

## مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای مدور قائم با ورودی پایونی شکل

سمیرا طالبی<sup>۱</sup>، قربان مهتابی<sup>۲\*</sup>، مسعود کرباسی<sup>۳</sup> و مسعود اکبری<sup>۴</sup>

۱، ۲، ۳- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ استادیار؛ و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان، ایران  
۴- دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۹

### چکیده

در سدهای مخزنی، یکی از روش‌های افزایش دبی عبوری سرریزهای مدور قائم و کاهش شرایط وقوع جریان‌های گردابی، اصلاح شکل ورودی سرریز است. برای رسیدن به این هدف، سرریز با ورودی نیلوفری، گلبرگی، کلید پیانویی و زیگزگی پیشنهاد شده است. در این تحقیق شکل جدید ورودی سرریزهای مدور قائم به فرم پایونی معرفی و با اجرای مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، ضریب دبی جریان در این نوع سرریزها مطالعه شد. سرریزهای پایونی با زاویه‌های مختلف ظظی پایون (۶۰ تا ۱۵۰ درجه) در دو حالت وجود کمان میانی و بدون آن (با طول کلی یکسان سرریز) استفاده و نتایج به دست آمده با یک سرریز نیلوفری مقایسه شد. نتایج مقایسه نشان داد که در مدل‌های پایونی بدون کمان میانی، افزایش زاویه پایون منجر به کاهش تداخل جریان و افزایش دبی عبوری از سرریز می‌شود، به طوری که مدل B-150 (با زاویه بین پایون برابر ۱۵۰ درجه) دارای ضریب دبی بالاتری نسبت به سایر مدل‌های پایونی است. این مدل سرریز پایونی نسبت به سرریز نیلوفری نیز دارای عملکرد هیدرولیکی بهتری (۱۰ درصد) است؛ مزیت اقتصادی آن نیز نسبت به سرریز نیلوفری بالاتر است (۳۱ درصد). در مدل‌های پایونی با کمان میانی، تغییر زاویه پایون بر ضریب دبی جریان اثر محسوسی ندارد و عملکرد هیدرولیکی آنها نسبت به سرریز نیلوفری پایین تر است (۵/۳-۹/۷ درصد).

### واژه‌های کلیدی

سرریز پایونی، سرریز نیلوفری، شفت قائم، ضریب دبی

### مقدمه

قائم یا همان نیلوفری (لاله‌ای) است. در سدهای کم عرض، به لحاظ محدودیت فضا و حفظ ایمنی سد، این نوع سرریز جایگزین سرریزهای خطی می‌شوند و در خارج از بدنه سد ساخته خواهند شد (Coleman *et al.*, 2004). سرریزهای نیلوفری یک دهانه شیپوری شکل عمودی دارند که در ادامه به یک

سرریز اضطراری در سدهای مخزنی به منظور ایجاد حاشیه اطمینان بیشتر برای تخلیه آب دریاچه در مواقعی استفاده می‌شود که احتمال سرریز آب روی تاج سد وجود دارد. یکی از انواع سرریزهای اضطراری مورد استفاده در سدها، سرریزهای مدور

شمشی (Shemshi, 2012) به صورت آزمایشگاهی اثر ورودی کلید پیلانویی بر هیدرولیک جریان در سرریزهای مدور قائم را بررسی کرد و نتیجه گرفت استفاده از مدل کلید پیلانویی با مشخصات  $\beta=30^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ,  $P/D=1/2$ ,  $L/D=1/6$  (طول سرریز،  $D$  قطر شفت،  $P$  ارتفاع سرریز،  $\alpha$  و  $\beta$  زاویه‌های قطاع ورودی سرریز کلید پیلانویی) حالت بهینه در بین ورودی‌های مختلف کلید پیلانویی است. در ضریب دبی این سرریز نسبت به سرریز بدون ورودی کلید پیلانویی (شفت قائم ساده) در حدود ۷۱/۸ درصد افزایش داشت. نصیری و همکاران (Nasiri et al., 2016) نیز با مطالعه عددی تاثیر طول، ارتفاع و زاویه‌های سرریز کلید پیلانویی قائم بر مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز، نتایج مشابهی گزارش داده‌اند. مجدمی و کبیری سامانی (Mojadami & Kabiri-Samani, 2016) تاثیر ورودی گلبرگی شکل را بر ظرفیت تخلیه سرریز مدور قائم بررسی کردند و دریافتند که سرریز گلبرگی با ایجاد تاخیر در شکل‌گیری جریان گردابی باعث می‌شود تا سرریز دیرتر به عملکرد روزنه‌ای برسد. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در نسبت طول سرریز به قطر شفت برابر با ۳/۷۵ و نسبت ارتفاع سرریز به قطر شفت معادل یک بیشترین ضریب دبی جریان در حالت آزاد به دست می‌آید. افزایش تعداد پره‌های گلبرگی، از دو به سه، تاثیر قابل توجهی در افزایش ضریب دبی عبوری از سرریز مدور قائم دارد. لشکرآرا و شیخی (Lashkar-Ara, B & Sheikhi, 2017) با معرفی سرریز تاج دندان‌ای به مطالعه ضریب تخلیه آن تحت شرایط جریان آزاد پرداختند. در تحقیقات آنها چهار نوع سرریز با طول تاج دو، چهار، شش و هشت سیکلی و با شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی مختلف بررسی گردید.

شفت قائم و تونل انحراف متصل می‌گردد. هیدرولیک جریان در سرریزهای نیلوفری به سه دسته آزاد، روزنه‌ای و تحت فشار تقسیم‌بندی می‌شود. برای جریان‌های با ارتفاع کم آب ( $H_0/R \leq 0.4$ ) ارتفاع آب روی تاج و شعاع تاج)، شفت قائم به صورت آزاد عمل می‌کند. در مقابل، برای جریان‌های با ارتفاع زیاد آب ( $H_0/R > 0.4$ )، شفت قائم ممکن است به صورت روزنه‌ای و تحت فشار عمل کند (USBR, 1987). در عملکرد بهینه سرریزهای اضطراری، نوسان‌های کم سطح آب، تخلیه سریع سیلاب مازاد و پایداری سازه سد از نکات کلیدی هستند. گزارش‌های ارائه شده از خرابی سدها نشان می‌دهد که یک سوم از خرابی سدها بر اثر کم بودن ظرفیت تخلیه سرریزها رخ داده است. از طرفی، آثار منفی موثر به وجود آمده در سازه‌های هیدرولیکی پایین دست سدها نشان می‌دهد که ورودی سرریز مدور قائم اغلب مستعد ایجاد جریان‌های گردابی است (Shemshi & Kabiri-Samani, 2016). یکی از روش‌های افزایش دبی عبوری و کاهش شرایط وقوع جریان‌های گردابی در این نوع سرریزها، اصلاح شکل دهانه ورودی سرریز نیلوفری است. در سال‌های اخیر برای این منظور سرریز با ورودی گلبرگی، کلید پیلانویی و زیگزاگی پیشنهاد شده است که به نام سرریزهای مارپیچی معروف هستند. مطابق یافته‌های محققان، این نوع ورودی‌ها باعث بهبود هیدرولیک جریان عبوری از سرریز مدور قائم می‌شود و از لحاظ اقتصادی بسیار با صرفه‌اند و هزینه نگهداری کمتری دارند (Schleiss, 2011). در زمینه مطالعه خصوصیات جریان خصوصاً ضریب دبی در انواع سرریزهای معرفی شده، تحقیقات متعددی شده است که به طور خلاصه به موارد زیر اشاره می‌شود.

رفتار جریان و میزان ظرفیت آگذری در آنها مقایسه گردید. در سرریز بدون قطاع با افزایش ارتفاع آب ۱۳۴ درصد دبی تخلیه افزایش یافت در حالی که در سرریز قطاعی  $\theta=152$  با همین مقدار افزایش در ارتفاع آب، ۱۶۰ درصد دبی تخلیه افزایش یافت که نشان‌دهنده آن است که محدوده دبی جریان در سرریزهای قطاعی با بالارفتن ارتفاع آب، نسبت به سرریز نیلوفری بدون قطاع بیشتر است. کبیری سامانی و کیهان‌پور (Kabiri-samani & keihanpour, 2020) ویژگی‌های هیدرولیک جریان چرخشی در شفت قائم با ورودی گلبرگی شکل را بررسی و به این نتیجه رسیدند که مدل گلبرگی شکل ظرفیت تخلیه را ۴ و ۱/۵ برابر بیشتر از به ترتیب سرریز نیلوفری و کلید پیانوی می‌کند. این محققان همچنین با آزمایش روی سرریزهای دو، چهار و پنج وجهی مشاهده کردند که ورودی سه وجهی بهترین کارایی را دارد. دیلالی و همکاران (Djillali et al., 2021) با یک مقطع ۱۲ ضلعی نشان دادند که ورودی مقطع ۱۲ ضلعی سرریز، ضریب تخلیه جریان را حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد بی‌آنکه سرریز در معرض خطر کاویتاسیون قرار گیرد.

مروری بر نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که هدف مشترک در مطالعه سرریزهای مدور قائم، تخلیه جریان‌های سیلابی با بیشترین دبی ممکن و کمترین تراز سطح آب و تقلیل اثر جریان گردابی است و تاکنون مطالعات متعددی درباره این موضوع-ها شده است. البته تفاوت کار در بیشتر این تحقیقات پرداختن به موضوعاتی مانند تاثیر نوع ورودی سرریز مدور قائم و پارامترهای هندسی سازه

نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش شیب کف کلیدها، ضریب دبی تخلیه جریان افزایش می‌یابد و نیز افزایش تعداد سیکل در بارهای آبی کم منجر به افزایش میزان ضریب تخلیه جریان می‌شود. در بارهای آبی زیاد، خاصیت گرداب‌شکنی سرریزهای با تعداد سیکل کمتر قابل توجه است. روزگار و همکاران (Rouzegar et al., 2019) تأثیر هندسه پلان ورودی سرریز نیلوفری-زیگزاگی را در شرایط با و بدون تیغه گرداب‌شکن بر ضریب دبی بررسی و گزارش کردند استفاده از سرریز نیلوفری مربعی و دایره‌ای در شرایط بدون استفاده از حالت زیگزاگ در افزایش دبی و ضریب دبی نسبت به حالتی که از این زیگزاگ‌ها استفاده می‌شود، مؤثرتر است. همچنین استفاده از سرریز مربعی در شرایط بدون استفاده از تیغه‌های گرداب‌شکن نسبت به سرریز دایره‌ای در همین شرایط، باعث افزایش دبی و ضریب دبی می‌شود.

باقری و همکاران (Bagheri et al., 2010) به وسیله مدل فیزیکی به بررسی تاثیر تغییر هندسه تاج سرریز روی ضریب تخلیه سرریز نیلوفری پرداختند و با آزمایش‌های مختلف روی سرریزهایی با مقطع سه، پنج و هفت وجهی دریافتند که چند وجهی کردن تاج سرریز باعث افزایش ضریب تخلیه سرریز می‌شود و بیشترین افزایش ضریب دبی در حالت تاج سه‌وجهی به دست می‌آید. ثابتی و همکاران (Sabeti et al., 2019) با استفاده از مدل عددی Flow-3D تاثیر طول موثر سرریز نیلوفری را بر عملکرد هیدرولیکی آن بررسی کردند. به این منظور، پنج زاویه قطاع (صفر، ۶۲، ۹۹، ۱۲۷ و ۱۵۲ درجه) در هندسه تاج سرریز در نظر گرفته شد و تغییرات

(شکل ۱-الف و ۱-ب) در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان اجرا شد. آب از یک منبع رو زمینی با یک پمپ ۱۱ کیلووات وارد مخزن اصلی می‌شد. جریان آب قبل از ورود به مخزن با یک شیرفلکه تنظیم و با یک کنتور حجمی با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد. در بخش ورودی آب به مخزن، برای آرام و یکنواخت کردن جریان از صفحه‌های مشبک متوالی استفاده شد. برای تخلیه جریان مخزن، یک شفت قائم (به عنوان سرریز مدور) به قطر ۷/۶ سانتی‌متر و در ادامه با اتصال به لوله با قطر ۱۲/۷ سانتی‌متر به منبع رو زمینی به‌کار گرفته شد (شکل ۱-ج). برای اندازه‌گیری عمق جریان در مخزن (ارتفاع آب روی سرریز،  $H$ ) از یک عمق‌سنج نقطه‌ای استفاده شد. مقادیر ارتفاع شفت قائم از کف مخزن ( $b$ ) و قطر شفت قائم ( $D$ ) به ترتیب برابر ۲۰ و ۷/۶ سانتی‌متر بود (شکل ۱-د).

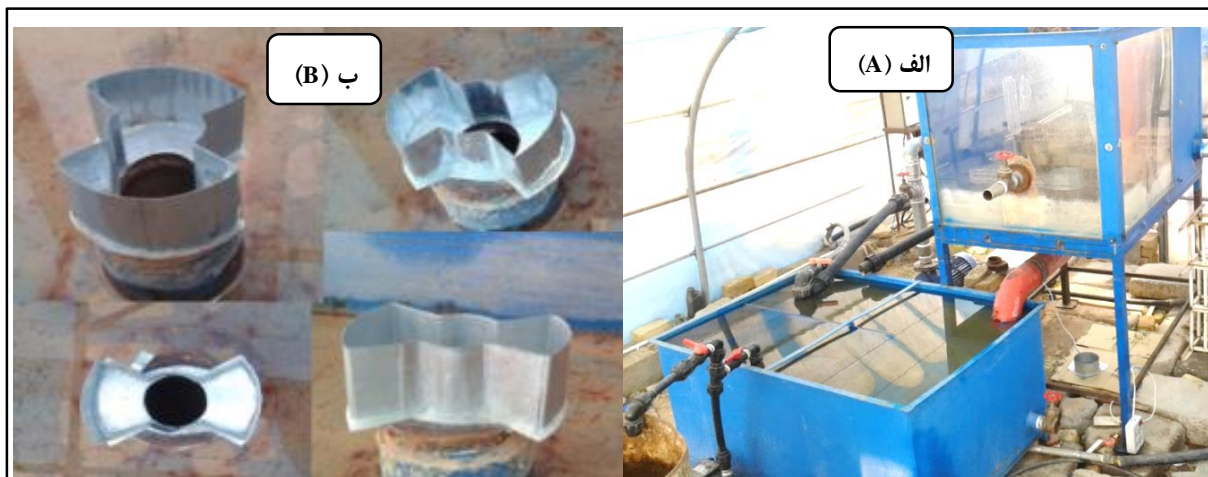
بر ضریب دبی، بررسی شرایط وقوع گرداب و هیدرولیک جریان است.

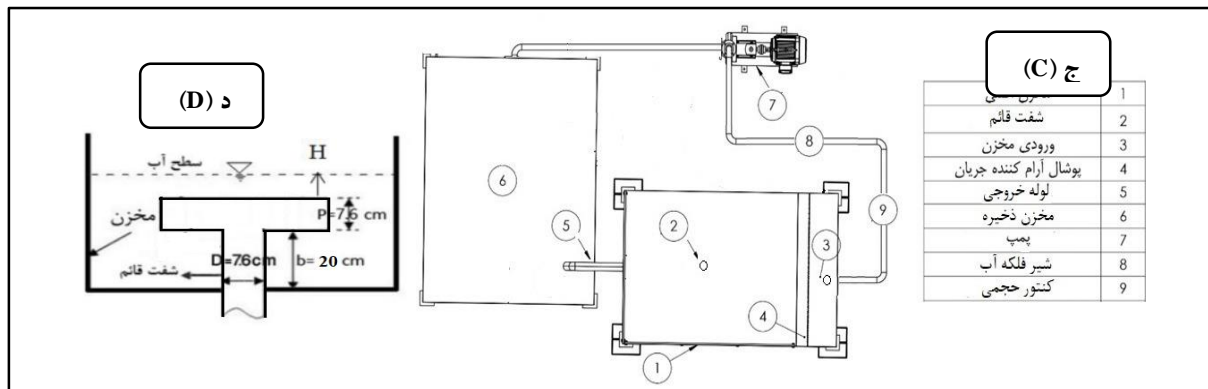
در این تحقیق، شکل جدیدی از دهانه ورودی سرریز مدور قائم به فرم پاپیونی شکل معرفی و با اجرای آزمایش‌هایی، خصوصیات جریان در این نوع سرریزها مطالعه شد. در آزمایش‌ها، تاثیر ابعاد مختلف هندسه سرریز پاپیونی تحت ترازهای سطح آب بر ضریب دبی بررسی و نتایج حاصل نسبت به سرریز نیلوفری ساده با طول کلی یکسان مقایسه شد.

## مواد و روش‌ها

### شرایط آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در یک مخزن مکعبی فلزی به طول ۱/۵ متر، ارتفاع و عرض ۱ متر با دیواره‌های کناری از جنس پلکسی‌گلس شفاف





شکل ۱- مخزن اصلی و مخزن پایین دست (الف)، شفت قائم و نمونه‌هایی از سرریز نصب شده روی آن (ب)، پلان مدل آزمایشگاهی به همراه اجزای مختلف آن (ج)، و پارامترهای هندسی سرریز و هیدرولیکی جریان (د)

Figure 1- Main reservoir and downstream tank (A), vertical shaft and examples of the mounted spillway on the shaft (B), plan of the laboratory model with its various components (C) and geometric parameters of spillway and hydraulic flow (D)

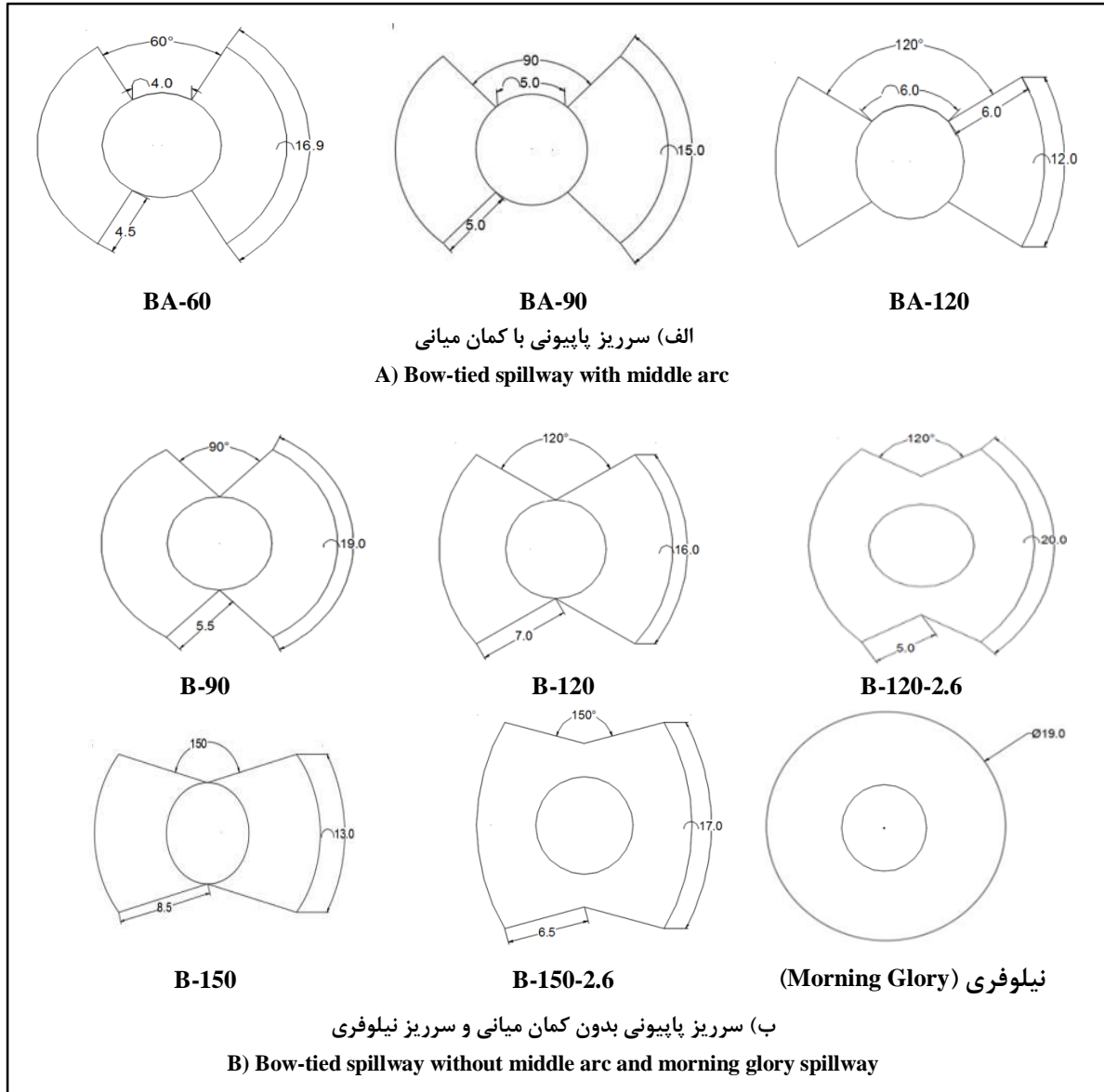
راس پاپیون متصل به شفت (مدل‌های B-90، B-120 و B-150) و راس پاپیون فاصله‌دار از محل شفت (مدل‌های B-120-2.6 و B-150-2.6، فاصله راس پاپیون از محل شفت  $(\ell_2)$  برابر ۲/۶ سانتی‌متر،  $(\ell_2/D = 0.134)$  تهیه شد. در کنار این مدل‌ها یک مدل سرریز نیلوفری (با قطر ۱۹ سانتی‌متر) برای مقایسه با عملکرد سرریزهای پاپیونی ساخته شد. لازم است گفته شود طول کلی همه سرریزها ( $L$ ) یکسان و برابر ۶۰ سانتی‌متر  $L/\ell = 2/5$  و محیط شفت قائم) است و مقدار ارتفاع تاج سرریز از محل شفت قائم ( $P$ )، ثابت و برابر ۷/۶ سانتی‌متر است  $(P/D = 1)$ . با توجه به مطالعه اثر شکل تاج سرریز در این پژوهش، شرایط جریان آزاد بررسی شد. جزئیات مربوط به سرریزهای مورد استفاده در شکل ۲ آورده شده است.

در نام‌گذاری اختصاری مدل‌ها، از حروف اول نام انگلیسی آن هندسه استفاده شده است. مدل سرریزهای پاپیونی با کمان میانی با نام اختصاری BA (مدل‌های شکل ۲-الف) و مدل سرریزهای

### مشخصات مدل سرریزهای پاپیونی

در ابتدا به منظور ساخت مدل سرریزهای پاپیونی، طرح هندسی آنها در محیط نرم‌افزار اتوکد رسم و پس از آن شابلون کاغذی هر مدل تهیه شد. برای ساخت مدل‌ها از ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر استفاده شد. پس از برش‌کاری و آماده‌سازی مدل‌ها، هر سرریز با استفاده از چسب آکواریوم روی شفت قائم متصل می‌شد. در این تحقیق دو سری سرریز پاپیونی متفاوت بررسی شد. در شکل ۲ جزئیات سرریزهای مورد آزمایش به همراه نام اختصاری آنها ارائه شده است. در سری اول مطابق (شکل ۲-الف)، سرریزهای پاپیونی کمان میانی دارند و ۳ مدل با زاویه‌های بین اضلاع میانی ( $\theta$ ) شامل ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه (به ترتیب با طول کمان  $(\ell_1)$  چهار، پنج و شش سانتی‌متر،  $(\ell_1/D = 0.152 - 0.179)$  تهیه شد (مدل‌های BA-60، BA-90 و BA-120). در سری دوم (شکل ۲-ب)، سرریزهای پاپیونی کمان میانی ندارند و پنج مدل با زاویه‌های بین اضلاع میانی ( $\theta$ ) شامل ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه در دو حالت

پایپونی بدون کمان میانی با حرف اختصاری B دو مدل B-120-2.6 و B-150-2.6، عدد سوم (مدل‌های شکل ۲-ب) نشان داده شدند. عدد دوم در میانگر فاصله راس پایپون از محل شفت (برابر ۲/۶ نام هر مدل میانگر اندازه زاویه راس پایپون است. در سانتی‌متر) است.



شکل ۲- جزئیات مربوط به سرریزهای مورد آزمایش به همراه نام اختصاری آنها

Figure 2- Details of tested spillways with their acronym

جدول ۱- مشخصات کلی و محدوده پارامترهای هیدرولیکی و هندسی

Table 1- General specifications and range of hydraulic and geometric parameters

محدوده تغییرات Range of changes	نماد و واحد Symbol and unit	پارامتر Parameter	
۶۰	L (cm)	طول کلی سرریز (سانتی‌متر) length of the spillway	
۷/۶	D (cm)	قطر شفت قائم (سانتی‌متر) diameter of the vertical shaft	
۲۰	b (cm)	ارتفاع شفت قائم (سانتی‌متر) height of the intake	
۷/۶	P (cm)	ارتفاع تاج سرریز از شفت قائم (سانتی‌متر) height of the spillway inlet	پارامترهای هندسی geometric parameters
۴، ۵، ۶	$\ell_1$ (cm)	طول کمان میانی (سانتی‌متر) length of the middle arc	
۲/۶	$\ell_2$ (cm)	فاصله راس پاپیون از محل شفت (سانتی‌متر) distance of the bow-tie tip from the vertical shaft	
۲۴	$\ell$ (cm)	محیط شفت قائم (سانتی‌متر) perimeter of the vertical shaft	
۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰	$\theta$ (°)	زاویه راس پاپیون سرریز (درجه) tip angle of the bow-tie spillway	
۱/۴۱-۴/۹۰	Q (L.s <sup>-1</sup> )	دبی جریان (لیتر بر ثانیه) discharge through spillway	پارامترهای هیدرولیکی hydraulic parameters
۱-۲/۶۵	H (cm)	ارتفاع آب بر روی سرریز (سانتی‌متر) water level over spillway crest	

### آنالیز ابعادی

سطحی (نیوتون بر متر)،  $L$  طول کلی سرریز (متر)؛ و  $\theta$  = زاویه بین دو پاپیون سرریز (درجه).  
با در نظر گرفتن پارامترهای تکراری  $H$ ،  $Q$  و  $\rho$  و با به‌کارگیری آنالیز ابعادی و به‌دست آوردن پارامترهای بی‌بعد می‌توان نوشت:

$$f_2 \left( \frac{Q}{H^{5/2}g^{1/2}}, \frac{D}{H}, \frac{Q}{vH}, \frac{\rho Q^2}{\sigma H^3}, \frac{L}{H}, \theta \right) = 0 \quad (2)$$

در پارامتر  $\frac{Q}{H^{5/2}g^{1/2}}$  با اعمال پارامتر بی‌بعد  $\frac{H}{L}$  می‌توان رابطه ۲ را به‌صورت زیر نوشت:

$$f_3 \left( \frac{Q}{LH^{3/2}g^{1/2}}, \frac{H}{D}, Re, We, \theta \right) = 0 \quad (3)$$

که در آن،  
 $Re =$  عدد رینولدز؛ و  $We =$  عدد وبر.

با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی جریان و پارامترهای هندسی سرریز پاپیونی و شفت قائم، رابطه دبی عبوری ( $Q$ ) از سرریزهای پاپیونی را می‌توان به صورت رابطه ۱ نوشت:

$$Q = f_1(D, H, g, \rho, v, \sigma, L, \theta) \quad (1)$$

که در آن،

$Q =$  دبی عبوری از سرریز (متر مکعب بر ثانیه)؛  $D =$  قطر شفت (متر)؛  $H =$  ارتفاع آب روی سرریز (متر)؛  $g =$  شتاب گرانش (متر بر مجذورثانیه)؛  $\rho =$  جرم مخصوص سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)؛  $v =$  لزوجت سینماتیک (مترمربع بر ثانیه)؛  $\sigma =$  کشش

پاپیونی بدون کمان میانی و نیلوفری را نشان می‌دهد. در دبی‌های پایین مدل‌های پاپیونی بدون کمان میانی، دو جت اصلی جریان از محل پاپیون‌ها به درون شفت قائم ایجاد می‌شود که با افزایش تراز سطح آب روی سرریز این جت‌ها تقویت و با افزایش تراز سطح آب و تداخل جریان‌های ریزشی به تدریج محو می‌شدند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در این مدل‌ها، محل اتصال دو پاپیون به عنوان نقطه جدایی جریان‌های ریزشی اضلاع کناری پاپیون و محل شروع کمان پاپیون به عنوان نقطه انقباض جریان‌های ریزشی عمل می‌کرد. در نقاط انقباض به علت همگرایی جریان‌های ریزشی یک ناحیه سکون تشکیل می‌شود و طول موثر سرریز کاهش می‌یابد. از طرفی، به علت برخورد جریان‌های ریزشی همگرا تلفات موضعی تشدید می‌شود. در نقاط جدایی (محل اتصال دو پاپیون)، با واگرایی خطوط جریان، یک ناحیه جدایی ایجاد می‌شود که با کاهش زاویه اتصال پاپیون‌ها، این ناحیه توسعه می‌یابد و به کاهش دبی عبوری از سرریز منجر می‌شود. شکل ۴، جریان ورودی انواع سرریزهای پاپیونی با کمان میانی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، در دبی‌های پایین تمامی مدل‌های این نوع سرریز دارای چهار جت ریزشی هستند که مشتمل‌اند بر دو جت ریزشی از کمان‌های میانی مماس بر شفت قائم و دو جریان ریزشی از محل پاپیون‌ها به درون شفت قائم. با افزایش ارتفاع آب روی سرریز، فاصله این جت‌ها از هم کم می‌شود و خصوصاً به علت وجود جت‌های ریزشی کمان‌های میانی، تداخل جریان‌های ریزشی شدت بیشتری می‌یابد و حالت مستغرق زودتر مشاهده می‌شود.

در آزمایش‌های تحقیق حاضر شرایط جریان طوری تنظیم گردید که اثر عدد وبر ( $We > 100$ ) و عدد رینولدز ( $Re > 10^4$ ) بر دبی عبوری حذف شود (Anwar et al., 1978 & Jain et al., 1978). در رابطه ۳ با حذف پارامترهای بی‌بعد ثابت و بی‌اثر می‌توان نوشت:

$$\frac{Q}{L H^{3/2} g^{1/2}} = f_4 \left( \frac{H}{D}, \theta \right) \quad (4)$$

و یا

$$Q = L H^{3/2} g^{1/2} \times f_4 \left( \frac{H}{D}, \theta \right) \quad (5)$$

با مقایسه فرم رابطه ۵ با رابطه عمومی سرریز تحت شرایط کنترل در تاج ( $Q = C_d L H^{3/2}$ )، می‌توان رابطه ضریب دبی در سرریزهای مورد مطالعه را به صورت رابطه ۶ نوشت:

$$C_d = g^{1/2} \times f_4 \left( \frac{H}{D}, \theta \right) \quad (6)$$

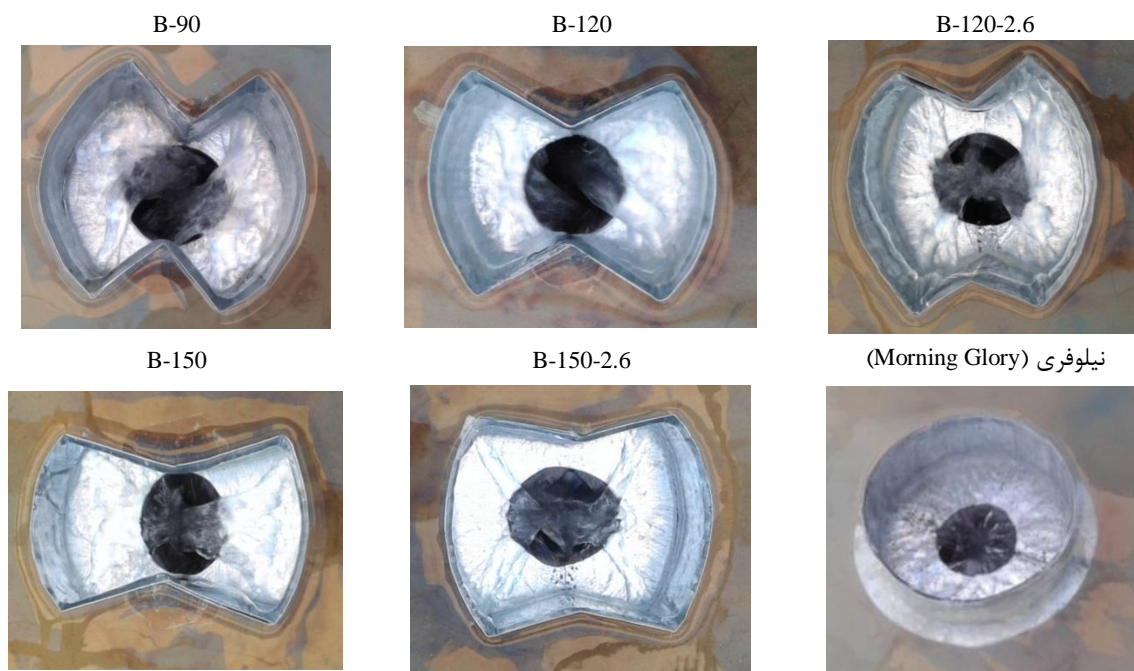
در این تحقیق، با تهیه هشت مدل سرریز پاپیونی و یک مدل سرریز نیلوفری ساده با طول کلی برابر ۶۰ سانتی‌متر (مطابق شکل ۲) و با در نظر گرفتن شرایط هیدرولیکی جریان ( $H/D$ )، تعداد ۷۲ آزمایش به منظور بررسی اثر شکل هندسی سرریز بر ضریب دبی اجرا شد. به منظور محاسبه مقدار ضریب دبی در هر آزمایش از رابطه سرریز تحت شرایط کنترل در تاج ( $Q = C_d L H^{3/2}$ ) استفاده شد (Bagheri et al., 2010).

## نتایج و بحث

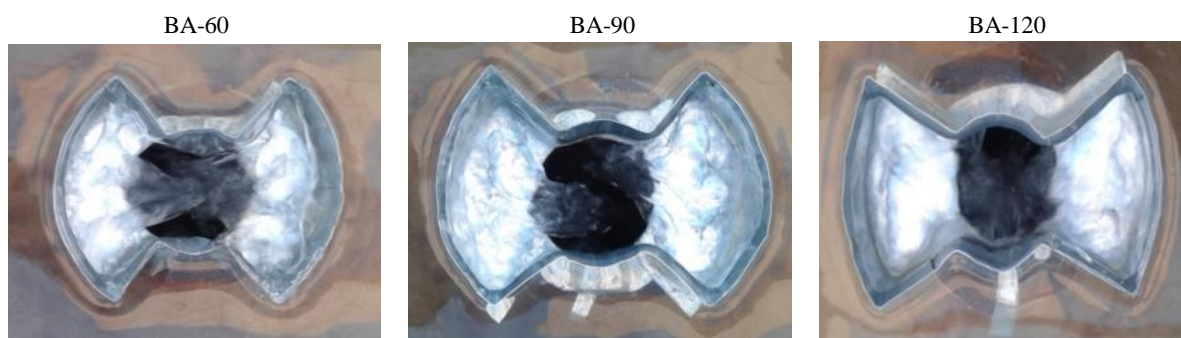
### شرح آزمایش‌ها

شکل ۳ شرایط جریان‌های ریزشی در سرریزهای





شکل ۳- نمای شرایط جریان‌های ریزشی در سرریزهای پایبونی بدون کمان میانی و نیلوفری  
Figure 3- View of fall flows condition in Bow-ties spillways without middle arch and morning glory



شکل ۴- نمای شرایط جریان‌های ریزشی در سرریزهای پایبونی با کمان میانی  
Figure 4- View of fall flows condition in Bow-ties spillways with middle arch and morning glory

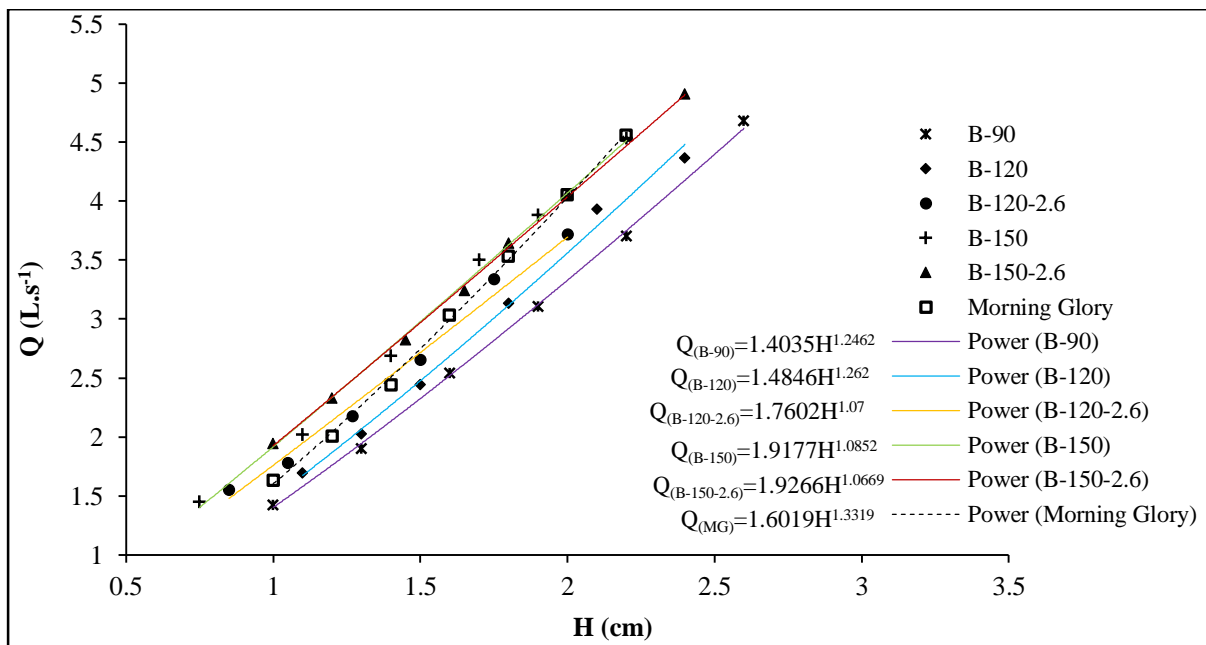
مدل B-120-2.6 و B-150-2.6 (با فاصله یکسان راس پایبون از محل شفت برابر ۲/۶ سانتی‌متر)، منحنی دبی-اشل مدل B-150-2.6 پایین تر از مدل B-120-2.6 است و به عبارتی در هر دو سری سرریز، مدل‌ها با زاویه راس پایبون ۱۵۰ درجه عملکرد بهتری در عبور جریان دارند. مقایسه منحنی دبی-اشل مدل‌های B-120 و B-120-2.6 با زاویه راس یکسان ۱۲۰ درجه ولی موقعیت قرارگیری راس

منحنی‌های دبی-اشل در شکل ۵، منحنی دبی-اشل سرریزهای پایبونی بدون کمان میانی با زاویه‌های مختلف بین دو پایبون ارائه شده است. مطابق شکل، در مدل‌های سری B-90 و B-120 با موقعیت یکسان راس پایبون (متصل به شفت) و زاویه‌های راس مختلف، منحنی دبی-اشل مدل B-150 یعنی مدل با زاویه راس ۱۵۰ درجه، پایین تر از دو مدل دیگر قرار دارد. در بین دو

است و با افزایش دبی، نتایج آن مشابه نتایج مدل B-150 و B-150-2.6 می‌شود. همچنین در شکل ۵، معادلات توانی برآزش شده به منحنی دبی-اشل مدل‌های مختلف سرریزهای پایونی بدون کمان میانی ارائه شده است. مطابق نتایج، ضریب و توان معادلات در دو مدل سرریز B-90 و B-120 تقریباً مشابه هم هستند.

این شرایط در دو مدل B-150 و B-150-2.6 نیز مشاهده می‌شود. از طرفی، تغییرات ضرایب و توان معادلات در دو مدل سرریز B-150 و B-150-2.6 نسبت به دو مدل دیگر (B-90 و B-120) معکوس است، به طوری که در دو مدل سرریز B-150 و B-150-2.6 مقادیر ضریب معادلات افزایش و در مقابل مقادیر توان آنها کاهش یافته است. مقادیر ضریب و توان معادله مدل سرریز نیلوفری به مقادیر معادله مدل سرریز B-120 نزدیک‌تر است.

پایون متفاوت، شکل ۵، نشان می‌دهد که موقعیت قرارگیری راس پایون در این سرریزها تاثیر محسوسی در شرایط دبی عبوری دارد؛ در حالی که عملکرد یکسان مدل‌های B-150 و B-150-2.6 با زاویه راس یکسان ۱۵۰ درجه ولی موقعیت قرارگیری راس پایون متفاوت، نشان می‌دهد با افزایش زاویه راس پایون از ۱۲۰ به ۱۵۰ درجه، اثر موقعیت قرارگیری راس پایون در دبی عبوری از این سرریزها خنثی می‌شود. در مجموع، به ازای یک دبی ثابت، کمترین تراز سطح آب مربوط به مدل‌های سری B-150 و B-150-2.6 و بیشترین تراز آب در مدل با زاویه پایونی ۹۰ درجه (B-90) برقرار می‌شود که بیانگر عملکرد ضعیف این مدل در عبور جریان آب است. در مقایسه مدل‌های پایونی با سرریز نیلوفری ساده مشاهده می‌شود که در دبی پایین، مدل نیلوفری به مدل B-120-2.6 نزدیک

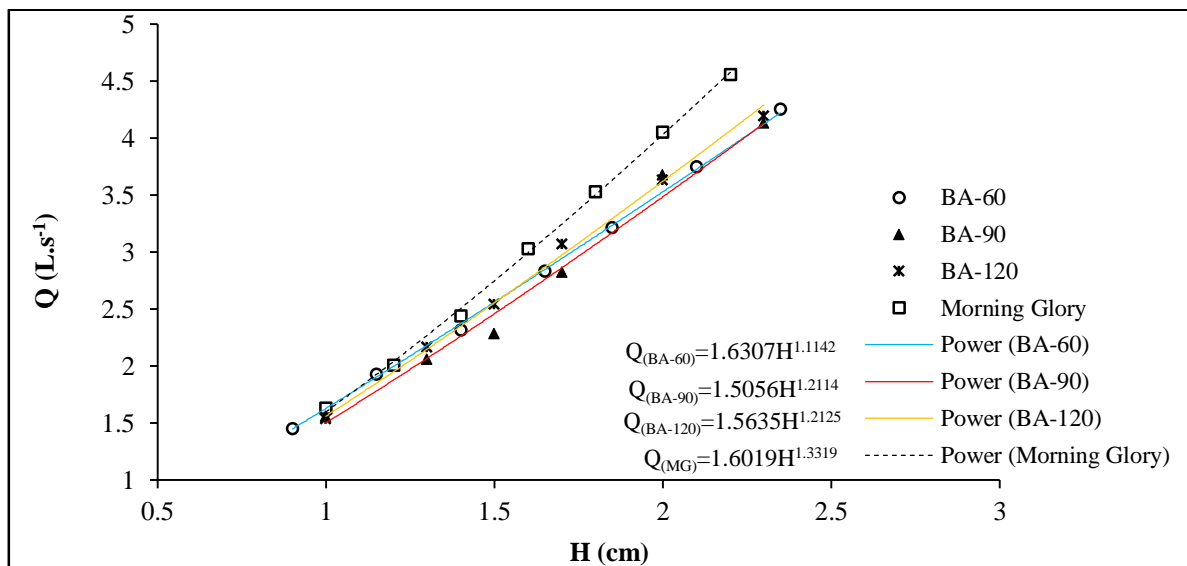


شکل ۵- منحنی دبی-اشل سرریزهای پایونی بدون کمان میانی

Figure 5- Stage-discharge relationship of Bow-ties spillways without middle arch

می‌گیرد و آب با سهولت بیشتری از روی این سرریز عبور می‌کند (خصوصاً در دبی‌های بالا). همچنین در شکل ۶، معادلات توانی برآزش شده به منحنی دبی-اشل مدل‌های مختلف سرریزهای پاپیونی با کمان میانی ارائه شده است. مطابق نتایج، ضریب و توان معادلات در سه مدل سرریزهای پاپیونی با کمان میانی تقریباً مشابه هم هستند، به طوری که میانگین مقادیر ضریب و توان معادلات به ترتیب برابر ۱/۵۶۶۶ و ۱/۱۷۹۴ است و این نتایج به مقادیر ضریب و توان معادله مدل سرریز نیلوفری نزدیک است.

در شکل ۶، منحنی دبی-اشل سرریزهای پاپیونی با کمان میانی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های دبی-اشل هر سه مدل تقریباً به هم نزدیک هستند و در این نوع پاپیون‌ها تغییر زاویه پاپیون تاثیر محسوسی بر منحنی دبی-اشل ندارد. شایان ذکر است سرریزهای پاپیونی با کمان میانی بین دو پاپیون با اعمال شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی، به عنوان سرریز کلید پیانویی (سرریز تاج دندان‌های دو سیکل) شناخته می‌شوند. مقایسه این سرریزها با مدل نیلوفری ساده نشان می‌دهد که در دبی ثابت، تراز آب کمتری روی سرریز نیلوفری قرار



شکل ۶- منحنی دبی-اشل سرریزهای پاپیونی با کمان میانی

Figure 6- Stage-discharge relationship of Bow-ties spillways middle arch

B-120 و B-90 بیشتر است که در ادامه در همه مدل‌ها تقریباً شیب کاهشی به هم نزدیک می‌شود. مقایسه منحنی سه مدل B-150، B-120 و B-90 با موقعیت یکسان راس پاپیون ولی با زاویه پاپیون متفاوت (اثر اختلاف زاویه بین پاپیون‌ها) نشان می‌دهد (شکل ۷) که با افزایش زاویه پاپیون، مقدار ضریب دبی سرریز افزایش محسوسی خواهد داشت. به عبارت دیگر در  $H/D$  ثابت، مدل B-150 (با زاویه

### تغییرات ضریب دبی

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات ضریب دبی  $(C_d)$  نسبت به  $H/D$  در مدل‌های پاپیونی بدون و با کمان میانی را نشان می‌دهند. در سرریزهای پاپیونی بدون کمان (شکل ۷)، با افزایش  $H/D$  مقدار ضریب دبی در همه مدل‌ها روند کاهشی نشان می‌دهد. البته در سه مدل B-150-2.6، B-120-2.6 و B-150، شیب کاهشی در مقادیر کم  $H/D$  نسبت به دو مدل

درصد). از طرفی، در دو مدل B-120-2.6 و B-150-2.6، با میزان مساحت تقریباً نزدیک به هم (۲۲۸/۹-۲۲۷/۵ سانتی‌متر مربع) و موقعیت یکسان راس پاپیون ولی زاویه‌های متفاوت راس (به ترتیب ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه)، عملکرد مدل B-150-2.6 نسبت به مدل B-120-2.6 تقریباً ۱۰ درصد بالاتر است. در بین دو مدل B-150 و B-150-2.6 با عملکرد هیدرولیکی یکسان، مدل B-150 دارای مزیت اقتصادی بهتری (۱۱/۴ درصد) نسبت به مدل B-150-2.6 است. شایان ذکر است در ساخت سدهای مخزنی، خصوصاً سدهای خاکی، بخش عمده هزینه‌های اجرایی این‌گونه سدها مربوط به اجرای سازه بتنی سرریزهای اضطراری است و در این شرایط با انتخاب سرریزهای پایبونی با هندسه بهینه ضمن بهبود شرایط هیدرولیکی جریان، می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی مناسبی نیز رسید.

در سرریزهای پایبونی با کمان میانی (مدل‌های سری BA-60، BA-90 و BA-120) مطابق شکل ۸، ضریب دبی با افزایش مقادیر  $H/D$  روند کاهشی نشان می‌دهد. در  $H/D$  های پایین (کمتر از ۰/۲)، مقدار ضریب دبی مدل BA-60 (با زاویه بین دو پاپیون ۶۰ درجه) نسبت به مدل BA-120 (با زاویه بین دو پاپیون ۱۲۰ درجه) بیشتر است، در حالی‌که در  $H/D$  های بیشتر از ۰/۲ مقادیر ضریب دبی مدل BA-60 نسبت به مدل BA-120 کمتر شده و حتی به مقادیر ضریب دبی مدل BA-90 نزدیک شده است. در بین سه مدل مذکور، مدل BA-90 با زاویه بین دو پاپیون برابر ۹۰ درجه نسبت به دو مدل دیگر، ضریب دبی پایین‌تری دارد. مطابق نتایج جدول ۲، مساحت سطح داخلی سرریزهای پایبونی با کمان میانی نسبت به سرریز نیلوفری کاهش حدود ۴۳/۳ تا ۵۲/۳ درصد را نشان می‌دهد. اما عملکرد

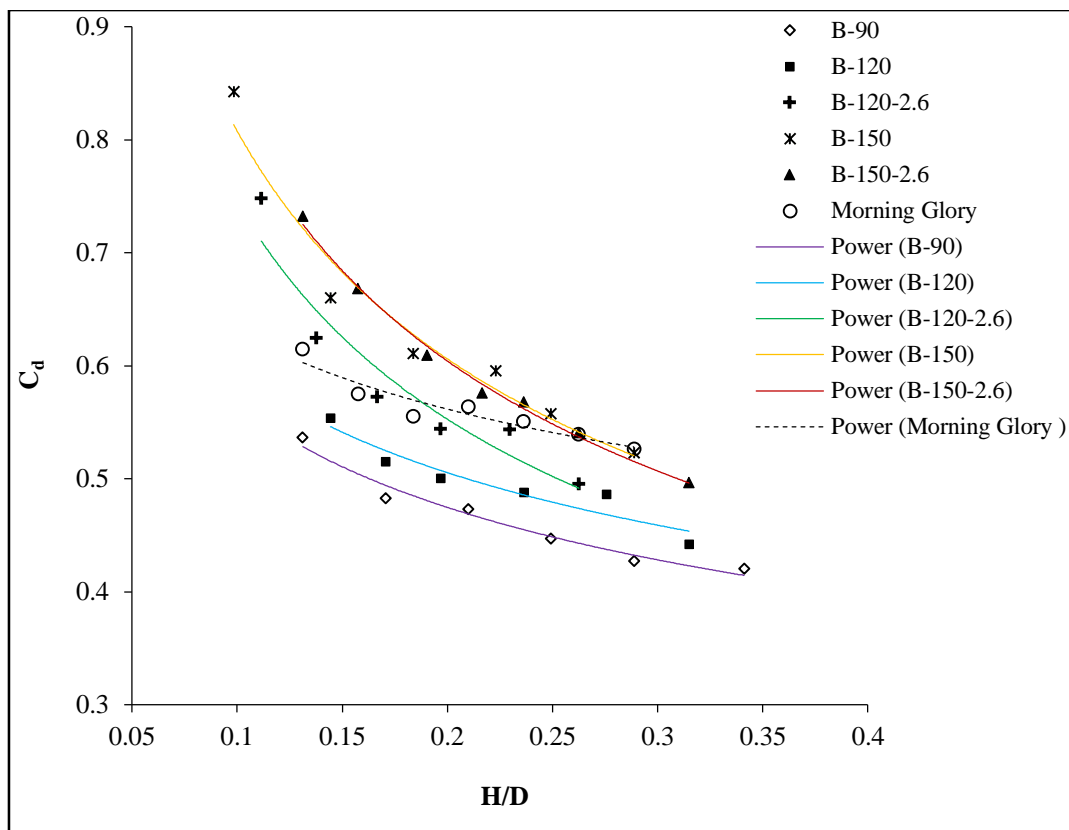
پاپیون ۱۵۰ درجه) ضریب دبی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. از طرفی، مقایسه عملکرد ضریب دبی دو مدل B-120-2.6 و B-150-2.6 با زاویه متفاوت راس پاپیون ولی موقعیت یکسان راس پاپیون، نشان می‌دهد که سرریزهای پایبونی با زاویه راس ۱۵۰ درجه عملکرد بهتری نسبت به سایر سرریزهای پایبونی دارند.

در خصوص اثر موقعیت راس پاپیون (شکل ۷)، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دو مدل B-120 و B-120-2.6 با زاویه راس پاپیون یکسان ولی موقعیت متفاوت راس پاپیون، عملکرد ضریب دبی مدل B-120-2.6 نسبت به B-120 بالاتر است. البته در مقدار  $H/D$  بالا، این اختلاف عملکرد تا حدودی کاهش یافته است. از طرفی، نتایج ضریب دبی دو مدل B-150 و B-150-2.6 با زاویه راس پاپیون یکسان ولی موقعیت متفاوت راس پاپیون، تقریباً منطبق بر هم هستند. بر این اساس می‌توان گفت با افزایش زاویه راس پاپیون از ۱۲۰ به ۱۵۰ درجه، تاثیر زاویه راس پاپیون بر عملکرد ضریب دبی سرریز غالب شده و پارامتر موقعیت راس پاپیون اثر چندانی بر عملکرد هیدرولیکی سرریز نداشته است. جدول ۲ مقایسه کلی عملکرد هیدرولیکی و عملکرد اقتصادی سرریزهای پایبونی را نسبت به سرریزهای نیلوفری نشان می‌دهد. در این جدول، درصد متوسط تغییرات ضریب دبی و درصد تغییرات مساحت سطح داخلی سرریزهای پایبونی نسبت به مدل نیلوفری ارائه شده است. مطابق نتایج این جدول، در مدل‌های سری B-120، 90 و B-150 با میزان مساحت داخلی تقریباً برابر (۱۹۷-۱۹۰ سانتی‌متر مربع) ولی زاویه‌های متفاوت راس پاپیون، مدل B-150 با زاویه راس ۱۵۰ درجه دارای بیشترین درصد متوسط افزایش ضریب دبی نسبت به مدل نیلوفری است (۱۰/۴)

بهترین عملکرد زاویه‌های کلیدهای ورودی و خروجی سرریز کلید پانویبی را مربوط به مدل با  $\alpha = 60$  و  $\beta = 30$  درجه بیان کردند.

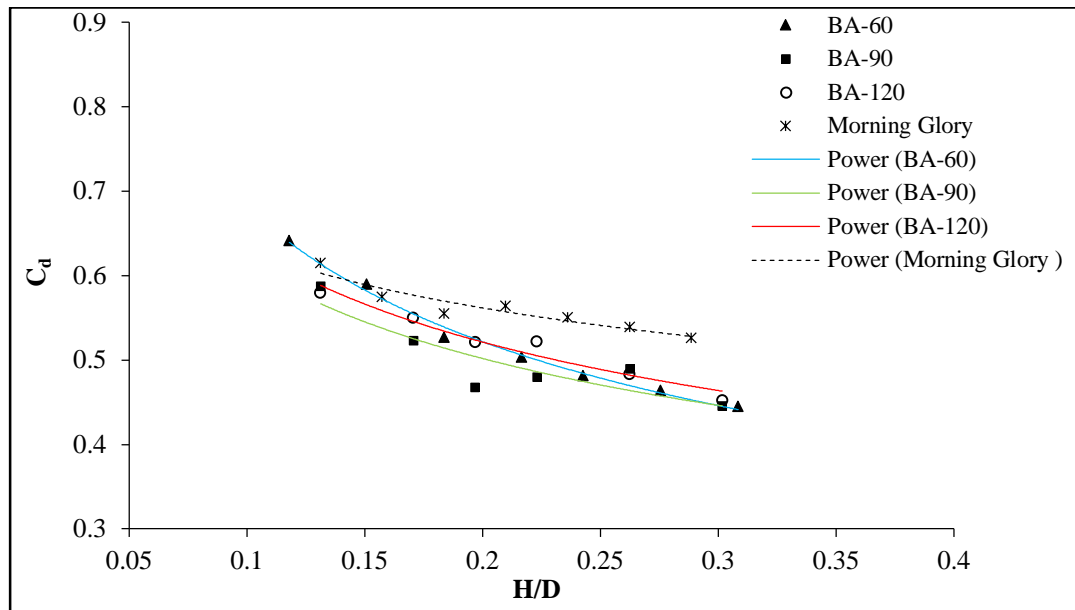
میرحسینی (MirHoseini, 2016) نیز با تغییر زاویه‌های کلیدهای ورودی ( $\alpha$ ) و خروجی ( $\beta$ )، گزارش کردند که بهترین عملکرد زاویه‌ها مربوط به مدل با  $\alpha = 75$  و  $\beta = 15$  درجه است.

هیدرولیکی این سرریزها (پاپیونی با کمان میانی) نسبت به سرریز نیلوفری پایین‌تر است ( $5/3$  تا  $9/7$  درصد). این مسئله می‌تواند ناشی از سطح داخلی کمتر این مدل‌ها و تداخل بیشتر جریان ریزشی باشد. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، سرریزهای پاپیونی با کمان میانی با اعمال شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی به عنوان سرریزهای کلید پانویبی شناخته می‌شوند. شمشی (Shemshi, 2012) و نصیری و همکاران (Nasiri *et al.*, 2016)



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی نسبت به  $H/D$  در مدل‌های پاپیونی بدون کمان میانی

Figure 7- Discharge coefficient changes versus  $H/D$  in Bow-ties spillways without middle arch



شکل ۸- تغییرات ضریب دبی نسبت به H/D در سرریزهای پاپیونی با کمان میانی

Figure 8- Discharge coefficient changes versus H/D in Bow-ties spillways with middle arch

جدول ۲- متوسط درصد تغییرات ضریب دبی نسبت به سرریز نیلوفری

Table 2- Average percentage changes of discharge coefficient compared to Morning Glory

نام مدل Name of model	مساحت سطح داخلی سرریز (cm <sup>2</sup> ) Internal area of spillway (cm <sup>2</sup> )	تغییرات مساحت نسبت به سرریز نیلوفری (درصد) Area changes compared to Morning Glory (%)	تغییرات ضریب دبی نسبت به سرریز نیلوفری (درصد) Discharge coefficient changes compared to Morning Glory (%)
B-90	۱۹۲	-۳۲/۶	-۱۴/۹
B-120	۱۹۰/۲	-۳۳/۲	-۹/۵
B-150	۱۹۶/۹	-۳۱	+۱۰/۴
B-120-2.6	۲۲۷/۵	-۲۰/۱	+۰/۸
B-150-2.6	۲۲۸/۹	-۱۹/۶	+۱۰/۲
BA-60	۱۵۲	-۴۶/۶	-۵/۳
BB-90	۱۶۱/۴	-۴۳/۳	-۹/۷
BB-120	۱۳۶	-۵۲/۳	-۶/۲
Morning Glory	۲۸۴/۹	---	---

### نتیجه‌گیری

میانی و سه مدل سرریز با کمان میانی با زاویه‌های مختلف پاپیون (با طول کلی یکسان سرریز) استفاده شدند و مقادیر ضریب دبی این سرریزها نسبت به سرریز نیلوفری با طول یکسان مقایسه شد. مشاهدات آزمایشگاهی سرریزهای پاپیونی بدون

در این تحقیق با معرفی شکل جدیدی از دهانه ورودی سرریز قائم با عنوان پاپیونی، به مطالعه آزمایشگاهی تغییرات ضریب دبی این سرریزها پرداخته شد. پنج مدل سرریز پاپیونی بدون کمان

درجه، تاثیر زاویه راس پاپیون بر عملکرد ضریب دبی سرریز غالب شده و پارامتر موقعیت راس پاپیون اثر چندانی بر عملکرد هیدرولیکی سرریز نداشته است. مقایسه عملکرد هیدرولیکی مدل های پاپیونی بدون کمان میانی با سرریز نیلوفری نشان می دهد که مدل B-150 نسبت به سایر مدل ها دارای بیشترین عملکرد هیدرولیکی (۱۰ درصد) است. از طرفی، این سرریز دارای مزیت اقتصادی بهتری (۳۱ درصد) نسبت به سرریز نیلوفری است. در سرریزهای پاپیونی با کمان میانی، عملکرد هیدرولیکی این سرریزها نسبت به سرریز نیلوفری حدود ۵/۳ تا ۹/۷ درصد پایین تر است. دلیل این موضوع می تواند تداخل جریان های ریزشی و سطح داخلی کمتر این مدل ها باشد. با توجه به اینکه در ساخت سدهای مخزنی، خصوصاً سدهای خاکی، بخش عمده هزینه اجرایی مربوط به اجرای سازه بتنی سرریزهای اضطراری است، در این شرایط با انتخاب سرریزهای پاپیونی با هندسه بهینه ضمن بهبود شرایط هیدرولیکی جریان، می توان به صرفه جویی اقتصادی مناسبی نیز رسید.

کمان میانی نشان داد که در این مدل ها دو جت اصلی جریان از محل پاپیون ها به درون شفت قائم ایجاد می شود، در حالی که مدل های پاپیونی با کمان میانی دارای چهار جت ریزشی است که مشتمل اند بر دو جت ریزشی از کمان های میانی مماس بر شفت قائم و دو جریان ریزشی از محل پاپیون ها به درون شفت قائم. مطابق نتایج منحنی های ضریب دبی، با افزایش مقدار  $H/D$  در همه مدل ها ضریب دبی روند کاهشی دارد. اثر زاویه بین پاپیون ها نشان می دهد که با افزایش زاویه پاپیون، مقدار ضریب دبی سرریز افزایش محسوسی نشان می دهد. به نظر می رسد با افزایش زاویه پاپیون، فاصله بین قوس و ورودی جریان بیشتر می شود و جت های ریزشی فرصت بیشتری برای خارج شدن از سرریز دارند. در نتیجه در بین مدل های پاپیونی، مدل B-150 دارای ضریب دبی بالاتری نسبت به سایر مدل هاست. نتایج تاثیر موقعیت راس پاپیون نشان می دهد که در زاویه ۱۲۰ درجه راس پاپیون، موقعیت راس پاپیون اثر محسوسی بر عملکرد هیدرولیکی سرریز گذاشته است اما با افزایش زاویه راس پاپیون از ۱۲۰ به ۱۵۰

## مراجع

- Anwar, H. O., Waller, J. A., & Amphlet, M. B. (1978). Similarity of free-vortex at horizontal intake. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), 95–105.
- Bagheri, A., M. S. Bajestan, H. M. Jahromi, H. Kashkooli & H. Sedghee. (2010). Hydraulic evaluation of the flow over polyhedral morning glory spillways. *World Applied Sciences Journal*, 9(7), 712-717.
- Djillali, K. Abderrezak, B. Petrovic, G.A. & Sourenevna B. E. (2021). Discharge capacity of shaft spillway with a polygonal section: a case study of Djedra dam (East Algeria). *Water Supply*, 21 (3), 1202–1215.
- Jain, A. K., Raju, K. G., & Garde, R. J. (1978). Vortex formation at vertical pipe intakes. *Journal of Hydraulic Division ASCE*, 104(10), 1429–1445.
- Kabiri-Samani, A. R. & Keihanpour, M. (2020). Hydraulic characteristics of swirling flow at shaft spillways with the marguerite-shaped inlets. *Journal of Hydraulic Research*, 59(5), 1-15.
- Lashkar-Ara, B & Sheikhi, Y. (2017). Introduce of CPK Spillway and Study of Its Discharge Coefficient under Free Flow Regime. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(2), 209-221. (In Persian)

- MirHoseini, S. (2012). Hydraulic characteristics of flow in vertical shaft spillways with Piano-Key inlet (M.Sc. Thesis). Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Mojadami, M.J. & Kabiri-Samani, A.R. (2016). Effects of Daisy-Shape Inlet on Free Flow over Shaft Spillways. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(5), 191-202. (In Persian)
- Nasiri, S., A. Kabiri-Samani, A., & Asghari, K. (2016). Numerical Modeling of Flow Field around the Shaft Spillways Using Piano-Key Inlet. *Journal of Hydraulics*, 11(1), 53-66. (In Persian)
- Rouzegar, J., Kamanbedast, A. A. Masjedi, A., Heidarnejad, M. & Bordbar, A. (2019). The Influence of Inlet Section Geometry in Labyrinth-Morning Glory Spillways with and without Vortex Blade on Discharge Coefficient. *Journal of Water and Soil Science*, 23(3), 209-221. (In Persian)
- Sabeti, P., Hojat Karami, H. & Sarkardeh, H. (2019). Analysis of the Impact of Effective Length of Morning Glory Spillway on Its Performance (Numerical Study). *Instrumentation Mesure Métrologie*, 18(2), 211-221.
- Schleiss A. J. (2011). From labyrinth to piano key weirs. Ecolepoly technique Federal de Lausanne.
- Shemshi, R. (2012). Effects of Piano-Key inlet on flow hydraulic characteristics at vertical shaft spillways (M.Sc. Thesis). Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Shemshi, R. & Kabiri-Samani A. R. (2016). Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets. *Journal of Hydraulic Research*, 55(2), 1-11.
- USBR. (1987). Design of small dams .3rd Edition, U.S. Bureau of Reclamation.
- Wayne Coleman, H. Wei, C. Y. & Lindell, J. E. (2004). Hydraulic design of spillway. McGrawHill.



## **Experimental Study of Hydraulic Properties of Flow over Vertical Shaft Spillway with Bow-Tied Shape Inlet**

**S. Talebi\*, Gh. Mhatabi, M.Karbasi and M. Akbari**

\* Corresponding Author: Assistant professor, water engineering department, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: ghmahtabi@gmail.com

Received: 5 February 2022, Accepted: 30 May 2022

### **Introduction**

A spillway is a structure used to provide the controlled release of water from a dam or levee downstream, typically into the riverbed of the dammed river itself. One of the types of spillway used in dams is vertical shaft spillway or the same as morning glory spillway. One of the methods to increase the flow rate and reduce the occurrence of vortex currents in the spillway is to modify the shape of the inlet of the spillways. In recent years, spillways with daisy, piano key and zigzag inlets have been proposed known as spiral spillways. A review of the results of previous research shows that the common goal in the study of vertical shaft spillways is to pass the flood flows with the highest possible discharge and the lowest water level and reducing the destructive effects of vortex currents. In previous researches, issues such as the effect of the inlet type of vertical shaft spillway and geometric parameters of the structure on the discharge coefficient and the study of vortex occurrence conditions and hydraulic flow of vertical shaft spillway. In this research a new shape of vertical shaft inlet in form of Bow-tied spillway was introduced and discharge coefficient of these spillways was investigated using a series of experiments.

### **Methodology**

The experiments of this research were performed in a metal cube tank with 1.5 m length, 1 m height and 1 m width with transparent Plexiglas side walls in the hydraulic laboratory of Department of Water Engineering at Zanjan University. Bow-tied spillways were examined with different angles of the bow-tie (60-150 degree) in both cases of with middle arc and without middle arc and the results were compared with a morning glory spillway. In this research, by preparing eight bow-tie spillways and a morning glory spillway with a total length of 60 cm and considering the hydraulic conditions (H/D), 72 experiments were run to investigate the effect of the geometric shape of the spillway on the discharge coefficient.

### **Results and Discussion**

Results showed that in Bow-tied models without middle arc, increase of the bow-tie angle leads to reduce the flow interference and increase of flow discharge over the spillway. So that B-150 model (with 150 degree, bow-tie angle) had higher discharge coefficient than the other models of bow-tied. This model had better hydraulic performance than morning glory spillway (10 percent). Also, economic advantage of this model was higher than morning glory spillway (31 percent). Results of the tip position of the bow-tie spillway show in tip angle of 120 degree, the tip position of the bow-tie has a significant effect on the discharge coefficient of the spillway, but with increasing the bow tip angle from 120 to 150 degree, the tip position of the bow-tie spillway did not have much effect on the discharge coefficient. In Bow-tied models with middle arc, change of bow-tie angle had no significant effect on discharge coefficient and hydraulic performance of these models was lower than morning glory spillway (5.3-9.7). This could be due to the interference of fall currents and the low internal area of these models.

### **Conclusions**

Comparison of the hydraulic performance of bow-tie models with morning glory spillway shows that the B-150 model has the highest hydraulic performance (10%) compared to other models. On the other hand, this spillway has a better economic advantage (31%) than the morning glory spillway. In the construction of reservoir dams, especially earthen dams, the major part of the executive cost is related to the implementation of concrete structures of emergency spillway. In this situation, by choosing Bow-tied spillway with optimal geometry, a suitable economic savings can be achieved along with improving the hydraulic conditions of the flow.

**Keywords:** Bow-tied spillway , Discharge coefficient, Morning glory spillway, Vertical shaft