

بررسی آثار دیوارهای هادی جریان بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی

یوسف سنگ سفیدی^۱، مسعود قدسیان^{۲*}

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده آب، دانشگاه تربیت مدرس

ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۳/۸]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۱/۷]

چکیده

استفاده از سرریزهای کنگره‌ای به عنوان یک راه مؤثر و اقتصادی برای افزایش ظرفیت آبگذری مطرح است. قرارگیری سیکل‌های سرریز کنگره‌ای روی قوسی از یک دایره می‌تواند بهبود جهت‌گیری سیکل‌های سرریز نسبت به جریان ورودی و نیز افزایش طول تاج بازای یک عرض معین را سبب گردد. این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی آثار دیوارهای هادی جریان بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای قوسی می‌پردازد. ضمن بررسی آثار پارامترهای نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز (H/P)، زاویه دیوار جانبی سرریز (α) و زاویه انحنا (θ) بر ضریب آبگذری و کارایی سرریزهای کنگره‌ای قوسی، آثار زاویه بین دیوارهای هادی جریان (θ') نیز بر این مهم مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که قوسی‌کردن سرریز کنگره‌ای می‌تواند بهبود کارایی آن را سبب شود. علی‌ایحال با افزایش بار هیدرولیکی، کارایی سرریزهای کنگره‌ای قوسی کاهش می‌یابد. در مقادیر پایین زاویه انحنا، انتخاب مناسب زاویه بین دیوارهای هادی جریان می‌تواند تا حدود ۲۰ درصد کارایی سرریز را بهبود بخشد. لیکن آثار این پارامتر در مقادیر بالای زاویه انحنا قابل صرف‌نظر کردن است.

واژگان کلیدی: ظرفیت آبگذری، دیوارهای هادی جریان، ضریب آبگذری، کارایی، سرریز کنگره‌ای قوسی.

۱- مقدمه

بودن ظرفیت تخلیه سرریز آنها بوده است [1]. در شرایطی که محل احداث سرریز با محدودیت در عرض و سطح آب در بالادست مواجه باشد، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای می‌تواند به عنوان یک راه‌حل مؤثر و اقتصادی مطرح شود. بدین ترتیب که با افزایش طول تاج در یک عرض مشخص، دبی بیشتری را

به دلیل نقش تعیین‌کننده سرریزها در ایمنی سدها، کارشناسان مجبور به انتخاب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا، به عنوان سیلاب طراحی سرریزها هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شکست حدود ۳۰ درصد سدها در نتیجه ناکافی

بازای بار هیدرولیکی یکسان از خود عبور می دهند.

نخستین پژوهش‌های جدی برای تبیین رفتار سرریزهای کنگره‌ای توسط هی و تیلور (۱۹۷۰) به انجام رسید [2]. آنان برای نشان دادن عملکرد سرریزهای کنگره‌ای از نسبت دبی سرریز کنگره‌ای به دبی سرریز مستقیم استفاده کردند. دارواس (۱۹۷۱) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مدل مطالعاتی سرریزهای Woronora و Avon در استرالیا منحنی‌هایی را برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای ارائه نمود [3]. ماگالاس (۱۹۸۵) به این نتیجه رسید که دبی واقعی، به ویژه در بارهای هیدرولیکی بالا، کمتر از مقدار به دست آمده از نمودارهای دارواس (۱۹۷۱) است و با انجام اصلاحاتی، منحنی‌های طراحی جدیدی ارائه نمود [4]. نمودارهای ماگالاس (۱۹۸۵) پس از چند سال و با اعمال تغییراتی جزئی توسط ماگالاس و لورنا (۱۹۸۹) ارائه شد [5]. لاکس و هینچلیف (۱۹۸۵) با استفاده از آنالیز ابعادی و انجام آزمایش‌ها، نمودارها و روش طراحی جدیدی را ارائه کردند [6]. تولیس و همکاران (۱۹۹۵) اعلام کردند که دبی یک سرریز کنگره‌ای تابعی از بار هیدرولیکی کل، طول مؤثر تاج و ضریب آبگذری بوده که ضریب آبگذری خود به بار هیدرولیکی کل، ارتفاع سرریز، شکل سرریز در پلان، زاویه دیوار جانبی سرریز، ضخامت دیوار و شکل تاج وابسته است [7]. آنان ضمن بررسی آثار نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز (H_o/P) و زاویه دیوار جانبی سرریز (α) بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای، نمودارهای جدیدی ارائه دادند.

قدسیان و شنوایی (۲۰۰۰) تأثیر طول تاج روی ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای را بررسی کردند [8]. تأثیر شکل تاج بر روی ضریب آبگذری نیز توسط شنوایی و قدسیان (۲۰۰۱) بررسی شد [9]. قدسیان و همکاران (۲۰۰۱) ضمن مطالعه جریان عبوری از سرریزهای کنگره‌ای با پلان نیم‌دایره‌ای روشی را برای طراحی این نوع سرریزها ارائه نمودند [10]. ملو و همکاران (۲۰۰۲)، روش ماگالاس و لورنا (۱۹۸۹) را برای سرریزهای کنگره‌ای قرار گرفته در یک کانال با دیواره‌های همگرا توسعه دادند [11]. آنان این امر را بعنوان راهی برای

بهبود جهت‌گیری جریان ورودی به سرریز معرفی کردند. فالوی (۲۰۰۳) ضمن مروری بر مهمترین روش‌های طراحی ارائه شده تا آن زمان، اعلام کرد که رابطه ارائه شده برای استغراق سرریزهای خطی توسط ویل مونت (۱۹۴۷) را می‌توان برای سرریزهای کنگره‌ای نیز بکار برد [12]. لیکن نتایج مطالعات تولیس و همکاران (۲۰۰۷) نشان می‌دهد که رفتار سرریزهای کنگره‌ای در شرایط مستغرق متفاوت از رفتار سرریز خطی است [13]. آنان روابطی را نیز برای محاسبه دبی سرریزهای کنگره‌ای مستغرق ارائه دادند.

قدسیان (۲۰۰۹) و کومار و همکاران (۲۰۱۱) روابطی را برای تخمین ظرفیت آبگذری سرریزهای کنگره‌ای مثلثی ارائه دادند [14, 15]. کارلو و همکاران (۲۰۱۲) رابطه ارائه شده توسط قدسیان (۲۰۰۹) را برای شکل تاج لبه‌تیز اصلاح کردند [16]. خوده و همکاران (۲۰۱۲) دسته‌ای دیگر از منحنی‌های طراحی را در محدوده وسیعتری از پارامترهای مورد پژوهش توسط تولیس و همکاران (۱۹۹۵) ارائه دادند [17]. اژدری مقدم و جعفری ندوشن (۲۰۱۳) اثر طول دماغه بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای را بررسی کردند [18]. تحقیقات کورکستون و تولیس (۲۰۱۳-a) از برتری عملکرد تاج نیم‌دایره‌ای نسبت به ربع‌دایره‌ای حکایت داشت [19]. گفتنی است که روش طراحی ارائه شده توسط آنان بعلت درستی آزمایشی با داده‌های مدل‌های مطالعاتی ۱۳ سد مختلف و حصول متوسط خطای کمتر از ۳ درصد، روش نسبتاً دقیقی در زمینه طراحی سرریزهای کنگره‌ای خطی محسوب می‌شود [20]. پژوهشگران نامبرده در تحقیقاتی دیگر به مطالعه چگونگی هواگیری، نوسانات و تداخل لایه‌های جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای پرداختند [21, 22]. ساویج و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که روابط طراحی ارائه شده توسط کورکستون و تولیس (۲۰۱۳-a) برای بارهای هیدرولیکی بالا تا $H_o/P = 2$ نیز معتبر است [23].

پژوهش‌های گفته شده همگی مربوط به سرریزهای کنگره‌ای خطی قرار گرفته داخل کانال است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که با وجود ساخت سرریز کنگره‌ای

که Q دبی، C_d ضریب آبگذری، L طول تاج، g شتاب ثقل و H_0 بار هیدرولیکی کل در بالادست است. پارامترهای مستقل مؤثر بر ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای قوسی را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$C_d = f(H_0, P, \alpha, \theta, m, W, N, t, A, S_e, g, \rho, \mu, \sigma) \quad (2)$$

که f نماد تابع، P ارتفاع تاج، α زاویه دیوار جانبی سرریز با راستای جریان در پایین دست، θ زاویه انحنا سرریز، m پارامتر تعیین کننده زاویه بین دیوارهای هادی جریان، W عرض کل، N تعداد سیکل، t ضخامت دیواره، A طول وجه داخلی دماغه، S_e فاکتور تعیین کننده شکل تاج، ρ جرم مخصوص، μ لزجت دینامیکی و σ ضریب کشش سطحی سیال است. شکل (۱) پارامترهای هندسی و هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی را نشان می‌دهد. روابط بین پارامترهای هندسی این سرریزها نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل ۱. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی:

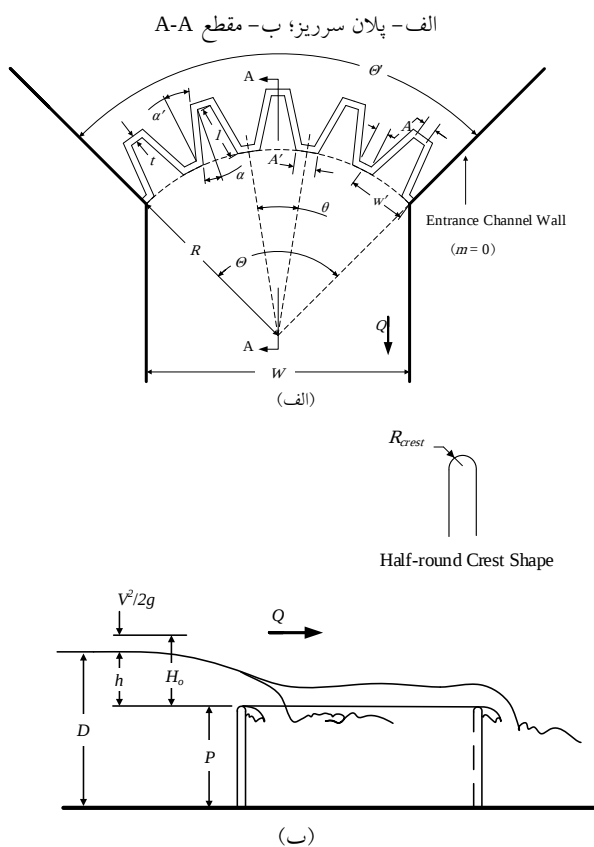


Fig. 1. Geometric and hydraulic parameters of an arced labyrinth weir: right) Plan view, left) section view A-A

قوسی در سدهای Avon در استرالیا (۱۹۷۱)، Weatherford در آمریکا (۱۹۹۲) و Kizilcapinar در ترکیه (۱۹۹۶)، لیکن پژوهش‌های در این عرصه در مراحل مقدماتی است. کورکستون و تولیس (۲۰۱۲) و سنگ سفیدی و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد سرریزهای کنگره‌ای قوسی را به ترتیب در داخل مخزن و کانال بررسی کردند [24, 25]. این پژوهشگران عملکرد بهتر سرریزهای کنگره‌ای قوسی را نتیجه جهت‌گیری مناسب‌تر سیکل‌های سرریز نسبت به جریان ورودی عنوان کردند. کریستنسن (۲۰۱۳) اعلام کرد که در صورت رعایت تشابه هندسی بین سیکل‌ها، برای مقادیر بزرگتر از ۵، تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای قوسی بر ضریب آبگذری تأثیر چندانی نخواهد داشت [26]. نتایج پژوهش‌های سنگ سفیدی و همکاران (۲۰۱۵) نشان می‌دهد که در شرایط استغراق موضعی شدید، پایین بردن تراز بستر سرریز کنگره‌ای قوسی می‌تواند بهبود کارایی آن را موجب شود [27].

کومار و همکاران (۲۰۱۳) با انجام پژوهش‌هایی روی سرریزهای قوسی ساده قرار گرفته داخل کانال، به این نتیجه رسیدند که قوسی کردن سرریز می‌تواند افزایش ظرفیت آبگذری آن را در پی داشته باشد [28]. پژوهش‌های سنگ سفیدی و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان می‌دهد که استفاده از سرریز قوسی ساده داخل مخزن می‌تواند کارایی را تا حدود ۵۰ درصد بهبود بخشد [29].

نظر به مزایای بالای سرریزهای کنگره‌ای قوسی و اینکه پژوهش‌ها در این عرصه در مراحل اولیه است، این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی می‌پردازد. در این راستا بررسی آثار پارامترهای نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز (H_0/P)، زاویه دیوار جانبی سرریز (α)، زاویه انحنا (θ) و زاویه بین دیوارهای هادی جریان (θ') بر ضریب آبگذری و کارایی این سرریزها تحقیق شده است.

۲- آنالیز ابعادی

رابطه دبی-اشل سرریزهای کنگره‌ای قوسی بر اساس

معادله زیر تعیین شده است [24]:

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

جدول ۱. روابط بین پارامترهای هندسی سرریز کنگره‌ای قوسی

$w = \frac{W}{N}$	,	$\theta = \frac{\Theta}{N}$
$\Theta' = \Theta + m(180 - \Theta)$	,	$\alpha' = \alpha + \frac{\theta}{2}$
$R = \frac{W}{2 \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)}$	,	$w' = 2R \left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$
$A' = A + 2t \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\alpha'}{2}\right)$	,	$l = \frac{R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{A}{2} - \frac{A'}{2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sin(\alpha)}$
$L_{cycle} = A + A' + 2l$	,	$L = L_{cycle} \times N$

Table 1. Relationships between the geometric parameters of arced labyrinth weirs

مطابق با شکل و جدول یاد شده، پارامتر m می‌تواند در محدوده $0 \leq m \leq 1$ انتخاب شود. مقدار $m = 0$ بمعنای برابری زاویه بین دیوارهای هادی جریان با زاویه انحنا سرریز ($\Theta' = \Theta$) و در نتیجه یکنواختی مساحت مخزن در سیکل‌های بالادست است. از طرفی مقدار $m = 1$ بیانگر قرارگیری سرریز داخل مخزن ($\Theta' = 180^\circ$) است. با استفاده از آنالیز ابعادی، معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [30]:

$$C_d = \Phi\left(R, W, \frac{H_o}{P}, \frac{w}{P}, \frac{t}{P}, \frac{A}{t}, \alpha, \Theta, m, N, S_e\right) \quad (3)$$

که Φ نماد تابع دیگر و $R = \rho V D / \mu$ و $W = (\rho D / \sigma)^{0.5} V$ به ترتیب اعداد بدون بعد رینولدز و وبر هستند. از آنجاییکه در آزمایش‌های این پژوهش جریان در محدوده آشفته قرار دارد ($10000 < R < 300000$)، می‌توان از اثر نیروی لزجت صرف‌نظر نمود [31, 32]. همچنین برای داده‌های اندازه‌گیری شده $h > 3 \text{ cm}$ است، پس می‌توان از اثر کشش سطحی چشم‌پوشی نمود [33, 34]. از آنجاییکه در طول تحقیق $w/P = 2$, $t/P = 0.08$, $A/t = 2$ و $N = 5$ و شکل تاج نیم‌دایره‌ای برای همه سرریزها لحاظ شد، پس این پارامترها نیز از معادله (۳) حذف می‌شود. در نتیجه:

$$C_d = \Phi\left(\frac{H_o}{P}, \alpha, \Theta, m\right) \quad (4)$$

در ادامه آثار پارامترهای فوق بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی تشریح شده است.

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

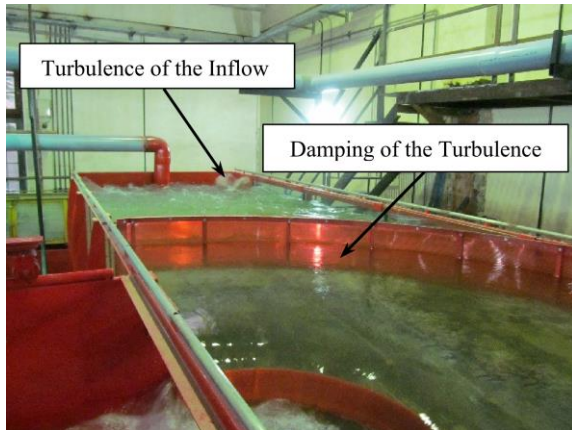
آزمایش‌های این پژوهش، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس و داخل یک فلوم آزمایشگاهی مستقیم با طول ۱۰ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر انجام پذیرفت. مطابق با شکل (۲)، برای شبیه‌سازی شرایط مخزن، شبیه‌ساز مخزن طراحی و نسبت به نصب آن در وجه جانبی فلوم اقدام شد.

مطابق با شکل (۲) جریان از دو سمت، توسط دو پمپ با مشخصات یکسان وارد فلوم می‌شود. جریان ورودی ابتدا از زیر شبیه‌ساز با دیواره‌های قرمز رنگ عبور کرده و از طریق سوراخ نیم‌دایره‌ای واقع در دیواره افقی به آن وارد می‌شود [مسیر ① و ② در شکل (۲-ب)]. پس از حرکت روی دیواره افقی [مسیر ③ در شکل (۲-ب)]، جریان از طریق فاصله مابین دیواره عمودی و میز استقرار سرریز (صفحه دودی رنگ) بالا می‌آید [مسیر ④ در شکل (۲-ب)]. در نهایت، جریان بر روی میز استقرار حرکت کرده و از طریق کانال تخلیه به پایین دست منتقل می‌شود [مسیر ⑤ در شکل (۲-ب)]. لازم به ذکر است که تمامی صفحات مورد استفاده در شبیه‌ساز (شامل دیواره‌های افقی و عمودی و میز استقرار) در پلان به شکل نیم‌دایره‌ای و فاقد تخلخل است.

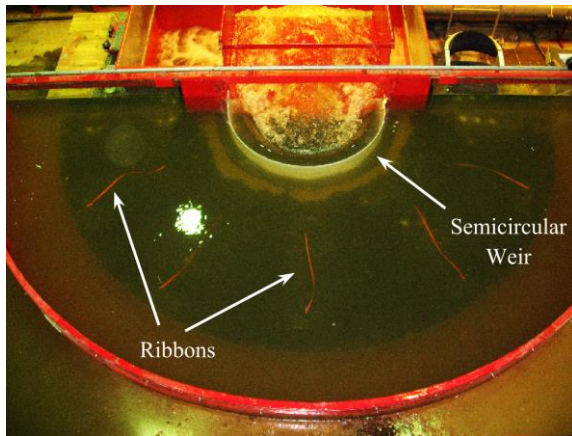
مطابق با شکل (۳)، برای ارزیابی توانایی شبیه‌ساز در ایجاد شرایط مخزن، بررسی جریان در سرریز نیم‌دایره‌ای در دستور کار قرار گرفت. در شکل مورد اشاره، توانایی شبیه‌ساز در آرام ساختن جریان ورودی و ایجاد جریان شعاعی و همه‌جانبه بسمت سرریز به تصویر کشیده شده است. ضمناً اندازه‌گیری عمق جریان بر روی یک نیم‌دایره فرضی در فاصله $4P = 40 \text{ cm}$ بالادست سرریز [35]، از یکنواختی جریان (بیشینه ۷ درصد اختلاف بین نقاط مختلف) حکایت داشت. جزئیات بیشتر در

شکل ۳. توانایی شبیه‌ساز در ایجاد شرایط مخزن:

الف- آرام‌سازی جریان ورودی؛ ب- ایجاد جریان شعاعی



(الف)



(ب)

Fig. 3. Applicability of the simulator to provide the reservoir conditions: up) damping the inflow, (b) creating a radial flow

سرریزهای مورد مطالعه با استفاده از صفحات پلکسی گلاس ساخته شدند. عرض و ارتفاع سرریزها بترتیب $W = 1\text{ m}$ و $P = 0.1\text{ m}$ لحاظ شد. ضمناً برای سرریزهای کنگره‌ای، پلان دوزنقه‌ای، $N = 5$ ، $t = 8\text{ mm}$ و $A = 16\text{ mm}$ در نظر گرفته شد.

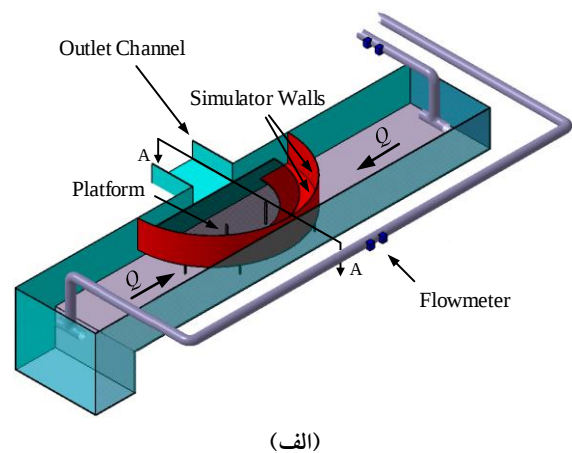
اندازه‌گیری دبی (35 – 120 l/s) با استفاده از دبی‌سنج آلتراسونیک با دقت $\pm 0.5\%$ و بصورت میانگین عددی در طول ۵ تا ۷ دقیقه انجام پذیرفت. عمق جریان با استفاده از یک عمق‌سنج دیجیتالی با دقت 0.1 mm تعیین شد. سرریزها در تمامی آزمایش‌ها، بصورت آزاد عمل کرده و داده‌ها در حالت جریان دائمی جمع‌آوری شدند.

خصوص شبیه‌ساز مورد استفاده توسط سنگ سفیدی و همکاران (۲۰۱۸) ارائه شده است [36].

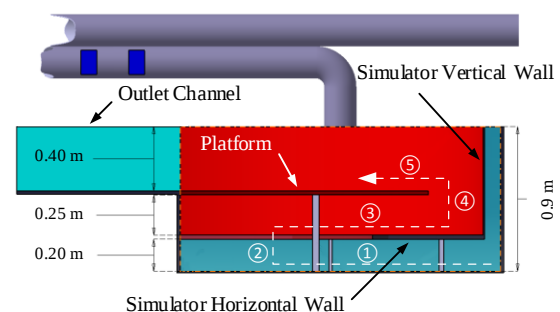
در این پژوهش، ۴ هندسه سرریز با لحاظ دیوارهای هادی با زوایای مختلف و تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت ($0.3 \leq H_o/P \leq 0.9$) مورد آزمایش قرار گرفتند (مجموعاً تعداد ۱۳۲ آزمایش). جدول (۲) هندسه سرریزهای مورد آزمایش و محدوده تغییرات پارامترهای جریان را نشان می‌دهد.

شکل ۲. شمای تجهیزات آزمایشگاهی:

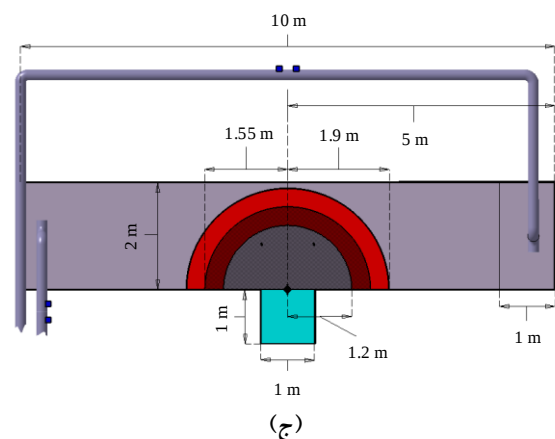
الف- نمای سه بعدی؛ ب- مقطع A-A؛ ج- پلان



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 2. Schematic view of the experimental setup: up) 3D view, middle) section view A-A, down) plan view

رفته و سرریز به صورت کامل مستغرق می شود [22].

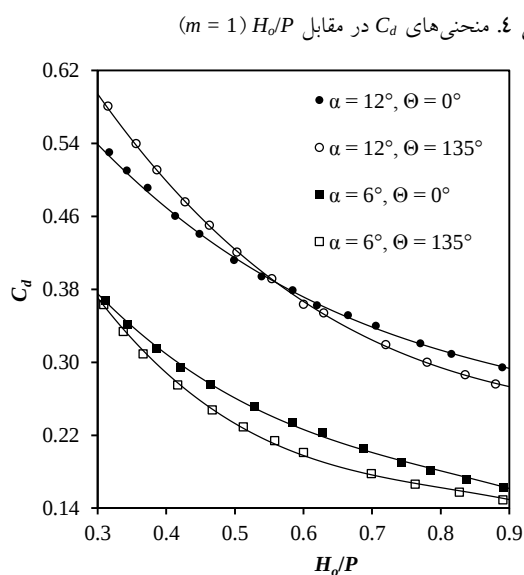
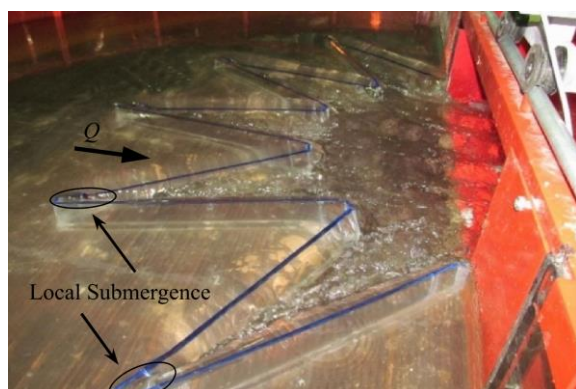


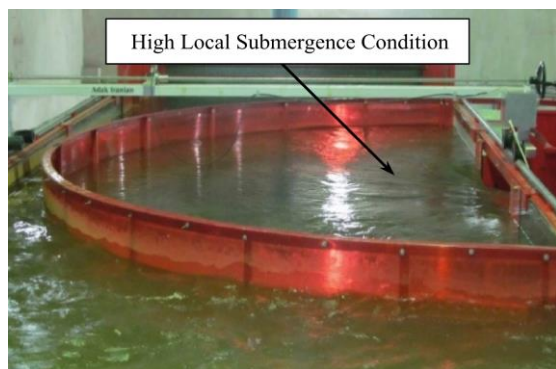
Fig. 4. Variations of C_d versus H_o/P ($m = 1$)

شکل ۵. تغییرات ابعاد استغراق موضعی (مدل شماره ۴، $m = 1$):

الف - $H_o/P = 0.35$; ب - $H_o/P = 1.05$



(الف)



(ب)

Fig. 5. Variations of the size of local submergence region (model 4, $m = 1$): up) $H_o/P = 0.35$, down) $H_o/P = 1.05$

جدول (۲) مشخصات سرریزهای مورد آزمایش

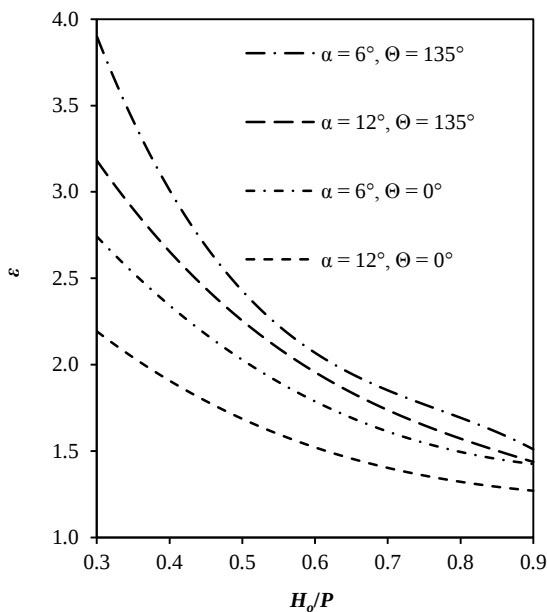
Model. No.	α (°)	θ (°)	m	H_o/P	Q (l/s)	Exp. Num.
1	6	0	0	0.32 - 0.88	44 - 111	15
			0.5	0.32 - 0.88	47 - 103	14
			1	0.31 - 0.89	45 - 97	13
2	12	0	0	0.32 - 0.88	36 - 91	14
			0.5	0.31 - 0.88	35 - 94	12
			1	0.32 - 0.89	35 - 91	14
3	6	135	0	0.31 - 0.88	62 - 120	12
			1	0.31 - 0.89	60 - 120	12
4	12	135	0	0.31 - 0.85	50 - 110	13
			1	0.32 - 0.88	51 - 113	13

Table 2. Specifications of Tested Models

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- آثار بار هیدرولیکی

شکل (۴) منحنی های ضریب آبگذری C_d هندسه مورد آزمایش در مقابل H_o/P و بازای $m = 1$ را نشان می دهد. از شکل مورد اشاره می توان دریافت که در محدوده مورد تحقیق ($H_o/P \geq 0.3$)، ضریب آبگذری سرریزهای کنگره ای با افزایش بار هیدرولیکی کاهش می یابد. در توجیه این شکل عملکرد باید گفت که مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی، همگرایی و برخورد لایه های جریان عبوری از سرریزهای کنگره ای، سبب شکل گیری یک ناحیه تداخل (با شروع از رئوس بالادست سرریز) می شود. با افزایش بار هیدرولیکی، چنانچه ظرفیت آبگذری سیکل های بالادست از ظرفیت آبگذری سیکل های پایین دست و کانال تخلیه فزونی یابد، بخشی از سیکل های پایین دست که در مجاورت با رئوس بالادست هستند، غوطه ور شده و سرریز بصورت موضعی مستغرق می شود (شکل ۵). باید توجه داشت که ناحیه استغراق موضعی متفاوت از استغراق معمول بوده که در آن سطح پایاب از تراز تاج سرریز بالاتر

شکل ۶. منحنی‌های ε در مقابل H_o/P ($m = 1$)Fig. 6. Variations of ε versus H_o/P ($m = 1$)

۴-۲- آثار زاویه انحنا

از شکل (۴) می‌توان نتیجه گرفت که در بارهای هیدرولیکی پایین، افزایش زاویه انحنا می‌تواند بهبود جهت‌گیری سیکل‌های سرریز کنگره‌ای نسبت به جریان ورودی و افزایش ضریب آبگذری را در پی داشته باشد. در مقابل، در بارهای هیدرولیکی بالا، زاویه انحنا با ضریب آبگذری رابطه معکوس می‌یابد. با افزایش زاویه انحنا، مساحت (و ظرفیت آبگذری) سیکل‌های بالادست فزونی می‌یابد ($\alpha' > \alpha$). پس جریان بیشتری به داخل سیکل‌های پایین دست تخلیه می‌شود. این امر افزایش استغراق موضعی بعنوان عامل کاهنده ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت. کورکستون و تولیس (۲۰۱۲) نتایج مشابهی در خصوص استغراق موضعی گزارش کردند [24].

شکل (۴) همچنین نشان می‌دهد که برتری ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای قوسی به نوع خطی، بستگی به مقدار H_o/P دارد؛ بدین ترتیب که با افزایش بار هیدرولیکی، برتری طرح قوسی به خطی به مقادیر بالای α (تقلیل آثار عوامل کاهنده ضریب آبگذری) محدود می‌شود.

شکل (۵) بیانگر رشد ابعاد ناحیه استغراق موضعی با افزایش بار هیدرولیکی است. با رشد ناحیه استغراق موضعی، مقطع کنترل سرریز بسمت پایین دست حرکت کرده و این پدیده تا استغراق کامل سرریز ادامه خواهد یافت.

لازم به ذکر است که داده‌های اندازه‌گیری شده برای $m \neq 1$ روندی مشابه با آنچه که در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است را نشان می‌دهند؛ پس از ارائه آنها در این بخش صرف نظر شده است.

با توجه به چگونگی تغییرات C_d با H_o/P ، معادله زیر برای تعیین ضریب آبگذری سرریزهای مورد مطالعه انتخاب شد [24]:

$$C_d = a_1 \left(\frac{H_o}{P} \right)^3 + a_2 \left(\frac{H_o}{P} \right)^2 + a_3 \left(\frac{H_o}{P} \right) + a_4 \quad (5)$$

که a_1 ، a_2 ، a_3 و a_4 ثابت‌های تجربی بوده که با استفاده از روش حداقل مربعات تعیین شدند.

جدول (۳) مقدار ثابت‌های معادله (۵) را به همراه ضریب تعیین (R^2)، خطای متوسط و خطای حداکثر نشان می‌دهد. مقادیر بیشینه خطای ۱/۸ درصد و $R^2 > 0.998$ از هماهنگی خوب معادله ارائه شده با داده‌های اندازه‌گیری شده حکایت دارند. مفهوم کارایی (ε) بدین این معنا است که سرریز بتواند بازای بار هیدرولیکی و عرض ثابت دبی بیشتری را از خود عبور دهد. در این پژوهش، کارایی مطابق با معادله (۶) معرفی و ارزیابی شده است [19]:

$$\varepsilon = C_d \times \frac{L}{W} \quad (6)$$

شکل (۶) منحنی‌های کارایی را بازای $m = 1$ نشان می‌دهد. به دلیل روند نزولی ضریب آبگذری با H_o/P که پیشتر در شکل (۴) بدان اشاره شده بود، کارایی سرریزهای کنگره‌ای با افزایش پارامتر مورد اشاره کاهش می‌یابد.

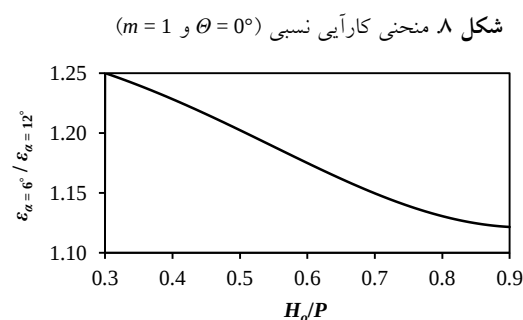
جدول ۳. ضرایب معادله (۵)

Model. No.	α (°)	θ (°)	m	a_1	a_2	a_3	a_4	R2	Error _{ave} (%)	Error _{max} (%)
1	6	0	0	-0.1967	0.7874	-1.0042	0.5975	0.9996	0.3	0.9
			0.5	-0.5938	1.5497	-1.5045	0.7033	0.9995	0.5	0.9
			1	-0.7119	1.7495	-1.6223	0.7236	0.9989	1.0	1.8
2	12	0	0	-0.378	1.2715	-1.4723	0.8923	0.9988	0.4	1.0
			0.5	-0.4839	1.4447	-1.5756	0.9069	0.9997	0.3	0.8
			1	-0.3756	1.1707	-1.3748	0.8562	0.9991	0.5	1.0
3	6	135	0	-1.3429	3.1059	-2.5437	0.8997	0.9994	0.6	1.2
			1	-1.0802	2.6367	-2.2689	0.8432	0.9991	1.0	1.6
4	12	135	0	-0.7563	2.1018	-2.1864	1.0884	0.9993	0.4	1.4
			1	-0.5450	1.7129	-1.9561	1.0417	0.9998	0.3	1.0

Table 3. Constants of Eq. (5)

[24]

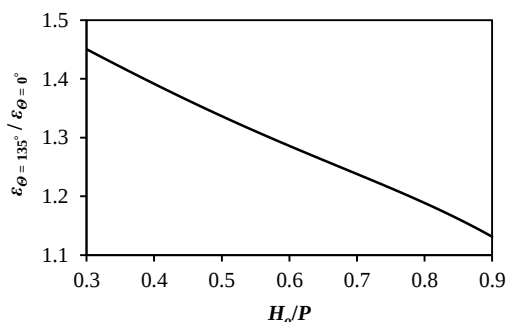
منحنی‌های کارایی نمایش داده شده در شکل (۶) از آن حکایت دارد که کاهش زاویه α می‌تواند منجر به افزایش کارایی سرریزهای کنگره‌ای قوسی شود. به عبارت دیگر افزایش طول تاج سبب جبران افت ضریب آبگذری می‌شود. گفتنی است که روندی مشابه برای سرریزهای کنگره‌ای خطی توسط کورکستون و تولیس (۲۰۱۳- α) گزارش شده است [19]. در هر حال شکل (۸) نشان می‌دهد که مزیت هیدرولیکی ناشی از کاهش α در مقادیر بالاتر H_o/P (تشدید اثرات عوامل کاهنده ضریب آبگذری) کمتر است.

Fig. 8. Relative efficiency curve ($\theta = 0^\circ$, $m = 1$)

۴-۴- آثار زاویه بین دیوارهای هادی جریان

در شکل (۹) اثرات زاویه بین دیوارهای هادی جریان بر ضریب آبگذری سرریزهای مورد مطالعه به تصویر کشیده شده است. با دقت در شکل (۹-الف) می‌توان دریافت که در مقادیر پایین H_o/P ، α و θ ، انتخاب مقادیر بالای m (توسعه سرریز به داخل مخزن) می‌تواند افزایش ضریب آبگذری را در پی داشته باشد. چراکه در چنین شرایطی خطوط جریان نزدیک شونده به

در خصوص آثار زاویه انحنا بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای باید اضافه کرد که مطابق با شکل (۶)، استفاده از طرح قوسی بدلیل افزایش طول تاج می‌تواند کارایی سرریز کنگره‌ای را حتی در بارهای هیدرولیکی بالا بهبود بخشد. علی‌احمال آنگونه که در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است، مزایای هیدرولیکی این اقدام با افزایش بار هیدرولیکی نزول می‌یابد.

شکل ۷. منحنی کارایی نسبی ($\alpha = 12^\circ$ و $m = 1$)Fig. 7. Relative efficiency curve ($\alpha = 12^\circ$, $m = 1$)

۴-۳- آثار زاویه دیوار جانبی

آنگونه که پیشتر در شکل (۴) نشان داده شده بود، برای مقادیر مختلف بار هیدرولیکی و زاویه انحنا، کاهش زاویه دیوار جانبی سرریز کنگره‌ای (α) باعث کاهش ضریب آبگذری می‌گردد. در توجیه این رفتار باید گفت که با کاهش زاویه α ، انحراف دیواره سرریز از حالت عمود بر خطوط جریان بالادست بیشتر می‌شود. ضمناً این امر باعث تنگ‌تر شدن مساحت آبگذری سیکل‌های پایین‌دست می‌شود؛ پس ابعاد ناحیه استغراق موضعی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که کورکستون و تولیس (۲۰۱۲) نتایج مشابهی در این خصوص گزارش کردند

تلاطم در سطح جریان شده و می‌تواند دلیل کاهش ضریب آبگذری باشد. در این شرایط تعبیه دیوارهای هادی جریان با زاویه‌ای برابر با زاویه انحنای سرریز ($m = 0$) سبب یکنواختی مساحت مخزن در سیکل‌های بالادست می‌گردد. این امر از طریق حذف تلاطم مورد اشاره، بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای را در پی خواهد داشت.

نمودارهای ارائه شده در شکل (۹-ج و ۹-د) نشان می‌دهند که با افزایش زاویه انحنا سرریز (θ) و در نتیجه کاهش غیریکنواختی مساحت مخزن، اثر زاویه بین دیوارهای هادی جریان (θ') بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که با زاویه $\theta = 135^\circ$ اختلاف ضرایب آبگذری در بیشینه و کمینه مقدار m از ۲ درصد تجاوز نمی‌کند.

دیوارهای کناری سرریز کنگره‌ای به حالت ایده‌آل (عمود بر تاج) نزدیک می‌باشند.

با این حال شکل (۹) نشان می‌دهد که در دامنه وسیعی از محدوده مورد پژوهش، انتخاب مقداری بزرگتر از θ برای θ' ($m > 0$) سبب کاهش ضریب آبگذری می‌شود. از شکل‌های (۹-الف و ۹-ب) می‌توان دریافت که این اختلاف در مقادیر پایین θ و بالای H_0/P قابل توجه است. در توجیه این رفتار سرریزهای کنگره‌ای باید گفت که در مقادیر پایین زاویه انحنا، جریان نزدیک شونده به سیکل‌های کناری سرریز به سرعت تغییر جهت داده و باعث می‌شود که این سیکل‌ها استغراق موضعی را زودتر تجربه کنند. مطابق با شکل (۱۰)، با افزایش بار هیدرولیکی، سیکل‌های کناری مقداری از جریان را به سیکل‌های مجاور خود منتقل می‌کنند. پس این امر سبب وقوع

شکل ۹. منحنی‌های C_d در مقابل H_0/P بازای مقادیر مختلف m : الف- مدل شماره ۱؛ ب- مدل شماره ۲؛ ج- مدل شماره ۳؛ د- مدل شماره ۴

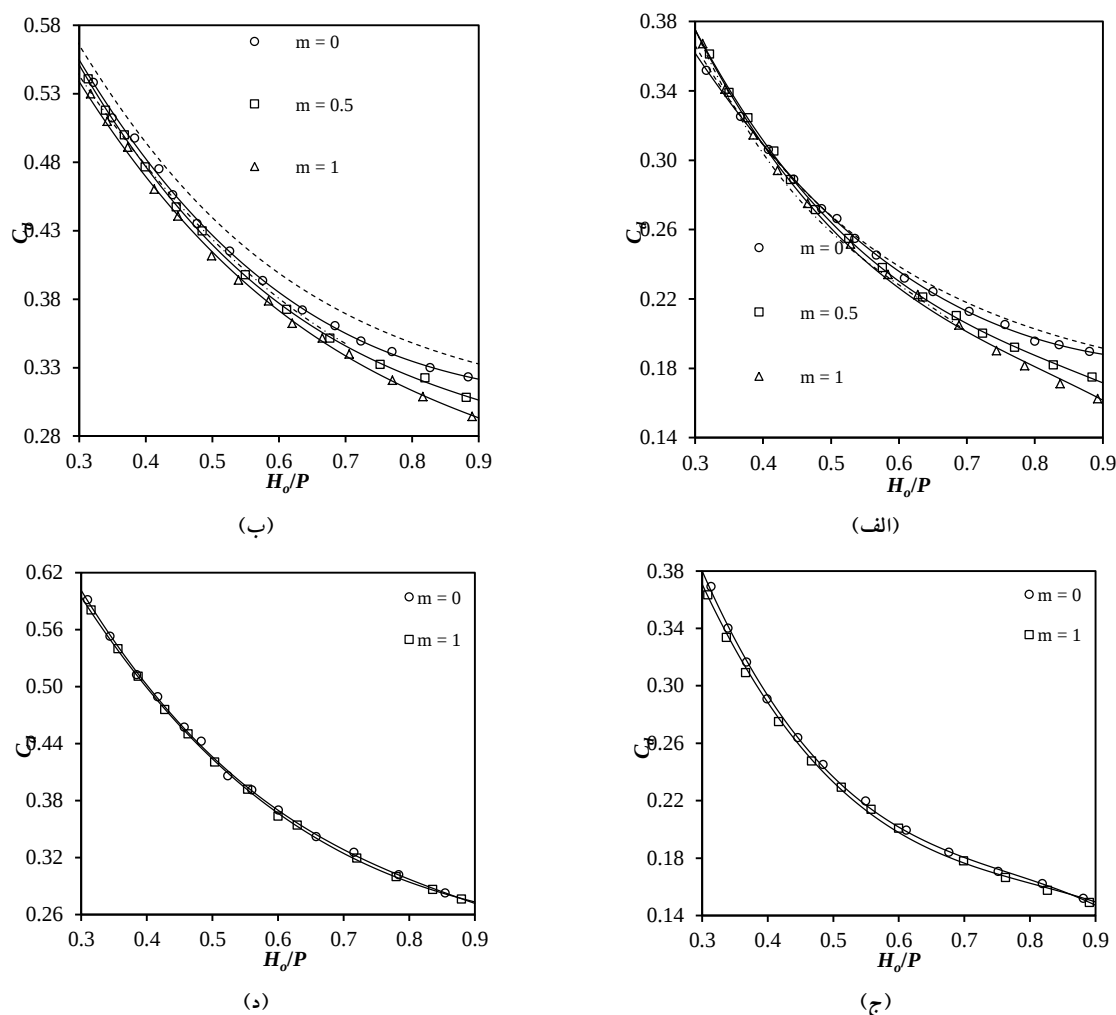


Fig. 9. Variations of C_d versus H_0/P : up-right) model 1, up-left) model 2, down-right) model 3, down-left) model 4

۵- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی آزمایشگاهی آثار دیوارهای هادی جریان بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای قوسی می‌پردازد. نتایج حاصله به شرح زیر است:

- در سرریزهای کنگره‌ای افزایش H_0/P و θ و کاهش α رشد ابعاد ناحیه استغراق موضعی را در پی خواهد داشت. ضمناً در مقادیر پایین زاویه انحناء، انتقال عرضی جریان از سیکل‌های کناری به سیکل‌های میانی سبب وقوع تلاطم در سطح جریان می‌شود.

- با افزایش H_0/P و کاهش α ضریب آبدگزی کاهش می‌یابد. در مقادیر پایین H_0/P ، افزایش θ می‌تواند افزایش C_d را باعث شود. با این حال در مقادیر بالای H_0/P ، افزایش زاویه انحناء، کاهش ضریب آبدگزی را در پی دارد.

- افزایش θ و کاهش α می‌تواند افزایش کارایی سرریز را سبب شود. ضمناً با افزایش بار هیدرولیکی، مزایای استفاده از سرریزهای کنگره‌ای قوسی کاهش می‌یابد.

- در مقادیر پایین H_0/P و α و θ ، توسعه سرریز به داخل مخزن می‌تواند سبب افزایش ضریب آبدگزی شود. لیکن در دامنه وسیعی از محدوده مورد تحقیق، انتخاب $\theta' > \theta$ کاهش ضریب آبدگزی را در پی دارد.

- تعبیه دیوارهای هادی جریان کارایی سرریز را در بارهای هیدرولیکی بالا تا حدود ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد. با این حال با افزایش θ ، اثر این اقدام بر عملکرد سرریز کنگره‌ای کاهش می‌یابد. ضمناً هر چه α کوچکتر باشد، اقدام فوق مزایا و معایب بزرگتری را بترتیب برای مقادیر بالا و پایین بار هیدرولیکی در پی خواهد داشت.

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 RIV-91042 یاری رساندند، قدردانی می‌شود.

شکل ۱۰ عملکرد نامطلوب سیکل‌های کناری

(مدل شماره ۲، $H_0/P = 0.5$ ، $m = 0$)

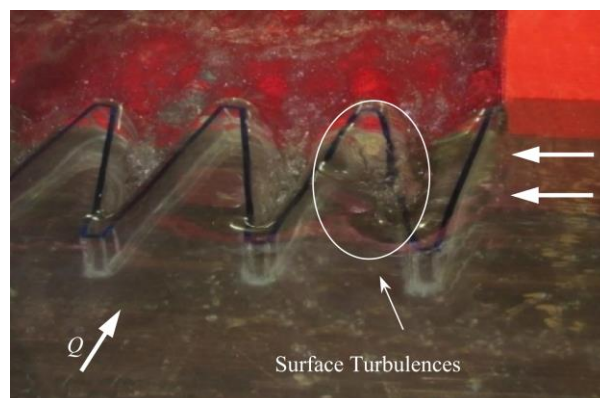


Fig. 10. Low efficiency of the side cycles (model 2, $H_0/P = 0.5$, $m = 0$)

در شکل (۹) همچنین نتایج این پژوهش با نتایج کورکستون و تولیس (۲۰۱۲، ۲۰۱۳-a) مقایسه شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که هماهنگی خوبی بین نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین وجود دارد.

شکل (۱۱) نسبت کارایی سرریز کنگره‌ای خطی در داخل کانال ($m = 0$) به مخزن ($m = 1$) را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل می‌توان گفت که تعبیه دیوارهای هادی جریان می‌تواند کارایی سرریز را در بارهای هیدرولیکی بالا تا حدود ۲۰ درصد بهبود بخشد. ضمناً هر چه زاویه دیوار جانبی سرریز کوچکتر باشد، این اقدام مزایا و معایب بزرگتری را به ترتیب برای مقادیر بالا و پایین بار هیدرولیکی به همراه خواهد داشت.

شکل ۱۱. نسبت کارایی سرریز کنگره‌ای خطی در کانال به مخزن

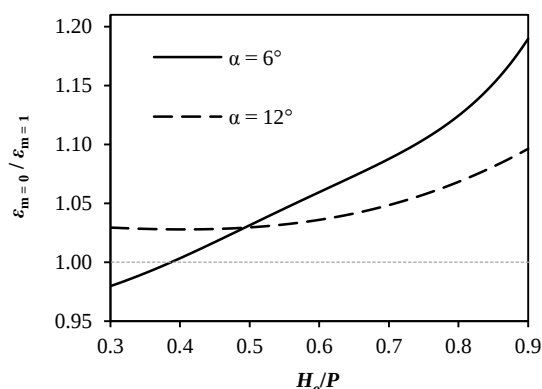


Fig. 11. Ratio of the efficiency of in-reservoir to in-channel linear labyrinth weirs

۷- واژگان لاتین

۸- مراجع

- [1] Schleiss A. 2011 From labyrinth to piano key weirs – a historical review. *Labyrinth and piano key weirs*, CRC Press, London, 3-15.
- [2] Hay N. & Taylor G. 1970 Performance and design of labyrinth weirs. *J. Hydraul. Div.*, **96**(11), 2337-2357.
- [3] Darvas L. A. 1971 Discussion of 'Performance and design of labyrinth weirs' by N. Hay and G. Taylor. *J. Hydraul. Div.*, **97**(80), 1246-1251.
- [4] Megalhaes A. P. 1985 Labyrinth-weir spillways. 15th *ICOLD Congress*, Vol. IV, Q59-R24, ICOLD Lausanne, Switzerland, 395-407.
- [5] Megalhaes A. P. & Lorena M. 1989 Hydraulic design of labyrinth weirs. *Report No. 736*, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon.
- [6] Lux F. & Hinchliff D. 1985 Design and construction of labyrinth spillways. 15th *ICOLD Congress*, Vol. IV, Q59-R15, ICOLD, Lausanne, Switzerland, 249-274.
- [7] Tullis J. P., Amanian N. & Waldron D. 1995 Design of labyrinth weir spillways. *J. Hydraul. Eng.*, **121**(3), 247-255.
- [8] Ghodsian M. & Shenavai H. 2000 Effect of crest length on discharge coefficient of triangular labyrinth spillway. *Proc. 4th Conf. Dams, IRCOLD*, Tehran, Iran (in Persian, CD-Rom).
- [9] Shenavai H. & Ghodsian M. 2001 Effect of crest shape on discharge coefficient of triangular labyrinth spillway. *Proc. Intl. Conf. Hydraulic Structures*, Kerman, Iran, 1, 168-177 (in Persian).
- [10] Ghodsian M., Amanian N. & Marashi S. A. 2001 Discharge coefficient of semicircular labyrinth weir. *Amirkabir J. Science and Technology*, **13**(49), 76-83 (in Persian).
- [11] Melo J., Ramos C. & Magalhaes A. 2002 Descarregadores com soleira em labirinto de um ciclo em canais convergentes. *Proc. 6th Congresso da Água*, Lisbon, Portugal (in Portuguese).
- [12] Falvey H. T. 2003 *Hydraulic design of labyrinth weirs*, ASCE, Reston, VA.
- [13] Tullis B. M., Young J. & Chandler M. 2007 Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs. *J. Hydraul. Eng.*, **133**(3), 248-254.
- [14] Ghodsian M. 2009 Stage-discharge relationship for a triangular labyrinth spillway. *Proc. Inst. Civ. Engrs., Water Management*, **162**(3), 173-178.
- [15] Kumar S., Ahmad Z. & Mansoor T. 2011 A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, **22**(3), 175-180.
- [16] Carollo G. F., Ferro V. & Pampalone V. 2012 Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth-weir. *J. Irr. Drainage Eng.*, **138**(1), 73-79.
- [17] Khode B. V., Tembhurkar A. R., Porey P. D. & Ingle R. N. 2012 Experimental studies on flow over

a_i	ضرایب ثابت معادله
A	طول وجه داخلی دماغه
A'	طول وجه بیرونی دماغه در پایین دست
C_d	ضریب آبگذری
D	عمق جریان
g	شتاب ثقل
h	بار هیدرولیکی در بالادست
H_0	بار هیدرولیکی کل در بالادست
L	طول کل سرریز
L_{cycle}	طول یک سیکل سرریز کنگره‌ای
l	طول دیوار جانبی سرریز کنگره‌ای
m	پارامتر تعیین کننده زاویه بین دیوارهای هادی
N	تعداد سیکل‌های سرریز کنگره‌ای
P	ارتفاع تاج
Q	دبی عبوری از سرریز
R	شعاع انحنا
R	عدد رینولدز
R_{crest}	شعاع نیم‌دایره تاج
S_e	فاکتور تعیین کننده شکل تاج
t	ضخامت دیواره
V	سرعت متوسط جریان در یک مقطع
W	عرض کل
W	عدد وبر
w	عرض یک سیکل سرریز کنگره‌ای خطی
w'	عرض یک سیکل سرریز کنگره‌ای قوسی
α	زاویه دیوار سرریز با جریان در پایین دست
α'	زاویه دیوار سرریز با جریان در بالادست
ε	کارایی
μ	لزجت دینامیکی
ρ	جرم مخصوص
σ	ضریب کشش سطحی
θ	زاویه انحنا سرریز
θ'	زاویه بین دیوارهای هادی جریان
θ	زاویه انحنا یک سیکل سرریز کنگره‌ای

- [28] Kumar S., Ahmad Z., Mansoor T. & Himanshu S. K. 2013 A new approach to analyze the flow over sharp-crested curved plan form weirs. *Intl. J. Recent Technology and Eng.*, **2**(1), 24-28.
- [29] Sangsefidi Y., Mehraein M., Ghodsian M., & Motalebizadeh M. R. 2017 Evaluation and analysis of flow over arced weirs using traditional and response surface methodologies. *J. Hydraul. Eng.* **143**(11) (published online).
- [30] Torabi M. & Shafieefar M., 2015 An experimental investigation on the stability of foundation of composite vertical breakwaters. *Journal of Marine Science and Application*, **14**(2), 175-182.
- [31] Henderson F. M. 1966 *Open channel flow*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [32] Zahabi H., Torabi M., Alamatian E., Bahiraei M. & Goodarzi M. 2018. Effects of Geometry and Hydraulic Characteristics of Shallow Reservoirs on Sediment Entrapment. *Water*, **10**(12), 1725.
- [33] Novak P., Guinot V., Jeffrey A. & Reeve D. E. 2010 *Hydraulic Modelling: An Introduction*. Spon Press, London.
- [34] Erpicum S., Tullis B. P., Lodomez M., Archambeau P., Benjamin J., Dewals B. & Piroton M. 2016 Scale effects in physical piano key weirs models. *J. Hydraul. Res.*, **54**(6), 692-698.
- [35] Anderson R. M. & Tullis B. P. 2012 Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *J. Hydraul. Eng.*, **138**(4), 358-361.
- [36] Sangsefidi Y., Mehraein M. & Ghodsian M. 2018 Experimental study on flow over in-reservoir arced labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, **59**, 215–224.
- labyrinth weir. *J. Irr. Drainage Eng.*, **138**(6), 548-552.
- [18] AjdariMoghadam M. & JafariNodoshan E. 2013 Hydraulic design of trapezoidal labyrinth weirs using CFD. *Modares J. Civ. Eng.*, **15**(2), 1–12 (in Persian).
- [19] Crookston B. M. & Tullis B. P. 2013a Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: discharge relationships. *J. Irrig. Drain Eng.*, **139**(5), 363 -370.
- [20] Crookston B. M. 2013 *Labyrinth Weirs*. PhD thesis, Utah State University, Logan, UT.
- [21] Crookston B. M. & Tullis B. P. 2013b Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. II: nappe aeration, instability, and vibration. *J. Irrig. Drain Eng.*, **139**(5), 371 -377.
- [22] Crookston B. M. & Tullis B. P. 2012 Labyrinth weirs: nappe interference and local submergence. *J. Irr. Drainage Eng.*, **138**(8), 757-765.
- [23] Savage B. M., Crookston B. M. & Paxson G. S. 2016 Physical and numerical modeling of large headwater ratios for a 15° labyrinth spillway. *J. Hydraul. Eng.*, **142**(11), 1-7.
- [24] Crookston B. M. & Tullis B. P. 2012 Arced labyrinth weirs. *J. Hydraul. Eng.*, **138**(6), 555-562.
- [25] Sangsefidi Y., Ghodsian M. & Mehraein M. 2017 Experimental investigation of the hydraulic performance of arced labyrinth weirs. *J. Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, **4**(12), 53-65 (in Persian).
- [26] Christensen N. A. 2013 *Flow characteristics of arced labyrinth weirs*. M.S. thesis, Utah State University, Logan, UT.
- [27] Sangsefidi Y., Mehraein M. & Ghodsian M. 2015 Numerical simulation of flow over labyrinth spillways. *Scientia Iranica, Trans. A*, **22**(5), 1779–1787.

Investigation of Effects of Entrance Channel Walls on the Hydraulic Performance of Arced Labyrinth Weirs

Y. Sangsefidi¹, M. Ghodsian^{2*}

1- Graduate Student in Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Professor, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

*ghods@modares.ac.ir

Abstract:

Labyrinth weir is one of the approaches to increase the discharge capacity. An arced configuration improves the orientation of the labyrinth weir cycles to the approach flow and increases the weir crest length for a given width. In this study, the effects of the entrance flow conditions on the hydraulic performance of the arced labyrinth weirs is studied experimentally. The effects of the angle between the entrance channel walls (θ') on the discharge coefficient and the efficiency are investigated for different values of the headwater ratio (H_o/P), the downstream sidewall angle (α), and the weir arc angle (θ). Experiments were conducted in a recirculating flume which is 10 m long, 2 m wide, and 0.9 m deep at Tarbiat Modares University. To simulate the reservoir conditions, a specific setup was added to the flume, known as the reservoir simulator. The flume was launched from its two ends by two pipelines. The inflow passes from underneath of the reservoir simulator and enters into it through a semi-circular opening in its horizontal wall. After moving over the horizontal wall, the flow comes up through the gap between the vertical wall. Finally, it flows on the platform and moves towards the downstream channel. All the plates (including the platform and the simulator walls) have a semicircular plan-view with a porosity equal to zero. The weirs were mounted on the platform at the entrance of the downstream channel. Totally 132 experiments were conducted to investigate the effects of the mentioned parameters on hydraulic performance of arced labyrinth weirs.

Due to the nappe interference, the local submergence forms in the downstream of the labyrinth weirs. The size of local submergence regions increase by increasing the headwater ratio and the arc angle. However, vice versa trend occurs with the downstream sidewall angle. In addition, for low values of the arc angle, the lateral flow from the side cycles to their adjacent cycles produces the surface turbulences. The results indicate that the discharge coefficient decreases by increasing the headwater ratio and the downstream sidewall angle. For low values of the headwater ratio, the discharge coefficient increases when the arc angle increases. However, a decreasing trend is observed in high head conditions. By increasing the arc angle and decreasing the downstream sidewall angle, the efficiency of a labyrinth weir can be increased. However, the efficiency gains diminish by increasing the headwater ratio. The efficiency of a labyrinth weir can slightly be increased by projecting of the cycles into a reservoir for low values of H_o/P , α , and θ . However, in the wide range of the research domain, the efficiency decreases when the angle between the entrance channel walls increases. According to the results of this research, the efficiency of a labyrinth weir can be increased up to 20% by channelizing abutments in high head conditions. However, the effect of θ' is insignificant for higher values of θ . In addition, as α decreases, the benefits and the losses of decreasing θ' become more severe at higher and lower values of H_o/P , respectively.

Keywords: Discharge, Entrance channel, Discharge coefficient, Efficiency, Arced labyrinth weir.