

## تخمین ضریب دبی در سرریزهای لبه‌پهن مرکب با استفاده از رگرسیون، برنامه‌ریزی ژنتیک و

### شبکه عصبی

اعظم مسعودی<sup>۱\*</sup> - پرستو پارسامهر<sup>۲</sup> - فرزین سلماسی<sup>۳</sup> - ساناز پوراسکندر<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۸

تاریخ پذیرش: ۹۱/۳/۲۰

### چکیده

سرریزهای لبه‌پهن مرکب دارای یک لبه کوچک با مقطع مستطیلی برای اندازه‌گیری جریان‌های کم هستند که این لبه در ارتفاعی بالاتر به منظور اندازه‌گیری جریان‌های زیاد عرض می‌شود. نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر در طراحی سازه‌های کنترل‌کننده و اندازه‌گیری کننده جریان استفاده می‌شود. در این مقاله مجموعه‌ای از آزمایشات به منظور بررسی تاثیر طول سرریز و ارتفاع لبه پایینی سرریز لبه‌پهن مستطیلی بر روی مقادیر ضریب دبی انجام شد. از این رو ۱۵ مدل مختلف از سرریزهای لبه‌پهن با مقطع مستطیلی برای محدوده وسیعی از مقادیر دبی آزمایش شدند. همچنین معادلات رگرسیونی چندگانه بر اساس تئوری آنالیز ابعادی برای محاسبه ضریب دبی انجام شد. نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از GP و شبکه عصبی مقایسه و مشاهده شد که شبکه عصبی در تخمین ضریب دبی از GP ضعیف‌تر عمل می‌کند. از طرفی استفاده از مدل GP معادله‌ی متفاوتی را برای ضریب دبی پیشنهاد می‌کند.

### واژه‌های کلیدی: سرریز لبه‌پهن مرکب، ضریب دبی، روش‌های هوش مصنوعی

### مقدمه

پهن و به صورت مایل و یا عمود نسبت به مسیر جریان قرار می‌گیرند. از مزایای سرریز مرکب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: در جریان کم، قسمت مرکزی سرریز به صورت منفرد عمل کرده و اندازه‌گیری جریان را با توجه به نوع شکل سرریز در قسمت مرکزی با دقت و حساسیت مناسبی انجام می‌دهد. در جریان‌های زیاد، دهانه بالایی مانع افزایش زیاد سطح آب در بالادست سرریز شده و اندازه‌گیری دبی را با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر می‌سازد (۲).

محققین مختلفی در گرایش‌های کشاورزی، صنعت و هیدرولیک برای شناخت اصول حاکم بر جریان از روی سرریزها در حال پژوهش بوده و هستند. رامامورتی و همکاران (۱۶) نیز خصوصیات جریان در شرایط آزاد و مستغرق بر روی سرریز لبه‌پهن با ورودی لبه‌تیز و لبه-گرد را مطالعه کردند. هاگر و همکاران (۱۲) به بررسی خصوصیات جریان بر روی سرریز لبه‌پهن با دیواره عمودی در بالادست و لبه تیز ورودی به صورت آزمایشگاهی پرداختند. خسروجردی و همکاران (۳)، به بررسی آزمایشگاهی سرریزهای لبه‌پهن و اثر قوس محوری در آنها پرداختند. چنانچه قوس محوری به طرف بالادست باشد، ضریب شدت جریان بزرگتر از حالت قوس محوری به سمت پایین دست جریان می‌باشد و لذا ظرفیت عبوردهی جریان بزرگتر می‌باشد. نتایج

سرریزها که کاربرد زیادی در مهندسی هیدرولیک و محیط زیست دارند به منظور اندازه‌گیری جریان و همچنین کنترل سطح آب در کانال‌ها استفاده می‌شوند. یکی از انواع متداول این سازه عبارتست از سرریزهای لبه‌پهن، که لبه سرریز در مقایسه با سایر ابعاد آن دارای اندازه قابل ملاحظه‌ای است. تاج سرریزهای لبه‌پهن، افقی و یا دارای انحنای خاصی بوده و اگر چه برای اندازه‌گیری دبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما بیشتر به عنوان سرریز سد و گاهی به عنوان خود سد (در صورتی که آب مجاز به گذشتن از روی آن باشد) به کار می‌روند و در هر حال می‌توان در مواقع لزوم برای ذخیره نمودن حجم‌های زیاد آب و ارتفاع‌های بالا از سرریز لبه‌پهن استفاده نمود (۱).

سرریز مرکب از دو قسمت، مرکز در پایین و دهانه در بالای خود تشکیل شده است. قسمت مرکزی و دهانه به شکل‌های مختلفی نظیر مستطیلی، دوزنقه یا مثلثی طراحی می‌شود که به شکل لبه‌تیز و یا لبه-

۴، ۳، ۲، ۱ - به ترتیب دانش‌آموختگان کارشناسی ارشد، استادیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
\* - نویسنده مسئول: (Email: azam.masoodi@gmail.com)

به دلیل عدم شناخت دقیق و نیز پیچیدگی عوامل موثر در ضریب دبی، این روابط در بسیاری از موارد با مقادیر مشاهده شده تطابق نداشته و در مواقعی نیز میزان مقادیر محاسبه شده از روابط گوناگون تفاوت معنی داری باهم دارند. امروزه بطور گسترده‌ای با توسعه مدل‌های رایانه‌ای استفاده از الگوهای ضمنی متکی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی در مطالعات هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته و متخصصین زیادی بر دقت بالای این روش تاکید نموده‌اند. اگرچه در تحقیقات وسیعی کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، در مقایسه با روش‌های متداول آماری مانند روش‌های رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار بوده ولی به دلایل مختلفی از جمله غیرصریح بودن این روش و پیچیدگی حاکم بر انتخاب و آرایش شبکه مناسب، استفاده از آن در عمل بطور مناسب توسعه نیافته است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که روش برنامه‌ریزی ژنتیک یک روش صریح و موثر در برآورد داده‌ها در زمینه علوم آب است. در این مقاله با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و برنامه ریزی ژنتیک (GP) و روش رگرسیونی مقادیر ضریب دبی سرریز لبه پهن مرکب محاسبه و نتایج با هم مقایسه شدند. برای این منظور آزمایشاتی روی چند مدل مختلف سرریز لبه پهن مستطیلی-مستطیلی انجام شد.

#### مشخصات هندسی مدل‌های فیزیکی

آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در فلومی شیشه‌ای - فلزی به طول ۹ متر، عرض ۲۵ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر انجام شده است. این فلوم در پایین دست خود مجهز به یک حوضچه انتهایی است که دارای یک سرریز مثلثی برای اندازه‌گیری دبی می‌باشد. بمنظور کاهش میزان جداشدگی جریان، ورودی سرریز دارای گردشگی است. در اشکال ۱ و ۲ مقطع عرضی و پلان مدل‌های مورد استفاده نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز برخی از مشخصات مهم مدل‌ها ارائه گردیده است.

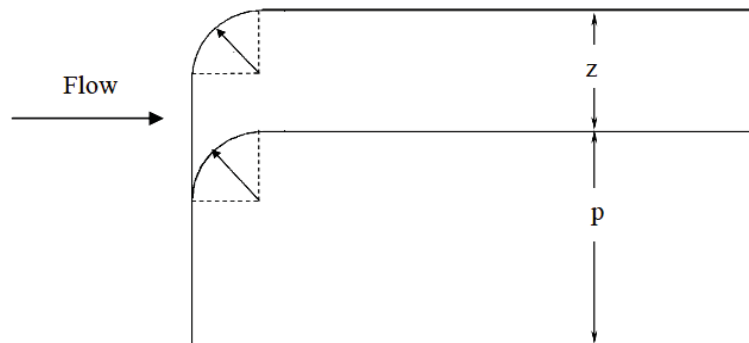
نشان می‌دهد که با تغییر انحنای قوس ضریب شدت جریان نیز تغییر می‌کند. شکری و همکاران (۵) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب وجه پایین دست سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی بر شرایط جریان (پروفیل سرعت و عمق بحرانی) پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که محل تشکیل عمق بحرانی در شیب‌های مختلف ثابت نبوده و بسته به مقدار شیب است.

عاجلو و فرهودی (۶) به بررسی تأثیر تغییر طول سرریز لبه‌پهن مستطیلی دو شیب بر مشخصات جریان پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات طول بر روی پروفیل جریان موثر است و با افزایش طول، تأثیر لایه مرزی بر شکل پروفیل جریان قابل ملاحظه است. گاکوس و همکاران (۱۱) به بررسی آزمایشگاهی سرریز مرکب لبه پهن مستطیلی - مستطیلی با گردشگی در ورودی سرریز پرداختند.

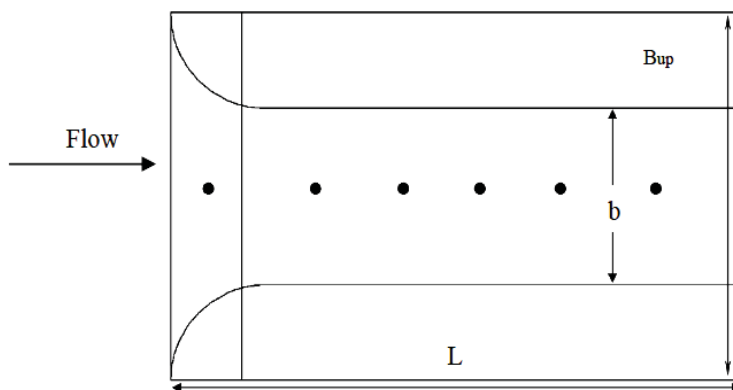
مارتینز و همکاران (۱۴) به طراحی و واسنجی سرریز مرکب لبه تیز پرداختند. آنها ۴ نوع سرریز مرکب لبه تیز با اشکال مستطیلی - مستطیلی، مستطیلی - دوزنقه، مثلثی - مستطیلی، مثلثی - دوزنقه - ای را مورد بررسی قرار دادند و سپس با ترکیب روابط سرریزهای لبه تیز مستطیلی و مثلثی، رابطه‌ای برای دبی پیشنهاد دادند. سرچیسون و همکاران (۱۷) با تغییر دادن شیب دیواره‌ها در سرریزهای لبه پهن، هیدرولیک جریان را در این نوع سازه‌ها بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که شیب بالادست تأثیر بیشتری بر روی ضریب دبی داشته و در حالتی که دیواره بالادست قائم باشد، ضریب دبی حدوداً ۱۰ الی ۱۵ درصد کمتر می‌شود.

بیلهان و همکاران (۱۰) از دو روش مختلف شبکه‌عصبی برای مطالعه‌ی جریان افقی روی سرریزهای جانبی مستطیلی در یک کانال مستقیم استفاده کردند. مقایسه نتایج آنها نشان داد که روش‌های شبکه‌عصبی برای پیش‌بینی ضریب دبی مناسب می‌باشد.

برآورد هر چه دقیق‌تر ضریب دبی با استفاده از روش‌های موجود یکی از اصول اساسی بمنظور اندازه‌گیری دقیق دبی می‌باشد. تاکنون روابط و معادلات گوناگون و پیچیده‌ای برای این منظور ارائه شده، اما



شکل ۱- برش طولی سرریز لبه پهن مرکب به کار رفته



شکل ۲- نمای بالای سرریز لبه پهن مرکب به کار رفته به همراه جانمایی پیزومترهای تعبیه شده روی آن

جدول ۱- مشخصات اصلی مدل های فیزیکی سرریزهای لبه پهن مستطیلی

نماد	مشخصه سرریز	طول (سانتی متر)
L	طول سرریز در جهت جریان	۳۰-۳۵-۴۰
b	عرض دهانه سرریز در قسمت مرکزی	۶-۸-۱۲
P	ارتفاع قسمت مرکزی سرریز	۱۰-۱۳-۱۶
Z	ارتفاع دهانه بالایی سرریز	۹
B <sub>up</sub>	عرض دهانه بالایی سرریز	۲۵
Q	دبی (lit/s)	۰/۸۷-۳۹/۰۷
H <sub>1</sub>	میزان کل هد موثر در بالادست سرریز	۴/۸۷-۲۴/۶۸

متصل بهم می باشد که به هر مجموعه از این نرون ها یک لایه گفته می شود. هر مدل شامل سه قسمت زیر می باشد: لایه ورودی، لایه های پنهان، لایه خروجی. ANN بر اساس یادگیری فرآیند حل مسئله و به عبارتی رسیدن به خروجی از طریق یافتن رابطه نهفته در فرآیند مورد نظر کار می کند. بدین منظور مدل با مجموعه ای از داده ها آموزش داده شده تا در مورد ورودی های جدید با توجه به رابطه پیدا شده در مرحله آموزش، خروجی مناسب را محاسبه نماید (۴). برای آشنایی بیشتر درباره مبانی شبکه عصبی به منابع ۷، ۸ و ۱۰ مراجعه نمایید.

### روش برنامه ریزی ژنتیک

برنامه ریزی ژنتیک که بر پایه الگوریتم ژنتیک می باشد برای اولین بار توسط کوزا ارائه شد (۱۳)، در حقیقت GP برنامه ای کامپیوتری ای است که برنامه های کامپیوتری دیگر را می نویسد. برنامه ریزی ژنتیک با الگوریتم ژنتیک تفاوت دارد، زیرا GP به جای کار با ردیف های خطی با طول ثابت (کروموزوم ها)، از شاخه های مجزا استفاده می کند. همچنین در برنامه ریزی ژنتیک بر ساختار درختی مجموعه ها تأکید می شود ولی الگوریتم ژنتیک، بر اساس

### روش رگرسیون

بمنظور بکارگیری رگرسیون خطی و غیر خطی چند متغیره از توابع زیر استفاده شد:

$$C_d = a + b \left( \frac{H_1}{L} \right) + c \left( \frac{H_1}{p} \right) \quad (1)$$

$$C_d = a \left( \frac{H_1}{L} \right)^b \left( \frac{H_1}{p} \right)^c \quad (2)$$

هر چند روابط غیر خطی زیادی را می توان متصور شد، ولی در این مرحله برای خودداری از سعی و خطای زیاد در بکارگیری معادلات غیر خطی گوناگون، تصمیم گرفته شد تا از معادله غیر خطی ۲ به دلیل سادگی استفاده گردد. البته همانطوری که در ادامه مطالب خواهد آمد، در روش برنامه ریزی ژنتیک نیز معادلات گوناگون غیر خطی مورد آزمون قرار گرفته و نهایتاً معادله مطلوب ارائه خواهد گردید.

### روش شبکه عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی مصنوعی شامل مجموعه ای از نرون های

### معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌ها در این تحقیق از شاخص‌های ضریب تبیین  $R^2$  و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است که با استفاده از روابط ۳ و ۴ قابل محاسبه‌اند:

$$R^2 = \left( \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum(x - y)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (4)$$

در روابط بالا  $x$ : مقدار مشاهداتی،  $\bar{x}$ : میانگین مقادیر  $x$ ،  $y$ : مقدار محاسباتی،  $\bar{y}$ : میانگین مقادیر  $y$  و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشند.

### نتایج

#### مقادیر ضریب دبی مشاهده‌ای

مقادیر ضریب دبی برای سه مقدار متفاوت از تاج پایینی سرریز و با در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای دیگر پارامترها به عنوان تابعی از  $H_1/L$  رسم شد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش هد آب یا کاهش طول سرریز، ضریب دبی نیز بیشتر می‌شود. همچنین به نظر می‌رسد که به ازای یک مقدار ثابت  $H_1/L$ ، سرریز با عرض مرکزی کمتر، دارای ضریب دبی کمتری است. حداقل ضریب دبی از حدود ۰/۷ تا حداکثر ۰/۹۵ متغیر است. در ضمن یادآوری می‌نماید که ضریب دبی مقادیر مشاهداتی از رابطه ۵ تعیین گردیده است.

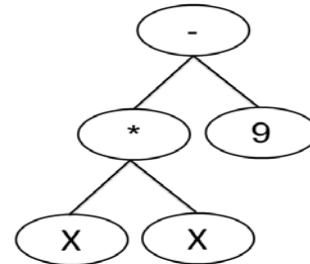
$$Q = \left(\frac{2}{3}\right) C_d b \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) g (H_1)^3} = C_d = 0.587 Q / (b H_1^{1.5}) \quad (5)$$

از طرفی ملاحظه می‌شود که تغییر ارتفاع سرریز از ۱۰ تا ۱۶ سانتی متر اثر محسوسی روی ضریب دبی ندارد. به جز اینکه برای ارتفاع ۱۰ سانتی متری اندکی افزایش ضریب دبی دیده می‌شود (شکل ۵).

برای در نظر گرفتن تأثیر کل هد موثر بر روی سرریز، چون ضریب دبی پارامتری بدون بعد می‌باشد، از نسبت بدون بعد  $H_1/L$  و  $H_1/p$  استفاده شده است. بر اساس آنالیز ابعادی انجام گرفته، نسبت بدون بعد  $H_1/L$  و  $H_1/p$  دارای بیشترین اثر بر روی ضریب دبی می‌باشند (برای اختصار از ذکر آن خودداری شده است). لازم به ذکر است که طبق مطالعات باس (۱۹۸۹) نیز همین دو عامل جزو مهمترین پارامترها تشخیص داده شده‌اند.

سیستم ارقام دودویی عمل می‌نماید. سیستم شاخه‌های مجزا عبارت از یک مجموعه ترمینال (متغیر مسئله) و یک مجموعه تابع می‌باشد. فرض کنید مجموعه ترمینال شامل یک متغیر  $x$  و چند مقدار ثابت باشد و مجموعه توابع شامل عملگرهای جمع، تفریق، ضرب و تقسیم باشد فضای در دسترس شاخه‌های مجزا شامل همه‌ی چند جمله‌ها، با هر شکلی از  $x$  و مقادیر ثابت می‌باشد (۱۵).

به عنوان مثال شاخه‌های مجزا برای مدل  $y = x^2 - 9$  در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه‌ای از شاخه مجزا GP برای نمایش  $y = x^2 - 9$

الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع هدف را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل کرده و در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها بکار گرفته و در نهایت، روش حل مناسب را ارائه می‌نمایند. برنامه‌ریزی ژنتیک می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی در شرایط زیر بکار بسته شود (۹):

۱- رابطه موجود بین متغیرهای مسأله، به خوبی شناخته نشده باشد (یا صحت و سقم شناخت فعلی از رابطه مذکور با تردید همراه باشد).

۲- پیدا کردن اندازه و شکل روش حل نهایی، بسیار سخت بوده و بخش عمده مسأله را تشکیل دهد.

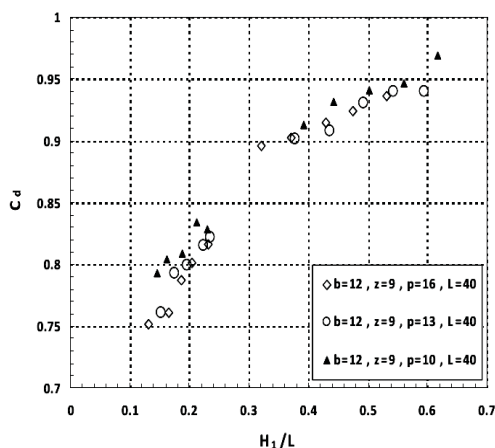
۳- روش‌های معمول تحلیل ریاضی قادر به ارائه روش‌های حل تحلیل نباشند.

۴- راه حل تقریبی، قابل قبول باشد.

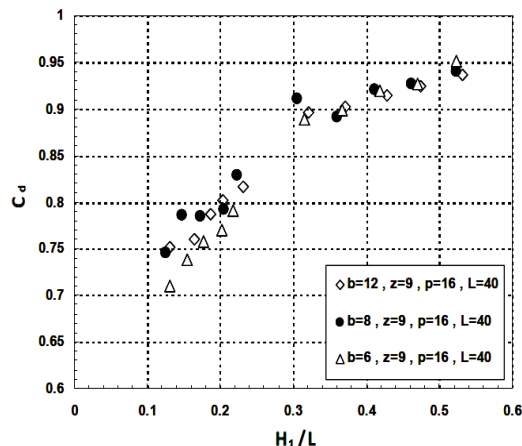
۵- هر گونه بهبود جزئی در عملکرد، به صورت منظم اندازه‌گیری شده و این بهبود از ارزش زیادی برخوردار باشد.

۶- تعداد داده‌هایی که بایستی توسط رایانه مورد آزمون دسته‌بندی و جمع‌بندی قرار گیرند زیاد باشد.

در دهه اخیر پژوهشگران زیادی برای حل مسائل مهندسی آب از GP به عنوان یک روش تناوبی موثر استفاده کرده‌اند. در تحقیق حاضر از برنامه GeneXproTools برای توسعه و اجرای مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد.



شکل ۵- تغییرات  $C_d$  در مقابل  $H_1/L$  به ازای ارتفاع‌های مختلف



شکل ۶- تغییرات  $C_d$  در مقابل  $H_1/L$  به ازای مقادیر متفاوت عرض

مدل شبکه عصبی برای حالتی که دو پارامتر ورودی  $H_1/L$  و  $H_1/p$  هستند و همچنین حالتی که تنها  $H_1/L$  به عنوان ورودی باشد اجرا شد برای هردو حالت با روش آزمون و خطا بهترین آرایش شبکه بدست آمد که نتایج آن در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای حالتی که تنها یک پارامتر ورودی داریم بهترین آرایش برای مدل شبکه عصبی عبارتست از حالتی که هر دو تابع انتقال سیگموئید باشد و تعداد نرون‌های لایه پنهان ۴ تا باشد (شکل ۶). از سوی دیگر برای مدل با دو پارامتر ورودی آرایش بهینه شامل شبکه‌ای است که تابع انتقال بین نرون‌های ورودی و لایه پنهان سکانت هیپربولیک و همچنین تابع انتقال بین نرون‌های لایه پنهان و خروجی سیگموئید باشد و تعداد نرون‌های لایه پنهان نیز ۵ تا می‌باشد (شکل ۷). ضریب ممتم برای تمامی مدل‌ها برابر ۰/۸ و تعداد تکرار ۱۰۰۰۰۰ است.

### مدل رگرسیونی

برای مدل سازی رگرسیونی از نرم افزار SPSS استفاده شد که نتیجه محاسبات به صورت زیر بدست آمد:

$$C_d = 0.748 + 0.343 \left(\frac{H_1}{L}\right) + 0.005 \left(\frac{H_1}{p}\right) \quad (6)$$

$$R^2=0.887$$

$$C_d = 1.021 \left(\frac{H_1}{L}\right)^{0.134} \left(\frac{H_1}{p}\right)^{0.612} \quad (7)$$

$$R^2=0.947$$

### مدل سازی با شبکه عصبی

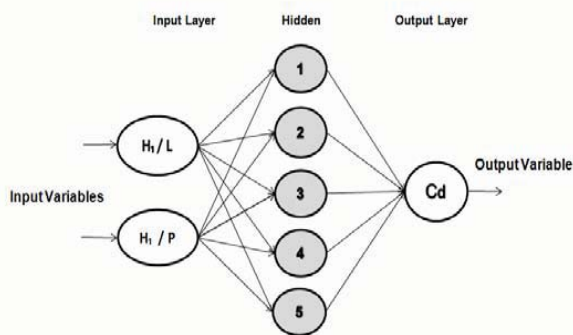
به منظور مدل سازی با شبکه عصبی در این تحقیق از ۱۹۵ دسته داده‌ی حاصل از آزمایشات، تعداد ۶۰ دسته به صورت تصادفی برای آزمون داده‌ها استفاده شد و بقیه داده‌ها نیز برای آموزش بکار رفتند.

جدول ۲- مدل‌های مختلف ANN با ۲ پارامتر ورودی

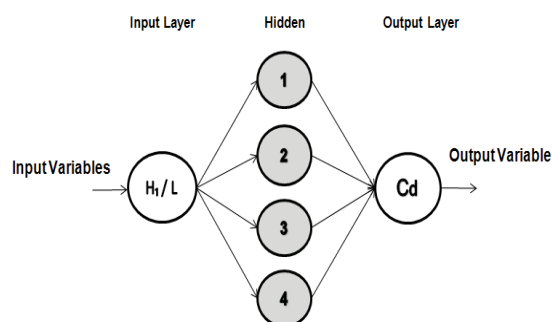
لایه/تابع انتقال	تعداد لایه پنهان	تعداد نرون	آموزش		صحت سنجی	
			RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>
Sigmoid, Sigmoid	1	3	0.05006	0.9036	0.06683	0.8899
Sigmoid, Sigmoid	1	4	0.05082	0.9102	0.06154	0.8600
Sigmoid, Sigmoid	1	5	0.05402	0.8982	0.05462	0.9014
Sigmoid, Sigmoid	1	6	0.05183	0.8971	0.06363	0.8836
Sigmoid, Sigmoid	1	7	0.05518	0.8914	0.05325	0.9041
Gaussian, Sigmoid	1	5	0.04274	0.9391	0.06557	0.8325
Hyperbolic Tangent	1	5	0.05418	0.8915	0.05538	0.9036
Sigmoid, Hype Secant	1	5	0.05028	0.9103	0.06688	0.8444
Hype Secant, Sigmoid	1	5	0.05619	0.8899	0.04461	0.9271
Hyperbolic Secant	1	5	0.05596	0.8955	0.04813	0.9141

جدول ۳- مدل‌های مختلف ANN با ۱ پارامتر ورودی

لایه/تابع انتقال	تعداد لایه پنهان	تعداد نرون	آموزش		صحت سنجی	
			RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>
Sigmoid	1	2	0.0597	0.8798	0.0588	0.8643
Sigmoid	1	3	0.0563	0.8911	0.0614	0.8614
Sigmoid	1	4	0.0615	0.8703	0.0482	0.9164
Sigmoid	1	5	0.0572	0.8859	0.0609	0.8720
Gaussian, Sigmoid	1	4	0.0602	0.8776	0.0574	0.8750
Hyper Secant, Sigmoid	1	4	0.0588	0.8718	0.0544	0.9092
Hyper Tangent, Sigmoid	1	4	0.0597	0.8817	0.0511	0.8955
Hyperbolic Tangent	1	4	0.0565	0.8909	0.0655	0.8538
Hyperbolic Secant	1	4	0.0560	0.8825	0.0608	0.8866



شکل ۷- مدل شبکه عصبی با ۲ پارامتر ورودی



شکل ۶- مدل شبکه عصبی با ۱ پارامتر ورودی

چهار عملگر اصلی که شامل {+، -، /، \*} و نیز توابع اصلی ریاضی  $\{ \ln(x), \log(x), e^x \}$  استفاده بعمل آمد. بهترین مجموعه توابع و پارامترهای بکار رفته در مدل‌سازی GP برای تحقیق حاضر در جدول ۴ آورده شده است.

نتیجه اجرای برنامه‌ریزی ژنتیک برای دو حالت معادلات خطی و غیر خطی بترتیب مطابق روابط زیر می‌باشد.

$$C_d = 0.741 + 0.372 \left( \frac{H_1}{L} \right) \quad (8)$$

$$R^2 = 0.887$$

$$C_d = 0.435 + \left( \frac{H_1}{L} \right) - 0.778 \left( \frac{H_1}{L} \right)^2 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.952$$

شکل ۱۰ داده‌های مشاهداتی را در مقابل داده‌های شبیه‌سازی شده توسط GP در حالت خطی نشان می‌دهد، و همچنین شکل ۱۱ مقادیر همان پارامترها را در حالت غیرخطی نشان می‌دهد.

## بحث

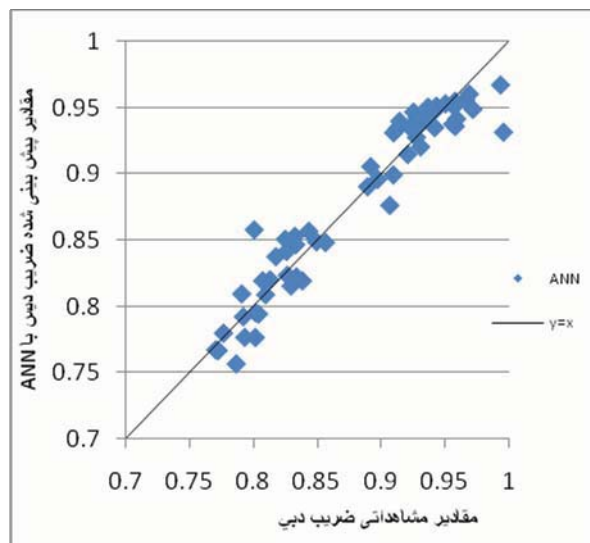
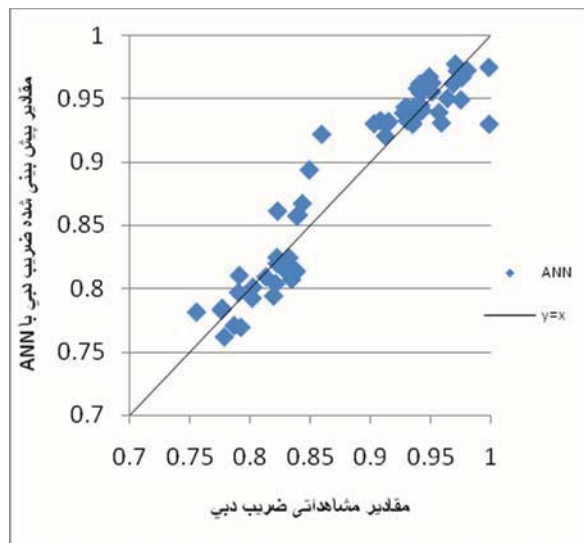
ملاحظه می‌شود که در روش برنامه‌ریزی ژنتیک (معادلات خطی و غیرخطی) اثر پارامتر  $H_1/P$  نادیده گرفته شده و ضریب تبیین در حالت خطی از طرق رگرسیون معمولی و برنامه‌ریزی ژنتیک یکسان است.

برای حالتی که یک پارامتر ورودی داریم مقدار RMSE برای آموزش مدل برابر ۰/۰۶۱۵ و برای صحت‌سنجی داده‌ها ۰/۰۴۸۲ بدست آمد. همچنین مقدار ضریب هم‌بستگی برای حالت آموزش ۰/۸۷۰۳ و برای صحت‌سنجی داده‌ها ۰/۹۱۶۴ برآورد شد. در شکل ۸ مقادیر حاصل از نتایج آزمایشگاهی در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل شبکه عصبی رسم شده است. از طرفی زمانی که تعداد پارامترهای ورودی به مدل شبکه عصبی را به دو تا افزایش می‌دهیم مقادیر RMSE برای آموزش و تست مدل به ترتیب عبارتند از ۰/۰۵۶۱۹ و ۰/۰۴۴۶۱، همچنین مقدار  $R^2$  نیز برای آموزش ۰/۸۸۹۹ و برای تست داده‌ها ۰/۹۲۷۱ بدست آمد. در شکل ۹ نتایج بدست آمده از مدل شبکه عصبی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی متناظر با آن رسم شده است.

## مدل‌سازی با برنامه‌ریزی ژنتیک

فرآیند مدل‌سازی ضریب دبی با استفاده از رهیافت برنامه‌ریزی ژنتیک به صورت زیر می‌باشد:

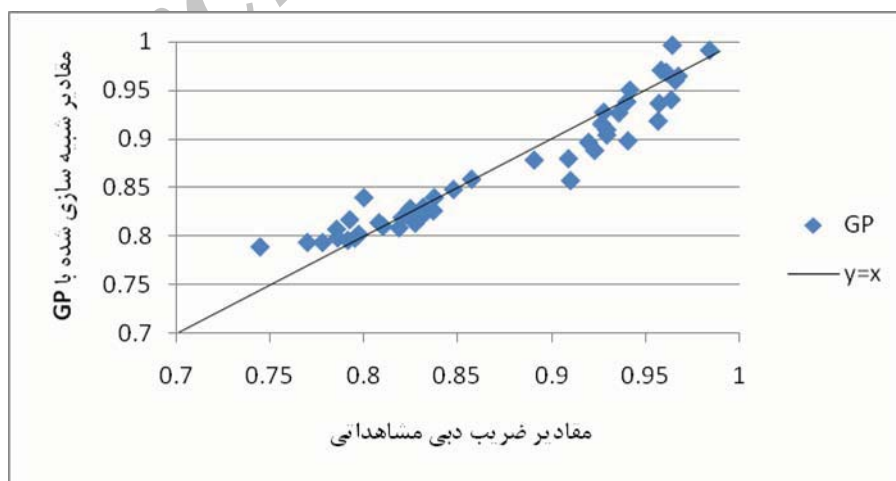
گام اول، شامل انتخاب معیار برازش مناسب می‌باشد. در مطالعه حاضر، ضریب تبیین  $R^2$  به عنوان معیار برازش انتخاب گردید. از طرفی انتخاب مجموعه توابع اگرچه یک امر صریح و ساده نمی‌باشد، لیکن یک حدس اولیه در اینگونه موارد کافی خواهد بود. در این مطالعه از



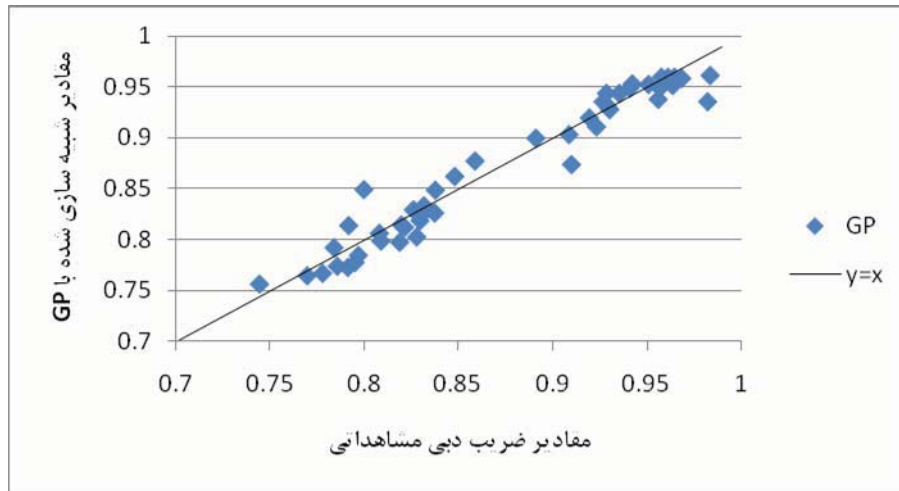
شکل ۸- نتایج ANN در برابر نتایج آزمایشگاهی (۱ پارامتر ورودی)      شکل ۹- مقایسه نتایج ANN با نتایج آزمایشگاهی (۲ پارامتر ورودی)

جدول ۴- پارامترهای مدل بهینه GP

پارامتر	توصیف پارامتر	مجموعه‌ی پارامتر
p1	Function set	+, -, *, /
p2	Population size	500
p3	Mutation frequency (%)	96
p4	Crossover frequency (%)	50
p5	Number of replication	10
p6	Block mutation rate (%)	30
p7	Instruction mutation rate (%)	30
p8	Instruction data mutation rate (%)	40
p9	Homologous crossover (%)	95
p10	Program size	Initial 64, maximum 256



شکل ۱۰- داده‌های آزمایشگاهی در مقابل داده‌های شبیه سازی شده با GP (حالت خطی)



شکل ۱۱- داده‌های آزمایشگاهی در مقابل داده‌های شبیه‌سازی شده با GP (حالت غیرخطی)

ضریب تبیین بدست آمده برنامه‌ریزی ژنتیک در حالت غیرخطی نتایج بهتری را نسبت به مدل شبکه عصبی و تابع رگرسیونی نشان داده است. اگرچه مقدار اختلاف ضریب تبیین روش برنامه‌ریزی ژنتیک با رگرسیون معنی‌دار نمی‌باشد، اما می‌توان گفت روش برنامه‌ریزی ژنتیک در تخمین ضریب دبی روش مناسبی است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله کاربرد برنامه‌ریزی ژنتیک و هم‌چنین شبکه عصبی مصنوعی و معادلات رگرسیونی در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای لبه‌پهن مرکب مقایسه و بررسی گردید. این روش‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به عنوان ورودی قادر به تخمین ضریب دبی می‌باشند. مدل جدید GP همانند مدل‌های قدیمی‌تر مثل معادلات رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی، می‌تواند با دقت خوبی ضریب دبی را تخمین بزند.

ولی ضریب تبیین در حالت غیرخطی از طریق برنامه‌ریزی ژنتیک بیشتر از رگرسیون معمولی بدست آمده است البته مقدار اختلافشان قابل توجه نمی‌باشد. علت حذف عامل بی بعد  $H_1/p$  احتمالاً مربوط به این موضوع است که چون در مجموعه این آزمایشات ارتفاع  $p$  برابر سه مقدار ۱۰، ۱۳ و ۱۶ سانتی متر در نظر گرفته شده بود، لذا بدلیل اختلاف اندک بین مقادیر انتخابی، عامل  $H_1/p$  کم‌اثر تر از عامل  $H_1/L$  بوده است. لذا در این زمینه انجام آزمایشات بیشتر پیشنهاد می‌گردد.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی و معادلات رگرسیونی (خطی و غیرخطی) و برنامه‌ریزی ژنتیک مهمترین پارامتر بی‌بعد موثر بر ضریب دبی  $H_1/L$  می‌باشد. همان‌طور که از نتایج شبکه عصبی مشاهده می‌شود تخمین ضریب دبی در حالتی که دو پارامتر ورودی ( $H_1/L$  و  $H_1/p$ ) داریم بیشتر از حالتی می‌باشد که تنها پارامتر  $H_1/L$  را بعنوان ورودی به برنامه وارد کنیم. اما از سوی دیگر این اختلاف مقدار کمی می‌باشد که بیانگر تاثیر کم پارامتر  $H_1/p$  است. بنابراین نتایج شبکه عصبی نتایج حاصل از GP را تصدیق می‌کند. با توجه به مقادیر

### منابع

- ۱- پوراسکندر س. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان در سرریز مرکب لبه‌پهن مستطیلی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تبریز.
- ۲- پوراسکندر س.، سلماسی ف.، و حسین‌زاده دلیر ع. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییر عرض سرریز مرکب لبه‌پهن در خصوصیات جریان. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۳- خسروجردی ا.، کاویانپور م.ر.، شمسایی ا.، و دائمی ع. ۱۳۸۰. بررسی هیدرولیکی سرریزهای لبه‌پهن و اثر قوس محوری. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تهران.
- ۴- داندانه مهر ع.، و مجدزاده طباطبایی م.ر. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر توالی دبی روزانه در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۴، شماره ۲، صفحه ۲۳۳-۳۲۵.
- ۵- شگری ن.، فرهودی ج.، و گودرزی ا. ۱۳۸۷. بررسی تاثیر شیب وجه پایین دست سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی بر شرایط جریان (پروفیل سرعت



- و عمق بحرانی). تهران. دانشگاه صنعت آب و برق.
- ۶- عاجلو ن. و فرهودی ج. ۱۳۸۷. بررسی تاثیر تغییر طول سرریز لبه‌پهن مستطیلی دو شیبه بر مشخصه‌های جریان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- ۷- فرخی ا، گیوه‌چی م. و اژدری مقدم م. ۱۳۹۰. تخمین ضریب گذردهی سرریز جانبی مایل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان.
- ۸- محمدی ک، فرزین س، کاردان ن. و حسن زاده ی. ۱۳۹۰. بررسی چگونگی تاثیرپذیری ضریب دبی از برخی پارامترهای بی‌بعد و تعیین ضریب شدت جریان در روزنه جانبی با استفاده از شبیه‌سازی هوشمند. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان.
- 9- Banzhaf W., Nordin P., Keller R.E., and Francone F.D. 1998. Genetic programming, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.
- 10- Bilhan O., Emiroglu M.E., and Kisi O. 2010. Application of two different neural network techniques to lateral outflow over rectangular side weirs located on a straight channel, *Advances in Engineering Software*, 41:831-837.
- 11- Gogos M., Defne Z., and Ozkandemir V. 2006. Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3):272-280.
- 12- Hager W.H., and Schwalt M. 1994. Broad-crested weir, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1):13-26.
- 13- Koza J. 1992. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection, MIT Press, Cambridge, MA.
- 14- Martinez J., Reca M., Morillas M.T., and Lopez J.G. 2006. Design and calibration of compound sharp-crested weir, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2):112-116.
- 15- Muttill N., and Chau K.W. 2006. Neural network and genetic programming for modeling coastal algal blooms, *International Journal of Environment and Pollution*, 28(3-4):223-238.
- 16- Ramamurthy S.A., Tim U.S., and Rao M.V.A. 1998. Characteristics of square-edged and round-nosed broad-crested weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(1):61-73.
- 17- Sargison J.E., and Percy A. 2009. Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1):115-118.

Archive of SID

## Regression Analysis, Genetic Programming and ANN to Predict Discharge Coefficient of Compound Broad Crested Weir

A. Masoodi<sup>1\*</sup> - P. Parsamehr<sup>2</sup> - F. Salmasi<sup>3</sup> - S. Pureskandar<sup>4</sup>

Received: 30-5-2011

Accepted: 9-6-2012

### Abstract

Compound broad-crested weir, have a small inner rectangular section for measuring low flows and then, they broaden to a wide rectangular section at higher flow depths. This paper presents data that will be of use in the design of hydraulic structures for flow control and measurement. A series of laboratory experiments was performed in order to investigate the effects of length of the lower weir crest and step height of broad-crested weirs of rectangular compound cross section on the values of the discharge coefficient. For this purpose, 15 different broad-crested weir models with rectangular compound cross sections for a wide range of discharges tested. Multiple regression equations based on dimensional analysis theory were developed for computing discharge coefficient. The results of compound broad-crested weirs were compared with Genetic programming (GP) and Artificial neural network (ANN) and it was found that the ANN formulation of the problem of solving for the discharge coefficient is less successful than that by GP. The implementation of GP offers another formulation for discharge coefficient.

**Keywords:** Compound broad-crested weir, Discharge coefficient, Intelligent Artificial

1,2,3,4- Former MSc Students, Associate Professor, and Former MSc Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran, Respectively  
(\* - Corresponding Author Email: azam.masoodi@gmail.com)