$A_r = L_r^2 \quad (9)$$

$$V_r = L_r^3 \quad (10)$$

با توجه به توضیحات ارائه شده در بالا، برای تشابه شرایط هیدرولیکی در مدل و نمونه واقعی از تشابه فرودی استفاده شد. این مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۷۵ از طرح پیشنهادی نمونه اصلی در زوایای همگرایی دیواره‌های هادی در بازه  $0 < \theta < 120$  درجه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول (۱) خلاصه پارامترهای طراحی برای مدل و نمونه واقعی ارائه شده است.

آزمایش‌ها به ازای دبی‌های مختلف بین  $0.073$  تا  $2/1$  برابر دبی طراحی انجام شد و مدل فیزیکی ساخته شده تحت ۴

بنابراین ضریب تصحیحی ضریب دبی طبق ضوابط طراحی USBR در طراحی سرریزهای اوجی برابر یک در نظر گرفته می‌شود [4]. با توجه به توضیحات مندرج در بندهای بالا و همچنین بنابر محدودیت‌های فلوم آزمایشگاهی، مقادیر پارامترهای  $H_d$  و همچنین  $P$  ثابت است، به این خاطر هر دوی نسبت‌های  $\frac{H}{H_d}$  و  $\frac{H}{P}$  تنها نشانگر تغییرات  $H$  است، بنابراین برای جلوگیری از تکرار اعداد بی‌بعد یکسان،  $\frac{H}{H_d}$  به نمایندگی از این دو نسبت انتخاب و نسبت  $\frac{H}{P}$  از معادله حذف شد. در نهایت معادله ۶ بصورت زیر بیان می‌شود.

$$C_d = \zeta \left( \frac{H}{H_d}, \frac{d + h_d}{H}, \frac{h_d}{H}, \theta \right) \quad (7)$$

## ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی در تهران با استفاده از مدل فیزیکی سرریز اوجی سد گرمی‌چای انجام گرفت. مدل سرریز بهتر است از مصالحی ساخته شود که سبک، غیر ارتجاعی و ضدآب باشد، همچنین چون سرریز در نمونه اصلی از بتن ساخته می‌شود باید تا آنجا که ممکن است مصالح انتخابی برای ساخت مدل، زبری نزدیک زبری بتن داشته باشد. دفتر آبادانی ایالت امریکا (USBR) پیشنهاد کرد زبری سطح یک سرریز بتنی کوچک می‌باشد، بنابراین مدل‌ها باید با موادی با زبری کم ساخته شوند [4]. با استفاده از این مطلب، مدل سرریز با استفاده از جنس پلی اتیلن (تفلون صنعتی) که ضد آب بوده و همچنین زبری کمی دارد ساخته

جدول (۱) پارامترهای طراحی برای مدل و نمونه واقعی

| Design elements                                                          | Prototype dimensions |          | Model dimensions |         |         |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------|------------------|---------|---------|
| Convergence angles(degree)                                               | 120 deg.             | 120 deg. | 90 deg.          | 60 deg. | 0 deg.  |
| Ratio of downstream channel width to crest length ( $\frac{L_{ch}}{L}$ ) | 0.214                | 0.214    | 0.253            | 0.311   | 1       |
| Crest Length                                                             | 42.83                | 0.56     | 0.4735           | 0.3853  | 0.12    |
| discharge( $m^3 s^{-1}$ )                                                | 398                  | 0.0069   | 0.0059           | 0.0048  | 0.0015  |
| Maximum discharge ( $m^3 s^{-1}$ )                                       | 717                  | 0.0147   | 0.0124           | 0.0101  | 0.00315 |
| Maximum Head(m)                                                          | 3                    |          |                  | 0.04    |         |
| Spillway height(m)                                                       | 7.8                  |          |                  | 0.106   |         |
| Downstream channel width(m)                                              | 184                  | 9        |                  | 0.12    |         |
| Downstream channel slope                                                 | 1H:0.06V             |          | 1H:0.06V         |         |         |

Table1. Model and Prototype Design Elements and Dimensions

شود، هریک از دبی‌های ارائه شده در زاویه ۱۲۰ درجه در نسبت  $\frac{\text{طول تاج در زاویه مد نظر}}{\text{طول تاج در زاویه 120 درجه}}$  ضرب شدند تا دبی‌های هم ارز (که دارای دبی بر واحد عرض یکسان است) در زوایای دیگر تولید شود. به عنوان نمونه در جدول (۲) چند دبی عبوری از سرریز در زوایای مختلف در مدل و نمونه واقعی نشان داده شده است. در شکل (۱) شماتیک سرریز اوجی قوس محور تحت زاویه همگرایی دیواره هادی و شکل ۲ شماتیکی از پلان تمامی مدل‌ها نشان داده شده است.

برای برداشت داده‌ها در زاویه ۱۲۰ درجه قرائت پروفیل سطح آب توسط یک ارتفاع سنج در سراسر بدنه سرریز و در ۵ قطاع که خود شامل ۱۰ ایستگاه با مختصات معلوم بود انجام شد، یک قطاع روی خط مرکزی سرریز در پلان (Center Line) و ۲ قطاع دیگر در مجاورت دیواره‌های هادی و ۲ قطاع

شکل ۱. شماتیک مدل سرریز اوجی قوس محور تحت همگرایی دیواره‌های هادی

زاویه همگرایی دیواره‌های هادی نسبت به یکدیگر شامل ۰ درجه، زاویه ۶۰ درجه، زاویه ۹۰ درجه و زاویه ۱۲۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفت. ایجاد هر یک از زوایا با توجه به عرض ثابت کانال پایین دست به دلیل محدودیت‌های اجرایی در طرح نمونه واقعی در طبیعت، موجب تغییر طول تاج سرریز مدل می‌شود؛ بنابراین برای ایجاد شرایط یکسان دبی-های عبوری در حالت‌های مختلف از دبی بر واحد عرض یکسان استفاده شد. برای این منظور در زاویه ۱۲۰ درجه که طرح اولیه در نظر گرفته شده بود، با استفاده از رابطه  $\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{2.5}$  دبی در مدل با مقیاس ۱:۷۵ محاسبه شد.  $Q_p$  و  $Q_m$  به ترتیب دبی در مدل و نمونه و  $D_p$  و  $D_m$  معرف بعد طولی مدل و نمونه است)

با توجه به این مطلب که دبی بر واحد عرض باید در تمامی زوایا به ازای دبی‌های ارائه شده در مدل ۱۲۰ درجه یکسان

شکل ۲. شماتیکی از سرریز اوجی قوس محور در زاویه‌های همگرایی (a) ۱۲۰ درجه (b) ۹۰ درجه (c) ۶۰ درجه (d) ۰ درجه

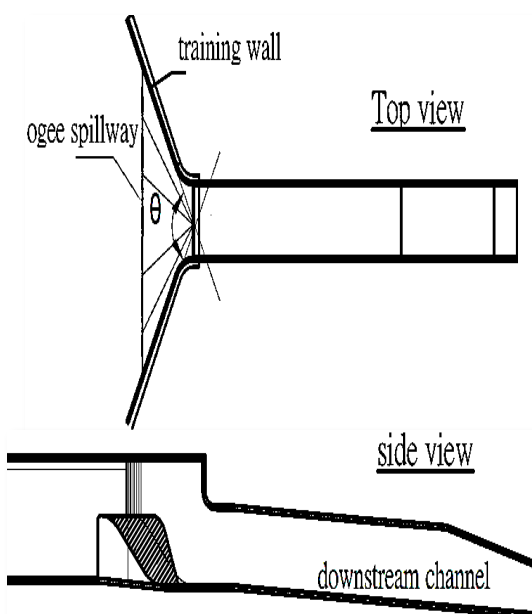


Fig. 1. Schematic of typical converging ogee spillway with straight axis

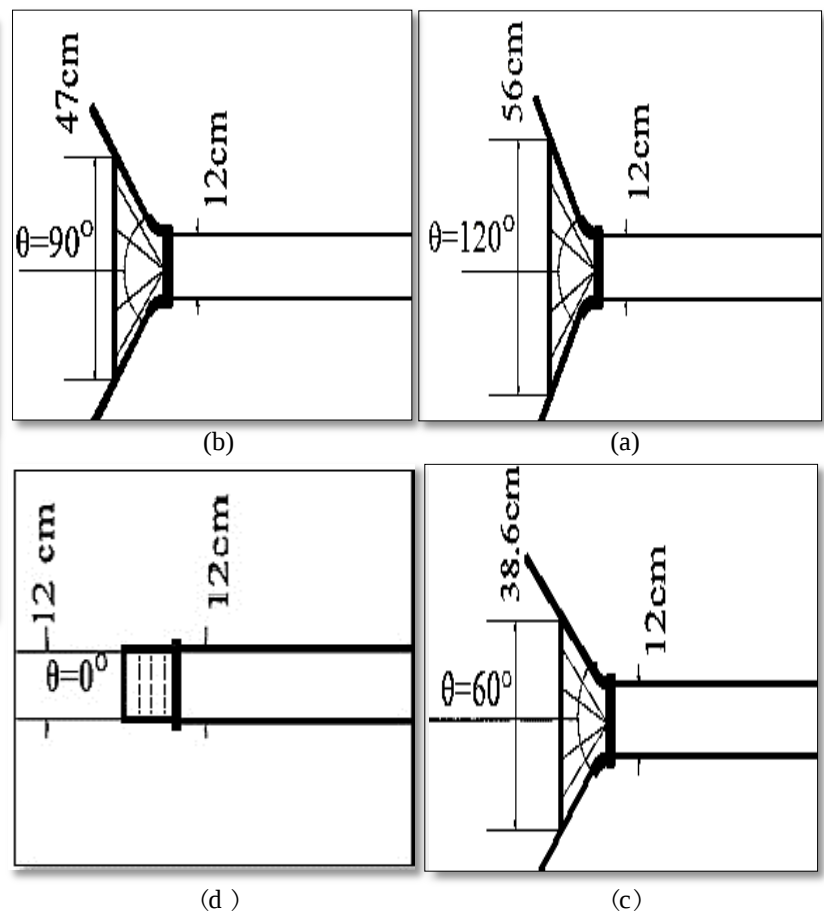


Fig. 2. Photograph of the spillway with convergence angles of: (a) 120°, (b) 90°, (c) 60° and (d) 0°

### ۳- بحث و نتایج

#### ۱-۳- مشاهدات

در روند آزمایش‌ها، در تمامی زوایای همگرایی دیواره‌های جانبی نسبت به یکدیگر غیر از زاویه ۰ درجه، (دیواره‌های جانبی در این زاویه موازی یکدیگر هستند) در پنجه سرریز و قسمت‌های انتهایی شوت سرریز، به دلیل تقرب دیواره‌های جانبی به سمت پایین‌دست، پدیده تداخل خطوط جریان و همگرایی مشاهده شد که در این شرایط پدیده دم خروسی (Rooser Tail) به وضوح قابل مشاهده است. دم خروسی واژه توصیفی است برای شناسایی سطح فواره زدن آبی که با تداخل امواج نوسانی یا امواج ایستاده ایجاد می‌شود، [15]. در شکل (a ۶) این پدیده نمایش داده شده است. پدیده دم خروسی در قسمت میانی ارتفاع بیشتری داشته و در کناره‌ها کوتاه‌تر است، در اطراف دم خروسی جریان‌های ثانویه مشاهده شد که این جریان ناشی از سرعت کم خطوط جریان در نزدیکی دیواره‌ها است که در هنگام ورود به کانال پایین‌دست در اثر برخورد با جریان با سرعت بالاتر به سمت پنجه پس زده می‌شوند و نوعی حرکت گردابه‌ای را تجربه می‌کند. بر اساس مشاهدات در زاویه ۱۲۰ درجه در بازه ۰/۰۷ تا ۰/۷۵ دبی طراحی، پرش در ناحیه پنجه سرریز مشاهده شد، در دبی‌های بزرگ‌تر از این مقدار، یک پرش هیدرولیکی ثابت در قسمت پنجه مشاهده شد؛ این پدیده در شکل (b ۶) نمایش داده شد.

دیگر به صورت متقارن نسبت به قطاع مرکزی در طرفین آن قرار داشتند

شکل (۳)، برای برداشت فشار استاتیکی نیز از ۱۰ پیزومتر بر روی قطاع مرکزی و دو قطاع دیگر در طرفین به صورت متقارن که در ۱۰ ایستگاه تعبیه، و استفاده شد، اما در زوایای همگرایی دیگر با توجه به کاهش طول تاج و همچنین متناسب با آن سطح بدنه سرریز، در زاویه ۶۰ و ۹۰ در هر دو حالت از سه قطاع (قطاع مرکزی و ۲ قطاع مجاورت دیواره-ها) و زاویه صفر درجه از یک قطاع مرکزی، برای برداشت داده‌ها استفاده شد.

شکل ۳. شماتیکی از قطاع‌های برداشت داده

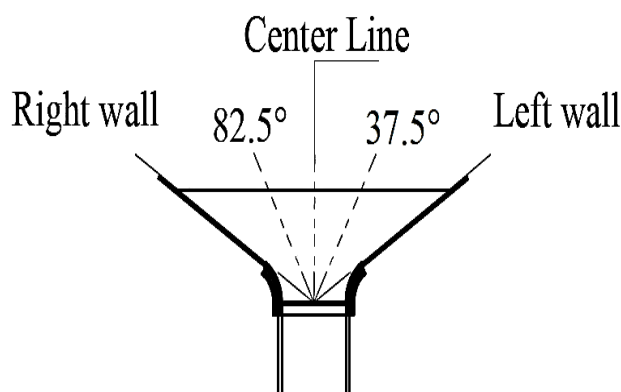


Fig. 3. Schematic of the position of picked lines data

شکل ۴. پروفیل سطحی آب بر امتداد طولی سرریز در دبی طراحی، (a) در زاویه ۱۲۰ (b) در زاویه ۹۰ درجه (c) در زاویه ۶۰ درجه

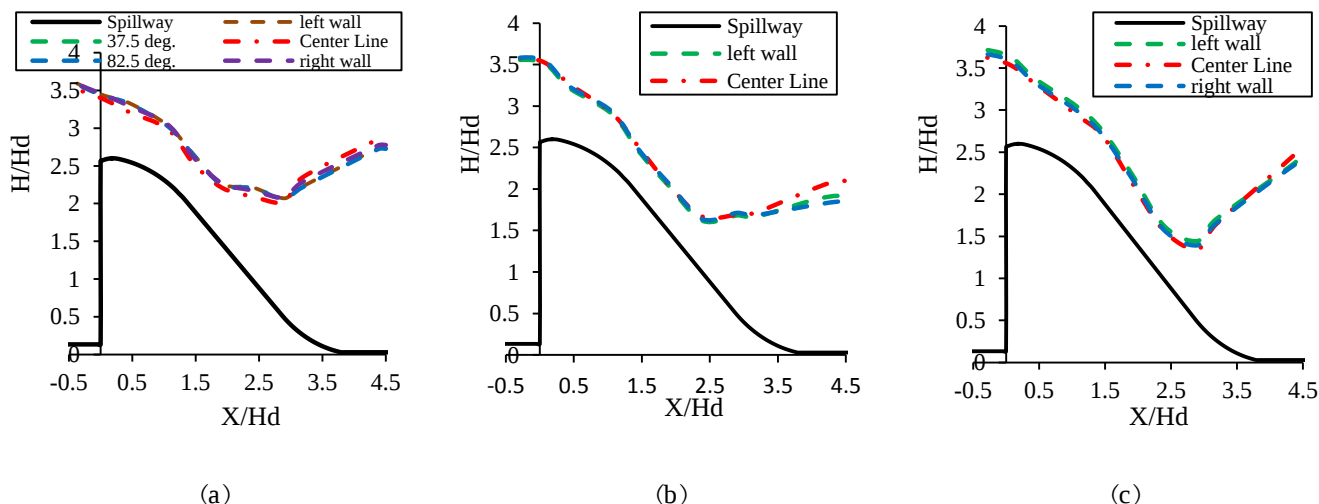


Fig. 4. Non dimensioned value of Water surface on spillway in different Axes with convergence angles of : (a) 120°, (b) 90° and (c) 0°

شکل ۵. پروفیل فشار بر امتداد طولی سرریز در دبی طراحی، (a) در زاویه ۱۲۰ درجه (b) در زاویه ۹۰ درجه (c) در زاویه ۶۰ درجه

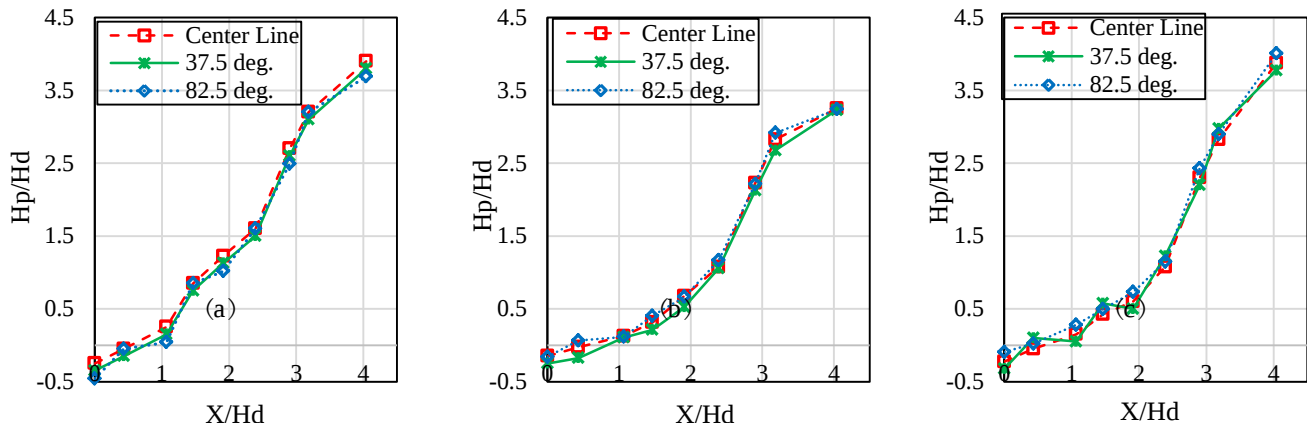
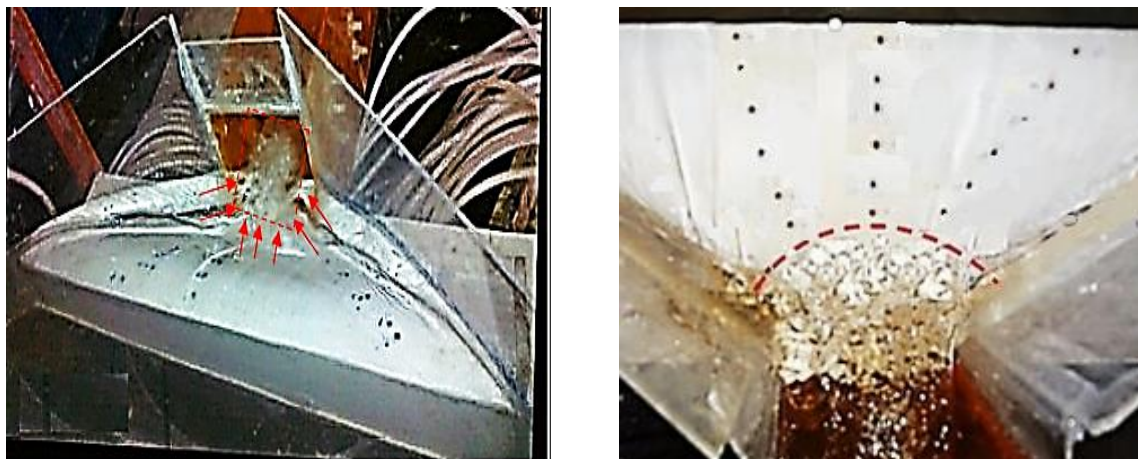


Fig. 5. Non dimensioned value of Static pressure on spillway in different Axes with convergence angles of : (a) 120°, (b) 90° and (c) 0°

شکل ۶. (a) پلان دم خروسی (b) پرش هیدرولیکی



(a)

(b)

Fig. 6. Photograph of the hydraulic phenomena of the converging ogee spillway; (a) Rooster tail and (b) hydraulic jump

مرکزی سرریز در زوایای مختلف به ازای دبی بر واحد عرض  $(Ls^{-1}m^{-1})$   $25/73$  (بالاترین دبی مشترک عبوری در بین تمامی زوایا)، در شکل (۷) جمع‌آوری شده است. مشاهدات آزمایشگاهی حاصل شده نشان داد، در تمامی زوایا در قسمت پنجه و کفبند، نواحی نزدیک به خط میانی سرریز به دلیل همگرایی خطوط جریان بالاترین سطح ارتفاع سیال وجود دارد اما در کناره‌ها ارتفاع جریان کمتر است، ارتفاع سطح آب در راستای طولی سرریز از تاج تا پنجه افزایش می‌یابد به نحوی که بیشترین ارتفاع پروفیل سطح آب در قسمت پنجه قابل مشاهده است. همچنین به ازای زوایای همگرایی مختلف هر چه مقدار  $\theta$  افزایش می‌یابد، ارتفاع پروفیل سطح آب نیز

مشاهده پرش هیدرولیکی تا دبی  $1/13 Q_d$  ادامه داشت و به تدریج با افزوده شدن دبی و گذشتن از این مقدار کارایی سرریز کاهش یافت. با افزایش دبی محل وقوع پرش هیدرولیکی روی تنداب سرریز و در جهت بالادست حرکت می‌کند. برای 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 مقطع پایین‌دست تأثیر گذار بر بالادست جریان است.

### ۳-۲- پروفیل سطح آب و عمق جریان

داده‌های برداشت شده از پروفیل سطح آب در امتداد خط

شکل ۸. عمق بی‌بعد جریان در مجاورت دیواره‌های هادی در دبی بر

واحد عرض  $25/73 (\frac{L}{m.s})$

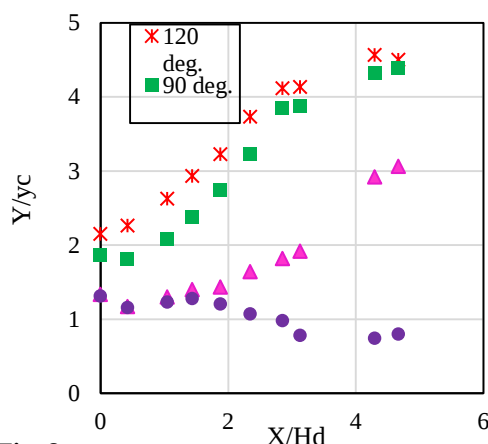


Fig. 8. Flow depth near the training wall versus distance from crest normalized by critical depth for varying convergence angles and  $q=25.73 \text{ l/m.s}$

### ۳-۳- فشار استاتیکی

پروفیل فشار استاتیکی به ازای تمامی زوایا در قسمت تاج سرریز در حال کاهش و از ابتدای شوت تا محل پنجه فشار در حال افزایش است. بنابراین با توجه به شکل (۹) که پروفیل بی‌بعد شده فشار با هد طراحی را در راستای طولی سرریز به ازای دبی بر واحد عرض  $25/73 (Ls^{-1}m^{-1})$  است، فشار استاتیکی با افزایش زاویه، افزایش پیدا می‌کند. به‌عنوان نمونه زاویه ۰ درجه دارای کمترین و زاویه ۱۲۰ درجه دارای بیشترین فشار استاتیکی در قسمت تاج به ترتیب با مقادیر  $\frac{H_p}{H_d} = -0/264$  و  $\frac{H_p}{H_d} = 1/25$  هستند. شکل ۱۰ نیز تغییرات عدد فرود به ازای دبی بر واحد عرض مذکور برای کلیه زوایا آورده شده است. همانطور که از مقایسه شکل‌های (۹ و ۱۰) قابل مشاهده است، مقادیر فشار استاتیکی و عدد فرود در راستای طولی مدل سرریز با یکدیگر رابطه معکوس دارند، بطور مثال زاویه ۱۲۰ درجه که دارای بالاترین مقادیر فشار استاتیکی در بین تمامی زوایا به‌ازای بالاترین دبی بر واحد عرض مشترک است، در همین دبی کمترین مقادیر عدد فرود را به خود اختصاص داده است، هر چه مقدار عدد فرود بیشتر باشد، نشان دهنده سرعت بالاتر جریان بر روی سرریز در آن ایستگاه خاص است که این افزایش سرعت باید با کاهش عمق جریان همراه شود تا توازن رابطه انرژی برقرار شود.

افزوده می‌شود، به عبارت دیگر زاویه همگرایی و ارتفاع سطح آب با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند، علت این پدیده نیز چنین بیان می‌شود با افزایش زاویه همگرایی نسبت طول تاج به عرض کانال پایین دست کاهش می‌یابد و این امر باعث همگرایی بیشتر خطوط جریان و متناسب با آن افزایش ارتفاع سطح جریان می‌شود. نمودار عمق جریان بی‌بعد شده با عمق بحرانی در امتداد دیواره‌های هادی سرریز به ازای بالاترین دبی مشترک در شکل (۸) رسم شده است، با توجه به نتایج گراف ترسیمی که به‌ازای دبی معادل بالاترین دبی مشترک در نمونه واقعی  $(7.02 \text{ m}^3/\text{s})$  تحت زوایای مختلف رسم شده است، می‌توان به یک پیش‌بینی اولیه برای تخمین کمینه ارتفاع دیواره هادی مورد نیاز برای جلوگیری از روگذری جریان از روی دیواره‌های هادی دست یافت. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود عمق جریان در زاویه ۱۲۰ در ایستگاه ۴/۳، در حدود ۶/۲ برابر عمق جریان در زاویه صفر درجه است.

شکل ۷. پروفیل سطح جریان بی‌بعد شده در راستای طولی سرریز در

زوایای همگرایی مختلف دبی بر واحد عرض  $25/73 (\frac{L}{m.s})$

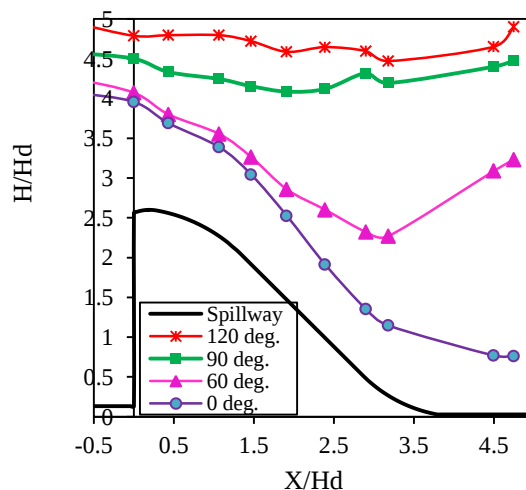


Fig. 7. Water surface over the ogee-spillway normalized by design head With varying convergence angles and  $q=25.73 \text{ l/m.s}$

شکل ۹. تغییرات پروفیل فشار بی بعد شده در راستای طولی سرریز به ازای زوایای مختلف

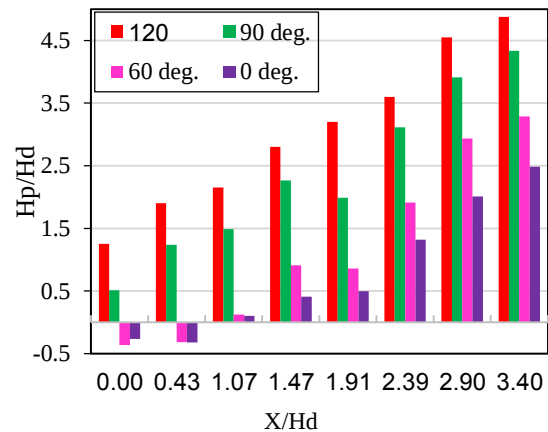


Fig. 9. Crest pressure on the ogee-spillway normalized by design head With varying convergence angles and  $q=25.73$  l/m.s

شکل ۱۰. تغییرات عدد فرود نسبت به تغییر زوایا در راستای طولی سرریز

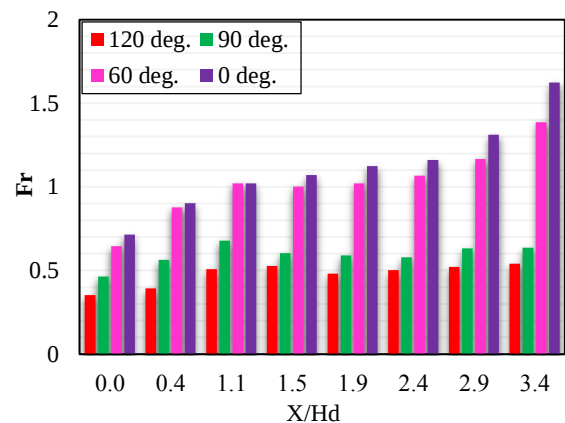


Fig. 10. Froude number on the ogee-spillway With varying convergence angles and  $q=25.73$  l/m.s

بالاتری پدیده استغراق را مشاهده می‌کند، به گونه‌ای که در زوایای ۰ و ۶۰ درجه در رنج دبی‌های آزمایش شده سرریز مستغرق نشد. همچنین در این شکل، تغییرات بار آبی بالادست سرریز به ازای دبی‌های مختلف در حالت بی بعد، در زوایای همگرایی مختلف در مقایسه با USBR رسم شد، همانطور که ملاحظه می‌شود، در  $\frac{H}{H_d}=1$  در تمامی زوایا مقدار  $\frac{C}{C_d}=1$  است. مقدار ضریب دبی در مدل فیزیکی تحت زاویه همگرایی دیواره‌های هادی در بازه  $0.45 < \frac{H}{H_d} < 1.55$  با ضریب آبگذری سرریز USBR تطابق دارد، اما با افزایش بار آبی کل، در بازه  $\frac{H}{H_d} > 1.8$ ، در زوایای ۹۰ و ۱۲۰ به دلیل استغراق سرریز، نمودار ضریب دبی روند کاهشی به خود گرفته و کاهش کارایی سرریز نسبت به سرریز USBR مشاهده می‌شود.

شکل ۱۱. نمودار ارتفاع سطح آب-ضریب دبی به ازای زوایای مختلف

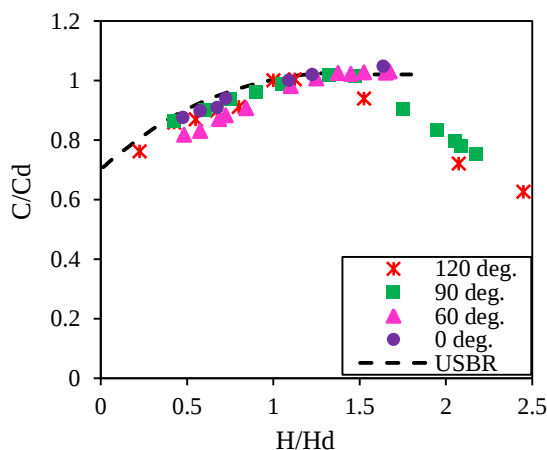


Fig. 11. the discharge coefficient against the total upstream head for various  $\theta$ 's tested. ( $C_s/C_d$  versus  $H/H_d$ )

### ۳-۴-۲- اثر رقوم کف بند بر ضریب دبی

با توجه به شکل (۱۲) که برای نشان دادن تاثیر رقوم کف بند بر ضریب دبی رسم شده است، در بازه  $2 < \frac{d+h_d}{H} < 2.7$  مقادیر ضریب دبی نسبی برای زوایای ۹۰ و ۱۲۰ درجه کمتر از ۱ بوده و نشانگر تأثیر رقوم کف بند روی ضریب دبی است، همچنین در این بازه تأثیرپذیری سرریز اوجی متقارب مورد استفاده در این پژوهش نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR بیشتر است. البته دلیل آن می‌تواند تنگ شدگی بیشتر

### ۳-۴-۳- ضریب دبی

با توجه به آنالیز ابعادی انجام شده در این پژوهش بار آبی کل در بالادست، درجه استغراق، رقوم کف بند و زاویه همگرایی دیواره‌های هادی مهمترین پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی معرفی شدند. پس با توجه به این مسأله اثر پارامترهای مذکور روی ضریب دبی بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳-۴-۱- اثر بار آبی کل در بالادست بر ضریب دبی

تغییرات ضریب دبی در مقابل بار آبی کل بالا دست در شکل (۱۱) رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است هر چه مقدار  $\theta$  کاهش می‌یابد سرریز در دبی‌های

نرخ کاهشی از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که بدلیل تقرب دیواره‌های هادی و بالابودن درجه استغراق سرریز در زوایای ۹۰ و ۱۲۰ درجه، مقادیر ضریب دبی نسبت به زوایای دیگر و همچنین نسبت به سرریز اوجی استاندارد USBR، کمتر است. اما به ازای مقادیر  $\frac{h_d}{H} > 0.8$ ، سرریز در درجات استغراق پایینی قرار داشته و ضریب دبی دیگر تأثیر پذیری از مقادیر  $\frac{h_d}{H}$  نشان نمی‌دهد.

### ۳-۵- نمودار دبی-اشل

شکل ۱۳. نمودار ارتفاع سطح آب-ضریب دبی به ازای زوایای مختلف

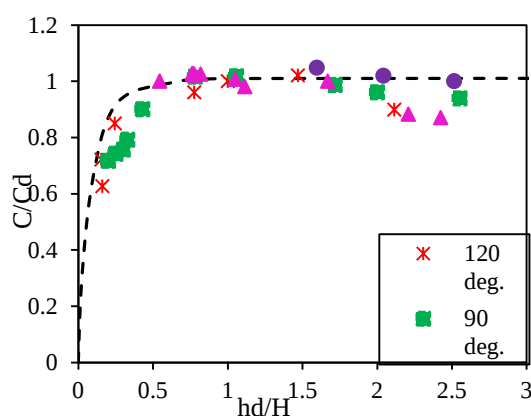


Fig. 13. Comparison of discharge coefficient for varying  $\theta$  against  $h_d/H$

با توجه به این مطلب که یکی از وظایف اصلی سرریز عبور آب‌های اضافی و به ویژه سیلاب‌ها است، نمودار دبی-اشل سرریز معادل شده در مقیاس نمونه واقعی تحت زوایای مختلف، در شکل (۱۴) رسم شد تا از آن به عنوان شاخصی تخمینی برای یافتن مناسب‌ترین زاویه همگرایی در بین این زوایا استفاده شود، البته پیش‌فرض استفاده شده در این مقایسه توسط پژوهشگران فرض رفتار مشابه هیدرولیک جریان در شرایط یکسان و همچنین متغیر بودن عرض کانال پایین‌دست است و از آنجا که تا قبل از پدیده استغراق در تمامی زوایا رژیم جریان بر روی سرریز فوق بحرانی گزارش شد، این فرضیه صحیح به نظر می‌رسد. با توجه به شکل (۱۴) به نظر می‌رسد که زوایای ۰ درجه با داشتن نسبت عرض کانال پایین دست به طول تاج برابر با یک ( $\frac{L_{ch}}{L} = 1$ ) و ۶۰ درجه با دارا بودن نسبت  $\frac{L_{ch}}{L} = 0.31$ ، زوایایی هستند که توان عبور بیشینه

عرض کانال پایین‌دست در این زوایا نسبت به زوایای ۰ و ۶۰ درجه باشد که این تنگ‌شدگی بیشتر باعث همگرایی بیشتر خطوط جریان و کاهش سرعت جریان در این ناحیه در دبی-های بالای عبوری که در بازه  $\frac{d+h_d}{H} < 2$  وجود دارد، شود. از طرفی کاهش سرعت جریان باعث افزایش عمق در این منطقه و متناسب با آن افزایش نیروی عمود بر سطح و در نهایت افزایش نیروی اصطکاک جنبشی می‌شود که خود عاملی مقاوم در برابر سرعت تخلیه جریان در وروی کانال پایین‌دست است.

اما به ازای  $\frac{d+h_d}{H} > 2$  مقادیر ضریب دبی نسبتی به ازای تمامی زوایای همگرایی برابر ۱ شده است و این بدان معناست که در این بازه رقوم کف‌بند تأثیری روی ضریب دبی ندارد.

شکل ۱۲. نمودار ارتفاع سطح آب-ضریب دبی به ازای زوایای مختلف

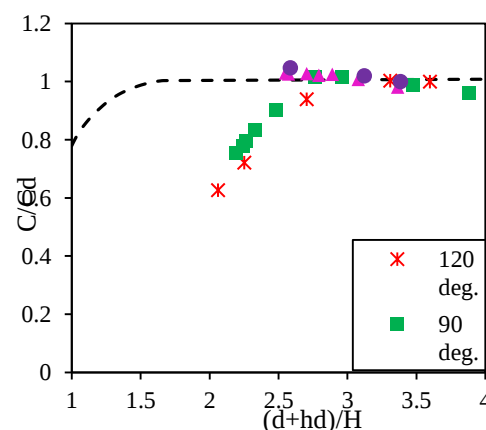


Fig. 12. Comparison of discharge coefficient for varying  $\theta$  against  $(d+h_d)/H$

### ۳-۴-۳- اثر درجه استغراق بر ضریب دبی

در شکل (۱۳) منحنی مربوط به اثر درجه استغراق بر ضریب دبی رسم شده است، لازم به توضیح است تغییرات درجه استغراق دقیقاً عکس نسبت  $\frac{h_d}{H}$  است یعنی به عبارت دیگر هر چه مقدار  $\frac{h_d}{H}$  کمتر باشد، استغراق در درجه بالاتری قرار دارد. براین اساس و با توجه به شکل (۱۳)، به ازای مقادیر  $\frac{h_d}{H} < 0.8$ ، استغراق در درجات بالایی قرار داشته، به همین دلیل ضریب دبی در این بازه متأثر از درجه استغراق بوده و

## ۴- نتیجه گیری

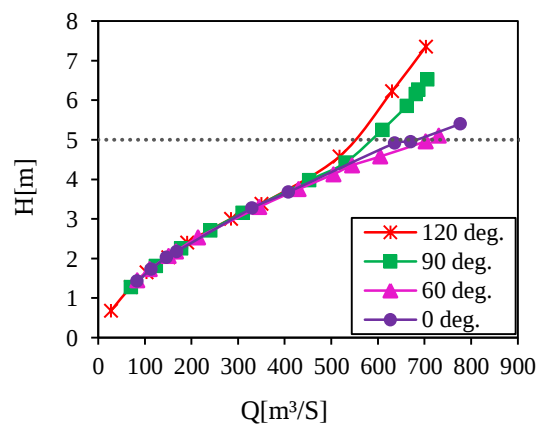
در این پژوهش عملکرد هیدرولیکی سرریز اوجی تحت اثر تغییرات زاویه همگرایی دیواره‌های هادی مورد بررسی قرار گرفت و برای این منظور شاخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند پروفیل سطح آب، فشار استاتیکی، ضریب دبی و دبی-اشل تک تک مدل‌ها مقایسه شد. همچنین برای مشخص شدن اثر هندسه خاص سرریز روی پارامترهای هیدرولیکی جریان، ضریب دبی به نمایندگی از سایر مشخصه‌های جریان انتخاب و آنالیز ابعادی روی آن انجام گرفت. آنالیز ابعادی نشان داد ارتفاع آب در سراب، ارتفاع آب در پایاب، رقوم کف در پایاب و زاویه همگرایی دیواره‌های هادی مهمترین پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی است. با توجه به تغییرات ارتفاع آب در سراب مشاهده شد، با افزایش ارتفاع آب بالادست در بازه  $1/55 < \frac{H}{H_d} < 0/45$  ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد که در این بازه مقدار ضریب دبی نسبی با ضریب آبگذری USBR هماهنگی دارد، اما با افزایش بیشتر بار آبی کل، در بازه  $1/8 < \frac{H}{H_d}$ ، در زوایای  $90^\circ$  و  $120^\circ$  به دلیل استغراق سرریز، نزول ضریب دبی نسبی و همچنین کاهش کارایی سرریز نسبت به سرریز USBR مشاهده شد. تأثیر رقوم کف‌بند بر ضریب دبی در بازه  $2/7 < \frac{d+h_d}{H} < 2$  و تأثیر درجه استغراق بر ضریب دبی به ازای مقادیر  $0/8 < \frac{h_d}{H}$ ، بصورت روندی کاهشی مشاهده شد. علاوه بر این با بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان نتایج زیر به دست آمد:

هر چه مقدار  $\theta$  افزایش پیدا کرده و یا به عبارت دیگر نسبت  $\frac{L_{ch}}{L}$  کاهش یابد، ارتفاع سطح آب در قسمت شوت و پنجه افزایش می‌یابد، اما این نرخ افزایشی پروفیل سطح آب تأثیر پذیری بالایی از استغراق نیز دارد، به عبارت دیگر در هنگام استغراق با افزایش  $\theta$ ، روند افزایشی عمق جریان سرعت بیشتری گرفته و تغییرات عمق محسوس‌تر می‌شود. بر همین اساس مشاهده می‌شود که به ازای دبی بر واحد عرض  $(\frac{L}{s.m})$   $25/73$ ، که بالاترین دبی مشترک عبوری در همه زوایا است عمق جریان در زاویه  $120^\circ$  که در این دبی مستغرق است، در ایستگاه  $4/3$ ، در حدود  $6/2$  برابر عمق جریان در زاویه صفر درجه‌ای است که در شرایط جریان آزاد کار می‌کند. همچنین

دبی سیلاب محتمل را در بیشینه ارتفاع مجاز ( $5m$ ) دارا هستند، اما در بین این دو زاویه، زاویه  $60^\circ$  درجه با داشتن  $\frac{L_{ch}}{L} = 0/31$  نسبت به زاویه  $0^\circ$  درجه با دارا بودن  $\frac{L_{ch}}{L} = 1$  می‌تواند به عنوان گزینه ارجح انتخاب شود و علت نیز چنین می‌تواند توضیح داده شود با توجه به این مطلب که طول تاج سرریز با توجه به طرح اولیه باید مقدار ثابت  $42$  متر باشد، زاویه  $60^\circ$  درجه در صورت افزایش طول تاج به مقدار تعریف شده  $42$  متر نیاز به عرض کانال پایین‌دستی معادل  $13/02$  متر است و این در حالی است که عرض کانال پایین‌دست مورد نیاز برای زاویه صفر درجه بایستی مقدار  $42$  متر انتخاب شود تا بتوان عبور بیشینه دبی سیلاب محتمل را داشته باشد، بنابراین زاویه  $60^\circ$  درجه با کاهش عرض کانال پایین دست به اندازه  $0/69$  نسبت به زاویه  $0^\circ$  درجه بعنوان مناسب‌ترین زاویه معرفی شود. این پژوهش می‌تواند به طراحانی که با محدودیت اجرایی در عرض کانال پایین‌دست روبرو هستند، ایده اولیه مناسبی در طرح این نوع سرریزها ارائه دهد. البته از جمله نگرانی‌هایی که در طرح این نوع سرریز وجود دارد، پدیده دم خروسی بوجود آمده در پنجه است که ممکن است تأثیر نامطلوبی با ایجاد فشارهای دینامیکی در پنجه و کف‌بند سرریز بگذارد، پس اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی ناشی از این پدیده توصیه می‌شود.

شکل ۱۴. دبی-اشل سرریز در زوایای مختلف مقیاس شده به مقادیر

نمونه واقعی

Fig. 14. The total upstream head against discharge scaled to prototype values for various  $\theta$ 's tested.

*crested weir of curved plan-form*. Research Journal of Engineering Sciences 2278, 9472.

[8] Morales V., Tokyay T.E. & Garcia M. 2012 *Numerical modeling of ogee crest spillway and tainter gate structure of a diversion dam on Canar River, Ecuador*. IX International Conference on Water Resources, University of Illinois at Urbana-Champaign.

[9] SheikhKazemi J. & Saneie M. *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.

[10] Saneie M., SheikhKazemi J. & Azhdary Moghaddam M. 2016 *Scale Effects on the Discharge Coefficient of Ogee Spillway with an Arc in Plan and Converging Training Walls*. Civil Engineering Infrastructure Journal 49(2): 361-374.

[11] Eshtrati T., Fazoula R., Saneie M. & Emadi A. 2015 *Laboratory Study of Hydraulic Performance of Ogee Spillway and Downstream Canal with Axial Arc*. Journal of Water and Soil 29(4): 874-885 (In Persian).

[12] Roshangar K., Foroudi-Khor A. & Saneie M. 2017a *Modeling the Discharge Coefficient of Converging Ogee Spillways for Free Flow Conditions Using Machine Learning Approaches*. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research 18(69): 107-122 (In Persian).

[13] Roshangar K., Foroudi-Khowr A. & Saneie M. 2017b *Prediction of Discharge Coefficient for Ogee Spillway with Curve Axis Using Support Vector Machine by Comparison with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 11(4): 647-657 (In Persian).

[14] Mohammadzadeh-Habili J., Heidarpour M. & Afzalimehr H. 2013 *Hydraulic characteristics of a new weir entitled of quarter-circular crested weir*. Flow Measurement and Instrumentation 33: 168-178.

[15] Nedoroda A.W. & Tanner W. 1970 *Preliminary study of transverse bars*. Marine Geology 9(1): 41-62.

فشار استاتیکی در همه زوایا، در تاج کاهش و در شوت و پنجه سرریز در حال افزایش گزارش شده است، فشار استاتیکی نسبت به تغییرات  $\theta$  حساس بوده و با افزایش زاویه، افزایش پیدا می‌کند. از نمودار دبی-اشل سرریز معادل شده در مقیاس نمونه واقعی تحت زوایای مختلف، به عنوان شاخصی کمی برای یافتن مناسب‌ترین زاویه همگرایی استفاده شد. زوایای صفر و  $60^\circ$  درجه، تنها زوایایی بودند که توان عبور بیشینه دبی سیلاب محتمل در حداکثر ارتفاع مجاز (5m) را دارا بودند که در این بین زاویه  $60^\circ$  درجه با کاهش عرض کانال پایین دست به اندازه  $0/69$  نسبت به زاویه صفر درجه، به عنوان مناسب‌ترین زاویه معرفی شد.

## References

## ۶- مراجع

- [1] Beirami M.K. 1977 *Water conveyance structures*. The isfahan university press, Isfahan university of technology press, Isfahan, Iran (In Persian).
- [2] Ranga Raju K.G. & Asawa G.L. 1977 *Viscosity and surface tension effects on weir flow*. Journal of the Hydraulics Division 103(10): 1227-1231.
- [3] Chanson H. 2008 *Physical Modelling, Scale Effects, and Self-Similarity of Stepped Spillway Flows*. World Environmental and Water Resources Congress pp. 1-10.
- [4] US Army Corps of Engineers-Waterways Experiment Station (USACE-WES) (1952) Corps of Engineers Hydraulic Design Criteria, revised in subsequent years.
- [5] US Bureau of Reclamation (USBR) 1980 U.S. Government printing office, Denver.
- [6] Khosrojerdi A. & Mehrjerdi M. 2008 *Hydraulic Study of Ogee Spillway with Axial Arc*. Shahid Bahonar University, Kerman, IR (In Persian).
- [7] Kumar S., Ahmad Z., Mansoor T. & Himanshu S. 2012 *Discharge characteristics of sharp*

# Experimental Study of Flow Hydraulics in Ogee Spillways Affected by Converging Training Walls (case study: Germe Chay Dam)

Kiyomars Roushangar<sup>1</sup>, Ali Foroudi<sup>2</sup>, Mojtaba Saneie<sup>3</sup>

1-Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran;

2- PH. D candidate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran;

3-Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

aliforudi.civil@yahoo.com

## Abstract

The most typical kind of spillways is the ogee **spillway**. The advantages of the ogee spillway are its simple design, its steady overflow pattern, and the simplicity to pass flows, in comparison with the other spillways and the closely associated lower prices. In the present study, a 1:75 scale physical model was utilized to assess the impact of converging vertical training walls on the flow quantities in the ogee spillway. In this regard, this structure was tested in varying convergence of training walls ranging from 0 to 120°. The experiments were conducted at the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI) in Tehran, Iran. The results of the experiments indicated that in the converging ogee spillway by increasing total upstream head, the discharge coefficient will go up for each of the convergence angles ( $\theta$ 's) and before submergence stage for the spillway, the discharge coefficient is independent of converging situations. At a 0° convergence angle (with ratio of  $\frac{L_{ch}}{L} = 1$ ), having free flow condition for each of the tested discharges, the highest ratio of relative discharge coefficients was 1.07. By contrast, at the submergence stage for the spillway, the difference in the discharge coefficient was observed noticeably. On the other hand, when the spillway was submerged, there is a decrease in the coefficient can be caused by tailwater submergence and it causes the differences in the discharge coefficient for each of the  $\theta$ 's. For instance, the ratio of coefficient to the discharge coefficient ( $C/C_d$ ) in 120° convergence, despite went up remarkably to just over 1.0 in  $H/H_d=1$ , the mentioned values then significantly dropped in  $H/H_d>1.8$ . Also, the data obtained from flow depth and static pressure distribution along the spillway in various convergence angles indicates that as  $\theta$  increases, the flow depth and static pressure increases at the bottom and the toe of the spillway model. For instance, the flow depth along the convergence angle of 120° at station 4.3, was nearly 6.2 times greater than the flow depth generated along the 0° convergence. The range of flow depth changes with any increase in the total upstream head near the walls can be used to estimate the minimum side wall height requirements to decrease overtopping for future site utilizing similar design criteria. It can be inferred from experimental results that 60° convergence with ability to pass the probable maximum flood in the Maximum head allowed can be selected as the most economic convergence angle. This convergence angle was chosen because downstream channel width of it is 69% lesser than that in 0° convergence having capability to pass the probable maximum flood in the Maximum head. This study was aimed to evaluate the impact of converging training walls of the ogee spillway on flow characteristics. Experimental result showed that where the downstream flow is at supercritical stage or where the hydraulic jump occurs, the convergence angles variations has no effect on the discharge coefficient considerably, but when the spillway is submerged, there is a decrease in the coefficient which can be caused by tailwater submergence. In addition 60° convergence having the smallest downstream channel width required to pass the probable maximum flood in the Maximum head allowed can be selected as the most economic convergence angle.

**Keywords:** ogee spillway, hydraulic performance, convergence angles, training wall