

## مقاله پژوهشی

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات ارتفاع بر خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای تاج دایره‌ای مورب تحت شرایط جریان غیردائمی

مهدی افیونی‌زاده اصفهانی<sup>۱</sup>، علی خوش‌فطرت<sup>۲\*</sup> و الهام ایزدی‌نیا<sup>۳</sup>

## چکیده

سرریزهای تاج دایره‌ای از سرریزهای مطمئن برای استفاده در کانال‌ها هستند که به‌صورت عمود بر جریان یا به‌صورت زاویه‌دار (مورب) نسبت به راستای جریان احداث می‌شوند. سرریزهای زاویه‌دار برای افزایش طول مؤثر سرریز و افزایش ظرفیت آبگذری استفاده می‌شوند. در این مقاله به کالیبراسیون ضریب دبی سرریز تاج دایره‌ای مورب تحت تغییر پارامتر ارتفاع سرریز تحت شرایط جریان غیردائمی پرداخته شده است. برای این منظور سه سرریز تاج دایره‌ای مورب به ارتفاع ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر تحت الگوهای مختلف تغییر دبی در فلوم تحقیقاتی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۶ متر بررسی شدند. این فلوم دارای دستگاه پی‌ال‌سی برای تنظیم دبی و ثبت داده‌های دبی و عمق جریان است. نتایج با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحلیل و مقادیر ضریب دبی کالیبره شده در شرایط جریان آزاد غیردائمی تحت الگوهای مختلف تغییر دبی محاسبه شده است. نتایج تحلیل داده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن بود که با افزایش ارتفاع سرریز و همچنین نسبت ارتفاع آب بالادست سرریز به ارتفاع سرریز، ضریب دبی جریان غیردائمی کاهش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب دبی جریان غیردائمی تحت شرایط مختلف ارتفاع جریان بالادست، ارتفاع سرریز و الگوی تغییر دبی بین ۰/۵ و ۱/۵ متغیر بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان غیردائمی، سرریز تاج دایره‌ای مورب، ضریب دبی، الگوریتم ژنتیک.

**ارجاع:** افیونی‌زاده اصفهانی م. خوش‌فطرت ع. و ایزدی‌نیا ا. ۱۴۰۳ بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات ارتفاع بر خصوصیات هیدرولیکی سرریزهای تاج دایره‌ای مورب تحت شرایط جریان غیردائمی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۲: ۹۹-۹۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14542.2558>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [khoshfetrat@khuif.ac.ir](mailto:khoshfetrat@khuif.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

## مقدمه

مطابق با تعریف، هر مانعی که بر سر راه جریان قرار گرفته و باعث بالا آمدن سطح آب در پشت آن و افزایش سرعت آب در ضمن عبور از روی آن شود، سرریز نامیده می‌شود. بندها و سرریزها از قدیمی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای نخستین بار در کشورهای ایران، هند، مصر و چین روی رودخانه‌ها به منظور افزایش رقوم سطح آب و انحراف بخشی از جریان رودخانه‌ها به سمت دلخواه استفاده شدند. سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهم برای کنترل جریان، تنظیم سطح آب و اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های آبیاری و رودخانه‌ها هستند. چنانچه سرریزها براساس استاندارد ساخته و اجرا شوند و در عمل نیز به‌طور صحیح استفاده شوند، یک وسیله ساده و مطمئن برای اندازه‌گیری جریان آب به حساب می‌آیند. در یک تقسیم‌بندی جامع، سرریزها به سه دسته لبه‌پهن، لبه‌تیز و لبه‌کوتاه تقسیم‌بندی می‌شوند. سرریزها می‌توانند به اشکال مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای و سهموی ساخته شوند. سرریزهای زاویه‌دار به‌عنوان سازه‌های هیدرولیکی مفید و درعین حال اقتصادی، مطرح هستند. این سرریزها به دلیل افزایش طول و زاویه قرارگیری در کانال نسبت به راستای جریان موجب ایجاد شرایط هیدرولیکی کاملاً متفاوت با سرریزهای عمود بر جریان می‌شوند. سه‌بعدی شدن جریان، جدایش جریان و تغییرات طول مؤثر تاج از این موارد هستند. دبی عبوری از این سرریزها با افزایش طول افزایش می‌یابد؛ البته افزایش دبی با افزایش زاویه سرریز دارای نرخ تغییرات یکنواختی نیست. با افزایش طول تاج یا افزایش زاویه سرریز نسبت به عمود بر جریان، نسبت طول مؤثر تاج به طول واقعی سرریز دارای روند نزولی است.

به دلیل ویژگی منحصربه‌فرد سرریز تاج دایره‌ای، تحقیقات انجام‌شده در این ارتباط نسبتاً گسترده است. در قرن نوزدهم تلاش‌ها برای افزایش ظرفیت تخلیه سرریزها به طراحی سرریزهای تاج دایره‌ای منجر شد. شاید بتوان مقاله رفته در سال ۱۹۰۰ میلادی را از اولین مطالعات منتشرشده در زمینه سرریزهای تاج دایره‌ای عنوان کرد.

نوری و چیلمران (۲۰۰۵) ویژگی‌های جریان آزاد بر سرریزهای نرمال و مورب با تاج نیم‌دایره‌ای را مطالعه کردند. آن‌ها با مدل‌سازی ۴۸ هندسه مختلف سرریز نشان دادند که برای سرریز نرمال، ضریب دبی جریان با افزایش

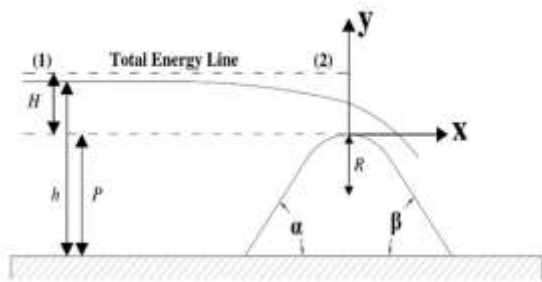
$h_u/p$  افزایش می‌یابد. در این آزمایش‌ها نشان داده شد که سرریزهای نرمال با تاج نیم‌دایره در مقایسه با سرریزهای با تاج لبه‌تیز کارایی بهتری دارند. شبیه‌سازی عددی جریان روی سرریزهای لبه‌پهن دوزنقه‌ای شکل، توسط هان و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد. در این تحقیق از دو مدل عددی Flow3D و SSIIM2 برای بررسی پروفیل سطح آب استفاده شد. اختلاف بین مقادیر محاسبات عددی با مقادیر مشاهداتی حاصل از مدل‌های فیزیکی برابر با ۱ تا ۱/۵ درصد به دست آمد. قبادیان و همکاران (۱۳۹۱) تأثیر زبری تاج و بدنه سرریز بر ضریب دبی جریان روی سرریزهای تاج دایره‌ای را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط بدون زبری بیشترین عامل تأثیرگذار بر ضریب دبی، نسبت بار آبی بالادست به شعاع تاج سرریز است. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش زبری نسبی سرریز، ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد. گوئل (۲۰۱۴) با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی ضریب دبی در سرریز مثلثی پرداخت و عملکرد بسیار خوب این روش را در این زمینه گزارش کرد. در تحقیق گل‌محمدی و همکاران (۱۳۹۴) در یک کانال مستطیلی با جریان متغیر تدریجی غیردائمی، عمق و هیدروگراف جریان با استفاده از روش مشخصه‌ها و تفاضل محدود و با برنامه‌نویسی در متلب باهم مقایسه شدند. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، روش مشخصه‌ها به زمان اجرایی بیشتری برای محاسبه پروفیل سطح آب نسبت به تفاضل محدود صریح نیازمند است و نزدیک‌بودن عدد کوران به یک، باعث نزدیکی نتایج حاصل از این دو روش شده است. کبیری سامانی و همکاران (۱۳۹۴) مجموعه جامعی از آزمایش‌ها را روی سرریزهای مورب جای‌گذاری شده در کانال مستطیلی روباز انجام دادند. هدف اصلی آن‌ها بررسی تأثیر زاویه قرارگیری سرریز بر رفتار و ویژگی‌های جریان و همچنین بررسی شرایط هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزهای مورب در حضور صفحات هادی و وجه شیب‌دار در بالادست سرریز مورب بوده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش زاویه جای‌گذاری سرریز، طول مؤثر سرریز مورب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین روابطی برای محاسبه آستانه استغراق و طول مؤثر سرریز مورب و توصیه‌هایی برای نحوه استفاده از صفحات هادی و وجه شیب‌دار بالادست سرریز ارائه کردند. ایزدی‌نیا و همکاران

ارتفاع سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای دوطرفه بر ضریب دبی در شرایط جریان زیربحرانی را به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت بررسی کردند. سرریزهای جانبی در حالت سه، چهار و پنج سیکل با ارتفاع ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و طول بازشدگی ۴۰ سانتی‌متر استفاده شدند. ضریب دبی به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقادیر محاسبه‌شده با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته و میزان خطا با کاهش عدد فرود کمتر می‌شود. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، ضریب دبی سرریز جانبی با افزایش ارتفاع سرریز و عدد فرود بالادست کاهش می‌یابد. زبردست‌نژاد شیرازی و بیرامی (۱۳۹۸) سرریزهای لبه‌پهن نیم‌دایره‌ای را برای جریان‌های آزاد بررسی کردند. ا در این پژوهش، تحقیقات روی دو پارامتر قطر و طول انجام شده‌است که همراه با تبدیل و بدون تبدیل در دهانه ورودی قرار گرفته‌اند و سپس نتایج عددی و تحلیلی به‌دست‌آمده با نمونه‌های آزمایشگاهی آن بررسی و مقایسه شده است.

بورتی و همکاران (۲۰۱۷) با فرضیات ساده‌کننده و ثابت در نظر گرفتن ضریب دبی در جریان غیردائمی با مشتق‌گیری از رابطه کلی سرریزها، به کالیبراسیون سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی و مثلثی در خروجی مخزن پرداختند. آن‌ها اذعان کردند که این روش دارای قابلیت کاربرد برای سایر سرریزها نیز است. این پژوهشگران با مطالعه روی سرریز مستطیلی و مثلثی و متغیر بودن سایر پارامترها به ارائه رابطه‌هایی برای ضریب دبی جریان در حالت جریان غیردائمی با مشتق‌گیری از هد آب نسبت به زمان  $(dh/dt)$  و محاسبه شیب خط آن پرداختند و این روش را برای سایر سرریزها نیز قابل‌استفاده دانستند. به همین دلیل در این مقاله نیز از روش مشتق‌گیری برای جریان غیردائمی استفاده شده است.

اعرفی و همکاران (۲۰۲۳) در یک پژوهش آزمایشگاهی به کالیبراسیون ضریب دبی سرریز کلید پیاپویی در حالت غیردائمی پرداخته‌اند. در این پژوهش سه نوع سرریز کلید پیاپویی مستطیلی نوع A با ارتفاع‌های متغیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر مطالعه شده است. محدوده دبی ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه تحت بازه‌های تغییر دبی ۵، ۳ و ۱ لیتر بر ثانیه و بازه تغییرات زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه بوده است. در این تحقیق نتیجه گرفته شده است که با افزایش ارتفاع

(۱۳۹۶) به بررسی ضریب دبی در سرریزهای تاج دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند و خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریزهای تاج مدور را در هفت گروه بررسی کرده و به مقایسه نتایج حاصل با نتایج تحقیقات پیشین پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ضریب دبی در سرریزهای استوانه‌ای، نیم‌استوانه‌ای و ربع استوانه‌ای با افزایش هد نسبی جریان ابتدا روند افزایشی و سپس کاهشی دارد. با مقایسه ضریب دبی این سرریزها، مشاهده شد که مقدار ضریب دبی در یک  $H_0/R$  ثابت برای سرریزهای استوانه‌ای بیشترین و برای سرریزهای ربع دایره‌ای کمترین مقدار است که این عامل ناشی از شکل سرریز و انحنای بیشتر خطوط جریان در سرریزهای استوانه‌ای نسبت به سرریز ربع دایره‌ای است. عمر و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان و رابطه هد-دبی در سرریزهای لبه‌پهن با تاج نیم‌دایره‌ای به دو صورت نرمال و مورب در کانال تحت زوایا و ارتفاع‌های مختلف پرداختند. آن‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندمتغیره معادله‌ای برای ارتباط دبی جریان با هد به‌دست آورده و به روش‌های مختلف رابطه خود را اعتبارسنجی کردند. بررسی‌ها نشان داد که معادله به‌دست‌آمده دارای ضریب همبستگی بالا، خطای کم و قابلیت اطمینان زیادی است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای تعیین دبی جریان در سرریزهای مورد بررسی، استفاده شود. بجایا و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی مشخصات هندسی جریان روی سرریز نیم‌دایره‌ای تحت زاویه نرمال و مورب پرداختند. برنامه آزمایشگاهی شامل ۴ اندازه از سرریزها در حالت نرمال و حالت انحرافی نسبت به دیواره کانال است. ۴ مدل شامل ارتفاع تاج ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ سانتی‌متر با شعاع تاج دایره به ترتیب ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر است. در حالت مورب دو زاویه انحراف ۶۰ و ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده که ضریب دبی متأثر از پارامترهای هندسی نظیر شعاع تاج دایره و ارتفاع تاج و همچنین زاویه انحراف است. نتیجه به‌دست‌آمده در این مقاله این است که شعاع بزرگ‌تر تاج دایره منجر به ضریب کمتر دبی سرریز می‌شود؛ همان‌طور که ارتفاع تاج دایره‌ای بزرگ‌تر باعث ضریب دبی کمتر می‌شود. به عبارت دیگر ضریب دبی در سرریز مورب بیشتر از حالت نرمال آن است و با افزایش تمایل به دیواره کانال افزایش می‌یابد. صفی‌لو و فرسادی‌زاده (۱۳۹۹) تأثیر



شکل ۱- طرح شماتیک جریان در سرریز تاج دایره‌ای مورب

جدول ۱، واحد و دیمانسیون پارامترهای مؤثر در سرریزهای کرامپ را برای تحلیل ابعادی نشان می‌دهد.

با توجه به این جدول و شناخت پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان در سرریز کرامپ، تابع کلی در این نوع سرریز را می‌توان به صورت معادله (۱) در نظر گرفت.

$$F(P, H, L_w, \alpha, \beta, \gamma, \rho, \mu, \sigma, q, g, h) = 0 \quad (1)$$

در شرایط جریان آزاد برای سرریز کرامپ، تابع کلی را می‌توان به صورت معادله (۲) ساده کرد.

$$F(P, H, R, b, \alpha, \beta, \gamma, \rho, \mu, \sigma, q, g) = 0 \quad (2)$$

سرریز، ضریب دبی افزایش و درمقابل، عدد فرود و نسبت ارتفاع آب به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد.

در مقاله حاضر برای اولین بار کالیبراسیون ضریب دبی سرریز تاج دایره‌ای مورب نسبت به تغییرات ارتفاع سرریز در جریان غیردائمی تحت الگوی دبی-زمان به صورت افزایشی و به کمک روش تجربی بررسی و سپس کالیبراسیون ضریب دبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

## مواد و روش‌ها

در این قسمت ابتدا به تحلیل ابعادی سرریز تاج دایره‌ای مورب برای شرایط آزاد جریان پرداخته شده است. شکل ۱ نمای شماتیک جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای مورب را به همراه معرفی پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد.

در این شکل، P ارتفاع سرریز، h عمق آب در قسمت بالادست جریان، H ارتفاع جریان بالادست نسبت به تاج سرریز، R شعاع تاج دایره، b عرض کانال،  $\alpha$  زاویه شیب وجه بالادست،  $\beta$  زاویه شیب وجه پایین دست است.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی پارامترهای مؤثر در سرریزهای کرامپ در جهت آنالیز ابعادی

| نام متغیر                  | علامت متغیر | واحد                 | دیمانسیون       |
|----------------------------|-------------|----------------------|-----------------|
| ارتفاع سرریز               | P           | متر                  | L               |
| عمق آب روی سرریز           | H           | متر                  | L               |
| شعاع تاج دایره             | R           | متر                  | L               |
| شیب بالادست                | $\alpha$    | -                    | -               |
| شیب پایین دست              | $\beta$     | -                    | -               |
| زاویه جایگذاری سرریز       | $\gamma$    | -                    | -               |
| جرم واحد حجم سیال          | $\rho$      | کیلوگرم بر مترمکعب   | $ML^{-3}$       |
| لزجت دینامیکی سیال         | $\mu$       | کیلوگرم بر متر ثانیه | $ML^{-1}T^{-1}$ |
| کشش سطحی                   | $\sigma$    | نیوتن بر متر         | $FL^{-1}$       |
| دبی بر واحد عرض            | q           | مترمربع بر ثانیه     | $L^2T^{-1}$     |
| شتاب ثقل                   | g           | متر بر مجذور ثانیه   | $LT^{-2}$       |
| عمق جریان در بالادست سرریز | h           | متر                  | L               |

و H به عنوان متغیرهای تکرار، می‌توان پارامترهای بدون بُعد اولیه را به صورت معادلات (۳) تا (۸) دسته‌بندی کرد.

$$\Pi_1 = P/H \quad (3)$$

$$\Pi_2 = R/H \quad (4)$$

$$\Pi_3 = b/H \quad (5)$$

با استفاده از روش پی-باکینگهام و با توجه به اینکه تعداد متغیرهای مستقل ۹ عدد و این متغیرها دارای سه بُعد اصلی M، L و T هستند، در نتیجه بایستی ۶ رابطه بدون بُعد استخراج کرد. با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل q،  $\rho$

(۱۴) صرفنظر شده است؛ بنابراین ضریب دبی در سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد به صورت معادله (۱۴) و تابعی از نسبت‌های  $P/H$ ,  $R/H$  و  $b/H$  است.

$$C_d = G(P/H, R/H, b/H) \quad (14)$$

که در این تحقیق فقط تأثیر ارتفاع سرریز  $P$  مورد نظر بوده است؛ بنابراین فقط تأثیر  $P/H$  بر روی  $C_d$  بررسی شده است. تمامی آزمایش‌های تجربی این مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد واحد اصفهان (خوراسگان) اجرا شده و از ابزار و تجهیزات آن شامل فلوم، ابزار دقیق برای اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی نظیر دبی، سرعت و عمق جریان استفاده شده است (شکل‌های ۲ و ۳).

طول فلوم ۱۰ و عرض آن ۰/۶ متر است و روی پایه‌ای به ارتفاع ۱/۱ متر از سطح زمین قرار گرفته است. ارتفاع فلوم در طول مسیر بدون تغییر است. همچنین جنس دیواره‌های فلوم، شیشه‌ای با اسکلت فلزی بوده و جریان داخل آن قابل مشاهده است. این فلوم مجهز به یک پمپ برای انتقال آب از مخزن به فلوم است که آب مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها توسط آن فراهم می‌شود. فلوم مذکور مجهز به سیستم گردش بسته آب است و قابلیت تأمین حداکثر دبی تا ۵۵ لیتر بر ثانیه را داراست. مخزن این فلوم از جنس فایبرگلاس و استوانه‌ای شکل و با حجم ۱۰ مترمکعب در ارتفاع حدود ۲ متر در زیرزمین قرار گرفته است. فلوم توسط دستگاه PLC قابلیت تنظیم دبی را دارد. عمق سنج دستگاه بدون تماس با سطح آزاد جریان، از طریق ارسال و دریافت امواج مافوق صوت، فاصله را با سرعت و دقت بسیار بالا اندازه‌گیری می‌کند و از این طریق عمق جریان در دستگاه PLC ثبت می‌شود. درواقع مهم‌ترین قسمت این مجموعه آزمایشگاهی، دستگاه PLC متصل به فلوم است و همه تنظیمات جریان اعم از میزان دبی جریان، حداکثر میزان دبی، هیدروگراف‌های مربوط و همچنین ثبت داده‌های عمق جریان توسط این دستگاه انجام می‌شود. در تحقیق حاضر ۳ مدل متفاوت از نظر ارتفاع برای انجام آزمایش استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. این سرریزها از جنس ورق گالوانیزه بوده و در فاصله ۵/۲ متری از ابتدای کانال قرار گرفته‌اند (شکل ۴).

$$\Pi_4 = \mu / \rho q \quad (6)$$

$$\Pi_5 = \sigma H / \rho q^2 \quad (7)$$

$$\Pi_6 = gH^3 / q^2 \quad (8)$$

با توجه به مقادیر بدون بُعد به دست آمده از معادلات بالا، معادله (۲) را می‌توان به صورت معادله (۹) بازنویسی و تابع کلی متشکل از گروه‌های بی‌بُعد را مشخص کرد:

$$F(P/H, R/H, b/H, \mu/\rho q, \sigma H/\rho q^2, gH^3/q^2) = 0 \quad (9)$$

با توجه به اینکه دبی بر واحد عرض سرریز ( $q$ ) برابر با حاصل ضرب سرعت جریان در عمق آب روی سرریز ( $q=V.h$ ) است و همچنین بنا بر تعریف اعداد بی‌بُعد مهم در علم سیالات، پارامترهای بدون بُعد  $\Pi_4$ ,  $\Pi_5$  و  $\Pi_6$  به ترتیب برابر با معکوس اعداد رینولدز، وبر<sup>۲</sup> و فرود<sup>۳</sup> هستند. با توجه به تعاریف بالا، معادله (۹) را می‌توان به صورت معادله (۱۰) بازنویسی کرد:

$$F(H/P, R/H, b/H, 1/Re, 1/We, gH^3/q^2) = 0 \quad (10)$$

همواره می‌توان با استفاده از عملیاتی نظیر معکوس کردن، ضرب کردن یا به توان رساندن پارامترهای بدون بُعد در آنالیز ابعادی، متغیرهایی مطلوب‌تر را به دست آورد. با استفاده از این اصل می‌توان معادله (۱۱) را نوشت:

$$F(H/P, R/H, b/H, Re, We, q^2/gH^3) = 0 \quad (11)$$

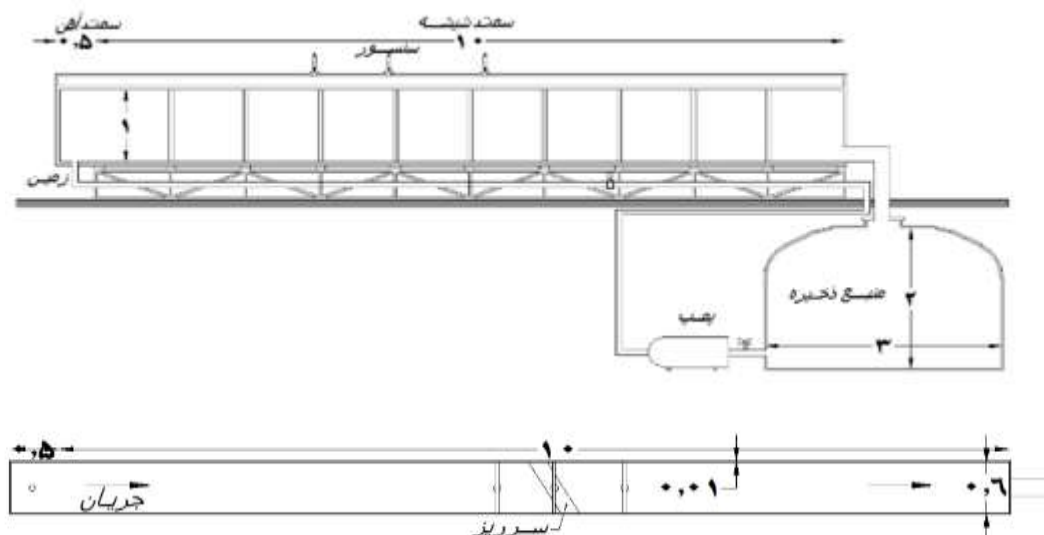
با نوشتن معادله فوق بر حسب  $q$  می‌توان معادله (۱۲) را نوشت.

$$q = g^{0.5} H^{1.5} . G(H/P, R/H, b/H, Re, We) \quad (12)$$

با توجه به معادله (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت ضریب دبی سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد تابعی از پارامترهای بدون بُعد به صورتی که در معادله (۱۳) ارائه شده است خواهد بود.

$$C_d = G(H/P, R/H, b/H, Re, We) \quad (13)$$

برای یک سیال معین با توجه به اینکه مقادیر  $g$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$  و  $\mu$  معلوم و ثابت است، اعداد رینولدز و وبر تنها تابعی از جریان در بالادست سرریز (محل اندازه‌گیری  $H$  یا همان نسبت  $H/P$  است؛ به عبارت دیگر از آن‌جا که اعداد رینولدز و وبر و همچنین نسبت  $H/P$  دارای همبستگی بالایی بوده و چون سه متغیر مستقل اشاره شده تنها بر یک متغیر مستقل اثرگذار هستند، از اعداد رینولدز و وبر در معادله



شکل ۲- شکل شماتیک فلوم مورد استفاده در پژوهش (ابعاد به متر)



شکل ۴- نحوه استقرار سرریز مورب در کانال آزمایشگاهی (تصویر از بالا)



شکل ۳- تصویر فلوم مورد استفاده در پژوهش

جدول ۲- مشخصات هندسی - هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

| نام<br>سازه | ارتفاع سازه<br>(P)<br>(cm) | شعاع تاج دایره<br>(R)<br>(cm) | زاویه شیب وجه پایین‌دست<br>(β)<br>(درجه) | زاویه شیب وجه بالادست<br>(α)<br>(درجه) | زاویه قرارگیری سرریز مورب در کانال<br>(ε)<br>(درجه) |
|-------------|----------------------------|-------------------------------|--|--|---|
| A۱          | ۱۰                         | ۷/۵                           | ۴۵                                       | ۴۵                                     | ۳۰  |
| A۲          | ۱۵                         | ۷/۵                           | ۴۵                                       | ۴۵                                     | ۳۰  |
| A۳          | ۲۰                         | ۷/۵                           | ۴۵                                       | ۴۵                                     | ۳۰  |

بلافاصله قبل از سرریز در فاصله ۵h از طریق حسگر عمق‌سنج و دی‌های مختلف نیز از طریق دی‌سنج که همگی به دستگاه PLC متصل هستند، اندازه‌گیری شده و از طریق اتصال به کامپیوتر در فایل‌های مشاهده و ذخیره می‌شود. بدین ترتیب فایل‌های شامل دی‌های مختلف و عمق جریان متناظر با آن به‌دست آمده که برای کالیبراسیون سرریزها به‌کار رفته است. برای حالت جریان آزاد،

آزمایش‌های این تحقیق در ۳ الگوی مختلف تغییر دبی و هر الگو شامل ۳ گام زمانی متفاوت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین در مجموع ۹ آزمایش متفاوت برای هر یک از سرریزها انجام شده است. در حالت کلی برای انجام آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک، دبی جریان با الگوهای مختلف افزایشی ۱ لیتر، افزایشی ۳ لیتر، افزایشی ۵ لیتر انجام شده است. درواقع به‌طور همزمان عمق جریان

رابطه محاسبه دبی برای سرریز تاج دایره‌ای مورب در شرایط آزاد جریان مورد بررسی در تحقیق حاضر به صورت معادله (۱۵) در نظر گرفته شده است:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gL} h^{3/2} \quad (15)$$

آیچل (۱۹۵۳) طی تحقیقات آزمایشگاهی خود معادله‌ای کاربردی برای به دست آوردن ضریب دبی سرریزهای مورب به صورت معادله (۱۶) ارائه داد.

$$C_d = C_D \left(1 - \frac{1}{1 + 3.70^{1.17} P}\right) \quad (16)$$

در این معادله P ارتفاع سرریز،  $C_d$  ضریب دبی سرریز در حالت مورب،  $C_D$  ضریب دبی سرریز در حالت نرمال و همچنین  $\phi = \frac{2\theta}{(\pi - 2\theta)}$  است که  $\theta = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$  و  $\varepsilon$  زاویه سرریز با محور عمودی کانال است. برای به دست آوردن  $C_D$  (ضریب دبی سرریز در حالت نرمال) از معادله هگر به صورت معادله (۱۷) استفاده می‌شود.

$$C_D = 1 + \frac{2\left(\frac{h}{R}\right)}{11 + 0.1\left(\frac{h}{R}\right)} \quad (17)$$

که در این معادله R زاویه سرریز و  $\theta$  برابر با  $4/5$  است. همان‌طور که گفته شد، در همه تحقیقاتی که روی سرریز تاج دایره‌ای انجام شده است، جریان دائمی بوده، پس به دلیل اینکه در پژوهش حاضر روند همه آزمایش‌ها و محاسبات در حالت غیردائمی بررسی شده است، لازم است رابطه بر حسب زمان ارائه شود. با مشتق زمانی از دو طرف معادله (۱۵)، معادله (۱۸) به دست می‌آید:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{2}{3} \sqrt{2gL} \left( \frac{dC_d}{dt} h^{3/2} + \frac{3}{2} h^{1/2} \frac{dh}{dt} \right) C_d \quad (18)$$

با جایگذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۶)، معادله‌ای برای به دست آوردن ضریب دبی سرریزهای مورب به دست می‌آید. با مشتق‌گیری از معادله (۱۹)، معادله (۲۰) بر حسب ارتفاع آب پشت سرریز در زمان‌های مختلف به دست می‌آید:

$$C_d = 1 + \frac{2\left(\frac{h}{R}\right)}{11 + 0.1\left(\frac{h}{R}\right)} \left(1 - \frac{1}{1 + 3.70^{1.17} P}\right) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_d}{dt} = & \frac{2\left(11R \frac{dh}{dt}\right)}{(11R + 4.5h)^2} \left(1 - \frac{h}{(1 + 3.70^{1.17} P)P}\right) \\ & + \left(-\frac{P(1 + 3.70^{1.17}) \frac{dh}{dt}}{P^2(1 + 3.70^{1.17})^2}\right) \left(1 - \frac{h}{(1 + 3.70^{1.17} P)P}\right) \\ & + \frac{2h}{11R + 4.5h} \end{aligned} \quad (20)$$

آزمایش‌ها به ترتیب مراحل چندگانه زیر انجام شد:

۱- نصب و مهار کردن سرریز تاج دایره‌ای مورب موردنظر در فاصله ۵/۲ متر از ورودی فلوم آزمایشگاهی.

۲- نصب ارتفاع سنج‌ها در فواصل ۶/۵، ۵/۸ و ۴/۵ متری از ورودی فلوم آزمایشگاهی.

۳- روشن کردن دستگاه پمپ آب و تنظیم دبی اولیه.

۴- گذشت زمان به مدت حدود ۲ دقیقه برای ثابت شدن جریان.

۵- ثبت و ذخیره لحظه‌ای همه داده‌ها تا لحظه عبور حداکثر دبی در فلوم.

۶- برداشت داده‌های ذخیره شده از خروجی دستگاه PLC در قالب یک فایل اکسل.

۷- تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج

در این مطالعه ابتدا معادلات حاکم استخراج و سپس از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. فرآیند بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک براساس یک روند تصادفی هدایت‌شده، استوار است. این روش بر مبنای نظریه تکامل تدریجی و ایده‌های بنیادین داروین پایه‌گذاری شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی غیرجبری است که برای توابعی که بهینه‌سازی آن‌ها با روش‌های جبری امری طاقت‌فرسا است، مناسب است. باین وجود، این الگوریتم و سایر الگوریتم‌های تکاملی، فضای پاسخ را به صورت موازی و خوشه‌به‌خوشه و نه به صورت عضو به عضو بررسی کرده و به همین دلیل، امکان رخ دادن ماکزیمم یا مینیمم‌های محلی از بین می‌رود. همچنین این روش‌ها نیازی به اطلاعات مربوط به مشتقات تابع هدف نداشته و تنها شکل اصلی تابع مورد نیاز است.

برای بهینه‌سازی با روش الگوریتم تکاملی در نرم‌افزار اکسل، با استفاده از حل‌گر موجود در نرم‌افزار، متغیر هدف مسئله، کالیره می‌شود که برای رسیدن به این مهم، مقدار مجموع خطاها باید حداقل مقدار خود را داشته باشد تا بهترین ضریب دبی که همان ضریب دبی کالیره است، محاسبه شود. پس از مشخص کردن متغیر هدف که در این پژوهش همان ضریب دبی است، در ادامه گزینه الگوریتم تکاملی انتخاب می‌شود و نرم‌افزار تحلیل خود را برای محاسبه بهترین ضریب دبی با کمترین میزان مجموع خطاها انجام می‌دهد.

با استفاده از معادله (۲۰)،  $dh/dt$  که آهنگ تغییرات ارتفاع آب در بالادست جریان نسبت به زمان و برابر با شیب

نمودار عمق جریان بالادست-زمان است، به صورت معادله (۲۱) به دست می‌آید:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\frac{dC_d}{dt}}{\frac{3(11R)}{(11R + 4.5H)^2} \left( 1 - \frac{h}{(1 + 3.7\phi^{1.17})P} \right) - \left( \frac{P(1 + 3.7\phi^{1.17})}{P^2(1 + 3.7\phi^{1.17})^2} \right) \left( 1 + \frac{3h}{11R + 4.5H} \right)} \quad (21)$$

## نتایج و بحث

برای به دست آوردن ضریب دبی لحظه‌ای جریان غیردائمی با الگوهای افزایشی در بازه‌های زمانی ۵-۱۰ و ۱۵ ثانیه، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. آهنگ تغییرات ضریب دبی نسبت به زمان ( $dC_d/dt$ ) با استفاده از معادله (۲۰) به دست می‌آید و در مرحله بعد برای به دست آوردن مقدار ضریب دبی نهایی، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. در این روش برای محاسبه ضریب دبی بهینه با شرط کمترین میزان خطا بین  $dQ/dt$  مشاهداتی و  $dQ/dt$  تئوری، به ازای هر ارتفاع سرریز و هر بازه زمانی فرمول (۱۸) به کار برده می‌شود. ضرایب دبی حاصل با عنوان ضریب دبی وابسته به عمق در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول نتایج آزمایش‌ها با استفاده از سه سرریز تاج دایره‌ای مورب به ارتفاع ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و عرض ۶۳ سانتی‌متر و برای الگوهای مختلف دبی جریان در بازه‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه و آهنگ تغییرات دبی به صورت ۱، ۳ و ۵ لیتر بر ثانیه آورده شده است. همچنین در شکل ۵ تغییرات ضریب دبی جریان غیردائمی ( $C_d$ ) نسبت به ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز ( $H/P$ ) به ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز و در الگوهای مختلف تغییرات دبی آورده شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در همه الگوهای تغییرات دبی، با افزایش مقدار  $H/P$ ، ضریب دبی جریان غیردائمی کاهش می‌یابد. در همه حالات، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی جریان غیردائمی کاهش می‌یابد؛ یعنی ضریب دبی جریان غیردائمی در سرریز تاج دایره‌ای مورب تابعی از شرایط جریان بالادست و ارتفاع سرریز است. همچنین ضریب دبی جریان غیردائمی در این نوع سرریز تابعی از الگوی تغییر دبی جریان است. همان‌طور که از نمودارها قابل مشاهده است، الگوی تغییر دبی بر شیب تغییرات ضریب دبی نسبت به تغییرات  $H/P$  تأثیر چندانی ندارد، اما بر میزان تأثیرپذیری از تغییرات ارتفاع

سرریز به ازای یک مقدار ثابت  $H/P$  مؤثر است. از سوی دیگر، نمودارها نشان می‌دهد که ضریب دبی جریان غیردائمی برای سرریز تاج دایره‌ای مورب بین ۰/۵ و ۱/۵ متغیر است. محققان پیشین نیز به این نتیجه رسیده بودند که ضریب دبی جریان غیردائمی برای سرریزهای دیگر نیز ثابت نبوده و تابعی از هندسه سرریز و الگوی تغییرات دبی جریان است که در این راستا می‌توان به تحقیق انجام شده توسط اعرفی و همکاران (۲۰۲۳) اشاره کرد که براساس آن، ضریب دبی جریان غیردائمی در سرریز کلید پیانویی در محدوده ۱/۴۶ و ۲/۶۰ متغیر است. همچنین براساس نتایج تحقیق بدیعی و همکاران (۱۴۰۲)، مقدار ضریب دبی جریان غیردائمی در سرریز کرامپ تحت الگوهای مختلف تغییر دبی بین ۰/۴ و ۰/۷ متغیر است.

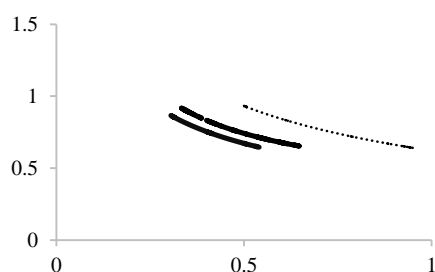
## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول و نمودارهای بخش قبل، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در همه الگوهای تغییرات دبی، با افزایش مقدار  $H/P$ ، ضریب دبی جریان غیردائمی کاهش می‌یابد. همچنین در همه حالات، به ازای مقدار ثابت  $H/P$  در هر حالت جریان مشخص، با افزایش ارتفاع سرریز در کانال، ضریب دبی جریان غیردائمی کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر، الگوی تغییر دبی بر میزان تأثیرپذیری ضریب دبی از تغییرات ارتفاع سرریز به ازای یک مقدار ثابت  $H/P$  مؤثر است و مقدار ضریب دبی تحت شرایط مختلف ارتفاع جریان بالادست و ارتفاع سرریز و الگوی تغییر دبی بین ۰/۵ تا ۱/۵ متغیر بوده است.

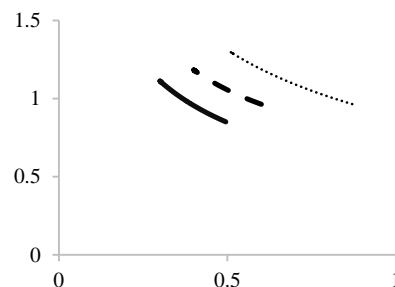


جدول ۲- ضریب دبی جریان غیردائمی

| ضریب دبی<br>cd | آهنگ<br>تغییرات<br>dcd/dt | شیب<br>ارتفاع-زمان<br>dh/dt | شیب<br>دبی-زمان<br>dQ/dt | تغییرات دبی | زمان (ثانیه) | ارتفاع سرریز<br>(سانتی متر) | دبی<br>(مترمکعب بر ثانیه) |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|
| ۱/۱۵           | ۰/۰۰۰۵۲۳                  | ۰/۰۰۱۴                      | ۰/۰۰۱۳                   | ۵           | ۵            | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۸           | ۰/۰۰۰۱۹۹                  | ۰/۰۰۰۸                      | ۰/۰۰۰۶                   | ۵           | ۱۰           | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۹           | ۰/۰۰۰۱۲۲                  | ۰/۰۰۰۶                      | ۰/۰۰۰۴                   | ۵           | ۱۵           | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۹۵           | ۰/۰۰۰۲۱۳                  | ۰/۰۰۱                       | ۰/۰۰۰۸                   | ۳           | ۵            | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۲             |
| ۰/۹۴           | ۰/۰۰۰۱۱۶                  | ۰/۰۰۰۵                      | ۰/۰۰۰۴                   | ۳           | ۱۰           | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۲             |
| ۱/۲۰           | ۰/۰۰۰۰۷۳۵                 | ۰/۰۰۰۳                      | ۰/۰۰۰۳                   | ۳           | ۱۵           | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۲             |
| ۰/۹۰           | ۰/۰۰۰۱۲۱                  | ۰/۰۰۰۴                      | ۰/۰۰۰۳                   | ۱           | ۵            | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۵۹           | ۰/۰۰۰۰۶۶۵                 | ۰/۰۰۰۲                      | ۰/۰۰۰۱                   | ۱           | ۱۰           | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۱/۰۶           | ۰/۰۰۰۰۲۷۳                 | ۰/۰۰۰۱                      | ۰/۰۰۰۰۹                  | ۱           | ۱۵           | ۱۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۹۵           | ۰/۰۰۱۱۹                   | ۰/۰۰۱۵                      | ۰/۰۰۱۴                   | ۵           | ۵            | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۳           | ۰/۰۰۰۶۱۵                  | ۰/۰۰۰۸                      | ۰/۰۰۰۶                   | ۵           | ۱۰           | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۵           | ۰/۰۰۰۴۸۰                  | ۰/۰۰۰۶                      | ۰/۰۰۰۴                   | ۵           | ۱۵           | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۲           | ۰/۰۰۰۸۹۱                  | ۰/۰۰۱                       | ۰/۰۰۰۷                   | ۳           | ۵            | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۹۱           | ۰/۰۰۰۴۱۲                  | ۰/۰۰۰۵                      | ۰/۰۰۰۴                   | ۳           | ۱۰           | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۷           | ۰/۰۰۰۲۲۷                  | ۰/۰۰۰۴                      | ۰/۰۰۰۳                   | ۳           | ۱۵           | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۶           | ۰/۰۰۰۲۲۹                  | ۰/۰۰۰۴                      | ۰/۰۰۰۳                   | ۱           | ۵            | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۵۰           | ۰/۰۰۰۱۱۶                  | ۰/۰۰۰۲                      | ۰/۰۰۰۱                   | ۱           | ۱۰           | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۲           | ۰/۰۰۰۰۵۹۵                 | ۰/۰۰۰۱                      | ۰/۰۰۰۰۸                  | ۱           | ۱۵           | ۱۵                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۹۵           | ۰/۰۰۱۴۸۹                  | ۰/۰۰۱۴                      | ۰/۰۰۱۲                   | ۵           | ۵            | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۵           | ۰/۰۰۰۰۱۳۸                 | ۰/۰۰۰۹                      | ۰/۰۰۰۰۶                  | ۵           | ۱۰           | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۴           | ۰/۰۰۰۰۰۱۲۱                | ۰/۰۰۰۰۶                     | ۰/۰۰۰۰۴                  | ۵           | ۱۵           | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۷۲           | ۰/۰۰۰۰۹۳۱                 | ۰/۰۰۱                       | ۰/۰۰۰۰۷                  | ۳           | ۵            | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۱/۱۱           | ۰/۰۰۰۰۳۴۷                 | ۰/۰۰۰۰۴                     | ۰/۰۰۰۰۴                  | ۳           | ۱۰           | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۲           | ۰/۰۰۰۰۰۱۰۵                | ۰/۰۰۰۰۴                     | ۰/۰۰۰۰۳                  | ۳           | ۱۵           | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۱           | ۰/۰۰۰۰۰۰۲۷                | ۰/۰۰۰۰۴                     | ۰/۰۰۰۰۳                  | ۱           | ۵            | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۴۹           | ۰/۰۰۰۰۱۷۳                 | ۰/۰۰۰۰۲                     | ۰/۰۰۰۰۱                  | ۱           | ۱۰           | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |
| ۰/۸۱           | ۰/۰۰۰۰۰۸۶۱                | ۰/۰۰۰۰۱                     | ۰/۰۰۰۰۰۰۸                | ۱           | ۱۵           | ۲۰                          | ۰/۰۲۵ - ۰/۰۵۰             |

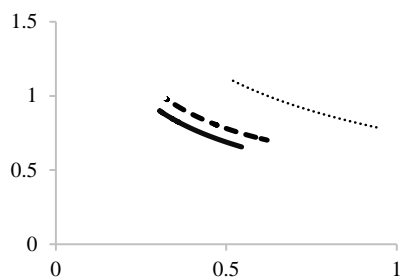


(ب) - تغییر دبی ۵- بازه زمانی ۱۰

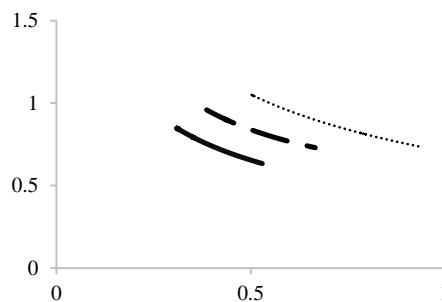


(الف) - تغییرات دبی ۵- بازه زمانی ۵

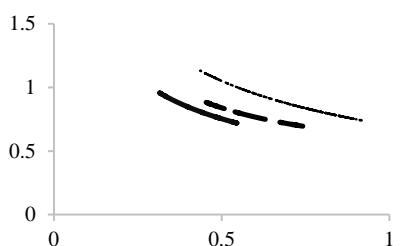
شکل ۵- تغییرات ضریب دبی جریان غیردائمی ( $C_d$ ) نسبت به ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز ( $H/P$ ) به ازای ارتفاع های مختلف سرریز (نقطه چین باریک..... ارتفاع سرریز ۱۰ سانتی متر، خط چین پررنگ ---: ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی متر و خط پررنگ —: ارتفاع سرریز ۲۰ سانتی متر) و در الگوهای مختلف تغییرات دبی



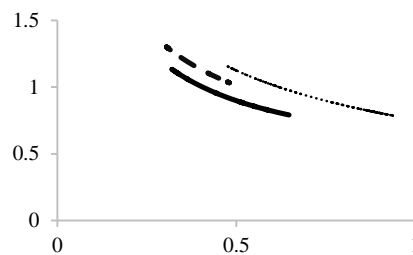
(د) - تغییر دبی ۳- بازه زمانی ۵



(ج) - تغییر دبی ۵- بازه زمانی ۱۵



(و) - تغییر دبی ۳- بازه زمانی ۱۵



(ه) - تغییر دبی ۳- بازه زمانی ۱۰



(ح) - تغییر دبی ۱۰- بازه زمانی ۵



(ز) - تغییر دبی ۱- بازه زمانی ۱۵



(ط) - تغییر دبی ۱۰- بازه زمانی ۱۰

شکل ۵- تغییرات ضریب دبی جریان غیردائمی ( $C_d$ ) نسبت به ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز ( $H/P$ ) به ازای ارتفاع‌های مختلف سرریز (نقطه چین باریک.....: ارتفاع سرریز ۱۰ سانتی‌متر، خط چین پررنگ ---: ارتفاع سرریز ۱۵ سانتی‌متر و خط پررنگ —: ارتفاع سرریز ۲۰ سانتی‌متر) و در الگوهای مختلف تغییرات دبی

## منابع

۲. ایزدینیا ا. ریسمانی ن. و کبیری سامانی ع. ۱۳۹۶. بررسی ضریب دبی در سرریز تاج دایره ای با استفاده از مدل سازی عددی. نشریه هیدرولیک. ۱۲(۳): ۵۳-۶۰.
۳. بدیعی م. ح. خوش فطرت ع. و سعادت م. ۱۴۰۲.

۱. اعرفی ع. ر. ایزدینیا ا. و خوش فطرت ع. ۱۴۰۲. ارزیابی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی تحت جریان غیردائمی- متغیر تدریجی با افزایش دبی. نشریه هیدرولیک. ۱۸(۱): ۱۲۷-۱۴۲.

13. Goel A. 2014. Neural Network Technique for Prediction of Discharge Coefficient and Discharge aor a Weir. Journal of Indian water resources society. 32(2): 25-31.
14. Haun S. Reidar B. N. Feurich O and Feurich R. 2011. Numerical modeling of flow over trapezoidal broad crested weir. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 5(3): 397-405.
15. Noori B. M. A. and Chilmeran T. A. H. 2005. Characteristics of flow over normal and oblique weirs with semicircular crests. Al Radian Engineering Journal. 13(1): 49-61.
16. Umar A. Alfa Abubakar U. Adamu A. Ohueyi Ahmed A. and Yakubu Khalifa S. 2018. Determination of discharge equation for semi-circular broad crested weir models. Journal of Science, Technology & Education. 6(2): 78-90.
- کالیبراسیون ضریب دبی جریان غیردائمی در سرریز کرامپ. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۲۳۴۲-۲۳۲۷: (۱۱)۵۵.
۴. زبردست نژادشیرازی م. ع. و بیرامی م. ک. ۱۳۹۸. بررسی ضریب دبی سرریز نیم دایره‌ای با استفاده از مدل آزمایشگاهی و نرم‌افزار FLOW3D. هفتمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری، ۲۷ تیر، موسسه علمی تحقیقاتی کومه علم آوران دانش، بابل.
۵. صفی‌لوف. و فرسادیزاده د. ۱۳۹۹. بررسی عددی تأثیر ارتفاع سرریز جانبی کنگره‌های نیم‌دایره‌ای بر روی ضریب دبی. ششمین کنفرانس بین‌المللی نوآوری و تحقیق در علوم مهندسی، ۹ تیر، آکادمی بین‌المللی علوم و مطالعات گرجستان، تفلیس-گرجستان.
۶. قبادیان ر. فرمانی‌فرد م. و کریمی ع. ر. ۱۳۹۱. اثر زیری تاج و بدنه بر ضریب تخلیه و شرایط هیدرولیکی جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای با استفاده از مدل فیزیکی. نشریه دانش آب و خاک. ۸۹-۷۷: (۱)۲۲.
۷. کبیری سامانی ع. و باقری س. ۱۳۹۴. طراحی کانال‌ها و سازه‌های انتقال آب. نشر ارکان دانش. چاپ دوم. ۹۰۴ ص.
۸. گل‌محمدی آذر ر. سعیدپناه ا. و محمدزاده س. ۱۳۹۴. حل عددی جریان غیردائمی در کانال‌ها به روش خطوط مشخصه و تفاضل محدود. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۵ اردیبهشت، دانشگاه تبریز، تبریز.
9. Aichel O. G. 1953. Discharge ratios for oblique weirs, Z. VDI. 95(1): 26-27
10. Arafı A. Izadinia E. and Khoshfetrat A. 2023. Evaluation of the Discharge Coefficient of Piano Key Weir under the Unsteady - Gradual Varied Flow with Increasing Discharge, Journal of Hydraulics. 18(1): 127-142.
11. Bachaya A. Hashmi H. N. Baluch M. A. ALI Z. and Latif A. 2019. Flow Characteristics Over the Weir with Semi-Circular Crest in Normal and Oblique Plane. Technical Journal. 24(01): 1-8.
12. Bortoni E. C. Rocha M. S. Rodrigues M. A. and Laurindo B. C. 2017. Calibration of weirs using unsteady flow. Flow Measurement. 57: 73-77.

## Research paper

# Experimental study of the effect of weir height on hydraulic characteristics of the oblique circular-crested weir under unsteady flow condition

M. Afiounizadeh Esfahani<sup>1</sup>, A. Khoshfetrat<sup>2\*</sup> and E. Izadinia<sup>3</sup>

## Extended Abstract

Weirs are a type of water structures that are used to pass floods, control water levels and measure flow rates. Accurate and appropriate design of the weir is of particular importance. Installation of weirs with inappropriate discharge capacity is one of the most important sources of channel inefficiency. Circular crest weirs are reliable to use in channels that are built perpendicular to the flow or at an angle (oblique) to the direction of the flow. Oblique weirs are used to increase the effective length of the weir and increase the water-passing capacity and hydraulic parameters such as the discharge coefficient. Moreover, the study of the flow in the unsteady state, in which the flow variables in the channel vary with time, is of special importance in hydraulic science. In this research, the calibration of the discharge coefficient of the oblique circular crest weir under unsteady flow condition was discussed. Also, the effect of changing of the weir height and the flow pattern on the discharge coefficient under unsteady flow has been investigated.

In this research, three oblique circular crest weirs with a height of 15, 10 and 20 cm were used. Other geometric parameters were identical. Both free and unsteady flow conditions were considered by the flow range of 25 to 51 liters per second. the range of flow rate changes were 1, 3 and 5 liters per second and the range of time changes of 5, 10 and 15 seconds were tested. Therefore, the total number of tests was equal to 27. Experiments were carried out in the research flume of Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan) branch, with a rectangular cross-section of 10 meters in length and 0.6 meters in width. The weirs were installed at 2.5 meters from the entrance of the channel. The flume has no slope in the floor and the height of the flume is the same without change and its walls are made of tempered glass and completely sealed. The mentioned flume was equipped with a closed water circulation system and can provide a maximum flow rate of up to 55 liters per second. The tank of this flume is made of fiberglass and has a cylindrical shape with a volume of 10 cubic meters and is placed underground at a height of about 2 meters. Flow can be regulated by PLC device. Depth of the flow can be recorded by depth gauge in the PLC device. The depth gauge is a device that measures the distance with very high speed and accuracy, without contacting the free surface of the flow. It works by sending and receiving ultrasonic waves. In fact, the most important part of this test set is the PLC device connected to the flume, which controls all flow settings, including the flow rate, maximum flow rate, relevant hydrographs, and records the flow depth data. In this study, the governing relations were first

---

1- M.Sc. Student, Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

3- Assistant Professor, Engineering College, Department of Civil Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

\* Corresponding Author: [khoshfetrat@khuif.ac.ir](mailto:khoshfetrat@khuif.ac.ir)

Received: 2023/09/13

Accepted: 2023/10/05

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14533.2557>

extracted and then the genetic algorithm was used for optimization. The optimization process in the genetic algorithm is relies on a guided random process. This method is based on the theory of gradual evolution and Darwin's fundamental ideas. Genetic Algorithm (GA) is a non-algebraic optimization method that is suitable for functions whose optimization with algebraic methods is exhausting. The GA and other evolutionary algorithms examine the response space in parallel and cluster-by-cluster, not member-by-member; for this reason, the possibility of occurrence of local maxima or minima is eliminated. Also, these methods do not need information about the derivatives of the target function, only the main form of the function is required. In this research, the solver used for optimization with evolutionary algorithm method was available in Excel software. After specifying the target variable, which was the discharge coefficient in this research, the evolutionary algorithm option was selected, and the software performed its analysis to calculate the best discharge coefficient with the lowest value for total errors.

The results obtained in this research showed that in all patterns of flow changes, increasing the ratio of water height on the weir crest to the weir height ( $H/P$ ) caused a decrease in the discharge coefficient of unsteady flow. Also, in all patterns of flow rate change, increasing the height of the weir led to a decrease in the discharge coefficient of the unsteady flow, that is, the discharge coefficient of the unsteady flow in the oblique circular crest weir is a function of the upstream flow conditions and the height of the weir. Also, the unsteady flow rate coefficient in this type of weir is a function of the flow rate change pattern. According to the graphs obtained in this research, the flow rate change pattern did not have much effect on the slope of the flow coefficient changes compared with the  $H/P$  changes, but it was effective on the degree of influence of the weir height changes for a fixed  $H/P$  value. Moreover, the graphs showed that the discharge coefficient of unsteady flow for oblique circular crest weir varied between 0.5 and 1.5, which previous researchers had also concluded that the discharge coefficient of unsteady flow for other weirs was not constant and was a function of the weir geometry and the pattern of changes in flow rate.

**Keywords:** Unsteady flow, Oblique circular-crested weir, Discharge coefficient, Genetic Algorithm.

**Citation:** Afiounizadeh Esfahani M. Khoshfetrat A. and Izadinia E. 2024. Experimental study of the effect of weir height on hydraulic characteristics of the oblique circular-crested weir under unsteady flow condition. Iranian Water Research Journal. 52: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14542.2558>