

مقاله علمی-پژوهشی

تجزیه و تحلیل روابط دبی-اشل تئوری و آزمایشگاهی در سرریز لبه تیز نیلوفری

رسول قبادیان^{۱*}، مهران زنگنه^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹

چکیده

در این پژوهش نوع خاصی از سرریزهای لبه تیز به نام سرریز لبه تیز نیلوفری معرفی شده است. به خاطر شکل خاص این سرریز، در دبی‌های کم دقت بالایی اندازه‌گیری و در دبی‌های سیلابی و ناگهانی نیمرخ برگشت آب کمتری در بالادست آن‌ها قابل انتظار است. از طرفی ناپیوستگی در رابطه دبی-اشل آن‌ها مشاهده نمی‌شود. با فرض وقوع جریان بحرانی در تاج سرریز رابطه کلی دبی-اشل اولیه برای این نوع سرریز استخراج شد. نظر به اینکه فرض وقوع جریان بحرانی در تاج سرریز همراه با خطا بوده و به تبع آن رابطه دبی-اشل حاصل شده بر اساس این فرض دقیق نیست گام بعدی اصلاح این رابطه بود. بدین منظور با اندازه‌گیری ۵۷ آزمایش بر روی ۵ نوع از این سرریز ساخته شده رابطه دبی-اشل اندازه‌گیری استخراج گردید و نشان داده شد به ازای یک اشل مشخص دبی اندازه‌گیری شده بیش‌تر از دبی تحلیلی محاسبه شده می‌باشد. باهدف منطبق نمودن رابطه دبی-اشل تحلیلی بر اندازه‌گیری، یک ضریب اصلاحی در رابطه‌ی تحلیلی اعمال گردید. این ضریب اصلاحی با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن به صورت تابعی از نسبت ارتفاع سرریز به هد بالادست (p/H) و نسبت a/n و n پارامترهای شکل هندسی سرریز (بهینه یابی و استخراج گردید. نتایج نشان داد رابطه دبی-اشل اصلاح شده مقادیر دبی اندازه‌گیری شده را ضریب همبستگی $R^2=0.98$ ، میانگین خطای مطلق $MAE=0.442$ لیتر و ریشه میانگین مربعات خطای $RMSE=0.08$ لیتر برآورد نمود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، دبی-اشل اندازه‌گیری، رابطه دبی-اشل تحلیلی، سرریز نیلوفری لبه تیز

مقدمه

سرریزها از جمله اجزاء اصلی پروژه‌های آبی هستند که به منظورهای مختلف ساخته می‌شوند. هدف از ساخت سرریزها، تنظیم سطح آب رودخانه‌ها و شبکه‌های آبیاری، اندازه‌گیری دبی جریان، تخلیه سیلاب از مخازن سدها، کنترل فرسایش و ... می‌باشد. سرریز لبه تیز یک صفحه قائم کار گذاشته در مسیر جریان است که عموماً برای اندازه‌گیری و سنجش آب و یا تنظیم سطح آب بکار می‌روند. سرریزهای لبه تیز به اشکال مستطیلی، مثلثی، دایره‌ای، سهموی و ... تقسیم‌بندی می‌شود. سرریزها بر اساس نحوه قرارگیری در پلان دارای انواع مختلفی نظیر سرریزهای خطی، مورب، کنگره‌ای و ... می‌باشند

(Kumar et al., 2011). با توجه به اهمیت سرریزها در اندازه‌گیری جریان و تنظیم سطح آب تاکنون مطالعات گسترده تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی را به خود معطوف ساخته‌اند. رانگاراجو و اساو با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی دریافتند که الگوی جریان بر روی یک سرریز صفحه لبه تیز بسیار پیچیده است و به‌تنهایی نمی‌توان آن را به صورت تئوری تجزیه و تحلیل کرد. دلیل این امر تغییرات فشار غیر هیدرو استاتیک، اغتشاش، اثرات اصطکاک و شرایط جریان نزدیک شونده به سرریز می‌باشد. همچنین اثر کشش سطحی و ویسکوزیته در هدهای پایین مهم می‌شود (Ranga Raju and Asawa, 1977). رامامورتی و همکاران از طریق مطالعات تجربی خود به این نتیجه رسیدند که ضریب تخلیه سرریز (Cd) برای جریان بر روی یک سرریز لبه تیز مستطیلی شکل در محدوده $(0 < \frac{H}{p} < 10)$ را می‌توان به صورت نیمه تجربی با پارامتر سرریز H/P مرتبط کرد؛ که در آن P ارتفاع تاج سرریز و H هد کل روی تاج سرریز می‌باشد (Ramamurthy et al., 1987). باس معادله عمومی سرریزها را به صورت زیر ارائه نمود (Bos, 1989).

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: r_ghobadian@razi.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.4.6.9

$$Q = K H^n \quad (1)$$

که در آن، Q دبی جریان، H ارتفاع هیدروستاتیک روی تاج سرریز، K ضریب وابسته به اندازه و شکل سرریز و n عدد بدون بعد وابسته به شکل سرریز است. مارتینز و همکاران مطالعاتی را روی سرریز مرکب لبه تیز متشکل از دو قسمت مثلثی با زوایای رأس متفاوت انجام داد. نتایج ایشان نشان داد این سرریز اندازه‌گیری بسیار دقیقی را برای طیف وسیعی از جریان بدون ناپیوستگی فراهم می‌کند. قسمت پایینی سرریز برای اندازه‌گیری محدوده طبیعی دبی بکار می‌رود در حالی که قسمت بالایی برای اندازه‌گیری دبی‌های ناگهانی و بیشتر بکار می‌رود (Martinez et al., 2005). ایگاتیناتن و همکاران به بررسی خصوصیات سرریز سهموی پرداختند. آن‌ها تنها عامل مؤثر بر ضریب دبی را زاویه رأس سرریز در نظر گرفته و رابطه‌ای را برای به دست آوردن ضریب دبی پیشنهاد نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها میانگین ضریب دبی 0.03 ± 0.53 برای زاویه‌های 30° ، 45° ، 60° درجه و با یک افزایش $4/3$ برای زاویه 90° درجه بود (Igathinathane et al., 2007). کاسترو-اورگاز و همکاران جریان بحرانی روی تاج سرریز دایره‌ای را مطالعه کردند. این محققین نشان دادند ضریب دبی با افزایش E/R (انرژی مخصوص و شعاع انحنا سرریز استوانه‌ای) افزایش می‌یابد و جریان روی تاج سرریز بین $0.06 - 0.15$ ، بحرانی و برای مقادیر بیشتر فوق بحرانی است (Castro-Orgaz et al., 2008). باقری و حیدر پور نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده ورقه بالایی و پائینی توده آب روی سرریز لبه تیز مستطیلی را به ترتیب توسط معادلات درجه دو و درجه سه تقریب زدند. علاوه بر این با استفاده از تئوری گرداب آزاد جریان روی این سرریز شبیه‌سازی و ضریب تخلیه دبی محاسبه گردید (Bagheri and Heidarpour, 2010). آیدن و همکاران با فرض اینکه ارتفاع و پهناى سرریز لبه تیز مستطیلی بر روی رابطه دبی- اشل سرریز مؤثر هستند، اندازه‌گیری آزمایشگاهی روی سرریزهای با پهنا و ارتفاع مختلف انجام دادند. همچنین کاربرد روابط مختلف برای محاسبه ضریب تخلیه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد ترسیم سرعت متوسط روی سرریز در مقابل ارتفاع سرریز خصوصیات عمومی را نشان می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان دبی سرریز را محاسبه نمود و نیاز به ضریب تخلیه سرریز را حذف می‌کند (Aydin, 2011). رابطه دبی- اشل ۱۱ نوع سرریز سنگی U، A و W شکل در مقیاسی نزدیک به نمونه اصلی توسط تورتون و همکاران ارائه شد. در هر آزمایش شکل سرریز، مواد بستر و شیب بستر منحصربه‌فرد بود. روابط دبی- اشل با استفاده از تکنیک‌های رگرسیون چند متغیره توانی برای هر یک از سرریزهای مذکور به‌عنوان تابعی از طول مؤثر سرریز، عمق جریان، میانگین ارتفاع سرریز، اندازه سنگ و ضریب دبی ایجاد شد. عبارات ضریب منحصربه‌فرد برای هر شکل سرریز توسعه داده شد و یک ضریب دبی

منفرد برای تعیین رابطه دبی-اشل سرریزها پیشنهاد شد (Thornton et al., 2011). قبادیان و مرآتى فشى رابطه دبی - اشل تئوری-تحلیلی برای سرریز های دایره‌ای لبه تیز ارائه نمودند. با اندازه‌گیری-های آزمایشگاهی نشان دادند که مؤثرترین پارامتر بر روی ضریب تخلیه نسبت ارتفاع آب روی تاج به شعاع سرریز می‌باشد. همچنین عمق جریان روی تاج سرریز به‌صورت متوسط $0.844/0$ برابر عمق بحرانی به دست آمد (Ghobadian and Meratifashi, 2012). مطالعات زچوال و همکاران به تعیین رابطه برای محاسبه ضریب دبی در شرایط جریان آزاد روی سرریزهای مستطیلی با لبه تیز تا لبه پهن و بدون انقباض جانبی مربوط می‌شود. آن‌ها بر اساس اندازه‌گیری در محدوده ضخامت نسبی سرریز از 0.12 تا 0.3 و در دامنه وسیعی از ارتفاع نسبی سرریز بسیار از 0.24 تا 0.84 انجام شده است که امکان کاربرد سرریزهای با هد کم را بسیار افزایش می‌دهد. علاوه بر این، اثرات اصطکاک و کشش سطحی بر مقدار ضریب دبی و همچنین تأثیر ضخامت نسبی سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت. اصطکاک و کشش سطحی (با خطای نسبی ± 0.1) بر مقدار ضریب تخلیه Cd در دماهای معمول با هد سرریز $h \geq 0.06$ متر تأثیری ندارد (Zachoval 2014). باتیستا- کاپتیلو و همکاران با تکنیک عکس‌برداری با سرعت پایین خصوصیات نیمرخ بالایی و پائینی جریان روی سرریز مثلثی را به دست آوردند. سپس نیمرخ‌های آزمایشگاهی به‌صورت ریاضی مدل شدند و در ترکیب با تئوری گرداب آزاد رابطه-ای برای ضریب تخلیه سرریز استخراج شد (Bautista-Capetillo et al., 2014). صانعی و همکاران با توجه به این موضوع که اثر مقیاس در مدل‌سازی سرریز منجر به تفاوت بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نمونه اولیه می‌شود مدل تجربی سرریز سد گرمی چای میانه را در سه مقیاس $1:100$ ، $1:75$ و $1:50$ ساختند. سطح آب در بالادست تاج سرریز در هفت دبی اندازه‌گیری شد و در مقایسه با مقیاس $1:50$ (مقیاس پایه)، درصد اختلاف سطح آب روی تاج در دو مدل فیزیکی با مقیاس‌های $1:100$ و $1:75$ محاسبه شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با کاهش مقیاس اثر ویسکوزیته و کشش سطحی به‌نوبه خود افزایش می‌یابد و ضریب دبی کاهش می‌یابد (Saneie et al., 2016). اخباری و همکاران با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی پایه شعاعی (RBNN و M5) ضریب دبی سرریزهای پلان مثلثی مدل‌سازی شده است. ابتدا پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی ضریب دبی شناسایی شد. سپس با ترکیب پارامترهای ورودی برای هر یک از روش‌های RBNN و M5 شش مدل مختلف معرفی گردید. با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی برای همه مدل‌ها، نشان داده شد که مدل M5 توانایی مدل‌سازی ضریب دبی را با دقت بیشتری دارد (Akhbari et al., 2017). آياز و منصور (۲۰۱۸) مدل‌های ANN را برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریز مایل لبه تیز در شرایط جریان آزاد

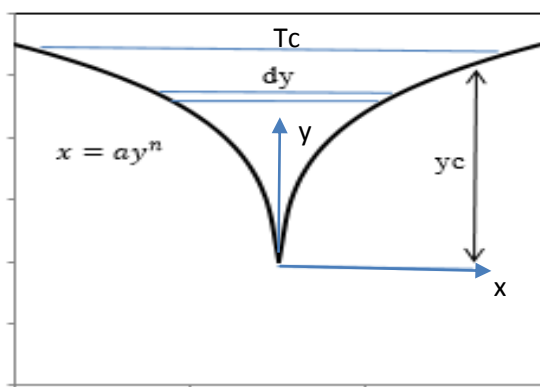
جریان به شعاع تاج $Cd = a(H/R)^b$ در سطح اعتماد ۹۵ درصد دامنه ضرایب a و b را به دو روش مذکور ارائه کردند (Parsaie and Haghiabi, 2021).

اندازه‌گیری دقیق دبی برای طیف وسیعی از جریان، بدون ناپیوستگی در رابطه دبی-اشل همواره از بااهمیت‌ترین موضوعات در مباحث هیدرولیکی هست. تحقیقات قبلی نشان داده است سرریزهای مثلثی مرکب تا حدودی این موضوع را در نظر گرفته‌اند با این وجود در دبی‌های خیلی کم ممکن است دقت خیلی بالایی نداشته باشند. در این تحقیق نوع خاصی از سرریزهای لبه تیز به نام سرریز نیلوفری لبه تیز معرفی می‌شود. این نوع سرریزها در دبی‌های کم از حساسیت بالایی نسبت به تغییرات بار آبی برخوردار هستند و به دلیل شکل هندسی خاص در دبی‌های سیلابی و ناگهانی برگشت آب کمتری را در بالادست ایجاد می‌نمایند. به عبارتی قسمت پایینی سرریز برای اندازه‌گیری محدوده دبی کم با دقت بالا بکار می‌رود درحالی‌که قسمت بالایی برای اندازه‌گیری دبی‌های ناگهانی و بیشتر بدون برگشت قابل ملاحظه پروفیل بالادست به کار می‌رود. باوجود این مزایا بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد این نوع سرریز تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است.

مواد و روش‌ها

استخراج رابطه دبی - اشل تحلیلی: مقطع شما تیک

سرریز لبه تیز نیلوفری در شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور استخراج رابطه دبی-اشل تحلیلی فرض می‌شود هنگام عبور جریان از روی سرریز بر روی تاج شرایط عمق بحرانی ایجاد می‌شود. با استفاده از محاسبات انجام شده در روابط ۲ تا ۱۰ رابطه دبی-اشل تحلیلی برای سرریز لبه تیز استخراج گردید:



شکل ۱- مقطع سرریز نیلوفری لبه تیز جهت محاسبه دبی

و مستغرق تیز برای موارد جریان آزاد و غوطه‌ور توسعه داده‌اند. عملکرد مدل‌های ANN توسعه‌یافته با استفاده از داده‌های تجربی برقی و همکاران در سال ۲۰۰۳ ارزیابی شده و نتایج با تحلیل مدل رگرسیون سنتی انجام شده توسط ایشان مقایسه گردید (Ayaz and Mansoor, 2018). گونگ و همکاران مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای مطالعه ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در اثر گرد شدگی لبه سرریز انجام داد. نتایج تجربی نشان داد که گرد کردن گوشه بالادست می‌تواند ظرفیت تخلیه را افزایش دهد و با افزایش نسبت گرد شدگی ظرفیت تخلیه دبی جریان افزایش می‌یابد (Gong et al., 2019). ایونسو و همکاران بر اساس نتایج تجربی به دست آمده در آزمایشگاه، درجه دقت اندازه‌گیری چندین سرریز لبه تیز با اشکال مختلف را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل حساسیت برای ارزیابی تأثیر شکل چهار سرریز مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و متناسب (Sutro) بر ضرایب دبی و شناسایی نوع سرریز مناسب با بهترین دقت برای اندازه‌گیری دبی‌های کوچک انجام شد. برای دبی کمتر از ۰/۱۵۲ لیتر در ثانیه بهترین حساسیت در بین سرریزهای مورد مطالعه متعلق به سرریز مثلثی است. بالاتر از این مقدار، در محدوده دبی مورد مطالعه، سرریز متناسب بهترین حساسیت را دارد. بنابراین، این دو شکل از سرریز لبه تیز برای اندازه‌گیری دبی بسیار کم بهترین هستند (Ionescu et al., 2019). صالحی و همکاران با اندازه‌گیری سرعت جریان و خصوصیات آشفتگی روی سرریزهای لبه تیز نیمه-کسینوسی و سرریز مستطیلی لبه تیز توسط دستگاه ADV نشان دادند مؤلفه‌های سرعت در جهت جریان در سرریز نیمه-کسینوسی از سرریز مستطیلی متناظر بیشتر است. با این وجود اغتشاشات سرعت در این جهت در هر دو سرریز مشابه است ولی در جهت قائم و عرضی در سرریز نیمه-کسینوسی بیشتر است. علاوه بر این رابطه دبی - اشل در شرایط جریان آزاد برای سرریز نیمه-کسینوسی بر اساس هندسه سرریز استخراج شد و نشان داده شد که ضریب تخلیه ثابت است (Salehi, et al., 2019). بهمین و کبیری سامانی پس از برشمردن فواید سرریزهای هیدرو فویل در مقایسه با دیگر سرریزها مانند ضریب دبی بالاتر، پایداری بیشتر، شرایط محدودکننده استخرای بهتر، نوسانات فشار کمتر و پروفیل سطح آزاد، آزمایش‌های بر روی این نوع سرریز انجام دادند. پروفیل‌های طولی فشار استاتیک روی سرریزهای مختلف هیدرو فویل با سرریزهای دایره‌ای و اوجی مقایسه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب دبی سرریزهای هیدرو فویل برای نسبت عمق جریان نزدیک شونده بالادست به طول تاج سرریز $h_1/L > 0.12$ بیشتر از سرریزهای لبه پهن و تاج کوتاه است و برای $0.35 < h_1/L < 0.45$ بیشتر از سرریزهای اوجی است (Bahman and Kabiri-Samani, 2021). پارسایی و حقی آبی با استفاده از روش‌های مونت کارلو و بوت استرپ آنالیز عدم قطعیت ضریب تخلیه سرریزهای تاج دایره‌ای را انجام دادند. با تعریف ضریب تخلیه به صورت تابعی از نسب هد

عمق بحرانی بر روی تاج سرریز به دست آمده است. در روابط بالا H اشل بالادست سرریز نسبت به تاج سرریز، y_c ، Ac و Tc به ترتیب عمق، سطح مقطع و عرض سطح آب برای شرایط جریان بحرانی روی تاج سرریز، a و n پارامترهای شکل هندسی سرریز هستند. لازم به ذکر است در سرریزهای مثلثی، سهموی و مستطیلی به ترتیب ضریب n برابر با ۱، ۰/۵ و صفر می‌باشد. این ضریب برای سرریز لبه تیز نیلوفری معرفی شده در این تحقیق برابر با $(n = 2)$ در نظر گرفته شده است.

تجهیزات آزمایشگاهی:

به منظور استخراج رابطه دبی- اشل اندازه‌گیری شده برای سرریز مورد نظر این تحقیق و مقایسه با رابطه تحلیلی، آزمایش‌های در فلوم آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه رازی انجام شد. این فلوم شامل سه قسمت ورودی، قوسی شکل و ناحیه خروجی می‌باشد. طول قسمت ورودی ۵/۴ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع مؤثر ۰/۶ متر می‌باشد. ناحیه قوسی شکل که شامل یک قوس ۹۰ درجه می‌باشد دارای شعاع قوس ۱/۹ متر در محور مرکزی فلوم می‌باشد. مشخصات ناحیه خروجی نیز همانند ناحیه ورودی می‌باشد. با این تفاوت که طول آن ۴/۵ متر است. در ابتدای فلوم مخزن فلزی به منظور آرامش جریان قرار دارد. سرریزهای ساخته شده بر روی قسمت ورودی و در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای فلوم به منظور اطمینان از شرایط جریان توسعه یافته نصب شدند. در شکل (۲) ناحیه ورودی فلوم آزمایشگاهی، برخی سرریزهای ساخته شده و همچنین سرریز در حال آزمایش نشان داده شده است.

در این تحقیق برای ساخت سرریز نیلوفری از ورق آهنی به ضخامت ۲ میلی‌متر و پهنای برابر با عرض فلوم استفاده شد. لبه‌های سرریز با استفاده از برش لیزری اریب شد تا شرایط لبه تیزی سرریز تا حد امکان محقق شود. در جدول (۱) مشخصات هندسی ۵ سری مختلف سرریز ساخته شده ارائه شده است.

$$Q^2 = \frac{gA_c^3}{T_c} = \frac{g[2 \int_0^{y_c} x dy]^3}{2x_c} = \frac{2^3 g [\int_0^{y_c} a y^n dy]^3}{2a y_c^n} = 4g \frac{a^3 \left[\frac{1}{n+1} y_c^{n+1} \right]^3}{a y_c^n} \quad (2)$$

$$Q^2 = 4ga^2 \frac{1}{(n+1)^3} \frac{y_c^{3n+3}}{y_c^n} = \frac{4ga^2}{(n+1)^3} y_c^{2n+3} \quad (3)$$

$$Q = 2\sqrt{g} \frac{a}{(n+1)^{\frac{3}{2}}} y_c^{n+\frac{3}{2}} \quad (4)$$

$$H = y_c + \frac{Q^2}{2gA_c^2} = y_c + \frac{Ac}{2T_c} \quad (5)$$

$$H = y_c + \frac{2 \int_0^{y_c} x_c dy}{2x_c} = y_c + \frac{2 \int_0^{y_c} a y_c^n dy}{2a y_c^n} \quad (6)$$

$$H = y_c + \frac{2a \frac{y_c^{n+1}}{n+1}}{2a y_c^n} = y_c + \frac{y_c}{n+1} = \left(1 + \frac{1}{n+1}\right) y_c \quad (7)$$

$$H = \left(\frac{n+2}{n+1}\right) y_c \quad (8)$$

$$y_c = \left(\frac{n+1}{n+2}\right) H \quad (9)$$

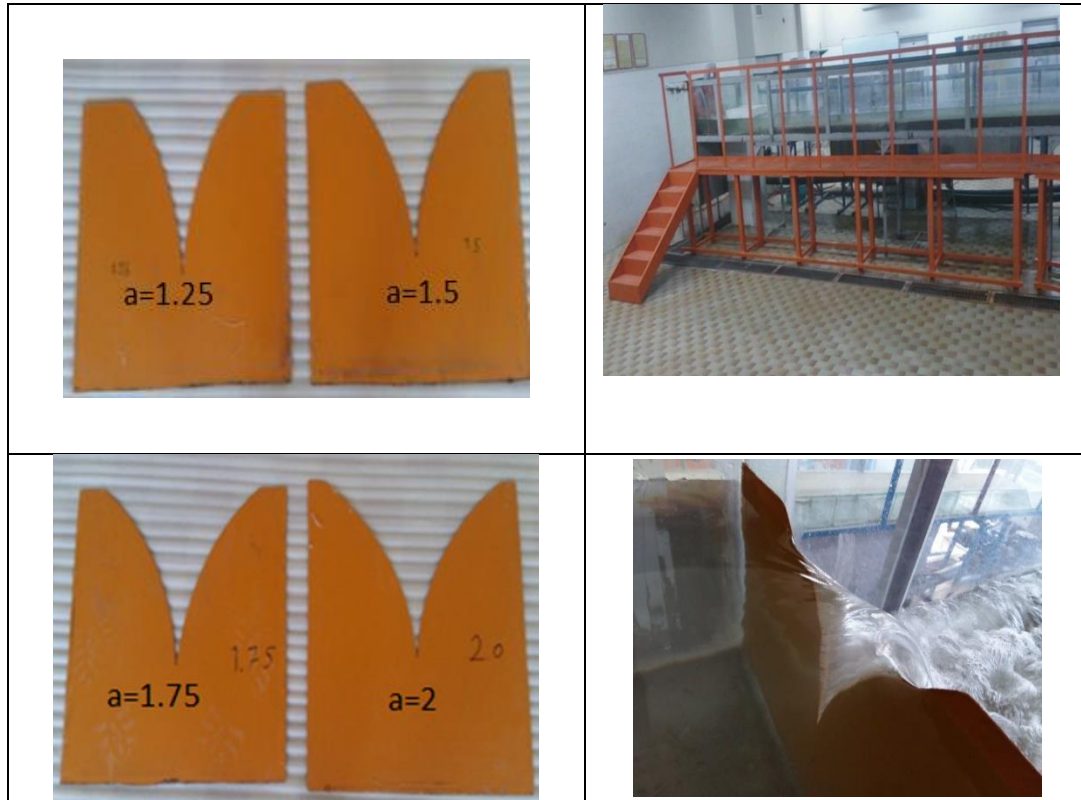
با جایگزینی رابطه شماره (۹) در رابطه شماره (۴) می‌توان نوشت:

$$Q = \left(\frac{2a\sqrt{g}}{(n+1)^{\frac{3}{2}}} \left[\frac{(n+1)}{(n+2)} \right]^{n+\frac{3}{2}} \right) H^{n+\frac{3}{2}} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) رابطه دبی - اشل تئوری است که با فرض وقوع

جدول ۱- ویژگی هندسی سرریزهای مورد استفاده

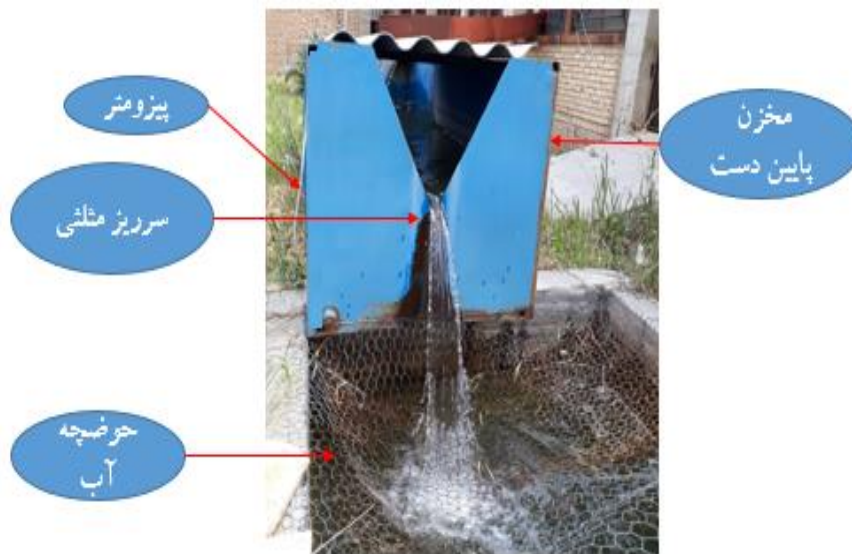
سری سرریز	ارتفاع تاج سرریز (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	پارامتر a	پارامتر n
۱	۲۰، ۱۷/۵ و ۲۲/۵	۵۰	۱/۲۵	۲
۲	۲۰، ۱۷/۵ و ۲۲/۵	۵۰	۱/۵	۲
۳	۲۰، ۱۷/۵ و ۲۲/۵	۵۰	۱/۷۵	۲
۴	۲۰، ۱۷/۵ و ۲۲/۵	۵۰	۲/۰	۲
۵	۲۰، ۱۷/۵ و ۲۲/۵	۵۰	۲/۳	۲



شکل ۲- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

سطح آب و عمق جریان در آزمایش‌ها از یک دستگاه عمق سنج نقطه‌ای (Point Gauge) مجهز به متر لیزری مدل Leica X310 و DistoTm با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده گردید.

تعداد ۵۷ آزمایش بر روی سرریزهای مذکور در شرایط مختلف هیدرولیکی انجام شد. در جدول (۲) پارامترهای هیدرولیکی - هندسی آزمایش‌های انجام شده آورده شده است. به منظور قرائت تراز



شکل ۳- سرریز اندازه‌گیری دبی در انتهای سیستم

جدول ۲- ویژگی هندسی- هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	ارتفاع سرریز (cm)	n	a	عمق جریان (cm)	دبی (لیتر بر ثانیه)	شماره آزمایش	ارتفاع سرریز (cm)	n	a	عمق جریان (cm)	دبی (لیتر بر ثانیه)
۱	۲۲/۵	۲	۱/۲۵	۴۹/۶۵	۸/۷۳	۳۰	۲۰	۲	۱/۷۵	۴۱/۴	۱۰/۲۱
۲	۲۲/۵	۲	۱/۲۵	۴۷/۳	۹/۳۴	۳۱	۲۰	۲	۱/۷۵	۳۹/۵	۱۵/۵۹
۳	۲۲/۵	۲	۱/۲۵	۴۵/۳	۸/۷۳	۳۲	۲۲/۵	۲	۲	۴۹/۶	۶/۵۴
۴	۲۲/۵	۲	۱/۲۵	۴۴	۱۰/۳۵	۳۳	۲۲/۵	۲	۲	۴۵/۵	۴/۹۴
۵	۲۲/۵	۲	۱/۲۵	۴۲/۲	۱۱/۶۹	۳۴	۲۲/۵	۲	۲	۴۴/۹	۵/۲۰
۶	۲۲/۵	۲	۱/۲۵	۳۸/۸	۸/۵۰	۳۵	۲۲/۵	۲	۲	۴۱/۵	۶/۹۵
۷	۲۰	۲	۱/۲۵	۴۷/۹	۹/۷۱	۳۶	۲۲/۵	۲	۲	۳۸/۲	۳/۵۴
۸	۲۰	۲	۱/۲۵	۴۵/۷۵	۳/۵۸	۳۷	۲۲/۵	۲	۲/۳	۴۹/۴	۱۰/۶۱
۹	۲۰	۲	۱/۲۵	۳۵/۱۵	۶/۶۴	۳۸	۲۲/۵	۲	۲/۳	۴۸/۶۵	۱۳/۴۹
۱۰	۲۰	۲	۱/۲۵	۳۴/۴	۸/۶۱	۳۹	۲۲/۵	۲	۲/۳	۴۷/۷۵	۱۴/۱۷
۱۱	۱۷/۵	۲	۱/۲۵	۴۶/۹	۷/۱۶	۴۰	۲۲/۵	۲	۲/۳	۴۴/۷۵	۱۱/۱۴
۱۲	۱۷/۵	۲	۱/۲۵	۴۶/۳۵	۶/۱۴	۴۱	۲۲/۵	۲	۲/۳	۴۱/۹	۶/۹۵
۱۳	۱۷/۵	۲	۱/۲۵	۳۸/۹	۷/۰۵	۴۲	۲۲/۵	۲	۲/۳	۴۱/۱	۵/۸۵
۱۴	۱۷/۵	۲	۱/۲۵	۳۸/۱	۲/۸۶	۴۳	۲۲/۵	۲	۲/۳	۳۹/۱۵	۲/۶۷
۱۵	۱۷/۵	۲	۱/۲۵	۳۴/۸۵	۴/۱۱	۴۴	۲۲/۵	۲	۲/۳	۳۷	۱/۴۲
۱۶	۲۲/۵	۲	۱/۵	۴۹/۵	۳/۸۰	۴۵	۲۲/۵	۲	۲/۳	۳۵/۲	۸/۸۵
۱۷	۲۲/۵	۲	۱/۵	۴۷/۹	۲/۵۱	۴۶	۲۰	۲	۲/۳	۴۶/۸	۲/۶۷
۱۸	۲۲/۵	۲	۱/۵	۴۲/۳۵	۱/۸۵	۴۷	۲۰	۲	۲/۳	۴۶/۲	۱/۴۲
۱۹	۲۲/۵	۲	۱/۵	۳۴/۵۵	۲/۳۴	۴۸	۲۰	۲	۲/۳	۴۵/۷	۸/۸۵
۲۰	۲۰	۲	۱/۵	۴۸/۵	۰/۷۶	۴۹	۲۰	۲	۲/۳	۴۵/۲	۹/۹۶
۲۱	۲۰	۲	۱/۵	۴۶/۵	۱/۱۷	۵۰	۲۰	۲	۲/۳	۴۴/۸	۶/۰۴
۲۲	۲۰	۲	۱/۵	۴۳/۱	۰/۵۱	۵۱	۲۰	۲	۲/۳	۴۲/۹	۴/۱۱
۲۳	۲۰	۲	۱/۵	۳۶/۵	۰/۷۶	۵۲	۲۰	۲	۲/۳	۴۰	۵/۲۹
۲۴	۲۲/۵	۲	۱/۷۵	۴۲/۱	۱/۰۱	۵۳	۲۰	۲	۲/۳	۳۸	۷/۳۷
۲۵	۲۲/۵	۲	۱/۷۵	۴۱	۸/۰۴	۵۴	۱۷/۵	۲	۲/۳	۴۲/۸	۶/۵۲
۲۶	۲۲/۵	۲	۱/۷۵	۳۸/۲	۱۵/۴۲	۵۵	۱۷/۵	۲	۲/۳	۴۰/۵۵	۲/۸۶
۲۷	۲۲/۵	۲	۱/۷۵	۳۰/۲۳	۷/۳۸	۵۶	۱۷/۵	۲	۲/۳	۳۶/۵	۲/۰۰
۲۸	۲۰	۲	۱/۷۵	۴۸	۴/۳۹	۵۷	۱۷/۵	۲	۲/۳	۲۲/۳	۲/۲۷
۲۹	۲۰	۲	۱/۷۵	۴۵/۱	۲/۸۳						

سال ۱۹۹۹ توسط فریرا^۱ ابداع شد. این روش ترکیبی از روش‌های GA و GP بوده که در آن، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند و از آنجایی که در این روش تمام ساختارهای شاخه‌ای با اندازه اشکال متفاوت، در کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کدگذاری می‌شوند، معادل این است که در این روش فنوتیپ و ژنوتیپ از هم جدا می‌شوند و سیستم می‌تواند از تمام مزایای تکاملی به سبب وجود آن‌ها بهره‌مند شود. اکنون با وجود اینکه فنوتیپ در GEP همان نوع از ساختارهای شاخه‌ای مورد استفاده در GP را شامل می‌شود، اما ساختارهای شاخه‌ای که به وسیله GEP

به منظور اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از فلوم آزمایشگاهی از یک سرریز مثلثی با زاویه بازشدگی ۵۳° که در بدنه مخزن فلزی در انتهای پایین دست فلوم آزمایشگاهی تعبیه شده است استفاده گردید. در شکل (۳) تأسیسات اندازه‌گیری دبی خروجی از فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این سرریز به صورت حجمی واسنجی شده است و رابطه (۱۱) برای محاسبه دبی توسط آن ارائه شده است.

$$Q = \alpha(h - h_0)^\beta \quad (11)$$

در این رابطه Q مقدار دبی (لیتر بر ثانیه)، α و β ضرایبی ثابت برابر $\alpha = 0.0203$ و $\beta = 2.1823$ ، h رقوم سطح آب بالادست سرریز و h_0 رقوم تاج سرریز می‌باشد

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP): روش برنامه‌ریزی بیان ژن، در

شامل توابع اصلی حسابی {/, ×, -, +}. توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر {x², exp, log, cos, ...} و یا توابع تعریف شده توسط کاربر است. توابع و ترمینال‌ها، در بخش سر ژن وجود دارند و در قسمت دنباله، فقط ترمینال‌ها وجود دارند (Lopes and Weinert, 2004). به عنوان مثال یک ژن را در نظر بگیرید که از {/, *, -, +, Q, a, b} تشکیل شده است. در این مورد تعداد متغیرهای مستقل n=2 است. برای مقادیر طول سر h=10 و طول دنباله t=11، طول ژن برابر با ۲۱ خواهد بود.

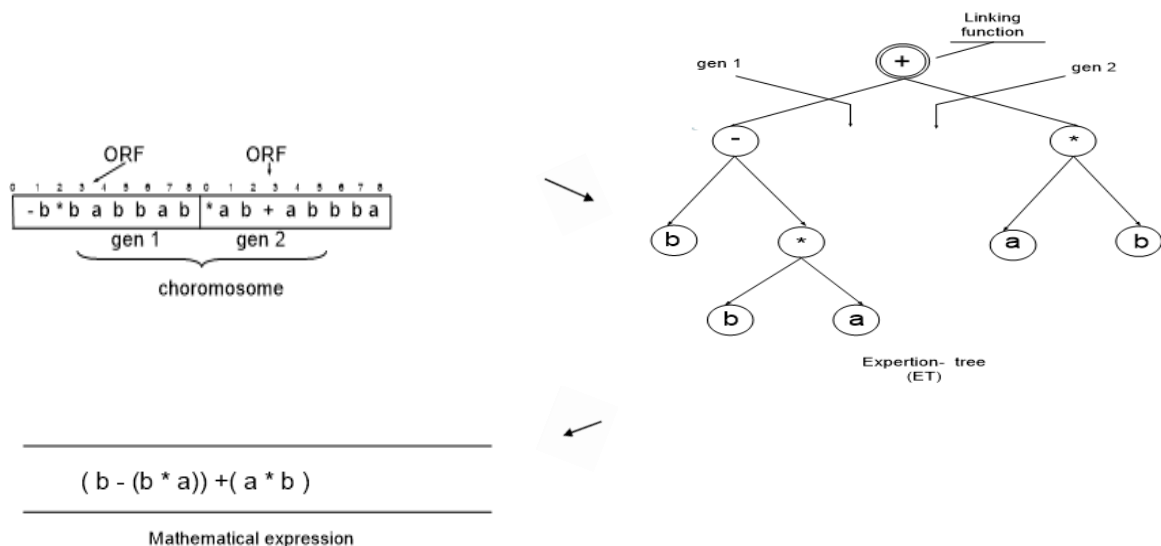
کروموزوم‌ها در هر نسل به وسیله عملگرهای ژنتیکی بهینه می‌شوند. عملگرهای ژنتیکی مورداستفاده در روش GEP جهش، وارونگی، ترکیب کردن، جابجایی، تقاطع و جابجایی ژن‌ها هستند. جهش می‌تواند در هر جایی از کروموزوم رخ دهد. در سر کروموزوم هر کاراکتر می‌تواند به وسیله توابع یا ترمینال‌ها جایگزین شود. با این حال در دم کروموزوم‌ها ترمینال‌ها تنها می‌توانند با دیگر ترمینال‌ها جایگزین شوند. وارونگی تنها در سر کروموزوم انجام می‌شود. در فرایند وارونگی دنباله به صورت تصادفی انتخاب و معکوس می‌شود. در ترکیب کردن یک ترکیب تصادفی از یک کروموزوم انتخاب و در هر موقعیتی از سر کروموزوم کپی می‌شود. در تقاطع کروموزوم‌های والدین با یکدیگر ترکیب شده و دو فرزند جدید تولید می‌کنند. در جابجایی ژن‌ها یک ژن دست نخورده به عنوان یک برگردان عمل کرده و خود را به موقعیت شروع کروموزوم جابجا می‌کند. پس از آن به منظور جلوگیری از تغییر طول کروموزوم‌ها ژن برگردان از موقعیت اصلی حذف می‌شود.

استنتاج می‌شوند (که بیان درختی نیز نامیده می‌شود) مبین تمامی ژنوم‌های مستقل هستند. به طور خلاصه می‌توان گفت: در GEP بهسازی‌ها در یک ساختار خطی اتفاق افتاده و سپس به صورت ساختار درختی بیان می‌شود و این موجب می‌شود تنها ژنوم اصلاح شده به نسل بعد منتقل شده و نیازی به ساختارهای سنگین برای تکثیر و جهش وجود نداشته باشد (Lopes and Weinert, 2004). در برنامه‌ریزی بیان ژن اطلاعات کروموزوم‌ها در حالت درختی رمزگشایی می‌شود که به این فرایند ترجمه می‌گویند. فرایند رمزگذاری بسیار ساده است که به موجب آن در حالت درختی کروموزوم‌ها از چپ به راست و از بالا به پایین خوانده می‌شوند. یک نمونه از برگردان کروموزوم به حالت درختی در شکل (۴) نشان داده است. هر ژن در اولین موقعیت آغاز می‌شود البته نقطه پایانی همیشه در آخرین موقعیت ژن نیست و قالب خواندن باز استفاده می‌شود.

یک کروموزوم از ژن‌ها تشکیل شده و معمولاً شامل بیش از یک ژن (کروموزوم چند ژنه) است. هر ژن به یک سر و یک دنباله تقسیم می‌شود. اندازه سر (h) به وسیله کاربر تعیین می‌شود، اما اندازه دنباله (t)، به صورت تابعی از h و پارامتر n به دست می‌آید. پارامتر n بیشترین تعداد پارامتر مستقل (arity) یافت شده در مجموعه توابع مورداستفاده در اجراست. رابطه (۱۲)، طول دنباله را با توجه به سایر پارامترها به دست می‌دهد (Lopes and Weinert, 2004).

$$t = h(n-1) + 1 \quad (12)$$

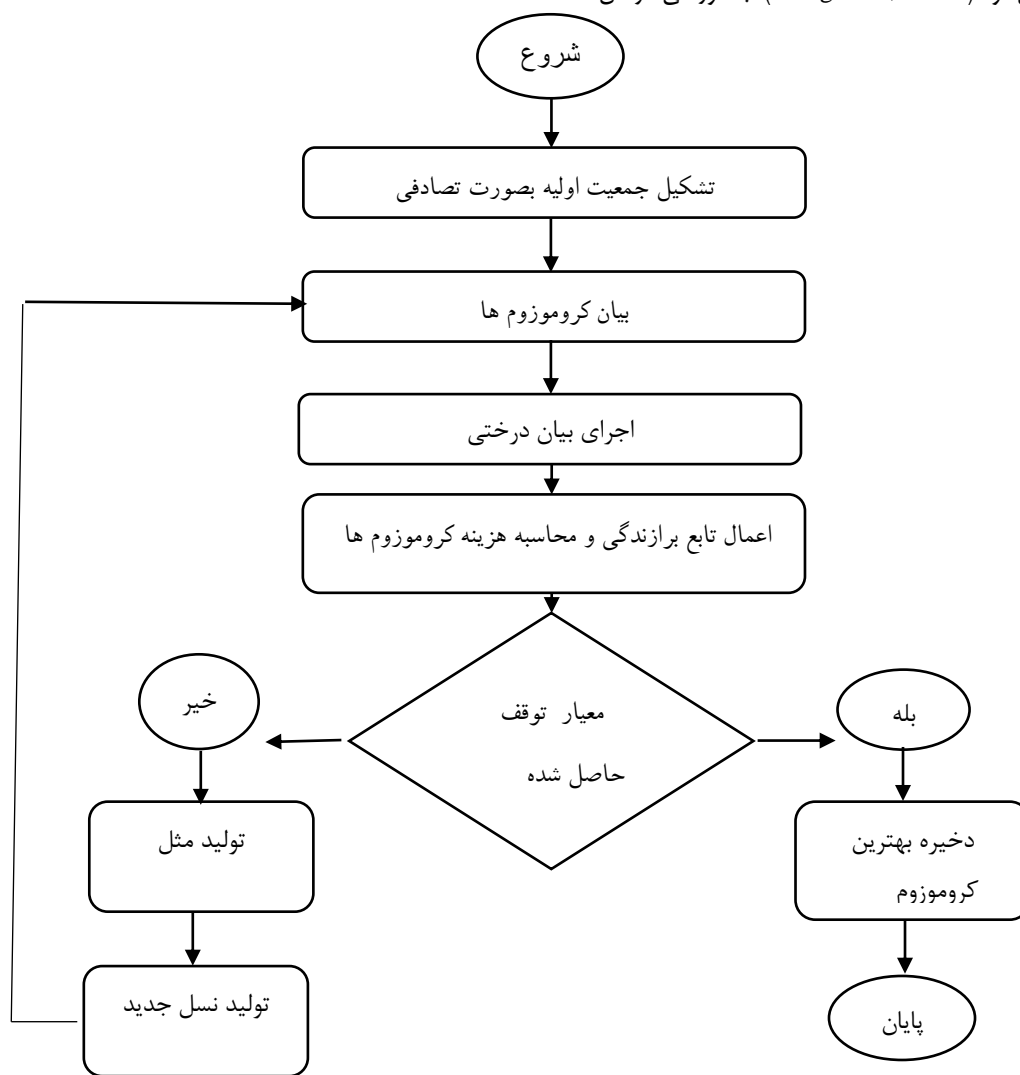
مسائل رگرسیونی نمادین، با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و مجموعه‌ای از ترمینال‌ها، مدل سازی می‌شوند. مجموعه توابع، معمولاً



شکل ۴ - ارائه کروموزوم‌های برنامه‌ریزی بیان ژن

اصلی الگوریتم‌های ذکر شده را می‌توان این گونه ذکر کرد. ابتدا فرایند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی افراد (جمعیت اولیه) آغاز می‌شود. سپس این کروموزوم‌ها به صورت بیان درختی (ET) اظهار می‌شوند در مرحله بعد با استفاده از تابع هدف میزان برازندگی هر فرد ارزیابی شده و بر اساس میزان عملکردشان انتخاب می‌شوند تا اصلاح شده و فرزندانی با ویژگی‌های جدید تشکیل شوند، فرزندان تولید شده، دوباره تحت فرایند توسعه‌ای قرار گرفته تا راه حل خوب و مناسبی پیدا شود (Ferreira, 2002).

شکل (۵) روند و مراحل برنامه‌ریزی بیان ژن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) روش برنامه‌ریزی بیان ژن شامل چند مرحله عمده است. در ابتدا کروموزوم‌ها از جمعیت اولیه به طور تصادفی تولید می‌شوند. سپس کروموزوم‌ها بیان شده و با توجه به تابع برازندگی در نظر گرفته شده هزینه هر کروموزوم ارزیابی می‌شود. سپس کروموزوم‌ها با توجه به هزینه‌های خود یا اصلاح می‌شوند یا دوباره تولید می‌شوند. ارائه افراد جدید از طریق فرایند مشابه شامل بیان ژنوم، تطبیق انتخاب گره‌های محیطی و تولید مثل اصلاح شده گام بعدی می‌باشد. روند ذکر شده تا زمانی که تعداد نسل یا خطای مدل به مقدار قابل قبولی برسد تکرار می‌شود (Liong et al, 2002). به طور کلی مراحل



شکل ۵ - الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

میانگین مربعات خطا (Root Mean Squares of Error-RMSE)، متوسط خطای مطلق (Mean Absolut Error-MAE)، مجذور ضریب همبستگی (R^2) و شیب خط رگرسیون (α) استفاده شد:

معیارهای آماری

به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شده برای محاسبه رابطه دبی- اشل در تحقیق حاضر از شاخص‌های آماری جذر

نتایج و بحث

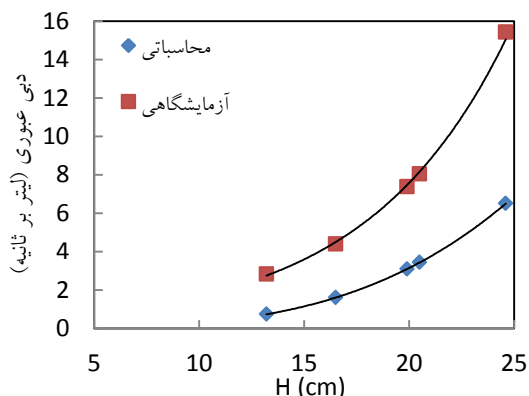
پس از انجام آزمایش‌های موردنظر بر روی سرریزهای ساخته شده مقادیر دبی و اشل متناظر با آن به دست آمد و نهایتاً رابطه دبی اشل - اندازه‌گیری شده برای هر یک از ۵ نوع سرریز نیلوفری لبه تیز ترسیم شد. این مقادیر دبی و اشل اندازه‌گیری شده به همراه دبی و اشل‌های محاسباتی با رابطه (۱۰) در شکل (۶) ترسیم شده‌اند.

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^n [(Q_M)_i - (Q_C)_i]^2} \quad (13)$$

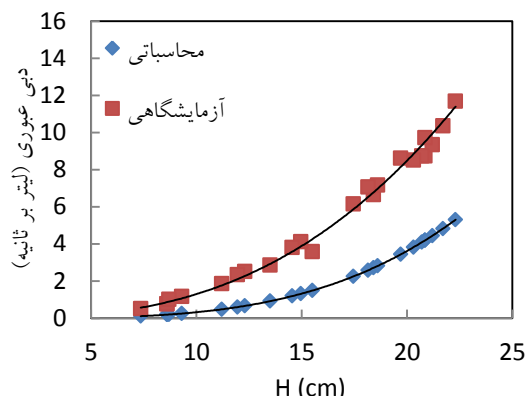
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [(Q_M)_i - (Q_C)_i] \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Q_C - \bar{Q}_C)(Q_M - \bar{Q}_M))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_C - \bar{Q}_C)^2 \sum_{i=1}^n (Q_M - \bar{Q}_M)^2} \quad (15)$$

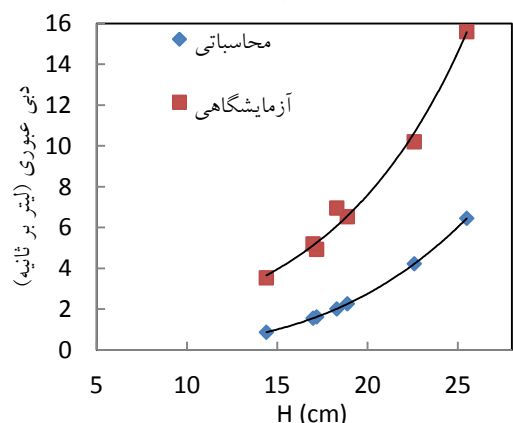
که در روابط فوق N تعداد داده‌ها، Q_M دبی اندازه‌گیری شده، Q_C دبی محاسبه شده می‌باشند. هراندازه مقدار $RMSE$ و MAE به صفر و مقادیر R^2 و شیب‌خط رگرسیون به یک نزدیک‌تر باشد دقت مدل بیشتر است.



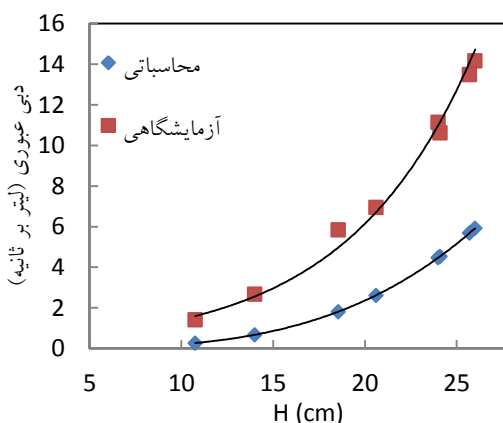
ب) $a=2$



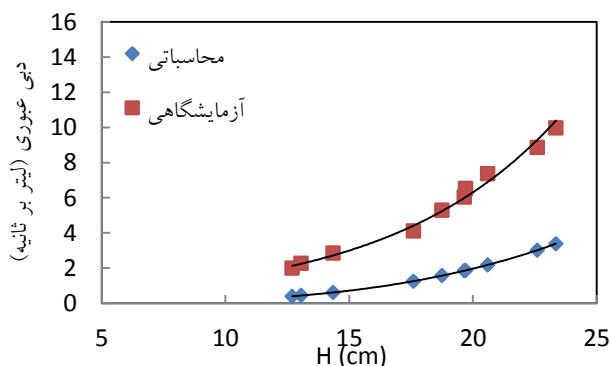
الف) $a=2/3$



د) $a=1/5$



ج) $a=1/75$



ه) $a=1/25$

شکل ۶- دبی- اشل محاسبه شده (قبل از اصلاح) در مقابل اندازه‌گیری

$$C = \left[e^{\tan^{-1}\left(\frac{p}{H}\right)} - \sqrt{0.765503 \left(\frac{a}{n} \times \frac{p}{H}\right)} \right] \times \left(e^{\cos(\sin(\cos((-1.288446)\left(\frac{a}{n} \times \frac{p}{H}\right)))} \right) \quad (17)$$

$$C = \left[\frac{\frac{p}{H}}{\frac{a}{n}} + \sqrt{\left(\frac{p}{H} + 9.598145\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)}} \right] \times \left(\frac{p}{H} + ((0.101348 \times \frac{a}{n}) / (\frac{p}{H})^3) \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (18)$$

$$C = \left[\frac{\frac{p}{H}}{\frac{a}{n} \times \sin\left(\sqrt{\left(\frac{a}{n} \times 2.709198\right)}\right)} + \left(\frac{p}{H} + (\cos(\cos\left(\left(\frac{a}{n} - \frac{p}{H}\right)\right)) / \left(\frac{p}{H}\right)) \right) \right] \quad (19)$$

$$C = \left[\cos\left(\left(\ln\left(\left(\frac{a}{n} + \sin\left(\left(\left(\frac{p}{H}\right)\right)^3 - \left(-5.916626 + \frac{a}{n}\right)\right)\right)\right) + \left(\frac{a}{n}\right)^{\left(1/3\right)^2}\right)\right] + \left[\left(\frac{p}{H}\right) / \left(\frac{a}{n} + \left(\sin\left(\cos\left(\left(\ln\left(\frac{a}{n}\right) - (6.390594 \times \left(\frac{a}{n}\right)^2\right)\right)\right)\right)^2\right)^3\right) + \frac{p}{H}\right] \quad (20)$$

به منظور انتخاب بهترین رابطه از بین روابط ۱۷ تا ۲۰، پس از جایگزینی این روابط در رابطه (۱۶) مقادیر دبی عبوری از سرریز به ازای هر اشل محاسبه گردید و با مقادیر دبی اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. در شکل (۷) مقادیر دبی اندازه‌گیری و اصلاح شده پس از جایگزینی هریک از ضرایب اصلاحی روابط (۱۷) تا (۲۰) در رابطه (۱۶) نشان داده شده است.

همان گونه که ملاحظه می‌شود هر چهار رابطه ارائه شده از دقت مناسبی برخوردار هستند. برای مقایسه دقیق‌تر از برخی پارامترهای آماری همانند مجموع مربعات خطا، میانگین خطای مطلق، ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون استفاده شد. مقادیر محاسبه شده برای این پارامترهای آماری در جدول (۳) ارائه شده است.

استفاده از رابطه (۱۸) برای تعیین ضریب اصلاحی C باعث شده است که دبی محاسبه شده به دبی اندازه‌گیری شده متناظر نزدیک‌تر باشد چرا که کمترین مقدار خطا، کمترین مجموع مربعات خطا، نزدیک‌ترین شیب خط رگرسیون به عدد یک و همچنین ضریب R^2 قابل‌رقابت با سایر مدل‌ها را ارائه نماید؛ بنابراین در این تحقیق رابطه (۱۸) به عنوان ضریب اصلاحی برای محاسبه رابطه دبی - اشل تحلیلی توسط رابطه (۱۶) انتخاب شد. در شکل (۸) نمایی سه‌بعدی از تغییرات مقدار ضریب اصلاحی C برحسب پارامترهای a/n و p/H مطابق رابطه (۱۸) نشان داده شده است.

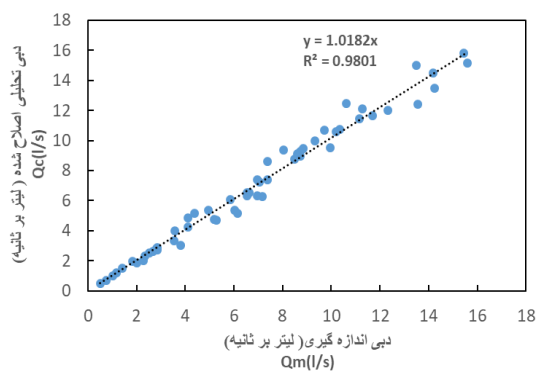
مجدداً یادآوری می‌شود در این شکل H عمق آب در بالادست سرریز نسبت به رأس سرریز (اشل بالادست)، P ارتفاع سرریز، a و $\alpha = 2$ مشخصات هندسی هریک از سرریزها هستند.

همان طور که در شکل (۶) مشخص شده است مقدار حداقل اشل به ازای دبی ۰/۵۱ لیتر بر ثانیه در سرریز با مشخصات $(a=2.23, n=2, p=20cm)$ برابر با ۷/۵۳ سانتی‌متر به می‌باشد. این هد جریان از حداقل ارتفاع توصیه شده به منظور حذف اثرات کشش سطحی (۵ الی ۶ سانتی‌متر) بیشتر است. به عبارتی با استفاده از این نوع سرریز حتی برای دبی‌های خیلی کم در حد نیم لیتر بر ثانیه کشش سطحی بی‌تأثیر می‌باشد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد سرریز مثلی معادل سرریز مذکور (سرریزی که حجم مصالح مورد نیاز برای ساخت و نصب آن در فلووم مذکور برابر با سرریز نیلوفری مذکور باشد) باید دارای زاویه رأس ۵۵/۹ درجه باشد. برای دبی نیم لیتر بر ثانیه هد جریان روی تاج این سرریز مثلی با فرض استاندارد بودن آن حدود ۵/۳ سانتی‌متر به دست می‌آید. در مقام مقایسه هد جریان روی تاج سرریز نیلوفری برای این دبی حدود ۳۰ درصد بیشتر از سرریز مثلی معادل است که خود نشان از دقت اندازه‌گیری بیشتر و حذف بهتر اثر کشش سطحی دارد.

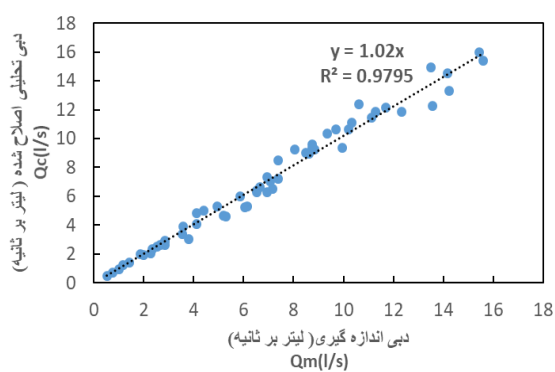
علاوه بر این شکل (۶) نشان می‌دهد به ازای یک اشل مشخص مقدار دبی محاسباتی به روش تحلیلی متفاوت از دبی آزمایشگاهی و کمتر از آن است. این اختلاف ناشی از فرض وقوع جریان بحرانی بر روی تاج سرریز و عدم در نظر گرفتن فشردگی جریان و ... می‌باشد. به منظور اصلاح رابطه دبی - اشل تحلیلی یک ضریب اصلاحی (C) در سمت راست رابطه (۱۰) اعمال شد. در نهایت رابطه (۱۶) به عنوان رابطه دبی - اشل اصلاح شده برای سرریز نیلوفری به دست آمد:

$$Q = C \left\{ \left(\frac{2a\sqrt{g}}{(n+1)^{\frac{3}{2}}} \left[\frac{(n+1)}{(n+2)} \right]^{n+\frac{3}{2}} \right) H^{n+\frac{3}{2}} \right\} \quad (16)$$

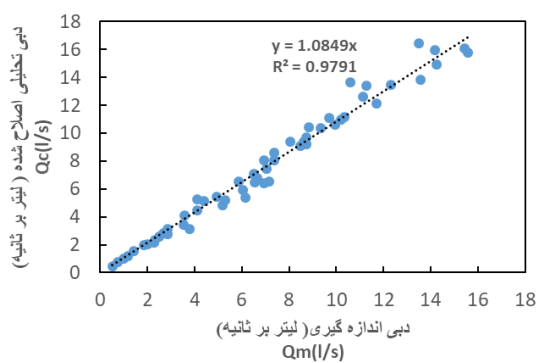
ضریب اصلاحی C در واقع برابر است با نسبت دبی اندازه‌گیری (Q_M) به دبی محاسباتی (Q_C) با رابطه (۱۰) یا به عبارتی $C = Q_M / Q_C$. برای به دست آوردن رابطه‌ای مناسب برای ضریب اصلاحی C از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی بیان ژن با استفاده از نرم افزار GeneXproTools استفاده شد. به خاطر جلوگیری از افزایش حجم مقاله در اینجا تنها به نتایج اشاره شده است. برای ضریب C به صورت تابعی از نسبت هد بالادست سرریز به ارتفاع آن (p/H) و مشخصات هندسی سرریز (a/n) روابط مختلفی استخراج شد (روابط ۱۷ تا ۲۰). لازم به ذکر است که برای استخراج این روابط از نتایج ۵۷ داده آزمایشگاهی استفاده شد تعداد ۴۰ داده آزمایشگاهی به عنوان داده ورودی در مرحله آموزش و داده‌های ۱۷ آزمایش دیگر برای صحت سنجی رابطه مورد استفاده گرفت.



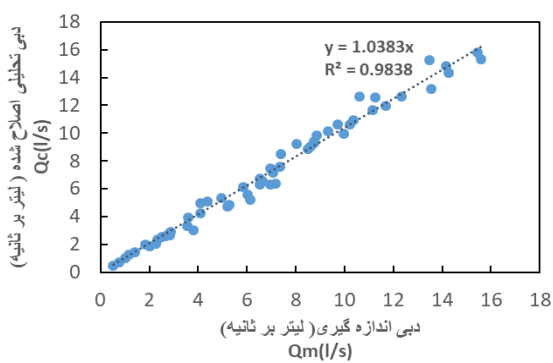
ب



الف

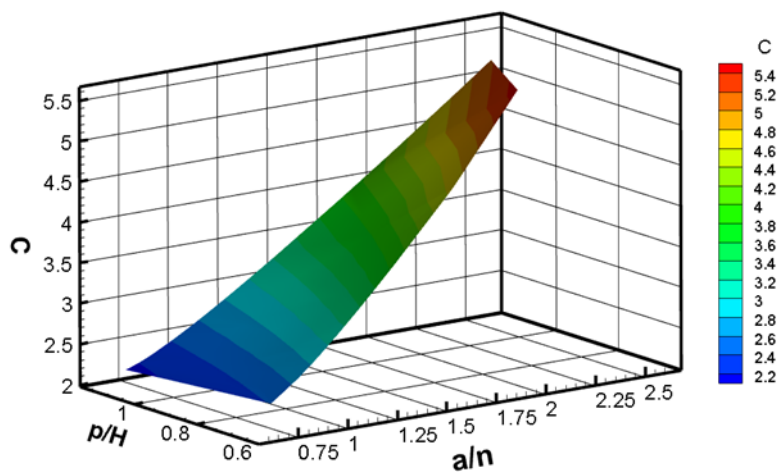


د

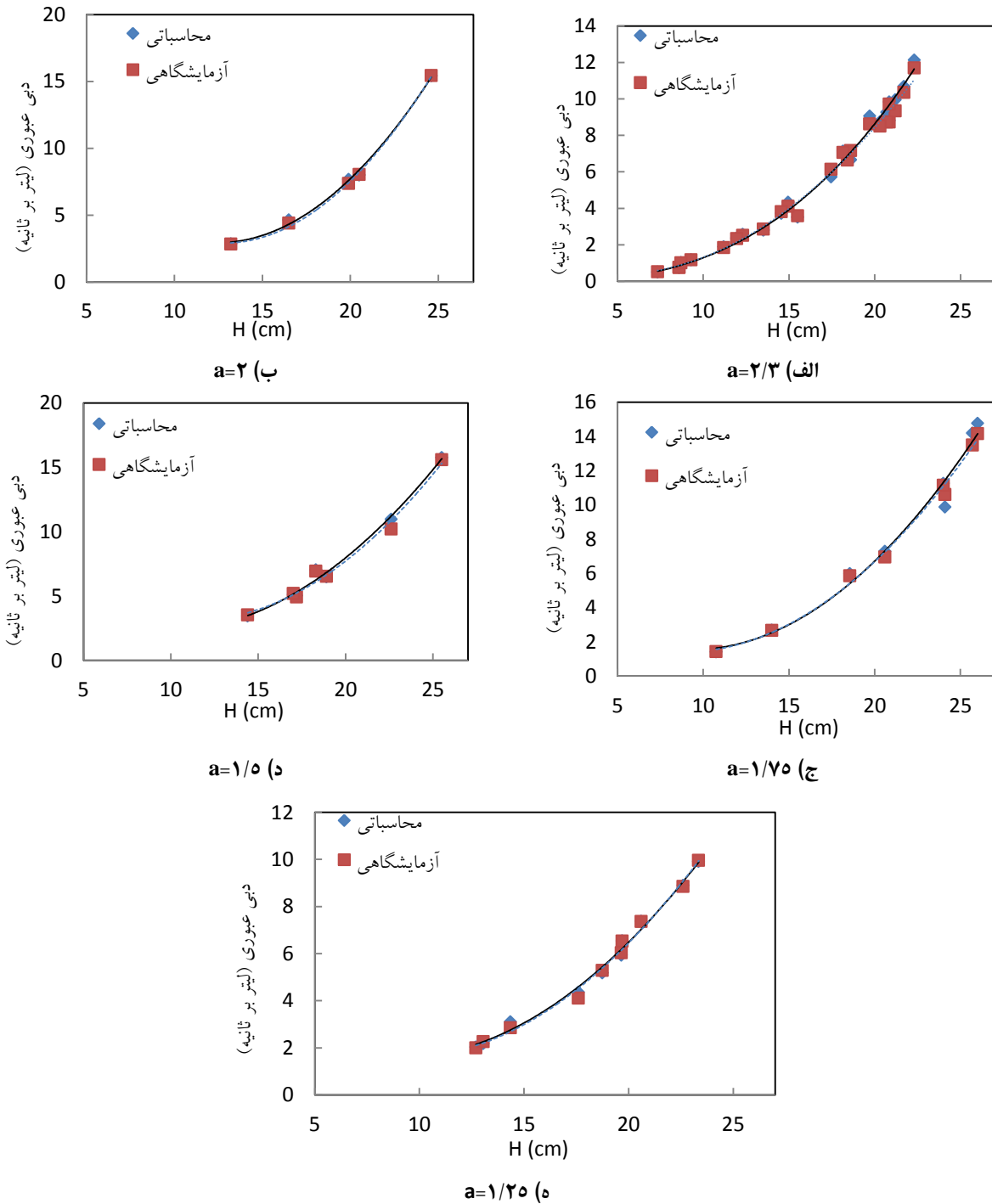


ج

شکل ۷- مقادیر دبی اندازه‌گیری شده در مقابل دبی محاسبه‌شده اصلاحی توسط ضریب C (الف) رابطه (۱۷)، (ب) رابطه (۱۸)، (ج) رابطه (۱۹) و (د) رابطه (۲۰)



شکل ۸- ضریب اصلاحی c برحسب پارامترهای a/n و p/H مطابق رابطه (۱۸)



شکل ۹- رابطه دبی- اشل محاسبه شده (بعد از اصلاح) در مقابل اندازه گیری

انطباق کامل منحنی دبی- اشل اندازه گیری شده بر روی دبی- اشل محاسباتی نشان دهنده دقت رابطه (۱۶) برای محاسبه رابطه دبی- اشل هست و رابطه (۱۶) به عنوان یک رابطه قابل اعتماد برای همه سرریزهای مورد استفاده در این تحقیق معرفی می شود.

نهایتاً به منظور بررسی دقت رابطه دبی- اشل تحلیلی اصلاح شده (رابطه ۱۶) مقادیر دبی و اشل محاسبه شده با این رابطه در مقابل مقادیر دبی و اشل اندازه گیری شده در آزمایشگاه برای هر یک از سرریزها ترسیم گردید. نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای آماری برای مقایسه روابط ۱۷ تا ۲۰

شماره رابطه	ضریب همبستگی (R^2)	میانگین خطای مطلق MAE (l/s)	ریشه مربعات خطا RMSE (l/s)	شیب خط رگرسیون
۱۷	۰/۹۷۹	۰/۴۷۰	۰/۰۸۲	۱/۰۲۰
۱۸	۰/۹۸۰	۰/۴۴۲	۰/۰۸۰	۱/۰۱۸
۱۹	۰/۹۸۴	۰/۴۵۲	۰/۰۸۳	۱/۰۳۸
۲۰	۰/۹۷۹	۰/۶۵۸	۰/۱۲۴	۱/۰۸۵

نتیجه گیری

سرریزها یکی از اجزای اصلی پروژه‌های آبی هستند که برای مصارف مختلفی ساخته می‌شوند. هدف اصلی از ساخت سرریزها تنظیم سطح آب رودخانه‌ها و شبکه‌های آبیاری، اندازه‌گیری دبی، تخلیه سیلاب از مخازن سدها، کنترل فرسایش بستر رودخانه و ... می‌باشد. معرفی سرریزی که در دبی‌های کم دقت اندازه‌گیری بالایی داشته باشد و در دبی‌های سیلابی برگشت آب کمتری را ایجاد نماید می‌تواند نقطه عطفی در سازه‌های اندازه‌گیری دبی در مجاری روباز باشد. در این تحقیق نوعی سرریز لبه تیز به نام سرریز لبه تیز نیلوفری معرفی شده است که این دو هدف را برآورده می‌کند.

با فرض وقوع عمق بحرانی در تاج سرریز، رابطه تحلیلی دبی-اشل برای سرریز مذکور به دست آمد. سپس به منظور بررسی صحت رابطه دبی-اشل تحلیلی، ۵ نوع مختلف از سرریز مذکور با مشخصات هندسی مختلف ساخته شد. آزمایش بر روی این سرریزها در فلوام آزمایشگاهی با عرض ۵۰ سانتی‌متر و عمق ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. به منظور اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان، سرریزها در فاصله ۴/۵ متری ابتدای فلوام نصب شدند. تعداد ۵۷ آزمایش تجربی بر روی این سرریزها در محدوده دبی ۰/۵ تا ۱۵/۵ لیتر در ثانیه انجام شد. رقوم سطح آب بالای تاج سرریز توسط یک دستگاه عمق سنج نقطه‌ای (Point Gauge) مجهز به متر لیزری مدل Leica X310 DistoTm با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین دبی جریان توسط یک سرریز مثلثی کالیبره شده ۵۳ درجه که روی مخزن فلزی در پایین دست فلوام نصب شده بود اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد رابطه دبی-اشل اندازه‌گیری شده با رابطه دبی-اشل محاسبه شده (رابطه ۱۰) به روش تحلیلی با همدیگر اختلاف دارند. این اختلاف می‌تواند عمدتاً ناشی از فرض وقوع جریان بحرانی بر روی تاج سرریز، انقباض جانبی خطوط جریان عبوری از روی سرریز و ... باشد. به منظور کاهش اختلاف رابطه دبی-اشل اندازه‌گیری شده و محاسباتی با استفاده روش‌های بهینه‌سازی فرا کاوشی و استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن یک ضریب اصلاحی استخراج گردید. نهایتاً این ضریب به صورت تابعی از پارامترهای $(p/H, a/n)$ تعریف

شد (رابطه ۱۸). با اعمال این ضریب در رابطه دبی-اشل تحلیلی، با دقت قابل قبولی، منحنی دبی-اشل اندازه‌گیری بر منحنی دبی-اشل تحلیلی اصلاح شده (رابطه ۱۶) منطبق گردید. بررسی اجمالی نشان داد برای اندازه‌گیری دبی نیم لیتر بر ثانیه با سرریز مذکور عمق جریان بالای تاج سرریز حدود ۷/۵۳ سانتی‌متر است که به اندازه کافی از حداقل عمق جریان لازم برای حذف اثر کشش سطحی فاصله دارد.

مراجع

- Akhbari, A., Zaji, A. H., Azimi, H. and M. Vafaeifard. 2017. Predicting the discharge coefficient of triangular plan form weirs using radian basis function and M5' methods. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*. 4 (1): 281-289
- Ayaz, Md. and Mansoor, T. 2018. Discharge coefficient of oblique sharp crested weir for free and submerged flow using trained ANN model. *Water Science*. 32(2): 192-212.
- Aydin, I., Altan-Sakarya, A. B., and Sisman, C. 2011. Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(2): 144-151.
- Bagheri, S. and Heidarpour, M. 2010. Flow over rectangular sharp-crested weirs. *Irrigation science*. 28(2): 173-179.
- Bahman, E., and Kabiri-Samani, A. 2021. Experimental investigation of flow characteristics over asymmetric Joukowski hydrofoil weirs for free and submerged flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101938.
- Bautista-Capetillo, C., Robles, O., JÚnez-Ferreira, H., and Playán, E. 2014. Discharge coefficient analysis for triangular sharp-crested weirs using low-speed photographic technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 140(3): 06013005.
- Bos, M.G. 1989. *Discharge Measurement Structures*. International Institute for Land Reclamation and

- enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 14(3): 375-384.
- Martinez R.E., Reza J., Morillas M.T. and Lopez, J.G. 2005. Design and calibration of compound sharp crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 131 (2):112- 116
- Parsaie, A. and Haghiabi, A. H. 2021. Uncertainty analysis of discharge coefficient of circular crested weirs. *Applied Water Science*. 11(2): 1-6.
- Ramamurthy, A. S., Tim, U. S., and Rao, M. V. J. 1987. Flow over sharp-crested plate weirs. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 113(2): 163-172.
- Ranga Raju, K. and Asawa, G. 1977. Viscosity and surface tension effects on weir flow. *Journal of the Hydraulics Division*. 103(HY10): 1227-1231.
- Salehi, S., Esmaili, K. and Azimi, A. H. 2019. Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 66: 99-110.
- Saneie, M., SheikhKazemi, J. and Azhdary Moghaddam, M. 2016. Scale effects on the discharge coefficient of ogee spillway with an arc in plan and converging training walls. *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 49(2): 361-374.
- Thornton, C. I., Meneghetti, A. M., Collins, K., Abt, S. R. and Scurlock, S. M. 2011. Stage-Discharge Relationships for U-, A-, and W-Weirs in Un-Submerged Flow Conditions. *Journal of the American Water Resources Association*. 47(1): 169-178.
- Zachoval Z., Kněblová M., Roušar L., Rumann J. and Šulc, J. 2014. Discharge coefficient of rectangular sharp-edged broad-crested weir. *Journal of Hydrology Hydromech*. 62(2): 145-149.
- Improvement (ILRI), Publication 20, Wageningen, Netherlands.
- Castro-Orgaz, O., Giraldez, J. V. and Ayuso, J. L. 2008. Critical flow over circular crested weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(11): 1661-1664.
- Ferreira, C. 2002. Gene expression programming in problem solving. In *soft computing and industry* (pp. 635-653). Springer, London.
- Ghobadian, R. and E. Meratifashi. E. 2012. Modified theoretical stage-discharge relation for circular sharp-crested weirs. *Water Science and Engineering*. 5(1):26-33
- Gong, J., Deng, J. and Wei, W. 2019. Discharge coefficient of a round-crested weir. *Water*, 11(6):1206.
- Igathinathane, C., Srikanth, I., Prakash, K., Ramesh, B., and A. R. Womac. 2007. Development of parabolic weirs for simplified discharge measurement. *Biosystems engineering*. 96(1): 111-119.
- Ionescu, C. S., Nistoran, D. E. G., OPRIȘ, I. and SIMIONESCU, Ș. M. 2019. Sensitivity Analysis of Sharp-Crested Weirs as a Function of Shape Opening, for Small Discharges. *Hidraulica*. 2: 43-51.
- Kumar, S., Ahmad, Z., and Mansoor, T. 2011. A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 22(3): 175-180.
- Liong, S.Y., Gautam, T.R., Khu, S.T., Babovic, V., Keijzer, M. and Muttill, N. 2002. Genetic programming: A new paradigm in rainfall runoff modeling. *Journal of American Water Resources Association*. 38 (3): 705-718.
- Lopes, H.S. and Weinert, W.R. 2004. EGIPSYS: An

Analysis of Stage-Discharge Theoretical and Laboratory Relationships in Morning glory Sharp Crested Weir

R. Ghobadian^{1*}, M. Zanganeh²

Received: Apr.22, 2022

Accepted: May.30, 2022

Abstract

In this study, a special type of sharp-crested weir is called sharp-crested morning glory weir (SCMGW) is introduced. Due to the special shape of this weir, high measurement accuracy in low discharge, and in flood and sudden discharges, less back water profile is expected upstream. On the other hand, there is no discontinuity in their stage-discharge relationship. Assuming the occurrence of a critical flow in the weir crest, the general stage-discharge relationship was extracted for this type of weir. The next step was to correct this assumption, considering that the assumption of the occurrence of a critical flow in the weir crest is accompanied by an error, and consequently the stage-discharge relationship obtained based on this assumption is not accurate. For this purpose, by measuring 57 experiments on 5 types of this weir, the stage-discharge relationship was extracted and it was shown that for a specific stage, the measured flow is greater than the calculated analytical flow. A correction coefficient was applied to the analytical relation with the aim of matching the stage-discharge analytic relationship with the measurement. This correction factor was optimized and extracted using the gene expression programming method as a function of the weir height-to-head ratio (p/H) and the a/n ratio (a and n parameters of the weir geometric shape). The results showed that the modified discharge-stage relationship estimated the measured discharge values as $R^2 = 0.98$, mean absolute error $MAE = 0.442$ liters and root mean square error of $RMSE = 0.08$ liters.

Keywords: Gene expression programming, Sharp crested morning glory weir, Stage-discharge relation, Weir

1- Assoc. Prof., Dept., of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Kermanshah. Iran

2- MSc. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Kermanshah. Iran

(* - Corresponding Author Email: r_ghobadian@razi.ac.ir)