





دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

برآورد ضریب دبی سرریز مرکب با استفاده از مدل GEP

نگارنده: سحر رمضان

استاد راهنما:

دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور:

دکتر سید حسین حسینی

تیر ۱۳۹۷

شماره: ۳۹۷/۴/۲۷
تاریخ:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سحررمضانی با شماره دانشجویی ۹۳۳۸۰۵۴ رشته مهندسی آب گرایش طراحی سازه‌های آبی تحت عنوان برآورد ضریب دبی سرریز مرکب با استفاده از مدل GEP که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۴/۰۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه): ☒ خیلی خوب ☐ خوب ☐ مردود ☒ عملی ☐ نظری			
نوع تحقیق:			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر صمد امامقلی زاده	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر سید حسین حسینی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید ایمان ساعدی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر خلیل اژدری	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر زهرا گنجی نوروزی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدرضا عامریان



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در صورت مجوز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیرم

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیرم می نمایم به

پدرم پیرمیرزا،

مادر گلم

و برادر عزیزتر از جانم

به سه گوهر نایابی که تمام زندگیم به وجود آنها خلاصه می شود

دل گوجه در این بادیه بسیار شتافت

یک موی ندانست ولی موی شکافت

اندر دل من هزار خورشید بتاف

آخر به کمال ذره ای راه نیافت

(ابوعلی سینا)

تشکر و قدردانی

شایسته است از تمامی عزیزانی که در طی دوران تحصیل و انجام این پژوهش به بنده لطف داشته‌اند، تشکر و قدردانی نمایم. بزرگ‌ترین سهم متعلق به پدر و مادر مهربانم می‌باشد، که در تمام سالهای زندگی تکیه‌گاه من برای ادامه تحصیل بوده‌اند. می‌دانم که هیچ‌گاه نمی‌توانم پاسخگوی حتی قطره‌ای از دریای محبت آنها باشم.

نهایت سپاس و تشکر خود را از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر صمد امامقلی زاده که در مراحل مختلف این تحقیق با حسن خلق و فروتنی و با حمایت‌های بی‌دریغ و راهنمایی‌های بیش‌ازخود مرا در انجام آن یاری و مساعدت نمودند دارم و برای ایشان، همواره سلامتی و مهریزی را از خداوند منان خواستارم.

از اساتید محترم گروه مهندسی اب و همچنین دکتر سید حسین حسینی و دکتر مجتبی عامری که همواره از آنها به عنوان الگوی علمی و اخلاقی خود بهره برده‌ام تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از اساتید محترم دکتر خلیل اژدری و دکتر زهرا گنجی نوروزی که زحمت مطالعه و داوری پایان‌نامه را برعهده داشته‌اند تشکرو سپاسگزاری می‌نمایم.

سحر رضایی

شمار ۹۷

تعهدنامه

- اینجانب سحر رضائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش طراحی سازه- های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه برآورد ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب در جریان زیر بحرانی تحت راهنمایی دکتر صمد امامقلی زاده متعهد می- شوم تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می- باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سرریزها، از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی به‌شمار می‌روند که به‌عنوان کنترل‌کننده سطح آب و اندازه‌گیری شدت جریان در کانال‌ها استفاده می‌شود. سرریزها به‌صورت گسترده در هیدرولیک، برنامه‌های کاربردی محیط‌زیست و همچنین سیستم آبیاری و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و انحراف آب از کانال اصلی به فرعی در آزمایشگاه هیدرولیک و شبکه‌های آبیاری و زهکشی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. دقت در اندازه‌گیری دبی جریان برای شرایط مختلف جریان موجب طراحی شکل‌های هندسی مختلف سرریزها شده است. لذا با توجه به اهمیت و کاربردهای گسترده سرریزهای جانبی، این سرریزها باید خصوصیتی داشته باشند تا بتوان از آن‌ها به‌طور مناسب در شبکه‌های انتقال آب بهره گرفت. از جمله خصوصیات بارزی که می‌توان به آن اشاره نمود: شامل اندازه‌گیری دقیق دبی عبوری از سرریز و توانایی آن در خروج میزان قابل توجهی آب در زمان رخداد دبی‌های سیلابی است. چراکه سرریزهای جانبی ساده در زمان بروز سیلاب فقط برای عبور آب اضافی کانال و یا رودخانه مناسب است ولی برای اندازه‌گیری دقیق دبی عبوری مناسب نمی‌باشد. لذا دقت اندازه‌گیری دبی در محدوده‌ی وسیعی از شرایط جریان و نیز تخلیه و عبور آب در مواقع سیلابی از مهم‌ترین مزیت‌های سرریزهای مرکب به‌شمار می‌رود.

در این پژوهش، سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی و مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه بررسی و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لذا پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای مرکب با استفاده از آنالیز رگرسیون، SPSS، شبکه‌های عصبی مصنوعی (GMDH) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) که از قوی‌ترین و پرکاربردترین مدل‌سازها به‌شمار می‌آیند انجام گرفته است. همچنین برای مدل‌سازی از پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر ضریب دبی استفاده شده است و برای مقایسه از پارامترهای آماری مانند R^2 و RMSE استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) با مقدار $R^2 = 0.83$ برای داده‌های آموزش و $R^2 = 0.80$ برای داده‌های آزمون در سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی و برای سرریزهای مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب برای داده‌های آموزش برابر $R^2 = 0.97$ ، $R^2 = 0.93$ و $R^2 = 0.97$ و برای داده‌های آزمون برابر $R^2 = 0.96$ ، $R^2 = 0.92$ و $R^2 = 0.96$ به دست آمد. که در مقایسه با مدل رگرسیون، SPSS و GMDH مقدار خطای RMSE را برای داده‌های آزمون در سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی به ترتیب ۰/۰۰۲۳، ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۰۷، برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه به ترتیب ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۰۶ و ۰/۰۰۱۰، برای سرریز مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۴، ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۵ و برای سرریز مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۴، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۹ درصد کاهش داشته است، که این نتایج نشان‌دهنده برتری و بهینه بودن مدل‌سازی برنامه‌ریزی بیان ژن می‌باشد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی، سرریز جانبی مرکب مثلثی-مستطیلی، شبکه عصبی، ضریب دبی.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- تئوری و کاربرد سرریز
۴	۳-۱- تقسیم‌بندی سرریزها
۴	۱-۳-۱- سرریز لبه تیز
۵	۲-۳-۱- سرریز لبه پهن
۵	۳-۳-۱- سرریز مرکب
۷	۲-۳-۱- سرریز لبه تیز ترکیبی مثلثی - مستطیلی (CTRSC)
۷	۴-۱- ضرورت انجام تحقیق
۸	۵-۱- اهداف تحقیق
۹	۶-۱- روش انجام تحقیق
۹	۷-۱- ساختار پایان نامه
۱۱	فصل دوم: تاریخچه
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- معادلات حاکم بر سرریز جانبی
۱۶	بررسی منابع
۳۷	۳-۲- جمع بندی
۳۹	فصل سوم: مواد و روشها
۴۰	۱-۳- داده های مورد استفاده
۴۰	۱-۱-۳- مشخصات مدل آزمایشگاهی
۴۲	۲-۳- مدل های مورد استفاده
۴۶	۳-۳- روش رگرسیون غیرخطی
۴۶	۴-۳- برنامه ریزی بیان ژن (GEP)
۵۸	۵-۳- پیش‌بینی ضرایب روابط تجربی با استفاده از برنامه ریزی بیان ژن
۵۸	۱-۵-۳- تابع برازش
۵۹	۲-۵-۳- تعیین تابع برازش
۶۱	۶-۳- شبکه عصبی GMDH
۶۳	۲-۶-۳- ماهیت شبکه‌های عصبی
۷۵	فصل چهارم: نتایج مدلسازی ها
۷۶	۱-۴- مقدمه

۷۶	۲-۴- آزمون همبستگی پارامترها
۷۹	۳-۴- نتایج حاصل از روش مستقیم برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی
۸۰	۴-۴- نتایج حاصل از محاسبه ضریب دبی در روش مستقیم برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی
۸۲	۵-۴- معادله ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی با استفاده از رگسیون غیرخطی
۸۳	۴-۴- معادله ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با استفاده از رگسیون غیرخطی
۸۵	۷-۴- نتایج حاصل از نرم افزار GMDH برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی
۸۷	۸-۴- نتایج حاصل از نرم افزار GMDH برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی
۹۰	۹-۴- معادله ضریب دبی سرریز مستطیلی- مستطیلی با استفاده از نرم افزار GEP
۹۳	۱۰-۴- معادله ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با استفاده از نرم افزار GEP
۱۰۰	۱۱-۴- نتیجه مدلسازی GEP با تعداد تکرارهای مختلف
۱۰۵	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۶	۱-۵- نتیجه گیری
۱۰۹	۲-۵- پیشنهادات
۱۱۰	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: سرریزهای مرکب شناخته شده ----- ۶
- شکل ۲-۱: سرریز CRRSC ----- ۷
- شکل ۳-۱: سرریز CTRSC ----- ۷
- شکل ۱-۲: دیاگرام E-y برای سرریز جانبی کانالی ----- ۱۳
- شکل ۲-۲: نمایی از پلان سرریز مستطیلی ----- ۱۵
- شکل ۳-۲: نمایی کلی از یک سرریز جانبی (سابرامانیا و آواستی، ۱۹۷۲) ----- ۱۶
- شکل ۴-۲: نمایی از خطوط جریان در سرریزهای جانبی (رانگاراچو و همکاران، ۱۹۷۹) ----- ۱۸
- شکل ۵-۲: نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از حل عددی با مقادیر آزمایشگاهی ----- ۲۳
- (پیراپیتان و همکاران ۲۰۰۶) ----- ۲۳
- شکل ۶-۲: نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از حل عددی با مقادیر آزمایشگاهی ----- ۲۴
- (پیراپیتان و همکاران ۲۰۰۶) ----- ۲۴
- شکل ۷-۲: تصویر سرریز جانبی استفاده شده در آزمایشها، (هنر و کشاورزی، ۲۰۰۹). ----- ۲۴
- شکل ۸-۲: مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و محاسبه شده توسط رابطه (۲-۳۱) (هنر و کشاورزی، ۲۰۰۹) ----- ۲۵
- شکل ۹-۲: مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و محاسبه شده در حالت گرد گوشه (هنر و کشاورزی، ۲۰۰۹) ----- ۲۶
- شکل ۱۰-۲: نمای سرریز جانبی مستطیلی (احمد، ۲۰۱۱) ----- ۲۷
- شکل ۱۱-۲: مقایسه نتایج محاسباتی با دادههای آزمایشگاهی (احمد، ۲۰۱۱) ----- ۲۸
- شکل ۱۲-۲: میزان تغییرات عمق آب در طول سرریز جانبی (احمد، ۲۰۱۱) ----- ۲۸
- شکل ۱۳-۲: میزان تغییرات در برابر $y - pp$ (احمد، ۲۰۱۱) ----- ۲۹
- شکل ۱۴-۲: میزان تغییرات C_d به Fr_1 (احمد، ۲۰۱۱) ----- ۲۹
- شکل ۱۵-۲: سرریز جانبی مایل (محمد، ۲۰۱۳) ----- ۳۰
- شکل ۱۶-۲: سرریز لبه تیز مرکب با مقطع مستطیلی - مستطیلی (باقری و همکاران، ۱۳۹۱) ----- ۳۱
- شکل ۱۷-۲: نمودار مقایسه نتایج ضریب دبی به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده به مقادیر آزمایشگاهی (باقری و همکاران، ۱۳۹۱) ----- ۳۲
- شکل ۱۸-۲: نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی (باقری و همکاران، ۱۳۹۱) ----- ۳۳
- شکل ۱۹-۲: نمایی از سرریز جانبی دوزنقهای (سیاری و همکاران، ۱۳۹۱) ----- ۳۳
- شکل ۱-۳: اجزای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی ----- ۴۵
- شکل ۲-۳: چرخ رولت ----- ۵۳
- شکل ۳-۳: بیان درختی (ET) رابطه $F = \sin(x) + \sqrt{x^2 + y}$ ----- ۵۵
- شکل ۴-۳: بیان درختی (ET) رابطه (۱۵-۳) ----- ۵۶

- شکل ۳-۵: بیان درختی معادله (۳-۱۷) ----- ۵۸
- شکل ۳-۶: ساختار شبکه عصبی از نوع CS-GMDH یک کروموزوم ----- ۷۱
- شکل ۳-۷: کروموزوم مربوط به شبکه عصبی نوع GS-GMDH ----- ۷۳
- شکل ۴-۱: مقایسه ضریب دبی بر اساس ضریب دبی رابطه (۴-۱) با نتایج آزمایشگاهی ----- ۸۰
- برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ----- ۸۰
- شکل ۴-۲: مقایسه ضریب دبی مشاهده شده با ضریب دبی حاصل از روش مستقیم ----- ۸۱
- برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۸۱
- شکل ۴-۳: مقایسه ضریب دبی مشاهده شده با ضریب دبی حاصل از روش مستقیم ----- ۸۱
- برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه. ----- ۸۱
- شکل ۴-۴: مقایسه ضریب دبی مشاهده شده با ضریب دبی حاصل از روش مستقیم ----- ۸۲
- برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۸۲
- شکل ۴-۵: مقایسه ضریب دبی بر اساس ضریب دبی رابطه (۴-۵) به دست آمده با استفاده از رگرسیون غیرخطی نتایج آزمایشگاهی برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۸۳
- شکل ۴-۶: مقایسه نتایج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه با استفاده از رگرسیون غیرخطی. ----- ۸۴
- شکل ۴-۷: مقایسه نتایج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه با استفاده از رگرسیون غیرخطی. ----- ۸۴
- شکل ۴-۸: مقایسه نتایج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه با استفاده از رگرسیون غیرخطی. ----- ۸۵
- شکل ۴-۹: مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی محاسبه شده برای داده های آموزش با استفاده از GMDH در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۸۶
- شکل ۴-۱۰: مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی محاسبه شده برای داده های آزمون با استفاده از GMDH در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۸۶
- شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج داده های حاصل از مدلسازی GMDH با داده های مشاهداتی ----- ۸۷
- برای داده های آموزش در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۸۷
- شکل ۴-۱۲: مقایسه نتایج داده های حاصل از مدلسازی GMDH با داده های مشاهداتی ----- ۸۸
- برای داده های آزمون در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۸۸
- شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج داده های حاصل از مدلسازی GMDH با داده های مشاهداتی ----- ۸۸
- برای داده های آموزش در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه ----- ۸۸
- شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج داده های حاصل از مدلسازی GMDH با داده های مشاهداتی ----- ۸۹
- برای داده های آزمون در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه. ----- ۸۹
- شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج داده های حاصل از مدلسازی GMDH با داده های مشاهداتی ----- ۸۹
- برای داده های آموزش در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۸۹

- شکل ۴-۱۶: مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مدل‌سازی GMDH با داده‌های مشاهداتی ----- ۹۰
- برای داده‌های آزمون در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۹۰
- شکل ۴-۱۷: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه ریزی بیان ژن (GEP) برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۹۲
- شکل ۴-۱۸: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۹۳
- شکل ۴-۱۹: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۹۳
- شکل ۴-۲۰: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه ریزی بیان ژن (GEP) ----- ۹۴
- برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۹۴
- شکل ۴-۲۱: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه ریزی بیان ژن (GEP) ----- ۹۵
- برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه. ----- ۹۵
- شکل ۴-۲۲: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه ریزی بیان ژن (GEP) ----- ۹۵
- برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۹۵
- شکل ۴-۲۳: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۹۷
- شکل ۴-۲۴: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۹۷
- شکل ۴-۲۵: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه. ----- ۹۷
- شکل ۴-۲۶: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه. ----- ۹۷
- شکل ۴-۲۷: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۹۸
- شکل ۴-۲۸: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۹۸
- شکل ۴-۲۹: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی برای داده‌های آموزش. ----- ۱۰۰
- شکل ۴-۳۰: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی برای داده‌های آزمون. ----- ۱۰۱
- شکل ۴-۳۱: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه برای داده‌های آموزش. ----- ۱۰۱
- شکل ۴-۳۲: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه برای داده‌های آزمون. ----- ۱۰۱

شکل ۴-۳۳: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰
 درجه برای داده های آموزش.-----۱۰۲

شکل ۴-۳۴: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰
 درجه برای داده های آزمون.-----۱۰۲

شکل ۴-۳۵: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰
 درجه برای داده های آموزش.-----۱۰۲

شکل ۴-۳۶: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰
 درجه برای داده های آزمون.-----۱۰۳

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: تعداد داده های مشاهداتی موجود برای هر سرریز مرکب ----- ۴۱
- جدول ۳-۲: رنج پارامترهای بیبعد سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ----- ۴۲
- جدول ۳-۳: رنج پارامترهای بیبعد سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأسهای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه ----- ۴۲
- جدول ۴-۱: ضریب همبستگی بین پارامترهای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۷۷
- جدول ۴-۲: ضریب همبستگی بین سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۷۸
- جدول ۴-۳: ضریب همبستگی بین سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه. ----- ۷۸
- جدول ۴-۴: ضریب همبستگی بین سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۷۹
- جدول ۴-۵: پارامترهای مورد استفاده در برنامه ریزی بیان ژن برای استخراج ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ----- ۹۱
- جدول ۴-۶: پارامترهای مورد استفاده در برنامه ریزی بیان ژن برای استخراج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی ----- ۹۴
- جدول ۴-۷: خلاصه نتایج حاصل از مدلسازی ها برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی. ----- ۹۹
- جدول ۴-۸: خلاصه نتایج حاصل از مدلسازی ها برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه. ----- ۹۹
- جدول ۴-۹: خلاصه نتایج حاصل از مدلسازی ها برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه. ----- ۹۹

فصل اول

مقدمه و کلیات

در این فصل با توجه به موضوع مورد مطالعه، که بررسی ضریب دبی عبوری از روی سرریزهای جانبی لبه تیز ترکیبی می باشد، به معرفی و تعریف سرریزها پرداخته می شود و کاربردهای آن ذکر می شود.

۱-۲- تئوری و کاربرد سرریز

هر مانعی که بر سر راه جریان در کانال قرار گیرد و باعث بالا آمدن آب در پشت آن شود و بر سرعت آب در ضمن عبور از روی آن افزوده شود، سرریز نامیده می شود. کنترل جریان و اندازه گیری شدت جریان در کانال های روباز از عوامل مهم کاربرد سرریز محسوب می گردد. از سرریزها به صورت گسترده در هیدرولیک، برنامه های کاربردی محیط زیست، تصفیه خانه های فاضلاب و انحراف آب از کانال اصلی به فرعی در شبکه های آبیاری و زهکشی استفاده می شود.

سرریزهای جانبی^۱ از انواع سازه های هیدرولیکی می باشد که با اهداف مختلف در سیستم های انتقال آب بکار گرفته می شود. تعریف سرریز جانبی برخلاف تحلیل آن بسیار ساده است. چنانچه در دیواره یک کانال سرریزی نصب شود که ارتفاع آن کمتر از ارتفاع کانال باشد در هنگام بالا آمدن سطح آب قسمتی از جریان از روی سرریز به صورت جانبی منحرف و به خارج از کانال اصلی تخلیه می گردد. این عملکرد باعث تنظیم و کنترل سطح آب و دبی در کانال اصلی خواهد شد. از موارد کاربرد سرریز جانبی می توان به کنترل دبی، انحراف سیلاب و دبی مازاد در رودخانه و کانال ها اشاره کرد.

در بیشتر مواقع، سرریز جانبی به منظور کنترل جریان و پیش از اینکه سطح آب در کانال اصلی بیش از حد معینی بالاتر رود، دبی اضافی را به کانال جانبی هدایت می کند. بنابراین از سرریزهای جانبی، به عنوان محدود کننده تراز جریان هم استفاده می شود. در بسیاری از کانال های هیدرولیکی مقادیر دبی عبوری دارای تغییرات فراوانی است. تغییرات دبی در فصل های مختلف سال، بسته به شرایط

¹ Side weir

هیدرولوژیکی حوزه‌های تغذیه‌کننده آن، نوسانات شدیدی را در تراز جریان ایجاد می‌نمایند. از آنجایی که یکی از دلایل اصلی به کارگیری سرریزها اندازه‌گیری دبی عبوری از آن هم‌زمان با انحراف و تخلیه مقادیر مشخصی از جریان بالادستی است، عموماً سرریزهای با مقطع ساده در شرایط ذکرشده فاقد این توانایی هستند و نمی‌توانند عملکرد مناسبی داشته باشند سرریزهای مرکب با توجه به شکل هندسی خاص خود می‌توانند در شرایطی که تراز سطح آب در کانال اصلی، در پایین‌ترین سطح خود قرار دارد مقادیر مشخصی از دبی را به کانال فرعی انتقال دهند. همچنین این نوع سرریزها، زمانی که در حوزه‌های تغذیه‌کننده‌ی آن بارش‌های نسبتاً شدیدی رخ دهد و یا به هر علتی دبی عبوری به‌شدت افزایش‌یابد و سبب سیلابی شدن جریان در کانال اصلی شود، می‌توانند علاوه بر تخلیه سیلاب به کانال‌های فرعی مانع از وارد شدن آسیب به کانال‌ها و سازه‌های آن شوند، امکان تعیین مقادیر دبی انحرافی را نیز به کمک روابط فراهم می‌نمایند (عامری و همکاران، ۲۰۱۵). اگر تخمین دقیقی از شدت جریان انجام نگیرد و طراحی سازه بر اساس مقادیر نادرست صورت گیرد سیلاب عبوری می‌تواند باعث افزایش فرسایش و تخریب سازه‌ها و همچنین باعث افزایش فرسایش سطح خاک شود.

سهولت و دقت اندازه‌گیری جریان در شرایط مختلف سبب طراحی شکل‌های مختلف سرریز از جمله: مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی، دایره‌ای و غیره گردیده است که از متداول‌ترین نوع سرریزهای جانبی می‌توان به نوع مستطیلی و مثلثی آن اشاره کرد. با توجه به کاربردهای سرریز جانبی، این نوع سرریز باید دارای خصوصیتی باشد تا بتوان از آن در شبکه‌های انتقال آب و یا رودخانه‌ها استفاده مفید کرد. از جمله این خصوصیات می‌توان به اندازه‌گیری دقیق دبی عبوری از سرریز، جهت آبرگیری مناسب از کانال و توانایی آن در تخلیه تعداد قابل‌توجه جریان در زمان رخ دادن سیلاب در مکان‌هایی است که این سازه به‌عنوان سازه‌ای حفاظتی به کار می‌رود، اشاره کرد. سرریزهای جانبی معمولی این دو قابلیت را به‌صورت هم‌زمان ندارند به‌طوری‌که اگر عرض سرریز کوچک باشد، فقط برای اندازه‌گیری جریان مناسب است و اگر عرض سرریز، بزرگ باشد، فقط برای تخلیه سریع سیلاب مناسب است و دقت اندازه‌گیری دبی کاهش می‌یابد (باقری و همکاران، ۲۰۱۳). سرریزهای مستطیلی

به راحتی دبی‌های بالا را عبور می‌دهند اما سرریزهای مثلثی بیشتر برای اندازه‌گیری دقیق جریان در دبی‌های پایین مناسب هستند. برای تأمین هر دو هدف، قابلیت اندازه‌گیری دقیق دبی و عبور دبی‌های بالا، می‌توان از سرریزهای مرکب استفاده کرد، که شامل یک مستطیل یا مثلث در مقطع پایین و یک مستطیل با دهانه بزرگ‌تر در مقطع بالایی می‌باشد. به همین دلیل اخیراً از سرریزهای جانبی با مقطع مرکب استفاده شده است.

۱-۳- تقسیم‌بندی سرریزها

یک سرریز از صفحه سرریز، شکاف سرریز، تاج سرریز و اشل اندازه‌گیری بار هیدرولیکی تشکیل می‌شود. صفحه سرریز از جنس فلزی، چوبی یا بتنی می‌باشد که عموماً به صورت عمود بر جریان آب در آبراهه نصب می‌شود که باعث بالا آمدن سطح آب در بالادست سرریز می‌شود.

تاج سرریز به قسمت لبه بالایی سرریز گفته می‌شود و سرریزها را براساس شکل تاج و این که آیا تمام یا قسمتی از عرض کانال را دربر گرفته‌اند، تقسیم‌بندی می‌نمایند. در معمولی‌ترین تقسیم‌بندی‌ها سرریزها به دو گروه سرریزهای لبه‌تیز و سرریزهای لبه‌پهن تقسیم می‌شوند. همچنین سرریزها می‌توانند به شکل‌های مستطیلی، مثلثی، دوزنقه‌ای و سهموی ساخته می‌شوند.

۱-۳-۱- سرریز لبه تیز

این سرریزها از یک صفحه قائم که دارای لبه و تاج نسبتاً تیز در بالا (محلی که آب از روی آن ریزش می‌کند) تشکیل می‌شوند، در مسیر جریان قرار می‌گیرند و جریان از روی تاج با حرکت پرتابی و بدون تماس با صفحه پایین‌دست ریزش می‌یابد. سرریز لبه‌تیز علاوه بر اندازه‌گیری جریان در کانال-های روباز به عنوان بالا آورنده سطح آب استفاده می‌شود. سرریزهای لبه‌تیز در شرایط اندازه‌گیری دبی با دقت بالا (به‌طور مثال در فلوم‌های آزمایشگاهی، کانال‌های آبیاری کوچک و کانال‌های صنعتی) کاربرد دارند. تئوری هیدرولیک مربوط به این سرریزها به عنوان پایه و اساس طراحی سرریزهای لبه-پهن از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. یک سرریز لبه‌تیز می‌تواند تمام عرض کانال را فراگیرد که در

این صورت سرریز لبه تیز هم عرض نامیده می شود. یا ممکن است عرض کانال را جهت عبور آب در بالای خود کاهش دهد که در این صورت به سرریز لبه تیز کوچک شده موسوم هستند. این سرریزها با مصالح بنایی، فلزی و یا چوبی ساخته می شوند.

۱-۳-۲- سرریز لبه پهن

تاج این سرریزها دارای ضخامت قابل توجه، افقی یا دارای انحنای خاصی است که برای اندازه گیری دبی جریان هم به کاربرده می شود. اما بیشتر برای سرریز سدها و به عنوان خود سد بکار می رود و در هر حال به دلیل سادگی ساخت و هزینه ساخت پایین برای ذخیره و بالا آوردن سطح آب به ارتفاع زیاد و اندازه گیری شدت جریان و کنترل تراز سطح آب مورد استفاده قرار می گیرد.

۱-۳-۳- سرریز مرکب

سرریزهای مرکب از ترکیب سرریزهای ساده ساخته می شوند که شکل تاج آنها ترکیبی از دو سرریز لبه تیز ساده می باشد و ابعاد قسمت پایینی سرریز کوچک تر از قسمت فوقانی است. از مهم ترین مزایای سرریز مرکب توانایی اندازه گیری دبی در حجم بالاتری از جریان و دقت در محاسبه دبی برای جریان های کم تا زیاد است و همچنین عبور جریان در دبی با تغییرات زیاد، امکان زهکشی مناسب و تخلیه کانال در شرایط سیلابی، جلوگیری از آسیب رسیدن به سازه های پایین دست، دارای دقت مناسب اندازه گیری دبی جریان با داشتن حداقل مشخصات و امکان تخلیه و عبور بیشتر رسوبات نسبت به حالت ساده را می توان نام برد. سرریز مثلثی یا ∇ شکل بیشترین دقت در اندازه گیری جریان های کم (کمتر از $0/283$ مترمکعب) را داشته و معمولاً با زاویه رأس 90° درجه متداول تر می باشند. سرریزهای مستطیلی در اندازه گیری دبی های نسبتاً بالا استفاده می شوند. در سرریزهای مرکب خصوصیات سرریز مستطیلی و مثلثی باهم ترکیب می شوند.

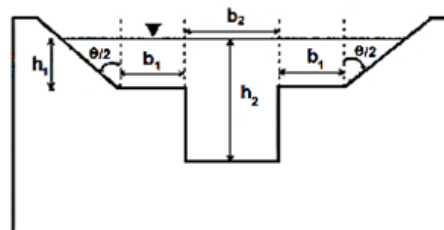
چهار مدل مختلف از سرریزها که بیشتر از بقیه شناخته شده هستند عبارت اند از (شکل ۱-۱):

۱. سرریز لبه تیز ترکیبی مستطیلی- مستطیلی (CRRSC)

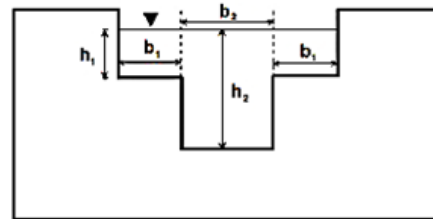
۲. سرریز لبه تیز ترکیبی مستطیلی - دوزنقه‌ای (CRTSC)

۳. سرریز لبه تیز ترکیبی مثلثی - مستطیلی (CTRSC)

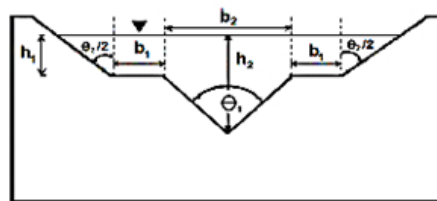
۴. سرریز لبه تیز ترکیبی مثلثی - دوزنقه‌ای (CTTSC)



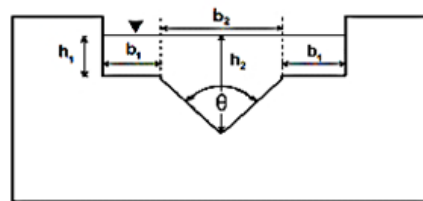
سرریز لبه تیز ترکیبی مستطیلی - دوزنقه‌ای (CRTSC)
Compound Rectangular-Trapezoidal Sharp
Crested weir



سرریز لبه تیز ترکیبی مستطیلی - مستطیلی (CRRSC)
Compound Rectangular-Rectangular Sharp
Crested weir



سرریز لبه تیز ترکیبی مثلثی - دوزنقه‌ای (CTTSC)
Compound Triangular-Trapezoidal Sharp
Crested weir



سرریز لبه تیز ترکیبی مثلثی - مستطیلی (CTRSC)
Compound Triangular-Rectangular Sharp
Crested weir

شکل ۱-۱: سرریزهای مرکب شناخته شده

با توجه به اینکه موضوع این پایان نامه در ارتباط با سرریزهای جانبی لبه تیز ترکیبی مستطیلی -

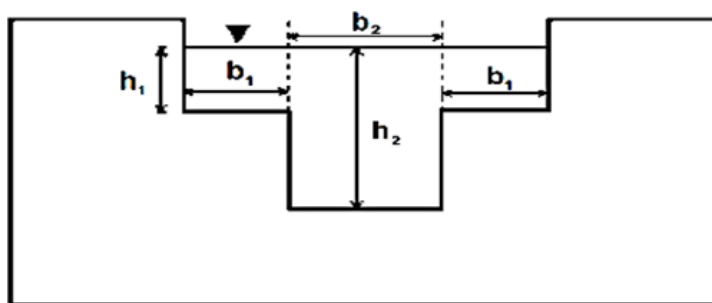
مستطیلی و مثلثی - مستطیلی می باشد، در ادامه این سرریزها معرفی می شوند.

۱-۳-۳-۱- سرریز لبه تیز ترکیبی مستطیلی - مستطیلی (CRRSC)

سرریز CRRSC به عنوان ترکیبی خطی از دو سرریز ساده لبه تیز در نظر گرفته می شود. شکل

(۲-۱) یک سرریز متقارن CRRSC است که شامل سه سرریز مستطیلی، یکی در چپ، یکی در وسط

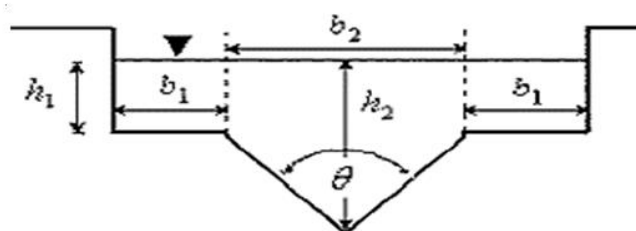
و یکی در سمت راست می باشد.



شکل ۱-۲: سرریز CRRSC

۱-۳-۳-۲- سرریز لبه تیز ترکیبی مثلثی - مستطیلی (CTRSC)

سرریز CTRSC را می‌توان همانند سرریز لبه تیز ترکیبی مستطیلی - مستطیلی به عنوان ترکیبی خطی از دو سرریز ساده لبه تیز در نظر گرفت. دو سرریز مستطیلی یکی در چپ، و یکی در راست و یک سرریز مثلثی در وسط می‌باشد (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳: سرریز CTRSC

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

باوجود کارآمد بودن و کارایی سرریزهای مرکب، مطالعات کمی بر روی این سرریزها صورت گرفته است. برای شناخت بهتر رفتار سرریزهای جانبی لازم است مطالعات بیشتری انجام گیرد، که این مطالعات می‌تواند به دو روش نظری یا تجربی باشد.

در روش نظری می‌توان به تکمیل مدل‌های ریاضی موجود و یا ارائه مدل‌های جدید و کامل‌تر پرداخت اما به دست آوردن یک مدل ریاضی بدون استفاده از ضرایب تجربی که بتواند پارامترهای

مختلف را با توجه به مقدار تأثیرشان در نظر گرفته و جواب‌های دقیق ارائه کند بعید به نظر می‌رسد. درروش دوم می‌توان با انجام آزمایش‌های تکمیلی روابط تجربی برای تحلیل سرریزهای جانبی را ارائه نمود. مطمئناً با انجام آزمایش و بررسی تأثیر پارامترها می‌توان مدل‌های ریاضی دقیق و ساده‌تری را نیز ارائه نمود. از طرف دیگر بررسی تأثیر تمامی پارامترها به‌صورت آزمایشگاهی و افزایش تعداد آزمایش‌ها عدم توجیه اقتصادی مطالعات را به دنبال خواهد داشت. بدین منظور ترجیح داده می‌شود با استفاده از مدل‌های ریاضی، نظریه‌های هیدرولیک و اطلاعات آزمایشگاهی، روابط تجربی را مورد مطالعه قرارداد.

در مورد هرکدام از سرریزها یک رابطه خاص برای اندازه‌گیری دبی جریان وجود دارد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، در صورت امکان روابطی بهینه برای سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی و مثلثی-مستطیلی با کمک الگوریتم بیان ارائه شده، توسعه داده شد. زیرا مطالعات آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم بیان‌زن با نتایج به‌دست‌آمده از شبکه عصبی GMDH و SPSS مورد مقایسه قرار گرفت.

۱-۵- اهداف تحقیق

با توجه به این نکته که اندازه‌گیری‌های صحرایی و آزمایشگاهی نیاز به هزینه و صرف وقت قابل‌توجهی داشته و همچنین با توجه به کاربردهای ذکرشده برای سرریزهای مرکب در این تحقیق با ابزارهای ارزشمندی همچون شبیه‌سازی و مدل‌سازی که دارای دقت قابل‌توجه و همچنین سرعت بیشتری در محاسبات و تحلیل‌ها می‌باشند اهداف زیر را با استفاده از مدل‌سازی‌ها بررسی می‌نماییم:

۱- مدل‌سازی با استفاده از پارامترهای بی‌بعد در نرم‌افزار GeneXpro Tools 4.0

۲- پیش‌بینی ضریب دبی با استفاده از شبکه عصبی GMDH

۳- بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SPSS

۴- مقایسه نتایج مدل GEP و GMDH با رگرسیون غیرخطی و معرفی بهترین مدل

۵- ارائه رابطه‌ای مناسب و بهینه برای ضریب دبی سرریز مرکب

فرضیات:

متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب دبی سرریزهای مرکب مستطیلی - مستطیلی عبارت است از:

۱- عدد فرود بالادست جریان (Fr)

۲-نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{w}{y}$)

۳-نسبت طول سرریز به عرض کانال ($\frac{L}{B}$)

برای سرریز مثلثی - مستطیلی:

۱- عدد فرود بالادست جریان (Fr)

۲-نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{w}{y}$)

۳-نسبت طول سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{L}{y}$)

۱-۶- روش انجام تحقیق

در این پژوهش از داده‌های حاصل از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط عامری (عامری و همکاران، ۲۰۱۵) استفاده شده است. پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی تعیین‌شده، سپس با استفاده از پارامترهای مؤثر، مدل‌های رگرسیون و مدل‌سازی با استفاده از GEP و GMDH و رگرسیون غیرخطی به داده‌ها انجام گرفته است.

۱-۷- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه نوشته شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول خلاصه‌ای از موضوع و اهداف پایان‌نامه، ارائه گردید. در فصل دوم علاوه بر معادلات حاکم بر سرریز جانبی و خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده ذکر شده است. فصل سوم شامل مواد و روش‌ها، توضیح مختصر درباره روش‌های استفاده‌شده و

همچنین اجرای مدل‌های GEP و GMDH تشریح می‌شود. در فصل چهارم نتایج حاصل از مدل-سازی‌ها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ذکر شده است. فصل پنجم پایان‌نامه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات می‌باشد.

فصل دوم:

تاریخچه

۲-۱- مقدمه

معرفی سرریزهای جانبی توسط De-marchi در سال ۱۹۳۴ را می‌توان به‌عنوان پایه‌ی فعالیت‌های فعلی دانست. بیشتر مطالعات انجام‌شده با استفاده از این نظریه و در جهت تکمیل آن صورت گرفته است. بیشتر مطالعات انجام‌گرفته بر روی این سرریزها در جهت برآورد ضریب دبی سرریز بوده است.

در این فصل معادلات حاکم بر سرریز جانبی و مطالعات انجام‌شده بر روی سرریزها ذکر می‌گردد:

۲-۲- معادلات حاکم بر سرریز جانبی

جریان روی سرریز جانبی از نوع متغیر مکانی می‌باشد. جریان متغیر مکانی به حالتی از جریان‌های دائمی گفته می‌شود که شدت جریان در طول کانال و در جهت جریان، افزایش و یا کاهش یابد. جریان در سرریزهای جانبی سدها، کانال‌ها و لوله‌های زهکش و همچنین دریچه‌های جانبی مثال‌های متعددی از این نوع جریان می‌باشد.

برحسب اینکه شدت جریان در امتداد طول مسیر اضافه و یا کم شود این نوع جریان‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) جریان متغیر مکانی با افزایش دبی: در این حالت مقدار دبی در طول مسیر سرریز افزایش یافته و در نتیجه اختلاط دو جریان، آشفستگی ایجاد می‌شود، در نتیجه افت انرژی قابل‌ملاحظه‌ای به وجود خواهد آمد.

ب) جریان متغیر مکانی با کاهش دبی: در این نوع از جریان شدت جریان در طول مسیر سرریز کاهش می‌یابد و اساساً یک جریان انشعابی می‌باشد، مانند سرریزهای جانبی در کانال‌ها.

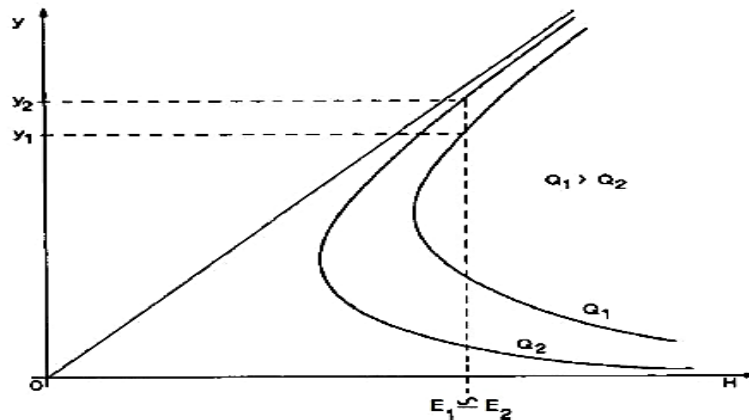
ارائه نظریه ارزشمند دی‌مارچی را می‌توان به‌عنوان شروع واقعی تحقیقات در زمینه سرریز جانبی در نظر گرفت. مسئله اصلی در مطالعات دی‌مارچی تعیین ضریب شدت جریان بود و اکثر مطالعات پس از وی نیز در جهت برآورد صحیح و دقیق‌تر این ضریب بوده است. دی‌مارچی از افت انرژی در طول

سرریز و برخی پارامترهای دیگر صرف نظر نمود و حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریزهای جانبی را به دست آورد (ابریشمی، ۱۳۸۴).

هنگام عبور آب از روی سرریز، افت انرژی ناشی از ریزش آب ناچیز فرض می شود. اگر فرض کنیم افت انرژی ناشی از اصطکاک در طول سرریز برابر افت کف کانال است، خط انرژی، موازی بستر خواهد بود. بنابراین رابطه (۲-۱) برقرار است.

$$E_1 = y_1 + \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} = y_2 + \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} = E_2 \quad (2-1)$$

در جریان زیربحرانی در امتداد سرریز عمق جریان افزایش یافته و برای شرایط جریان فوق بحرانی عمق جریان کاهش می یابد (شکل ۲-۱)، زیرا با افزایش فاصله (x) از ابتدای سرریز جانبی دبی در واحد عرض کانال کاهش می یابد و در شکل (۲-۱) نیز مشهود است که با افزایش فاصله منحنی نشان داده شده از حالت Q_1 به Q_2 انتقال می یابد.



شکل ۲-۱: دیاگرام E-y برای سرریز جانبی کانالی

با مشتق گیری از رابطه (۲-۱)، رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2-2)$$

سپس از خلاصه سازی رابطه (۲-۲)، رابطه (۳-۲) به دست می آید:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dy}{dx} + \frac{1}{2g} \left(\frac{2Q}{A^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3} \frac{dA}{dx} \right) \quad (3-2)$$

طبق معادله پیوستگی برای این بازه از کانال:

$$\frac{dQ}{dx} = -q \quad (4-2)$$

و دبی در واحد طول کانال در امتداد سرریز جانبی برابر است با:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_m (y - w)^{1.5} \quad (5-2)$$

که C_m ضریب تخلیه سرریز جانبی، y عمق آب در داخل کانال، g شتاب ثقل زمین و w ارتفاع تاج سرریز می باشد، همچنین دبی در طول کانال در هر مقطعی به صورت رابطه (۶-۲) است:

$$Q = A \sqrt{2g(E - y)} \quad (6-2)$$

$$\frac{dA}{dx} = B \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad \text{و درنهایت:}$$

بنابراین با در نظر گرفتن روابط فوق، رابطه (۳-۲) به صورت رابطه (۷-۲) نوشته می شود:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4C_m}{3B} \frac{(E-y)^{0.5}(y-w)^{1.5}}{\frac{A}{B} + 2y - 2E} \quad (7-2)$$

برای مجرای مستطیلی داریم $\frac{A}{B} = y$ ، A : مساحت کانال و B : عرض کانال) بنابراین:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4C_m}{3B} \frac{(E-y)^{0.5}(y-w)^{1.5}}{3y - 2E} \quad (8-2)$$

دی مارچی با فرض ثابت بودن انرژی (E) در طول سرریز کانال های افقی مستطیلی زمانی که بتوان از اصطکاک صرف نظر نمود رابطه (۹-۲) را به دست آورد:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4C_m}{3B} \frac{\sqrt{(E-y)(y-w)}}{3y - 2E} \quad (9-2)$$

دی مارچی مقادیر E و C_m را مستقل از مقدار X فرض نمود و با انتگرال گیری از معادله فوق رابطه پروفیل سطح آب را به صورت زیر به دست آورد.

$$X = \frac{3B}{2C_M} \varphi(y, E, w) + \text{cte} \quad (۱۰-۲)$$

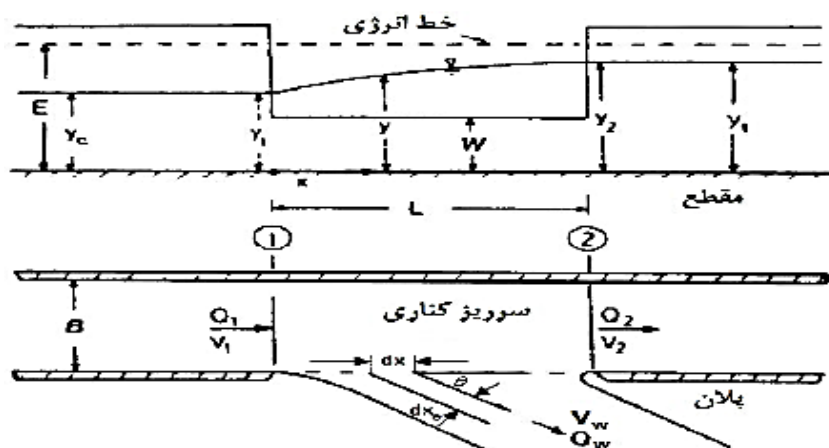
که در آن:

$$\varphi(y, E, w) = \frac{2E-3w}{E-w} \sqrt{\frac{E-y}{y-w}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{E-w}} \quad (۱۱-۲)$$

چنانچه مقاطع ابتدا و انتهای سرریز جانبی با شماره‌های ۱ و ۲ نشان داده شود، می‌توان نوشت:

$$L = \frac{3}{2} \frac{B}{C_M} (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (۱۲-۲)$$

C_M ضریب تجربی دبی سرریز جانبی با کاهش دبی است و تابعی از پارامترهای هیدرولیکی و نوع جریان می‌باشد. نمایی از سرریز جانبی مستطیلی در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



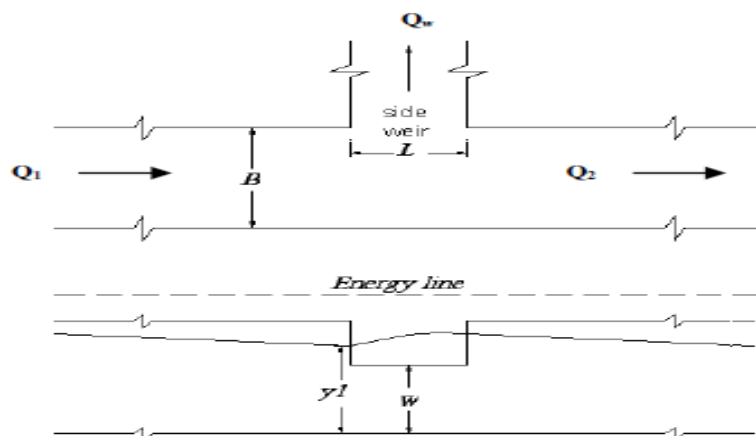
شکل ۲-۲: نمایی از پلان سرریز مستطیلی

در ادامه، مطالعاتی که تاکنون توسط محققین مختلف در زمینه‌های فوق انجام شده مورد بررسی قرار گرفته ذکر شده است.

بررسی منابع

مطالعه ساپرامانیا و آواستی (۱۹۷۲)

ساپرامانیا و آواستی (۱۹۷۲) معادله دیفرانسیل عمومی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را در یک کانال مستطیلی افقی که دارای یک سرریز جانبی با ارتفاع صفر یا محدود بود را در نظر گرفتند. آن‌ها با انجام آزمایش‌هایی در هر دو حالت، جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، روابطی را برای محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای جانبی لبه‌تیز به دست آوردند. آن‌ها در مطالعه خود تغییرات ضریب دی‌مارچی را با دقت خاصی در نظر گرفتند (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳: نمایی کلی از یک سرریز جانبی (ساپرامانیا و آواستی، ۱۹۷۲)

ساپرامانیا و آواستی برای تعیین ضریب تخلیه تجربی (C_m)، رابطه (۲-۱۳) را پیشنهاد کرده‌اند:

$$C_m = C_m^* \sqrt{1 - \left(\frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2} \right)} \quad (۲-۱۳)$$

که در این رابطه C_m^* نشان‌دهنده ضریب ثابت انقباض و Fr_1 نشان‌دهنده عدد فرود در بالادست جریان می‌باشد.

مقدار C_m^* را می‌توان برابر ۰/۶۱۱ در نظر گرفت، چون این ضریب نشان‌دهنده ضریب انقباض در اثر ریزش و جاری شدن آب از روی سرریزی با ارتفاع صفر می‌باشد. در نتیجه رابطه (۲-۱۳) به صورت رابطه (۲-۱۴) خواهد بود.

$$C_m = 0.611 \sqrt{1 - \left(\frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2} \right)} \quad (۱۴-۲)$$

از تجزیه و تحلیل داده‌ها نتایج زیر حاصل گردید:

۱. این معادله برای داده‌های تجربی در جریان‌های بحرانی با ارتفاع سرریز صفر، همخوانی خیلی خوبی را دارد.

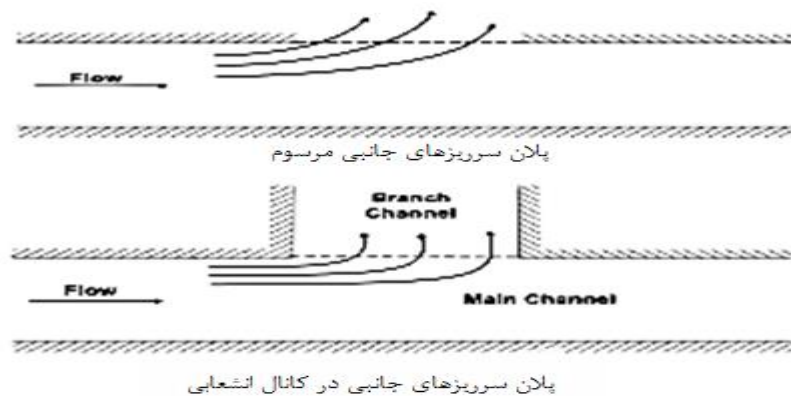
۲. برای جریان فوق بحرانی ضریب تخلیه با مقادیر Fr_1 به‌کندی تغییر می‌کند و در این حالت برای تعیین رابطه ضریب تخلیه از رابطه (۱۵-۲) استفاده می‌گردد:

$$C_m = 0.36 - 0.08Fr_1 \quad (۱۵-۲)$$

۳. معادله دی‌مارچی را با داشتن مقادیر C_m می‌توان برای پیش‌بینی میزان تخلیه آب توسط سرریز مورد استفاده قرار داد.

۴. ضریب تخلیه یک سرریز با ارتفاع محدود اصولاً مشابه ضریب تخلیه سرریزی با ارتفاع صفر می‌باشد. رانگاراچو و همکاران (۱۹۷۹)

تحقیقات رانگاراچو و همکاران (۱۹۷۹) صحت معادله دی‌مارچی را در برآورد میزان تخلیه از سرریزهای جانبی لبه‌تیز و لبه‌پهن بررسی کردند و روابطی برای محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای ذکر شده ارائه دادند (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴: نمایی از خطوط جریان در سرریزهای جانبی (رانگاراچو و همکاران، ۱۹۷۹)

طی تحقیقات آن‌ها اثر جدشدگی جریان آب در گوشه بالادست کانال فرعی به‌وضوح دیده‌شده و از عمق‌های بسیار کم به‌دست‌آمده در این ناحیه نتیجه گرفتند قسمتی از طول سرریز بی‌اثر بوده و جریان آب بیشتر در گوشه پایین‌دست کانال فرعی تجمع پیدا می‌کند. همچنین با توجه به توزیع غیریکنواخت جریان، بهتر است برای جریان عبوری از سرریز جانبی عرض مؤثر Be در نظر گرفته شود.

دی‌مارچی با فرض این‌که طول سرریز ثابت می‌ماند، برای سرریزهای به‌کاررفته شده در دیواره کانال مستطیلی معادلات (۲-۱۶) تا (۲-۱۷) را به‌دست‌آورد:

$$C_m = \frac{3B_1}{2B_2} \left(F\left(\frac{y}{E}\right)_2 - F\left(\frac{y}{E}\right)_1 \right) \quad (2-16)$$

که در این معادله، C_m ضریب دبی، B_1 نشان‌دهنده عرض کانال اصلی و B_2 نشان‌دهنده عرض سرریز می‌باشد.

داده‌های به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که استفاده از Be در معادله (۲-۱۷)، در رابطه (۲-۱۶) بسیار مناسب می‌باشد.

$$Be = B_2 - 0.05 \quad (2-17)$$

همچنین رانگاراچو و همکاران، معادله (۲-۱۸) را برای ضریب دبی در سرریز لبه‌تیز به دست آوردند:

$$C_m = 0.81 - 0.6Fr_1$$

(۱۸-۲)

ایزدجو و شفاعی بجستان (۱۳۷۵)

ایزدجو و شفاعی بجستان (۱۳۷۵) به منظور انتخاب رابطه‌ای مناسب برای ضریب تخلیه، روابط ارائه شده برای ضریب تخلیه سرریزهای جانبی توسط محققین مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ۶ مدل سرریز لبه تیز مستطیلی را در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز تحت شرایط هیدرولیکی مختلف مورد آزمایش قرار داده و داده‌های به دست آمده را تجزیه و تحلیل کردند. در این بررسی رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۴) به عنوان بهترین رابطه برای تخمین ضریب تخلیه سرریز مشخص شد و همچنین رابطه‌ای جدید برای ضریب دبی سرریز ارائه نمودند.

ایزدجو و شفاعی بجستان (۱۳۷۵) پارامترهای بی بعد مؤثر بر ضریب دبی را به صورت رابطه زیر (۲-۱۹) در نظر گرفتند:

$$C_m = f \left(Fr_1^2, Re, \frac{L}{y_1}, \frac{w}{y_1}, \frac{b}{y_1}, \frac{B}{y_1} \right) \quad (۱۹-۲)$$

و از طریق رگرسیون گیری چند متغیره رابطه (۲-۲۰) را برای محاسبه C_m معرفی کردند:

$$C_m = -0.0759Fr_1^2 + 0.7364\frac{w}{y_1} - 0.0187\frac{L}{y_1} + 0.199 \quad (۲۰-۲)$$

از مقایسه آماری و ترسیمی بین معادلاتی که توسط محققین در گذشته برای ضریب تخلیه در سرریزهای جانبی ارائه شده و نتایج به دست آمده در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که، رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۴) با انحراف معیار ۹۹٪ بیشترین نزدیکی را با نتایج تحقیق حاضر داشته و به طور متوسط با نتایج آزمایش حدود ۳٪ اختلاف دارد.

جلیلی قاضی زاده و همکاران (۱۳۷۶)

جلیلی قاضی‌زاده و همکاران (۱۳۷۶) تأثیر پارامترهای مختلف از جمله $(\frac{L}{B})$ و $(\frac{w}{y_1})$ و (S_0) و (Fr_1) را بر ضریب تخلیه موردبررسی قراردادند، که در این تحقیق y_1 عمق آب در ابتدای سرریز، P ارتفاع تاج سرریز از کف کانال، L طول سرریز، B عرض کانال، S_0 شیب طولی کانال و Fr_1 عدد فرود در ابتدای سرریز است. در این تحقیق مقدار متوسط کاهش نسبی انرژی مخصوص در طول سرریز ۳/۷٪ به دست آمد. درحالی‌که این مقدار در تحقیقات الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶)، و رانگاراچو و همکاران (۱۹۷۹) به ترتیب ۵ و ۲ درصد محاسبه شده است. در نتیجه فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز قابل قبول است. آنها تغییرات C_m برحسب مجذور Fr_1 رسم کرده و با برازش بر داده‌های آزمایشگاهی معادله (۲-۲۱) به دست آوردند.

$$C_m = 0.55 - 0.47 Fr_1^2 \quad (2-21)$$

آنها با استفاده از آنالیز ابعادی و داده‌های آزمایشگاهی رابطه (۲-۲۲) را برای تخمین C_m ارائه دادند.

$$C_m = a + b_1(Fr_1) + c_1\left(\frac{w}{y_1}\right) + d_1\left(\frac{L}{B}\right) + e_1(S_0) \quad (2-22)$$

همچنین بررسی‌های انجام شده نشان داد حذف پارامترهای $\frac{L}{B}$ ، S_0 در محاسبه C_m تأثیر زیادی ندارد و می‌توان از تأثیر این پارامترها صرف نظر کرد. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معادله (۲-۲۳) را ارائه دادند:

$$C_m = 0.71 - 0.41 Fr_1 - 0.22 \left(\frac{w}{y_1}\right) \quad (2-23)$$

قدسیان و همکاران (۱۹۹۷)

قدسیان و همکاران (۱۹۹۷) مقدار C_m را برای روابط مختلف ارائه شده با عددهای فرود مختلف محاسبه کرده و بیان کردند که ضرایب به دست آمده تفاوت زیادی باهم دارند و برای اعداد فرود مشابه نتایجی متفاوت به دست آمده. بنابراین هیچ یک از روابط ارائه شده قبل قادر به محاسبه دقیق دبی

نبودند. بنابراین آنها رابطه‌ای با استفاده از ضریب دبی المانی معرفی کردند که تابع عمق جریان و ارتفاع سرریز بوده که شبیه به ضریب دبی معرفی شده برای سرریزهایی معمولی است.

معادلات زیر برای ضریب دبی المانی فرض شد:

$$\eta_w \leq 5 \quad C_e = K_1 + K_2 \eta_w \quad \text{اگر}$$

$$\eta_w \geq 15 \quad C_e = K_3 \cdot (1 + \eta_w^{-1})^{K_4} \quad \text{اگر}$$

که $\eta_w = \frac{y-w}{w}$ و K_1 تا K_4 مقادیر ثابت و مجهولی هستند که از طریق آزمایش به دست می‌آیند.

قدسیان و همکاران، با به کارگیری روش بهینه‌سازی جستجوی شبکه‌ای مقادیر ثابت را به صورت زیر معرفی کردند:

$$\eta_w \leq 5 \quad C_e = 0.5 + 0.01 \eta_w \quad \text{اگر}$$

$$\eta_w \geq 15 \quad C_e = 0.447(1 + \eta_w^{-1}) \quad \text{اگر}$$

با استفاده از معادلات فوق به ترتیب ۵ و ۵/۸۸ درصد خطا برای کل داده‌ها مربوطه به دست آمد. با توجه به لزوم یک رابطه عمومی C_e که برای تمامی η_w قابل استفاده باشد، ترکیب این دو رابطه بر اساس کل داده‌های آزمایشگاهی ضروری است که بعد از این مرحله معادله زیر (۲-۲۴) برای ضریب دبی المانی ارائه شد:

$$C_e = 0.446 \left\{ \left(\frac{44.7}{50 + \eta_w} \right)^{6.67} + \left(\frac{\eta_w}{1 + \eta_w} \right)^{6.67} \right\} \quad (2-24)$$

η_w برای کلیه مقادیر قابل قبول می‌باشد. خطای متوسط داده‌ها برای به دست آوردن معادله (۲-۲۴) برابر ۶/۶ درصد به دست آمد.

سینگ و همکاران (۱۹۹۴)

سینگ و همکاران (۱۹۹۴) به این نتیجه دست یافتند که ضریب شدت جریان علاوه بر عدد فرود بالادست به نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست سرریز نیز بستگی دارد. همچنین با رگرسیون گیری چند متغیره به رابطه‌ای خطی برحسب Fr_1 و $\frac{w}{y_1}$ برای محاسبه ضریب تخلیه دست یافتند.

نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها به شکل زیر می‌باشد:

۱. پروفیل سطح آب نشان داد که عمق جریان در طول سرریز بیشتر می‌شود که این موضوع در تمامی تکرارها رخ داد که با توجه به نتایج آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول آزمایش، فرضی مناسب است.

۲. در تحقیق آن‌ها مشخص شد هر چه مقدار Fr_1 زیادتر باشد، مقدار C_m کاهش خواهد یافت. بهترین معادله منطبق بر منحنی C_m و Fr_1 که با روش حداقل مربعات خطا به دست آمده است، به صورت رابطه (۲۵-۲) می‌باشد:

$$C_m = 0.99 - 1.26 Fr_1 \quad (25-2)$$

۳. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد هر چه مقدار $\frac{w}{y_1}$ زیادتر باشد، مقدار C_m نیز افزایش خواهد یافت. رابطه (۲۶-۲) که با روش حداقل مربعات خطا به دست آمده است نشان‌دهنده رابطه بین C_m و $\frac{w}{y_1}$ می‌باشد.

$$C_m = 0.24 + 0.24 \left(\frac{w}{y_1} \right) \quad (26-2)$$

۴. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار C_m به Fr_1 و $\frac{w}{y_1}$ بستگی دارد که با استفاده از رگرسیون چند متغیره رابطه (۲۷-۲) بهترین رابطه بین C_m ، Fr_1 و $\frac{w}{y_1}$ است:

$$C_m = 0.33 - 0.18 Fr_1 + 0.49 \left(\frac{w}{y_1} \right) \quad (27-2)$$

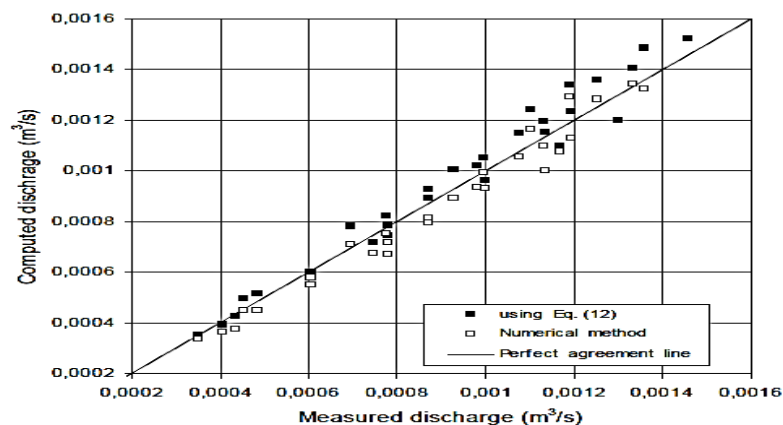
۵. متوسط C_m به دست آمده از رابطه (۲-۲۷) برابر $0/6$ و انحراف معیار آن $0/07$ می باشد. بررسی های آماری نشان داد هیچ گونه اختلاف معناداری بین C_m به دست آمده از سایر روابط با C_m به دست آمده از رابطه (۲-۲۷) وجود ندارد، بنابراین استفاده از رابطه (۲-۲۷) برای تعیین ضریب دبی مناسب می باشد.

مطالعه پیراپیتان و همکاران (۲۰۰۶)

پیراپیتان و همکاران (۲۰۰۶) با انجام آزمایش هایی بر روی ۶ سرریز با ۵ دبی متفاوت ضریب دبی سرریز جانبی را به دست آوردند. آن ها تأثیر پارامترهای بی بعد Fr_1 ، $\frac{w}{y_1}$ ، $(\frac{L}{B})$ (نسبت طول سرریز به عرض) را بر روی سرریز جانبی ارزیابی کردند. آزمایش ها در جریان فوق بحرانی انجام شده و با فرض ثابت در نظر گرفتن انرژی مخصوص، معادلات متغیر مکانی را به روش عددی رانگ-کوتا مرتبه ۴ حل کردند و معادله ی حاکم بر C_m را به صورت معادله زیر (۲-۲۸) بیان کردند:

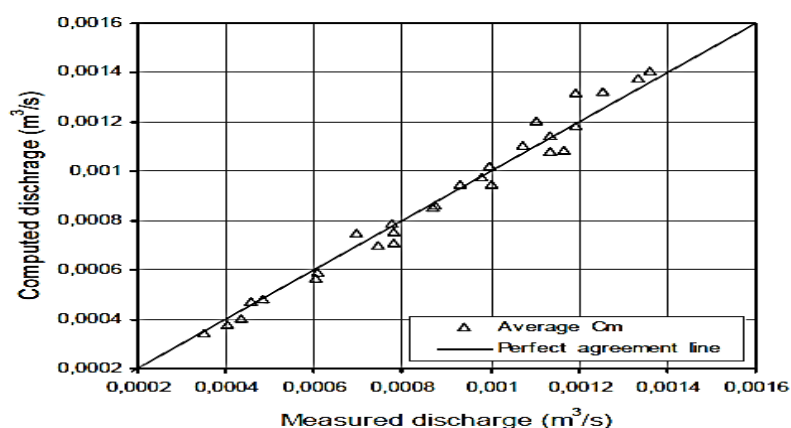
$$C_m = -0.511 + 0.93Fr_1 - 0.199(\frac{w}{y_1}) - 0.137(\frac{L}{B}) \quad (2-28)$$

نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده که در محدوده ی خاصی از اعداد فرود به دست آمد، نشان داد که افزایش Fr_1 باعث افزایش C_m می شود (شکل ۲-۵ و ۲-۶).



شکل ۲-۵: نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از حل عددی با مقادیر آزمایشگاهی

(پیراپیتان و همکاران ۲۰۰۶)

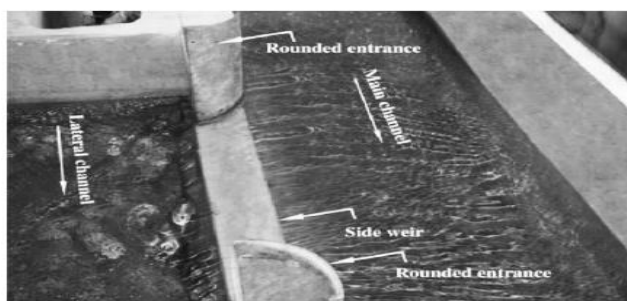


شکل ۲-۶: نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از حل عددی با مقادیر آزمایشگاهی

(پیراپیتان و همکاران ۲۰۰۶)

مطالعه هنر و کشاورزی (۲۰۰۹)

هنر و کشاورزی (۲۰۰۹) اثر گرد گوشه کردن دیواره‌های ورودی بر ضریب تخلیه جریان در سرریزهای جانبی در کانال‌های مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تعداد ۹۰ آزمایش انجام دادند که نتایج به دست آمده از آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و اثر پارامترهای بی بعد مختلف بر ضریب تخلیه سرریز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که دبی عبوری از سرریز جانبی در حالت گرد گوشه شدن دیواره‌ها حدود ۱۰ درصد بیشتر از حالت معمول است (شکل ۲-۷).

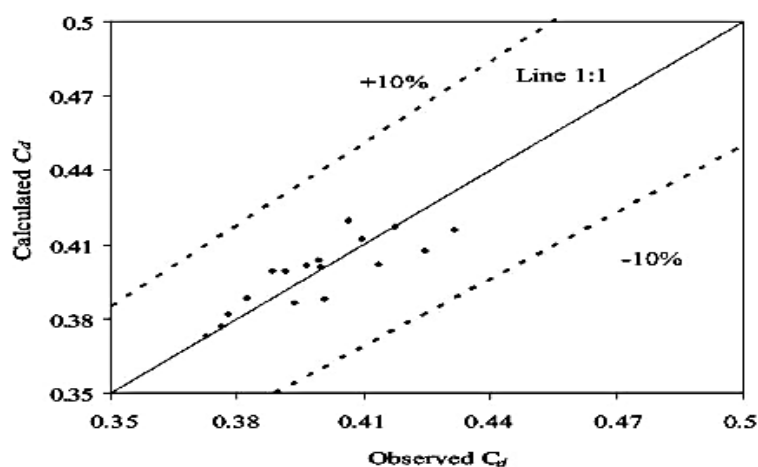


شکل ۲-۷: تصویر سرریز جانبی استفاده شده در آزمایش‌ها، (هنر و کشاورزی، ۲۰۰۹).

سرانجام آن‌ها رابطه (۲۹-۲) را با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات خطا (SSE) برای محاسبه C_m در سرریزهای جانبی بدون گردشگی در دیواره‌های ورودی معرفی کردند:

$$C_m = 0.466 - 0.126 \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + 0.017 \left(\frac{h_2}{w} \right) - 0.019 \left(\frac{h_2}{w} \right)^2 \quad (29-2)$$

v_1 و v_2 به ترتیب سرعت متوسط جریان در ابتدا و انتهای سرریز (m/s) و h_2 عمق آب در انتهای سرریز می‌باشد (شکل ۲-۸).

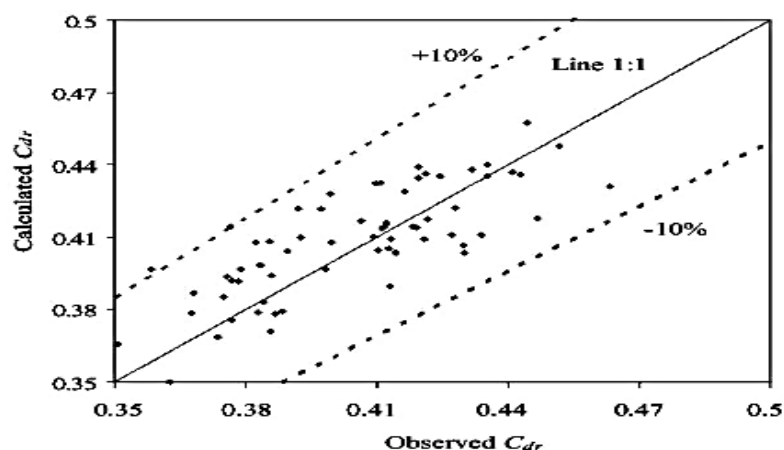


شکل ۲-۸: مقایسه ضریب دبی مشاهده‌ای و محاسبه‌شده توسط رابطه (۲۳۱-۲) (هنر و کشاورزی، ۲۰۰۹)

هنر و کشاورزی رابطه (۳۰-۲) را برای محاسبه C_m در سرریزهای جانبی با گردشگی در دیواره‌های ورودی ارائه کردند:

$$C_{dr} - C_m = 0.044 \left(\frac{L}{\frac{w}{2}} \right) - 0.449 \left(\frac{r}{\frac{L}{2}} \right) - 0.029 \left(\frac{w}{Y_2} \right) + 0.309 \quad (30-2)$$

که در این رابطه C_{dr} ضریب دبی در حالتی است که دیواره‌های ورودی سرریز جانبی گرد است، L محیط ناحیه گرد شده (m)، r شعاع ناحیه گرد شده (m)، w ارتفاع سرریز (m) و Y_2 عمق آب در انتهای سرریز و مرکز کانال است (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹: مقایسه ضریب دبی مشاهده‌ای و محاسبه‌شده در حالت گرد گوشه (هنر و کشاورزی، ۲۰۰۹)

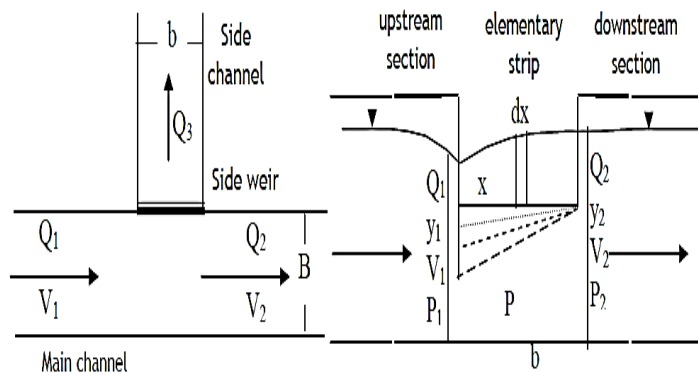
نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد با فرض طول یکسان برای سرریز در حالتی که دیواره‌های ورودی سرریز گرد گوشه باشند، دبی عبوری از سرریز گرد گوشه بیشتر از حالتی است که دیواره‌های کناری آن لبه‌تیز باشند. در نتیجه برای عبور و یا انحراف دبی خاصی از کانال اصلی، ابعاد اجرائی سرریز را با گرد کردن دیواره‌های ورودی می‌توان کاهش داد.

ایزدی‌نیا و همکاران (۱۳۸۶)

ایزدی‌نیا و همکاران (۱۳۸۶) با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی تحقیقات برقی و همکاران (۱۹۹۹) و حل معادلات متغیر مکانی به روش عددی رانگ-کوتا مرتبه ۴، پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی را ارائه نمودند. عمق محاسبه‌شده به روش عددی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و میزان خطا کمتر از ۵٪ به دست آمد، در نتیجه آن‌ها روش عددی رانگ-کوتا مرتبه ۴ را به‌عنوان راه-حلی مناسب برای تعیین پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی معرفی کردند.

مطالعه احمد (۲۰۱۱)

احمد (۲۰۱۱) با انجام آزمایش بر روی ۵ مدل فیزیکی از سرریز جانبی مستطیلی با زاویه‌های مختلف، نسبت به کانال اصلی، ضریب دبی المانی سرریزهای جانبی را مورد مطالعه قرارداد (شکل ۲-۱۰).



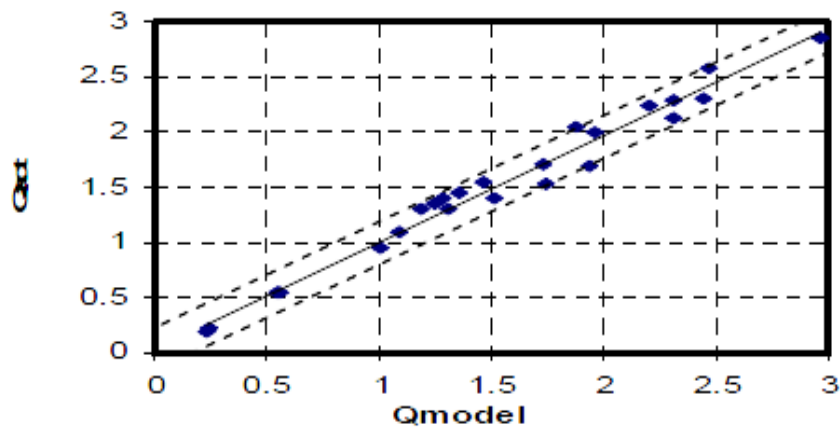
شکل ۲-۱۰: نمای سرریز جانبی مستطیلی (احمد، ۲۰۱۱)

او ضریب دبی المانی را با استفاده از ادغام معادلات متغیر مکانی، به صورت رابطه‌ی (۲-۳۱) را معرفی نمود:

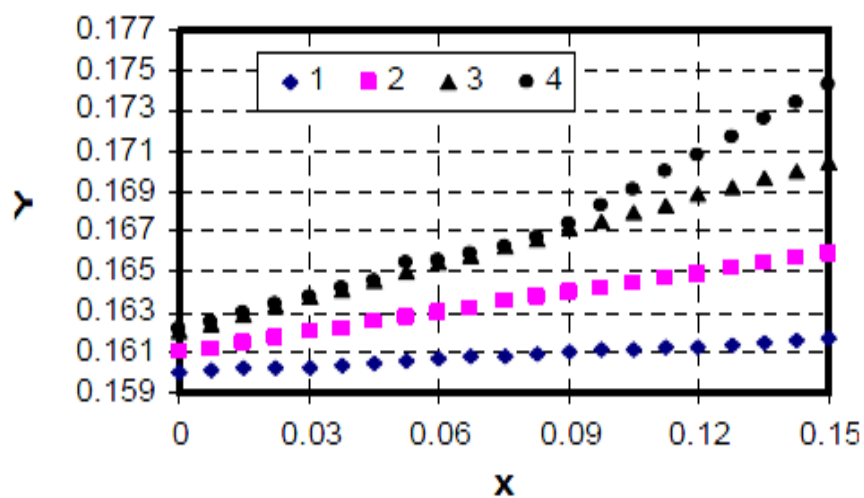
$$Cd = C_1 \left[\left(\frac{C_2}{C_3 + \left(\frac{y-p}{p} \right)} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\left(\frac{y-p}{p} \right)}{\left(\frac{y-p}{p} \right) + 1} \right)^{-10} \right]^{C_4} \quad (2-31)$$

که در این رابطه C_1 ، C_2 ، C_3 و C_4 پارامترهایی ثابت هستند، y میزان عمق آب و p ارتفاع تاج سرریز جانبی است.

احمد میزان عمق آب و دبی را در طول سرریزها با حل عددی معادلات متغیر مکانی به روش رانگ-کوتا مرتبه ۴ محاسبه نمود. نتایج به دست آمده از رابطه، مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت (شکل ۲-۱۱ و ۲-۱۲).

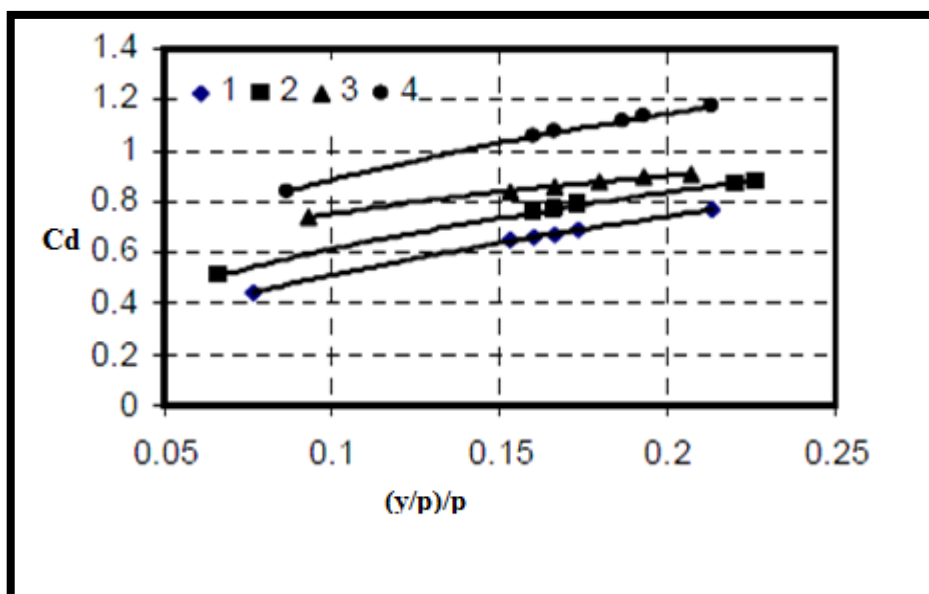


شکل ۱۱-۲: مقایسه نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی (احمد، ۲۰۱۱)

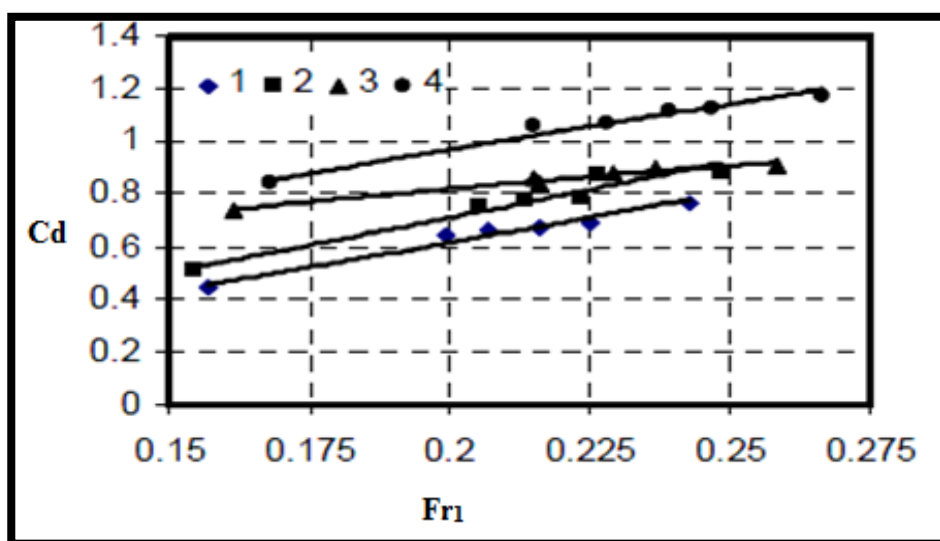


شکل ۱۲-۲: میزان تغییرات عمق آب در طول سرریز جانبی (احمد، ۲۰۱۱)

او همچنین تأثیر دو پارامتر بی بعد Fr_1 (عدد فرود بالادست) و $\frac{(y-p)}{p}$ (نسبت اختلاف بین عمق آب و ارتفاع سرریز به ارتفاع سرریز) را به Cd بررسی کرد. نتایج به دست آمده نشان داد میزان Cd با Fr_1 و $\frac{(y-p)}{p}$ رابطه‌ای مستقیم دارد (شکل‌های ۱۳-۲ و ۱۴-۲).



شکل ۲-۱۳: میزان تغییرات در برابر $\frac{(y-p)}{p}$ (احمد، ۲۰۱۱)



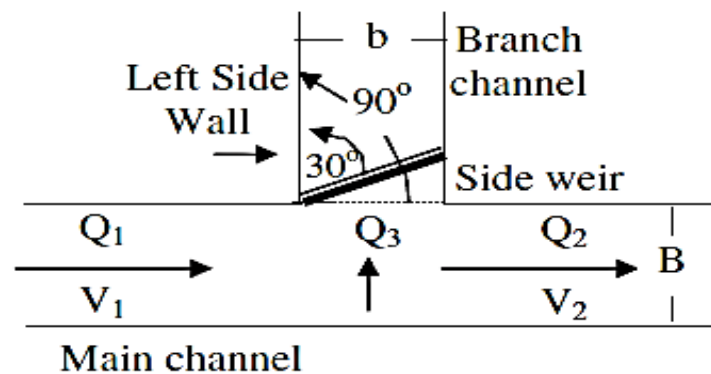
شکل ۲-۱۴: میزان تغییرات C_d به Fr_1 (احمد، ۲۰۱۱)

بررسی‌های وی نشان داد که میزان ضریب دبی المانی در سرریزهای جانبی مایل بیشتر از سرریز ۹۰ درجه می‌باشد و میزان دبی عبوری نیز بیشتر از ۴۰٪ است.

محمد (۲۰۱۳)

محمد (۲۰۱۳)، ضریب دبی المانی سرریز جانبی مستطیلی را با زوایای مختلف ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، و ۹۰ مورد مطالعه قرارداد و تأثیر زاویه قرارگیری سرریز جانبی بر ضریب دبی و میزان دبی خروجی را با

استفاده از حل عددی اوپلر، بررسی کرد (شکل ۲-۱۵). بررسی‌های او نشان داد که از بین زوایای مورد مطالعه، زاویه ۳۰ درجه دارای بیشترین ضریب تخلیه دبی است و رابطه آن را به صورت رابطه (۲-۳۲) است.



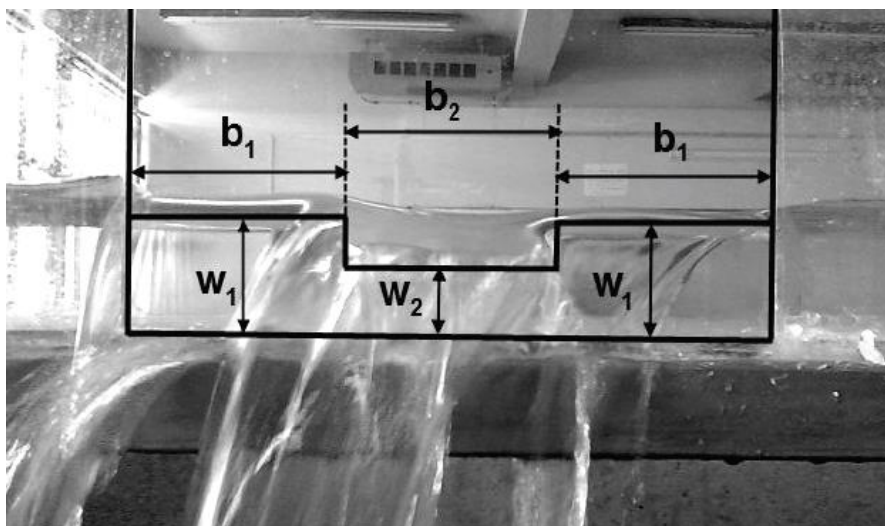
شکل ۲-۱۵: سرریز جانبی مایل (محمد، ۲۰۱۳)

$$C_m = 1.275 - 0.612 Fr_1 - 0.522 \left(\frac{P}{y_1} \right) + 0.028 \left(\frac{L}{B} \right) - 0.132 \theta \quad (2-32)$$

θ = زاویه سرریز نسبت به کانال اصلی، b = عرض سرریز، Fr_1 = عدد فرود بالادست، y_1 = ارتفاع آب در بالادست، P = ارتفاع تاج سرریز، L = طول سرریز

باقری و همکاران (۱۳۹۱)

باقری و همکاران (۱۳۹۱) مطالعاتی بر روی سرریزهای جانبی لبه تیز با مقطع مرکب (ترکیبی) انجام دادند. آن‌ها برای محاسبه ضریب دبی، حدود ۱۱۰ آزمایش بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی - مستطیلی با عرض و ارتفاع متغیر انجام دادند (شکل ۲-۱۶).



شکل ۲-۱۶: سرریز لبه تیز مرکب با مقطع مستطیلی- مستطیلی (باقری و همکاران، ۱۳۹۱)

آن‌ها بر اساس هندسه سرریزهای لبه تیز جانبی مرکب، معادله‌ی دبی عبوری از سرریز دی‌مارچی را به صورت رابطه (۲-۳۳) اصلاح نمودند:

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (2-33)$$

در این رابطه b_1 و b_2 به ترتیب طول تاج سرریز بالایی و پایینی و w_1 و w_2 به ترتیب ارتفاع تاج سرریز بالایی و پایینی است. لذا دبی عبوری از سرریزهای لبه تیز جانبی مرکب به صورت رابطه (۲-۳۴) ارائه شد:

$$Q = C\sqrt{2gL}(y_1 - \bar{w})^{1.5} \quad (2-34)$$

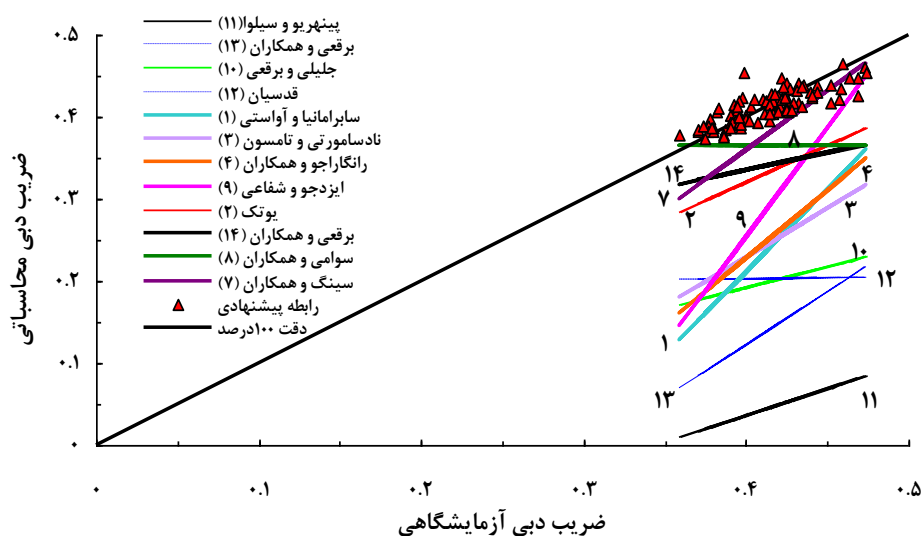
با استفاده از تحلیل ابعادی و نیز مدل سازی فیزیکی رابطه‌ی (۲-۳۵) را به صورت رابطه کلی برای تخمین دبی سرریزهای جانبی مرکب مستطیلی- مستطیلی پیشنهاد نمودند:

$$C = aFr_1^b + c\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^d + e\left(\frac{B}{y_1}\right)^f + h \quad (2-35)$$

و با انجام بهینه سازی رابطه (۲-۳۶) را برای برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب در شرایط جریان زیربحرانی ارائه نمودند:

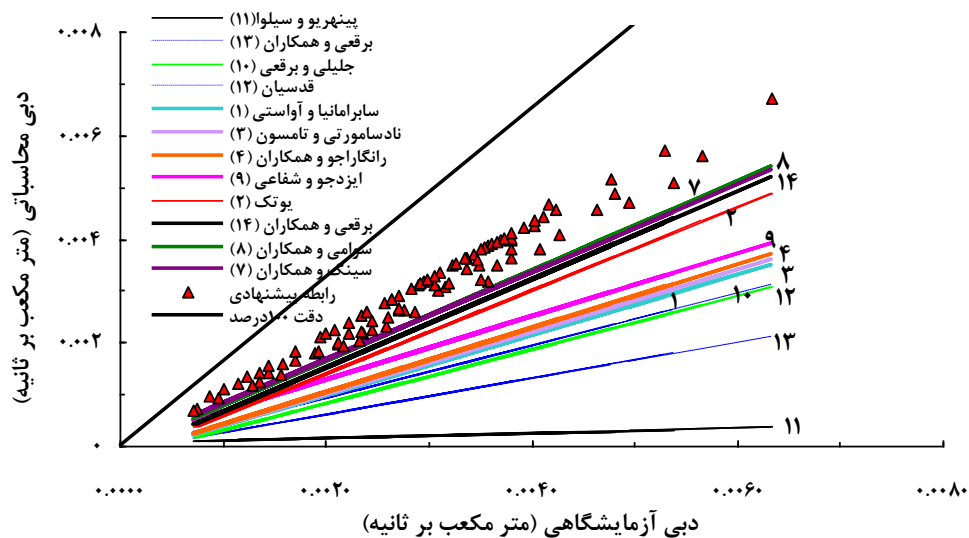
$$C = -0.0551Fr_1 + 0.1063 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{2.1065} + 0.00168 \left(\frac{B}{y_1}\right)^{1.1789} + 0.412 \quad (36-2)$$

بنابراین، ضریب دبی در سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب به‌صورت تابعی از ۳ پارامتر بدون بعد، عدد فرود جریان در بالادست سرریز، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز و نسبت عرض کانال به عمق جریان در بالادست سرریز است. آن‌ها با بررسی روابط ارائه‌شده برای ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز ساده توسط محققان پیشین مشخص نمودند که هیچ‌یک از روابط ارائه‌شده کارایی مناسب برای سرریزهای جانبی مرکب را ندارند زیرا روابط ضریب تخلیه دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب را بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند (شکل‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۸).



شکل ۲-۱۷: نمودار مقایسه نتایج ضریب دبی به‌دست‌آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده به مقادیر آزمایشگاهی

(باقری و همکاران، ۱۳۹۱)

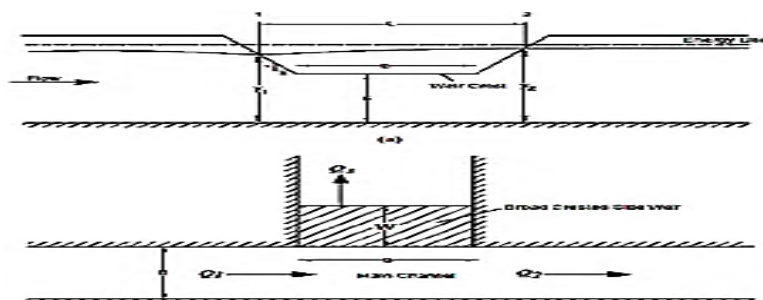


شکل ۱۸-۲: نمودار مقایسه نتایج دبی جریان به دست آمده از روابط سرریزهای جانبی ساده با مقادیر آزمایشگاهی

(باقری و همکاران، ۱۳۹۱)

سیاری و همکاران (۱۳۹۱)

سیاری و همکاران (۱۳۹۱) برای حل معادلات دینامیکی جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی، از روش عددی رانگ-کوتا مرتبه ۴ استفاده نمودند و پروفیل سطح آب را بر روی سرریز جانبی دوزنقه‌ای لبه پهن محاسبه کردند (شکل ۱۹-۲).



شکل ۱۹-۲: نمایی از سرریز جانبی دوزنقه‌ای (سیاری و همکاران، ۱۳۹۱)

از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج محاسبه شده به این نتیجه رسیدند که دقت پیش‌بینی پروفیل سطح آب با استفاده از روش عددی رانگ- کوتا مرتبه ۴ بسیار مناسب می‌باشد. آن‌ها برای اطمینان از نتایج به دست آمده، میزان خطا را از روش تحلیل رگرسیون نیز به دست آوردند که با این مقایسه مشخص شد در شیب جانبی ۱/۵ مقدار $R^2 = 0.978$ و برای شیب جانبی ۲ مقدار $R^2 = 0.989$ می‌باشد. نتایج ضریب همبستگی به دست آمده نشان داد که عمق‌های محاسبه شده با زیاد شدن شیب جانبی انطباق بیشتری را با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

همچنین معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان در سرریزهای جانبی ساده نیز توسط محققین مختلف به روش عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. سامانی (۲۰۰۵) برای تعیین موقعیت پرش هیدرولیکی در محدوده سرریز جانبی یک مدل ریاضی را ارائه کرده و دستگاه معادلات حاکم را به روش عددی رانگ-کوتا (۴) حل نمود. قبادیان و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی، مدل ریاضی پروفیل سطح آب را در محدوده سرریز جانبی واسنجی کردند. محمد و همکاران (۲۰۱۱) معادله متغیر مکانی در محدوده سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را با استفاده از حل عددی رانگ-کوتا (۴) حل نموده و اثر شیب طولی کانال بر ضریب دبی تخلیه را بررسی کردند. صادقی و همکاران (۱۳۹۱) پروفیل سطح آب در محدوده دریچه جانبی واقع در قوس ۱۸۰ درجه را با استفاده از حل عددی رانگ-کوتا ۴، بررسی نمودند.

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، اگرچه سرریزهای جانبی ساده به صورت گسترده‌ای توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲)، مقیسه و اسماعیلی (۲۰۱۱)، امیرآق‌لو و همکاران (۲۰۱۰)، برقی و صالحی (۲۰۰۳)، رامامورتی و همکاران (۲۰۰۶)، اکبری و قدسیان (۲۰۱۱)). اما در زمینه سرریزهای جانبی مرکب مطالعات محدودی انجام شده است (باقری و همکاران، ۱۳۹۱). البته مطالعات آزمایشگاهی محدودی در خصوص سرریزهای لبه تیز مرکب نرمال (که در عرض کانال و عمود بر جهت جریان احداث می‌شوند) انجام شده که دارای تفاوت عمده‌ای با

سرریزهای جانبی می‌باشد. از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به (سازمان احیای اراضی امریکا، ۱۹۶۳؛ یاسی و عباسپور (۱۳۸۴)، مارتینز و همکاران (۲۰۰۵)، پیراتیپان و همکاران (۲۰۰۶). جان و همکاران (۲۰۰۶) و ظهیری (۱۳۹۱) اشاره کرد.

اولین بار سازمان احیای اراضی امریکا (۱۹۳۶) دبی جریان را با استفاده از یک سرریز لبه‌تیز مثلثی-مستطیلی اندازه‌گیری نمود.

یاسی و عباسپور (۲۰۰۶) با بررسی جریان در سرریز لبه‌تیز مرکب نرمال مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه در حالت با و بدون فشردگی جانبی به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع سطح آب روی سرریز و در مرز تماس سرریزهای مثلثی و مستطیلی، ضریب دبی به‌صورت متناوب افزایش و کاهش می‌یابد.

مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی‌های آزمایشگاهی سرریز لبه‌تیز مرکب نرمال مثلثی-مثلثی، این نوع سرریز را برای استفاده در سدهای رسوب‌گیر در حوضه‌های کوهستانی مناسب ارزیابی کردند. این نوع سرریز به دلیل پیوستگی رابطه دبی-اشل در تمامی عمق‌های جریان روی سرریز و همچنین دقت مناسب در اندازه‌گیری دبی در محدوده وسیعی از شرایط جریان (کم‌آب تا سیلابی) انتخاب شد.

جان و همکاران (۲۰۰۵) با الگو گرفتن از تحقیقات مارتینز و انجام یک سری آزمایش، محدوده دبی جریان را برای چهار نوع سرریز لبه‌تیز مرکب نرمال شامل ترکیبی از سرریزهای مستطیلی-مستطیلی، مستطیلی-دوزنقه‌ای، مثلثی-مستطیلی و مثلثی دوزنقه‌ای اندازه‌گیری و بررسی نمودند. به دلیل وجود ناپیوستگی در منحنی دبی-اشل سرریز، همچنین حساسیت زیاد اندازه‌گیری تراز سطح آب در محل اتصال سرریزهای پایین یا مرکز و دو سرریز بالا که در دو طرف سرریز مرکزی قرار دارند و غیرممکن بودن محاسبه دقیق دبی در این ناحیه، استفاده از این سرریزهای مرکب را محدود کرده است.

همچنین پیراپیتان و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی آزمایشگاهی همین نوع سرریز مرکب با زاویه‌های - مختلف، رابطه‌ای دقیق برای محاسبه دبی جریان سرریز مرکب مثلثی- مثلثی معرفی کردند.

کشاوری و همکاران (۲۰۱۱) با مطالعه بر روی دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز دوزنقه‌ای روابطی را ارائه نمودند.

ظهیری (۲۰۱۳) به‌عنوان روشی جدید با حل عددی مدل ریاضی شبه دوبعدی شیونو و نایت، دبی عبوری از سرریزهای لبه‌تیز مرکب نرمال را محاسبه کرد.

۲-۳- جمع‌بندی

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد که باوجود مطالعات فراوان درزمینه‌ی سرریزهای جانبی لبه-تیز ساده، سرریزهای جانبی لبه‌تیز مرکب که ضمن قابلیت اندازه‌گیری دقیق دبی عبوری، توانایی خروج میزان قابل‌توجهی از جریان در زمان رخداد سیلاب را دارند، تاکنون موردتوجه جدی قرار نگرفته‌اند و برای تعیین دبی جریان عبوری از سرریزهای جانبی مرکب از یک رابطه ساده استفاده‌شده است که در این روابط، ضریب تخلیه دبی بر اساس هندسه سرریز مرکب محاسبه می‌شود.

در این پایان‌نامه به معرفی اصول کلی برنامه‌ریزی بیان‌ژن پرداخته خواهد شد. محدوده کاری برنامه-ریزی بیان‌ژن دارای وسعتی زیاد است و هر روزه با پیشرفت‌های روزافزون علوم و تکنولوژی استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل بسیار گسترده و فراگیر شده است.

همچنین در این مطالعه از شبکه عصبی GMDH و همچنین بهینه‌سازی غیرخطی رگرسیون بهره گرفته و برای مقایسه مدل‌ها استفاده شدند.

فصل سوم:

مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌های مورد استفاده

در مطالعه حاضر از داده‌های آزمایشگاهی عامری (عامری و همکاران، ۲۰۱۵) بر روی سرریزهای مرکب مستطیلی-مستطیلی و مثلثی-مستطیلی استفاده شده است و به کمک نرم‌افزارهای مورد مطالعه در این پژوهش داده‌ها آنالیز شدند.

۱-۳-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه بر روی دو فلوم با شیب تقریباً ۰/۰۰۱، با طول ۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر برای دو نوع سرریز مستطیلی-مستطیلی و مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه انجام شده است. همچنین حداکثر دبی ورودی آن ۴۰۰ لیتر بر ثانیه بوده که توسط یک روتامتر اندازه‌گیری شده و برای اندازه‌گیری دبی خروجی از سرریز جانبی مرکب، در انتهای مسیر یک مخزن فلزی نصب شده که دارای یک سرریز مثلثی ۵۳ درجه کالیبره شده می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری تراز سطح آب در داخل فلوم و در محدوده سرریز جانبی از یک عمق سنج با دقت ± 1 میلی‌متر استفاده شده است.

پارامترهای موجود آزمایشگاهی: عرض سرریز (b)، ارتفاع سرریز (w)، طول سرریز (L)، عمق جریان (y)، بار هیدرولیکی (h_{up})، زاویه سرریز (θ)، دبی جریان (Q) و عدد فرود (Fr).

تعداد داده‌های مشاهداتی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه که در این پژوهش استفاده شده در جدول (۳-۱) نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: تعداد داده‌های مشاهداتی موجود برای هر سرریز مرکب

تعداد داده مشاهداتی	نوع سرریز مرکب
۳۷۸	سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی
۱۹۷	سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه
۲۳۵	سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه
۱۶۰	سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه

برای رسیدن به معادله‌ای که شکل ظاهری مناسبی داشته داشته و همه‌ی پارامترهای تأثیرگذار را شامل باشد از پارامترهای بی-بعد استفاده شده است.

متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب دبی سرریزهای مرکب مستطیلی- مستطیلی عبارت است از:

عدد فرود بالادست جریان (Fr)، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{w}{y}$)،
نسبت طول سرریز به عرض کانال ($\frac{L}{B}$)

برای سرریز مثلثی- مستطیلی:

عدد فرود بالادست جریان (Fr)، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{w}{y}$)،
نسبت طول سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{L}{y}$)

همچنین رنج داده‌های استفاده شده برای سرریز مستطیلی- مستطیلی و مثلثی- مستطیلی به ترتیب در جدول (۳-۲) و (۳-۳) نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: رنج پارامترهای بی‌بعد سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی

Rectangular-Rectangular	W/Y	L/B	Fr
Min	0.12	0.5	0.15
Max	0.83	1	0.96

جدول ۳-۳: رنج پارامترهای بی‌بعد سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه

Tryangular-Rectangular		W/Y	L/Y	Fr
60°	Min	0.36	1.32	0.16
	Max	0.78	3.54	0.66
90°	Min	0.42	1.31	0.16
	Max	0.84	3.85	0.66
120°	Min	0.39	1.99	0.21
	Max	0.8	3.7	0.73

۳-۲- مدل‌های مورد استفاده

امروزه با توجه به پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی در حل مسائل فراگیر شده است. در این تحقیق با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن، شبکه عصبی GMDH و بهینه‌سازی غیرخطی رگرسیون، نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده و با مقایسه نتایج، قابلیت این روش‌ها در تخمین ضریب‌دبی مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۲-۱- ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی به روش مستقیم

روش مستقیم سریع ترین روش محاسبه ضریب دبی می باشد با داشتن پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز ضریب دبی محاسبه می شود. در سرریز مستطیلی تغییرات دبی در طول سرریز از رابطه (۱-۳) به دست می آید:

$$Q = \frac{2}{3} c_d \sqrt{2gb} (y - w)^{1.5} \quad (1-3)$$

در این روش سرریز جانبی مرکب مستطیلی- مستطیلی به سه بخش تقسیم می شود که دارای دو سرریز مستطیلی ساده در طرفین و یک سرریز مستطیلی ساده در مرکز می باشد، همچنین ضریب دبی کل از روش مستقیم از جمع ضریب دبی سرریز مرکزی با ضریب دبی های دو طرف دست می آید. برای جلوگیری از اشکال در روابط به دلیل متغیر بودن ارتفاع تاج سرریز از پارامتر ارتفاع وزنی تاج ($\bar{w}$) استفاده شده است که اولین بار توسط ظهیری و همکارانش (۲۰۱۳) معرفی شده است:

دبی کل از رابطه (۲-۳) به دست می آید:

$$Q_w = Q_1 + 2Q_2 = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} [2b_1 (y_1 - w_1)^{1.5} + b_2 (y_1 - w_2)^{1.5}] \quad (2-3)$$

در این رابطه Q_1 دبی سرریز وسطی در سرریز مرکب و Q_2 دبی سرریز در طرفین سرریز مرکزی می باشد.

در نتیجه ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی به صورت رابطه (۳-۳) ارائه می گردد:

$$C_d = \frac{Q_w}{\left(\left(\frac{3}{2} \right) \sqrt{2g} \cdot 2b_1 (y_1 - w_1)^{1.5} + b_2 (y_1 - w_2)^{1.5} \right)} \quad (3-3)$$

که در آن g شتاب ثقل و y_1 ارتفاع آب قبل از سرریز می باشد.

در رابطه زیر $\bar{w}$ ارتفاع وزنی تاج است و برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی به شکل (۴-۳) می باشد:

$$\bar{W} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (4-3)$$

که در این رابطه b_1 و b_2 به ترتیب طول تاج سرریز در قسمت کناری و قسمت مرکزی سرریز می-باشد و w_1 و w_2 نیز به ترتیب ارتفاع تاج سرریز در قسمت کناری و قسمت مرکزی می-باشد. در این تحقیق برای برقراری رابطه بین پارامترهای هیدرولیکی سرریز جانبی و ضریب دبی C_d از مدل خطی استفاده شده است. همچنین متغیرهای ورودی و خروجی به شکل به هم مرتبط می-شوند:

برای سرریز مستطیلی - مستطیلی

$$C_d = f\left(Fr, \frac{L}{B}, \frac{W}{Y}\right) \quad (5-3)$$

برای سرریز مثلثی - مستطیلی

$$C_d = f\left(Fr, \frac{L}{Y}, \frac{W}{Y}\right) \quad (6-3)$$

در روابط بالا پارامترهای بی بعد هیدرولیکی Fr عدد فرود بالادست، L/B نسبت طول سرریز به عرض کانال، W/Y نسبت ارتفاع وزنی به عمق آب، L/Y نسبت طول سرریز به عمق آب در کانال به عنوان پارامترهای ورودی و C_d ضریب دبی در روابط به عنوان پارامتر خروجی می-باشد.

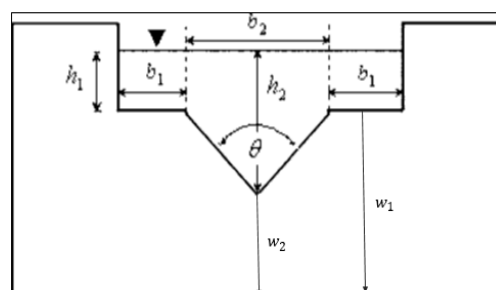
با توجه به داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه (۷-۳) برای محاسبه ضریب دبی ارائه می-شود:

$$c_d = a + b * Fr^c + d * \left(\frac{\bar{w}}{y}\right)^e + f * \left(\frac{L}{B}\right)^g \quad (7-3)$$

که در این رابطه ضرایب a, b, c, d, e, f, g را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با کمک حداقل-سازی مجموع مربعات خطا به دست می-آیند.

۳-۲-۲- ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی به روش مستقیم

مشابه آنچه که برای سرریز مستطیلی- مستطیلی ذکر گردید در روش مستقیم برای سرریز جانبی مرکب مثلثی- مستطیلی نیز به سه بخش تقسیم می‌شود که دارای دو سرریز مستطیلی ساده در طرفین و یک سرریز مثلثی ساده در مرکز می‌باشد (شکل ۳-۱). همچنین فرمول ضریب دبی مستطیلی و مثلثی ساده به ترتیب از رابطه (۳-۸) و (۳-۹) به دست می‌آید. ضریب دبی کل از روش مستقیم از جمع این دو ضریب به دست می‌آید.



شکل ۳-۱: اجزای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی

ضریب دبی سرریز مستطیلی:

$$C_d = \frac{Q_w}{\left(\left(\frac{3}{2}\right)\sqrt{2g} \cdot b_1 \cdot (y_1 - w_1)^{1.5}\right)} \quad (۳-۸)$$

ضریب دبی سرریز مثلثی:

$$C_d = \frac{Q_w}{\left(\left(\frac{8}{15}\right)\sqrt{2g} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot (y_1 - w_2)^{2.5}\right)} \quad (۳-۹)$$

ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی:

$$C_d = 2 \left(\frac{Q_w}{\left(\left(\frac{3}{2}\right)\sqrt{2g} \cdot b_1 \cdot (y_1 - w_1)^{1.5}\right)} \right) + \left(\frac{Q_w}{\left(\left(\frac{8}{15}\right)\sqrt{2g} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot (y_1 - w_2)^{2.5}\right)} \right) \quad (۳-۱۰)$$

همچنین دبی برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی درجه نیز از رابطه (۳-۱۱) به دست می‌آید:

$$Q_w = Q_1 + 2Q_2 = \left(C_d \left(\frac{3}{2}\right)\sqrt{2g} \cdot b_1 \cdot (y - \bar{w})^{1.5}\right) + 2 \left(C_d \left(\frac{3}{2}\right)\sqrt{2g} \cdot b_1 \cdot (y - \bar{w})^{1.5}\right) \quad (۳-۱۱)$$

همچنین ارتفاع وزنی در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{W} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2 + 0.5b_2(w_1 - w_2)}{2b_1b_2} \quad (3-12)$$

۳-۳- روش رگرسیون غیر خطی

در اکثر تحقیقات با حجم زیادی از داده‌ها مواجه هستیم که اجرای عملیات بر روی داده‌ها حجم وسیعی از محاسبات را نیاز خواهد داشت. لذا استفاده از یک نرم‌افزار مناسب آماری با کارایی و قدرت متفاوت ضروری است، در این پژوهش از نرم‌افزار SPSS (sciences statistical package for the social)، (بسته آماری برای علوم اجتماعی) استفاده شده است. علت استقبال بیشتر محققین از این نرم‌افزار، استفاده آسان، ارائه خروجی با محیط گرافیکی عالی و انجام بیشتر روش‌های آماری بدون نیاز به برنامه‌نویسی و نیز دارا بودن محیط برنامه‌نویسی (SYNTAX SPSS EDITOR) برای کاربران حرفه‌ای است. همچنین در این پژوهش پارامترهای موجود در سرریز با استفاده از آزمون همبستگی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۳-۴- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

الگوریتم بیان ژن یک روش جستجوی کلی است که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی پیروی می‌کند. الگوریتم بیان ژن بر روی قسمتی از جواب‌های مساله برای دستیابی به جواب‌های بهتر، قانون بقا بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی پیروی شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست خواهد آورد. این فرایند باعث می‌شود که نسل‌های جدید که با شرایط مساله سازگارتر هستند تولید شوند. به عبارتی الگوریتم بیان ژن روش جستجوی احتمالاتی فراگیر می‌باشد که از فرایند تکامل زیست‌شناختی طبیعی الهام می‌گیرد. الگوریتم بیان ژن بر جمعیت جواب‌های بالقوه عمل می‌نماید و از اصول تنازع بقا در تولید تقریب‌های بهتر جواب مساله استفاده می‌کند. در هر نسل

مجموعه‌ای جدید از تقریب‌ها بر اساس میزان برازش^۱، با انتخاب بهترین عضو از مجموعه نسل در دامنه مساله و همچنین تکثیر شدن با استفاده از عملگرهای گرفته‌شده از ژنتیک طبیعی ساخته می‌شوند. در نهایت این فرایند به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می‌شود که نسبت به اعضای اولیه دارای سازگاری بیشتری با محیط هستند.

الگوریتم تکاملی که درباره استراتژی تکامل است اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط آقای ریچنبرگ بررسی و ارائه شد. بعدها نظریه او توسط محققان زیادی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و سرانجام الگوریتم ژنتیک (GA) توسط جان هولند John Holland در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان معرفی شد.

۳-۴-۱- انواع الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌ها از لحاظ ساختاری به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱- الگوریتم ژنتیک GA دارای افرادی با کروموزوم‌های با طول ثابت و بدون بیانی پیچیده می‌باشند. در این سیستم‌ها کروموزوم‌ها بر اساس برتری خصوصیات فردیشان حفظ می‌شوند.

۲- الگوریتم‌های ژنتیک (GP) افرادی با ساختار شاخه‌ای^۲ هستند که از اندازه و شکل‌های مختلف تشکیل می‌شوند و نسبت به GA قادر به در نظر گرفتن عوامل بیشتری می‌باشند. این نوع از الگوریتم به برنامه‌ریزی ژنتیک معروف است.

۳- در دسته سوم الگوریتم‌های ژنتیک، افراد به شکل کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کدگذاری شده و به شکل ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف قابل بیان هستند. در این سیستم‌ها

^۱Fitness

^۲Ramified structures

کروموزوم‌ها به وسیله برتری عوامل سببی روی فنوتیپ^۱ (ساختار شاخه‌ای) حفظ می‌شوند. این نوع الگوریتم را برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) می‌نامند.

با توجه به مطالب ذکر شده تفاوت بین سه نوع الگوریتم فوق را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

در GA افراد رشته‌های خطی با طول ثابت هستند و در GP نهادهای غیرخطی با اندازه و شکل‌های مختلف (درختان تجزیه) می‌باشند؛ در حالی که در GEP افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (ژنوم یا کروموزوم‌ها) کدگذاری شده و سپس به شکل نهادهای غیرخطی با اندازه و شکل‌های مختلف (نمایش دیاگرام ساده یا بیان درختی) ظاهر خواهند شد (فریرا، ۲۰۰۱). در ادامه به شرح خلاصه‌ای از سه تکنیک جهت درک کردن قابلیت سیستم فنوتیپ / ژنوتیپ پرداخته می‌شود.

۳-۴-۲- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک توسط جان هالند در سال ۱۹۶۰ ابداع و معرفی گردید. این نوع الگوریتم از نظریه تکامل زیستی مشابه آنچه که در سیستم‌های کامپیوتری بکار رفته استفاده می‌کنند. در این روش از الگوریتم ژنتیک راه‌حل‌های مسئله در رشته‌هایی با طول ثابت و به صورت ۰ و ۱ کدگذاری شده و جمعیتی از رشته‌ها ایجاد می‌شوند تا راه‌حلی مناسب برای مسئله به دست آید. در هر نسل افراد به وسیله عملگرهایی از قبیل جهش، تکثیر و وارونه‌سازی بهبود می‌یابند و بر اساس شایستگی‌شان انتخاب می‌شوند. در روش GA کروموزوم‌ها هم به عنوان فنوتیپ و هم ژنوتیپ عمل می‌کنند، در این روش همیشه تمام تکثیرکننده‌ها راه‌حل می‌باشند و امکان استفاده‌ی محدوده‌ی خاصی از تکثیرکننده‌ها به عنوان راه‌حل مسئله وجود ندارد.

^۱Phenotype

۳-۴-۳- برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

این روش توسط کرامر در سال ۱۹۸۵ ارائه شد. در این روش ساختارهای غیرخطی (درختان تجزیه) با اندازه و شکل‌های مختلف، به کشف تناوبی از راه‌حل‌ها با طول ثابت انجامید؛ الفبای مورد استفاده در ایجاد این ساختار متنوع‌تر از ساختار ۰ و ۱ افراد GA است. در این روش، ساختارهای غیرخطی از افراد GP مانند کروموزوم‌های خطی GA، تکثیرکننده‌های خطی با نقش دوگانه ژنوتیپ و فنوتیپ هستند، درختان تجزیه قادر به نمایش عوامل متعددی می‌باشند؛ در این روش چون به‌سازی‌ها باید روی خود درختان تجزیه انجام شود، بنابراین تنها دامنه محدودی از به‌سازی‌ها امکان‌پذیر است (فریرا ۲۰۰۶).

۳-۴-۴- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

روش برنامه‌ریزی بیان ژن^۱، توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ارائه شد. این روش برنامه‌ریزی بیان ژن ترکیبی از روش‌های GP و GA است که در آن، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)، ترکیب می‌شوند. از آنجایی که در این روش تمام ساختارهای شاخه‌ای با اندازه و اشکال مختلف، به‌صورت کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کدگذاری می‌شوند، در این روش فنوتیپ و ژنوتیپ از هم جدا شده و سیستم می‌تواند از تمام مزایای تکاملی آن‌ها بهره‌مند شود. با وجود اینکه فنوتیپ در GEP، همان نوع از ساختارهای شاخه‌ای مورد استفاده در GP را شامل می‌شود، اما ساختارهای شاخه‌ای که به‌وسیله GEP استنتاج می‌شوند (که بیان درختی نیز نامیده می‌شود) نشان‌دهنده تمامی ژنوم‌های مستقل می‌باشند. به عبارتی برنامه‌نویسی بیان ژن یک الگوریتم یادگیری تکاملی برای ایجاد مدل‌های بهبودیافته‌ی کامپیوتری است. این مدل دارای

¹ Gene Expression Programming

ساختاری درختی است که برای تعریف آن، از “درخت بیان”^۱ استفاده می‌شود. این ساختار درختی، مشابه یک موجود زنده خودش را، با تغییر اندازه، تغییر شکل و ترکیب‌های مختلف تطبیق داده و آموزش می‌دهد. برنامه نویسی بیان ژن (GEP) از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) به‌طور هدفمند و هم‌زمان بهره‌می‌برد. همانند سایر الگوریتم‌های یادگیری، هدف از به‌کارگیری GEP استخراج روابط بین متغیرها در مجموعه‌ای از داده‌ها و سپس ایجاد مدل برای توضیح این روابط است.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت در GEP به‌سازی‌ها در یک ساختار خطی رخ می‌دهد و سپس به‌صورت ساختار درختی بیان می‌شود و این موجب انتقال تنها ژنوم اصلاح‌شده به نسل بعد می‌شود و نیازی به ساختارهای سنگین برای تکثیر و جهش وجود ندارد (فریرا، ۲۰۰۴).

۳-۴-۱- مراحل اصلی در برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

اولین مرحله در الگوریتم GEP، تولید جمعیت اولیه از راه‌حل‌های کاندید است. سپس کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی (Ets) نمایان می‌شوند، در مرحله بعد باید کارایی یا سازگاری هر عضو جمعیت کروموزوم‌ها را ارزیابی کرد که این عمل با توجه به شاخصی به نام تابع برازش انجام می‌گیرد، به‌عبارتی دیگر در یک فرایند دوره‌ای (تکاملی) با توجه به شاخص برازش، جمعیت‌ها انتخاب و مجدداً تولید می‌شوند. گرچه در حل مسائل با استفاده از GEP نیازی به دانستن دقیق ساختار ریاضی مسئله نیست اما باید بتوانیم به طریقی میزان مطلوبیت هر جواب مثبت مسئله (کروموزوم) و همچنین درجه سازگاری آن را در محیط مسئله ارزیابی نمائیم، آنگاه با حفظ جواب‌های برتر و حذف جواب‌های ضعیف‌تر به تدریج به جواب مطلوب بهینه نزدیک خواهیم شد. در پدیده تکامل و انتخاب طبیعی زیست‌شناختی این نقش بر عهده طبیعت می‌باشد که موجودات سازگارتر را نسبت به موجودات

¹ Expression tree

ناسازگارتر ارجحیت دهد. معیارهای توقف GEP را می‌توان یکی و یا ترکیبی از معیارهای زیر در نظر گرفت.

- عدم بهبود و رسیدن به جوابی بهتر در طی چندین نسل. اگر بین بهترین جواب طی چندین نسل تفاوتی محسوس مشاهده نشود، می‌تواند آن را دلیلی بر رسیدن به جواب بهینه مطلق دانست.
- قابل قبول دانستن جواب، طی تعداد نسل معین. این شرط در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرد که انتظار می‌رود تعداد نسل کمی منجر به یافتن پاسخ بهینه عمومی شود.
- عدم بهبودی و دستیابی به بهترین جواب در طی مدت‌زمان معین. در این معیار اگر طی مدت‌زمان معینی در بهترین جواب انتخاب‌شده نسل آخر بهبودی ایجاد نگردد محاسبات متوقف می‌شود.

به‌طور کلی مراحل اصلی الگوریتم‌های ذکر شده را می‌توان این‌گونه بیان کرد.

در اولین مرحله فرایند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی افراد (جمعیت اولیه) شروع می‌شود. سپس کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی (ET) نمایش داده می‌شوند در مرحله بعدی با استفاده از تابع هدف میزان برازندگی هر فرد ارزیابی می‌شود و بر اساس میزان عملکردشان انتخاب می‌شوند تا اصلاح‌شده و فرزندان با ویژگی‌های جدید تولید کنند، فرزندان تولید می‌شوند، سپس تحت فرایند توسعه قرار گرفته تا راه‌حل خوب و مناسبی به دست آید (فریرا، ۲۰۰۴).

روشی که GEP برای انتخاب افراد بکار می‌برد به روش چرخ رولت^۱ (عملگر انتخاب) معروف است، درواقع اولین مکانیزم، محبوب‌ترین و پرکاربردترین مکانیزم انتخاب بوده که این روش با نام Fitness proportionate selection یا انتخاب بر اساس میزان مناسب بودن تابع برازش کروموزوم نیز نامیده می‌شود. در این روش اعضا بر اساس میزان سازگاری نسبی آن‌ها انتخاب می‌شوند برای این منظور

¹ Roulette-wheel

می‌توان از دایره‌ای که در شکل (۳-۱) آمده استفاده کرد محیط دایره به‌اندازه sum است و اندازه هر تکه از دایره به‌اندازه سازگاری نسبی و یا سازگاری خام هر عضو مربوط است. حال اگر دایره را هم‌چون یک فرفره بچرخانیم احتمال اینکه نشانه‌ی ثابت کنار دایره دریکی از مقاطع توقف کند به‌اندازه آن مقطع و به سازگاری نسبی آن عضو ارتباط دارد (البرزی، ۱۳۸۸).

۳-۴-۲- منطق مکانیزم چرخ رولت

در مکانیزم چرخ رولت هر یک از کروموزوم‌ها بسته به میزان مناسب بودنشان (بر اساس تابع برازش) احتمال انتخاب شدن را دارند. به عبارت دیگر به هر اندازه که یک کروموزوم بهتر باشد احتمال انتخاب شدن آن کروموزوم برای تولید نسل بعدی بیشتر خواهد بود و همچنین عکس این قضیه که هر چه کروموزوم بدتر و نامناسب‌تر باشد، احتمال انتخاب شدن آن کروموزوم برای تولید نسل بعدی کمتر خواهد بود.

۳-۴-۲-۱- شیوه پیاده‌سازی چرخ رولت

در واقع در این گام که همه کروموزوم‌ها ارزیابی شدند یعنی مشخص می‌شود که هر کروموزوم بر اساس تابع برازش چه ارزشی رو به دست آورده است. با استفاده از این مقادیر می‌توان احتمال انتخاب شدن هر کروموزوم رو مشخص کرد. این احتمال به صورت زیر بیان می‌شود:

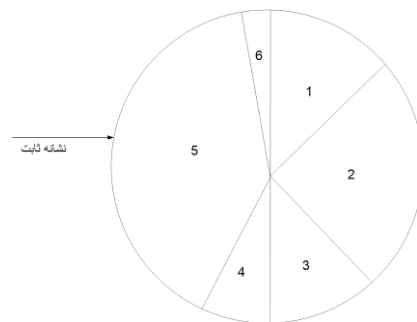
$$\text{Probability (chromosomes C)} = \text{Fitness(chromosomes C)} / \text{Sum Fitness(All chromosomes)}$$

به‌طور خلاصه یعنی، نسبت خوب بودن یک کروموزوم با میزان خوب بودن تمامی کروموزوم‌ها محاسبه می‌شود. هر چه این عدد بزرگ‌تر باشد، احتمال انتخاب آن کروموزوم بیشتر خواهد بود، به عبارت دیگر شانس بیشتری برای تولید نسل بعدی خواهد داشت. و برعکس هر چه این عدد کوچک‌تر باشد احتمال انتخاب آن کروموزوم کمتر است به عبارت دیگر شانس کمتری در تولید نسل بعدی را خواهد داشت (شکل ۳-۲).

بیان ریاضی فرمول بالا به شکل زیر می باشد:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (13-3)$$

به عبارتی احتمال انتخاب کروموزوم i برابر با نسبت تابع برازش کروموزوم i به مجموع تابع برازش همه کروموزومها است.



شکل ۳-۲: چرخ رولت

GEP برخلاف GA و GP، چندین عملگر ژنتیکی را برای تکثیر افراد و اصلاحات دارد که در اینجا به صورت خلاصه به عملگرهای مورد استفاده در GEP اشاره می شود (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

ابداع کروموزومهایی با قابلیت نمایش به صورت درختان تجزیه، نشان دهنده ی بینش اساسی از GEP است. برای این منظور یک زبان جدید موسوم به "کاوالا"^۱ ارائه شد تا بتواند اطلاعات کدگذاری شده در کروموزومها را ترجمه کرده، بخواند و بیان کند، علاوه بر این ساختار کروموزومها به گونه ای طراحی شده که اجازه ایجاد چندین ژن، که هر یک برای برنامه کوچک تر یا زیر بیان درختی کدگذاری می شود را بدهد. لازم به تأکید این مسئله قابل توجه است که GEP تنها الگوریتم چند ژنی می باشد. در حقیقت نقش یک فرزند، در سیستم های ژنوتیپ/ فنوتیپ با عملکرد صحیح، ایجاد افراد پیچیده تر مرکب از چند ژن بوده و تطبیق پذیری زیاد سیستم GEP را به خوبی نشان می دهد. سپس این سیستم ها بعد از ایجاد افراد پیچیده تر، خودشان را به سطوح بالاتری از پیچیدگی همچون سیستم های تک سلولی و

¹ Karava language

چند سلولی می‌رسانند، که در آن‌ها سلول‌های مختلف ترکیب‌های متفاوتی از ژن‌ها را با یکدیگر ارائه می‌دهند (فریرا، ۲۰۰۴).

GEP از لحاظ ساختار فنوتیپ، دارای درختان توابع و ترمینال‌ها هستند که شبیه GP می‌باشد، فنوتیپ خود به‌تنهایی به‌عنوان ژنوم (ژنوتیپ) عمل کرده و در آن مرحله‌ی ترجمه وجود ندارد، درحالی‌که در GEP، فنوتیپ از ترجمه یک ژنوم تحت بررسی (یک کروموزوم خطی) که هدف آن انتخاب عملگرهای ژنتیکی است، به دست می‌آید. در GEP، ژنوم یا اصطلاحاً کروموزوم و فنوتیپ یا به‌اصطلاح، بیان درختی (ET) مجزا می‌باشند. بیان درختی، با استفاده از پروسه ترجمه، از کروموزوم-ها به دست می‌آید و نمایش ETs در محیط، برازش آن و کروموزوم‌های متناظرش را تعیین می‌کند، درحالی‌که این کروموزوم است که تحت انتخاب و فعالیت عملگرهای ژنتیکی قرار می‌گیرد (ویلسون، ۲۰۰۸).

۲-۴-۳ ساختار افراد (GEP)

۳-۴-۴-۳ ORF و بیان درختی (ET) ژن‌ها

در GEP، ژن‌ها به‌صورت بیان درختی کدگذاری می‌شوند. همچنین در کروموزوم‌های چندژنی، همه‌ی بیان‌های درختی با استفاده از تابع پیوند^۱، از محل گره‌ریشه^۲ خود به هم وصل می‌شوند. هر ژن، ناحیه کدگذاری به نام ORF^۳ (چارچوب تفسیر باز) یا بیان K^۴ دارد که بعد از رمزگشایی کد به‌صورت ET نمایان می‌شود که نشان‌دهنده یک راه‌حل کاندید، برای مساله می‌باشد.

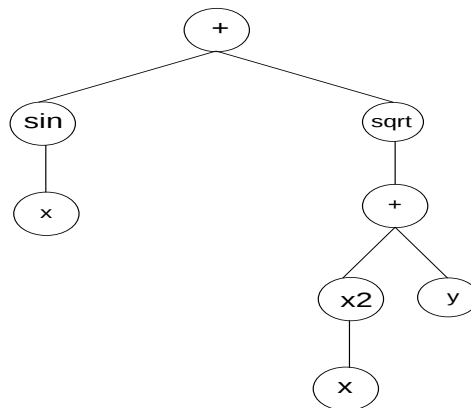
^۱ Linking Function .

^۲ Root Node

^۳ Open Reading Frame

^۴ K-expression

مثال زیر درک بهتری از نحوه کدگذاری ORF و همچنین نحوه‌ی کد برداری به صورت ET را نشان می‌دهد. اگر رابطه ریاضی $F = \sin(x) + \sqrt{x^2 + y}$ در نظر بگیریم، دیاگرام و بیان درختی (ET) آن به صورت شکل (۳-۳) خواهد بود.



شکل ۳-۳: بیان درختی (ET) رابطه $F = \sin(x) + \sqrt{x^2 + y}$

این نوع دیاگرام نشان‌دهنده فنوتیپ افراد GEP می‌باشد. همچنین با تفسیر فنوتیپ و با خواندن ET، از بالا به پایین و از چپ به راست ژنوتیپ به صورت عبارت (۳-۱۴) بیان می‌شود.

0 1 2 3 4 5 6 7 8

(۳-۱۴)

+Sin sqrt x + ^ y x 2

بیان (۳-۱۴) یک ORF می‌باشد که از + (موقعیت ۰) شروع می‌شود و در ۲ (موقعیت ۸) خاتمه

می‌یابد.

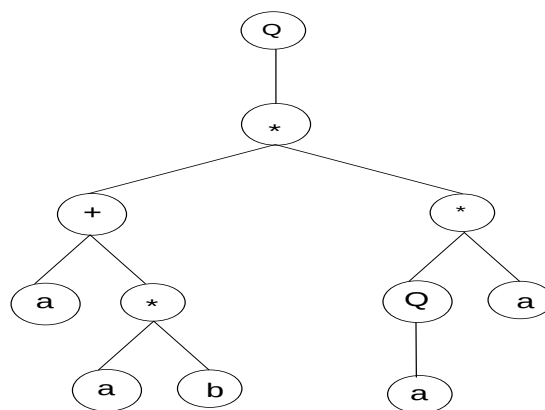
معکوس این فرایند، یعنی ترجمه‌ی بیان K به صورت بیان درختی (ET) نیز به سادگی قابل بیان است. به عنوان مثال بیان K را به صورت عبارت (۳-۱۵) در نظر بگیرید.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

(۳-۱۵)

Q * + * a * Q a a b a

نقطه شروع (موقعیت 0) در ORF، همان گره ریشه ET می‌باشد که در مثال بالا عملگر جمع (+) بود. در مرحله بعد توابع به صورت شاخه‌های افزایشی در زیر گره تا جایی که شناسه توابع وجود داشته باشد به آن متصل می‌شوند، عمل اضافه شدن زمانی پایان می‌پذیرد که خط انتهایی فقط شامل ترمینال‌ها (متغیرها یا مقادیر ثابت مورد استفاده در یک مسئله) باشد. در این مورد بیان ET مشابه شکل (۳-۴) خواهد بود. (فریرا، ۲۰۰۱).



شکل ۳-۴: بیان درختی (ET) رابطه (۳-۱۵)

در GEP کروموزوم‌ها دارای طول ثابت بوده و از یک یا چند ژن با طول مساوی تشکیل می‌شود. لذا در GEP، طول ژن‌ها تغییر نمی‌کند، طول ORFs است که تغییر می‌کند. درحالی‌که در GEP، محل شروع همیشه اولین نقطه از یک ژن است ولی نقطه انتهایی همیشه منطبق با آخرین محل یک ژن نیست. معمولاً برای ژن‌های GEP، نواحی کدگذاری نشده‌ای در قسمت بعد از نقطه انتهایی وجود دارد که چون این نواحی کدگذاری نشده اجازه اصلاحات و به‌سازی‌های ژنوم را بدون محدودیت، با استفاده از هر عملگر ژنتیکی می‌دهند لذا ماهیت GEP و قدرت استنتاج آن به حساب می‌آید، همچنین بدون اینکه نیاز به فرایند ویرایشی پیچیده یا روش‌های تحمیلی در جهت اجرای عملگرهای ژنتیکی داشته باشند، همیشه از نظر قواعد، برنامه‌های صحیحی را تولید می‌کنند، که این مسئله بزرگ‌ترین تفاوت بین GEP و نوع GP بدون ژنوم‌های خطی می‌باشد. (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۴-۴-۳- ساختار ژن‌ها در برنامه‌ریزی بیان ژن

یک کروموزوم از ژن تشکیل می‌شود و معمولاً شامل بیش از یک ژن (کروموزوم چند ژنه) می‌باشد. هر ژن دارای یک سر^۱ و یک دنباله^۲ است که اندازه سر (h) به وسیله کاربر تعیین می‌شود، اما اندازه دنباله (t)، به صورت تابعی از h و پارامتر n، محاسبه می‌شود. پارامتر n، بیشترین تعداد پارامتر مستقل^۳ در مجموعه توابع مورد استفاده در اجرا است. رابطه (۳-۱۶)، طول دنباله را با توجه به پارامترهای موجود محاسبه می‌نماید (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

$$t = h(n-1)+1 \quad (۳-۱۶)$$

مسائل رگرسیونی، با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و مجموعه‌ای از ترمینال‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. مجموعه توابع، عموماً شامل توابع اصلی حسابی {/, X, -, +}. 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 هستند، و در قسمت دنباله، فقط ترمینال‌ها وجود دارند (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

به عنوان مثال ژنی را در نظر بگیرید که شامل {Q, *, /, -, +, a, b} است. در این مثال تعداد متغیرهای مستقل n، ۲ خواهد بود. برای مقادیر طول سر h=10، طول دنباله t=11 به دست می‌آید، بنابراین طول ژن برابر با ۲۱ خواهد بود. برای مثال چنین ژنی در عبارت (۳-۱۷) نشان داده شده است که در آن، قسمت ابتدایی سر و قسمت انتهایی آن دنباله است، که قسمت دنباله به صورت پررنگ نشان داده شده است (فریرا، ۲۰۰۱).

$$012345678901234567890 \quad (۳-۱۷)$$

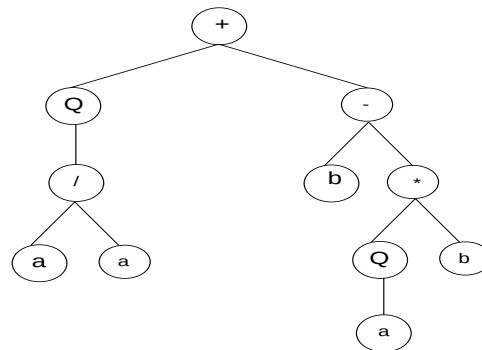
$$+ Q - / b * a a Q b \textbf{ a a b a a b b a a a b}$$

¹ Head

² Tail

³ Arity

با کد برداری بیان درختی آن مطابق با شکل (۳-۵) خواهد بود.



شکل ۳-۵: بیان درختی معادله (۳-۱۷)

در این مثال ORF در موقعیت ۱۰ به پایان می‌رسد درحالی‌که ژن در موقعیت ۲۰ پایان می‌یابد که نشان‌دهنده نواحی کدگذاری نشده می‌باشد.

۳-۵- پیش‌بینی ضرایب روابط تجربی با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن

۳-۵-۱- تابع برازش^۱

یکی از مهم‌ترین موارد در GEP، تعیین تابع برازش است که هدف آن، یافتن راه‌حلی می‌باشد که برای تمامی برازش‌ها به اندازه یک خطای معین به خوبی عمل کند. برای برخی کاربردهای ریاضی، استفاده از خطای نسبی یا مطلق کوچک برای یافتن راه‌حل مناسب، مؤثر است. اما اگر محدوده انتخابی بی‌نهایت کوچک باشد، جمعیت به کندی استنتاج می‌شود و در نتیجه برای یافتن راه‌حل مناسب ناتوان خواهد بود. از طرفی دیگر اگر عکس آن صورت گیرد و محدوده انتخابی وسیع باشد، راه‌حل‌های متعددی با برازش حداکثر، ظاهر می‌شوند که از راه‌حل‌های مناسب دور خواهند بود. برای رفع این مشکل، یک راه‌حل تکاملی اختراع شده است که اجازه یافتن راه‌حل مناسب را بدون توقف تکامل می‌دهد. بنابراین به سیستم اجازه داده می‌شود که برای خودش راه‌حل مناسبی با حداقل خطا بیابد (فریرا، ۲۰۰۱).

^۱ Fitness Function

۳-۵-۲- تعیین تابع برازش

تابع برازش، شاخصی برای انتخاب جفت‌های مناسب می‌باشد و باعث جفت‌گیری در جمعیت کروموزوم‌ها می‌شود. فرایند GEP همچون سایر الگوریتم‌ها زمانی پایان می‌یابد که به ضابطه تعیین‌شده‌ای مثل میزان معین خطای میانگین کارایی اعضای جمعیت رسیده باشد و یا چرخه فرایند به تعداد دلخواهی ادامه یافته باشد، در این صورت بهترین راه‌حل یافت شده تابه‌حال گزارش داده می‌شود و در غیر این صورت بهترین راه‌حل از نسل حاضر نگه‌داشته می‌شود و بقیه راه‌حل‌ها به فرایندی گزینشی واگذار می‌شوند که بر اساس آن بهترین افراد شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. با تکرار روند ذکرشده و با پیش رفتن نسل به جلو کیفیت جمعیت بهبودیافته و به جواب بهینه نزدیک می‌شویم (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

درواقع تابع برازش برای ارزیابی عملکرد هر برنامه خروجی بر مبنای خطای نسبی انتخاب می‌شود و این را به‌وسیله یک محدوده انتخابی و میزان دقت کاوش می‌نماید. محدوده انتخابی، به‌عنوان یک حد انتخاب برای عمل کردن و دقت، حدی برای بهبود می‌باشد؛ به‌طوری‌که اجازه تطبیقی دقیق از راه-حل‌های استخراجی را با صحت کافی و لازم را می‌دهد (فریرا، ۲۰۰۶). از لحاظ ریاضی، برازش f_i از یک برنامه انفرادی i به‌صورت رابطه زیر (۳-۱۸) به دست می‌آید.

$$f_i = \sum_{j=1}^n \left(R - \left| \frac{P_{ij} - T_j}{T_j} \cdot 100 \right| \right) \quad (۳-۱۸)$$

که در آن R طول محدوده انتخابی، P_{ij} مقدار پیش‌بینی‌شده به‌وسیله برنامه انفرادی i برای مورد برازش j (از میان n مورد برازش) T_j مقدار هدف برای مورد برازش j است. لازم به ذکر است که عبارت داخل قدر مطلق متناظر با درصد خطای نسبی می‌باشد و این عبارت را به‌اصطلاح دقت می‌گویند. چنانچه $P_{ij} = T_j$ ، خطا صفر می‌شود. بنابراین برای یک برازش کامل که در آن $P_{ij} = T_j$ عبارت داخل قدر مطلق صفر خواهد شد و مقدار f_i از یک برنامه انفرادی i برابر با $f_i = f_{\max} = nR$ می‌شود (فریرا، ۲۰۰۶).

۳-۵-۲-۱- انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و توابع

مرحله بعد شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای تشکیل کروموزوم‌ها خواهد بود. برای برقراری رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی لازم به تعریف تابعی است که در این تحقیق علاوه بر چهار عمل اصلی $\{+, -, *, /\}$ ، از توابع $\{x^2, x^3, x^{\frac{1}{3}}, \sqrt{x}, \exp, \log, \cos, \sin, \tan^{-1} x\}$ نیز جهت پیش‌بینی مقادیر ضریب ثابت G_d استفاده شده است.

۳-۵-۲-۲- انتخاب ساختار کروموزوم‌ها

مرحله بعد از انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و توابع، انتخاب ساختار کروموزوم‌ها است که شامل انتخاب طول سر و تعداد ژن‌ها می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد یک کروموزوم از ژن‌ها تشکیل می‌شود و معمولاً شامل بیش از یک ژن (کروموزوم چند ژنه) می‌باشد و همچنین هر ژن دارای دو قسمت سر و یک دنباله است. اندازه سر یک ژن (h) به وسیله کاربر تعیین می‌شود، اما اندازه دنباله (t)، به صورت تابعی از اندازه سر ژن (h) و پارامتر n حاصل می‌شود. پارامتر n ، بیشترین تعداد پارامتر مستقل یافت شده در مجموعه توابع مورد استفاده در اجراست (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

۳-۵-۲-۳- انتخاب تابع پیوند

کروموزوم‌ها در GEP، معمولاً از چند ژن با طول مساوی تشکیل می‌شوند. برای هر مسئله یا هر اجرا، تعداد ژن‌ها نیز همانند طول سر قابل انتخاب است. هر ژن، به صورت یک زیر بیان درختی کدگذاری می‌شود. در مسائلی که فقط یک خروجی دارند، sub-ETs (زیر بیان درختی‌ها) به وسیله اثر متقابل بر یکدیگر، یک مجموعه از چند زیر واحد ET را تشکیل داده و خروجی موردنظر را به دست می‌دهند، درحالی‌که در مسائل با چند خروجی هر sub-ETs به طور مستقل، خروجی مربوط به خودش را استنتاج می‌کند. در ساختارهای چند زیر واحدی افراد sub-ETs بر روی یکدیگر به وسیله نوع ویژه‌ای

از پیوند اثر می‌کنند. برای مثال sub-ETs جبری می‌توانند به‌وسیله جمع یا تفریق پیوند زده شوند و یک خروجی را تولید کنند.

استفاده از کروموزوم‌های چندژنی، جهت استنتاج راه‌حل‌های خوب مناسب‌تر هستند، به‌طوری‌که در آن هر ژن، برای بلوک‌های ساختمانی کوچک‌تر و ساده‌تر کدگذاری می‌شود. این بلوک‌های ساختمانی از نظر فیزیکی از هم جدا می‌شوند و بنابراین به‌طور مستقل، می‌توانند استنتاج شوند. نتایج استفاده از هر دو نوع سیستم‌های چندژنی و تک ژنی، نشان می‌دهد در اکثر موارد استفاده از سیستم‌های چندژنی مؤثرتر از نوع تک ژنی هستند. سیستم استفاده‌شده در این تحقیق نیز از نوع چندژنی است که در آن سه ژن انتخابی (زیر درخت‌ها یا همان ETs) از طریق تابع جمع به هم پیوند داده می‌شوند.

۳-۵-۲-۴ مدل‌سازی GEP

در این پژوهش برای مدل‌سازی در روش GEP، داده‌های آزمایشگاهی موجود به دودسته تقسیم می‌شوند. ۸۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آزمون می‌باشد، سه پارامتر ورودی و یک پارامتر هدف داریم.

۳-۶- شبکه عصبی GMDH

شبکه عصبی GMDH یا به‌بیان دیگر روش دسته‌بندی گروهی داده‌های عددی^۱ توسط پروفیسور ایواخنینکو، دانشمند اکرایی معرفی و توسعه یافت. ساخت مدل برای سیستم‌های پیچیده از نوع رگرسیون با درجات بالا به‌عنوان روش یادگیری جست‌وجو کننده^۲، از مزایای GMDH نسبت به مدل‌سازی‌های کلاسیک دیگر می‌باشد.

^۱ Group Method of Data Handling

^۲ Heuristic

GMDH روشی خودسازمانده بوده که بر اساس ارزیابی داده‌ها به صورت جداگانه با استفاده از معیار خارجی برای مدل‌سازی‌های پیچیده بکار می‌رود. در مدل‌سازی GMDH، مدل‌های خطی و غیرخطی احتمالی یا دسته‌بندی‌شده با استفاده از کمینه شدن یک معیار خارجی حاصل می‌شوند. الگوریتم‌های خوشه‌بندی‌شده نسبتاً ساده بوده و اطلاعات خود را مستقیماً از داده‌های ورودی می‌گیرند. متغیرهای مؤثر بر روی فرایند به عنوان متغیر ورودی معرفی و مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین متغیرهای تأثیرگذار ورودی، تعداد لایه‌ها و نرون‌ها در لایه‌های مخفی و همچنین ساختار بهینه‌ی مدل به صورت خودکار تعیین می‌شوند و این عمل بر اساس اثر کمینه‌سازی و بهینه‌سازی معیار خارجی در حین کامل شدن ساختار انجام می‌گیرد.

روش مدل‌سازی GMDH برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، پیش‌بینی، استخراج داده‌های فرآیندهای چند متغیره، الگوشناسی و شیوه‌های تشخیص و... بسیار مفید و پرکاربرد می‌باشد. همچنین روش دسته‌بندی گروهی داده‌های عددی برگرفته از روش استقرایی برای مدل‌سازی ریاضی سیستم‌های پیچیده است.

از سال ۱۹۸۶ تحقیقات بسیاری در زمینه‌های گوناگون با استفاده از شبکه عصبی GMDH انجام گرفته است. تحقیقات انجام‌شده نشان داده، با استفاده از روش GMDH برای داده‌های کم، مغشوش و یا نه‌چندان دقیق هم می‌توان به بهترین و بهینه‌ترین مدل دست‌یافت که دارای دقتی بالا و ساختاری ساده‌تر نسبت به ساختار سایر مدل‌ها باشد.

۳-۶-۱- تاریخچه شبکه‌های عصبی از نوع GMDH

GMDH یکی از بهترین روش‌ها برای حل مسائلی از قبیل شناسایی، پیش‌بینی کم تعداد یا دامنه‌دار فرآیندهای تصادفی و شناسایی الگو در سیستم‌های پیچیده است. این روش در گروه سیستم‌های متحد کنترلی (CCS) در انستیتو سیرنیتیک در کیف اکران در سال ۱۹۸۶ گسترش یافت.

در حال حاضر محققان و دانشمندان بسیاری برای گسترش تئوری و کاربرد GMDH تلاش می‌کنند و این تلاش‌ها فقط به پرفسور ایواخنینکو ابداع‌کننده این روش برنمی‌گردد، بلکه سایر محققین نیز به‌نوبه خود فعالیت‌هایی در این زمینه دارند.

۳-۶-۲- ماهیت شبکه‌های عصبی

برای معرفی و شناخت شبکه‌های عصبی به‌طور کلی دو دیدگاه اصلی وجود دارد.

دیدگاه اول: در دیدگاه اول شبکه عصبی را علمی مستقل در نظر گرفته که دارای ساختار شبکه‌های عصبی است که دارای توانایی بالایی در شناسایی و مدل‌سازی می‌باشد. پایه و اساس این دیدگاه بر اساس آموزش شبکه‌های عصبی بوده و الگوریتم‌هایی که شبکه‌ها در اختیار دارند به‌عنوان ابزاری برای آموزش و یادگیری شبکه است. به عبارت دیگر هر یک از شبکه‌ها الگوریتم متفاوتی را به خدمت می‌گیرند تا از این طریق یک آموزش بهینه داشته باشند.

دیدگاه دوم: در دیدگاه دوم شبکه‌های عصبی به‌عنوان ابزاری علمی برای پیاده‌سازی و تفهیم الگوریتم‌های پیچیده ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نظریه برعکس دیدگاه اول، شبکه عصبی به‌عنوان فلوچارتی برای الگوریتم‌های پیچیده ریاضی است.

با توجه به تاریخچه و ماهیت شبکه‌های عصبی GMDH باید آن را از دیدگاه دوم در نظر گرفت زیرا شبکه‌های عصبی GMDH با به‌کارگیری ساختار شبکه‌ای برای الگوریتم GMDH به وجود آمده‌اند و تأثیر بسزایی در پیاده‌سازی نرم‌افزاری و تفهیمی آن داشته‌اند. همچنین در سال‌های اخیر استفاده از شبکه‌های خودسازمانده عصبی در الگوریتم GMDH منجر به موفقیت این الگوریتم در عرصه‌های مختلف علمی از قبیل فنی‌مهندسی، علوم و اقتصاد شده است.

۳-۶-۳- الگوریتم GMDH

به طور کلی می توان الگوریتم GMDH را می توان از دو دیدگاه متفاوت بررسی نمود. لذا در قسمت اول این الگوریتم بر اساس مبنای ریاضی آن و در قسمت دوم بر اساس تئوری و آنالیز مدل سازی سیستم معرفی خواهد شد.

۳-۶-۳-۱- الگوریتم GMDH بر مبنای ریاضی

بر اساس مبنای ریاضی، الگوریتم GMDH از تجزیه ی سری توابع ولترا به چند جمله ای های دومتغیره درجه دوم به دست آمده و بر مبنای آن پایه ریزی می شوند. تابع ولترا به صورت تابع (۳-۱۹) می باشد.

$$G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_j^2 + a_5 x_i x_j \quad (۳-۱۹)$$

که در این تجزیه، سری ولترا به مجموعه ای از معادلات بازگشتی زنجیره ای تبدیل می گردد، به گونه ای که مجدداً با جایگذاری جبری هر یک از روابط بازگشتی در یکدیگر این رابطه (سری ولترا) برقرار می گردد. لذا خواهیم داشت:

<i>Principal System</i>											
<i>input</i>						<i>Output</i>					
x_{11}	x_{12}	x_{13}		x_{1m}		y_1					
x_{12}	x_{22}	x_{23}		x_{2m}		y_2					
x_{N1}	x_{N2}	x_{N3}		x_{Nm}		y_N					

<i>Partial System (1)</i>			<i>Partial System (2)</i>				<i>Partial System (m-1)</i>				<i>Partial System (Cm2)</i>		
x_{11}	x_{12}	y_1	x_{11}	x_{13}	y_1		x_{11}	x_{1m}	y_1		x_{1m-1}	x_{1m}	y_1
x_{21}	x_{22}	y_2	x_{21}	x_{23}	y_2		x_{21}	x_{2m}	y_2		x_{2m-1}	x_{2m}	y_2
.....													
x_{N1}	x_{N2}	y_N	x_{N1}	x_{N3}	y_N		x_{N1}	x_{Nm}	y_N		x_{Nm-1}	x_{Nm}	y_N

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

۳-۶-۲- معرفی الگوریتم GMDH بر اساس تئوری و آنالیز مدل سازی

سیستم‌ها

سیستم‌های پیچیده‌ای را که دارای m متغیر ورودی و یک خروجی هستند می‌توانند به تعداد $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{2}$ سیستم جزئی^۱ ساده که دارای دو ورودی و یک خروجی است تجزیه شوند. البته خروجی تمامی سیستم‌های جزئی، یکسان و همانند خروجی سیستم اصلی در نظر گرفته می‌شود. برای ترکیب دو سیستم جزئی در قالب یک سیستم واحد و تشکیل سیستم جزئی جدید دیگر به‌طوری که متغیرهای هر دو سیستم قبلی را داشته باشد، کافی است که خروجی و یا مقادیر تخمین زده هر دو مدل به‌دست‌آمده به ازای N نمونه ورودی مجدداً مدل شود.

الگوریتم GMDH برای مدل‌سازی، از این دو قاعده استفاده می‌کند. در این روش بعد از شکل‌گیری سیستم‌های جزئی و یا به عبارتی متغیرهای ورودی سیستم در دسته‌های دوتایی همراه با خروجی‌های یکسان دسته‌بندی می‌شوند، برای هر یک از این سیستم‌های شکل‌گرفته، تابع $\hat{f}$ که همان مدل سیستم جزئی است به صورت معادله (۳-۲۰) تشکیل داده می‌شود.

$$\sum_{k=1}^N \left[\left(\hat{f}(x_{ki}, x_{kj}) - y_k \right)^2 \right] \rightarrow \text{Min} \quad (۳-۲۰)$$

همچنین تمامی مدل‌های جزئی حاصل از یک ساختار متشابه، دارای ساختاری همچون رابطه (۳-۲۱) می‌باشند:

$$\hat{f}(x_i, x_j) = v_0 + v_1 x_i + v_2 x_j + v_3 x_i^2 + v_4 x_j^2 + v_5 x_i x_j \quad (۳-۲۱)$$

¹ Partial System

با توجه به اینکه در این مدل سازی هدف به دست آوردن مدل سیستم اولیه است، لذا با ترکیب مدل سیستم های جزئی و تکرار این عمل، به عبارتی با ترکیبی از ترکیب های مدل، می توان به مدل اصلی سیستم که به فرم رابطه (۲۲-۳) می باشد، دست یافت.

$$\hat{y} = v_0 + \sum_{i=1}^m v_i X_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m v_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m v_{ijk} X_i X_j X_k + \dots \quad (22-3)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & X_{1p} & X_{1q} & X_{1p}^2 & X_{1q}^2 & X_{1p}X_{1q} \\ 1 & X_{2p} & X_{2q} & X_{2p}^2 & X_{2q}^2 & X_{2p}X_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{Np} & X_{Nq} & X_{Np}^2 & X_{Nq}^2 & X_{Np}X_{Nq} \end{pmatrix}$$

۳-۳-۶-۳- مدل سازی سیستم های جزئی

با توجه به مطالبی که قبلاً ذکر شد، مدلی که برای سیستم های جزئی در نظر گرفته می شود، چند جمله ای دومتغیره ی درجه دوم است که به صورت رابطه (۲۳-۳) می باشد:

$$y_i = f(x_{ip}, x_{iq}) = a_0 + a_1 x_{ip} + a_2 x_{iq} + a_3 x_{ip}^2 + a_4 x_{iq}^2 + a_5 x_{ip} x_{iq} \quad (23-3)$$

همان طور که می بینیم، تابع f دارای شش ضریب مجهول می باشد. در ادامه تابع G را بر اساس قاعده کمترین مربعات خطا پایه ریزی می کنیم.

$$\sum_{k=1}^N \left[\left(\hat{f}(x_{ki}, x_{kj}) - y_k \right)^2 \right] \rightarrow Min \quad (24-3)$$

با توجه به شرایط حاکم بر مسئله، دستگاه معادله شامل شش مجهول و N معادله را حل می کنیم:

فرم ماتریسی دستگاه معادله فوق به شکل زیر نمایش داده می شود:

[illegible]

$$a = \{a_0. a_1. a_2. a_3. a_4. a_5\}^T$$

که در آن

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}^T$$

برای حل معادله باید معکوس ماتریس غیرمربعی A محاسبه شود. برای محاسبه معکوس ماتریس غیرمربعی A ، از روش SNE^1 استفاده شده است که در ادامه روش و روند حل مسئله شرح داده می-شود.

۳-۶-۳-۴- روش حل معادلات متعامد (SNE)

در روش SNE، شبه معکوس ماتریس حقیقی A ، ماتریس منحصربه‌فرد A^* است که طبق رابطه (۳)-۲۵ محاسبه می‌گردد:

$$A^* = (A^T A)^{-1} A^T \quad (25-3)$$

بنابراین بردار ضرایب مجهول a با توجه به رابطه (۳-۲۶) به دست می‌آید:

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (26-3)$$

شبکه‌های عصبی GMDH جلوه‌ای از الگوریتم‌های GMDH هستند که به فرم و سبک ساختار شبکه‌ای بیان شده‌اند. پیاده‌سازی الگوریتم GMDH با استفاده از شبکه‌های عصبی باعث انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی آن، به واسطه به وجود آمدن ساختارهای شبکه‌ای مختلف و همچنین زمینه‌ای برای

'Solving Normal Equation

سهولت در ایجاد نرم افزارهای کامپیوتری شده است. به طور کلی به کار بردن شبکه‌ها در این الگوریتم، باعث ساده‌تر و منطقی شدن ادغام و آنالیز مدل‌ها و یا توابع جزئی به روش‌های گوناگون شده است که این امر منجر به تنوع در انتخاب مدل بهینه در راستای کاهش میزان خطای مدل و نیز حجم و محتوای تابع ریاضی مدل می‌شود.

۳-۶-۴- ویژگی‌های عمومی شبکه‌های GMDH

شبکه‌های عصبی GMDH، شبکه‌ای خود سامانده و یک‌سویه هستند که دارای چندین لایه بوده که هر لایه نیز از چندین نرون تشکیل شده است. تمامی نرون‌ها دارای یک ساختار مشابه هستند. به عنوان مثال برای ۵ پارامتر ورود، همه‌ی آن‌ها دو ورودی و یک خروجی دارند و هر نرون با ۵ وزن و یک بایاس عمل پردازش را میان داده‌های ورودی و خروجی انجام می‌دهد.

(۲۷-۳)

$$y_{ik} = N(x_i \alpha, x_i \beta) = b^k + w_1^k x_{i\alpha} + w_2^k x_{i\beta} + w_3^k x_{i\alpha}^2 + w_4^k x_{i\beta}^2 + w_5^k x_{i\alpha} x_{i\beta} \quad [2]$$

در رابطه (۲۷-۳)، $i = 1, 2, 3, \dots, N$ می‌باشد که در آن N تعداد نمونه‌های ورودی و خروجی بوده و $K = 1, 2, 3, \dots, C_m^2$ می‌باشد که در آن‌ها m تعداد نرون‌های لایه قبلی می‌باشد.

وزن‌ها بر اساس روش SVD محاسبه می‌شوند و به عنوان مقادیر مشخص و ثابت در داخل هر نرون جایگذاری می‌شوند. ویژگی منحصر به فردی که در این شبکه‌ها بارز است این است که نرون‌های مرحله قبلی و یا لایه قبلی (m) عامل و یا مولد تولید نرون‌های جدید به تعداد $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{2}$ می‌باشند که از میان این نرون‌های تولید شده، لزوماً باید تعدادی از آن‌ها حذف شوند تا از واگرایی شبکه جلوگیری شود. اصطلاحاً این نرون‌های حذف شده، به نرون‌های مرده معروف هستند. همچنین امکان دارد نرون‌های باقیمانده برای ادامه و گسترش شبکه، برای رسیدن به شکل همگرایی شبکه و عدم ارتباط آن‌ها با نرون لایه آخر حذف شوند که اصطلاحاً به آن‌ها نرون غیرفعال می‌گویند. ملاک و معیاری را

که برای گزینش و حذف مجموعه‌ای از نرون‌ها در یک‌لایه در نظر گرفته می‌شود، میزان مجموع مربعات خطا (r_j^2) بین مقادیر خروجی واقعی (y_i) و خروجی نرون j ام (y_{ij}^*) می‌باشد.

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ij}^*)^2}{N} \quad (28-3)$$

در رابطه‌ی (28-3) $\{1, 2, 3, \dots, C_m^2\}$ j می‌باشد که در آن m تعداد نرون‌های گزینش‌شده در لایه قبلی می‌باشد.

3-6-5- طراحی ساختارهای گوناگون برای شبکه‌های GMDH

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه (پرسپترون و ...) مطرح می‌باشد، طراحی ساختار شبکه است. در این طراحی باید تعداد لایه‌ها و نیز ساختار درونی از قبیل تعداد وزن‌ها و مقادیر اولیه آن‌ها و همچنین تابع تحریک هر نرون به‌صورت مناسب انتخاب گردند تا یک نگاشت مناسب و ایده‌آل میان داده‌های ورودی و خروجی برقرار شود. در این نوع از طراحی، هدف جلوگیری از رشد گرایی شبکه و نیز مرتبط کردن شکل و ساختار شبکه به یک یا چند پارامتر عددی است، به‌گونه‌ای که با تغییر این پارامتر ساختار شبکه‌ها نیز تغییر کند.

در طراحی ساختارهای شبکه‌ها، معمولاً دو اصل کلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌های هر لایه و ارائه روشی برای کنترل و انتخاب آن‌ها

۲- نحوه ارتباط نرون‌ها با یکدیگر و ارائه روشی برای ایجاد ارتباط بهینه میان آن‌ها

3-6-6- کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه‌های عصبی

روش‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک در طراحی پارامترهای مختلف شبکه‌های عصبی کاربردهای وسیعی دارند، زیرا این روش، تنها روش برای پیدا کردن بهینه سراسری در فضای جستجو که مشتق

پذیر نیست، می‌باشد. این قبیل روش‌های تصادفی عموماً برای آموزش شبکه‌های عصبی در بهینه سازی وزن‌ها یا ضرایب، نسبت به روش‌های کلاسیک گرادیان عملکرد بهتری دارند. به‌ویژه فضای نامتناهی ساختار پیچیده و ساده برای اتصال بین وزن‌ها بسیار جذاب‌تر و مؤثرتر، توسط الگوریتم تکاملی می‌تواند بهینه‌سازی شود.

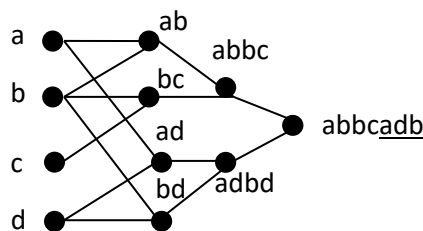
۳-۶-۸- شبکه‌های عصبی با ساختار مرسوم و ساختار عمومی

شبکه‌های عصبی با ساختار مرسوم که CS-GMDH نامیده می‌شوند، برای ساخت نرون‌ها در لایه جدید تنها از نرون‌های لایه مجاور خود استفاده می‌کنند، ولی در شبکه‌های عصبی با ساختار عمومی بانام GS-GMDH برای ساخت نرون در لایه‌ی جدید از نرون‌ها در تمامی لایه‌های قبلی خود استفاده می‌کنند. برای این دو نوع شبکه (CS-GMDH و GS-GMDH) از دو نوع کدگذاری برای الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود که در ادامه نحوه کدگذاری این دو شبکه تشریح می‌شود.

۳-۶-۸-۱- ژنوم نشان‌دهنده‌ی شبکه‌های عصبی از نوع CS-GMDH

ژنوم یا نمایش کروموزوم که جزئیات ساختاری شبکه CS-GMDH را نشان می‌دهد، از رشته‌هایی که اجزای آن حروف الفبا هستند ساخته شده است در این روش کدگذاری، داده‌های مختلف ورودی با حروف الفبا نام‌گذاری گردیده و هر کروموزوم رشته‌ای است که از به هم پیوستن داده‌های ورودی نامگذاری شده ایجاد شده است. بنابراین داده‌های ورودی $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ را می‌توان به صورت رشته‌ای به هم پیوسته از نشانه‌های $\{a, b, c, d, \dots\}$ و جمعیت‌ها را به صورت $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i)$ chromosome = $(a, b, c, \dots)$ نام مستعار داده‌های $x_1, x_2, x_3, \dots$ می‌باشند، معرفی کرد. برای مثال در صورتی که ۴ داده‌ی ورودی موجود باشد، ۴ حرف الفبا مثل a, b, c, d را می‌توان به صورت رشته‌های تک‌حرفی که از به هم پیوستن آن‌ها کروموزوم تشکیل خواهد شد، برای معرفی شبکه‌های مختلف و نیز کروموزوم‌های متفاوت استفاده کرد. بنابراین طول هر کروموزوم 2^k

می‌باشد که $k \in \{1, 2, 3, \dots, (n_i + 1)\}$ و n_i تعداد لایه‌های مخفی می‌باشد و می‌توان به راحتی آن را با شبکه GMDH ترجمه کرد، با توجه به این‌که در چنین شبکه‌ای هر نرون تنها بر مبنای دو نرون لایه قبلی بنا نهاده شده است و طبق تعریف‌های قبلی این شبکه‌ها را شبکه‌های پیش تغذیه شونده گویند. باید در نظر داشت که در اینجا دولایه‌ی مخفی وجود دارد که طول رشته در این مورد بخصوص برابر و معادل با $2^{2+1} = 8$ می‌باشد. این مسئله نیز واضح است که نشانه‌های الفبایی معرفی کننده تعداد نرون‌ها در هر لایه می‌باشد. در این نحوه‌ی معرفی هرکدام از اعداد متوالی 2^1 یا 2^2 یا 2^3 نشان‌دهنده طول رشته‌ها و به تبع آن نشان‌دهنده نرونی مشخص واقع در لایه‌ای مشخص می‌باشد. برای مثال هرکدام از قسمت‌های کروموزوم $ab|bc|ad|bd$ یا $abbc|adbd$ یا $abbcadb|d$ نرون‌ها را در لایه‌های اول (طول 2^1)، دوم (طول 2^2) و خروجی نشان می‌دهد، درست همان‌گونه که در شکل (۳-۶) نمایش داده شده است.

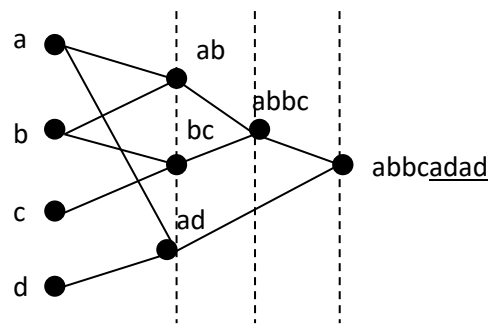


شکل ۳-۶: ساختار شبکه عصبی از نوع CS-GMDH یک کروموزوم

باید توجه داشت که کروموزوم‌ها باید کروموزوم‌های معتبر بوده و وجود خارجی داشته باشند. کروموزوم‌هایی با ترکیب $abab|adbc$ یا $aa|bc|ad|bd$ در شبکه‌های CS-GMDH وجود خارجی ندارند. بنابراین لازم است که هنگام شروع تولید و یا دوباره ساختن کروموزوم‌ها به این نکته توجه داشت که ترکیب موردنظر وجود خارجی داشته باشد. ساختن تصادفی کروموزوم‌ها تا ساخته شدن کروموزوم معتبر ادامه خواهد داشت. بنابراین لازم است که سالم بودن هر کروموزوم ساخته شده بررسی شود و این بررسی می‌بایست هم در شروع ساختن کروموزوم‌ها و هم در حین دوباره‌سازی آن‌ها انجام گیرد.

۳-۶-۸-۲- ژنوم نشان دهنده شبکه‌های عصبی از نوع GS-GMDH

از مفاهیم گفته شده در کدگذاری شبکه‌های CS-GMDH استفاده می‌شود تا کدگذاری شبکه‌های GS-GMDH به نحو مطلوب انجام گیرد. همان‌طور که در کدبندی شبکه‌های عصبی نوع CS-GMDH مشاهده شد به‌طور کلی فرمول $2^{HL+1} = \text{Length of neuron}$ (HL نشان دهنده تعداد لایه‌های مخفی است)، ارتباط بین طول نرون و تعداد لایه‌های مخفی را در این کدگذاری نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال کروموزوم abbcadb که به طول ۸ می‌باشد طبق فرمول دارای دو لایه مخفی ($2^{2+1} = 8$) است. همچنین از این کدگذاری کاملاً مشخص است که هر نرون به طول 2^n متعلق به لایه n ام است. برای شبکه‌ی فوق (abbcadb) کلیه نرون‌ها با طول دو (2^1) متعلق به لایه اول (ad|bc|ab|bc)، و کلیه نرون‌ها با طول چهار (2^2)، متعلق به لایه دو (abbc|acbc) و... از این خاصیت استفاده می‌شود تا ژنومی برای شبکه عصبی نوع GS-GMDH تشکیل یابد. در شبکه‌ی عصبی نوع GS-GMDH نرون‌ها با طول‌های مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در حقیقت نرون با طول کوچک‌تر باید از چند لایه‌ی مخفی جهش کند و با نرون با طول بزرگ‌تر ترکیب شود. برای حل این مشکل نام نرون‌هایی که از لایه‌ها جهش می‌کنند، تکرار می‌شود. در شکل (۷-۳) مشاهده می‌شود که نرون ad در لایه مخفی اول با جهش از لایه مخفی دوم با نرون abbc (با طول بزرگ‌تر) ترکیب شده و نرون abbc adad را تشکیل داده است. در حقیقت نرون مجازی بانام adad در لایه مشابه نرون abbc ساخته شده با آن ترکیب می‌گردد. تعداد تکرار نرون با طول کوچک‌تر برابر 2^n است، که در آن n نشان دهنده تعداد لایه‌هایی است که نرون از آن‌ها جهش کرده است. کروموزوم‌هایی نظیر acacabad در کدگذاری شبکه‌های نوع GS-GMDH غیرقابل قبول اند، زیرا به راحتی می‌توان آن‌ها را به صورت acad نمایش داد. کاملاً مشخص است که شبکه CS-GMDH زیرمجموعه‌ای از شبکه GS-GMDH می‌باشد.



شکل ۳-۷: کروموزوم مربوط به شبکه عصبی نوع GS-GMDH

فصل چهارم

نتایج

مدل سازی ها

۴-۱- مقدمه

در فصل قبل روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در این مطالعه تشریح شد. در این فصل ابتدا همبستگی داده‌ها ارزیابی شده، سپس به شرح نتایج حاصل از مدل‌سازی و ساختارهای ایجاد شده پرداخته شد و همچنین نمودارهای حاصل را بررسی کرده و در پایان مقایسه‌ای پیرامون نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی موجود انجام شد.

۴-۲- آزمون همبستگی پارامترها

ضریب همبستگی ابزاری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر با متغیر کمی دیگر می‌باشد. این ضریب به گونه‌ای تعریف شده است که مقادیر بین -1 تا $+1$ را دربر می‌گیرد. زمانی یک همبستگی کامل رخ می‌دهد که بتوان مقدار یک متغیر را از روی مقدار متغیر دیگر دقیق پیش‌بینی کرد. همچنین این ضریب به شکل بیضی است و هر چه ضریب به ± 1 نزدیک‌تر باشد قدر مطلق ضریب همبستگی پیروسون بزرگ‌تر بوده و رابطه قوی‌تر می‌باشد. هنگامی که رابطه‌ای بین دو متغیر وجود نداشته باشد نمودار پراکنش نیز به شکل دایره نزدیک می‌شود. همچنین این همبستگی به شکل ماتریس نیز نشان داده می‌شود که (***) نشان‌دهنده بامعنی بودن و همبستگی بیشتر در سطح $0/01$ و علامت (*) معنی‌دار بودن در سطح $0/05$ درصد را نشان می‌دهد. آزمون ضریب همبستگی برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی و سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی انجام شده است. در این جداول تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده در سرریز ذکر شده است که از بین همه پارامترهای موجود، پارامترهایی که دارای (***) می‌باشند تأثیرگذارترین پارامترها هستند و سلول‌هایی که پررنگ‌تر هستند پارامترهایی با تأثیر خیلی کم می‌باشند. نتایج حاصل از ارزیابی همبستگی پارامترهای موجود برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی و مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس‌های 60° ، 90° و 120° درجه به ترتیب در جدول‌های (۴-۱، ۴-۲، ۴-۳ و ۴-۴) ارائه شده است. پارامترهای بررسی شده شامل:

عرض سرریز مرکزی (b_1)، عرض سرریزهای موجود در دو طرف سرریز مرکزی (b_2)، عرض کانال (B)، ارتفاع وزنی سرریز مرکزی و سرریزهای دو طرف به ترتیب (w_1) و (w_2)، عمق جریان بالادست (Y)، دبی جریان بالادست (Q)، دبی جریان عبوری از سرریز (Q_s)، دبی جریان به سمت پایین دست کانال اصلی (Q_1)، میانگین ارتفاع وزنی ($\bar{W}$)، طول سرریز (L)، عدد فرود بالادست جریان (Fr)، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{\bar{W}}{Y}$)، نسبت طول سرریز به عرض کانال ($\frac{L}{B}$)، نسبت طول سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{L}{Y}$).

جدول ۴-۱: ضریب همبستگی بین پارامترهای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی.

CRRSC	b1	b2	w1	w2	L	Y	Q	Qs	Q1	Fr	Wbar	B	W/Y	L/B	Cd
b1	1	.798**	.690**	.758**	.980**	.848**	.876**	.885**	.743**	-.067	.744**	.872**	.018	-.225**	.357**
b2		1	.458**	.563**	.902**	.637**	.748**	.773**	.625**	.286**	.485**	.737**	-.330**	-.061	.046
w1			1	.747**	.646**	.916**	.775**	.629**	.752**	-.406**	.986**	.735**	.410**	-.474**	.625**
w2				1	.729**	.824**	.753**	.648**	.708**	-.312**	.843**	.698**	.328**	-.273**	.416**
L					1	.818**	.875**	.889**	.739**	.046	.693**	.868**	-.096	-.182**	.271**
Y						1	.903**	.867**	.795**	-.322**	.937**	.839**	.138**	-.414**	.466**
Q							1	.851**	.946**	.026	.803**	.893**	-.016	-.426**	.370**
Qs								1	.636**	-.128*	.662**	.777**	-.199**	-.179**	.236**
Q1									1	.117*	.774**	.835**	.098	-.516**	.399**
Fr										1	-.415**	.043	-.560**	.025	-.589**
Wbar											1	.760**	.423**	-.451**	.612**
B												1	-.034	-.645**	.305**
W/Y													1	-.099	.685**
L/B														1	-.220**
Cd															1

نتایج ارائه شده در جدول حاکی از آن است که پارامترهایی همچون Fr با سایر پارامترها بیشترین همبستگی را دارد، یا به طور مثال پارامترهایی مانند w_1 , w_2 , Y از پارامترهای موثر بر ضریب دبی بوده و دو ستاره دارند پس به جای استفاده از این سه پارامتر به صورت مجزا، از پارامتر $\frac{\bar{W}}{Y}$ استفاده می - شود که هر سه پارامتر را شامل می شود. همچنین برای سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه نیز به همسن طریق جداول ارائه شده است.

جدول ۴-۲: ضریب همبستگی بین سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.

60°	b1	b2	w1	w2	L	Y	Q	Qs	Q1	Fr	Wbar	W/Y	L/Y	Cd
b1	1	-.195**	-.277**	-.058	.973**	-.089	.028	.333**	-.201**	.086	-.025	.078	.821**	.202**
b2		1	.500**	-.571**	.035	-.005	-.014	-.031	.009	-.014	.155*	.087	.025	.209**
w1			1	.425**	-.165*	.191**	-.091	-.242**	.085	-.226**	.911**	.375**	-.232**	.170*
w2				1	-.193**	.186**	-.071	-.197**	.071	-.200**	.702**	.265**	-.246**	-.057
L					1	-.092	.025	.332**	-.202**	.084	.011	.100	.842**	.255**
Y						1	.146*	.809**	-.420**	-.651**	.207**	-.792**	-.596**	-.812**
Q							1	.172*	.747**	.634**	-.097	-.203**	-.065	-.223**
Qs								1	-.526**	-.482**	-.193**	-.856**	-.176*	-.703**
Q1									1	.873**	.047	.402**	.062	.282**
Fr										1	-.242**	.449**	.410**	.469**
Wbar											1	.421**	-.099	.165*
W/Y												1	.504**	.878**
L/Y													1	.655**
Cd														1

جدول ۴-۳: ضریب همبستگی بین سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه.

90°	b1	b2	w1	w2	L	Y	Q	Qs	Q1	Fr	Wbar	L/Y	W/Y	Cd
b1	1	-.824**	-.481**	.359**	.559**	-.125	-.039	-.089	.024	.074	.101	.361**	.197**	.030
b2		1	.520**	-.526**	.009	.079	.010	.156*	-.090	-.068	-.107	-.073	-.159*	.103
w1			1	.419**	-.088	.196**	-.007	-.140*	.083	-.172*	.780**	-.219**	.386**	.446**
w2				1	-.136	.123	-.021	-.315**	.182*	-.110	.868**	-.168*	.527**	.203**
L					1	-.105	-.053	.070	-.090	.031	.021	.530**	.114	.203**
Y						1	.130	.876**	-.445**	-.657**	.163*	-.886**	-.697**	-.554**
Q							1	.116	.777**	.640**	-.023	-.147*	-.131	-.163*
Qs								1	-.536**	-.565**	-.275**	-.699**	-.901**	-.620**
Q1									1	.903**	.155*	.318**	.460**	.255**
Fr										1	-.153*	.568**	.427**	.300**
Wbar											1	-.139	.582**	.433**
L/Y												1	.640**	.570**
W/Y													1	.793**
Cd														1

جدول ۴-۴: ضریب همبستگی بین سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه.

120°	b1	b2	w1	w2	Y	Q	Qs	Q1	Fr	Wbar	W/Y	L/Y	Cd
b1	1	-1.000**	-.237**	.571**	.112	-.013	-.155*	.098	-.076	.326**	.288**	-.098	-.076
b2		1	.237**	-.571**	-.112	.013	.155*	-.098	.076	-.326**	-.288**	.098	.076
w1			1	.659**	.454**	.005	-.127	.095	-.343**	.840**	.479**	-.460**	.048
w2				1	.471**	-.004	-.225**	.156*	-.349**	.960**	.624**	-.467**	-.020
Y					1	.174*	.721**	-.353**	-.620**	.507**	-.349**	-.989**	-.645**
Q						1	.265**	.728**	.645**	-.003	-.148	-.165*	.092
Qs							1	-.469**	-.345**	-.207**	-.865**	-.707**	-.608**
Q1								1	.836**	.145	.479**	.352**	.517**
Fr									1	-.379**	.160*	.635**	.570**
Wbar										1	.625**	-.505**	.009
W/Y											1	.349**	.590**
L/Y												1	.644**
Cd													1

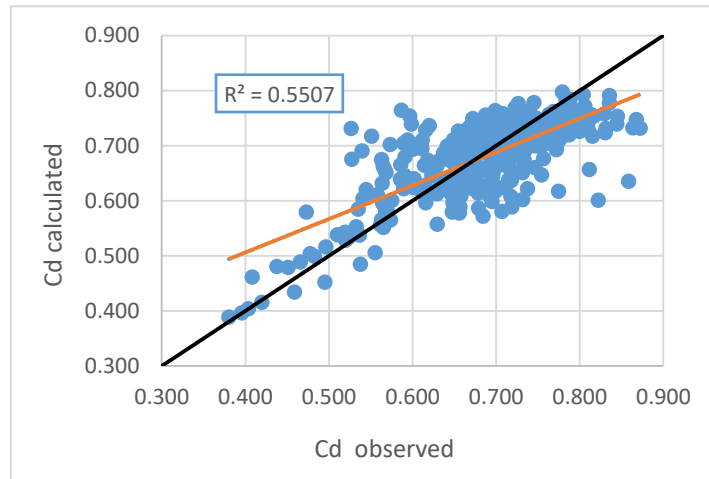
بررسی جداول نشان می‌دهند که پارامترهایی که در مدل‌سازی‌ها استفاده شده‌اند، پارامترهایی با بیشترین تأثیر هستند.

۳-۴- نتایج حاصل از روش مستقیم برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی

با داشتن پارامترهای آزمایشگاهی موردنیاز، مقدار C_d اندازه‌گیری شده و با استفاده از روش حداقل - سازی مجموعه مربعات خطا و تحلیل ابعادی و پس از انجام محاسبات و رگرسیون غیرخطی در اکسل ضرایب مجهول محاسبه و رابطه زیر برای ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ارائه گردید.

$$C_d = 0.7698 - 0.3327Fr_1^{0.1722} + 0.5685 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.5885} - 0.2163 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.5348} \quad (۱-۴)$$

تغییرات ضریب دبی محاسباتی نسبت به ضریب دبی مشاهداتی در شکل (۱-۴) نمایان است. در این مقایسه محور افقی مقدار ضریب دبی مشاهده شده در آزمایشگاه بوده و محور عمودی نشان دهنده ضریب دبی محاسبه شده برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی از فرمول (۱-۴) است که ضریب رگرسیون برابر ۰/۵۵۱ بدست آمد.



شکل ۴-۱: مقایسه ضریب دبی بر اساس ضریب دبی رابطه (۴-۱) با نتایج آزمایشگاهی

برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی

۴-۴- نتایج حاصل از محاسبه ضریب دبی در روش مستقیم برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

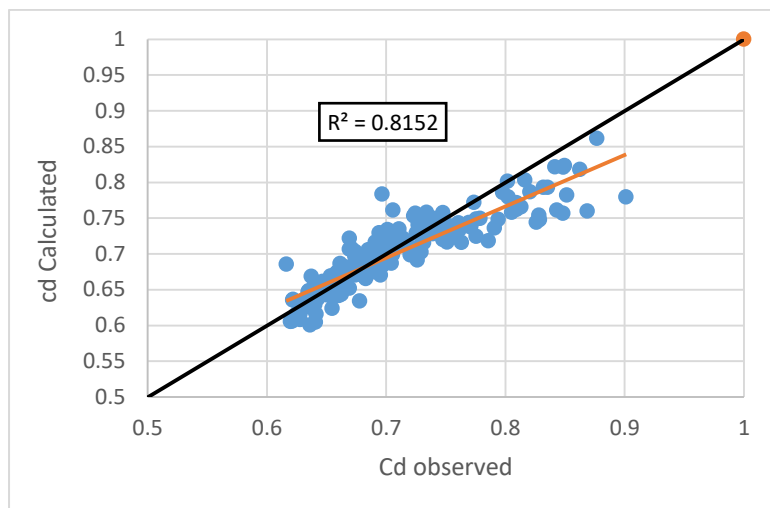
مشابه سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ضریب دبی برای سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه، ۹۰ درجه و زاویه رأس ۱۲۰ درجه به ترتیب به صورت زیر حاصل می شود:

$$Cd = 0.3356 - 0.051Fr_1^{0.583} + 0.3682 \left(\frac{\bar{w}}{y_1} \right)^{1.103} + 0.1245 \left(\frac{L}{y_1} \right)^{0.53} \quad (۲-۴)$$

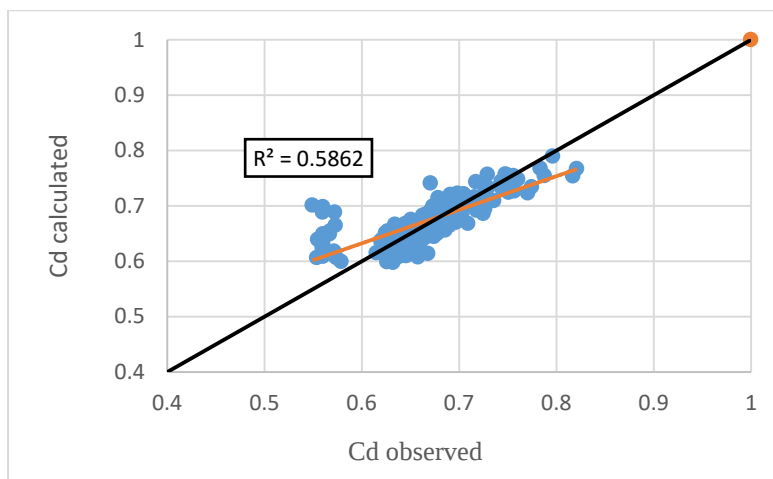
$$Cd = 0.4243 + 0.0327Fr_1^{1.299} + 0.3762 \left(\frac{\bar{w}}{y_1} \right)^{1.18} + 0.0454 \left(\frac{L}{y_1} \right)^{0.479} \quad (۳-۴)$$

$$Cd = 0.4917 + 0.1324Fr^{2.555} + 0.39 \left(\frac{\bar{w}}{y} \right)^{3.33} + 0.0363 \left(\frac{L}{y} \right)^{1.34} \quad (۴-۴)$$

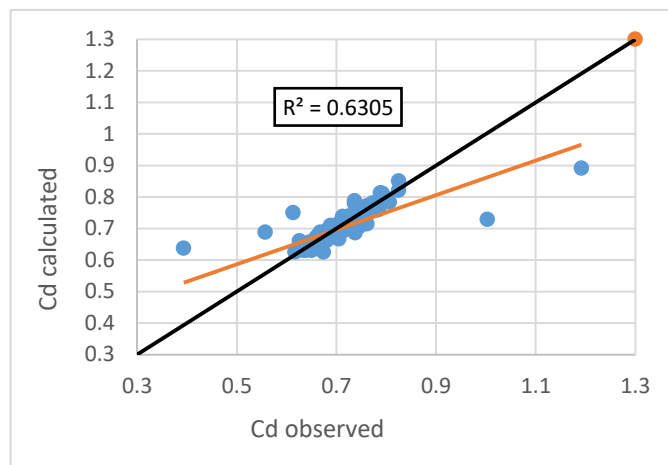
که در زیر نمودارهای مقایسه ضریب دبی حاصل از روش محاسبه مستقیم نسبت به ضریب دبی مشاهداتی ارائه گردیده است. در این شکل ها محور افقی نشان دهنده ضریب دبی مشاهداتی و محور عمودی ضریب دبی بدست آمده از معادلات (۲-۴)، (۳-۴) و (۴-۴) می باشد.



شکل ۴-۲: مقایسه ضریب دبی مشاهده شده با ضریب دبی حاصل از روش مستقیم برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.



شکل ۴-۳: مقایسه ضریب دبی مشاهده شده با ضریب دبی حاصل از روش مستقیم برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه.



شکل ۴-۴: مقایسه ضریب دبی مشاهده شده با ضریب دبی حاصل از روش مستقیم

برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه.

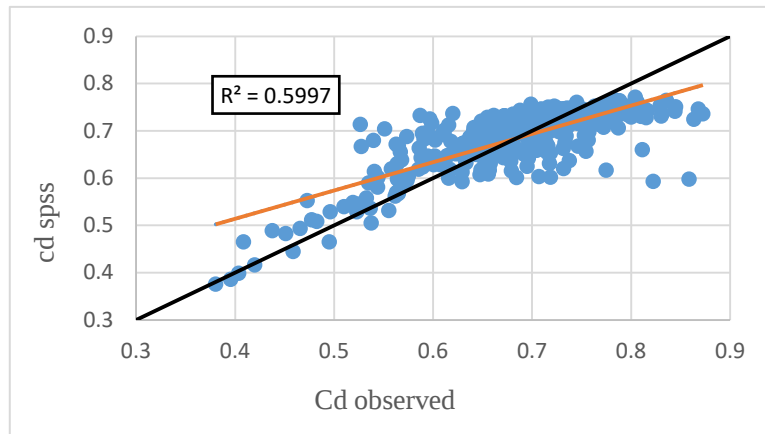
با توجه به نتایج نمودارهای بدست آمده از روش محاسبه مستقیم ضریب دبی به روش رگرسیون مقادیر R^2 نشان دهنده نزدیکی نتایج ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی محاسبه شده به روش رگرسیون می باشد. که نتایج کلی در پایان به صورت جدول کلی ارائه شده است.

۴-۵- معادله ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی با استفاده از رگرسیون غیرخطی

با استفاده از فراخوانی داده ها با نرم افزار SPSS و با استفاده از رگرسیون غیرخطی، ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی مدل سازی شده و ضرایب تخمین زده شدند. سپس برای اطمینان از بهینه بودن، ضرایب مدل سازی را با ضرایب جدید تکرار کرده تا ضرایب ثابت حاصل شود. رابطه ی حاصل از رگرسیون غیرخطی به شکل زیر می باشد:

$$Cd = -0.342 - 0.102Fr^{2.928} + 1.164 \left(\frac{\bar{W}}{y}\right)^{0.15} - 0.041 \left(\frac{L}{B}\right)^{28.293} \quad (5-4)$$

همچنین تغییرات ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی برای داده های مشاهداتی و ضریب حاصل از مدل سازی SPSS در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است. ضریب رگرسیون برای این مدل برابر ۰/۵۹ می باشد.



شکل ۴-۵: مقایسه ضریب دبی بر اساس ضریب دبی رابطه (۴-۵) به دست آمده با استفاده از رگرسیون غیرخطی نتایج آزمایشگاهی برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی.

۴-۶- معادله ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با استفاده از رگرسیون غیرخطی

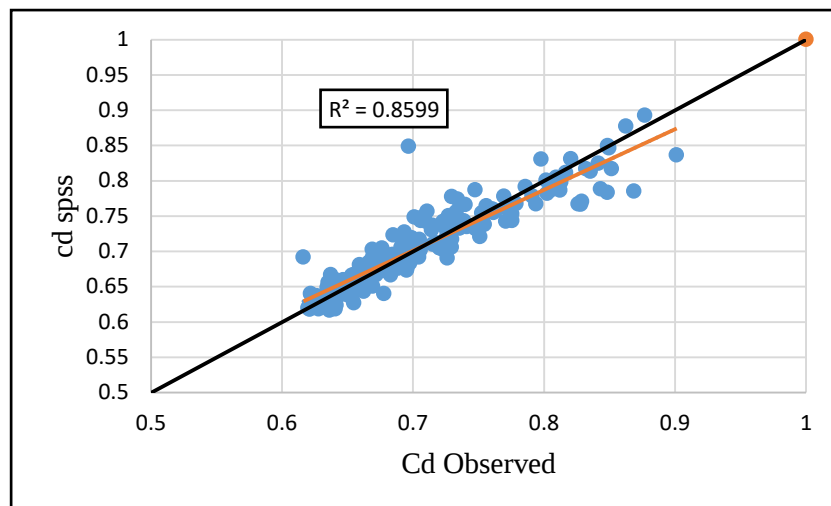
نتایج حاصل از رگرسیون غیرخطی ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با استفاده از نرم افزار SPSS برای هر سه نوع سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب به صورت زیر می باشد.

$$Cd = 0.359 + 4.708Fr^{10.563} + 0.405 \left(\frac{\bar{W}}{y}\right)^{3.267} + 0.213 \left(\frac{L}{y}\right)^{0.272} \quad (۴-۶)$$

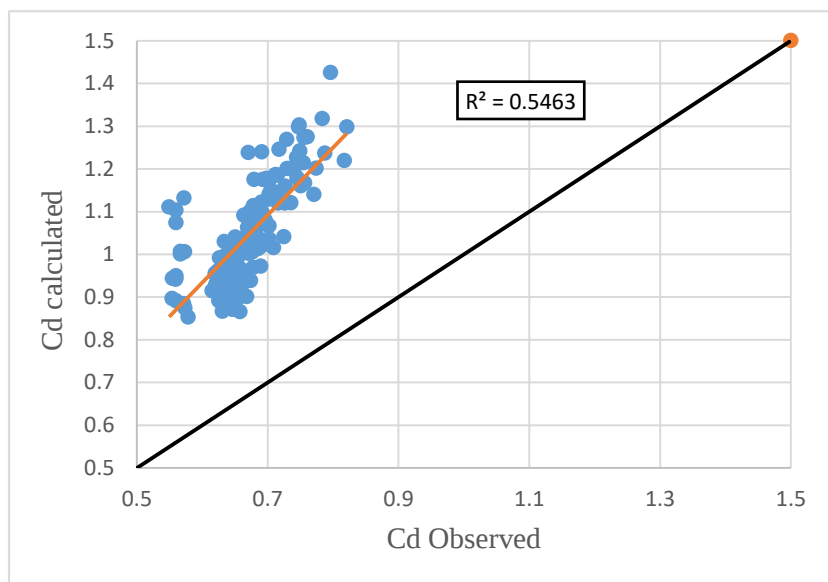
$$Cd = -2400.921 + 0.434Fr^{1.775} + 0.05 \left(\frac{\bar{W}}{y}\right)^{2.286} + 2401.652 \left(\frac{L}{y}\right)^0 \quad (۴-۷)$$

$$Cd = 0.109 + 0.532Fr^{0.126} + 3.554 \left(\frac{\bar{W}}{y}\right)^{10.483} + 0.019 \left(\frac{L}{y}\right)^{1.699} \quad (۴-۸)$$

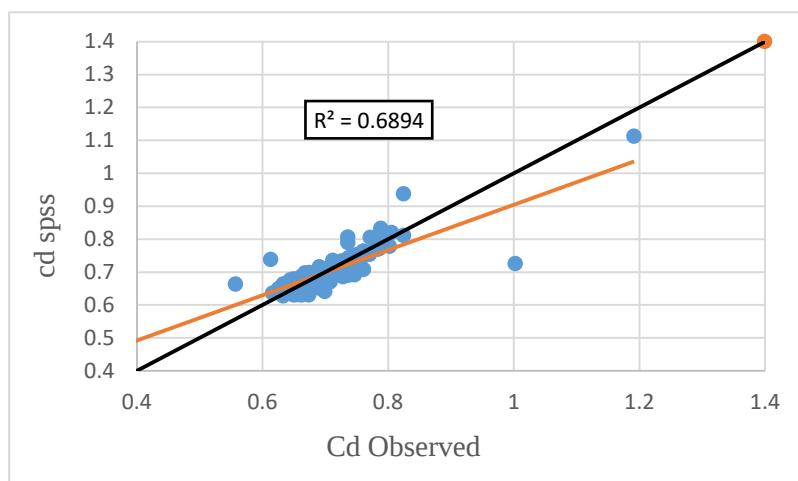
همچنین نمودار مقایسه ضریب دبی به دست آمده از رگرسیون غیرخطی با داده های مشاهداتی را برای هر سه سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب در نمودارهای زیر ارائه شده است. در این نمودارها محور افقی نشان دهنده ضریب دبی مشاهداتی در آزمایشگاه بوده و محور عمودی ضریب دبی حاصل از رگرسیون غیرخطی می باشد.



شکل ۴-۶: مقایسه نتایج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه با استفاده از رگرسیون غیرخطی.



شکل ۴-۷: مقایسه نتایج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه با استفاده از رگرسیون غیرخطی.



شکل ۴-۸: مقایسه نتایج ضریب دبی سرریز مرکب مثلی- مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه با استفاده از رگرسیون غیرخطی.

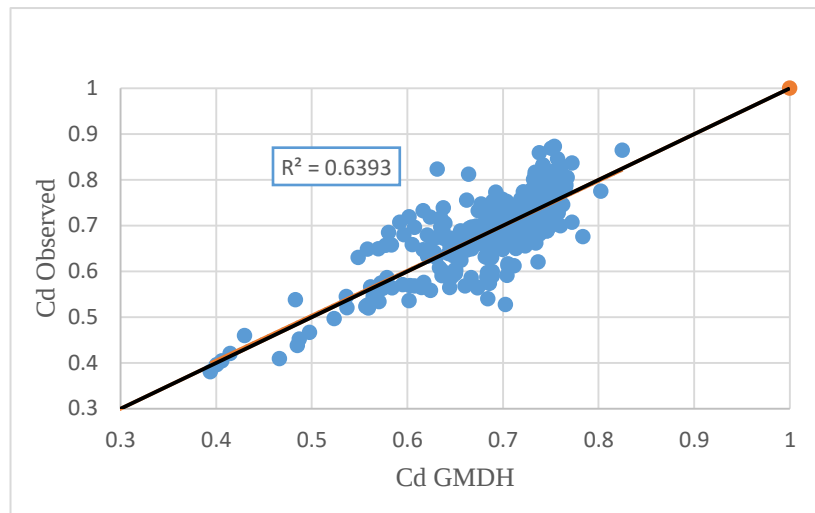
با توجه به مقدار R^2 بدست آمده در روش بهینه سازی رگرسیون غیرخطی برای سرریز مستطیلی- مستطیلی و مثلی- مستطیلی با زاویه ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه و برازش خط $y = x$ ، بهینه بودن و تجمع داده ها در نزدیکی خط $y = x$ قابل مشاهده می باشد.

۴-۷- نتایج حاصل از نرم افزار GMDH برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی

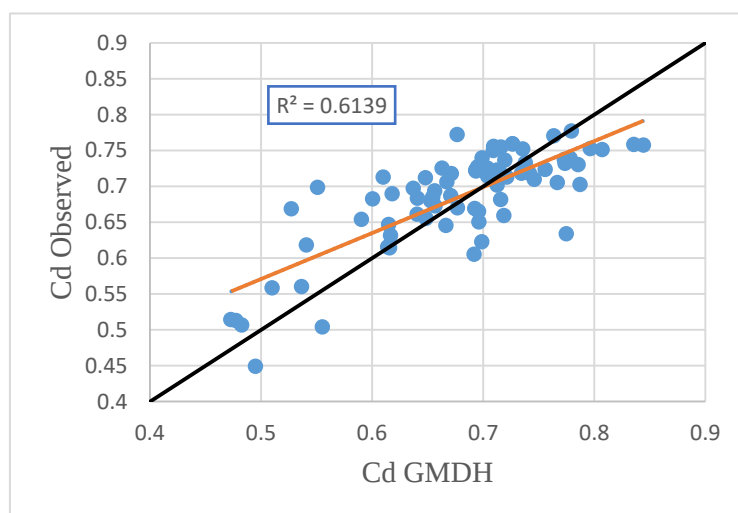
با توجه به متغیرهای انتخاب شده، داده ها به دو بخش، که ۸۰ درصد داده ها به عنوان داده های آموزشی و ۲۰ درصد به عنوان داده ی آزمون است تقسیم شده اند. صحت مدل آموزش دیده سنجیده شده و نزدیکی نتایج حاصل از پیش بینی ها با نتایج واقعی، اعتبار مدل را ارزیابی می کند. در این پژوهش ساختار شبکه عصبی برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی از ۳ نرون ورودی تشکیل شده است و به صورت دولایه پنهان به تابع هدف ختم می شود.

در شکل های (۴-۹ و ۴-۱۰) به ترتیب ضریب دبی مشاهداتی نسبت به ضریب دبی حاصل از مدل- سازی GMDH برای داده های آموزش و آزمون نشان داده شده است که ضریب همبستگی برای داده- های آموزش برابر ۰/۶۴ و برای داده های آزمون برابر ۰/۶۱ می باشد. در این نمودارها محور افقی نشان-

دهنده ضریب دبی حاصل از مدل سازی با مدل GMDH و محور عمودی ضریب دبی مشاهداتی به دست آمده در آزمایشگاه می باشد.



شکل ۴-۹: مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی محاسبه شده برای داده های آموزش با استفاده از GMDH در سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی.

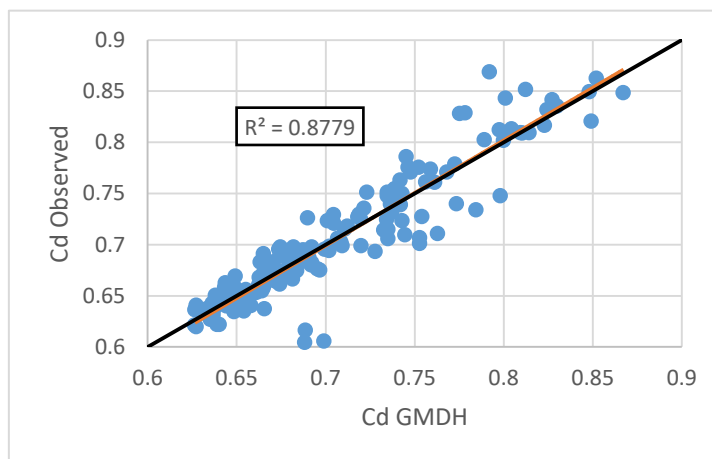


شکل ۴-۱۰: مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی محاسبه شده برای داده های آزمون با استفاده از GMDH در سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی.

۸-۴- نتایج حاصل از نرم افزار GMDH برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

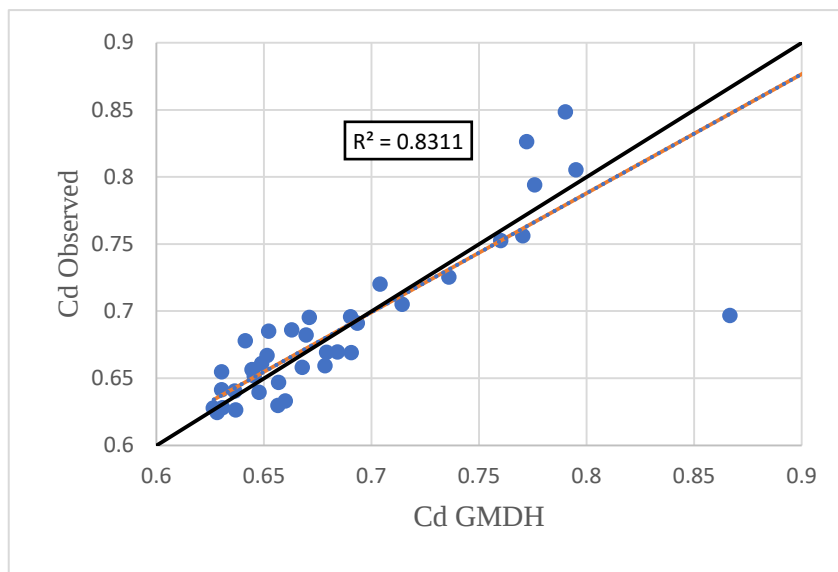
برای مدل سازی ضریب دبی سرریزهای مرکب مثلثی- مستطیلی همچون محاسبه ی ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی عمل کرده و داده ها به دو قسمت ۸۰ به ۲۰ تقسیم شده و نتایج حاصل به ترتیب برای سرریزهای مرکب با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به صورت نمودارهایی برای داده های آزمون و داده های آموزش به صورت مجزا نشان داده شده است (اشکال ۴-۱۱، ۴-۱۲، ۴-۱۳، ۴-۱۴، ۴-۱۵، ۴-۱۶).

همچنین محورهای افقی نشان دهنده ضریب دبی حاصل از مدل سازی با استفاده از GMDH و محور عمودی ضریب دبی مشاهداتی در آزمایشگاه است.



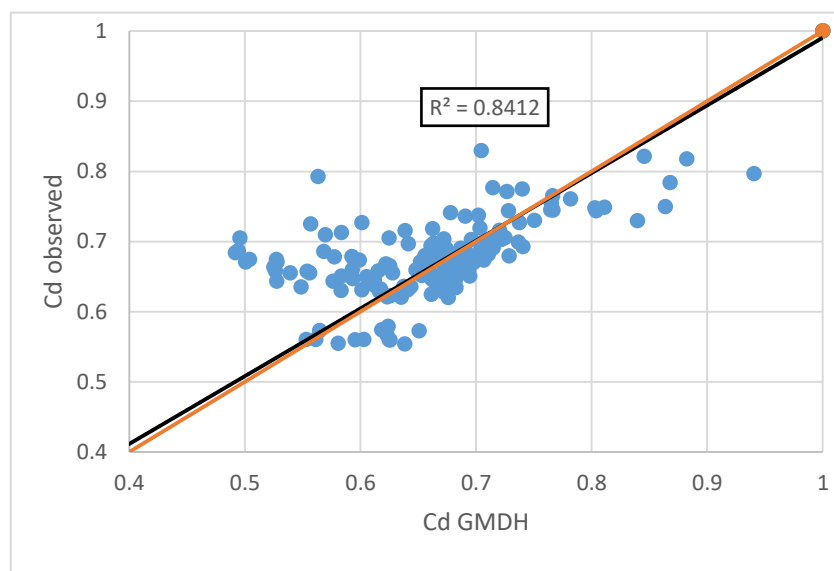
شکل ۴-۱۱: مقایسه نتایج داده های حاصل از مدل سازی GMDH با داده های مشاهداتی

برای داده های آموزش در سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.



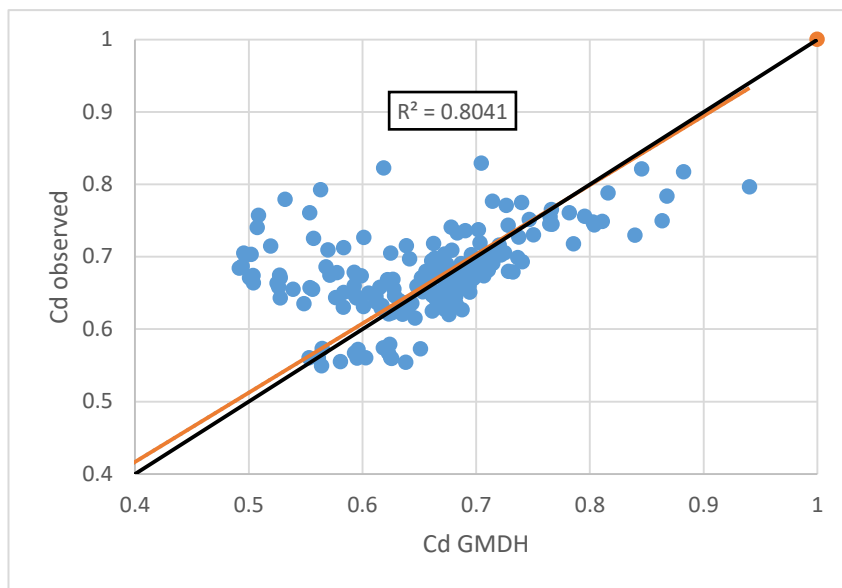
شکل ۴-۱۲: مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مدل‌سازی GMDH با داده‌های مشاهداتی

برای داده‌های آزمون در سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.



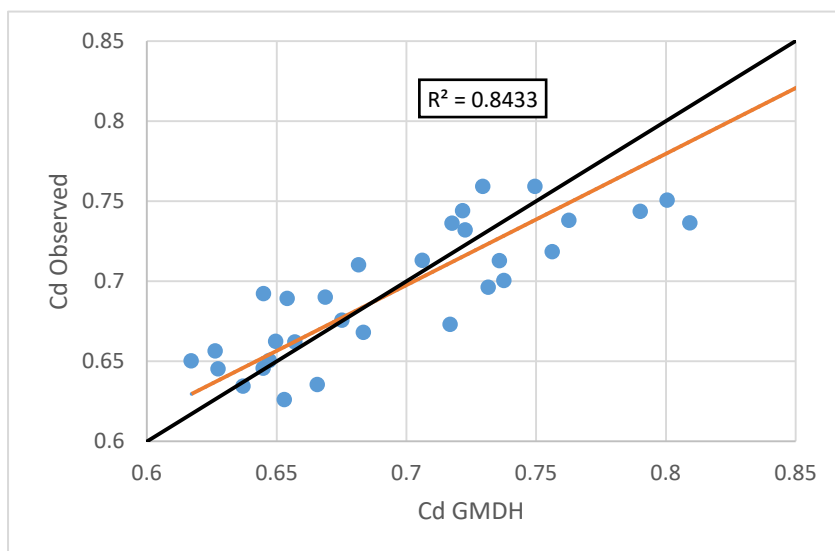
شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مدل‌سازی GMDH با داده‌های مشاهداتی

برای داده‌های آموزش در سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه



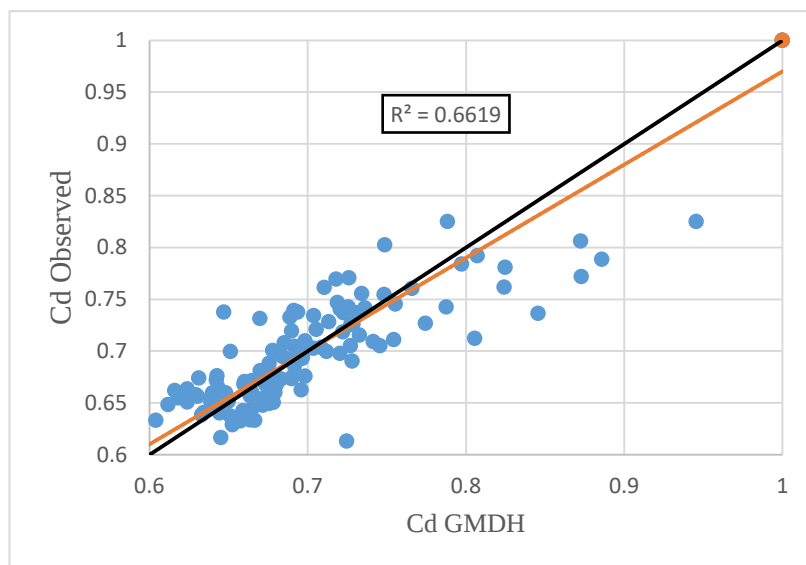
شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مدل‌سازی GMDH با داده‌های مشاهداتی

برای داده‌های آزمون در سرریز مرکب مثلی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه .



شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مدل‌سازی GMDH با داده‌های مشاهداتی

برای داده‌های آموزش در سرریز مرکب مثلی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه .



شکل ۴-۱۶: مقایسه نتایج داده‌های حاصل از مدل‌سازی GMDH با داده‌های مشاهداتی برای داده‌های آزمون در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه.

باتوجه به نمودارهای مقایسه ضریب دبی مشاهداتی و ضریب دبی حاصل از مدل‌سازی GMDH، مقدار R^2 نسبت به رگرسیون که در قسمت قبل ارائه گردید بهبود یافته و بهینه‌تر شده است. نتایج برای هر دو دسته داده‌های آموزش و داده‌های آزمون ارائه گشته که نتایج حاکی از آن است که با استفاده از روش مدل‌سازی GMDH می‌توان مقداری دقیق و نزدیک به مقدار واقعی را بدست آورد.

۴-۹- معادله ضریب دبی سرریز مستطیلی - مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار GEP

در جدول (۴-۵) لیست ترکیبی از اپراتورهای ژنتیکی استفاده‌شده برای ساخت مدل با استفاده از روش GEP در این مطالعه را نشان می‌دهد.

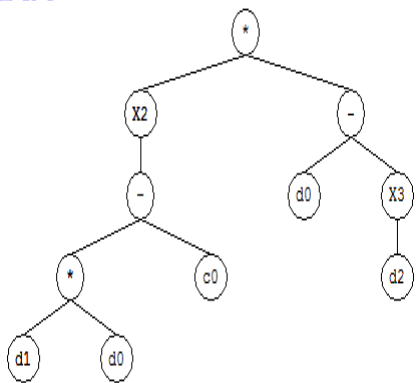
جدول ۴-۵: پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی بیان ژن برای استخراج ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی -

مستطیلی

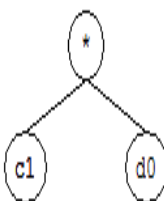
پارامتر	مقدار
اندازه سر (Head Size)	۷
تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)	۳۰
تعداد ژن در هر کروموزوم (Number of genes)	۳
نرخ جهش (Mutation Rate)	۰/۰۴۴
تابع پیوند (Linking Function)	جمع (+)
معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)	RMSE
مجموعه توابع	+, -, *, /

نتایج مطالعات قبلی انجام شده، نشان دهنده برتری پارامتر جبری جمع به عنوان تابع پیوند نسبت به دیگر پارامترها برای رسیدن به نتیجه بهینه می باشد. لذا در این پژوهش نیز از پارامتر جبری جمع استفاده شده است. در مدل سازی با استفاده از GEP خروجی به صورت درختی بوده که پس از ترجمه می توان به معادله مورد نظر دست یافت. نمودار درختی به دست آمده از مدل برنامه ریزی بیان ژن به صورت شکل (۴-۱۷) می باشد.

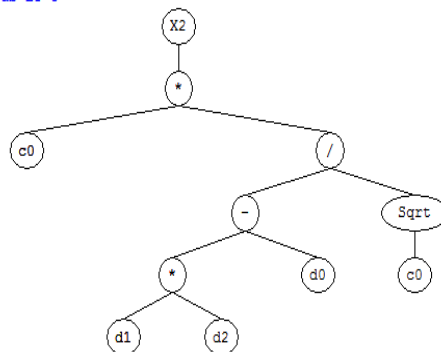
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل ۴-۱۷: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی.

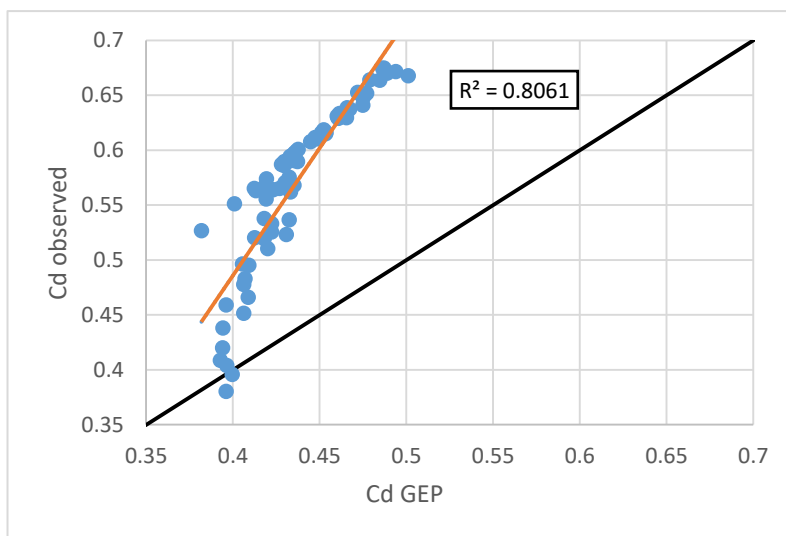
سپس با توجه به نمودار درختی حاصل از مدل GEP معادله زیر برای ضریب دبی سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی به دست آمد:

$$\left[\left(\left(\frac{L}{B} \times Fr \right) - 0.348816 \right)^2 \times \left(Fr - \left(\frac{w}{y} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \right] + [0.728729 \times Fr]$$

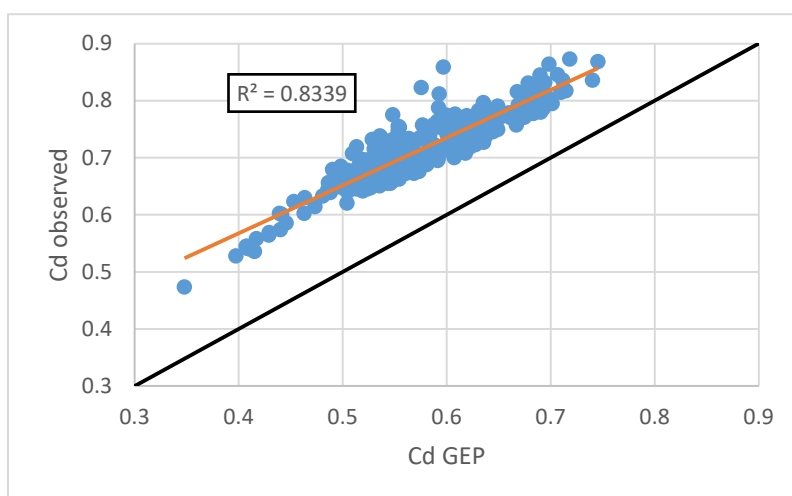
$$+ \left[0.348816 \times \frac{\left(\frac{L}{B} \right) \left(\frac{w}{y} \right) - Fr}{\sqrt{0.348816}} \right]^2$$

(۹-۴)

مقایسه‌ی ضریب دبی مشاهداتی نسبت به ضریب دبی به‌دست‌آمده از GEP برای داده‌های آموزش و داده‌های آزمون به‌ترتیب در نمودارهای (۴-۱۸) و (۴-۱۹) نشان داده‌شده است، محور افقی نشان‌دهنده ضریب دبی حاصل از مدل‌سازی و محور افقی نشان‌دهنده ضریب دبی مشاهده‌ای می‌باشد. نحوه هم‌پوشانی مقادیر ضریب دبی مشاهداتی و نتایج حاصل از پیش‌بینی با استفاده از مدل به‌طور هم‌زمان در دو بخش آموزش و آزمون ترسیم‌شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که ضریب رگرسیون برای داده‌های آموزش برابر ۰/۸۳ و برای داده‌های آزمون برابر ۰/۸۰ می‌باشد.



شکل ۴-۱۸: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده شده در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی.



شکل ۴-۱۹: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده شده در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی.

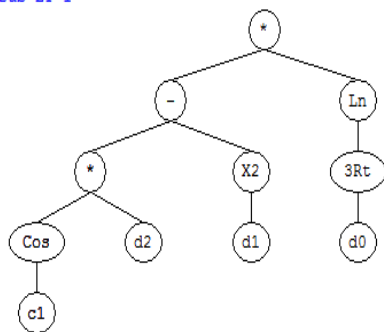
۴-۱۰- معادله ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با استفاده از نرم افزار GEP

برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی نیز روش کار به شکل روش سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی بوده و نتایج برای سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب در شکل های (۴-۲۰)، (۴-۲۱) و (۴-۲۲) ارائه شده است. همچنین پارامترهای مورد استفاده برای سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی در جدول (۴-۶) ارائه گردیده است:

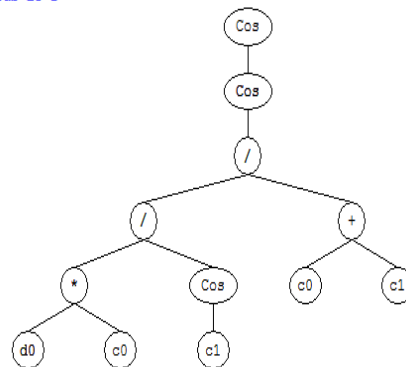
جدول ۴-۶: پارامترهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی بیان ژن برای استخراج ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی

پارامتر	مقدار
اندازه سر (Head Size)	۷
تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)	۳۰
تعداد ژن در هر کروموزوم (Number of genes)	۳
نرخ جهش (Mutation Rate)	۰/۰۴۴
تابع پیوند (Linking Function)	جمع (+)
معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)	RMSE
مجموعه توابع	ln, cot, Tan, Cos, Sin, -, *, /

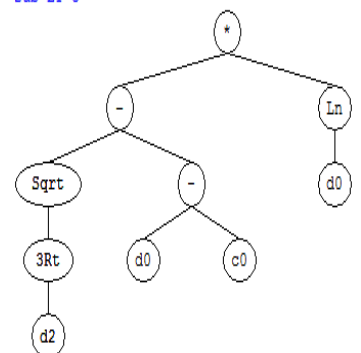
Sub-ET 1



Sub-ET 2



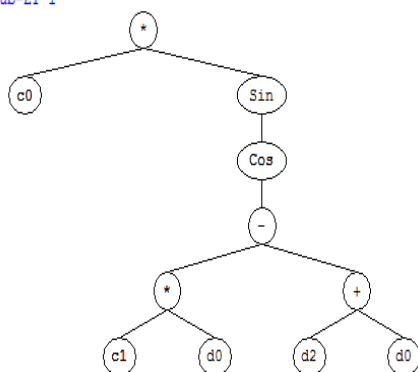
Sub-ET 3



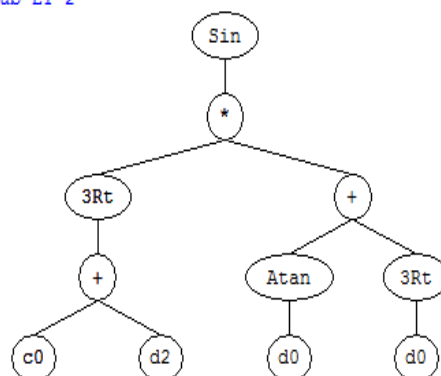
شکل ۴-۲۰: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.

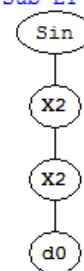
Sub-ET 1



Sub-ET 2



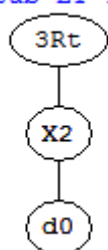
Sub-ET 3



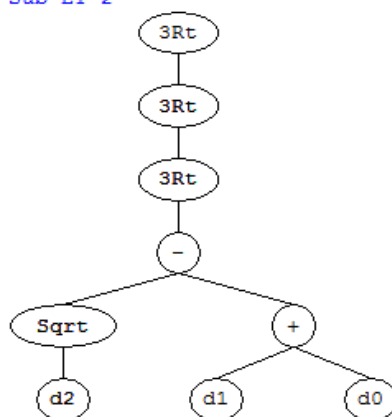
شکل ۴-۲۱: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه.

Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل ۴-۲۲: نمودار درختی مدل بهینه حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه.

با توجه به نمودار درختی حاصل از مدل GEP ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه

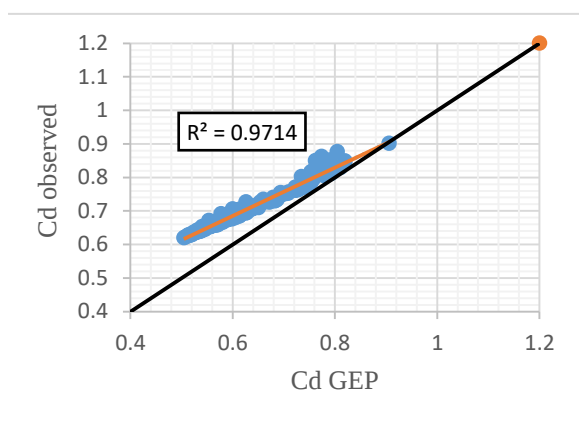
رأس‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ به ترتیب به صورت معادلات (۴-۱۶)، (۴-۱۷) و (۴-۱۸) می‌باشند:

$$Cd_{60^\circ} = \left[\left[-0.012 \frac{w}{y} - \left(\frac{L}{b} \right)^2 \right] * \ln Fr^3 \right] + [\cos^2((2.33 * Fr))] + \left[\left(\sqrt{\left(\frac{w}{y} \right)^3} - Fr - 0.66 \right) * \ln Fr \right] \quad (16-4)$$

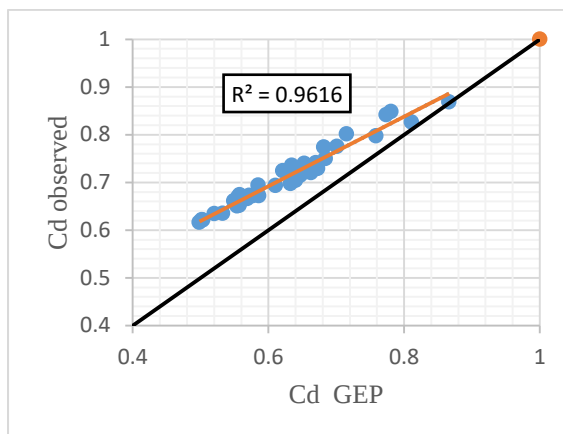
$$Cd_{90^\circ} = \left[-0.78 * \sin \left(\cos \left(\left((3.369 * Fr) - \left(\frac{w}{y} \right) + Fr \right) \right) \right) \right] + \left[\sin \left(\left(-0.755 + \frac{w}{y} \right)^3 * (\text{Arctg}(Fr) + Fr^3) \right) \right] + [\sin Fr^4] \quad (17-4)$$

$$Cd_{120} = [\sqrt[3]{Fr^2}] + \left[\left(\sqrt{\frac{w}{y}} - \left(\frac{L}{B} + Fr \right) \right)^9 - 1.196 \right] \quad (18-4)$$

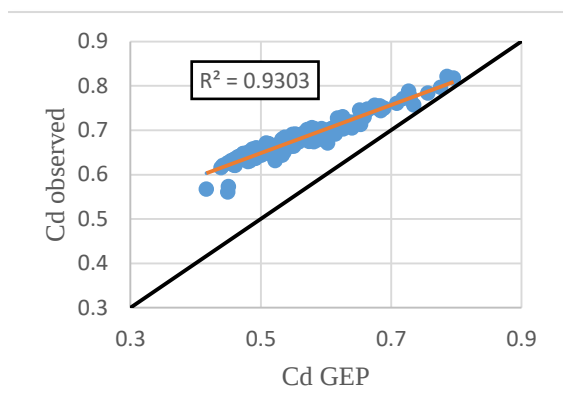
همچنین نمودار مقایسه ضریب دبی مشاهده‌ای با ضریب دبی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی GEP به ترتیب برای سرریزهای مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب برای داده‌های آموزش و داده‌های آزمون به شکل های (۲۳-۴)، (۲۴-۴)، (۲۵-۴)، (۲۶-۴)، (۲۷-۴) و (۲۸-۴)، می‌باشند. در این نمودارها محور افقی نشان‌دهنده ضریب دبی به‌دست‌آمده با استفاده از مدل-سازی GEP بوده و محور عمودی نشان‌دهنده ضریب دبی مشاهده‌ای می‌باشد.



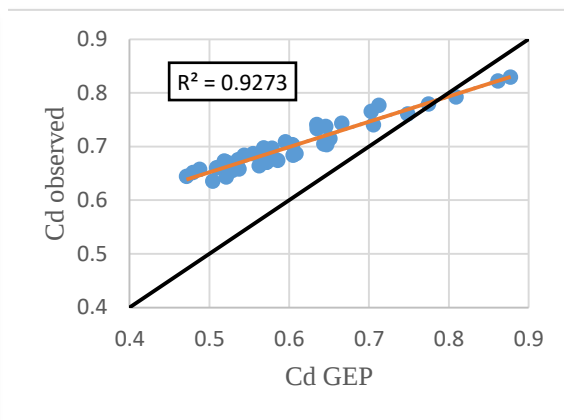
شکل ۴-۲۴: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.



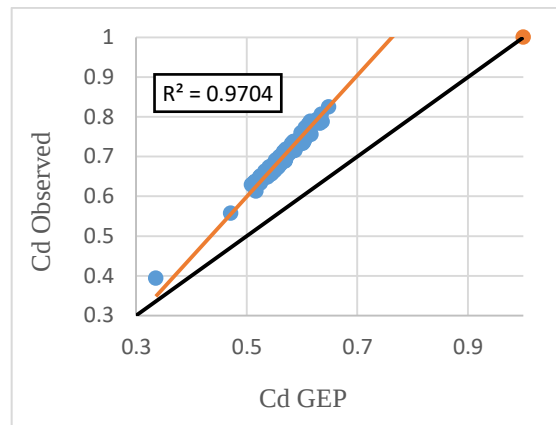
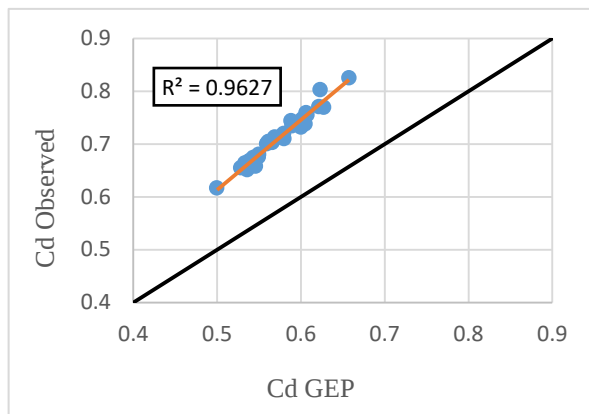
شکل ۴-۲۳: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.



شکل ۴-۲۶: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی مشاهده شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه.



شکل ۴-۲۵: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی مشاهده شده در سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه.



شکل ۴-۲۸: مقایسه ضریب دبی آموزش و ضریب دبی
مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه
رأس ۱۲۰ درجه.

شکل ۴-۲۷: مقایسه ضریب دبی آزمون و ضریب دبی
مشاهده‌شده در سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با
زاویه رأس ۱۲۰ درجه.

عملکرد مدل‌های موجود در پیش‌بینی ضریب دبی سرریز با استفاده از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R)، مورد بررسی قرار گرفته است. نزدیک‌تر شدن مقدار R به یک و همچنین نزدیک شدن ضریب مربعات خطا به صفر نشان‌دهنده دقت بالای مدل ارائه‌شده برای محاسبه ضریب دبی می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((cd_m)_i - (cd_o)_i)^2}{n}} \quad (۴-۱۹)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((cd_o)_i - \overline{cd_o})((cd_m)_i - \overline{cd_m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((cd_o)_i - \overline{cd_o})^2 \sum_{i=1}^n ((cd_e)_i - \overline{cd_e})^2}} \quad (۴-۲۰)$$

در جدول (۴-۷)، (۴-۸)، (۴-۹) و (۴-۱۰) به‌طور خلاصه مقدار R^2 و RMSE به ترتیب برای مدل-های رگرسیون، رگرسیون غیرخطی، GMDH و GEP برای سرریزهای مرکب مستطیلی- مستطیلی و مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه ارائه‌شده است.

جدول ۴-۷: خلاصه نتایج حاصل از مدل سازی‌ها برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی.

CRRSC	REGRESSION	NONLINER REGRESSION	GMDH		GEP	
			TEST	TRAIN	TEST	TRAIN
R^2	0.55	0.59	0.61	0.64	0.80	0.83
RMSE	0.048	0.04	0.032	0.028	0.025	0.02

جدول ۴-۸: خلاصه نتایج حاصل از مدل سازی‌ها برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه.

CTRSC 60°	REGRESSION	NONLINER REGRESSION	GMDH		GEP	
			TEST	TRAIN	TEST	TRAIN
R^2	0.81	0.85	0.83	0.87	0.96	0.97
RMSE	0.029	0.03	0.034	0.03	0.024	0.018

جدول ۴-۸: خلاصه نتایج حاصل از مدل سازی‌ها برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه.

CTRSC 90°	REGRESSION	NONLINER REGRESSION	GMDH		GEP	
			TEST	TRAIN	TEST	TRAIN
R^2	0.58	0.54	0.80	0.84	0.92	0.93
RMSE	0.06	0.048	0.051	0.043	0.046	0.040

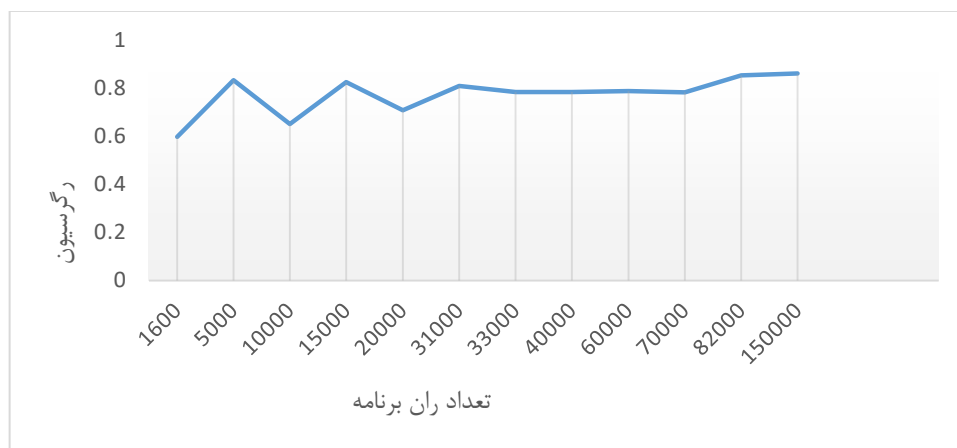
جدول ۴-۹: خلاصه نتایج حاصل از مدل سازی‌ها برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه.

CTRSC 120°	REGRESSION	NONLINER REGRESSION	GMDH		GEP	
			TEST	TRAIN	TEST	TRAIN
R^2	0.63	0.68	0.66	0.84	0.96	0.97
RMSE	0.043	0.04	0.030	0.039	0.039	0.034

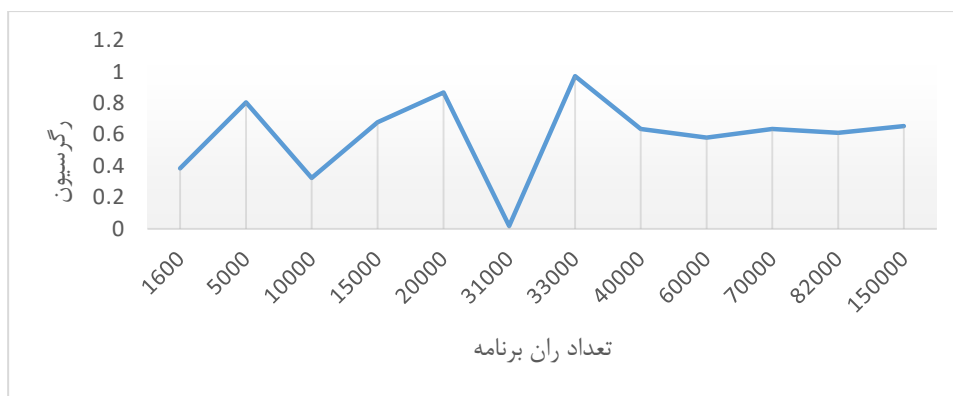
با توجه به نتایج حاصل که در جداول فوق ارائه گردیده می‌توان گفت که مدل‌سازی با استفاده از GEP بهترین نتیجه را داشته است. مقدار R^2 برای برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) بهتر از GMDH، SPSS و تحلیل رگرسیون می‌باشد. لذا برنامه‌ریزی بیان ژن به عنوان مدل بهینه معرفی می‌شود و برای بهینه‌سازی مناسب بوده و جوابی نزدیک به واقعیت ارائه می‌دهد.

۴-۱۱- نتیجه مدل‌سازی GEP با تعداد تکرارهای مختلف

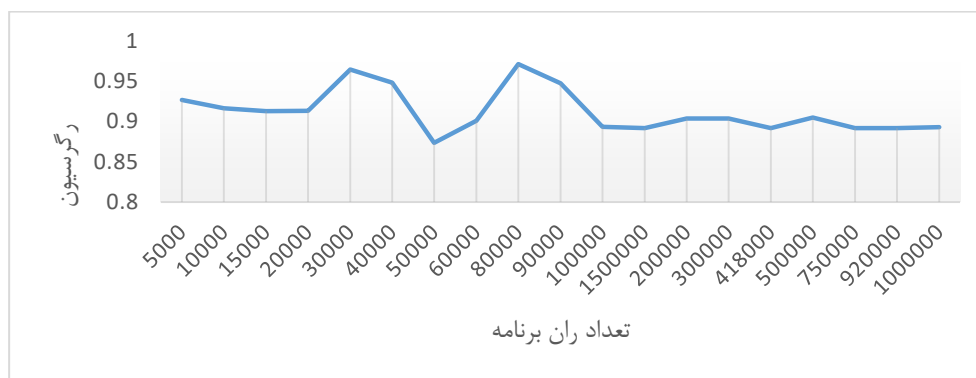
در این مرحله، نتیجه مدل‌سازی برای تعداد ران‌های مختلف ارائه می‌گردد، محور عمودی نمودارها نشان‌دهنده تعداد ران‌های گرفته‌شده در مدل‌سازی بوده و محور عمودی مقدار R^2 می‌باشد. نمودارها نشان می‌دهند که بعد از چندین مرحله اجرای برنامه بعد از مدتی مقدار ضریب R^2 تقریباً ثابت شده و تغییر چشم‌گیری ندارد.



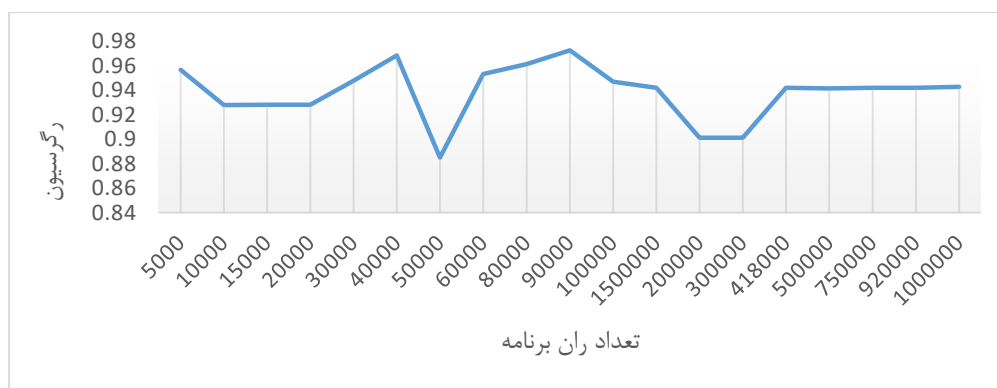
شکل ۴-۲۹: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی برای داده‌های آموزش.



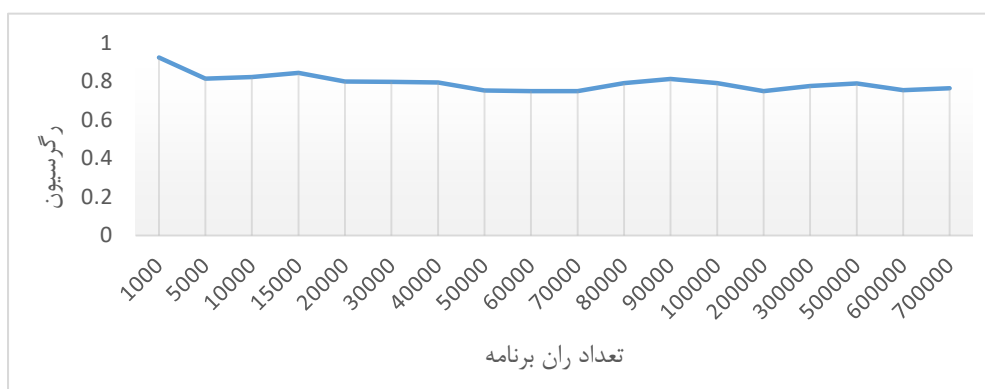
شکل ۴-۳۰: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی برای داده‌های آزمون.



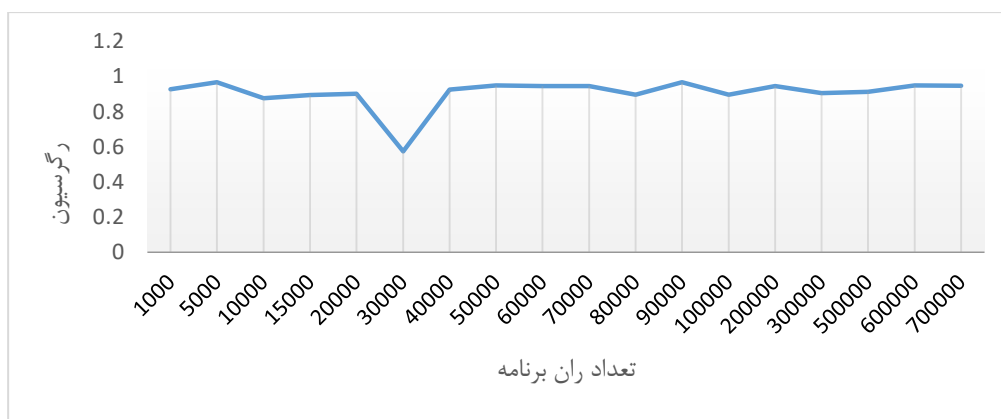
شکل ۴-۳۱: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه برای داده‌های آموزش.



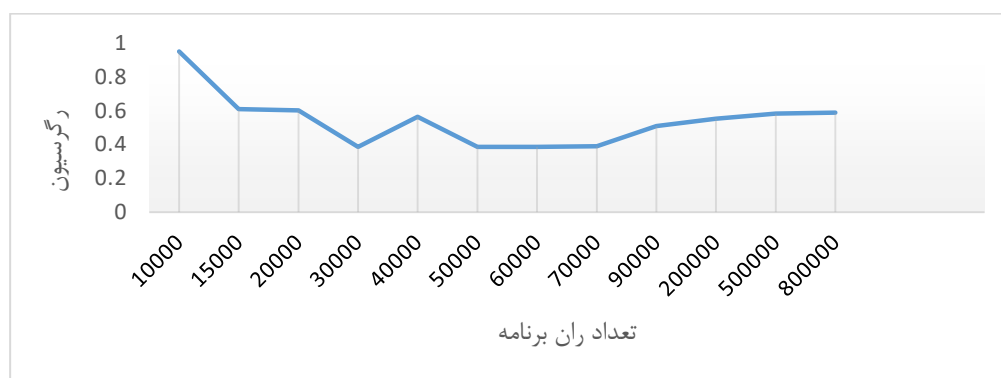
شکل ۴-۳۲: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۶۰ درجه برای داده‌های آزمون.



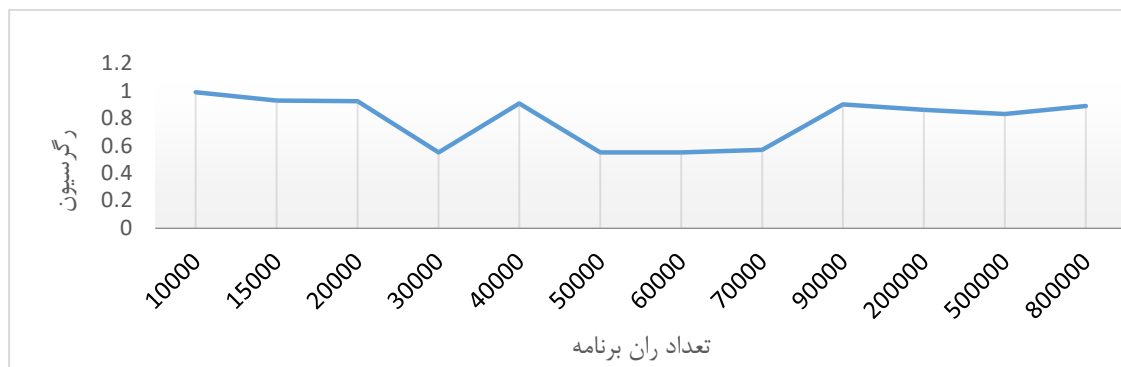
شکل ۴-۳۳: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه برای داده‌های آموزش.



شکل ۴-۳۴: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۹۰ درجه برای داده‌های آزمون.



شکل ۴-۳۵: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه برای داده‌های آموزش.



شکل ۴-۳۶: مقایسه تعداد ران مدل GEP در برابر ضریب R^2 برای سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی با زاویه رأس 120° درجه برای داده‌های آزمون.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری

و

پیشنهادهات

۵-۱- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی- مستطیلی و مثلثی- مستطیلی پرداخته و با استفاده از رگرسیون غیرخطی، GEP و GMDH بهترین و بهینه‌ترین رابطه برای ضریب دبی را ارائه نمودیم.

در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SPSS همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی (عامری، ۲۰۱۵) ارزیابی شد که نتایج حاصل، نشان داد بین پارامترهایی استفاده‌شده برای محاسبه ضریب دبی، همبستگی لازم وجود داشته و نتایج حاصل با نتایجی که عامری به دست آورده همخوانی دارد.

نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام‌گرفته به‌صورت خلاصه در زیر ارائه شد:

۱- نتایج حاصل از محاسبه ضریب دبی سرریز مرکب حاکی از آن است که می‌توان از ترکیب روابط سرریزهای ساده برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای مرکب استفاده کرد و به نتایج معقولی دست‌یافت.

۲- با بهینه‌سازی ترکیب روابط ضریب دبی سرریزهای ساده، می‌توان به روابط بهینه و مناسب برای ضریب دبی سرریزهای مرکب دست‌یافت.

۳- با استفاده از رگرسیون غیرخطی و با کمک نرم‌افزار SPSS می‌توان ضرایب موجود در معادلات را بهینه‌تر کرده و با تکرارهای مکرر برای رگرسیون گیری غیرخطی و محاسبه ضرایب معادلات می‌توان به نتایج بهتر و بهینه‌تر برای ضریب دبی دست‌یافت.

۴- در مدل‌سازی برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، نتایج به‌صورت درخت (ETs) بیان می‌شود که با تجزیه درختان می‌توان معادلات را استخراج کرد.

۵- برای استفاده کاربردی تر نتایج این پژوهش، روابط حاصل از مدل سازی GEP برای سرریزهای مرکب مستطیلی- مستطیلی و مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه ارائه گردیده است.

۶- در مدل سازی برنامه ریزی بیان ژن (GEP)، داده ها به دو قسمت تقسیم می شوند که ۸۰ درصد داده ها به عنوان داده های آموزشی و ۲۰ درصد به عنوان داده های آزمون مورد استفاده قرار می گیرد. برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی مقدار R^2 برای داده های آموزش ۰/۸۳ و برای داده های آزمون ۰/۸۰ به دست آمد. همچنین برای سرریزهای مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب برای داده های آموزش ۰/۹۷، ۰/۹۳ و ۰/۹۷ و برای داده های آزمون به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۲ و ۰/۹۶ به دست آمد که در مقایسه با نتایج GMDH، رگرسیون غیرخطی و رگرسیون ساده بهترین نتیجه می باشد.

۷- در مدل سازی GMDH همچون برنامه ریزی بیان ژن داده ها به دو قسمت که ۸۰ درصد به عنوان داده های آموزش و ۲۰ درصد به عنوان داده های آزمون استفاده شده است. نتایج R^2 برای داده های آموزش در سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی ۰/۶۴ و برای داده های آزمون ۰/۶۱ به دست آمد، همچنین برای سرریزهای مرکب با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه برای داده های آموزش به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۴ و ۰/۸۴ و برای داده های آزمون به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۸۰ و ۰/۶۶ به دست آمد.

۸- در رگرسیون غیرخطی همچون مدل سازی GEP و GMDH داده ها به دو قسمت تقسیم نشده اند، بلکه از تمامی داده ها استفاده کرده و رابطه بهینه استخراج شده و ضریب دبی را محاسبه شد. مقدار R^2 برای سرریز مرکب مستطیلی- مستطیلی ۰/۵۹ و برای سرریز مرکب مثلثی- مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۵۴ و ۰/۶۸ به دست آمد.

۹- در قسمت رگرسیون برای هر سرریز مرکب از جمع روابط سرریزهای ساه استفاده شده و نتایج حاصل ارائه شده است. برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ۰/۵۵ و برای سرریز مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۵۸ و ۰/۶۳ به دست آمد.

برای مقایسه نتایج حاصل علاوه بر ضریب R^2 از ضریب RMSE نیز بهره گرفته و نتایج حاصل با استفاده از این ضریب نیز مورد مقایسه قرار گرفته اند. مقدار RMSE برای داده های آموزش مدل سازی GEP در سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی ۰/۰۲ و برای داده های آزمون ۰/۰۲۵، در مدل سازی GMDH برای داده های آموزش ۰/۰۲۵ و برای داده های آزمون ۰/۰۳۲، برای رگرسیون غیرخطی مقدار ۰/۰۴ و همچنین برای رگرسیون ساده ۰/۰۴۸ به دست آمد. همچنین برای سرریزهای مرکب مثلثی - مستطیلی با زاویه رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه در مدل سازی GEP به ترتیب برای داده های آموزش ۰/۰۱۸، ۰/۰۴۰ و ۰/۰۳۴ و برای داده های آزمون به ترتیب ۰/۰۲۴، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۳۹، در مدل GMDH به ترتیب برای آموزش ۰/۰۳، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۳۹ و برای داده های آزمون ۰/۰۳۴، ۰/۰۵۱ و ۰/۰۳۰، در رگرسیون غیرخطی به ترتیب ۰/۰۳، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۴ و در رگرسیون ساده ۰/۰۲۹، ۰/۰۶ و ۰/۰۴۳ به دست آمد.

مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج به دست آمده از داده های مشاهداتی و آنالیز رگرسیون نشان دهنده برتری و بهینه تر بودن مدل سازی با استفاده از مدل برنامه ریزی بیان زن (GEP) است.

۵-۲-پیشنهادات

۱-انجام مطالعات و مدل سازی اشکال هندسی دیگر سرریزهای مرکب جانبی از جمله مستطیلی-

دوزنقه‌ای و دوزنقه- مثلثی.

۲- مدل سازی بر روی سرریز لبه پهن و مقایسه نتایج حاصل.

۳- مدل سازی با ژن های متفاوت، شرایط، پارامترهای مختلف و تحلیل نتایج.

۴- مدل سازی بر روی سرریزهای ساده و مقایسه نتایج با سرریزهای مرکب.

منابع

- [۱]. اکبری طائمه.ر، قدسیان.م، (۱۳۹۰)، تعیین ضریب آبگذری سرریز جانبی لبه تیز مثلثی، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، ص. ۷-۱.
- [۲]. امامقلی زاده. ص، کریمه دمنه. ر، (۱۳۹۶)، کاربرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در تعیین ضریب هوادهی دریچه تخلیه کننده تحتانی سدها، نشریه -پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیست و چهارم، شماره اول.
- [۳]. ایزدجو. ف، شفاعی بجستان. م، (۱۳۷۴)، بررسی روش‌های طراحی آبگیرهای جانبی و ارائه مدل کامپیوتری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته تأسیسات آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [۴]. باقری. س، ظهیری. ع. قبادیان، دهقانی. ا و مفتاح هلقی. م، (۱۳۹۱)، بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز ترکیبی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، شماره اول، جلد بیستم، ص. ۱۳۳-۱۵۰.
- [۵]. برقی. م، کبیری سامانی. ع، (۱۳۸۴)، تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و روش تشابه ناقص، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص. ۹-۱.
- [۶]. برقی. س و صالحی. ح، (۱۳۸۲)، بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی با استفاده از مدل آزمایشگاهی، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، جلد ۳، ص ۱۰-۳.
- [۷]. بسیاری. س، حدادی. ح و رحیم‌پور.م، (آبان، ۱۳۹۱)، ترسیم پروفیل سطح آب در سرریز جانبی لبه پهن دوزنقه‌ای با استفاده از روش عددی، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه.
- [۸]. جلیلی قاضی‌زاده. م، برقی. م و قدسیان. م، (۱۳۷۶)، بررسی آزمایشگاهی جریان‌های زیربحرانی بر روی سرریزهای جانبی. چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، تهران.
- [۹]. حسینی. م، ابریشمی. ج، (۱۳۸۲)، هیدرولیک کانال‌های باز، انتشارات آستان قدس رضوی.
- [۱۰]. خوش‌بین. ف، ابتهاج. ع، بنکداری. ع، لشته‌نشایی. م، (آبان ماه ۱۳۹۳)، ارائه مدل ریاضی جهت پیش بینی ضریب دبی سرریز کنگره‌های مثلثی با استفاده از شبکه عصبی GMDH و الگوریتم ژنتیک سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز، صفحه ۱ تا ۹.
- [۱۱]. روشنگر. ک، بنکداری. ح، اخگر. س، هرسمی. ف، (۱۵ تا ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۴)، بررسی عملکرد برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) در پیش‌بینی استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی در رژیم جریان رویه‌ای (Skimming)، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز، صفحه ۱ تا ۴.

- [۱۲]. روشنگر، ک.، اعلم. م.، وجودی مهربانی. ف.، (بهمن و اسفند، ۱۳۹۴)، افزایش دقت پیش‌بینی بارکل رسوبی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی (مطالعه موردی :رودخانه قطورچای)، نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۹، شماره ۶، ص ۱.
- [۱۳]. روشنگر، ک.، تقی اعلمی. م.، میرمحمدیان. ش.، (۱۳۹۳) بررسی عملکرد و کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد عمق آب شستگی پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیرچسبنده، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، شماره ۲، جلد ۴۴، ص. ۳۳-۲۱.
- [۱۴]. صادقی. ز.، دهقانی. ا.، قدسیان. م.، ظهیری. ع.، منتصری. ح.، (۱۳۹۱)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، شماره ۴، جلد ۱۹، ص. ۶۴-۴۷.
- [۱۵]. قبادیان. ر.، قربانی. م.، خلج. م.، (۱۳۹۲)، بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در روند یابی سیلاب زنگمار در مقایسه با روش موج دینامیکی، نشریه آب و خاک، جلد ۲۷، شماره ۳، ص ۶۰۲-۵۹۲.
- [۱۶]. قدسیان. ر.، شفاعی بجستان. م.، (۱۳۸۵)، بهینه‌سازی ضریب تخلیه سرریزهای جانبی در کانال‌های آبیاری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص. ۹-۱.
- [۱۷]. نیکوئی. ه.، نورزاد. ع.، آهنگری. ک.، (پاییز و زمستان ۱۳۹۲)، پیش‌بینی خطای سلول فشار به کمک روش (GEP) مطالعه موردی : سد سنگ ریشه‌ای البرز، مازندران، ایران) نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد هفتم، شماره ۲.
- [۱۸]. هنر. ت.، طرازکار. م.، طرازکار. م.، (۱۳۸۹)، برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی با استفاده از سیستم استنتاج فازی -عصبی (ANFIS)، شماره ۲، جلد ۱۷، ص ۱۶۹-۱۷۵.
- [۱۹]. هنر. ت.، جوان. م.، کشاورزی. ع.، (۱۳۸۴)، تحلیل ضریب دبی جزئی سرریزهای جانبی مایل در کانال‌های غیرمنشوری مستطیلی، مجله علوم کشاورزی ایران، شماره ۴، جلد ۳۶، ص ۸۲۴-۸۱۹.
- [۲۰]. یاسی. م.، عباس‌پور. اکرم.، (۱۳۸۴)، ارزیابی جریان بر سرریز لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی، مجله علمی کشاورزی، شماره ۲، جلد ۲۸، ص. ۱۸۲-۱۶۵.
- [21]. Abdolrahimi.S, Nasernejad. B, G. Pazuki, (2014), Prediction of partition coefficients of alkaloids in ionic liquids based aqueous biphasic systems using hybrid group method of data handling (GMDH) neural network, Journal of Molecular Liquids, Vol. 191, No. 0, pp. 79-84.
- [22]. Ahmed. Y, Al-Taee. (2011), Theoretical analysis of flow over the side weir Runge-Kutta method, J. Annals of Faculty Engineering. ISSN: 1584-2665, Pp: 47-50.
- [23]. Ahmed. Y, Mohamad, (2013), Numerical analysis of flow over side weir. J. of King Saud University- Engineering Sciences. Pp: 1-6.

- [24]. Ameri. M, Ahmadi.A, Dehghani.A, (2015), Discharge coefficient of compound triangular-rectangular sharp-crested side weirs in subcritical flow conditions, *J. Flow Measurement and International*, 45, pp.170-175.
- [25]. Ameri.M, Dehghani.A, and Ahmadi.A, (2015), Elementary discharge coefficient of a triangular-rectangular sharp-crested side weir in subcritical flow, *J. of River Basin Management*, pp.1-8.
- [26]. Bagheri.S, Zahiri.A.R, Ghobadian.R, Dehghani.A.A, (2013), and Meftah Halaghi. M, Experimental investigation of discharge coefficient for compound sharp crested side weirs, *J. Water and Soil Conservation*, 20(1), pp.133-149.
- [27]. Borghei. S.M, Jalili. M.R, and Ghodsian. M,(1999), Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow, *J. Hydraul. Eng, ASCE*, 125:10. 1051-1056.
- [28]. De Marchi. G, (1934), Essay on the performance of lateral weirs. *L Energia Electrica Milano, Italy*, 11: 11. 849-860.
- [29]. Ebtehaj.I, Bonakdari.H, Zaji.A, Azimi.H and Khoshbin.F, (2015), GMDH type neural network Approach or modeling the discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs, *Int.J.Engi neering science and Technology*, 18, pp.746-757.
- [30]. Ebtehaj.I, Bonakdari.H, Zaji.A, Azimi.H, Sharifi.A, (2015), Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs. *Applied Soft Computing*, 35, pp.618–628.
- [31]. Emin Emiroglu. M, Agaccioglu.H, Kaya .N, (2011) Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, (22), pp.319–330.
- [32]. Emiroglu. M.E, Kaya. N, and Agaccioglu. H.(2010), Discharge Capacity of Labyrinth Side Weir Located on a Straight Channel, *J. Irrigation and Drainage Eng, ASCE*, 136: 1. 37-46.
- [33]. Ferreira. C, (2001).”Gene expression programming: A new adaptive algorithm for problems”, *Complex Systems* 13 (2): 87-129.
- [34]. Ferreira. C, (2004).”Gene expression programming and the evolution of computer program”, in: Castro, L.N, Von Zuben, F.J., (Eds.), *Recent Developments*.
- [35]. Ferreira. C, (2006).”Automatically defined functions in gene expression program”. In: Nedjah, N, Mourelle, L.M, Abraham, A. (Eds), *Genetic systems Programming: Theory and Experiences, Studies in Computational*.
- [36]. Ghodsian. M, 1997. Elementary discharge coefficient for rectangular side weir. *Proceeding of 4th Int, Conf. on Civil Engineering, Tehran*, Pp: 36-42.
- [37]. Hager. W.H, (1987), Lateral outflow of side weirs, *J. Hydraul. Eng, ASCE*, 113: 4. 491-504.

- [38]. Jalili. M.R, and Borghei. S.M, (1996), Discussion of "Discharge coefficient of rectangular side weir", by Singh R, Manivannan, D, and Satyanarayana, T, J. of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 122: 2. 132.
- [39]. Mahmoud Ibrahim. M, (2015), Bed profile downstream compound sharp crested V- notch weir, J. Alexandria Engineering, (54), pp.607-613.
- [40]. Martinez. J, Reca. J, Morillas. M.T, and Lopez .J.G, (2005), Design and Calibration of a Compound Sharp -Crested Weir, ASCE, 2(112), pp.112-116.
- [41]. Nariman Zadeh. N, Darvizeh. A, Felezi. M.E, Gharababaei. H, (2002), Polynomial modelling of explosive compaction process of metallic powders using GMDH type neural networks and singular value decomposition, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 10.
- [42]. Piratheepan. M, Winston. N.E.F and Pathirana. K.P.P, (2006), Discharge measurements in open channels using compound sharp-crested weirs, J. Institution Of Engineers, Sri Lanka,3, pp.31-38.
- [43]. Ranga Raju. K.G, Parasad. B, and Gupta. S.K, (1979), Side weir in rectangular channel, J. Hydraul. Eng, ASCE, z10 5: 5. 547-554.
- [44]. Subramanya. K, and Awasthy. S.C, (1972), Spatially varied flow over side weirs, J. Hydraul. Eng., ASCE, 98: 1. 1-10.
- [45]. Tai Lee. J, Chuan Chan. H, Kun Huang. C and Mou Leu. J, (2012), Experiments on hydraulic relations for flow over a compound sharp-crested weir, Int. J. Physical sciences, 7(14), pp.2229-2237.
- [46]. Zahiri. A, Azamathulla H. Md, Bagheri. S, (2013) Discharge coefficient for compound sharp crested side weirs in subcritical flow conditions, J. Hydrology, 480, pp.162–166, 2013.
- [47]. Zahiri. A, (2012), Quasi-two dimensional mathematical model for prediction of flow discharge over over compound sharp-crested weirs, J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(3).
- [48]. Singh. R, Manivannan. D, and Satyanarayana. T, (1994), Discharge coefficient of rectangular side weirs. J. Irrigation and Drainage Eng, ASCE, 120: 4. 814-819.

Abstract

Side weirs are among the most important hydraulic structures which is used as water level controller and flow rate measurement in channels. Side weirs are widely used in hydraulic, environmental applications as well as irrigation and sewage treatment systems and water diversion from the main canals to the hydraulic lab and irrigation and drainage networks. Precision in measuring flow for different flow conditions has led to the design of various geometric shapes of side weirs. Therefore, due to the importance and extensive applications of lateral side weirs, these overflows must have properties in order to be able to properly utilize them in water transmission networks. One of the most prominent features that can be mentioned here is the accurate measurement of the flow through the side weir and its ability to drain significant water during flood event. Because simple overflows during flood events are suitable only for excess water flow in the canal or river, but not suitable for accurate measurement of passage. Therefore, the accuracy of measuring the discharge and water flow during flood events, is one of the most important advantage of composite side weirs. In this study, the rectangular-rectangular, triangular-rectangular, sharp, perpendicular, overheads are examined at 60, 90, 120 degree angles. Therefore, predicting the intake flood discharge coefficient using regression analysis, improve analyse regression, artificial neural networks (GMDH) and Gene expression planning (GEP) are among the most powerful and must widely used modelers. Also, for the modeling, the effective parameters have been used for the flow coefficient. For comparison, statistical parameters such as R^2 and RMSE have been used. The results indicate that GEP programming with the amount for training data and for test data in a rectangular-rectangular compound side weir and for triangular-rectangular composite side weirs of 60, 90, 120 degrees respectively for equal education data, and for the test data were equal, and obtained compared to the regression model, SPSS and GMDH, the RMSE error value for the rectangular-rectangular compound side weir test was 0.023, 0.0015, and 0.007 respectively, for a triangular-rectangular composite side weir with a 60 degree angle are 0.041, 0.002, and 0.005, respectively and for rectangular-triangular side weir an angle of 120 degrees, respectively equal to 0.004, 0.001, 0.009 percent, which indicates the superiority and optimality of the modeling of gene expression planning.

Keywords: Gene expression planning, rectangular-rectangular compound side weir, triangular-rectangular composite side weir, neural network, multiplying.



Faculty of Agriculture
M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering

**Estimation of discharg coefficient of compound weir
using GEP model**

By: Sahar Ramezani

Supervisor:
Dr. Samad Emamgholizadeh

Advisor:
Dr.Sayed Hoswin Hoseini

June 2018