

## بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای قوسی

یوسف سنگ سفیدی<sup>۱</sup>، مجتبی مهرآیین<sup>۲</sup>، مسعود قدسیان<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه خوارزمی

۳- استاد، گروه مهندسی آب و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۰۹

**چکیده-** سرریزها نقش تعیین کننده‌ای در ایمنی سدها دارند و بخش زیادی از هزینه‌های مربوط به ساخت سد را به خود اختصاص می‌دهند. برای اطمینان از ایمنی سدها، کارشناسان مجبور به انتخاب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا، به عنوان سیلاب طراحی سرریزها است. سرریز قوسی، کماتی از یک دایره است که افزایش طول مؤثر تاج سرریز را در یک عرض مشخص ممکن می‌سازد و بدین ترتیب می‌توان به ازای یک بار هیدرولیکی یکسان، دبی بیشتری را از سرریز عبور داد. در این مقاله، ضریب آبگذری و دبی عبوری سرریز قوسی قرار گرفته در داخل مخزن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب آبگذری این سرریزها به عنوان تابعی از  $H/P$  و  $\theta$  ارائه و عملکرد هیدرولیکی این سرریزها با سرریز خطی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای بار هیدرولیکی یکسان، افزایش  $\theta$  منجر به کاهش ضریب آبگذری می‌شود. با این حال افزایش طول مؤثر سرریز در نتیجه قوسی کردن آن، می‌تواند بهبود راندمان سرریزهای قوسی را تا حدود ۴۵٪ در پی داشته باشد. با افزایش بار هیدرولیکی، ارتفاع پشته جریان در پایین دست سرریزهای قوسی، افزایش یافته که این امر کاهش راندمان سرریزهای قوسی را در پی دارد. در پایان بر اساس نتایج و محدودیت‌های پژوهش حاضر، روشی برای طراحی سرریزهای قوسی قرار گرفته در داخل مخزن ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** سد، سرریز قوسی، بار هیدرولیکی، دبی، ضریب آبگذری.

### ۱- مقدمه

برای مقطع عرضی سرریز از جمله مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای، دایره‌ای و غیره ارائه شده است (رامامورتی و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۷۷؛ الی<sup>۲</sup>، ۱۹۸۶؛ باس<sup>۳</sup>، ۱۹۸۹ و بلچندر<sup>۴</sup> و رامامورتی، ۱۹۹۱). دسته‌بندی دیگر سرریزها بر اساس نوع تیغه و ارتفاع آب روی تاج است که بر این اساس به سه دسته‌ی لبه‌تیز، لبه‌پهن و اوجی تقسیم می‌شوند. بر اساس

سرریز از جمله سازه‌های مورد استفاده در سدها و شبکه‌های آبرسانی است. این سازه‌ها در شبکه‌های آبرسانی برای تخلیه و پخش آب و در سدها به منظور کنترل ارتفاع و حجم آب و تخلیه سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد که بخش قابل توجهی از هزینه‌های ساخت سد را به خود اختصاص می‌دهد.

با توجه به هیدرولیک جریان عبوری، اشکال مختلفی

<sup>1</sup>- Ramamurthy et al

<sup>2</sup>- Eli

<sup>3</sup>- Bos

<sup>4</sup>- Balachandar

انرژی است که از یک حفره مستطیلی در یک مخزن بزرگ خارج می‌شود. کنداسوامی و رز<sup>۷</sup> (۱۹۵۷) رابطه رهبوک (۱۹۲۹) را برای مقادیر بالاتر بار هیدرولیکی به صورت منحنی ارائه کردند.

کیندسواتر و کارتر<sup>۸</sup> (۱۹۵۷) روابطی را برای ضریب آبگذری سرریزهای مستطیلی انقباض یافته ارائه کردند. سوامی<sup>۹</sup> (۱۹۸۸) بر اساس پژوهش‌ها کیندزواتر و کارتر (۱۹۵۷) رابطه جدیدی را بر اساس نسبت انقباض (نسبت عرض سرریز به عرض کانال) برای سرریزهای مستطیلی انقباض یافته معرفی کرد. در همین زمینه آیدین<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۱) نمودارهایی را برای بیان تغییرات ضریب آبگذری سرریزهای مستطیلی انقباض یافته، بر اساس عدد رینولدز ارائه نمود.

به منظور بررسی اثر لزجت و کشش سطحی بر آبگذری سرریزها، پژوهش‌های مختلفی به انجام رسیده است. رهبوک (۱۹۲۹)، کیندسواتر و کارتر (۱۹۵۷)، سارگینسون<sup>۱۱</sup> (۱۹۷۲)، رانگاراجو و آساوا<sup>۱۲</sup> (۱۹۷۷)، گیل<sup>۱۳</sup> (۱۹۸۵) و قدسیان<sup>۱۴</sup> (۱۹۹۸) روابط جداگانه‌ای را بدین منظور ارائه کردند. تجربیات آزمایشگاهی توصیه‌های مختلفی را برای حذف اثر لزجت و کشش سطحی در جریان عبوری از سرریز بیان داشته است. کیندسواتر و کارتر (۱۹۵۷) اعلام داشتند که اثر نادیده‌گرفتن لزجت و کشش سطحی با افزایش ارتفاع آب به اندازه ۰/۰۰۱ متر و کاهش عرض سرریز به اندازه ۰/۰۰۰۹ متر می‌تواند جبران شود. رانگاراجو و آساوا (۱۹۷۷) عمق ۱۱ سانتی‌متر را به عنوان کمینه عمق آب بر روی سرریز برای حذف اثر

این تقسیم‌بندی چنانچه عمق آب روی تاج سرریز از ۱/۵ برابر ضخامت تاج در جهت جریان بیشتر شود، سرریز لبه‌تیز محسوب می‌شود (ویشر<sup>۱</sup>، ۱۹۸۸ و هگر و اشوال<sup>۲</sup>، ۱۹۹۴). تقسیم‌بندی دیگر سرریزها بدین ترتیب است که اگر سرریز تمام عرض کانال را اشغال کند، هم‌عرض و اگر عرض کانال را برای عبور آب در بالای خود کاهش دهد، انقباض یافته نامیده می‌شود (فرنچ<sup>۳</sup>، ۱۹۸۶). سرریزها بر اساس ارتفاع آب پایین دست نیز به دو دسته آزاد و مستغرق تقسیم‌بندی می‌شوند (ویل مونت<sup>۴</sup>، ۱۹۴۷ و واو و رانجارتنام<sup>۵</sup>، ۱۹۹۶).

رابطه عمومی سرریزهای مستطیلی به شکل زیر است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2g} H_0^{1.5} \quad (1)$$

در رابطه بالا، Q مقدار دبی، C<sub>d</sub> ضریب آبگذری، L<sub>c</sub> طول مؤثر تاج سرریز، H<sub>0</sub> بار هیدرولیکی کل نسبت به تراز تاج در بالادست سرریز و g شتاب ثقل است. مطالعات روی سرریزها با هدف بررسی پارامترهای مختلف اثرگذار روی ضریب آبگذری به انجام می‌رسد که در این مسیر پژوهش‌های زیادی بر روی سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز به انجام رسیده است. در قالب این پژوهش‌ها تأثیر پارامترهای مختلف روی ضریب آبگذری این سرریزها بررسی و بدین منظور روابط و نمودارهایی ارائه شده است.

رهبوک<sup>۶</sup> (۱۹۲۹) رابطه‌ای را بین ضریب آبگذری سرریزهای مستطیلی با بار هیدرولیکی و ارتفاع سرریز ارائه کرد و اعلام داشت که اگر ارتفاع سرریز به بی‌نهایت نزدیک شود، ضریب آبگذری سرریز برابر ۰/۶۱۱ می‌شود که این عدد همان ضریب انقباض یک جت آب بدون افت

<sup>7</sup>- Kandaswamy and Rouse

<sup>8</sup>- Kindsvater and Carter

<sup>9</sup>- Swamee

<sup>10</sup>- Aydin

<sup>11</sup>- Sarginson

<sup>12</sup>- RangaRaju and Asawa

<sup>13</sup>- Gill

<sup>14</sup>- Ghodsian

<sup>1</sup>- Vischer

<sup>2</sup>- Hanger and Schwalt

<sup>3</sup>- French

<sup>4</sup>- Villemonte

<sup>5</sup>- Wu and Ranjaratnam

<sup>6</sup>- Rehbock

لزجت و کشش سطحی معرفی کردند. این در حالی است که بیشتر مراجع عمق در حدود ۲/۵ تا ۳ سانتی متر را برای این منظور معرفی کرده‌اند (هندرسون<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶ و انجمن مهندسی عمران آمریکا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰).

بر اساس پژوهش‌های آزمایشگاهی چنانچه تراز آب پایین دست از تراز تاج سرریز بیشتر شود، سرریز مستغرق شده و این امر تأثیر منفی بر ضریب آبگذری سرریز خواهد داشت. ویل مونت (۱۹۴۷) بر اساس نسبت استغراق (نسبت بار هیدرولیکی پایین دست به بار هیدرولیکی بالادست سرریز) رابطه‌ای را برای آبگذری سرریزهای مستغرق ارائه داد. واو و راجاراتنام (۱۹۹۶) بر اساس پژوهش‌ها ویل مونت (۱۹۴۷) رابطه‌ای را برای آبگذری سرریزهای مستطیلی لبه تیز در حالت مستغرق ارائه دادند.

مطالعات پیرامون فشار هوای زیر تیغه جریان خروجی از سرریز حاکی از آن است که با کاهش فشار هوا، انحنای جریان بیشتر شده و ضریب آبگذری افزایش می‌یابد. البته باید توجه داشت که اگر هوای زیر جریان به صورت نامنظم تغییر کند، جت جریان نوسان کرده که می‌تواند خرابی سرریز را در پی داشته باشد. در این زمینه، باس (۱۹۸۹) رابطه‌ای را برای محاسبه بیشینه هوای مورد نیاز برای سرریز ارائه نمود.

پژوهش‌های برقی و همکارانش<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) حاکی از آن بود که با زاویه دار کردن سرریزهای لبه تیز مستطیلی، طول مؤثر سرریز افزایش یافته که این امر موجب می‌شود که به ازای یک بار هیدرولیکی ثابت دبی بیشتری از سرریز عبور کند. ایشان رابطه‌ای را نیز برای محاسبه دبی این سرریزها ارائه نمودند.

نتایج کورکستون و تولیس<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) بر روی سرریزهای

کنگره‌ای قوسی نشان داد که توسعه سرریز به داخل مخزن در شرایطی که سیکل‌های سرریز بر روی قوسی از دایره قرار گیرند، افزایش ضریب آبگذری را در پی دارد. این محققین ضمن معرفی پارامترهای هندسی سرریزهای کنگره‌ای قوسی، نتیجه‌گیری کردند که با بالارفتن زاویه انحنای سرریز، چنانچه ظرفیت آبگذری سیکل‌های بالادست سرریز کنگره‌ای از سیکل‌های پایین دست آن بیشتر گردد، ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای قوسی حتی به مقداری کمتر از سرریز کنگره‌ای خطی نیز خواهد رسید.

بر اساس بررسی تحقیقات گذشته، تا کنون مطالعات کاملی بر روی سرریزهای قوسی لبه تیز به انجام نرسیده است. از آنجایی که سرریزهای قوسی بعنوان یکی از گزینه‌های افزایش طول سرریز مطرح می‌باشد، در این پژوهش ضمن معرفی پارامترهای اثرگذار بر عملکرد سرریزهای قوسی، با توسعه سرریزها به داخل مخزن، اثر قوسی کردن سرریز و بار هیدرولیکی بالادست بر عملکرد هیدرولیکی و ضریب آبگذری سرریزهای قوسی قرار گرفته در داخل مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. در انتهای مقاله نیز روشی برای طراحی این سرریزها ارائه شده است.

## ۲- آنالیز ابعادی

آنچه که در بررسی‌های آزمایشگاهی باید مدنظر باشد این است که نتایج حاصل از آزمایش‌ها را بتوان به شرایط واقعی و طبیعی تعمیم داد و بدون در نظر گرفتن ابعاد، از نتایج آن در شرایط واقعی و مشابه استفاده نمود. آنالیز ابعادی در واقع رابطی بین مدل آزمایشگاهی و نمونه واقعی موجود در طبیعت است که هدف از انجام آن تعیین اعداد بدون بعدی است که ممکن است بر پدیده مورد نظر تأثیر گذار باشند. استفاده از روش آنالیز ابعادی به همراه درک فیزیکی از مسأله مورد نظر در کنار انجام آزمایش‌ها منجر به

<sup>۱</sup>- Henderson

<sup>۲</sup>- American Society of Civil Engineering (ASCE)

<sup>۳</sup>- Borghai et al.

<sup>۴</sup>- Crookston and Tullis

مخصوص سیال،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی سیال و  $S_e$  فاکتور تعیین کننده شکل مقطع تاج است.

با توجه به تراکم ناپذیری جریان در سرریزها، می توان از تأثیر تغییر جرم مخصوص ( $\rho$ ) در آبگذری سرریز چشم پوشی نمود. در ضمن چنانچه جریان در محدوده آشفته و عمق جریان روی سرریز از یک مقدار به ویژه (این مقدار بر اساس تجارب آزمایشگاهی ۲/۵ سانتی متر بیان شده است) کمتر نباشد، می توان از اثر نیروی لزجت و کشش سطحی نیز چشم پوشی کرد. بدین ترتیب معادله (۲) به شکل زیر در می آید:

$$Q = f(H_0, P, D, L_c, t, \theta, W, S_0, g, S_e) \quad (3)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی و پس از ترکیب سازی می توان نشان داد:

$$f\left(\frac{Q}{L_c \sqrt{g} H_0^{1.5}}, \frac{H_0}{P}, \frac{W}{P}, \frac{t}{P}, \frac{H_0}{D}, \theta, S_0, S_e\right) = 0 \quad (4)$$

مطابق با معادله (۵) طول مؤثر تاج سرریز قوسی ( $L_c$ )، تابعی وابسته به زاویه انحنا ( $\theta$ )، عرض ( $W$ ) و ضخامت تاج سرریز ( $t$ ) است:

$$L_c = \left(R + \frac{t}{2}\right)\theta = \left(\frac{W}{2 \sin(\theta/2)} + \frac{t}{2}\right)\theta \quad (5)$$

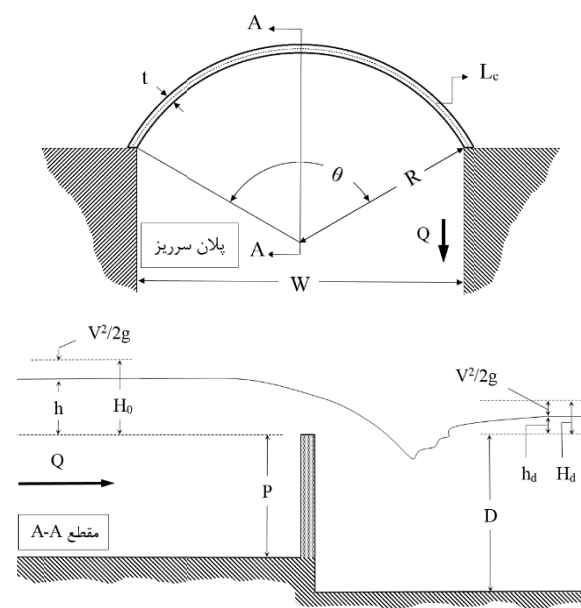
معادله فوق رابطه کلی پارامترهای بدون بعد در یک سرریز قوسی را نشان می دهد. با توجه به اینکه شکل تاج سرریز و شیب کف ثابت بوده، پارامترهای  $S_0$  و  $S_e$  قابل چشم پوشی کردن است و از معادله (۴) حذف می شود. با عنایت به اینکه عرض کانال تخلیه، ارتفاع و ضخامت سرریزها ثابت و نیز ارتفاع سرریز در بالا دست و پایین دست برابر بودند، پارامترهای  $W/P$ ،  $t/P$  و  $H_0/D$  هم از معادله (۴) حذف شده و رابطه ساده شده زیر به دست می آید.

$$f\left(L_c \sqrt{g} H_0^{1.5} / Q, H_0 / P, \theta\right) = 0 \quad (6)$$

یا:

تعیین پارامترهای تاثیرگذار و میزان تاثیر آنها بر پارامتر هدف می شود. روش های مختلفی برای آنالیز ابعادی وجود دارد که در این پژوهش از تئوری  $\pi$  باکینگهام<sup>۱</sup> استفاده شده است.

شکل (۱) پلان و مقطع طولی یک سرریز قوسی را نشان می دهد. زاویه انحنا ( $\theta$ ) و شعاع قوس ( $R$ ) از جمله پارامترهای خاص سرریز قوسی است که در این شکل نمایش داده شده اند.



شکل (۱) پلان و مقطع طولی یک سرریز قوسی

ظرفیت آبگذری سرریزهای قوسی از معادله (۱) محاسبه می شود. در این رابطه، طول تار میانی تاج در پلان به عنوان طول مؤثر سرریز ( $L_c$ ) لحاظ شده است. به شکل کلی کمیت های مؤثر در آبگذری سرریزهای قوسی را می توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$Q = f(H_0, P, D, L_c, t, \theta, W, S_0, g, \rho, \mu, \sigma, S_e) \quad (7)$$

که  $P$  ارتفاع بالادست سرریز،  $D$  ارتفاع پایین دست سرریز،  $t$  ضخامت سرریز،  $W$  عرض سرریز،  $S_0$  شیب کف،  $\rho$  جرم

<sup>۱</sup> - Buckingham  $\pi$  theorem

جریان ورودی ابتدا از زیر صفحه عمودی (که در پلان نیم‌دایره‌ای بوده و بمانند دیواره‌ای برای مخزن عمل می‌کند) عبور کرده و سپس با گذر از زیر صفحه افقی (با سوراخ نیم‌دایره‌ای در مجاورت دیواره جانبی فلوم) که در زیر صفحه دودی نیم‌دایره‌ای افقی واقع شده، بالا می‌آید. در نهایت مخزن ایجاد شده از آب پر شده و جریان وارد کانال تخلیه و از این طریق به پایین دست منتقل می‌شود.

دیواره‌های مخزن (صفحات نمایش داده شده در شکل ۲) باعث هدایت جریان از پایین به داخل مخزن شده و سطح زیرین میز استقرار سرریز (صفحه دودی رنگ نمایش داده شده در شکل ۲) نیز استهلاک انرژی جنبشی و تلاطم جریان را در پی دارد. تمامی صفحات مورد استفاده در پلان به شکل نیم‌دایره‌ای بوده که جهت‌گیری شعاعی جریان در مخزن را مطابق با شکل (۳-ب) ممکن می‌سازند. (شکل ۳-الف ملاحظه شود)

در پژوهش حاضر، ۴ هندسه مختلف سرریز با زاویه انحنای متفاوت در محدوده سرریز مستقیم تا سرریز نیم‌دایره‌ای ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) مورد آزمایش قرار گرفتند که برای ساخت آنها از تلق‌های پلی‌کربنات، به دلیل قوس‌پذیری آسان و دقیق، استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها تراز بستر بالادست و پایین دست سرریزها برابر بود. سرریزها دارای ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، ضخامت ۶ میلی‌متر و به لحاظ هیدرولیکی به صورت لبه‌تیز عمل می‌کردند. جدول (۱) هندسه سرریزهای مورد آزمایش و محدوده تغییرات پارامترهای جریان را نشان می‌دهد.

سرریزها در تمامی آزمایش‌ها، به صورت آزاد عمل کرده و داده‌ها در حالت جریان دائمی جمع‌آوری شدند. اندازه‌گیری دبی با استفاده از دبی‌سنج آلتراسونیک و بصورت میانگین عددی در طول ۵ تا ۷ دقیقه تعیین می‌شد.

$$Q/L_c \sqrt{gH_0}^{1.5} = f(H_0/P, \theta) \quad (7)$$

ضریب آگذری از معادله (۷) و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$C_d = \frac{3Q}{2L_c \sqrt{2gH_0}^{1.5}} \quad (8)$$

با مقایسه معادلات (۷) و (۸) و توجه به این نکته که پارامترهای بدون بعد را می‌توان در یک عدد ثابت ضرب و یا به توان یک عدد ثابت رساند، خواهیم داشت:

$$C_d = f(H_0/P, \theta) \quad (9)$$

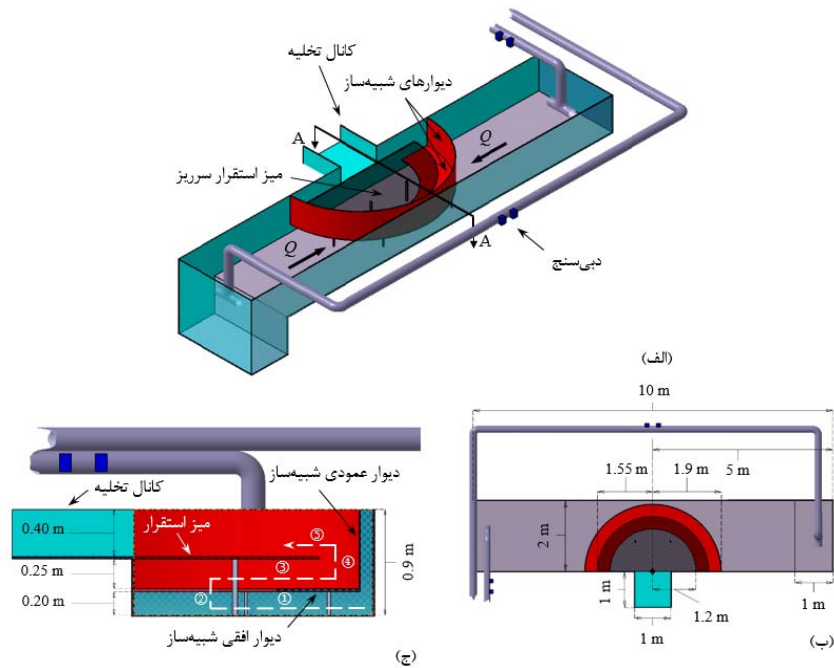
در این مقاله تأثیر پارامترهای فوق بر ضریب آگذری سرریزهای قوسی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد و در نهایت منحنی‌ها و روابط طراحی این سرریزها ارائه شده است.

### ۳- مواد و روش‌ها

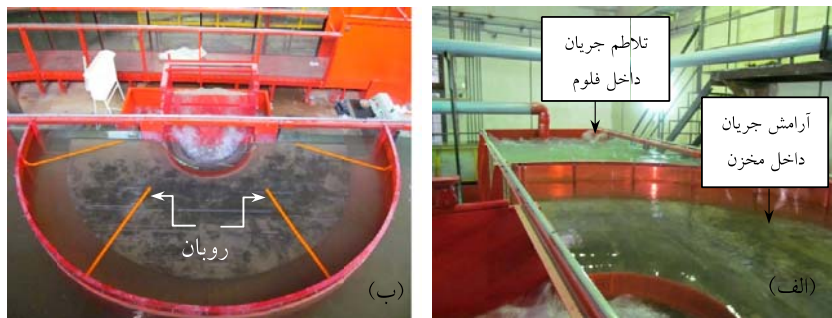
#### ۳-۱- تجهیزات آزمایشگاهی و چگونگی انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های پژوهش حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس و داخل یک فلوم مستقیم انجام شد. فلوم مورد اشاره (با طول ۱۰ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر) از یک منبع زیرزمینی تغذیه شده و مجهز به یک جک مکانیکی، برای تنظیم شیب است که در طول آزمایش‌ها شیب آن برابر صفر حفظ شد.

برای شبیه‌سازی شرایط مخزن سد برای انجام آزمایش‌ها روی سرریزها، شبیه‌ساز مخزن طراحی و پس از ساخت، نسبت به نصب آن در داخل فلوم اقدام شد. مطابق با شکل (۲)، شبیه‌ساز مخزن در وجه جانبی فلوم آزمایشگاهی قرار گرفته و جریان از دو سمت، به وسیله‌ی دو پمپ با مشخصات یکسان و مجموع ظرفیت ۲۲۰ لیتر بر ثانیه، از طریق دو خط لوله با قطر ۸ اینچ وارد می‌شود.



شکل (۲) تجهیزات آزمایشگاهی: الف- شمای کلی ب- پلان ج- مقطع A-A



شکل (۳) توانایی شبیه‌ساز در آرام‌سازی جریان (الف) و ایجاد جریان شعاعی و همه‌جانبه بسمت سرریز (ب)

جدول (۱) هندسه سرریزهای مورد آزمایش

| Q (m <sup>3</sup> /s) | H <sub>0</sub> /P | تعداد آزمایش‌ها | t (m) | L <sub>c</sub> (m) | P (m) | W (m) | θ (°) | مدل |
|-----------------------|-------------------|-----------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----|
| ۰/۰۱۵ - ۰/۱۶          | ۰/۳ - ۱/۷         | ۳۱              | ۰/۰۰۶ | ۱                  | ۰/۱   | ۱     | ۰     | ۱   |
|                       |                   | ۳۱              | ۰/۰۰۶ | ۱/۰۸۸              | ۰/۱   | ۱     | ۷۸/۶  | ۲   |
|                       |                   | ۲۹              | ۰/۰۰۶ | ۱/۲۹۵              | ۰/۱   | ۱     | ۱۳۷   | ۳   |
|                       |                   | ۲۸              | ۰/۰۰۶ | ۱/۵۸۳              | ۰/۱   | ۱     | ۱۸۰   | ۴   |

آزمایش‌ها چند آزمایش به صورت تصادفی تکرار می‌شد. مشاهدات آزمایشگاهی با استفاده از یک دوربین با کیفیت عکس برداری ۱۴/۱ مگاپیکسل و کیفیت HD ثبت شد. این

عمق جریان با استفاده از یک عمق دیجیتالی با دقت ۱ میلی‌متر و از طریق اختلاف سطح آب با تراز تاج سرریزها تعیین می‌شد. برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری‌ها، در طول

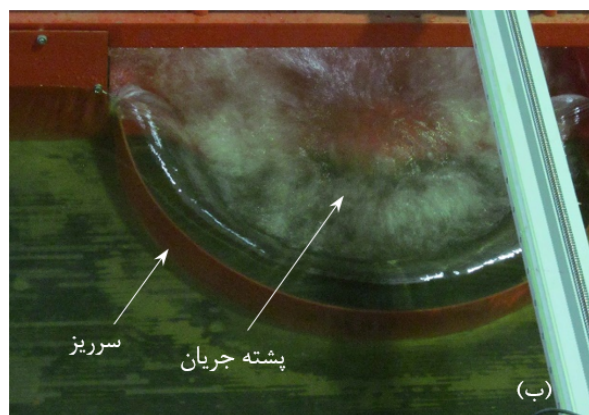
مشاهدات شامل هوای موجود زیر تیغه جریان، محل همگرایی جریان و ابعاد پشته جریان در پایین دست سرریز می‌بود. همچنین در چند آزمایش ویژه نسبت به اندازه‌گیری ابعاد پشته جریان اقدام شد که نتایج آن در بخش بعدی ارائه شده است.

اندازه‌گیری شد. نتایج ارائه شده در شکل (۶) بیانگر این است که هر دو پارامتر زاویه انحنا  $\theta$  سرریز و بار هیدرولیکی بالادست سرریز  $(H_0)$ ، اثر مستقیم بر روی ارتفاع پشته جریان داشته و با افزایش هر یک از این دو پارامتر، ارتفاع پشته جریان بزرگتر می‌شود. با افزایش بار هیدرولیکی بالادست  $(H_0)$ ، شدت و حجم جریان برخوردی در پایین دست سرریز افزایش یافته که این امر افزایش ارتفاع پشته جریان  $(K)$  را در پی دارد. همچنین به ازای بار هیدرولیکی یکسان، افزایش زاویه انحنا  $\theta$  قوس، همگرایی بیشتر تیغه‌های جریان عبوری از سرریز را در پی دارد که این امر نیز اثر مستقیم بر روی ارتفاع پشته خواهد داشت؛ تا حدی که در سرریز نیم دایره‌ای  $(\theta=180^\circ)$  تراز پشته به بیش از دو برابر تراز تاج سرریز  $(K/P > 2)$  نیز می‌رسید. لازم به ذکر است که این برآمدگی در سطح جریان به صورت موضعی بوده و در تمامی آزمایش‌ها سطح آب در پایین دست سرریز از تاج آن پایینتر بود و سرریزها به صورت آزاد عمل می‌کردند.

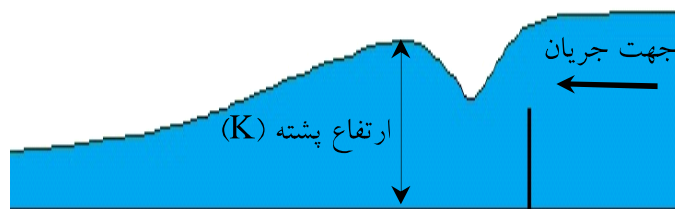
۴- ارزیابی نتایج

۴-۱- عملکرد هیدرولیکی

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌داد که همگرایی جریان عبوری از روی سرریزهای قوسی مطابق با شکل (۴)، باعث ایجاد برآمدگی موضعی سطح آب در پایین دست سرریز می‌شود. این پدیده که روی عملکرد هیدرولیکی سرریزها اثرگذار است با عنوان پشته جریان نامگذاری شد. ارتفاع پشته جریان  $(K)$  در وسط طولی سرریز و از کف کانال پایین دست، به گونه‌ای که در شکل (۵) نمایش داده شده است، در دو قوس مختلف و به ازای سه بار هیدرولیکی متفاوت

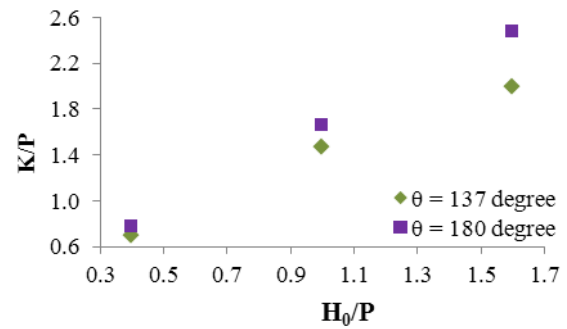


شکل (۴) نمایش پشته جریان در سرریز با زاویه انحنا  $\theta=180^\circ$  و نسبت  $H_0/P=0.68$ : الف- نما از بالا ب- نما از روبرو



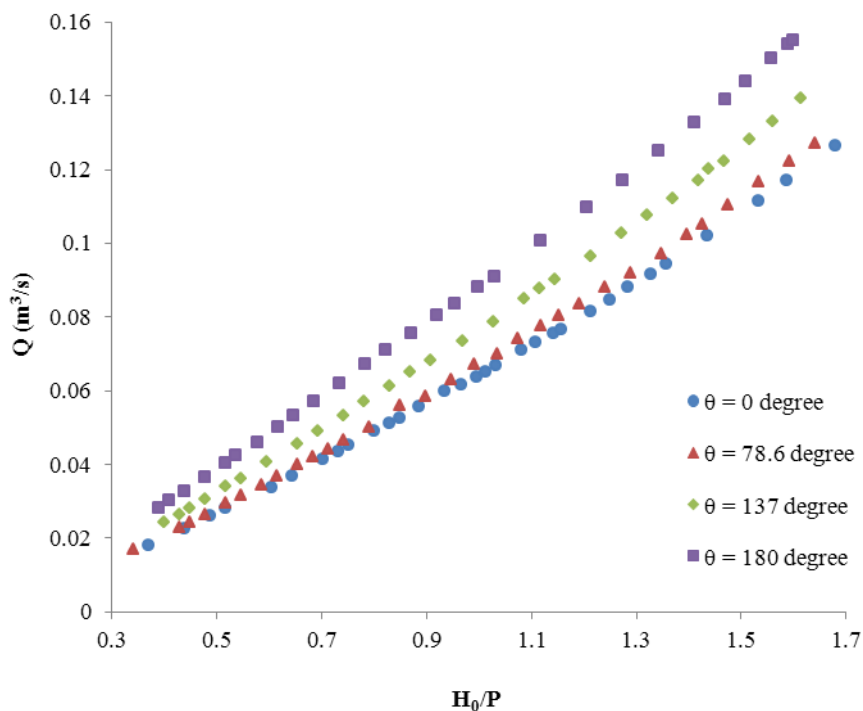
شکل (۵) ارتفاع پشته جریان

در شکل (۸) ضریب آبگذری ( $C_d$ ) سرریزهای مورد آزمایش ارائه شده است. از این نمودارها می‌توان دریافت که در تمامی قوس‌ها با افزایش نسبت  $H_0/P$ ، ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش بار هیدرولیکی، ارتفاع و ابعاد پشته به عنوان مانعی در برابر جریان عبوری از سرریز و عامل کاهش ضریب آبگذری افزایش می‌یابد. این نمودارها همچنین از این امر حکایت دارند که در محدوده  $H_0/P$  ارائه شده در شکل (۸)، قوسی کردن سرریز و افزایش زاویه انحنای قوس ( $\theta$ ) موجب کاهش ضریب آبگذری می‌شود که این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش  $\theta$ ، اولاً ابعاد پشته رشد کرده و ثانیاً جریان برای طی مسیر مخزن تا کانال تخلیه، مجبور به طی مسیری غیرمستقیم با انحنای بیشتر است که این دو موضوع می‌تواند اثر منفی بر ضریب آبگذری داشته باشد.



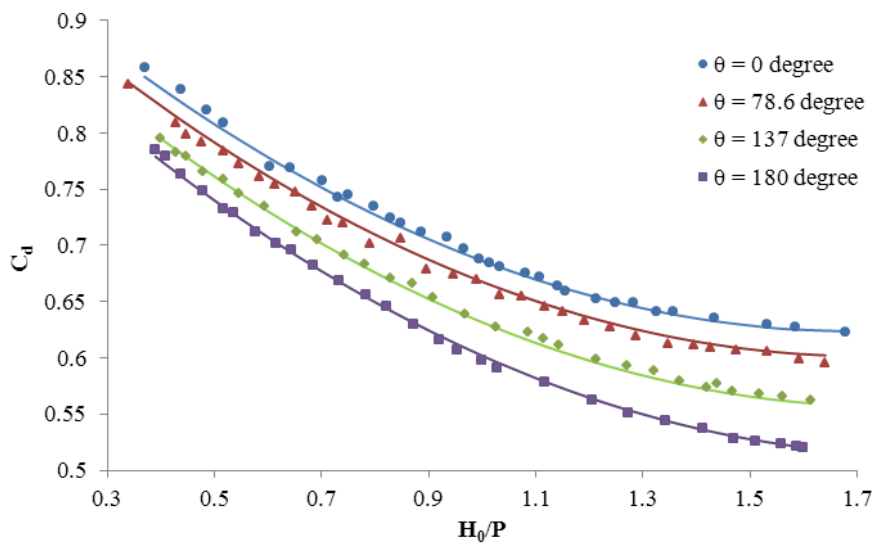
شکل (۶) مقادیر  $K/P$  در مقابل  $H_0/P$

رابطه دبی-اشل سرریزهای قوسی با استفاده از معادله (۱) تعیین شد. نتایج ارائه شده در شکل (۷) که برحسب نسبت بار هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز ( $H_0/P$ ) و به ازای چهار قوس مختلف با زاویه انحنای متفاوت ارائه شده است، نشان می‌دهد که با افزایش زاویه انحنای قوس  $\theta$ ، که افزایش طول سرریز قوسی در یک عرض یکسان را در پی دارد، ظرفیت آبگذری این سرریزها افزایش می‌یابد.



شکل (۷) منحنی‌های دبی ( $Q$ ) در مقابل  $H_0/P$ ، برای سرریزهای مورد آزمایش





شکل (۸) منحنی‌های ضریب آبگذری ( $C_d$ ) در مقابل  $H_0/P$ ، برای سرریزهای مورد آزمایش

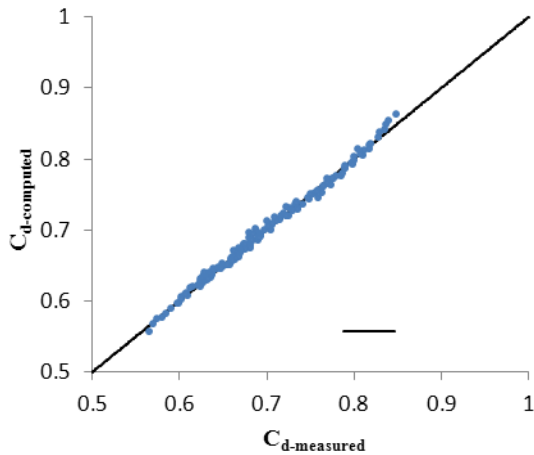
طول موثر سرریز در نتیجه قوسی کردن آن، می‌تواند بهبود راندمان سرریز را تا حدود ۴۵٪ در پی داشته باشد. همان‌گونه که مشخص است با افزایش زاویه انحنا قوس ( $\theta$ )، شیب منحنی‌های کارایی ( $\epsilon$ ) تندتر شده که دلیل آن بزرگتر شدن پشته جریان به ازای بار هیدرولیکی یکسان می‌باشد. ضمناً با افزایش بار هیدرولیکی و افزایش ابعاد پشته جریان در پایین دست سرریزهای قوسی، راندمان این سرریزها کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که از شیب منحنی‌های کارایی در شکل (۹) می‌توان گفت که احتمالاً در مقادیر خیلی بالای  $H_0/P$ ، اثر قوسی کردن از بین رفته و سرریز قوسی همچون یک سرریز خطی عمل خواهد کرد که البته تعیین این مقدار با توجه به محدودیت تجهیزات آزمایشگاهی میسر نبود و نیازمند انجام آزمایش‌های بیشتر است.

با هدف آسانی استفاده از نتایج این پژوهش، برآزش منحنی‌های ضریب آبگذری ( $C_d$ ) و کارایی ( $\epsilon$ ) از داده‌های اندازه‌گیری شده، با استفاده از معادله (۱۰) انجام گرفت. این معادله در واقع ارتباط بین ضریب آبگذری سرریزهای

با دقت در منحنی‌های شکل (۸) می‌توان دریافت که در مقادیر پایین  $H_0/P$  که پشته جریان تاثیر کمتری روی عملکرد سرریز دارد، اختلاف بین منحنی‌های ضریب آبگذری کمتر شده است. بنابراین در صورت به حداقل رساندن اثر پشته بر روی عملکرد سرریز، ممکن است قوسی کردن، بهبود جهت‌گیری سرریز نسبت به جریان ورودی و افزایش ضریب آبگذری را در پی داشته باشد. برای یافتن این شرایط، انجام آزمایش در بارهای هیدرولیکی کم (که با توجه به محدودیت تجهیزات آزمایشگاهی در این پژوهش میسر نبود) می‌تواند در دستور کار قرار گیرد. ضمناً افزایش ظرفیت آبگذری کانال تخلیه از طریق پایین بردن تراز کف در پایین دست سرریز ( $D > P$ ) نیز می‌تواند به عنوان راه‌حلی برای بهبود ضریب آبگذری سرریزهای قوسی مورد پژوهش قرار گیرد.

نسبت دبی سرریز قوسی ( $\theta > 0^\circ$ ) به دبی سرریز خطی ( $\theta = 0^\circ$ )، به عنوان کارایی ( $\epsilon$ ) تعریف می‌شود. شکل (۹) کارایی سرریزهای مورد آزمایش را بر اساس نسبت  $H_0/P$  نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که افزایش

طراحی سرریزهای قوسی قرار گرفته در داخل مخزن ارائه شده است. محدودیت‌های روش پیشنهادی به شرح زیر است:



شکل (۱۰) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ضریب آبگذری

$$0^{\circ} \leq \theta \leq 180^{\circ}$$

$$0.4 \leq H_0/P \leq 1.6$$

$$W/P = 10$$

$$t/P = 0.06$$

برای طراحی گام‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. تعیین دبی طراحی (Q)، بیشینه تراز آب مخزن (EL<sub>Res</sub>) و تراز کانال دسترسی (EL<sub>Cha</sub>) براساس بررسی‌های هیدرولوژیکی.

۲. تعیین اختلاف بیشینه تراز آب مخزن (EL<sub>Res</sub>) با تراز کانال دسترسی (EL<sub>Cha</sub>):

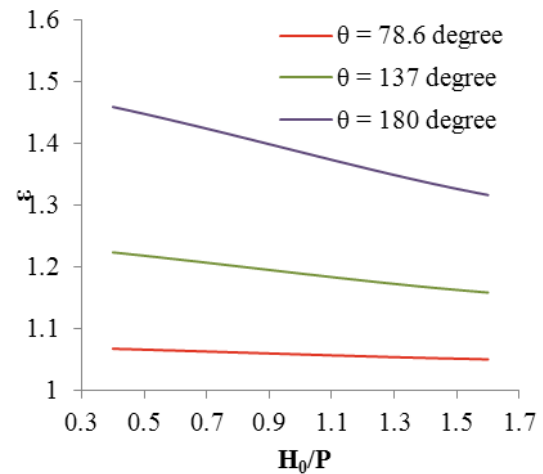
$$Y = EL_{Res} - EL_{Cha}$$

۳. تعیین عرض سرریز با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه.

۴. ارتفاع تاج سرریز را برابر  $P = 0.1W$  در نظر بگیرید. باید

توجه داشت که این مقدار در محدوده  $0.4Y \leq P \leq 0.7Y$  قرار داشته باشد.

قوسی ( $C_d$ ) با نسبت بار هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز ( $H_0/P$ ) و زاویه انحنای سرریز ( $\theta$ ) را بیان می‌کند. پارامتر S در معادله (۱۰) برابر با نسبت طول تاج پایینی تاج سرریز به عرض کانال و تابعی از  $\theta$  بوده که  $\theta$  برحسب رادیان می‌باشد. ضرایب معادله (۱۰) به همراه مقدار  $R^2$  در جدول (۲) ارائه شده است. ضمناً مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ضریب آبگذری در شکل (۱۰)، از دقت بالای معادله (۱۰) در تعیین ضریب آبگذری سرریزهای قوسی حکایت دارد.



شکل (۹) منحنی کارایی ( $\epsilon$ ) در مقابل  $H_0/P$ ، برای سرریزهای مورد آزمایش

$$C_d = P_{00} + P_{10} \left( \frac{H_0}{P} \right) + P_{01} (S) + P_{20} \left( \frac{H_0}{P} \right)^2 + P_{11} \left( \frac{H_0}{P} \right) (S) + P_{02} (S)^2 \quad \text{Where: } S = \frac{\theta}{2 \sin(\theta/2)} \quad (10)$$

جدول (۲) ضرایب معادله (۱۰) به همراه مقدار  $R^2$

| $P_{00}$ | $P_{10}$ | $P_{01}$ | $P_{20}$ | $P_{11}$ | $P_{02}$ | $R^2$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| ۰/۴۲۳۲   | -۰/۰۰۶۷  | ۰/۵۸۱۲   | ۰/۰۴۳۳   | -۰/۱۸۵۲  | -۰/۱۶۷۴  | ۰/۹۹۳ |

#### ۴-۲- روش طراحی سرریزهای قوسی

بر اساس نتایج و محدودیت‌های این پژوهش، روشی برای

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای قوسی قرار گرفته در داخل مخزن، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- جریان در داخل شبیه‌ساز مخزن بخوبی آرام شده و به صورت شعاعی به سمت سرریزها برقرار می‌شود. پس با استفاده از این تجهیزات امکان مدلسازی شرایط مخزن سد در یک فلوم آزمایشگاهی و با هزینه و فضای کمتر از آنچه که هم اکنون در مراکز پژوهش‌های صورت می‌گیرد، فراهم می‌شود.

- همگرایی جریان عبوری از روی سرریزهای قوسی باعث ایجاد برآمدگی موضعی سطح آب در پایین دست سرریز می‌شود که این پدیده با عنوان پشته جریان نامگذاری شد.

- زاویه انحنای قوس سرریز ( $\theta$ ) و نسبت بار هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز ( $H_0/P$ )، اثر مستقیم روی ارتفاع پشته جریان داشته و با افزایش هر یک از این دو پارامتر، ارتفاع پشته جریان بزرگتر می‌شود.

- افزایش طول مؤثر سرریز در نتیجه قوسی کردن آن، می‌تواند بهبود راندمان سرریز را تا حدود ۴۵٪ در پی داشته باشد.

- به ازای زاویه انحنای ثابت، افزایش بار هیدرولیکی ( $H_0$ ) کاهش راندمان سرریزهای قوسی را در پی دارد.

- با افزایش بار هیدرولیکی ضریب آبگذری سرریزهای قوسی کاهش می‌یابد. همچنین با این روند اختلاف بین منحنی‌های ضریب آبگذری بیشتر می‌شود.

- در محدوده  $H_0/P$  ارائه شده در شکل (۸)، قوسی کردن سرریز و افزایش زاویه انحنای قوس ( $\theta$ ) موجب کاهش ضریب آبگذری می‌شود.

۵. تعیین ارتفاع کل جریان بر روی سرریز:

$$H_0 = Y - P$$

۶. ضخامت دیوار سرریز را برابر  $t = 0.06P$  در نظر بگیرید.

۷. تعیین نسبت  $H_0/P$ .

۸. تعیین طول مؤثر سرریز ( $L_c$ ) به صورت رابطه‌ای بر اساس زاویه انحنای سرریز ( $\theta$ ). توجه شود که مقادیر عرض سرریز ( $W$ ) و ضخامت دیوار سرریز ( $t$ ) به ترتیب در گام‌های ۳ و ۶ تعیین شده بود.

$$L_c = \left( \frac{W}{2 \sin(\theta/2)} + \frac{t}{2} \right) \theta = f_1(\theta)$$

۹. تعیین ضریب آبگذری سرریز ( $C_d$ ) به صورت رابطه‌ای بر اساس  $\theta$  با استفاده از معادله (۱۰). توجه شود که نسبت  $H_0/P$  در گام ۷ تعیین شده بود.

$$C_d = f_2(\theta)$$

۱۰. تعیین زاویه انحنای سرریز ( $\theta$ ) با حل معادله (۱). توجه شود که مقادیر دبی طراحی ( $Q$ ) و بار هیدرولیکی کل روی سرریز ( $H_0$ )، بترتیب در گام‌های ۱ و ۵ تعیین شده بود، همچنین طول مؤثر سرریز ( $L_c$ ) و ضریب آبگذری ( $C_d$ ) نیز به ترتیب در گام‌های ۸ و ۹ به صورت تابعی از  $\theta$  بیان شده بود، بنابراین تنها مجهول باقی‌مانده در معادله (۱) زاویه انحنای سرریز ( $\theta$ ) است که برای حل آن می‌توان از روش‌های محاسبات عددی همچون روش نصف کردن بهره گرفت (چاپرا و کانال<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰).

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2gH_0}^{1.5}$$

$$\Rightarrow Q - \left( \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2gH_0}^{1.5} \right) = 0$$

$$\Rightarrow f(\theta) = 0$$

با انجام ۱۰ گام فوق، پارامترهای هندسی سرریز شامل ارتفاع ( $P$ )، عرض ( $W$ )، ضخامت دیواره ( $t$ ) و در نهایت زاویه انحنای سرریز ( $\theta$ ) تعیین می‌شوند.

<sup>۱</sup> - Chapra and Canale

ضخامت تاج سرریز  $t$   
زاویه انحنای قوس  $\theta$   
عرض سرریز  $W$

بر اساس نتایج و محدودیت‌های این پژوهش، روشی  
برای طراحی سرریزهای قوسی قرار گرفته در داخل مخزن  
ارائه شده است.

## ۷- مراجع

- [1] Ramamurthy, A. S; Bidya S. P; and Subramanya, K; "Discharge measurement structures". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 103, No. 12, 1977, pp: 1431-1441.
- [2] Eli, R. N; "V-notch weir calibration using new parameters". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 103, No. 12, 1986, pp: 321-325.
- [3] Bos, M. G; "Discharge measurement structures". International Institute For Land Reclamation and Improvement, Wageningen, the Netherlands, 1976.
- [4] Balachandar, R; and Ramamurthy, A. S; "A note on circular sharp-crested weirs". Journal of civil Engineering, Vol. 18, No. 5, 1991, pp: 881-885.
- [5] Vischer, D; "Recent developments in spillway design". Journal of Water Power and Dam Construction, Vol. 40, No. 1, 1988, pp: 10-15.
- [6] Hanger, W. H; and Schwalt, "Broad-crested weir". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 120, No. 2, 1994, pp: 13-27.
- [7] French, R. H; "Open channel hydraulic". McGraw-Hill book Co., New York, 1986.
- [8] Villemonte J. R; "Submerged weir discharge studies". Engineering News Record, Vol. 139, No. 26, 1947, pp: 54-56.
- [9] Wu, S; and Rajaratnam, N; "Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs". American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 7, 1996, pp: 412-414.
- [10] Rehbock, T; Discussion of "Precise Weir measurements" by Schoder, E. W; and Turner K. B; Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 93, No. 1, 1929, pp: 999-1110.
- [11] Kandaswamy, P. K; and Rouse, H; "Characteristics of flow over terminal weirs and sills". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 83, No. 4, 1957, pp: 1-13.

## ۶- قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی دفتر پژوهش‌های کاربردی  
شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران که مولفین را در  
انجام این پژوهش، تحت پروژه تحقیقاتی با کد RIV4-91042  
یاری رسانده‌اند، قدردانی می‌شود.

## ۶- واژگان لاتین

ضریب آبگذری  $C_d$   
ارتفاع پایین‌دست سرریز  $D$   
تراز کانال دسترسی  $EL_{Cha}$   
بیشینه تراز آب مخزن  $EL_{Res}$   
کارایی  $\varepsilon$   
شتاب ثقل  $g$   
بار هیدرولیکی کل در پایین‌دست سرریز  $H_d$   
بار هیدرولیکی کل در بالادست سرریز  $H_0$   
ارتفاع پشته جریان  $K$   
طول مؤثر تاج  $L_c$   
لزجت دینامیکی سیال  $\mu$   
ارتفاع بالادست سرریز  $P$   
دبی  $Q$   
شعاع قوس  $R$   
جرم مخصوص سیال  $\rho$   
نسبت طول تار پایینی تاج سرریز به عرض کانال  $S$   
فاکتور تعیین‌کننده شکل تاج  $S_e$   
شیب کف  $S_0$   
ضریب کشش سطحی سیال  $\sigma$

- [12] Kindsvater, C. E; and Carter, R. W; "Discharge characteristics of rectangular thin plate weirs". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 33, No. 6, 1957, pp: 1-36.
- [13] Swamee, K. P; "Generalized rectangular weir equation". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 8, 1988, pp: 945-949.
- [14] Aydin, I. "Flow Measurement and Instruction". Journal of Hydraulic Research, 2011, pp: 144-151.
- [15] Sarginson, E. j; "The influence of surface tension on weir flow". Journal of Hydraulic Research, Vol. 4, No. 10, 1972, pp: 431-446.
- [16] RangaRaju, K. G; and Asawa, G. L; "Viscosity and surface tension effects on weir flow". American Society of Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 103, No. 10, 1977, pp: 1227-1231.
- [17] Gill, M. A; "Flow measurement by triangular broad-crested weir". Journal of Water Power and Dam Construction, 1985, pp: 47-49.
- [18] Ghodsian, M; "Viscosity and surface tension effects on rectangular weir flow". International Journal of Engineering Science, Iran University of Science & Technology. Vol. 9, No. 4, 1988, pp: 111-117.
- [19] Henderson, F. M; "Open channel flow" Macmillan publishing Co., New York, 1996.
- [20] ASCE; "Hydraulic modeling: Concepts and practice". Manual 97, American Society of Civil Engineering, Reston, Va, United States, 2000.
- [21] Borghei, S. M; Vatannia, Z; Ghodsian, M; and Jalili, M. R; "Oblique rectangular sharp-crested weir". Proceedings of the Institution of Civil Engineering (ICE), Water and Maritime Engineering, Vol. 156, 2003, pp: 185-191.
- [22] Crookston, B. M; and Tullis, B. P; "Arced Labyrinth Weirs". American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 138, No. 6, 2012, pp: 555-562.
- [23] Crookston, B. M; and Tullis, B. P; "Discharge Efficiency of Reservoir-Application-Specific Labyrinth Weirs". American Society of Civil Engineering, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 138, No. 6, 2012, pp: 564-568.
- [24] Chapra, C. S; and Canale, P. R; "Numerical Methods for Engineers". McGraw-Hill, 6<sup>th</sup> Edition, 2010.

# Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of Arced Weirs

Y. Sangsefidi<sup>1</sup>, M. Mehraein<sup>2</sup>, M. Ghodsian<sup>3\*</sup>

1- M.Sc. of Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering., Kharazmi University

3- Professor of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

ghods@modares.ac.ir

## Abstract:

Weirs have important roles in dam safety and should spill floods with high return period. The designers enhance the width of the weirs to increase the discharge capacity. In some cases, this procedure has topography and economic limitations. Arced weirs can be considered as an alternative. In plan-view, arced weir is a part of a circle that increases the crest length for a given channel width that increases the flow capacity for similar heads. This structure is recommended also for modification and increasing the capacity of the existing spillways. In this paper, the hydraulic performance of arced weirs located in a reservoir has been studied experimentally. In the first step, dimensionless parameters affecting the performance of arced weirs is introduced using Buckingham  $\pi$  theorem. Then effect of arc angle ( $\theta$ ) and head water ratio ( $H_0/P$ ) on hydraulic performance of arced weirs was experimentally investigated and hydraulic performance of the tested arced weir geometries was compared with a linear configuration. For this purpose, arches with different radius of curvature from linear to semi-circular configurations ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) and various head water ratio ( $0.4 \leq H_0/P \leq 1.6$ ) were studied. To simulate reservoir conditions, a reservoir simulator was designed and built. Laboratory observations show that the converging of flow over an arced weir causes a locally bulge in the downstream of the weir. This phenomenon was named as flow mound. Results show that arc angle ( $\theta$ ) and head water ratio ( $H_0/P$ ) have strong effect on the flow mound and by increasing these parameters the mound height increases. The head-discharge relationship for arced weirs was derived using general form of the rectangular weir equation. Data from physical models were used to determine discharge and upstream head for the flat crested weirs installed in the reservoir. From discharge curves, it was found that by increasing the weir angle, leads to increasing the crest length for a given channel width, flow capacity increases for a similar upstream head. Discharge coefficients as a function of  $H_0/P$  for arced weirs are also presented and compared with linear configuration. The results show that with increasing  $H_0/P$ , discharge coefficient is declined for each configuration. Also with increasing  $\theta$ , that leads to greater convergence of flow passing over the weirs, discharge coefficient decreases. Efficiency parameter is defined as the ratio of discharge of arced weir to that of liner weir with the same width. From efficiency curves indicates that the semi-circular weir can improve efficiency up to about 45%. However for all tested weirs, efficiency decreases with increasing  $H_0/P$  and it reaches to 1. Finally, based on the results and limitations of this study, a method is presented for the design of arced weirs located in the reservoir. By using this method, the designer can find the geometric parameters of the arced weir for passing a certain flow rate in a given hydraulic head.

**Keywords:** Dam, arced weir, head water ratio, discharge, discharge coefficient.