

کالیبراسیون ضریب دبی جریان غیردائمی در سرریز کرامپ

سید محمد حسین بدیعی^۱، علی خوش فطرت^{۱*}، محسن سعادت^۲

۱ گروه عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲ گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی:

جریان غیردائمی

سرریز کرامپ

ضریب دبی

الگوریتم ژنتیک

کالیبراسیون

خلاصه: سرریز کرامپ به طور گسترده ای برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های روباز با جریان غیر دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش کالیبراسیون ضریب دبی سرریز کرامپ در جریان غیردائمی و در شرایط جریان آزاد تحت دو الگوی مختلف دبی-زمان به صورت تجربی بررسی شده است. این الگوهای دبی-زمان به صورت افزایشی و کاهش‌ی و در مدت زمان‌های مختلف در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های تجربی در فلولم تحقیقاتی مجهز به دستگاه ثبت تغییرات زمانی داده‌ها، به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۸ متر انجام شده و سرریز کرامپ در فاصله ۵/۲ متری از ورودی کانال نصب گردیده است. مطابق آزمایش‌های انجام‌شده، رفتار ضریب دبی جریان غیردائمی برحسب پارامترهای بدون بعد شامل نسبت ارتفاع سرریز به ارتفاع آب روی سرریز، نسبت طول کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز و نسبت عرض سرریز به ارتفاع آب روی سرریز در الگوها و بازه‌های مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد ضریب دبی جریان غیردائمی با تمامی پارامترهای بدون بعد، نسبت عکس دارد به صورتی که با افزایش هر یک از پارامترهای ذکر شده، به طور کلی ضریب دبی کاهش می‌یابد. در گام نهایی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی ضریب دبی انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب دبی کالیبره در شرایط جریان آزاد غیردائمی تحت الگوهای مختلف در محدوده ۰/۴ تا ۰/۷ متغیر است.

۱- مقدمه

استفاده‌ی سرریز کرامپ می‌تواند به اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌ها و رودخانه‌ها، در شبکه‌های انتقال آب به منظور بالا آوردن تزار سطح آب برای آبیگری از کانال‌ها، د به‌عنوان یکی از سازه‌های تنظیم آب نقش سد انحرافی را نام برد. همچنین این سرریزها باعث افزایش ظرفیت مخزن گشته و از لحاظ اقتصادی به لحاظ امکان ساخت بصورت پیش‌ساخته و نصب در محل نسبت به سایر سرریزها از جمله سرریزهای اوجی بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه نگهداری کمتری دارند. شیب بالادست این نوع سرریز غالباً بیش‌تر از شیب پایین‌دست آن بوده که این خود باعث تسهیل در عبور ذرات و رسوبات و عدم تجمع در پشت سرریز می‌شود. همچنین از آن‌جا که در این نوع سرریزها همانند سرریزهای لبه پهن، جریان بحرانی بر روی تاج اتفاق می‌افتد؛ لذا از مفهوم انرژی مخصوص و شرایط بحرانی برای به‌دست آوردن رابطه دبی جریان از روی تاج سرریز استفاده می‌گردد. علاوه‌بر این، این نوع سرریزها می‌توانند استغراق زیادی را تحمل کنند [۱].

طبق تعریف هر مانعی که بر سر راه جریان قرار گرفته و باعث بالآمدن 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 می‌باشند که برای اولین بار در کشورهای ایران، هند، مصر و چین بر روی رودخانه‌ها به‌منظور افزایش رقوم سطح آب و انحراف بخشی از جریان رودخانه‌ها به سمت دلخواه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهم جهت کنترل جریان، تنظیم سطح آب و اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های آبیاری و رودخانه‌ها می‌باشند. چنان‌چه سرریزها بر اساس استاندارد ساخته و اجرا شوند و در عمل نیز به‌طور صحیح مورد استفاده قرار گیرند، یک وسیله ساده و مطمئن برای اندازه‌گیری جریان آب به حساب می‌آیند. در یک تقسیم‌بندی جامع سرریزها به سه دسته لبه پهن، لبه تیز و سرریز لبه کوتاه تقسیم‌بندی شده است. سرریزها می‌توانند به اشکال مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای و سهموی ساخته شوند. از موارد

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khoshfetrat@khuisf.ac.ir



زیادشان، تغییرات ارتفاع آب بالادست نسبت به دبی در آن‌ها کم‌تر است و به ارتفاع آزاد کم‌تری در بالادست نیاز دارند [۸]. نوری و عارف^۷ در تحقیق آزمایشگاهی خود رابطه‌ی نمایی بین زاویه سرریز مثلثی در پلان، ارتفاع و قطر تاج سرریز به دست آوردند. نتایج نشان داد با کاهش ارتفاع و افزایش قطر تاج سرریز، مقدار ضریب آب‌گذری افزایش پیدا می‌کند [۹]. یاکوب خلیفا و همکاران^۸ در پژوهشی به دنبال راهی برای پیش‌بینی ضریب تخلیه (C_d) برای مدل سرریز کرامپ بودند. آن‌ها از تکنیک هوش مصنوعی (AL) به انجام این کار پرداختند. C_d از هفت مدل داده محور شامل شبکه عصبی بایسین (BNN)، رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه ($MLPNN$)، الگوریتم ژنتیک (GA)، ماشین بردار پشتیبانی (SVM)، تابع اساسی شعاعی (RBF) و شبکه‌ی عصبی منحنی فیت ($CFNN$) استفاده کردند. همچنین در این پژوهش هشت مدل سرریز کرامپ با زاویه‌های ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفتند. زاویه‌ی بالادست سرریز به‌صورت کاهشی و به ترتیب ۸۵، ۷۰، ۵۵، ۴۰، ۲۵ و ۱۰ درجه در نظر گرفته شدند. به همین ترتیب زاویه پایین‌دست، به ترتیب با زاویه‌ی افزایشی ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه در نظر گرفته شد. در این تحقیق از نتایج ۳۶۰ آزمایش استفاده شد. ۷۰ درصد از این نتایج برای تمرین، ۱۵ درصد برای آموزش و ۱۵ درصد برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین پارامترهای آماری برای ضریب اندازه‌گیری (R^2)، خطای میانگین مربع ریشه ($RMSE$)، خطای مطلق میانگین (MAE) به‌عنوان معیارهایی برای مقایسه‌ی عملکرد مدل به‌کاربرده شدند. نتایج مطابقت خوبی بین مقادیر مشاهده‌شده و حدس زده‌شده با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی را نشان می‌دهند. باین‌حال در میان این مدل‌ها، مدل $CFNN$ توانست با بالاترین میزان دقت مقدار C_d را حدس بزند و دقت آن بهتر از سایر مدل‌ها بود ($RMSE=0.1635 \times 10^{-4}$, $R^2=0.9981$). علاوه بر این، در این پژوهش این نتیجه به دست آمد که پر بازده‌ترین مدل دارای ضریب دبی برابر ۱/۴۱۹۴۱ بوده است. همچنین این مقادیر با استفاده از GA با مقدار $C_d=1.14815$ بهینه‌سازی شد [۱۰]. مهدی یاسی و نادره سلامت راوندی در سال ۲۰۲۲ به بررسی عملکرد سرریزها در پیچ یک آبراهه پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از مدل عددی $FLOW3D$ استفاده نموده و به شبیه‌سازی آن پرداختند. همچنین نتایج آن را با مطالعات پیشین مقایسه کردند [۱۱].

مطالعات در رابطه با تعیین رفتار سرریزها از دیرباز انجام و به تدریج تکمیل شده است. بازین^۱ اولین کسی بود که با انجام آزمایش‌هایی بر روی سرریز لبه پهن مستطیلی، روابطی را بین تغییرات طول سرریز نسبت به ارتفاع آن به‌دست آورد [۲]. هورتن^۲ با انجام آزمایش‌هایی بر روی سرریز لبه پهن مستطیلی نشان داد که ضریب دبی فقط تابعی از نسبت H/L می‌باشد که در آن H بار کل آب روی تاج سرریز و L طول سرریز می‌باشد [۳].

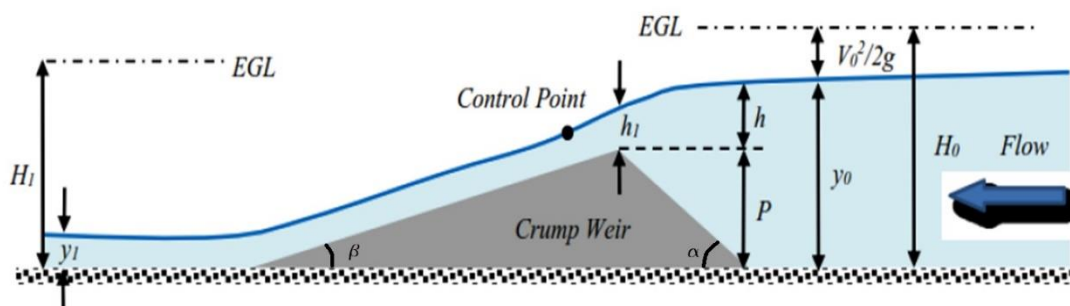
در تحقیقات جدیدتر روشهای نوین بررسی مانند شبیه‌سازی های عددی، استفاده از روشهای آماری دقیق تر و استفاده از هوش مصنوعی پیگیری شد. شبیه‌سازی عددی جریان روی سرریزهای لبه پهن ذوزنقه‌ای شکل، توسط هان و همکاران^۳ انجام شد. در این تحقیق از دو مدل عددی $Flow3D$ و $SSIIM2$ برای بررسی پروفیل سطح آب استفاده شد. اختلاف بین مقادیر محاسبات عددی با مقادیر مشاهداتی حاصل از مدل‌های فیزیکی برابر با ۱ تا ۱/۵ درصد به‌دست آمد [۴]. سارگیسون و پرسی^۴ به مطالعه اثر شیب‌های بالادست و پایین‌دست و شیب ترکیبی بالادست و پایین‌دست بر سرریز لبه پهن پرداختند. آن‌ها سرریز لبه پهن با شیب‌های جانبی ۱:۱ و ۲:۱ و عمودی و ترکیب شیب بالادست و پایین‌دست را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب بالادست به عمودی، ارتفاع پروفیل سطح آب کاهش و در نتیجه فشار استاتیکی تاج کاهش یافته و همچنین افزایش شیب بالادست به عمودی باعث کاهش ضریب دبی شد [۵]. عظیمی و همکاران^۵ به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای با شیب بالادست و پایین‌دست در شرایط جریان آزاد پرداختند. آنان دریافتند که در سرریزهای مثلثی کرامپ با شیب بالادست و پایین‌دست و یا شیب همزمان، با افزایش شیب پایین‌دست ضریب دبی افزایش می‌یابد؛ در حالی که ضریب دبی با افزایش شیب بالادست کاهش می‌یابد [۶].

در سال‌های اخیر یافتن مدل‌های دقیق هیدرولیک رفتار سرریزها مد نظر محققین قرار گرفته است. بیلهان^۶ 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 [۷]. رضایی و همکاران سرریزهای کنگره‌ای را با سرریزهای مستقیم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم، با توجه به طول

- 1 Bazin
- 2 Horton
- 3 Haun et al.
- 4 Sargison and Percy
- 5 Azimi et al.
- 6 Bilhan

7 Noori and Aref

8 Sani Yakubu Khalifa et al



شکل ۱. طرح شماتیک جریان در سرریز کرامپ

Fig. 1. Schematic illustration of Crump weir

در این مقاله برای اولین بار کالیبراسیون ضریب دبی سرریز کرامپ در جریان غیردائمی و آزاد تحت دو الگوی مختلف دبی-زمان به کمک روش تجربی بررسی شده است. این الگوهای دبی-زمان به صورت افزایشی و یا کاهششی در نظر گرفته شده است. سپس کالیبراسیون ضریب دبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارایه گردیده است.

۲- الگوسازی تجربی

۲-۱- مدلسازی ریاضی ضریب دبی جریان سرریز

در اینجا به تحلیل ابعادی سرریز کرامپ با استفاده از قضیه پی-باکینگهام^۲ برای شرایط آزاد جریان پرداخته شده است. ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که بر هیدرولیک جریان سرریزهای کرامپ تأثیرگذار می‌باشد، پرداخته می‌شود. شکل ۱ نمای شماتیک جریان در سرریزهای کرامپ به همراه معرفی پارامترهای مورد بررسی را ارائه داده است.

در شکل ۱، ارتفاع سرریز، P ، عمق آب در قسمت بالادست جریان، h عمق آب روی سرریز در قسمت بالادست جریان، h_1 عمق آب روی تاج سرریز و y_1 عمق آب در قسمت پایین دست جریان است. همچنین به طور کلی در سرریزهای کرامپ، L_w طول کف سرریز، b عرض سرریز، Q دبی جریان، α زاویه بالادست سرریز با راستای عمود (شیب بالادست) و β زاویه پایین دست سرریز با راستای عمود (شیب پایین دست) در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که به دلیل عدم شناخت از تأثیر برخی پارامترهای مؤثر و یا میزان و محدوده تأثیر آن پارامترها بسته به شرایط جریان، روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان به صورت مستقیم از قوانین

به دلیل پیچیدگی خصوصیات جریان در شرایط غیر دائمی، مطالعات اندکی در زمینه کالیبراسیون سرریزها در این شرایط صورت گرفته است. یکی از مطالعات صورت گرفته تحقیقات بورتونی^۱ است که با فرضیات ساده کننده و ثابت در نظر گرفتن ضریب دبی در جریان غیر دائمی با مشتق گیری از رابطه کلی سرریزها، به کالیبراسیون سرریزهای لبه تیز مستطیلی و مثلثی در خروجی مخزن پرداختند. آن‌ها ادعان نمودند که این روش دارای قابلیت کاربرد برای سایر سرریزها نیز هست لازم به ذکر است که بورتونی با مطالعه بر روی سرریز مستطیلی و مثلثی و متغیر بودن سایر پارامترها به ارائه ی رابطه‌ای برای ضریب دبی جریان در حالت جریان غیر دائمی با مشتق گیری از هد آب نسبت به زمان (dh/dt) و محاسبه شیب خط آن پرداختند و این روش را برای سایر سرریزها قابل استفاده دانستند به همین جهت در این تحقیق نیز از روش مشتق گیری برای جریان غیردائمی استفاده شده است [۱۲]. اعرفی و همکاران در یک پژوهش آزمایشگاهی به کالیبراسیون ضریب دبی سرریز کلید پیانویی در حالت غیردائمی پرداختند. سپس برمبنای این شرایط و با استفاده از روش تحلیلی ضریب دبی جریان در سرریز کلید پیانویی تعیین شده است. در این پژوهش سه نوع سرریز کلید پیانویی مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفته است که عبارتند از: نوع A با ارتفاعهای متغیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و سایر پارامترهای هندسی ثابت در محدوده دبی ۳۰ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه تحت بازه دبی ۵، ۳ و ۱ لیتر بر ثانیه و بازه تغییرات زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه. در این تحقیق نتیجه گرفته شده است که با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی افزایش و در مقابل، عدد فرود و نسبت ارتفاع آب به ارتفاع سرریز کاهش می‌یابد [۱۳].

2 Buckingham pi theorem

1 Bortoni

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

Table 1. Hydraulic characteristics of effective parameters in Cramp weirs for dimensional analysis

نام متغیر	علامت متغیر	واحد	دیمانسیون
ارتفاع سرریز	P	متر	L
عمق آب روی سرریز	h	متر	L
طول کف سرریز	L_w	متر	L
شیب بالادست	α	-	-
شیب پایین دست	β	-	-
جرم واحد حجم سیال	ρ	کیلوگرم بر مترمکعب	ML^{-3}
لزجت دینامیکی سیال	μ	کیلوگرم بر متر ثانیه	$ML^{-1}T^{-1}$
کشش سطحی	σ	نیوتن بر متر	MT^{-2}
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	y_0	متر	L
عمق جریان در پایین دست سرریز	y_1	متر	L

با توجه به جدول فوق و شناخت پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان در سرریز کرامپ، تابع کلی زیر در این نوع سرریز را می توان به صورت رابطه (۱) در نظر گرفت.

$$F(P, h, L_w, \alpha, \beta, \rho, \mu, \sigma, q, g, y_0, y_1) = 0 \quad (1)$$

در شرایط جریان آزاد برای سرریز کرامپ، تابع کلی را می توان به صورت رابطه ۲ ساده کرد.

$$F(P, h, L_w, b, \alpha, \beta, \rho, \mu, \sigma, q, g) = 0 \quad (2)$$

با استفاده از روش پی-باکینگهام و با توجه به این که تعداد متغیرهای مستقل ۹ عدد و این متغیرها دارای سه بعد اصلی M ، L و T هستند، در نتیجه بایستی ۶ رابطه بدون بعد استخراج نمود. با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل h ، q و ρ به عنوان متغیرهای تکرار، می توان پارامترهای بدون بعد اولیه را به صورت روابط ۳ تا ۸ بیان نمود.

حاکم بر حرکت سیالات و تئوری های موجود نظیر قوانین بقای جرم، انرژی و اندازه حرکت و یا معادلات انتشار و استهلاک انرژی به دست آورد؛ از این رو در چنین مواردی تلاش می شود با استفاده از مدل های آزمایشگاهی و با بهره گیری از آنالیز ابعادی، تأثیر آن پارامترها را بر هیدرولیک جریان مشخص نمود. آنالیز ابعادی روشی است که به کمک دیمانسیون کمیت ها رابطه ای بین آن ها برقرار می کند. در استفاده از روش آنالیز ابعادی، کمیت ها به سه گروه کمیت های هندسی، سینماتیکی و دینامیکی تقسیم بندی می شوند پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک جریان سرریز های کرامپ به صورت زیر دسته بندی می شوند:

1. خصوصیات هندسی شامل ارتفاع سرریز (P)، طول کف سرریز در جهت جریان (L_w)، زاویه بالادست سرریز با راستای عمود (α) و زاویه پایین دست سرریز با راستای عمود (β).
2. خصوصیات مرتبط با جریان شامل دبی جریان در واحد عرض (q)، عمق آب روی سرریز در قسمت بالادست جریان (h)، عمق جریان در بالادست سرریز (y_0)، عمق جریان در پایین دست سرریز (y_1) و شتاب جاذبه (g).
3. خصوصیات مربوط به سیال شامل جرم واحد حجم مایع (ρ)، لزجت دینامیکی (μ) و کشش سطحی مایع (σ).
4. تابع هدف: ضریب دبی (C_d)

جدول (۱) واحد و دیمانسیون پارامترهای مؤثر در سرریزهای کرامپ را جهت آنالیز ابعادی دسته بندی کرده است.

$$F(h/P, L_w/h, b/h, Re, We, q^2/gh^3) = 0 \quad (11)$$

$$\pi_1 = P/h \quad (3)$$

$$\pi_2 = L_w/h \quad (4)$$

$$\pi_3 = b/h \quad (5)$$

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

$$\pi_4 = \mu/\rho q \quad (6)$$

$$\pi_5 = \sigma h/\rho q^2 \quad (7)$$

$$\pi_6 = gh^3/q^2 \quad (8)$$

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

$$C_{df} = G(h/P, L_w/h, b/h, Re, We) \quad (13)$$

با توجه به پارامترهای بدون بعد به دست آمده از روابط فوق، رابطه ۲ را می‌توان به صورت رابطه ۹ بازنویسی و تابع کلی متشکل از گروه‌های بی‌بعد را مشخص نمود:

$$F(P/h, L_w/h, b/h, \mu/\rho q, \sigma h/\rho q^2, gh^3/q^2) = 0 \quad (9)$$

برای یک سیال معین با توجه به این‌که مقادیر g ، ρ ، σ و μ معلوم و ثابت است، لذا اعداد رینولدز و وبر تنها تابعی از جریان در بالادست سرریز (محل اندازه‌گیری h) و 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 روی یک متغیر مستقل اثرگذار هستند؛ لذا از اعداد رینولدز و وبر در رابطه (۳-۲۱) صرف‌نظر شده است. لذا ضریب دبی در سرریز کرامپ در شرایط جریان آزاد به صورت رابطه ۱۴ و تابعی از نسبت‌های P/h ، L_w/h و b/h است.

$$C_{df} = G(P/h, L_w/h, b/h) \quad (14)$$

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 بی‌بعد مهم در علم سیالات، پارامترهای بدون بعد Π_3 ، Π_4 و Π_5 به ترتیب برابر با معکوس اعداد رینولدز^۱، وبر^۲ و فرود^۳ هستند. با توجه به تعاریف فوق رابطه ۹ را می‌توان به صورت رابطه ۱۰ بازنویسی نمود:

$$F(h/P, L_w/h, b/h, 1/Re, 1/We, gh^3/q^2) = 0 \quad (10)$$

۲-۲- روش اجرای آزمایشات تجربی

تمامی آزمایشهای تجربی این مطالعه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد واحد اصفهان (خوراسگان) اجرا و از ابزار و تجهیزات آن شامل فلوم، ابزار دقیق جهت اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی نظیر دبی، سرعت و عمق جریان استفاده شده است.

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

-
- 1 Reynolds Number
 - 2 Weber Number
 - 3 Froude Number

آزمایش‌های این تحقیق در ۲ الگوی مختلف و هر الگو شامل ۳ گام زمانی متفاوت در نظر گرفته شد. لذا در مجموع تعداد ۶ آزمایش متفاوت بر روی سرریز کرامپ انجام شد. در حالت کلی جهت انجام آزمایش، دبی جریان به طور جداگانه هم با الگوهای کاهش و هم با الگوهای افزایشی با گام‌های کاهش و افزایشی برابر ۱ لیتر بر ثانیه انجام شده است و به‌طور هم‌زمان عمق در فاصله ۳۰ سانتیمتر قبل از سرریز از طریق حس‌گر عمق‌سنج و دبی‌های مختلف نیز از طریق دبی‌سنج که همگی به دستگاه PLC متصل هستند، اندازه‌گیری شده و از طریق اتصال به کامپیوتر در فایل مشاهده و ذخیره می‌گردد. بدین ترتیب فایل‌های شامل دبی‌های مختلف و عمق جریان متناظر با آن خواهیم داشت که می‌تواند جهت کالیبراسیون سرریزها به کار رود.

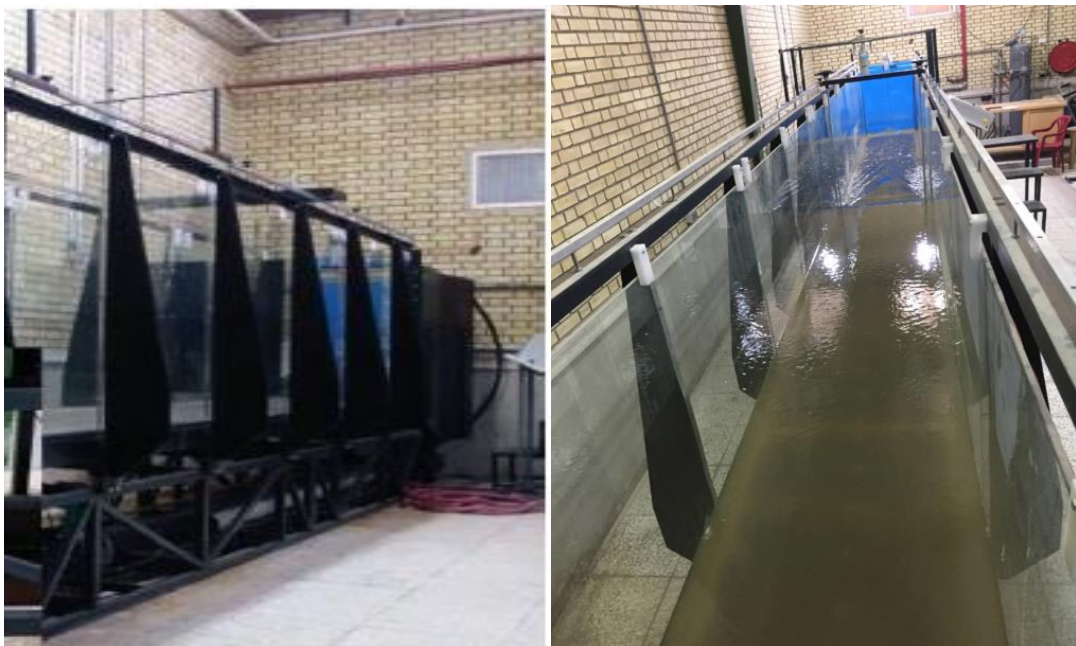
۲-۳- یافتن روابط حاکم بر مسئله و بهینه‌سازی

در این مطالعه ابتدا روابط حاکم استخراج و سپس از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. فرآیند بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک^۴ بر اساس 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 طاقت‌فرساست، مناسب می‌باشد. با این وجود، این الگوریتم و سایر الگوریتم‌های تکاملی، فضای پاسخ را به‌صورت موازی و خوشه به خوشه و نه به‌صورت عضو به عضو بررسی کرده و به همین علت، امکان رخ‌دادن 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 می‌باشد.

برای بهینه‌سازی با روش الگوریتم تکاملی در نرم‌افزار اکسل، با استفاده از حل‌گر موجود در نرم‌افزار، متغیر هدف مسئله که همان ضریب دبی است، کالیبراسیون می‌شود که برای رسیدن به این مهم، تابع هدف که در واقع همان مقدار مجموع خطاهاست باید حداقل مقدار خود را داشته باشد تا بهترین ضریب دبی که همان ضریب دبی کالیبره 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.

طول فلوم ۱۰ متر و عرض آن ۰/۸ متر است و بر روی پایه‌ای به ارتفاع ۱/۱ متر از سطح زمین قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ارتفاع فلوم در طول مسیر بدون تغییر است. همچنین کف آن از جنس ورق‌های گالوانیزه و جنس دیواره‌های فلوم، شیشه‌ای با اسکلت فلزی بوده و جریان داخل آن قابل مشاهده است. این فلوم مجهز به یک پمپ جهت انتقال آب از مخزن به فلوم است که آب موردنیاز جهت انجام آزمایش‌ها توسط آن فراهم می‌گردد. فلوم مذکور مجهز به سیستم گردش بسته آب است و قابلیت تأمین حداکثر دبی تا ۵۵ لیتر بر ثانیه را داراست. مخزن این مجموعه از جنس فایبرگلاس و دارای ابعادی با قطر ۲/۵ و ارتفاع ۳/۵ متر بوده و با حجم ۱۰ مترمکعب در ارتفاع حدود ۲ متر در زیر زمین قرار گرفته که توسط دستگاه PLC قابلیت تنظیم دبی را دارد. از دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیسی مگاب^۱ مدل ۳۰۰۰ ساخت شرکت ایران مدار محصول کشور ایران با محدوده خطای ۰/۵٪ استفاده شده است. کلیه فلومترهای مگاب ۳۰۰۰ تحت استاندارد جهانی ISO 4185 در لابراتوار هیدرومتری ایران مدار، کالیبره می‌شوند. به‌منظور مشخص شدن تراز سطح آب و عمق جریان در آزمایش‌ها از دستگاه عمق‌سنج اولتراسونیک مدل یو آر اف^۲ محصول شرکت پیش‌تاز کنترل آپادانا ساخت کشور ایران با دقت ۰/۲۵ میلی‌متر در هر متر مقدار قرائت‌شده، استفاده شده است. این سنسور بدون تماس با جسم هدف، از طریق ارسال و دریافت امواج مافوق صوت، فاصله را با سرعت و دقت بسیار بالا اندازه‌گیری کرده که با توجه به همین شاخصه مهم، دارای طول عمر بالا و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد به‌منظور کنترل شرایط جریان از کنترلر منطقی برنامه‌پذیر^۳ ساخت شرکت مهندسی مشاور راندمان صنعت محصول کشور ایران استفاده شده است. در واقع مهم‌ترین قسمت این مجموعه آزمایشگاهی، دستگاه PLC متصل به فلوم است که کلیه تنظیمات جریان اعم از میزان دبی جریان، حداکثر میزان دبی، هیدروگراف‌های مربوطه و غیره توسط این کنترلر انجام می‌شود. روش کالیبراسیون دستگاه عمق‌سنج به این صورت است که در حالتی که هیچ جریانی در کانال وجود ندارد، عمق نمایش داده شده باید برابر صفر باشد که اگر این گونه نباشد، دستگاه این قابلیت را دارد که در این حالت، عمق برابر صفر تنظیم شود. سرریز کرامپ مورد استفاده در فاصله ۵/۲ متری از ابتدای فلوم آزمایشگاهی نصب شد. جدول ۲ اطلاعات کامل هندسی سرریز مورد استفاده در کار حاضر و شکل ۳ و ۴ تصاویر مختلف سرریز کرامپ مورد استفاده در کار حاضر را معرفی نموده است.

- 1 MagAb
- 2 URF
- 3 Programmable Logic Controller (PLC)



شکل ۲. تصاویر فلوم تحقیقاتی مورد استفاده

Fig. 2. Images of research flume used

جدول ۲. اطلاعات هندسی سرریز کرامپ مورد استفاده در پژوهش حاضر

Table 2. Geometric information of Cramp overflow used in the present study

ارتفاع P (cm)	طول Lw (cm)	وتر مثلث کوچک (cm)	وتر مثلث بزرگ (cm)	عرض b (cm)	شیب بالادست (α)	شیب پایین‌دست (β)
۹	۵۴	۲۳	۳۵	۸۰	۱:۲	۱:۴



شکل ۳. نمونه ای از اجرای روش تجربی

Fig. 3. Experimentation in the applied flume



(ب)



(الف)

شکل ۴. نمایی از (الف) طرح سه بعدی از مدل آزمایشگاهی و (ب) عمق‌سنج اولتراسونیک مدل URF

Fig. 4. A view of (a) the three-dimensional design of the laboratory model and (b) the ultrasonic depth gauge of the URF model

با توجه به روابط موجود برای آنالیز ابعادی سرریز کرامپ در بخش‌های قبل و همچنین رابطه فوق، ضریب دبی به عوامل تأثیرگذاری نظیر عرض سرریز (b)، ارتفاع آب روی سرریز (h)، طول سرریز (LW)، ارتفاع آب در بالادست جریان (y_0) و ارتفاع سرریز (P) بستگی دارد. در نهایت پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی برای انواع آزمایش‌های موجود در پژوهش حاضر مطابق رابطه ۱۹ در نظر گرفته شده است.

$$C_d = G\left(\frac{b}{h}, \frac{L_w}{h}, \frac{P}{h}\right) \quad (19)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی کاهشی

آزمایش‌ها به صورت کاهشی (۱ لیتر بر ثانیه در هر ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه) و برای دبی ۵۰ تا ۲۱ لیتر بر ثانیه انجام شد. در این نوع جریان دبی با گذشت زمان براساس الگوی کاهشی خطی، کاهش می‌یابد. شکل ۵ تغییرات دبی جریان برحسب زمان را در الگوهای کاهشی مختلف و جدول ۳ محدوده تغییرات ضریب دبی در این سه مدل آزمایش کاهشی را نشان می‌دهد. در آزمایشگاه، الگوهای کاهشی (یا افزایشی) از طریق وارد نمودن الگوی تغییرات دبی در مانیتور دستگاه پی ال سی انجام شده است. این دستگاه پی ال سی متصل به دبی سنچ الکترومغناطیسی دارای قابلیت کنترل و تنظیم دبی است. بنابراین، دستگاه پی ال سی به دبی سنچ فرمان می‌دهد که تغییرات دبی مطابق الگوی وارد شده توسط کاربر اعمال گردد.

مطابق جدول ۳، در الگوی کاهشی برای جریان غیردائمی در تمامی بازه‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه روند ضریب دبی از ابتدا تا انتهای آزمایش به صورت افزایشی خواهد بود که دلیل این اتفاق را بایستی در رابطه (۱۵) جستجو کرد. مطابق رابطه مذکور و با در نظر گرفتن مقادیر ثابت عرض سرریز و شتاب جاذبه در تمامی حالت‌ها، ضریب دبی در جریان غیردائمی با آهنگ تغییرات دبی نسبت مستقیم و با حاصل ضرب آهنگ تغییرات ارتفاع آب روی سرریز در جذر ارتفاع آب در بالادست جریان، نسبت عکس دارد. با توجه به این که مقادیر dQ/dt و dh/dt اعداد ثابتی هستند، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش مقادیر y_0 در الگوی کاهشی، شاهد افزایش مقدار ضریب دبی خواهیم بود. از طرفی با مقایسه محدوده ضریب دبی

رابطه ضریب دبی برای سرریز کرامپ مستطیلی در شرایط آزاد جریان مورد بررسی در کار حاضر به صورت زیر در نظر گرفته شده است

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gby_0^3} \quad (15)$$

به دلیل اینکه در پژوهش حاضر روند انجام کلیه آزمایش‌ها و محاسبات جریان در حالت غیردائم (گذرا) بررسی شده است، لازم است رابطه فوق برحسب زمان ارائه شود. با مشتق زمانی از دو طرف رابطه ۱۵ خواهیم داشت:

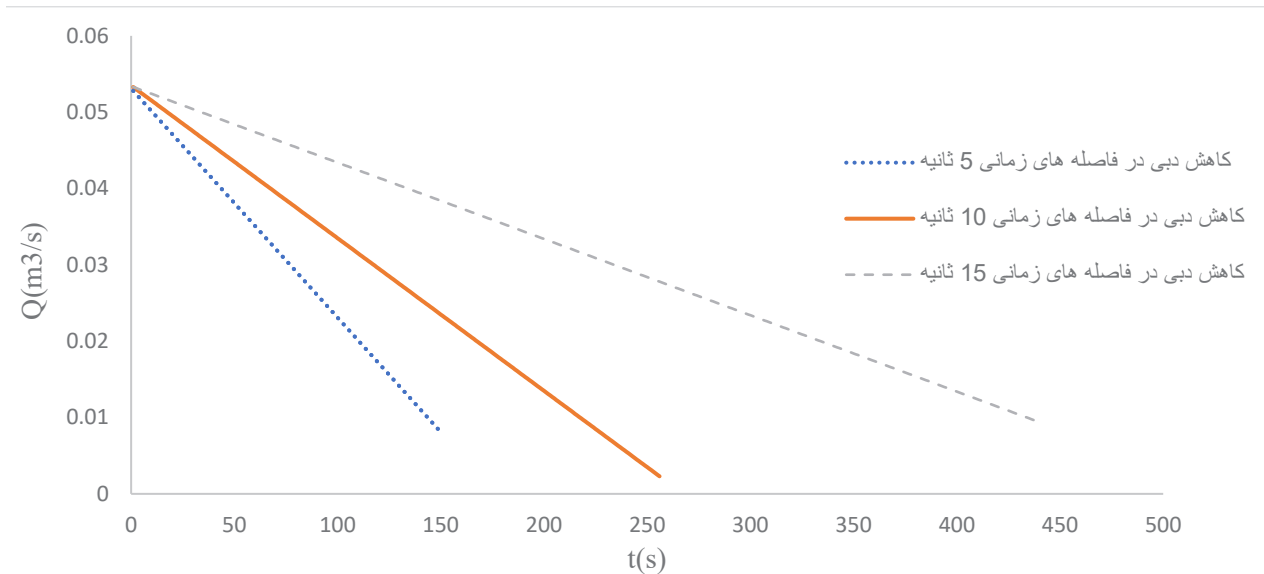
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{2}{3} C_d \sqrt{2gby_0^3} \right) \quad (16)$$

معادله ۱۶ معادله اصلی برای بهینه سازی و کالیبراسیون ضریب دبی می‌باشد. این معادله را می‌توان با فرض‌های مختلف و تحت شرایط مختلف حل نمود و مقادیر متناظر را به دست آورد. از طرفی می‌توان معادله ۱۶ را با فرض اینکه تغییرات ضریب دبی نسبت به زمان صفر باشد ساده سازی کرد. با در نظر گرفتن این نکته که شتاب جاذبه (g) و عرض سرریز (b) ثابت بوده و تغییرات ضریب دبی نسبت به زمان صفر در نظر گرفته شده است، رابطه ۱۶ را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

$$\frac{dQ}{dt} = C_d b \sqrt{2gy_0} \frac{dy_0}{dt} \quad (17)$$

در نتیجه رابطه ۱۷ به صورت رابطه ۱۸ قابل بازنویسی است:

$$C_d = \frac{\frac{dQ}{dt}}{b \sqrt{2gy_0} \frac{dh}{dt}} \quad (18)$$



شکل ۵. تغییرات دبی جریان برحسب زمان در الگوهای کاهش‌ی مختلف

Fig. 5. Changes in flow rate according to time in different reduction patterns

جدول ۳. محدوده تغییرات ضریب دبی در آزمایش‌های الگوی کاهش‌ی وقتی تغییرات ضریب دبی نسبت به زمان برابر با صفر است

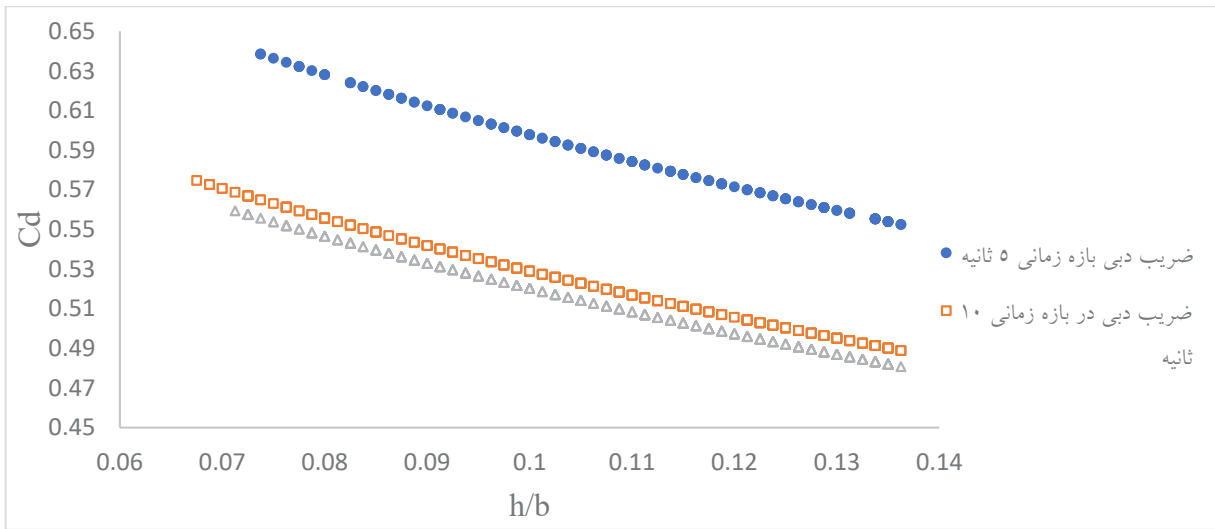
Table 3. The range of flow coefficient changes in the tests of the reduction pattern when the flow coefficient changes with respect to time is equal to zero

مقدار ثانویه	مقدار اولیه	بازه زمانی
۰/۶۳۸۵	۰/۵۵۳۹	۵ ثانیه
۰/۵۷۴۷	۰/۴۹۱۳	۱۰ ثانیه
۰/۵۵۷۵	۰/۴۸۳۲	۱۵ ثانیه

زمان ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۵ تا ۷ مشخص است، با کاهش نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عرض سرریز (h/b) و نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز (h/P) مقدار ضریب دبی افزایش یافته ولی با کاهش نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز (L_w/h)، مقدار ضریب دبی کاهش یافته است. همچنین با افزایش بازه زمانی انجام آزمایش، مقدار ضریب دبی در نسبت‌های h/b ، h/P و L_w/h یکسان، همواره کاهش یافته که این امر در افزایش بازه زمانی از ۵ به ۱۰ ثانیه نسبت به افزایش آن از مقدار ۱۰ به ۱۵ ثانیه، بسیار بیش‌تر است. علاوه‌بر این انتظار می‌رود افزایش بازه زمانی از مقدار ۱۵ ثانیه به مقادیر بالاتر، اثر چندانی بر روی تغییرات ضریب دبی نداشته باشد.

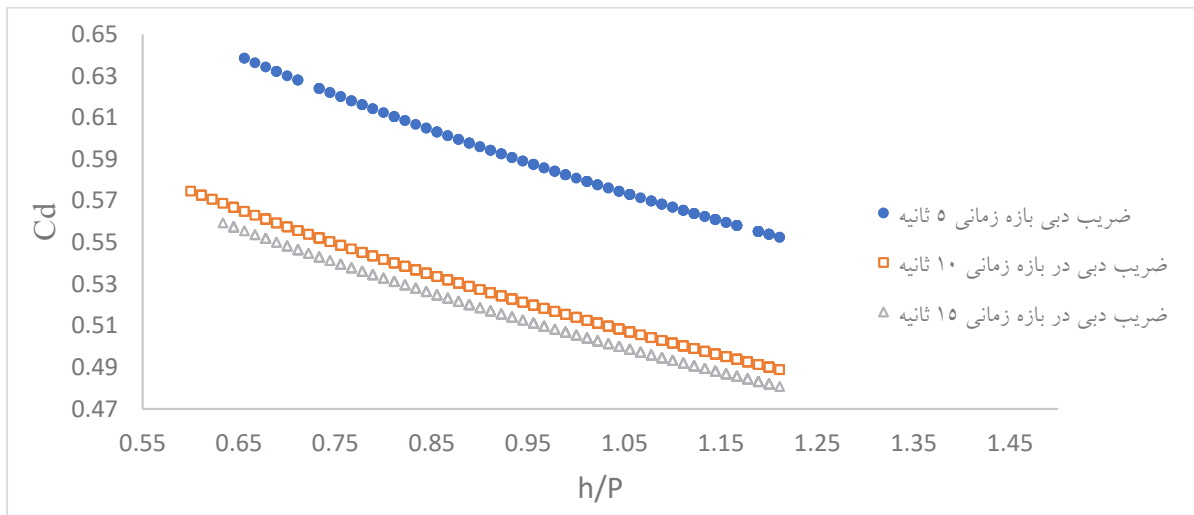
بازه‌های مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش بازه زمانی از ۵ به ۱۵ ثانیه محدوده ضریب دبی کاهش یافته و کوچک‌تر شده است. برای تحلیل علت این موضوع نیز رابطه (۱۵) در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مقادیر b و g ثابت بوده و همچنین محدوده h نیز در بازه‌های زمانی مختلف تقریباً یکسان است، می‌توان نتیجه گرفت که محدوده ضریب دبی به حاصل تقسیم dQ/dt بر dh/dt وابستگی دارد؛ به طوری که هر اندازه حاصل این نسبت بزرگ‌تر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که محدوده ضریب دبی بازه بزرگ‌تری را در بر خواهد گرفت.

اثر عوامل مؤثر بر ضریب دبی شامل نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عرض سرریز (h/b)، نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز (h/P) و نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز (L_w/h) در الگوی کاهش‌ی و



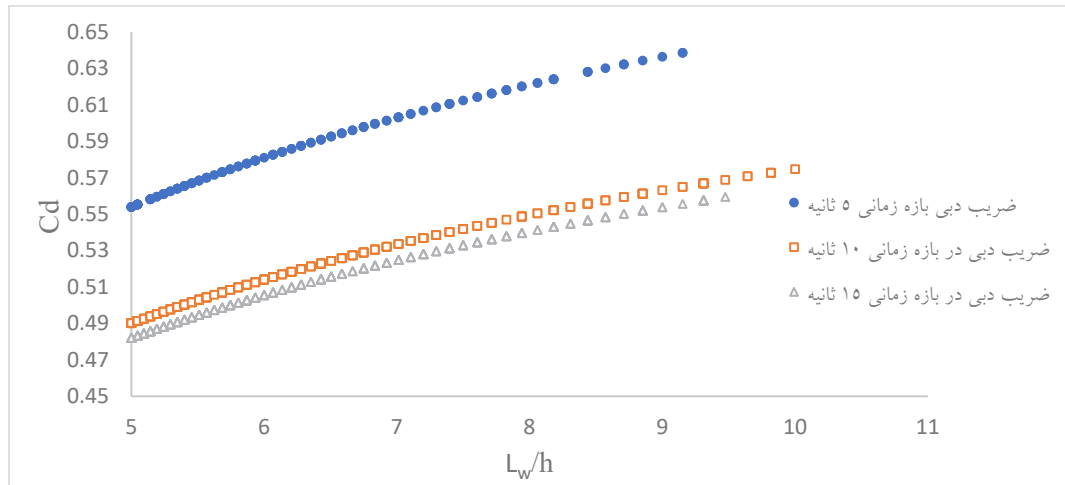
شکل ۶. تغییرات ضریب دبی جریان برحسب نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عرض سرریز در الگوی کاهش

Fig. 6. Changes in the flow rate coefficient according to the ratio of the water height on the weir to the width of the weir in the decreasing pattern



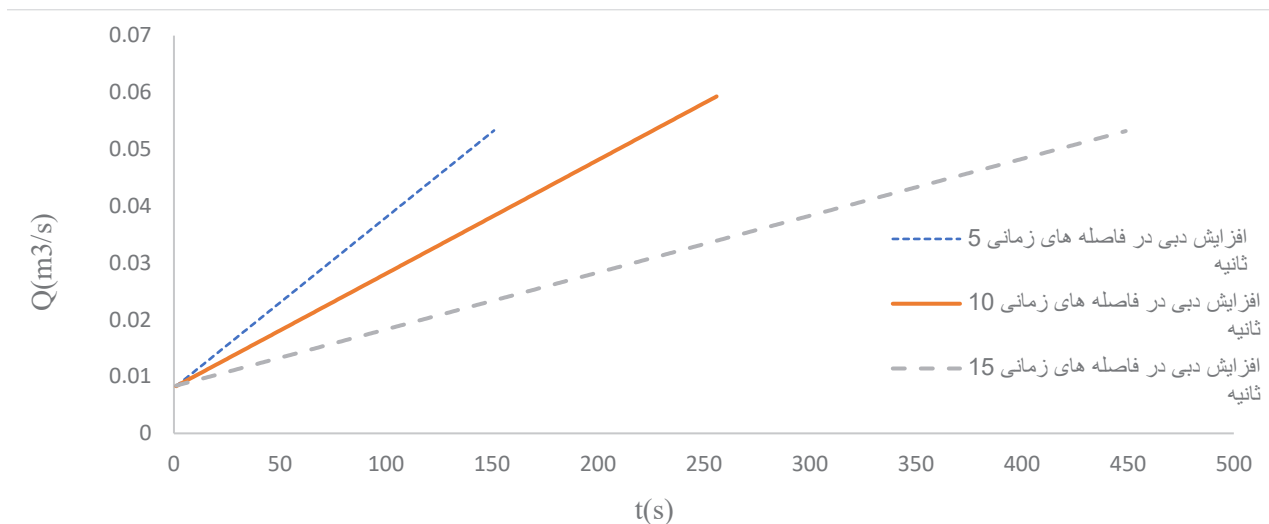
شکل ۷. تغییرات ضریب دبی جریان برحسب نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز در الگوی کاهش

Fig. 7. Changes in the flow rate coefficient according to the ratio of the height of the water on the weir to the height of the weir in the decreasing pattern



شکل ۸. تغییرات ضریب دبی جریان برحسب نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز در الگوی کاهش

Fig. 8. Changes in the flow rate coefficient according to the ratio of the weir floor to the water height on the weir in the decreasing pattern



شکل ۹. تغییرات دبی جریان برحسب زمان در الگوهای افزایشی مختلف

Fig. 9. Flow rate changes over time in different incremental patterns

برحسب زمان در الگوهای افزایشی مختلف در شکل ۹ و محدوده ضریب دبی برای هر یک از آزمایشهای این الگو در جدول ۴ نشان داده شده است. همان طور که از جداول فوق مشخص است، در الگوی افزایشی برای جریان غیردائمی در تمامی بازه‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه روند ضریب دبی از ابتدا تا انتهای آزمایش به صورت کاهش خواهد بود که دلیل این اتفاق را بایستی در رابطه (۱۵) و مشابه آنچه که در مورد الگوی کاهش ذکر شد جستجو کرد.

در ادامه با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار اکسل، بهترین ضریب دبی که دارای شرط کم‌ترین میزان خطا است، برای بازه‌های زمانی مختلف در الگوی کاهش محاسبه و در جدول ۵ نمایش داده شده است.

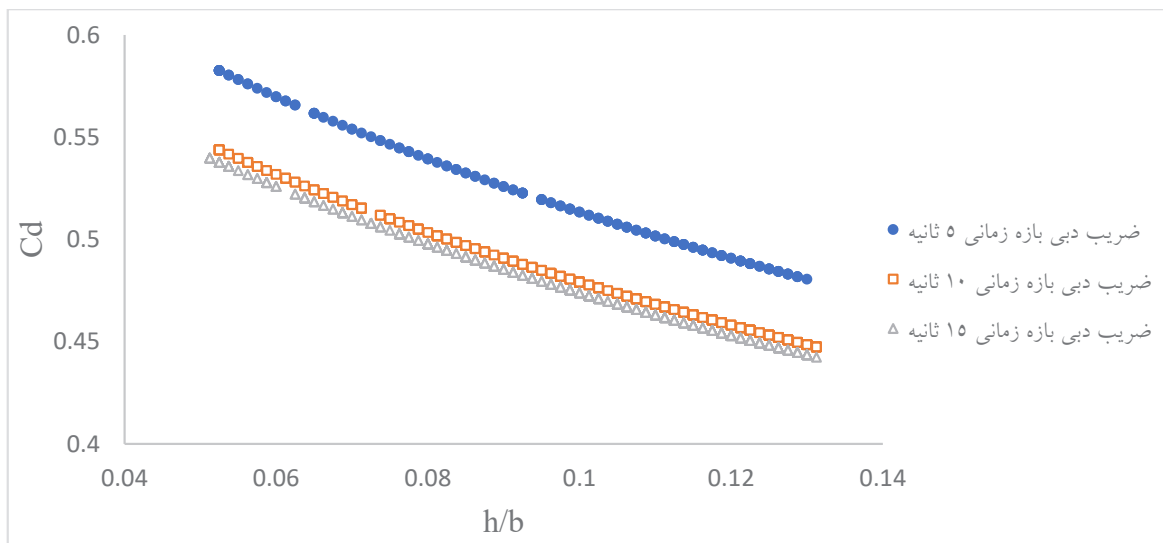
۳-۲ الگوی افزایشی

مشابه آنچه که در الگوی کاهش اجرا شد، این بار با الگوی افزایشی آزمایشات در فاصله‌های زمانی مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه انجام گرفت. تغییرات دبی جریان

جدول ۴. محدوده تغییرات ضریب دبی در آزمایشهای الگوی افزایشی وقتی تغییرات ضریب دبی نسبت به زمان برابر با صفر است

Table 4. The range of flow coefficient changes in incremental model tests when the flow coefficient changes with respect to time is equal to zero

مقدار ثانویه	مقدار اولیه	بازه زمانی
۰/۵۸۲۶	۰/۴۸۰۵	۵ ثانیه
۰/۵۴۳۷	۰/۴۴۷۳	۱۰ ثانیه
۰/۵۳۹۸	۰/۴۴۳۶	۱۵ ثانیه



شکل ۱۰. تغییرات ضریب دبی جریان بر حسب نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عرض سرریز در الگوی افزایشی

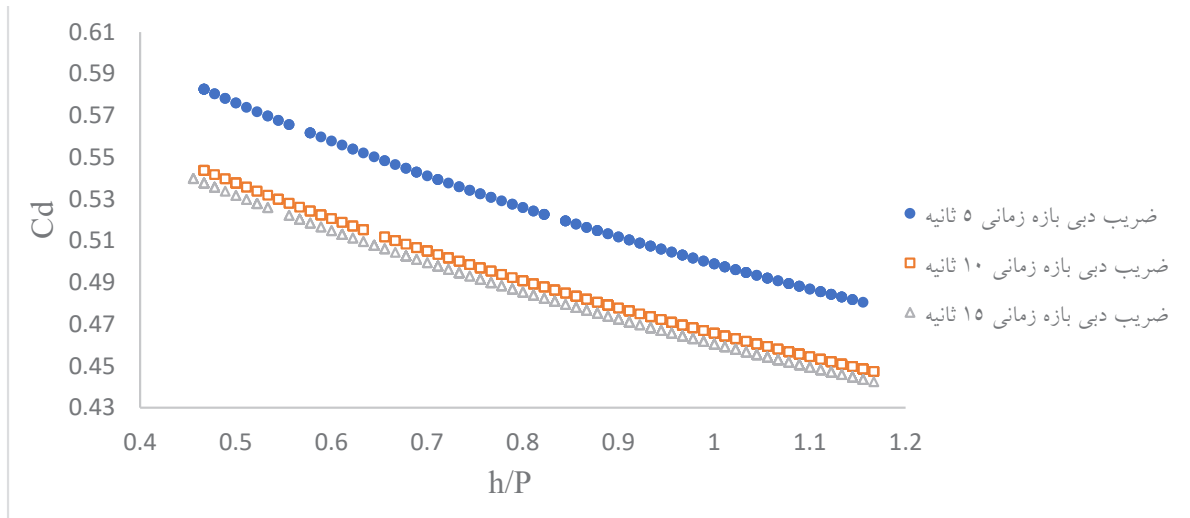
Fig. 10. Changes in the flow coefficient according to the ratio of the height of the water on the weir to the width of the weir in the incremental pattern

تغییرات ضریب دبی نداشته باشد. مجدداً با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار کالیبره ضریب دبی در الگوی افزایشی به دست می آید.

با مقایسه جدول فوق در مورد نتایج کالیبراسیون ضریب دبی در جریان غیردائمی تحت الگوهای کاهشی و افزایشی مشاهده می شود که همواره ضریب دبی کالیبره تحت الگوی کاهشی نسبت به ضریب دبی کالیبره تحت الگوی افزایشی در هر بازه زمانی دلخواه متناظر با آن، بزرگ تر است. همچنین در مورد ثابت نیون ضریب دبی سرریز کرامپ در حالت جریان غیردائمی که از نتایج این تحقیق است، این موضوع با نتایج تنها پژوهش قبلی صورت پذیرفته در مورد کالیبراسیون ضریب دبی در حالت غیردائمی که در سرریز کلید پیلانویی صورت پذیرفته هماهنگ است. بر اساس پژوهش صورت پذیرفته توسط اعرفی و همکاران، ضریب دبی در سرریز کلید پیلانویی در جریان غیردائمی نیز در محدوده ۱/۴۶ تا ۲/۶۰ متغیر است [۱۳].

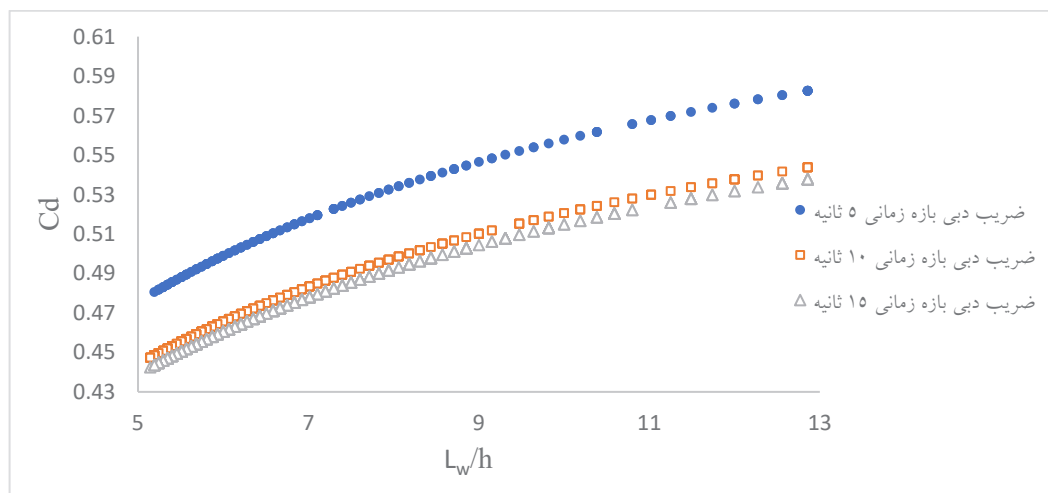
اثر عوامل موثر بر روی ضریب دبی شامل ارتفاع آب روی سرریز به عرض سرریز (h/b)، نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز (h/P) و نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز (L_w/h) در الگوی افزایشی و زمان ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه در شکل های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است.

همان طور که از شکل های ۱۰ تا ۱۲ مشخص است، با افزایش نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عرض سرریز (h/b) و نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز (h/P) مقدار ضریب دبی کاهش یافته است اما با افزایش نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز (L_w/h)، مقدار ضریب دبی افزایش یافته است. همچنین با افزایش بازه زمانی انجام آزمایش، مقدار ضریب دبی در نسبت های h/b ، h/P ، L_w/h یکسان، همواره کاهش یافته که این امر در افزایش بازه زمانی از ۵ به ۱۰ ثانیه نسبت به افزایش آن از مقدار ۱۰ به ۱۵ ثانیه، بسیار بیش تر است. علاوه بر این انتظار می رود افزایش بازه زمانی از مقدار ۱۵ ثانیه به مقادیر بالاتر، اثر چندانی بر روی



شکل ۱۱. تغییرات ضریب دبی جریان برحسب نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع سرریز در الگوی افزایشی

Fig. 11. Changes in the flow coefficient according to the ratio of the height of the water on the weir to the height of the weir in the incremental pattern



شکل ۱۲. تغییرات ضریب دبی جریان برحسب نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی سرریز در الگوی افزایشی

Fig. 12. Changes in the flow rate coefficient according to the ratio of the weir floor to the height of the water on the weir in the incremental pattern

جدول ۵. نتایج کالیبراسیون ضریب دبی در جریان غیردائمی تحت الگوی کاهش و افزایشی

Table 5. Calibration results of flow coefficient in non-steady flow under decreasing and increasing pattern

بازه زمانی (dt) بر حسب ثانیه						کمیت
۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۵	۵	
(افزایشی)	(کاهشی)	(افزایشی)	(کاهشی)	(افزایشی)	(کاهشی)	
$1/0.11 \times 10^{-8}$	$6/495 \times 10^{-9}$	$1/663 \times 10^{-8}$	$3/0.56 \times 10^{-8}$	$4/40.2 \times 10^{-8}$	$1/715 \times 10^{-8}$	مجموع مجذور خطاها
۰/۴۷۵۷	۰/۵۰۹۹	۰/۴۷۹۶	۰/۵۵۰۱	۰/۵۱۷۹	۰/۵۸۳۹	ضریب دبی کالیبره

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده می توان موارد ذیل را به عنوان اهم یافته های این مطالعه ذکر نمود.

- مقدار ضریب دبی با افزایش نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عرض آن (h/b) و نسبت ارتفاع آب روی سرریز به ارتفاع آن (h/P) کاهش یافته است، اما این ضریب با نسبت کف سرریز به ارتفاع آب روی آن (Lw/h)، نسبت مستقیم داشته و با افزایش آن افزایش می یابد.
- مقدار ضریب دبی کالیبره تحت الگوهای مختلف جریان آزاد غیردائمی بین ۰/۴ تا ۰/۷ متغیر است.
- ضریب دبی در قسمت افزایشی الگوهای مختلف همواره کوچکتر از ضریب دبی در قسمت کاهش می باشد.
- نسبت تغییرات ضریب دبی از بازه زمانی ۵ به ۱۰ ثانیه بیشتر از این نسبت در بازه ۱۰ به ۱۵ ثانیه است.
- انتظار می رود بعد از ۱۵ ثانیه افزایش بازه زمانی اثر چندانی بر روی تغییرات ضریب دبی نداشته باشد.

منابع

- [4] S. Haun, N.R.B. Olsen, R. Feurich, Numerical Modeling of Flow Over Trapezoidal Broad-Crested Weir, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 5(3) (2011) 397-405.
- [5] E. Sargison Jane, A. Percy, Hydraulics of Broad-Crested Weirs with Varying Side Slopes, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(1) (2009) 115-118.
- [6] H. Azimi Amir, N. Rajaratnam, Z. Zhu David, Submerged Flows over Rectangular Weirs of Finite Crest Length, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 140(5) (2014) 06014001.
- [7] O. Bilhan, M.E. Emiroglu, O. Kisi, Use of artificial neural networks for prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth side weir in curved channels, Advances in Engineering Software, 42(4) (2011) 208-214.
- [8] M. Rezaee, A. Emadi, Q. Aqajani Mazandarani, Experimental Study of Rectangular Labyrinth Weir, Water and Soil, 29(6) (2016) 1438-1446.
- [9] B.M.A. Noori, N.T. Aaref, Hydraulic Performance of Circular Crested Triangular Plan Form Weirs, Arabian Journal for Science and Engineering, 42(9) (2017) 4023-4032.
- [10] S. Yakubu Khalifa, B. Korode Adeogun, A. Ismail, M. Ajibola Ajibike, M. Mujahid Muhammad, Performance Evaluation of Flow over Crump Weir Using Data-Driven Models, ATBU Journal of Science, Technology and
- [1] M.G. Bos, Discharge measurement structures, ILRI (Int. Institute for land Reclamation), Netherlands, 1978.
- [2] H.E. Bazin, Experiences nouvelles sur l'écoulement en deversoir: executees a Dijon de 1886 a 1895, Gyan Books Pvt. Ltd, Delhi, India, 2017.
- [3] R.E. Horton, Weir experiments, coefficients, and formulas, USGS, Washington, USA, 1907.

- Laurindo, Calibration of weirs using unsteady flow, *Flow Measurement and Instrumentation*, 57(October 2017) (2017) 73-77.
- [13] A. Arafı, E. Izadınia, A. Khoshfetrat, Evaluation of the Discharge Coefficient of Piano Key Weir under the Unsteady - Gradual Varied Flow with Increasing Discharge, *Journal of Hydraulics*, 18(1) (2023) 127-142. In Persian
- Education, 9(4) (2022) 115-130.
- [11] M. Yasi, N. Salamat Ravandi, Numerical Simulation of Flow over Sharp- and Broad-Crested Weirs with Horizontal and Sloping Crests in a Channel Bend, *Journal of Iranian Water Engineering Research*, 2(1) (2022) 51-65. In Persian
- [12] E.C. Bortoni, M.S. Rocha, M.A.S. Rodrigues, B.C.S.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. h. Badiei, A. Khoshfetrat, M. Saadat, Calibration of unsteady flow in Crump Weir, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(11) (2024) 2327-2342.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22166.7918

