



دانشگاه گواران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و هفتم، شماره سوم، ۱۳۹۹
۶۳-۴۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2020.15349.3059

مقاله کامل علمی - پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سازه سرریز - دریچه مرکب قوسی

نرجس محمودی سفیدکوهی^۱، * مهدی مفتاح هلقی^۲، عبدالرضا ظهیری^۲ و خلیل قربانی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲

چکیده

سابقه و هدف: سرریزهای مرکب اغلب برای اندازه‌گیری دامنه‌ای وسیع از جریان و با دقت مناسب در کانال‌های روباز به‌کار گرفته می‌شوند. اما در مواردی که آب انتقالی حاوی مواد رسوبی و شناور باشد، مشکلاتی در نحوه عملکرد آن‌ها ایجاد می‌شود. با ترکیب دریچه و سرریز مرکب، می‌توان تا حدی این مشکل را برطرف کرد. در این پژوهش، به کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن به‌عنوان روشی هوشمند و نوین، رابطه‌ای بر اساس پارامترهای بی‌بعد به‌دست آمده از آنالیز ابعادی جهت برآورد ضریب دبی سرریز-دریچه مرکب قوسی ارائه شده است. هدف از این پژوهش، بررسی خصوصیات هیدرولیکی سرریز-دریچه مرکب قوسی و ارائه رابطه‌ای برای برآورد ضریب آبگذری این سرریز بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و هندسی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به طول ۹ متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر انجام شد و داده‌های برداشت شده برای برآورد ضریب آبگذری، مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش با استفاده از تغییر پارامترهایی مانند دبی جریان، بازشدگی دریچه، بازشدگی سرریز و زاویه قوس سرریز در کانال آزمایشگاهی، اثرات هیدرولیکی جریان و هندسه مجرا بر میزان آبگذری در سیستم سرریز-دریچه مرکب قوسی مورد بررسی قرار گرفت و سپس به کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن رابطه‌ای با دقت بالا برای ضریب آبگذری سازه مذکور به‌دست آمد.

یافته‌ها: نتایج آزمایش‌ها پس از بررسی صحت و پالایش داده‌ها تحلیل گردید و با توجه به روابط فوق‌الذکر ضریب دبی محاسبه شد. رابطه ارائه شده توسط روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای سازه سرریز-دریچه مرکب قوسی که ضریب همبستگی (R^2) آن برای داده‌های آموزش ۰/۹۹ و برای داده‌های آزمون ۰/۸۹ می‌باشد، در حالی که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های آموزش ۰/۰۰۵ و برای داده‌های آزمون ۰/۰۰۹ می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد سازه با نسبت ارتفاع دریچه به طول دریچه (پله دوم) $\frac{a_1}{b_1} = \frac{4}{15}$ بیشترین ضریب آبگذری را دارا می‌باشد و با افزایش $(\frac{h}{p})$ و Fr میزان ضریب آبگذری نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده از این

* مسئول مکاتبه: meftahhalaghi@gmail.com

پژوهش نشان داد مدل هوشمند برنامه‌ریزی بیان ژن، به خوبی توانسته است ضریب آبگذری سرریز- دریاچه مرکب قوسی را پیش‌بینی کند و استفاده از آن موجب بهبود نتایج پیش‌بینی در مقایسه با روش‌های مرسوم حاصل از مدل‌های رگرسیونی شود. به عبارتی، نتایج به‌دست آمده بیانگر توانایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن در تعیین ضریب آبگذری سرریز- دریاچه مرکب قوسی و در نتیجه برآورد صحیح‌تر آن می‌باشد. هم‌چنین با توجه به رابطه به‌دست آمده و کم‌تر بودن درصد خطا نسبت به روش رگرسیونی، بنابراین استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مسائل مرتبط با موضوع پژوهش پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، زاویه قوس سرریز، سرریز- دریاچه مرکب قوسی، ضریب آبگذری

مقدمه

ورودی به کانال‌های فرعی و مزرعه با دقت بیش‌تری تنظیم شود. علاوه بر مزایای هیدرولیکی سرریزهای با تاج طولانی، این سازه‌ها به‌دلیل افزایش تلاطم و آشفتگی جریان در پایین‌دست خود دارای مزیت زیست‌محیطی می‌باشند. سرریزهای طولانی در جایی که جریان آب در کانال حاوی رسوبات شن و ماسه زیادی باشد، باعث تجمع و ته‌نشینی رسوبات در جلوی سرریز شده و کارکرد سرریز در تنظیم سطح آب بالادست را مختل می‌کند. به همین دلیل مؤسسه تحقیقات و آموزش آبیاری توصیه نموده است که در دهانه بالادست سرریزهای نوک اردکی، دریاچه‌ای برای تخلیه رسوبات در نظر گرفته شود (۱۳).

یکی از انواع سرریزهای با تاج طولانی که اخیراً مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است، سرریز قوسی در پلان است که طول تاج آن از سرریز استاندارد قائم بیش‌تر است. بنابراین می‌تواند در دبی‌های مختلف جریان عبوری از کانال اصلی، نسبت به سرریزهای معمول دارای کارایی بیش‌تری از نظر کنترل تراز سطح آب در جلوی آبگیر مزرعه می‌باشد. به‌طورکلی در زمینه سرریزهای قوسی تاکنون مطالعات محدودی در دنیا انجام شده است. اغلب این مطالعات در سرریزهای اوجی و برای سدهای مخزنی و بندهای انحرافی انجام شده است. این سرریزها در سدهای مخزنی احداث شده بر رودخانه‌های با شیب

سرریزها، سازه‌های هیدرولیکی مهمی هستند که برای اندازه‌گیری دبی جریان و نیز کنترل سطح آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، مخازن سدها، سیستم‌های تصفیه فاضلاب و کنترل سیل رودخانه‌ها کاربرد وسیعی دارند. این سازه‌ها به همراه دریاچه از اجزاء مهم و کلیدی در مدیریت آب در کانال‌های آبیاری می‌باشند. سرریزها دارای انواع مختلفی بوده و برای کاربردهای مختلف، شکل‌های خاصی از سرریزها ارائه شده است. سرریزهای لبه‌تیز، لبه‌پهن، جانبی، اوجی، نیلوفری، پلکانی، قائم و... از انواع مهم سرریزهای مورد استفاده در مباحث مختلف مهندسی آب و عمران است. به‌دلیل تنوع بسیار زیاد سرریزها، معمولاً تقسیم‌بندی‌های زیادی برای این سازه‌ها در نظر گرفته شده است (۲۴).

سرریزهای با تاج طولانی (شامل سرریزهای مایل، سرریزهای زیگزاگی یا کنگره‌ای، سرریزهای منقاری یا نوک اردکی و سرریزهای قوسی) دارای کاربرد زیاد بوده و در تنظیم و مدیریت تحویل آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی نقشی اساسی ایفا می‌کنند. این سرریزها عموماً عمود بر مسیر اصلی جریان نصب می‌شوند و به‌دلیل دارا بودن تاج طولانی، دارای قابلیت بسیار خوبی برای تنظیم سطح آب در بالادست دریاچه‌های آبگیر بوده و باعث می‌شوند دبی جریان

قوسی با زاویه ۷۰ تا ۱۱۳ درجه، هیدرولیک جریان در این سرریزها و نیز ضریب دبی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش انحناء سرریز، ضریب دبی کاهش می‌یابد اما به دلیل افزایش قابل توجه طول تاج سرریز، به‌طورکلی دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد. هم‌چنین مطالعه بر روی سرریز لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی برای اولین بار توسط سازمان احیای اراضی آمریکا (۱۹۶۳) انجام گرفت. مزیت مهم این‌گونه سرریزها، دقت مناسب در اندازه‌گیری دبی در محدوده وسیعی از شرایط جریان (کم‌آبی تا سیلاب) است. ایجاد قوس و انحناء در بندها برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ توسط مک کی با هدف ساخت سازه‌ای با حداقل اتلاف انرژی و بار آبی ثابت، که بتواند سیلاب‌های بزرگ‌تر از سیل طراحی را تخلیه کند، ارائه شد. مارتینز و همکاران نیز (۲۰۰۵) با بررسی آزمایشگاهی یک سرریز لبه‌تیز مرکب مثلثی، این نوع سرریز را برای استفاده در سدهای رسوب‌گیر در حوضه‌های کوهستانی پیشنهاد نمودند. انتخاب این نوع سرریز به دلیل پیوستگی رابطه دبی - اشل در تمامی عمق‌های جریان روی سرریز است. این سرریز برای اندازه‌گیری هیدروگراف رواناب و بررسی تأثیر گزینه‌های مختلف پوش گیاهی در کاهش رواناب و فرسایش خاک حوضه‌های کوهستانی طراحی و اجرا شده است. با توجه به تغییرات شدید هیدروگراف دبی رواناب از شروع بارش تا خاتمه سیل، کاربرد این سرریز بسیار مناسب می‌باشد، به این صورت که از سرریز مثلثی پایین برای اندازه‌گیری دقیق دبی‌های کم و از سرریز مثلثی بالا برای اندازه‌گیری دقیق دبی‌های بالا (دبی اوج هیدروگراف) استفاده می‌شود. جان و همکاران (۲۰۰۶) با انجام یک سری آزمایش، دبی جریان برای چهار نوع سرریز لبه‌تیز مرکب را اندازه‌گیری نمودند. در این آزمایش‌ها از ترکیب سرریزهای مستطیلی - مستطیلی، مستطیلی - دوزنقه‌ای،

طولی بسیار کم و نیز حوضه‌هایی که دارای بارندگی‌های سیل‌آسا می‌باشند، از کارکرد بسیار خوبی برخوردار بوده‌اند. در این شرایط، این سرریزها بار آبی روی تاج سرریز را به میزان بسیار زیادی کاهش داده و باعث خسارت بسیار کم سیلاب در مناطق و اراضی بالادست سد مخزنی شده‌اند. هم‌چنین این سرریزها باعث می‌شوند طول حوضچه آرامش در پایین‌دست سرریز به میزان قابل توجهی کاهش یابد (۵).

تاکنون، هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای مرکب به‌طور جامع به روش تحلیلی و یا تجربی مورد بررسی قرار نگرفته است. اولین و احتمالاً تنها مطالعات تجربی بر روی سرریزهای مرکب، توسط برگمن (۱۹۶۳) انجام شده است. در این بررسی، ظرفیت جریان بر روی سه مدل سرریز لبه تیز مرکب با فشردگی جانبی در یک کانال صحرائی ارزیابی گردید. دهانه مثلثی سرریز با زاویه ۹۰ درجه و ارتفاع یک فوت و دهانه مستطیلی آن با عرض متغیر ۲، ۴ و ۶ فوت بود. دبی جریان تا حداکثر بار هیدرولیکی ۲/۸ فوت نسبت به تاج سرریز اندازه‌گیری شد. نتایج به‌صورت یک معادله تجربی، جهت ارزیابی دبی جریان (Q) بر اساس بار هیدرولیکی نسبت به تاج دهانه مثلثی (h_1)، بار هیدرولیکی نسبت به تاج افقی دهانه مستطیلی (h_2) و عرض دهانه مستطیلی (L) به‌صورت رابطه ۱ در سیستم واحدی انگلیسی ارائه گردیده است.

$$Q=3.9h_1^{1.72}+3.5Lh_2^{1.5}-1.5 \quad (1)$$

در منابع موجود، نتایج دیگری در خصوص ارزیابی جریان بر روی سرریزهای مرکب گزارش نگردیده است. از این‌رو، کاربرد این نوع سرریزها نیز بسیار محدود بوده است. برای اولین بار آستانا و همکاران (۱۹۶۱)، با مطالعه آزمایشگاهی سرریزهای

با افزایش زاویه مرکزی تا زاویه ۹۰ درجه، کارایی سرریز لبه‌تیز قوسی نسبت به حالت خطی افزایش می‌یابد، ولی از زاویه ۹۰ درجه تا ۱۲۰ درجه، به دلیل تداخل جریان در پایین‌دست کارایی سرریز کاهش می‌یابد. خسف و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی دبی جریان در سرریز مرکب و دریچه نیم دایره‌ای پرداختند. در این مطالعه سرریز مرکب شامل یک سرریز دوزنقه‌ای و مستطیلی شکل می‌باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی به بررسی دبی جریان آب پرداختند. با افزایش ارتفاع آب روی سرریز مرکب دبی جریان عبوری افزایش می‌یابد. افزایش فاصله میان سرریز مرکب و دریچه موجب کاهش میزان دبی جریان عبوری می‌شود. حسان و همکاران (۲۰۱۵) دبی جریان عبوری آب را در سرریز مرکب و دریچه مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه سرریز مرکب مستطیلی و دوزنقه‌ای با هر یک از دریچه‌های مستطیلی، قوسی و مثلثی ترکیب شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش ارتفاع آب روی سرریز مرکب دبی جریان عبوری افزایش می‌یابد. افزایش پهنای قسمت‌های مختلف سرریز مرکب و همچنین افزایش فاصله میان سرریز مرکب و دریچه، میزان دبی جریان عبوری را کاهش می‌دهد.

یکی از روش‌های هوشمند مورد استفاده در مسائل مهندسی آب، روش برنامه‌ریزی بیان ژن می‌باشد که از جمله روش‌های تکاملی است، که می‌توان به نتایج موفقیت‌آمیزی چون پیش‌بینی عمق آبشستگی (۲، ۲۰)، برآورد ضریب زبری مانینگ (۳)، پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای دیواره مستطیلی (۸)، نتایج پژوهش‌های این پژوهشگران، توانایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن را در مقایسه با روش‌های متداول رگرسیونی و دیگر روش‌های هوشمند چون شبکه عصبی مصنوعی و سیستم فازی نشان می‌دهد.

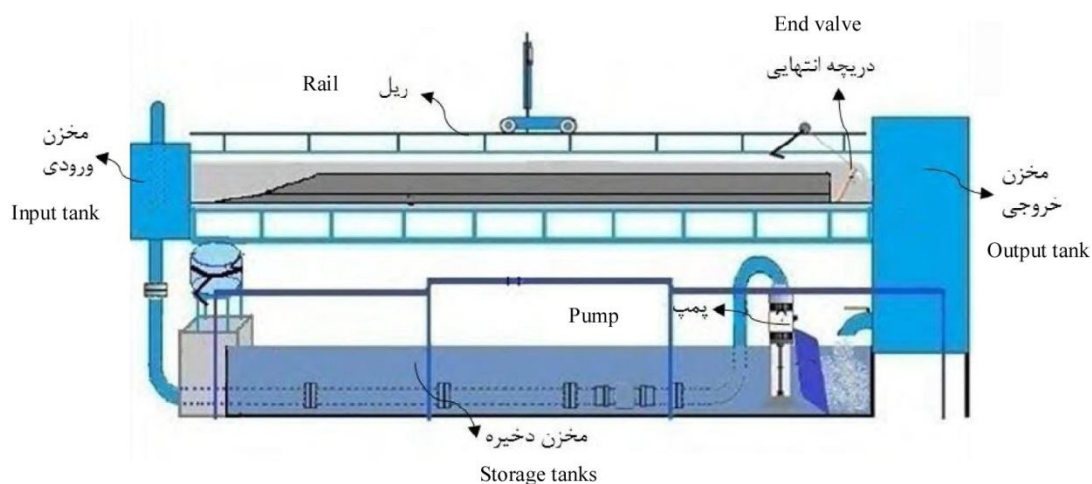
مثلثی- مستطیلی و مثلثی-دوزنقه‌ای استفاده شده است. محدودیت این چهار نوع سرریز مرکب این است که به دلیل ایجاد ناپیوستگی در منحنی دبی-اشل سرریز، اندازه‌گیری تراز سطح آب در محل اتصال سرریزهای پایین و بالا دارای حساسیت زیادی بوده و محاسبه دقیق دبی در این ناحیه غیرممکن است. در مطالعات فوق برای محاسبه دبی جریان و استخراج رابطه دبی-اشل در سرریزهای مرکب از مجموع دبی سرریزهای ساده (به صورت ترکیب خطی) به عنوان دبی کل سرریز مرکب استفاده شده است. مطالعاتی هم بر روی سازه ترکیبی سرریز و دریچه انجام گرفت که از آن جمله می‌توان به مطالعه سامانی و مظاهری (۲۰۰۹) که جریان ترکیبی بر روی سرریز-دریچه مستطیلی لبه‌تیز بدون فشردگی جانبی را در دو حالت استغراق (سرریز آزاد و دریچه مستغرق، سرریز و دریچه مستغرق) مدل‌سازی نمودند. در هر دو حالت مشاهده شد که پایاب بر عمق بالادست جریان و در نتیجه بر دبی جریان تأثیر می‌گذارد. کورکستون و تویس (۲۰۱۲) نیز به بررسی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای قوسی پرداختند. نتایج نشان داد که توسعه سرریز به داخل مخزن در شرایطی که سیکل‌های سرریز بر روی قوسی از دایره قرار گیرند، افزایش ضریب آبگذری را در پی دارد. این پژوهشگران ضمن معرفی پارامترهای هندسی سرریزهای کنگره‌ای قوسی، نتیجه‌گیری کردند که با بالا رفتن زاویه انحنای سرریز، چنانچه ظرفیت آبگذری سیکل‌های بالادست سرریز کنگره‌ای از سیکل‌های پایین‌دست آن بیش‌تر گردد، ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای قوسی حتی به مقداری کم‌تر از سرریز کنگره‌ای خطی نیز خواهد رسید. کومار و همکاران (۲۰۱۲) ضریب آبگذری جریان را برای سرریز لبه‌تیز قوسی در پلان، با زاویه مرکزی ۱۲۰، ۱۰۵، ۹۰، ۶۰، ۴۵، ۳۰ و با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که

سانتی‌متر و با شیب کف ثابت (تقریباً صفر)، در آزمایشگاه تحقیقات آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. در قسمت ورودی این فلوم مخزنی به طول یک متر وجود دارد که آشفتگی جریان آب، که از پمپ سانتریفوژ وارد می‌شود با ورود به این مخزن گرفته شده و جریان آرامی وارد فلوم آزمایشگاهی می‌شود. سیستم گردش جریان آب در این کانال بدین صورت است که در ابتدا جریان از مخزن ذخیره به مخزن ورودی کانال پمپاژ می‌شود تا بعد از کاهش آشفتگی‌های جریان و عبور از درون کانال، وارد مخزن خروجی شده و سپس دوباره به مخزن ذخیره باز می‌گردد. برای تنظیم دقیق‌تر دبی جریان در کانال، از یک دستگاه دیجیتال فرکانس‌سنج استفاده شده است. این دستگاه طوری طراحی شده که با تغییر فرکانس دستگاه، دبی جریان نیز تغییر می‌یابد و هر فرکانس، معرف یک دبی مشخص بوده است.

تاکنون پژوهشی بر روی سازه سرریز- دریچه مرکب قوسی صورت نگرفته است، از آنجایی که سرریزهای قوسی به‌عنوان یکی از گزینه‌های افزایش طول سرریز مطرح می‌باشد، در این پژوهش ضمن معرفی پارامترهای اثرگذار بر عملکرد سرریزهای قوسی و همچنین با توجه به اهمیت میزان ضریب دبی در سازه‌ها، در این مقاله از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) جهت برآورد ضریب دبی سازه سرریز- دریچه مرکب قوسی استفاده شد و نتایج این روش با روش رگرسیون مقایسه گردید. برای این منظور آزمایش‌هایی روی چند مدل سرریز- دریچه مرکب قوسی، با زوایای مختلف و همچنین تغییر ابعاد در ارتفاع و طول دریچه، انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی: آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی (شکل ۱) با اسکلت فلزی و دیواره‌های از جنس پلکسی‌گلاس، به طول ۹ متر و عرض و ارتفاع ۴۰



شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها.

Figure 1. Laboratory flume used for experiments.

ورقه‌ها، سرریز- دریچه مرکب قوسی با زوایای رأس ۱۲۰، ۹۰ و ۱۵۰ درجه و ارتفاع سرریز ۱۸ سانتی‌متر و دریچه‌هایی مستطیلی شکل با ابعاد مشخص مطابق جدول ۱، در بدنه سرریز ساخته شده‌اند.

مدل‌های آزمایشگاهی: در آزمایش‌های صورت گرفته با توجه به جنس و قطر ورقه‌های موجود و در دسترس در بازار برای ساخت مدل‌های فیزیکی از ورق گالوانیزه با قطر ۲ میلی‌متر استفاده شد. پس از طراحی با استفاده از نرم‌افزار اتوکد و برش این

جدول ۱- اطلاعات مدل‌های فیزیکی.

Table 1. Information of physical models.

ارتفاع سرریز Weir height P (cm)	عرض کانال Channel width B (cm)	زاویه قوس Arc angle θ (°)	طول قوس Arc length L (cm)
18	40	90	44
18	40	120	48
18	40	150	53

مشخصات دریچه Specifications of gate		مشخصات سرریز Specifications of weir		مشخصات سرریز Specifications of weir	
عرض دریچه Gate width b_1 (cm)	ارتفاع دریچه Gate height a_1 (cm)	عرض پله دوم Width 2nd step b_3 (cm)	ارتفاع پله دوم Height 2nd step a_3 (cm)	عرض پله اول Width 1st step b_2 (cm)	ارتفاع پله اول Width 1st step a_2 (cm)
10		10			
	2		2		
15		15		20	4.5
10		10			
	4		4		
15		15			

مرکب قوسی در پلان برای ۳ زاویه مرکزی و ۵ دبی متفاوت و ۵ بازشدگی متفاوت سرریز و به تبع آن بازشدگی دریچه انجام گرفت که دامنه تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آمده است.

در این پژوهش همه سرریزها در فاصله ۴ متری از ورودی کانال اصلی نصب گردیدند. بعد از نصب هر یک از سرریزها، عمق جریان در فاصله $4h$ از سرریز با استفاده عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۱ میلی‌متر قرائت گردید. داده‌های آزمایشگاهی برای سرریز- دریچه

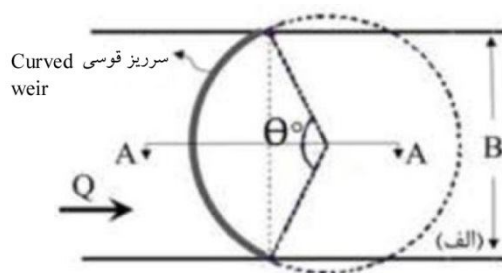
جدول ۲- محدوده تغییرات داده‌های آزمایشگاهی.

Table 2. The range of changes laboratory data.

محدوده تغییرات Range of changes	نماد و واحد Symbol and unit	متغیر Variable	
0	S_0	شیب کانال Channel slope	
18	P(cm)	ارتفاع سرریز Weir height	
44-53	L(cm)	طول سرریز Weir length	
4.5	a_2 (cm)	ارتفاع پله اول Height 1st step	
20	b_2 (cm)	عرض پله اول Width 1st step	
2-4	a_3 (cm)	ارتفاع پله دوم Height 2nd step	متغیر هندسی Geometric variable
10-15	b_3 (cm)	عرض پله دوم Width 2nd step	
2-4	a_1 (cm)	ارتفاع دریچه Gate height	
10-15	b_1 (cm)	عرض دریچه Gate width	
40	B(cm)	عرض کانال Channel width	
4-20	Q(lit/s)	دبی جریان Flow discharge	
5.6-22.5	H(cm)	عمق آب بالادست Depth of upstream water	متغیر هیدرولیکی Hydraulic variable
3.6-12.1	h(cm)	عمق آب روی سرریز Depth of water on weir	

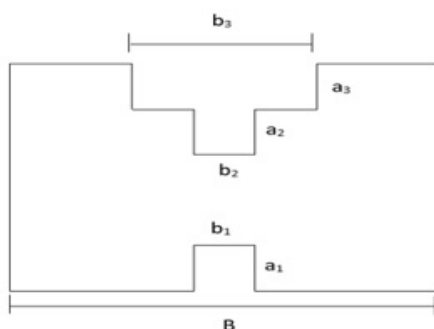
شکل ۳ نمای روبروی سیستم ترکیبی سرریز- دریچه مرکب مستطیلی نشان داده شده است. به منظور کمی کردن رفتار هیدرولیکی جریان هم‌زمان عبوری از سرریز- دریچه مرکب، پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مختلفی را می‌توان به عنوان فاکتورهای مؤثر بر سازه ترکیبی مورد مطالعه قرار داد.

تحلیل ابعادی: با توجه به این‌که هدف اصلی، بررسی تأثیر پارامترهای بدون بعد بر روی ضریب آبگذری سرریز- دریچه مرکب قوسی در پلان می‌باشد، بنابراین با استفاده از آنالیز ابعادی و ایجاد پارامترهای بدون بعد مانند متغیرهای موجود در جریان از تئوری π باکینگهام استفاده شده است. شکل ۲ نمای از بالا و



شکل ۲- نمای بالا از سازه سرریز- دریچه مرکب قوسی.

Figure 2. Up view of compound curved weir-gate structure.



شکل ۳- نمای روبرو از سازه سرریز- دریچه مرکب قوسی.

Figure 3. Front view of compound curved weir-gate structure.

چنانچه پارامترهای سرعت جریان (V)، جرم حجمی سیال (ρ) و ارتفاع آب روی سرریز (h) به‌عنوان متغیرهای تکراری انتخاب شوند پارامترهای بی‌بعد به فرم رابطه ۳ به‌دست می‌آیند:

$$f(C_d, \frac{gh}{v^2}, \frac{\mu}{\rho h \nu}, \frac{\sigma}{(\rho h \nu^2)}, \frac{h}{L}, \frac{h}{P}, \frac{h}{B}, \frac{h}{H}, \frac{h}{a_1})$$

$$\frac{h}{a_2}, \frac{h}{a_3}, \frac{h}{b_1}, \frac{h}{b_2}, \frac{h}{b_3}, S_0, \theta) = 0 \quad (3)$$

با توجه به این‌که در آزمایش مورد نظر محدوده عدد رینولدز ($10000 < Re < 50000$) می‌باشد جریان در کانال در محدوده جریان آشفته قرار می‌گیرد، بنابراین در رابطه ۳ از پارامتر بی‌بعد رینولدز، صرف‌نظر شده است. هم‌چنین چنانچه ارتفاع آب روی سازه کم باشد، کشش سطحی در رفتار جریان اثر خواهد گذاشت با توجه به این مطلب اگر محدودیت حداقل ارتفاع آب روی سازه ترکیبی

پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی سازه ترکیبی سرریز- دریچه (C_d) عبارتند از: B عرض کانال، S_0 شیب کانال، P ارتفاع سرریز، θ زاویه قوس سرریز، L طول مؤثر تاج سرریز، a_1 ارتفاع بازشدگی دریچه، a_2 ارتفاع پله اول، a_3 ارتفاع پله دوم، b_1 عرض دریچه، b_2 عرض پله اول، b_3 عرض پله دوم، V سرعت جریان در بالادست سازه، h ارتفاع آب روی سرریز در بالادست سازه، H ارتفاع آب در بالادست سازه، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، σ کشش سطحی سیال، g شتاب ثقل.

لازم به ذکر است پارامتر زبری به‌دلیل ثابت بودن آن در تمام آزمایش‌ها صرف‌نظر شده است. با استفاده از تحلیل ابعادی و تئوری پی باکینگهام، رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$f(C_d, V, L, P, B, H, h, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, \rho, \mu, \sigma, \theta, g, S_0) = 0 \quad (2)$$

دوم که جریان از زیر دریچه عبور می‌کند از روابط دریچه استفاده می‌شود (۲۱).

$$Q_s = Q_w + Q_g = \frac{2}{3} C_{dw} \sqrt{2gLH^2} + C_{dg} ab \sqrt{2gh} \quad (7)$$

که در آن، Q_s دبی کل عبوری از سازه ترکیبی سرریز-دریچه قوسی (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد. با فرض برابر بودن ضریب آبگذری دریچه و ضریب آبگذری سرریز، ضریب آبگذری سازه ترکیبی سرریز-دریچه قوسی مطابق رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$C_d = \frac{Q_s}{\frac{2}{3} L \sqrt{2gH^2} + ab \sqrt{2gh}} \quad (8)$$

هم‌چنین ضریب آبگذری سرریز-دریچه مرکب قوسی به دلیل تغییر در عرض مؤثر سرریز از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$(9)$$

$$C_d = \frac{Q_s}{2 \left(\frac{2}{3} L_1 \sqrt{2gH_1^{1.5}} \right) + 2 \left(\frac{2}{3} \left(\frac{b_2 - b_3}{2} \right) \sqrt{2gH_2^{1.5}} \right) + \frac{2}{3} b_3 \sqrt{2gH_1^{1.5}} + a_1 b_1 \sqrt{2gh}}$$

در شکل ۴ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب آبگذری در سرریز-دریچه مرکب قوسی نشان داده شده است.

(حدود ۳ سانتی‌متر) رعایت شود می‌توان اثر کشش سطحی (پارامتر We) را نادیده گرفت. قابل ذکر است که پارامترهای بدون بعد را می‌توان در هم ضرب یا تقسیم نمود و هم‌چنین معکوس یا به توان رساند که در این صورت باز هم یک پارامتر بدون بعد حاصل می‌شود. با توجه به ملاحظات فوق می‌توان رابطه ۴ را به صورت زیر بیان نمود:

$$C_d = f \left(Fr, \frac{h}{p}, \frac{h}{B}, \frac{H}{L}, \frac{h}{a_1}, \frac{h}{b_1}, \theta \right) \quad (4)$$

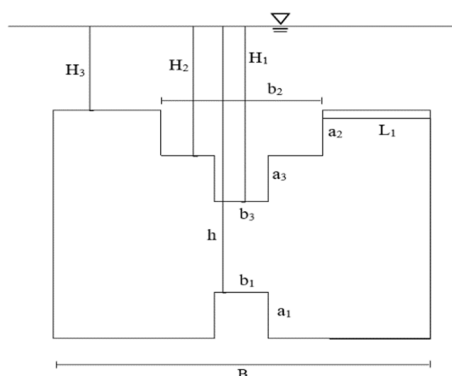
برآورد ضریب آبگذری: دبی عبوری از سرریز قوسی همانند سرریز مستطیلی لبه تیز به صورت رابطه ۵ می‌باشد:

$$Q = \frac{2}{3} C_{dw} \sqrt{2gLH^2} \quad (5)$$

دبی عبوری از دریچه مستطیلی از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$Q_g = C_{dg} ab \sqrt{2gh} \quad (6)$$

دبی کل عبوری از سرریز-دریچه بر اساس اصل پیوستگی که رابطه ۷ بیانگر آن است، به دو قسمت تقسیم می‌شود. بخشی از جریان از روی سرریز عبور می‌کند که روابط سرریز بر آن حاکم است و بخش



شکل ۴- پارامترهای اندازه‌گیری ضریب دبی در سازه سرریز-دریچه مرکب قوسی.

Figure 4. Measurement parameter on flow discharge coefficient coefficient in compound curved weir-gate structure.

دبی‌های بیش‌تر، جریان از روی مرکب عبور می‌کند. در شکل ۵ جریان عبوری از سازه قابل مشاهده است.

در ابتدا جریان تنها از دریچه عبور می‌کند و با افزایش دبی و عبور آب از روی قسمت مرکب سرریز، سرریز- دریچه عمل می‌نماید و در انتها در

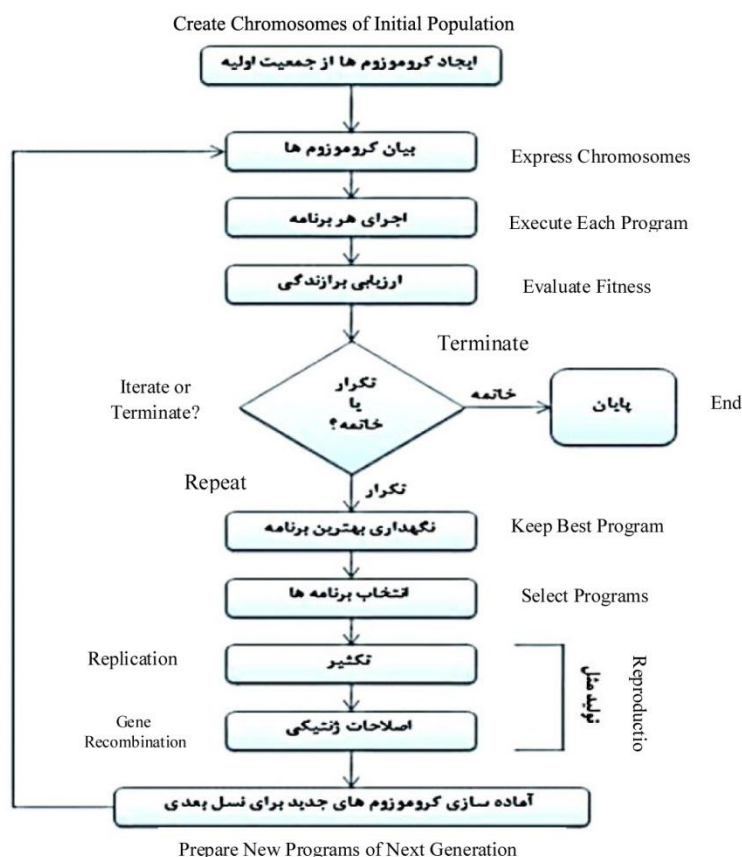


شکل ۵- نمایی از قرارگیری سرریز دریچه- مرکب قوسی در کانال.

Figure 5. View of placement the compound curved weir-gate in the channel.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP): روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ترکیب و توسعه یافته روش‌های GA و GP است که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا ابداع شد (۱۰). در این روش، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با الگوریتم ژنتیک و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک ترکیب می‌شوند. به‌طور خلاصه می‌توان بیان داشت که در این روش فنوتیپ و ژنوتیپ از هم جدا شده و سیستم قادر خواهد بود از تمام مزایای تکاملی بهره‌گیرد. با وجود این‌که فنوتیپ در GEP مشابه ساختار شاخه‌ای GP می‌باشد، اما ساختار شاخه‌ای در GEP که بیان درختی نیز نامیده می‌شود، بیانگر تمام ژنوم‌های مستقل است. اولین مرحله در GEP، تشکیل جمعیت اولیه از راه‌حل‌هاست. سپس کروموزوم‌ها به بیان درختی

(ETs) نشان داده می‌شوند. در مرحله بعد باید کارایی یا میزان سازگاری هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها توسط تابع برازش ارزیابی شود. مراحل اصلی الگوریتم‌های تکاملی ذکر شده را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد: فرایند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس کروموزوم‌های ایجاد شده در GP و GEP به‌صورت درختی بیان می‌گردند. در ادامه به کمک تابع هدف میزان برازندگی و کارایی هر فرد ارزیابی می‌شود، پس از آن اعضای سازگارتر انتخاب و اصلاح شده تا فرزندان جدیدتر ایجاد شوند، فرزندان ایجاد شده نیز تحت فرایند توسعه‌ای قرار می‌گیرند تا پاسخ خوب و مناسب پیدا شود (۱۱). در شکل ۶ الگوریتم حل مسأله به کمک GEP نشان داده شده است:



شکل ۶- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن.

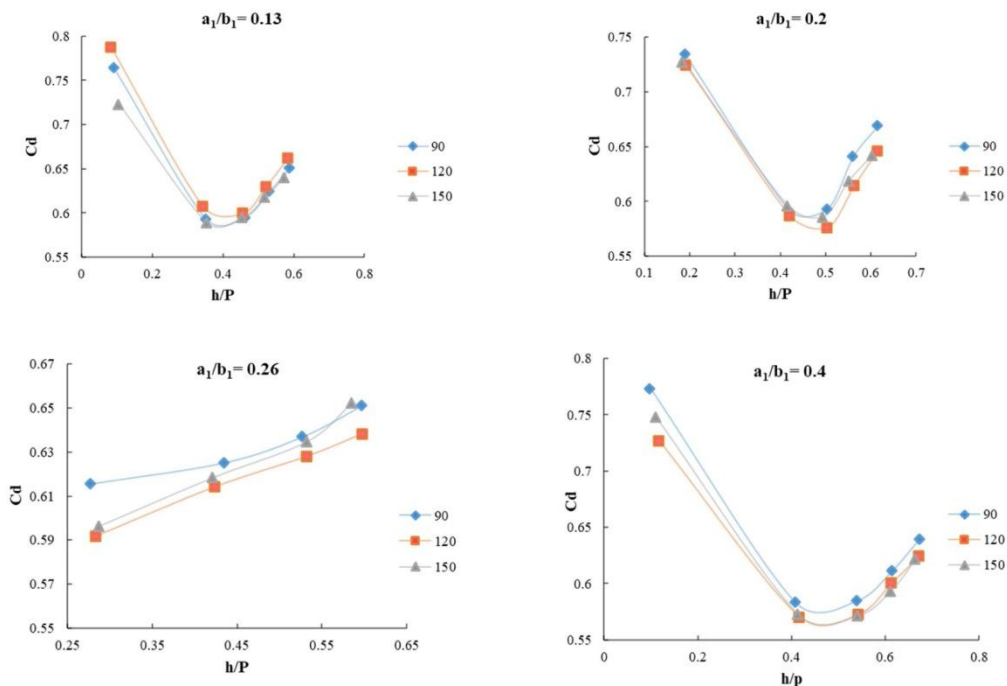
Figure 6. Gene expression programming algorithm.

نتایج و بحث

داده‌های برداشت شده از آزمایش‌ها سرریز- دریاچه مرکب قوسی پس از بررسی صحت و پالایش داده‌ها در محیط اکسل تحلیل گردیدند و با توجه به رابطه ۹ ضریب آبگذری محاسبه شد. سپس با استفاده از تحلیل ابعادی و روش برنامه‌ریزی بیان ژن یک رابطه برای ضریب آبگذری سیستم سرریز- دریاچه مرکب قوسی به دست آمد. برای انجام این پژوهش و استخراج رابطه‌ای صریح برای متغیر خروجی، ابتدا داده‌ها را به صورت تصادفی به گونه‌ای که ۷۰ درصد

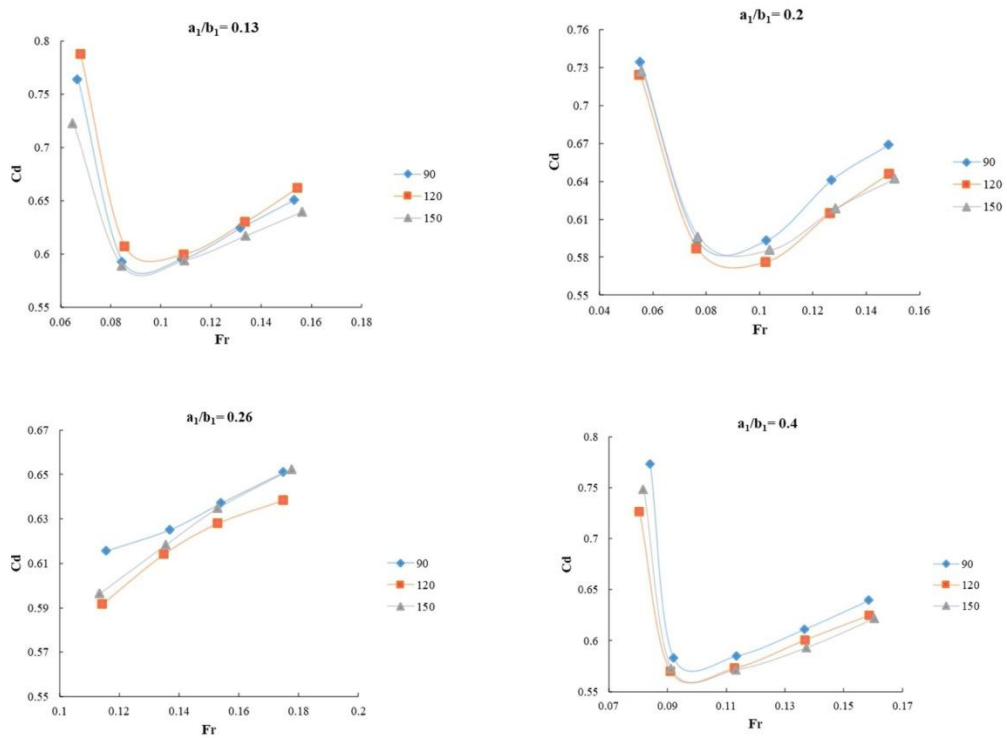
داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها برای آزمون باشد، در نظر گرفته شده است.

روند تغییرات ضریب دبی در برابر پارامترهای بدون بعد: در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات ضریب آبگذری سرریز- دریاچه مرکب قوسی نسبت به ارتفاع بار آبی روی سرریز نسبت به ارتفاع سرریز $(\frac{h}{p})$ و نسبت به F_r ، در زوایای مختلف ارائه شده است.



شکل ۷- تغییرات ضریب آبگذری در مقابل h/P در حالات مختلف.

Figure 7. Comparison of discharge coefficient and h/P in different conditions.

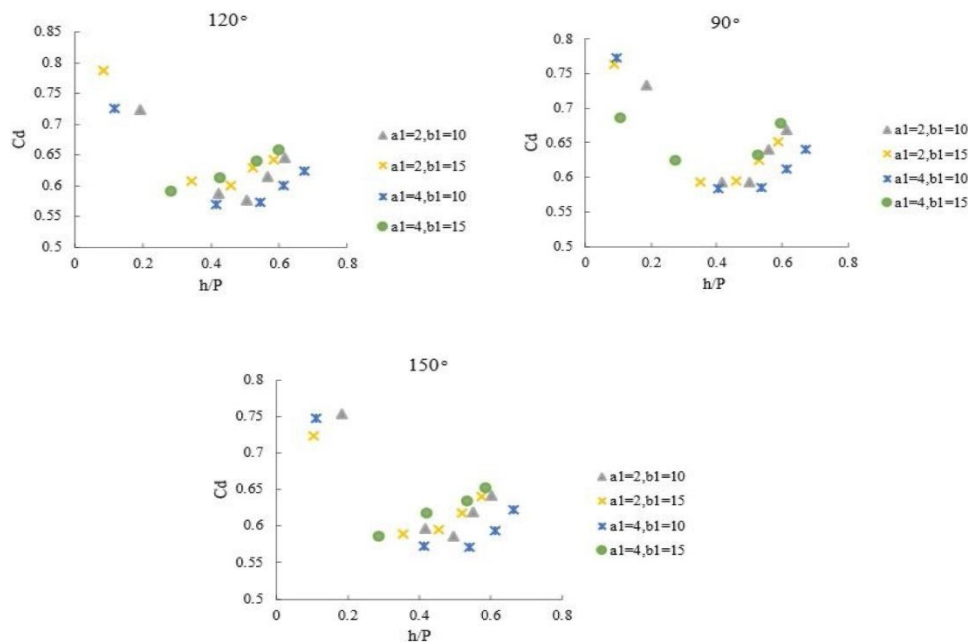


شکل ۸- تغییرات ضریب آبگذری در مقابل Fr در حالات مختلف.

Figure 8. Comparison of discharge coefficient and Fr in different conditions.

در حالی که نسبت ارتفاع به طول دریچه (ارتفاع و طول پله دوم در تمام حالات با ارتفاع و طول دریچه برابر است) ۲ به ۱۰ ($\frac{a_1}{b_1}=0.2$) و نسبت ارتفاع به طول دریچه ۴ به ۱۰ ($\frac{a_1}{b_1}=0.4$) باشد، در ($\frac{h}{p}$) ها و Fr های ثابت زاویه راس ۹۰ درجه بیشترین ضریب آبگذری را دارد و در زوایای قوس بزرگتر از ۹۰ از مقدار ضریب دبی کاسته می‌شود علت این امر، همگرایی بیش‌تر جریان عبوری و همچنین تداخل بیش‌تر آن از روی سرریز است. زمانی که ارتفاع دریچه ۲ سانتی‌متر و طول آن ۱۵ سانتی‌متر است در زاویه راس ۱۲۰ درجه بیش‌ترین آبگذری را خواهیم داشت. برای بررسی ارتباط ضریب آبگذری سرریز-دریچه مرکب قوسی با اندازه‌های متفاوت ارتفاع و طول دریچه (پله دوم) با نسبت $\frac{h}{p}$ در زوایای مختلف قوس، ارائه شده است. لازم به ذکر است روند تغییرات ضریب دبی با افزایش سایر پارامترهای بی‌بعد نیز انجام شد، ولی به‌علت مشابه بودن این روند با روند تغییرات در برابر پارامتر بی‌بعد $\frac{h}{p}$ ، فقط به ذکر یک پارامتر اکتفا گردید.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی شکل‌ها دبی ۴ لیتر بر ثانیه بیش‌ترین ضریب آبگذری را دارد زیرا تا دبی ۴ لیتر بر ثانیه مقطع مرکزی عمل می‌کند و برای مقادیر دبی بیش‌تر از ۴ لیتر بر ثانیه مقطع مرکب عمل می‌کند، به همین دلیل طول مؤثر سرریز کاهش پیدا کرده و ضریب آبگذری افزایش می‌یابد و همچنین در دبی‌های بالاتر جریان عبوری از سرریز بر دبی دریچه تأثیر بیش‌تری گذاشته و باعث کاهش ضریب آبگذری می‌گردد که این امر می‌تواند در اثر افزایش عمق آب و ایجاد فشار مثبت در پایین‌دست دریچه باشد که عملاً دریچه را شبیه حالت مستغرق می‌کند؛ چرا که با افزایش ریزش آب از روی سرریز جریان عبوری از دریچه با یک مانع یا به‌عبارتی مومنتوم اجباری مواجه گشته که خود سبب افزایش عمق آب در پشت دریچه می‌شود. در دبی‌های بالاتر به همراه افزایش دبی و عمل نمودن حالت مرکب سرریز بر مقدار عبور جریان افزوده می‌شود که در این صورت حالت کلی با افزایش مقدار پارامترهای بی‌بعد $\frac{h}{p}$ و Fr ضریب آبگذری افزایش می‌یابد.



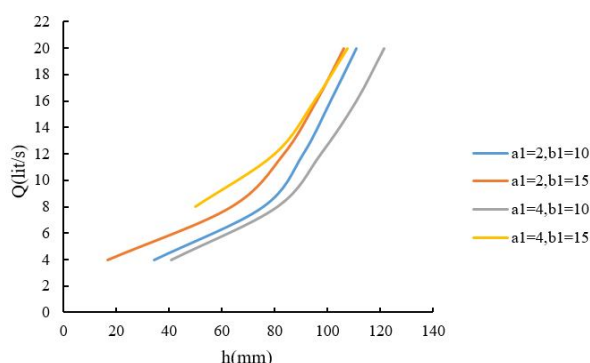
شکل ۹- تغییرات ضریب آبگذری در مقابل h/P در زوایای مختلف.

Figure 9. Comparison of discharge coefficient and h/P in different angles.

که $Cd=0.68$ است، را به خود اختصاص می‌دهد زیرا به‌ازای مقدار ثابت هد بر روی سرریز، با افزایش ارتفاع و طول قسمت مرکزی و دریچه، دبی عبوری نیز بیشتر می‌شود و به‌ازای هد ثابت بر روی سرریز، وقتی ارتفاع و طول قسمت مرکزی افزایش می‌یابد، سطح مقطع جریان افزایش یافته و در نتیجه مقدار دبی عبوری از سرریز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل‌های ۹ مشاهده می‌شود در تمام زوایا سرریز با بازشدگی پله مرکزی و هم‌چنین دریچه به نسبت $a_1=4$ و $b_1=15$ بیش‌ترین ضریب آبگذری را دارد.

بررسی رابطه دبی-هد: همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، سازه با نسبت ارتفاع دریچه به طول دریچه (پله دوم) $\frac{a_1}{b_1}=\frac{4}{15}$ بیش‌ترین ضریب آبگذری



شکل ۱۰- تغییرات هد آب در مقابل دبی‌های مختلف در بازشدگی‌های مختلف دریچه.

Figure 10. Comparison of water head and different discharges in opening different gate.

مطالعات فریرا نشان داده است که انتخاب ۳۰ تا ۵۰ کروموزوم در اندازه جمعیت، بهترین پاسخ را موجب می‌گردد (۱۰). سعی و خطا نشان داد بهترین پاسخ با تشکیل جمعیت اولیه از ۳۰ کروموزوم حاصل می‌گردد. اندازه سر نیز به کمک سعی و خطا برابر با ۸ تعیین گردید. پارامترهای عملیات بهسازی ژن نیز مطابق با پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شدند. هم‌چنین با توجه به مطالعات امامقلی‌زاده و همکاران، تابع پیوند (+) به‌دلیل برتری بر دیگر توابع عملیاتی برگزیده شد (۷).

بررسی نتایج روش برنامه‌ریزی بیان ژن: در جدول ۳ برخی پارامترهای مورد استفاده و مقادیر آن‌ها، در برآورد ضریب آبگذری سرریز-دریچه مرکب قوسی به کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است. کروموزوم‌ها در GEP از بیش از یک ژن با طول یکسان تشکیل گردیده‌اند. تعداد ژن‌ها اختیاری است (۹). با توجه به مطالعات فریرا، پاسخ بهینه با انتخاب ۲ یا ۳ ژن به‌دست می‌آید (۱۰). بنابراین، این پژوهش با انتخاب ۳ ژن مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین

جدول ۳- مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد ضریب آبگذری سازه سرریز-دریچه مرکب قوسی.

Table 3. The amounts parameters of Gene Expression Programming of flow discharge coefficient in compound curved weir-gate structure.

تابع پیوند Link function	معیار خطای تابع برازش Standard Error of the Estimate	تعداد ژن Number of genes	تعداد کروموزوم‌ها Number of chromosomes	اندازه سر Lengths of head	پارامتر parameter
جمع (+)	RRSE	3	30	8	مقدار amount

۰/۰۰۹ در دو بخش آموزش و آزمون، برخوردار نیست به عبارتی نتایج نشان داد که روش GEP نسبت به روش رگرسیونی بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا، در دو مرحله آموزش و آزمون دارا می باشد. با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی و قابل پذیرش بودن میزان خطا، رابطه استخراج شده توسط روش برنامه ریزی بیان ژن مورد قبول می باشد.

به منظور ارزیابی و مقایسه نتایج دو روش برنامه ریزی بیان ژن و روش رگرسیونی، نتایج حاصل از هر دو روش در جدول ۴ ارائه شده است. بنابراین، نتایج نشان می دهد که رابطه رگرسیونی با ضرایب همبستگی ۰/۹۷ و ۰/۷۶ و خطای ۰/۰۰۷ و ۰/۰۱ به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، از دقت کافی نسبت به نتایج اجرای روش برنامه ریزی بیان ژن، با ضرایب همبستگی ۰/۹۹ و ۰/۸۹ و خطای ۰/۰۰۵ و

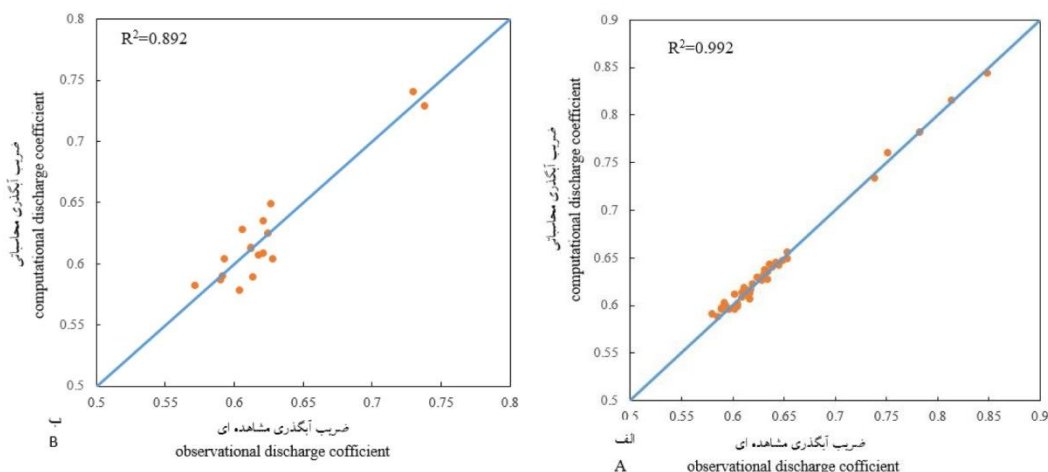
جدول ۴- مقایسه بین نتایج رابطه رگرسیونی و روش برنامه ریزی بیان ژن.

Table 4. Comparison between the result of regression equation and GEP model.

جذر میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)		ضریب همبستگی Coefficient of Determination (R ²)		روش Method
آزمون Test	آموزش Train	آزمون Test	آموزش Train	
0.01	0.007	0.76	0.97	رگرسیونی Regression
0.009	0.005	0.89	0.99	برنامه ریزی بیان ژن GEP

پراکندگی خوبی حول خط نیمساز ۴۵ درجه می باشد.

در شکل ۱۱ همانطور که مشاهده می شود نتایج رابطه پیشنهادی روش برنامه ریزی بیان ژن دارای

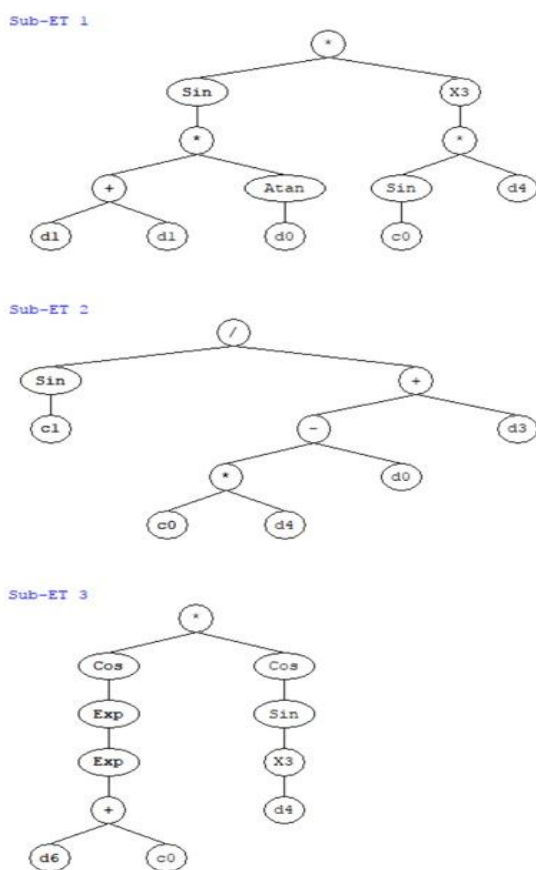


شکل ۱۱- مقایسه نتایج ضریب آبگذری مشاهده ای و محاسباتی برای داده های آموزش (الف) و آزمون (ب).

Figure 11. Compare the results of observational and computational discharge coefficient for training data(A) and tests data (B).

آنالیز ابعادی شامل θ , Fr, $\frac{h}{L}$, $\frac{h}{B}$, $\frac{h}{p}$, $\frac{h}{a_1}$, $\frac{h}{b_1}$ می‌باشند.

در شکل ۱۲ ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است، پارامترهای $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$ و d_6 به ترتیب برابر با پارامترهای بی‌بعد حاصل از



شکل ۱۲- بیان درختی ژن‌های ۱، ۲، ۳ در برآورد ضریب آبگذری سرریز- دریچه مرکب قوسی.

Figure 12. Expression tree of genes 1, 2 and 3 of flow discharge coefficient in compound curved weir-gate.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش‌هایی در جهت تحلیل هیدرولیک جریان و برآورد رابطه‌ای مناسب برای ضریب آبگذری در مدل سرریز- دریچه مرکب قوسی انجام پذیرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر می‌باشد.

پارامترهای هندسی مدل مذکور از جمله طول و ارتفاع بازشدگی‌های دریچه و سرریز و ارتفاع سرریز و همچنین پارامترهای هیدرولیکی از جمله عمق

همچنین رابطه ارائه شده از GEP برای برآورد ضریب آبگذری سرریز- دریچه مرکب قوسی به صورت رابطه ۱۰ می‌باشد:

(۱۰)

$$Cd_s = (\sin((2(\frac{h}{b_1}) * \text{Arctan}(\text{Fr}))) * ((\sin(0.8) * \frac{h}{B}) ^ 3)) + (\sin(3.4)/(((8.8 * \frac{h}{B}) - \text{Fr}) + \frac{h}{p})) + (\cos(e^{(e^{((\frac{H}{L} + 6.3)) * \cos(\sin((\frac{h}{B})^3)))}))$$

تأثیر طول دریچه بر ضریب آبگذری بیش تر از ارتفاع دریچه است به عبارتی طول دریچه تأثیر مستقیم و بیش تری بر روی ضریب آبگذری دارد و با افزایش طول در قسمت مرکزی سرریز باعث افزایش دبی عبوری از سرریز می شود. هم چنین با افزایش بار آبی ضریب آبگذری سرریز- دریچه مرکب قوسی افزایش می یابد.

با ریزش جریان از روی سرریز و برخورد آن با جریان خروجی از روزنه در پایین دست سازه آشفتگی جریان به وجود می آید. این تداخل جریان هرچه شدتش بیشتر باشد می تواند باعث افزایش افت ورودی جریان شود.

نتایج به دست آمده در تطابق با نتایج پژوهش خسف و همکاران (۲۰۱۳) و حسان و همکاران (۲۰۱۵) بوده است. آن ها در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع آب روی سرریز مرکب دبی جریان عبوری افزایش می یابد.

جریان بالادست، عمق آب روی سرریز و دبی جریان در ضریب آبگذری نقش اساسی دارند. هم چنین با استفاده از روش برنامه ریزی بیان ژن رابطه ای بر اساس پارامترهای بی بعد ارائه شد که با توجه به میزان خطای کم می توان گفت که رابطه ارائه شده از دقت خوبی برخوردار است.

روش برنامه ریزی بیان ژن نتایج قابل قبول با خطای کمتری نسبت به روش رگرسیونی، دارا می باشد. ضرایب همبستگی در بخش آزمون برای روش GEP و رگرسیونی به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۷۶، بیانگر توانایی این روش در برآورد ضریب دبی سرریز- دریچه مرکب قوسی می باشد. روش GEP با افزایش ۷/۴ درصدی ضریب همبستگی (R^2) و کاهش ۲۸ درصدی خطا RMSE مربوط به بخش آزمون، سبب افزایش دقت و کاهش خطای برآورد ضریب آبگذری شده و بر روش رگرسیونی برتری دارد. از دیگر برتری های آن استفاده هم زمان از چند پارامتر هیدرولیکی می باشد.

منابع

1. Asthana, K.C., Syed Tahir, H., and Syed, Y. 1961. Flow over curved weirs. *Water and Energy International*, 18: 8. 744-761.
2. Azamathulla, H.Md. 2012. Gene expression programming for prediction of scour depth downstream of sills. *J. Hydrol.* 460-461: 156-159.
3. Azamathulla, H.Md., and Jarrett, R.D. 2013. Use of Gene-Expression Programming to Estimate Manning's Roughness Coefficient for High Gradient Streams. *Water Resour. Manage.* 27: 715-729.
4. Bergmann, J.M. 1963. Compound Weir Study. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, United states.
5. Chanson, H. 2003. History of minimum energy loss weirs and culverts. *Proceeding. XXX IAHR Congress, Thessaloniki Greece, Vol. E.*
6. Crookston, B.M., and Tullis, B.P. 2012. Labyrinth weirs: nappe interference and local submergence. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.* 138: 8. 757-765.
7. Emamgholizadeh, S., Bateni, S.M., Shahsavani, D., Ashrafi, T., and Ghorbani, H. 2015. Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). *J. Hydrol.* 529: 1590-1600.
8. Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Zaji, A.H., Azimi, H., and Sharifi, A. 2015. Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs. *Applied Soft Computing*, 35: 618-628.
9. Ferreira, C. 2001a. Gene Expression Programming in Problem Solving. In: 6th online world conference on Soft Computing in Industrial Applications (Invited tutorial), Pp: 1-22.

10. Ferreira, C. 2001b. Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. *Complex Systems*, 13: 2. 87-129.
11. Ferreira, C. 2004. Gene expression programming and the evolution of computer programs. *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Pp: 82-103.
12. Hassan, F.A., Khassaf, S.I., and Hassan, A.O. 2015. Determining the Coefficient of Discharge due to Flow over Composite Weir and below Gates, DOI: 10.13140/RG.2.2.33844.86406.
13. Irrigation Training and research Center (ITRC), 2007. Rapid appraisal process. Glenn-Colusa Irrigation District.
14. Irrigation Training and research Center (ITRC), 2007. Long crested weir design.
15. Jan, C.D., Chang, C.D., and Lee, M.H. 2006. Discussion Design and calibration of a compound sharp-crested weir. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 132: 8. 868-872.
16. Khassaf, S.I., and Abbas, H.A. 2013. A Study of Flow Over Different Opening of Combined Weirs and Below Gates, *Inter. J. Sci. Engin. Res.* 4: 10.
17. Kumara, S., Ahmada, Z., and Mansoor, T., and Himanshu, S.K. 2012. Discharging characteristics of sharp crested weir of curved plan-form. *Res. J. Engin. Sci.* 1: 4. 16-20.
18. Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T., and Lopez, J.G. 2005. Design and calibration of a compound sharp-crested weir. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 131: 2. 112-116.
19. McKay, G.R. 1971. Design of Minimum Energy Culverts. Research Report, Dept of Civil Eng, Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, 29p.
20. Muzzammil, M., Alama, J., and Danish, M. 2015. Scour prediction at bridge piers in cohesive bed using Gene Expression Programming. *Aquatic Procedia*, 4: 789-796.
21. Negm, M.A.A., Al-Brahim, A.M., and Alhamid, B. 2002. Combined free flow over weir and below gates. *J. Hydr. Res.* 40: 3. 59-365.
22. Samani, J.M.V., and Mazaheri, M. 2009. Combined Flow over Weir and under Gate. *J. Hydr. Engin.* 135: 3. 224-227.
23. United States Bureau of Reclamation (USBR). 1963. Compound weir study, Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 505: 34.
24. Zahiri, A. 2015. Developing formulae for discharge coefficient in curved weirs using Genetic programming. *Iran. J. Irrig. Drain.* Pp: 323-334.



Experimental Assessment of Discharge Coefficient of Curved Compound Weir-Gate structure

N. Mahmoudi Sefidkouhi¹, *M. Meftah Halaghi², A. Zahiri² and Kh. Ghorbani²

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Structure, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources,

²Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 07.06.2018; Accepted: 12.03.2018

Abstract

Background and Objectives: Compound weirs, as an appropriate solution, can be used for measuring flow discharges with reasonable sensitivity and accuracy in a wide range of flows. However, sediment laden flows will cause problems in their functions. This problem can be coped with trough combining gates and compound weirs. In this research, based on dimensionless parameters obtained from dimensional analysis and using a smart and new method named Gene-Expression Programming (GEP), an equation has been proposed for prediction of discharge coefficient in compound curved weir-gate structures. The aim of this research is investigation of hydraulic characteristics of compound curved weir-gate as well as providing a relationship for prediction of discharge coefficient of these structures, based on the hydraulic and geometric parameters.

Materials and Methods: The experiments were done in a rectangular flume by 9 meter of length and 0.4 meter of width. Then, the obtained data were used to estimate the discharge coefficient. This study has been assessed by using of variations of flow discharge, gate opening, weir opening and angle of curve as parameters of experimental channel. Also, the effects of hydraulic of flow and the geometry of duct were considered in the discharge coefficient estimation. After these, Gene Expression Programming (GEP) was used to set an equation to determine the discharge coefficient with a high accuracy.

Results: The discharge coefficient were calculated by analyzing the obtained experimental data. The equation provided by method of gene expression programming for curved compound weir-gate structure by correlation coefficient (R^2) of 0.99 and 0.89 for training and testing data, respectively, while root mean square error (RMSE) of 0.005 and 0.009 for training and testing data, respectively.

Conclusion: The results showed that the most discharge coefficient occurred in the experiment by $\frac{a_1}{b_1} = \frac{4}{15}$, where a_1 and b_1 denoted on gate height and gate length, respectively. Also, increasing trend in discharge coefficient was seen by increasing the Froude number and $\frac{h}{P}$. Furthermore, the results show that (GEP) intelligence approach is an adequate model to predict assessment of discharge coefficient of curved compound weir-gate. Also, the results of traditional regression equations were improved using this method. In the other words, these results indicated that gene expression programming (GEP) is reliable to evaluate the coefficient discharge of curved compound weir-gate by more accurate estimation. Also, according to the results, and less error rate than regression method, So, use of the gene expression programming (GEP) is suggested in future studies related to this topic.

Keywords: Arc angle of weir, Compound curved weir-gate, Discharge coefficient, GEP

* Corresponding Author; Email: meftahhalaghi@gmail.com

