# شبیه‌سازی ضریب دبی سرریزهای لبه تیز دایره‌ای توسط مدل ترکیبی انفیس- کرم شب‌تاب

امیر علیزاده، بهروز یعقوبی* و سعید شعبانلو[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۲)

**چکیده**

**در این مطالعه، ضریب دبی سرریزهای لبه تیز واقع بر کانال‌های دایره‌ای با استفاده از مدل‌های انفیس و انفیس-کرم شب‌تاب شبیه‌سازی شد. همچنین برای بررسی افزایش قابلیت مدل‌های عددی از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو استفاده شد. این درحالی است که روش اعتبارسنجی ضربدری برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی به‌کار گرفته شد. با توجه به پارامترهای ورودی، چهار مدل انفیس و انفیس-کرم شب‌تاب معرفی شد. تجزیه‌و تحلیل نتایج عددی نشان می‌دهد که مدل برتر ضریب دبی را به‌عنوان تابعی از عدد فرود (Fr) و نسبت عمق جریان روی تاج سرریز به ارتفاع تاج سرریز (h/P) شبیه‌سازی کرد. مقادیر MARE، RMSE و R برای مدل برتر به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۹۹۹ محاسبه شد. این درحالی است که حداکثر مقدار MARE برای این مطالعه کمتر از ۲ درصد بود.**

**واژه‌های کلیدی: سرریز دایره‌ای ، ضریب دبی، شبیه‌سازی، انفیس، الگوریتم کرم شب‌تاب**

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: behrouz.yaghoubi.h@gmail.com



www.SID.ir

Archive of SID

**مقدمه**

به‌طور کلی، سرریزها سازه‌های هیدرولیکی ساده‌ای هستند که برای کنترل، تنظیم و اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز مورد استفاده قرار می‌گیرند. پژوهشگران مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و تئوریک بسیاری را روی رفتار هیدرولیکی سرریزها انجام داده‌اند. به‌عنوان مثال، بالاچاندار و همکاران (۳)، دی (۶-۴) و استرلینگ و نایت (۱۳) رفتار هیدرولیکی سرریزهای لبه تیز دایره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه، وطن‌خواه (۱۴) مقادیر دبی و ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای را با استفاده از روش انتگرال‌گیری محذوف پیش‌بینی کرد. وی مقادیر روش تحلیلی را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه کرد و نشان داد روش مذکور حداکثر ۰/۰۸ درصد خطا داشت. همچنین وی یک رابطه برای محاسبه زمان مورد نیاز برای تخلیه مخزن دارای سرریز دایره‌ای ارائه کرد. همچنین، باقری و حیدرپور (۲) با استفاده از تئوری گردابه‌های غیرچرخشی، جریان عبوری از روی سرریزهای دایره‌ای را شبیه‌سازی کردند. آنها با استفاده از این روش ضریب دبی و توزیع سرعت روی این نوع از سرریزها را به‌دست آوردند. آنها نشان دادند که مدل تحلیلی ارائه شده مقادیر ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای شکل را با دقت مناسبی تخمین زد. نبوی و همکاران (۱۰) در یک مطالعه تحلیلی و با استفاده از تئوری گردابه آزاد مقدار نسبت عمق انتهایی برای کانال‌های دایره‌ای و U شکل را تخمین زدند. آنها نشان دادند که این مدل تحلیلی دارای دقت مناسبی بود. وطن‌خواه و خلیلی (۱۵) در یک مطالعه آزمایشگاهی جریان عبوری از روی سرریزهای دایره‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با تجزیه‌وتحلیل نتایج آزمایشگاهی یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سرریزها ارائه کردند. رابطه آنها مقادیر ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای را برحسب نسبت هد جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز محاسبه کرد.

شبیه‌سازی با استفاده از محاسبات نرم و تکنیک‌های هوش مصنوعی در تخمین و پیش‌بینی پدیده‌های مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مورد استفاده پژوهشگران مختلف قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، دورسان و همکاران (۷) با استفاده از مدل انفیس رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی نیمه‌بیضوی واقع بر دیواره جانبی کانال‌های مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی ارائه کردند. علاوه بر این، عظمت ا.. و همکاران (۱) به‌وسیله الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن دبی عبوری از میان دریچه کشویی مستطیلی واقع بر کانال‌های باز را پیش‌بینی کردند. آنها رابطه‌ای را به‌عنوان تابعی از عدد فرود جریان و نسبت عمق جریان در بالادست دریچه به بازشدگی دریچه، برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سرریزها پیشنهاد دادند. ابتهاج و همکاران (۸) ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی واقع بر دیواره کانال‌های مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی را توسط مدل شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها پیش‌بینی کردند. همچنین، شعبانلو (۱۲) با استفاده از روش شبکه عصبی ماشین آموزش نیرومند خود تطبیقی ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای شکل را شبیه‌سازی کرد. وی برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی یک ماتریس پیشنهاد داد.

همان گونه که مشاهده می‌شود کانال‌های دایره‌ای به شکل گسترده‌ای در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده می‌شوند و همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته‌اند. در مقابل سرریزهای لبه تیز یکی از کاربردی‌ترین سرریزها هستند که برای اندازه‌گیری و تنظیم جریان در داخل کانال‌های باز استفاده می‌شوند. از یک‌طرف، ضریب دبی یک سرریز مهم‌ترین پارامتر برای طراحی آن محسوب می‌شود و در این بین مطالعات فراوانی روی آن انجام گرفته است. علاوه بر این، سرریزهای دایره‌ای شکل در مقایسه با سرریزهای مستطیلی به‌صورت گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند و نیازمند بررسی و مطالعه بیشتر هستند. از طرف دیگر، تکنیک‌های مختلفی برای بهینه سازی الگوریتم‌های هوش مصنوعی وجود دارد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم کرم شب‌تاب به‌طور چشمگیری دقت و انعطاف روش‌ها محاسبات نرم را افزایش می‌دهند. بنابراین، در این مطالعه برای اولین بار ضریب دبی


www.SID.ir

Archive of SID

سرریزهای دایره‌ای شکل توسط مدل ترکیبی انفیس- کرم شب‌تاب تخمین زده می‌شود. بدین منظور، ابتدا، پارامترهای ورودی مؤثر روی ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای شکل شناسایی شده و با استفاده از آنها برای هر یک از مدل‌های انفیس و انفیس- کرم شب‌تاب چهار مدل متمایز توسعه داده می‌شود. در ادامه با تجزیه‌وتحلیل نتایج کلیه مدل‌های هوش مصنوعی، مدل برتر و مؤثرترین پارامترهای ورودی شناسایی خواهند شد.

## مواد و روش‌ها

### شبکه انفیس

شبکه انفیس ترکیبی از سیستم فازی و شبکه عصبی مصنوعی است و مزایای هر دو را به‌طور همزمان دارد. بخش فازی رابطه‌ای بین ورودی و خروجی برقرار کرده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی به‌وسیله الگوریتم‌های آموزشی شبکه عصبی تعیین می‌شوند. بنابراین خصوصیات هر دو مدل فازی و عصبی در این سیستم نهفته است. ساختار مناسب انفیس متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی، انتخاب می‌شود. در لایه اول (ورودی) میزان تعلق هر ورودی به بازه‌های مختلف فازی مشخص می‌شود. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن قانون‌ها ($w_i$) در لایه دوم به‌دست می‌آید. در لایه سوم، عمل محاسبه وزن نسبی قوانین انجام می‌گیرد. لایه چهارم، لایه قوانین است که از انجام عملیات روی سیگنال‌های ورودی به این لایه، حاصل می‌شود . لایه آخر، خروجی شبکه (f) است که هدف آن حداقل کردن اختلاف خروجی به‌دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است (۹).

### الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm: FA)، اولین‌بار توسط یانگ (۱۶) ارائه شد. ایده اصلی این روش از ارتباط نوری میان کرم‌های شب‌تاب الهام گرفته شد. این الگوریتم را می‌توان جزء نمونه‌های عینی هوش ازدحامی (Swarm intelligence) تلقی کرد که در آن همکاری و احتمالاً رقابت اعضای ساده و کم‌هوش، مرتبه بالاتری از هوشمندی را ایجاد می‌کنند که قطعاً توسط هیچ‌یک از اجزا قابل دستیابی نیست.

الگوریتم کرم شب‌تاب بر پایه قوانین زیر ارائه شده است (۱۶):

۱) همه کرم‌های شب‌تاب دو جنسیتی هستند. به‌عبارت دیگر، صرف‌نظر از جنسیت خود به‌صورت جذاب‌تر و شفاف‌تری حرکت خواهند کرد به‌طوری که یک کرم شب‌تاب، کرم‌های شب‌تاب دیگر را جذب می‌کند.

۲) درجه جذابیت یک کرم شب‌تاب با درخشش آن متناسب است. همچنین ممکن است درخشندگی با افزایش فاصله از کرم‌های شب‌تاب دیگر کاهش یابد. در این شرایط اگر یک کرم شب‌تاب جذاب‌تر وجود نداشته باشد، درنتیجه کرم‌های شب‌تاب دیگر به‌صورت تصادفی حرکت خواهد کرد.

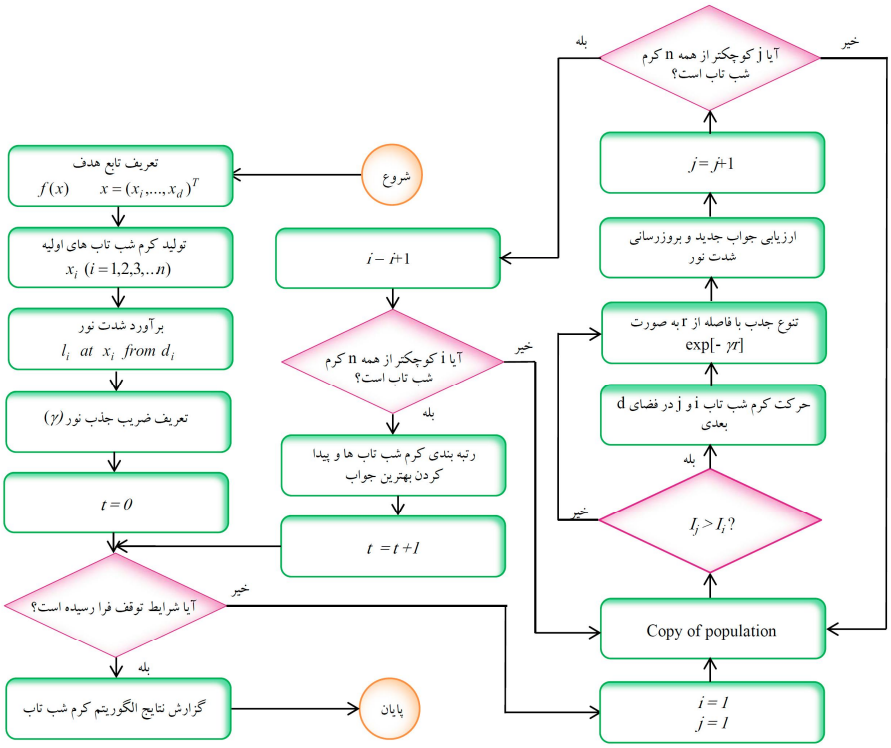
۳) درخشندگی یا شدت نور یک کرم شب‌تاب، توسط مقدار تابع هدف تعیین می‌شود.

الگوریتم کرم شب‌تاب، الگوریتمی تکاملی بر پایه جمعیت است که از رفتار کرم‌های شب‌تاب در جستجوی غذا و هوش جمعیتی آنها، الهام گرفته شده است. در طبیعت کرم‌های شب‌تاب به‌صورت تصادفی حرکت می‌کنند و هر کرم طعمه بهتری پیدا کند از خود نور بیشتری ساطع می‌کند و دیگران را به‌سمت خود جذب می‌کند. هرچه فاصله دو کرم از یکدیگر بیشتر باشد، درصد جذب نور آنها به یکدیگر کمتر می‌شود. به بیان دیگر، فاصله با سرعت و میزان جذب نسبت عکس دارد. این الگوریتم از دو بخش اساسی تشکیل شده است؛ ۱) تغییرات شدت نور و ۲) حرکت به‌سمت کرم شب‌تاب با نور بیشتر. میزان شدت نور به مقدار تابع هزینه بستگی دارد. لذا در مسائل کمینه‌سازی، کرم شب‌تاب با نور زیادتر، کرم‌های شب‌تاب با نور کمتر را به‌خود جذب می‌کند.


www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۱. روندنمای الگوریتم کرم شب‌تاب مورد استفاده در این مطالعه**

به‌طورکلی، روندنمای الگوریتم کرم شب‌تاب به‌صورت زیر است:

۱- تعیین و مقداردهی اولیه کرم‌های شب‌تاب (جمعیت اولیه)

۲- به‌دست آوردن تابع هزینه برای هر فرد از جمعیت در موقعیت خود،

۳- تخصیص تصادفی شدت نور به هر فرد از جمعیت،

۴- تعیین بهترین (پرنورترین) فرد در جمعیت به‌واسطه محاسبه توابع هزینه کل افراد جمعیت،

۵- حرکت دیگر افراد جمعیت به‌سمت بهترین فرد و بروزرسانی شدت نور با توجه به آن،

۶- بررسی شرایط توقف. اگر شرایط توقف مهیا بود، حرکت به‌سمت مرحله بعد، در غیر این‌صورت، حرکت به‌سمت گام ۴

۷- پایان الگوریتم.

عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب به‌طور کامل به تعداد جمعیت اولیه، تابع جذب و ضریب جذب وابسته است. هر چه ضریب جذب نرو بیشتر باشد، سرعت جذب افراد جمعیت به سمت پرنورترین فرد، بیشتر می‌شود. در شکل ۱ روندنمای الگوریتم کرم شب‌تاب قابل مشاهده است.

## آموزش سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب

به‌منظور آموزش انفیس با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب، ابتدا باید فضای حل مثال و یا دامنه متغیرهایی که نیاز به بهینه سازی دارند و تابع شایستگی (fitness function)، تعیین شود. در این مطالعه ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error (RMSE)) برای ارزیابی عملکرد انفیس آموزش دیده با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب، به‌عنوان تابع شایستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر کرم شب‌تاب شامل مجموعه‌ای از پارامترهای مقدم (antecedent) و نتیجه (consequent) است. به‌منظور آغاز شبیه‌سازی، جمعیت اولیه کرم شب‌تاب‌ها به‌طور تصادفی تعیین می‌شود. هر یک از



www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. محدوده مقادیر آزمایشگاهی وطن‌خواه و خلیلی (۱۵)

| پارامتر | محدوده |
|---|---|
| $Q\left(m^3/s\right)$ | 0.000734-0.038357 |
| $D(m)$ | 0.191 and 0.301 |
| $P(m)$ | 0.06-0.22 |
| $h(m)$ | 0.0139-0.1373 |
| $y(m)$ | 0.0892-0.2842 |

کرم‌های شب‌تاب می‌توانند با مجموعه پارامترهای سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی نگاشت داشته باشد. با توجه شدت نور مربوط به هر یک از کرم‌های شب‌تاب، جذابیت مربوط به هر یک محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شود و کرم‌های شب‌تاب با روشنایی کمتر، به‌سمت کرم‌های شب‌تاب دارای بیشترین روشنایی، حرکت می‌کنند. در ادامه مقدار تابع شایستگی محاسبه می‌شود. این روند تا رسیدن به مقدار تکرار تعیین شده و یا حداقل مقدار تابع شایستگی مورد نظر، ادامه می یابد.

## مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌های عددی از مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط وطن‌خواه و خلیلی (۱۵) استفاده شد. مدل آزمایشگاهی شامل یک کانال دایره‌ای افقی است که سرریز لبه تیز در انتهای کانال نصب شده است. سرریزهای لبه تیز از صفحات آزمایش‌ها در داخل دو کانال به قطرهای ۰/۱۹۱ و ۰/۳۰۱ انجام گرفته است که از جنس پی‌وی سی ساخته شده‌اند. محدوده اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اندازه گیری شده توسط وطن‌خواه و خلیلی (۱۵) در جدول ۱ مرتب شده است. در این جدول $Q$، $D$، $P$، $h$ و $y$ به‌ترتیب برابر دبی داخل کانال دایره‌ای، قطر کانال دایره‌ای، ارتفاع تاج سرریز، هد جریان روی سرریز و عمق جریان داخل کانال دایره‌ای است. در شکل ۲ طرح نمادین مدل آزمایشگاهی وطن‌خواه و خلیلی (۱۵) نشان داده شده است.

## ضریب دبی سرریزهای لبه تیز

بر اساس معادله (۱) رهباک (۱۱) ضریب دبی سرریزهای لبه تیز را به‌عنوان تابعی از نسبت هد جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز $(h/P)$ درنظر گرفت:

$$C_d = 0.611 + 0.08\left(\frac{h}{p}\right) \qquad (۱)$$

همچنین وطن‌خواه و خلیلی (۱۵) ضریب دبی سرریزهای لبه تیز واقع بر کانال‌های دایره‌ای را برحسب نسبت $h/P$ پیشنهاد دادند. در این مطالعه به‌منظور شناسایی مدل برتر و پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی ظرفیت آبگذری سرریزهای لبه تیز واقع بر کانال‌های دایره‌ای، تأثیرات عدد فرود $(Fr)$، نسبت هد جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز $(h/P)$ و نسبت قطر کانال دایره‌ای به ارتفاع تاج سرریز $(D/P)$ در شبیه‌سازی پارامتر ضریب دبی $(C_d)$ درنظر گرفته می‌شود:

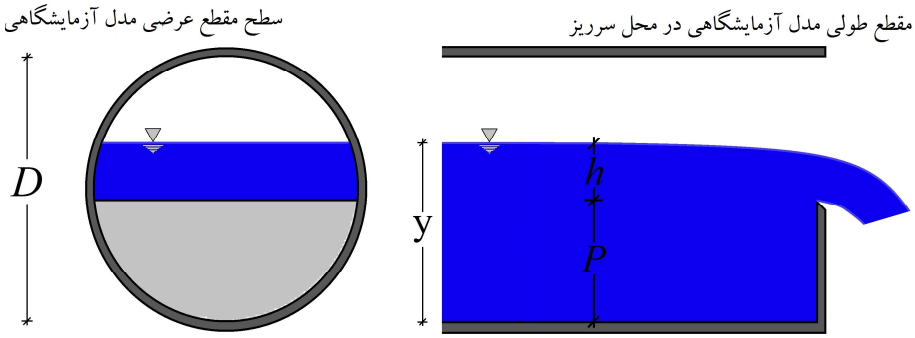
$$C_d = f\left(Fr, \frac{h}{P}, \frac{D}{p}\right) \qquad (۲)$$

برای مدل‌سازی ضریب دبی سرریزهای لبه تیز واقع بر کانال های دایره‌ای توسط مدل‌های عددی، چهار مدل مختلف معرفی شده است. نحوه ترکیب پارامتری ورودی برای مدل‌های چهارگانه در شکل ۳ مشخص است. همچنین در این مطالعه، برای افزایش توانایی مدل‌های عددی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو (Monte Carlo simulation) استفاده می‌شود. شبیه‌سازی مونت کارلو یک طبقه‌بندی گسترده از الگوریتم‌های محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج عددی استفاده می‌کند. این روش به‌طور کلی با استفاده از توزیع احتمالی، مسائل مختلف از قبیل بهینه‌سازی و انتگرال‌گیری‌های عددی را حل می‌کند. علاوه بر این، از روش اعتبارسنجی چند لایه‌ای (k-fold cross validation) برای آموزش و آزمون مدل‌های عددی بهره گرفته می‌شود. در روش اعتبارسنجی چند لایه‌ای، نمونه اصلی به‌طور تصادفی به k نمونه فرعی به اندازه مساوی تقسیم می‌شود. در بین نمونه‌های فرعی k، یک نمونه به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی و مابقی آنها به‌عنوان داده‌های تست برای هر یک از مدل عددی استفاده می‌شود. سپس

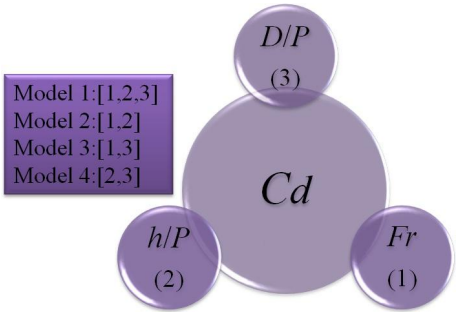

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۲. طرح نمادین مدل آزمایشگاهی وطن‌خواه و خلیلی (۱۵)**




**شکل ۳. نحوه ترکیب پارامترهای مختلف برای پیش‌بینی ضریب دبی با استفاده از مدل عددی**

روند اعتبارسنجی چند لایه، k بار تکرار می‌شود (برابر تعداد لایه‌ها)، هر کدام از نمونه‌های فرعی k، دقیقاً یک‌بار به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس نتایج به‌دست آمده از k لایه مذکور متوسط‌گیری شده و به‌عنوان یک تخمین ارائه می‌شود. مزیت این روش، تکرار تصادفی نمونه های فرعی در روند تست و آموزش برای کلیه مشاهدات است. به‌عبارت دیگر، هر مشاهده دقیقاً یک‌بار برای اعتبارسنجی مدل عددی مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه مقدار k برابر پنج درنظر گرفته شده است.

## بحث و نتایج

به‌منظور بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی ضریب دبی روزنه جانبی توسط مدل‌های عددی از شاخص‌های آماری درصد میانگین مطلق خطا (MARE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، شاخص پراکندگی (SI) ، BIAS و ضریب همبستگی (R) استفاده می‌شود:

$$MARE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left|(C_d)_{(Predicted)_i} - (C_d)_{(Observed)_i}\right|}{(C_d)_{(Observed)_i}}\right)\times 100 \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left((C_d)_{(Predicted)_i} - (C_d)_{(Observed)_i}\right)^2} \quad (۴)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{(C_d)}_{(Observed)}} \quad (۵)$$

$$BIAS = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left((C_d)_{(Predicted)_i} - (C_d)_{(Observed)_i}\right) \quad (۶)$$

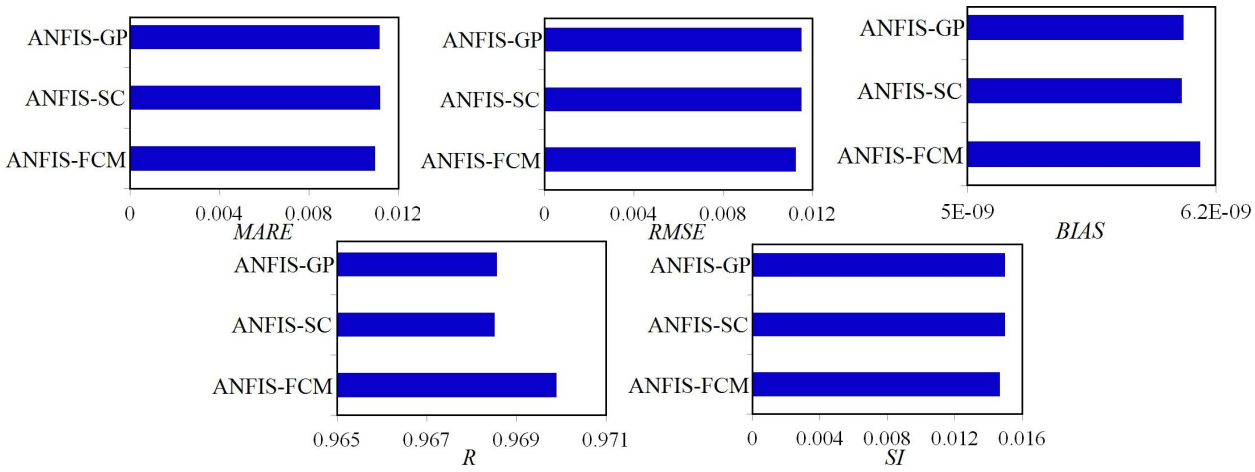
$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left((C_d)_{(Observed)i} - \overline{(C_d)}_{(Observed)}\right)\left((C_d)_{(Predicted)i} - \overline{(C_d)}_{(Observed)}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left((C_d)_{(Observed)i} - \overline{(C_d)}_{(Observed)}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left((C_d)_{(Predicted)i} - \overline{(C_d)}_{(Observed)}\right)^2}} \quad (۷)$$

در اینجا $(C_d)_{(Observed)i}$ ضریب دبی آزمایشگاهی،

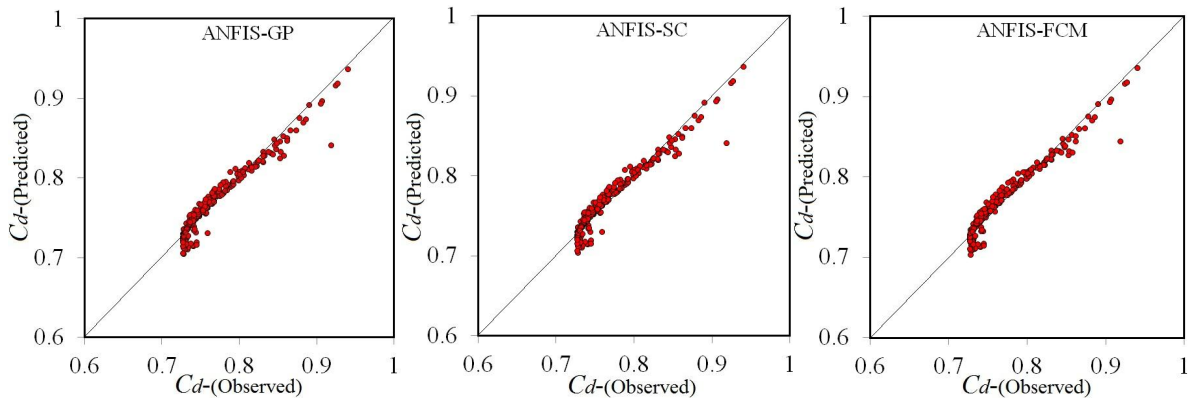


www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۴. نتایج شاخص‌های آماری مختلف برای نسل‌های مختلف سیستم استنتاج فازی**




**شکل ۵. نمودارهای پراکندگی برای نسل‌های مختلف سیستم استنتاج فازی**

$(C_d)_{(Predicted)i}$ ضریب دبی پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل عددی، $(\overline{C_d})_{(Observed)}$ میانگین ضریب دبی آزمایشگاهی و n برابر تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است.

## بررسی نسل‌های مختلف سیستم استنتاج فازی

در ابتدا عملکرد سه نسل مختلف سیستم استنتاج فازی شامل Grid Partitioning (GP)، Subtractive Clustering (SC) و Fuzzy C-Means Clustering (FCM) در پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۴ نتایج شاخص‌های آماری مختلف برای این سه نسل سیستم استنتاج فازی نشان داده شده است. همچنین مقایسه مقادیر ضریب دبی پیش‌بینی شده توسط FIS generation مدل ANFIS با مقادیر مشاهداتی در شکل ۵ قابل مشاهده است. به‌عنوان مثال، مقدار RMSE برای GP، SC و FCM به‌ترتیب مساوی ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۱۱ محاسبه شده است. همچنین برای GP مقادیر MARE و ضریب همبستگی به‌ترتیب برابر ۰/۰۱۱ و ۰/۹۶۹ تخمین زده شده است. در مقابل برای SC مقادیر شاخص‌های آماری BIAS ، SI و R برابر $۶/۰۴\times۱۰^{-۹}$، ۰/۰۱۵ و ۰/۹۶۹ است. این درحالی است که مقدار ضریب همبستگی برای FCM برابر ۰/۹۷۰ تخمین زده شده است. علاوه بر این مقادیر MARE و SI برای این FIS generation به‌ترتیب مساوی ۰/۰۱۱ و ۰/۰۱۵ محاسبه شده است. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود، SC دارای کمترین دقت در مدل‌سازی ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای


www.SID.ir

Archive of SID

است. در مقابل FCM دارای بیشترین دقت در مدل‌سازی ظرفیت آبدهی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی شناسایی شد. بنابراین در ادامه برای پیش‌بینی ضریب دبی از FCM به‌عنوان FIS generation برتر استفاده می‌شود.

**مدل‌های ANFIS**

در این مطالعه چهار مدل مختلف ANFIS برای تخمین ضریب دبی معرفی می‌شود. در شکل ۶ مقایسه ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ANFIS 1 و ANFIS 4 با مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷ نتایج شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مدل‌های مختلف ANFIS مرتب شده است. در مدل ANFIS 1 تأثیر کلیه پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای درنظر گرفته شده است. این مدل مقادیر ضریب را برحسب عدد فرود جریان $(Fr)$، نسبت ارتفاع جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز $(h/P)$ و نسبت قطر کانال دایره‌ای به ارتفاع تاج سرریز $(D/P)$ پیش‌بینی می‌کند. برای مدل ANFIS 1 مقادیر RMSE، MARE و ضریب همبستگی به ترتیب مساوی ۰/۰۱۱، ۰/۰۱۱ و ۰/۹۷۰ محاسبه شده است. همچنین مقدار BIAS برای این مدل مساوی $۶/۰۴\times۱۰^{-۹}$ به‌دست آمده است. همچنین مدل‌های ANFIS 2 تا ANFIS 4 با ترکیبی از دو پارامتر ورودی مقادیر ضریب دبی را شبیه‌سازی می‌کنند. به‌عنوان مثال مدل ANFIS 2 تابعی از عدد فرود جریان $(Fr)$، نسبت ارتفاع جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز $(h/P)$ شبیه‌سازی می‌کند. برای این مدل تأثیر نسبت قطر کانال دایره‌ای به ارتفاع تاج سرریز $(D/P)$ نادیده گرفته شده است. برای این مدل مقادیر SI و ضریب همبستگی به‌ترتیب مساوی ۰/۰۰۲ و ۰/۹۹۹ است. همچنین مقدار RMSE برای ANFIS 2 مساوی ۰/۰۰۲ محاسبه شده است. در بین مدل‌های ANFIS، مدل ANFIS 2 دارای بیشترین دقت است. برای مدل ANFIS 3 تأثیر نسبت ارتفاع جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز حذف شده است. این مدل مقادیر ضریب دبی را برحسب Fr و D/P مدل‌سازی می‌کند. برای این مدل مقدار شاخص R مساوی ۰/۹۴۱ است. همچنین مقادیر RMSE و MARE برای مدل ANFIS 3 به‌ترتیب مساوی ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۶ تخمین زده شده است. برای مدل ANFIS 4 مقادیر SI و RMSE به‌ترتیب برابر ۰/۰۱۳ و ۰/۰۱۰ محاسبه شده است. در بین کلیه مدل‌های با سه پارامتر این مدل مقادیر ضریب دبی را با دقت بیشتری تخمین می‌زند. مقدار ضریب همبستگی برای این مدل مساوی ۰/۹۷۷ محاسبه شده است. این مدل مقادیر ضریب دبی سرریزهای دایره‌ای را برحسب نسبت ارتفاع جریان روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز $(h/P)$ و نسبت قطر کانال دایره‌ای به ارتفاع تاج سرریز $(D/P)$ مدل‌سازی می‌کند. به‌عبارت دیگر برای شبیه‌سازی ضریب دبی توسط ANFIS 4 تأثیرهای عدد فرود حذف شده است.

در ادامه به‌منظور بررسی بیشتر دقت مدل‌های عددی ضریب اختلاف (Discrepancy Ratio) (DR) مدل‌های مذکور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این پارامتر شامل نسبت ضریب دبی شبیه‌سازی شده به ضریب دبی مشاهداتی است:

$$DR = R_{Predicted}/R_{Observed} \qquad (۸)$$

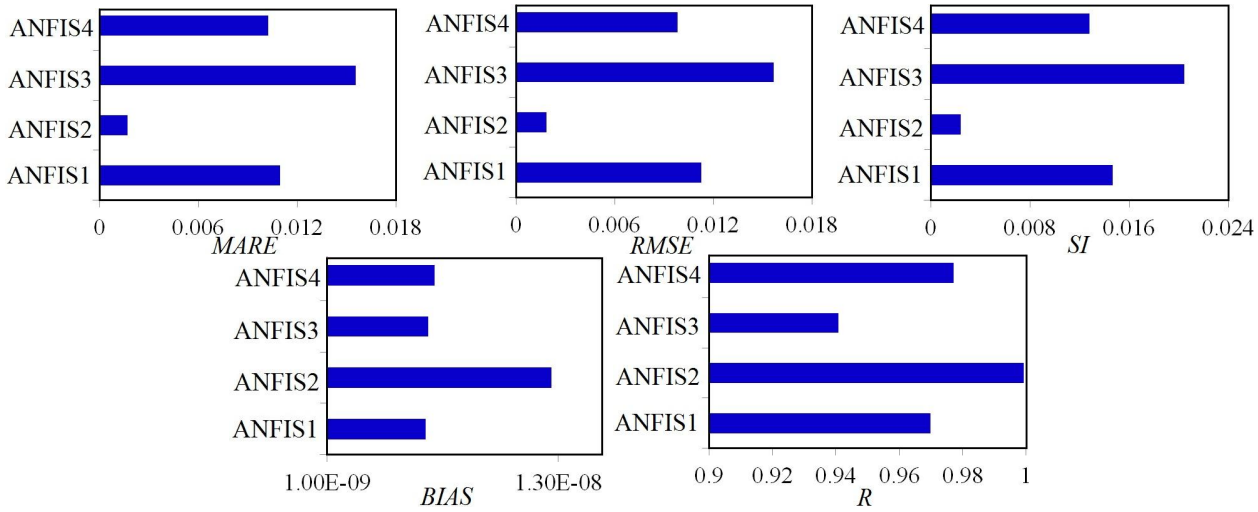
همچنین ضریب اختلاف حداکثر، حداقل و متوسط به‌ترتیب با $DR_{max}$، $DR_{min}$ و $DR_{ave}$ نیز برای مدل‌های مختلف محاسبه شده و در شکل ۸ به‌تصویر کشیده شده است. نزدیک بودن مقادیر ضریب اختلاف به عدد یک نشان‌دهنده نزدیک بودن مقادیر آزمایشگاهی به مقادیر عددی است. به‌عنوان مثال مقادیر ضریب اختلاف حداکثر، حداقل و متوسط برای مدل ANFIS 1 به‌ترتیب مساوی ۱/۰۲۶، ۰/۹۱۸ و ۱/۰۰۰۲ محاسبه شده است. برای مدل‌های ANFIS 2 و ANFIS 3 مقدار $DR_{ave}$ به‌ترتیب مساوی ۱/۰۰۰۰۰۱ و ۱/۰۰۰۳ به‌دست آمده است. علاوه بر این مقدار ضریب اختلاف حداکثر برای مدل ANFIS 4 مساوی ۱/۰۱۹ محاسبه شده است.

**مدل‌های ANFIS-FA**

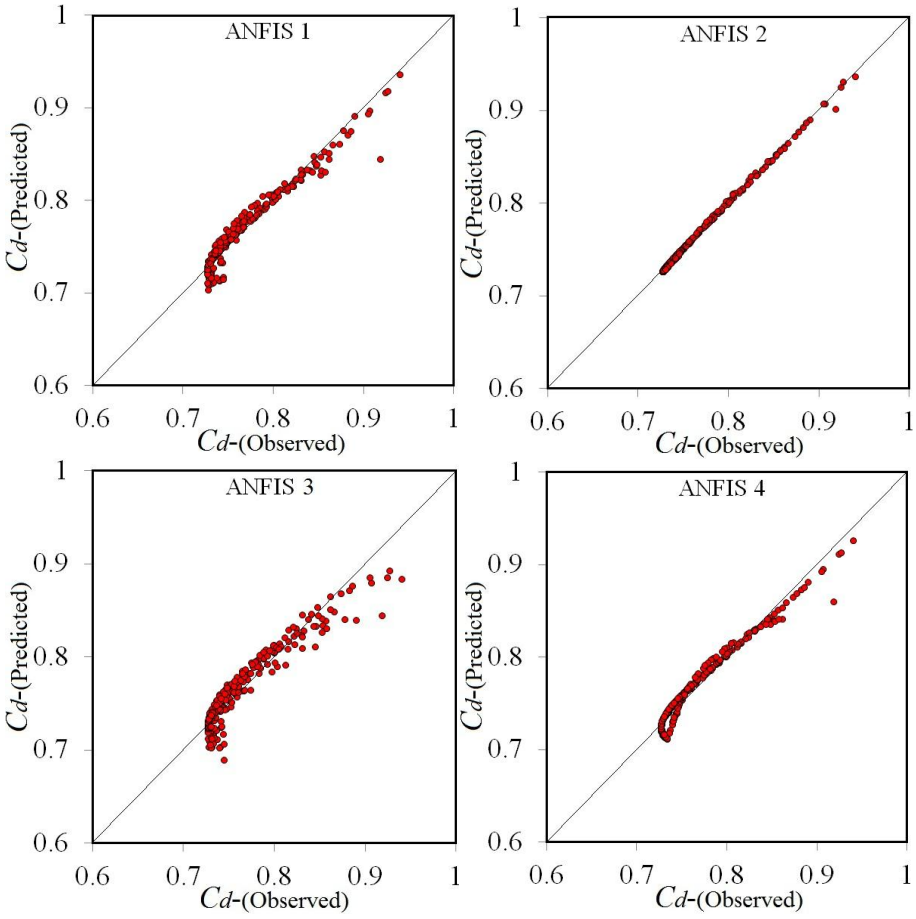
در ادامه نتایج مدل‌های ANFIS-FA بررسی می‌شوند. در


www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۶. نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های ANFIS**

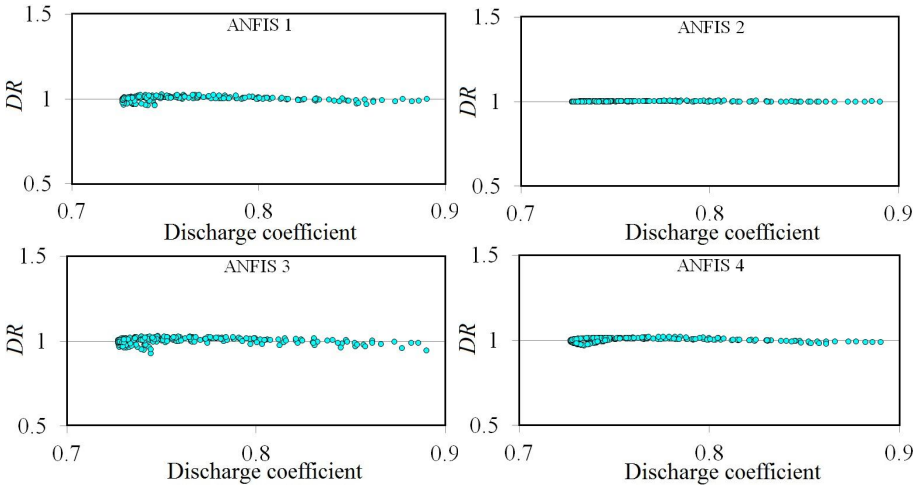



**شکل ۷. نمودارهای پراکندگی برای مدل‌های مختلف**

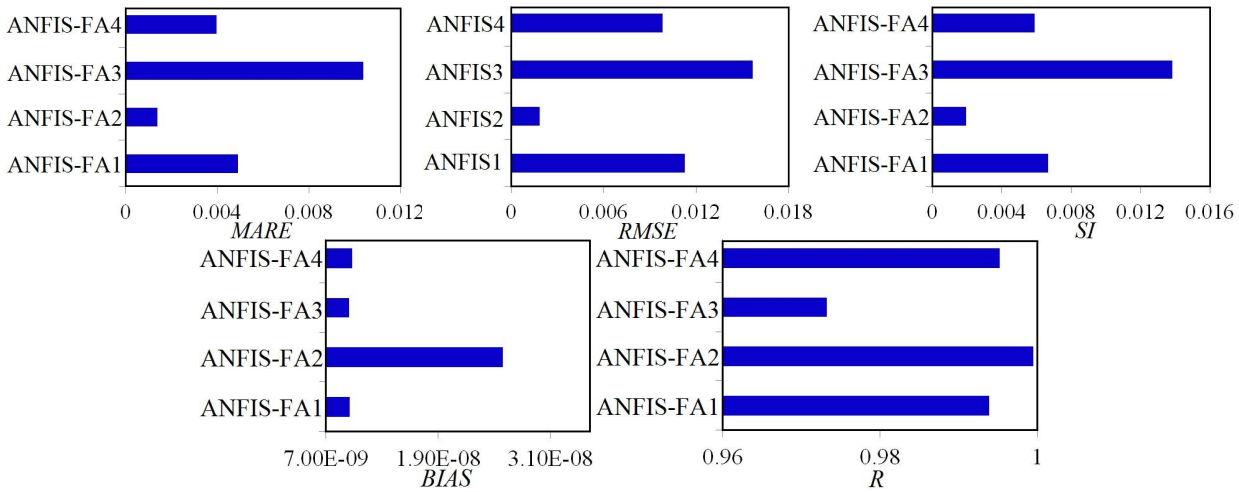

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۸ . تغییرات نسبت اختلاف در مقابل ضریب دبی مشاهداتی برای مدل‌های مختلف ANFIS**




**شکل ۹. نتایج شاخص‌های آماری برای مدل‌های مختلف ANFIS-FA**

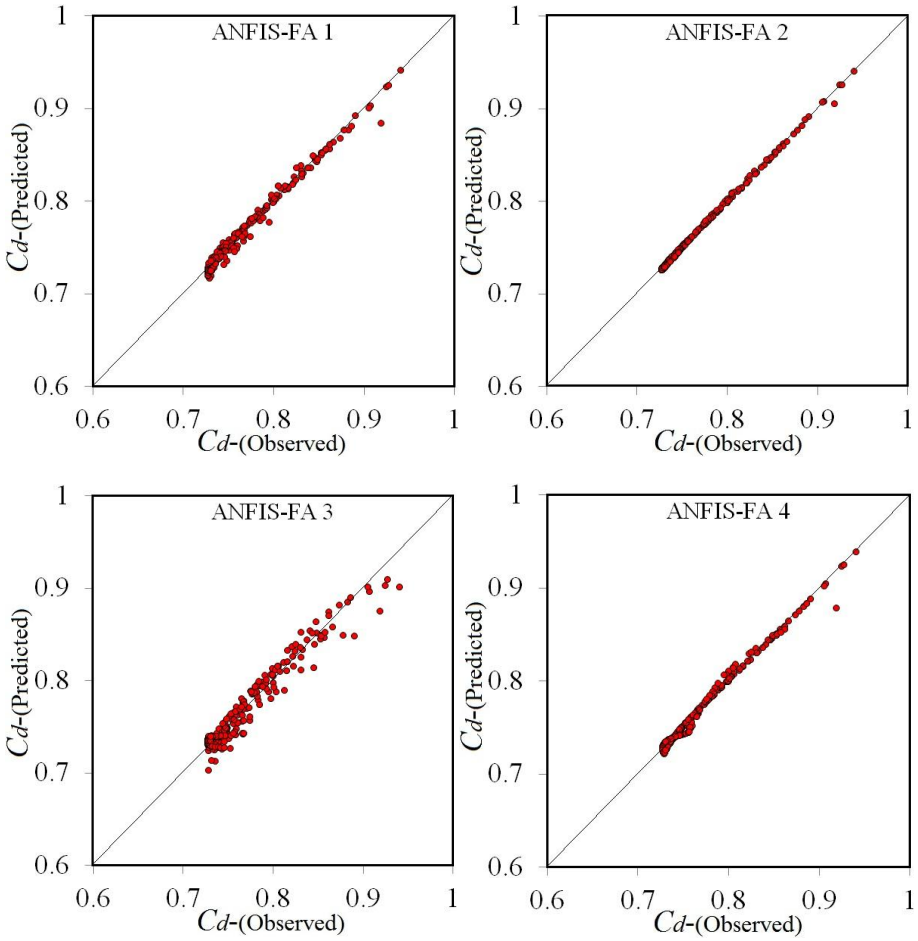
شکل ۹ نتایج شاخص‌های آماری مختلف برای این مدل‌ها مرتب شده است. علاوه بر این، نمودارهای پراکندگی برای مدل‌های ANFIS-FA 1 تا ANFIS-FA 4 در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است. به‌عنوان مثال مقدار شاخص R برای مدل‌های ANFIS-FA 1 و ANFIS-FA 2 به‌ترتیب مساوی ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹۹ محاسبه شده است. علاوه بر این مقدار پارامتر مذکور برای مدل ANFIS-FA 3 برابر ۰/۹۷۳ است. همچنین تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مقادیر MARE و SI برای مدل ANFIS-FA 1 به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۷ محاسبه شده‌اند. در میان کلیه مدل‌های ترکیبی ANFIS-FA 2 دارای بیشترین همبستگی با مقادیر آزمایشگاهی است. برای این مدل مقدار RMSE مساوی ۰/۰۰۲ است. لازم به‌ذکر است که مقادیر MARE برای مدل‌های ANFIS-FA 3 و ANFIS-FA 4 به‌ترتیب مساوی با ۰/۰۱۰ و ۰/۰۰۴ محاسبه شده است. علاوه بر این مقدار BIAS برای ANFIS-FA 4 برابر با $۶/۰۴\times۱۰^{-۹}$ به‌دست آمده است.

در بخش بعدی، به ارزیابی ضریب اختلاف برای مدل‌های ANFIS-FA 1 تا ANFIS-FA 4 پرداخته می‌شود. در شکل ۱۱ توزیع مقدار ضریب اختلاف برای این مدل ها نشان داده شده است. به‌عنوان مثال، مقدار ضریب اختلاف حداکثر، حداقل و

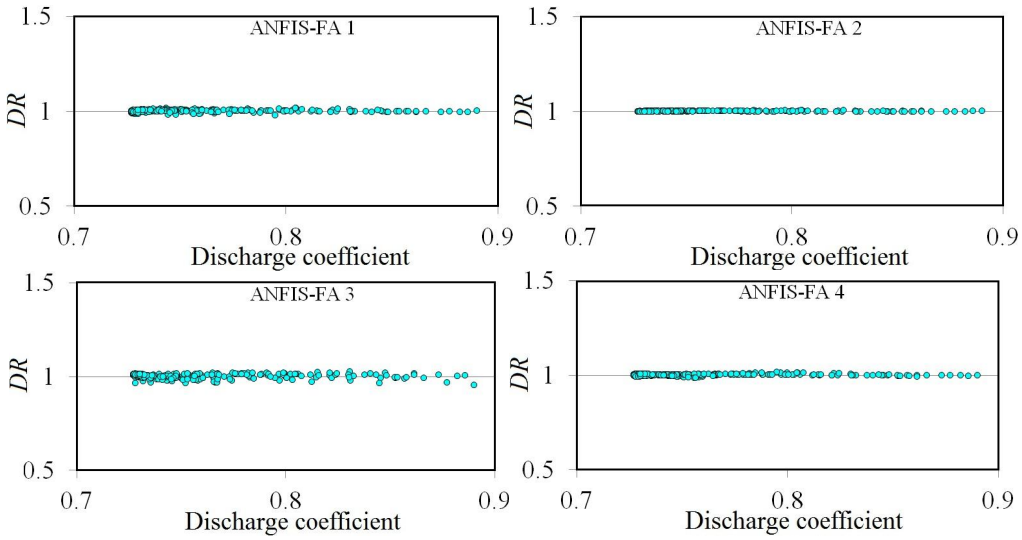


www.SID.ir

Archive of SID




شکل ۱۰. نمودارهای پراکندگی برای مدل‌های ANFIS-FA

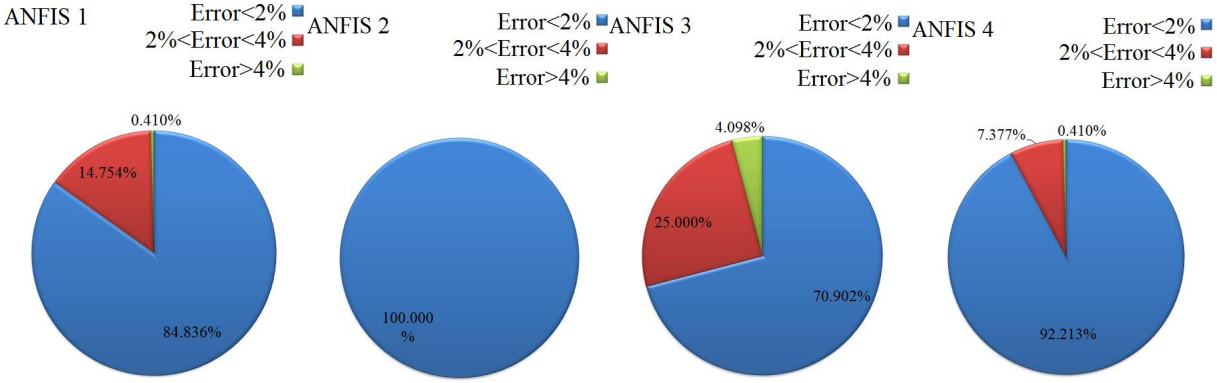



شکل ۱۱. تغییرات نسبت اختلاف در مقابل ضریب دبی مشاهداتی برای مدل‌های مختلف ANFIS-FA

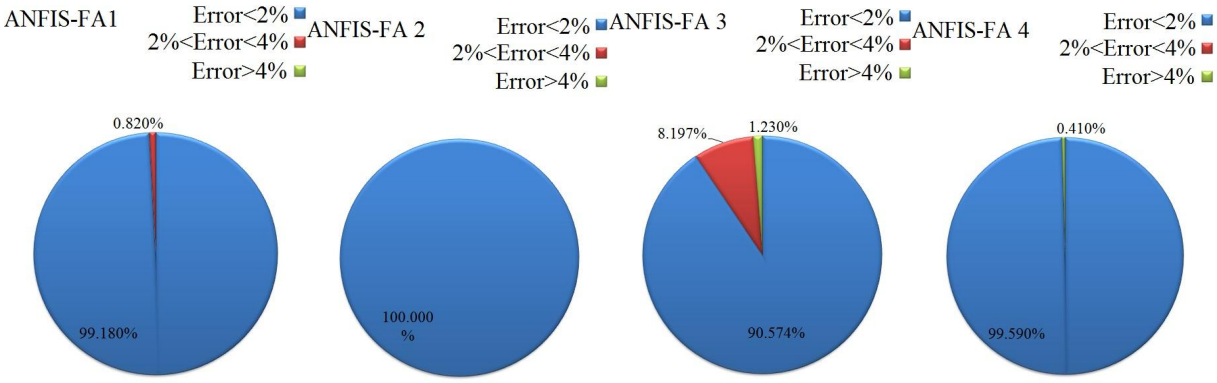

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۱۲. نمودارهای توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS**




**شکل ۱۳. نمودارهای توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS-FA**

متوسط برای ANFIS-FA 1 به‌ترتیب برابر با ۱/۰۱۵، ۰/۹۶۲ و ۱/۰۰۰۰۳ به‌دست آمده است. این درحالی است که مقدار $DR_{max}$ برای مدل‌های ANFIS-FA 2 و ANFIS-FA 3 به‌ترتیب برابر با ۱/۰۰۵ و ۱/۰۲۶ تخمین زده شده‌اند. همچنین برای مدل ANFIS-FA 4 ضریب اختلاف حداقل مساوی ۱/۰۰۰۰۲ محاسبه شده است.

## توزیع خطا

در ادامه به بررسی توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS پرداخته می‌شود. در شکل ۱۲ نتایج توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS به‌تصویر کشیده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، حدوداً ۸۵ درصد نتایج مدل ANFIS 1 دارای خطایی کمتر از ۲ درصد است. همچنین تقریباً ۱۵ درصد مقادیر ضریب دبی تخمین زده شده توسط این مدل دارای خطایی بین ۲ تا ۴ درصد هستند. علاوه بر این، تقریباً نیم درصد نتایج مدل ANFIS 1 مقدار خطایی بیشتر از ۴ درصد هستند. با توجه به نتایج توزیع خطا، کل مقادیر ضریب دبی شبیه‌سازی شده توسط ANFIS 2 مقدار خطایی کمتر از ۲ درصد هستند. علاوه بر این، ۲۵ درصد نتایج مدل ANFIS 3 خطایی بین ۲ تا ۴ درصد دارند. همچنین حدودا ۹۲ درصد نتایج شبیه‌سازی شده توسط ANFIS 4 خطایی کمتر از ۲ درصد دارند.

در ادامه توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS-FA 1 تا ANFIS-FA 4 مورد بررسی قرار می‌گیرد که در شکل ۱۳ نشان داد شده است. به‌عنوان مثال، حدودا ۹۹ درصد نتایج مدل ANFIS-FA 1 دارای خطایی کمتر از ۲ درصد هستند. برای این مدل یک درصد نتایج دارای خطایی بین ۲ تا ۴ درصد دارند. این در حالی است که بیشتر نتایج مدل ANFIS-FA 2 دارای خطایی کمتر از ۲ درصد هستند. علاوه بر



www.SID.ir

Archive of SID

این تقریبا ۹۰ درصد مقادیر ضریب دبی تخمین زده شده توسط ANFIS-FA 3 مقدار خطایی کمتر از ۲ درصد دارند. همچنین بر اساس نتایج توزیع خطا، تقریبا ۹۹ درصد ضریب دبی‌های پیش‌بینی شده توسط ANFIS-FA 4 خطایی کمتر از ۲ درصد دارند.

در ادامه توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS-FA 1 تا ANFIS-FA 4 مورد بررسی قرار می‌گیرد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. به‌عنوان مثال، حدوداً ۹۹ درصد نتایج مدل ANFIS-FA 1 دارای خطایی کمتر از ۲ درصد هستند. برای این مدل یک درصد نتایج دارای خطایی بین ۲ تا ۴ درصد دارند. این درحالی است که بیشتر نتایج مدل ANFIS-FA 2 دارای خطایی کمتر از ۲ درصد هستند. علاوه بر این تقریبا ۹۰ درصد مقادیر ضریب دبی تخمین زده شده توسط ANFIS-FA 3 مقدار خطایی کمتر از ۲ درصد دارند. همچنین بر اساس نتایج توزیع خطا، تقریباً ۹۹ درصد ضریب دبی‌های پیش‌بینی شده توسط ANFIS-FA 4 خطایی کمتر از ۲ درصد دارند.

## منابع مورد استفاده


1. Azamathulla, H. M., Z. Ahmad and A. A. B. Ghani. 2013. Computation of discharge through side sluice gate using gene-expression programming. *Irrigation and Drainage* 62: 115-119.
2. Bagheri, S. and M. Heidarpour. 2010. Overflow characteristics of circular-crested weirs. *Journal of Hydraulic Research* 48(4): 515-520.
3. Balachandar, R., S. Sorbo and A. S. Ramamurthy. 1991. A note on circular sharp-crested weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering* 18(5): 881-885.
4. Dey, S. 1998. End depth in circular channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(8): 856-863.
5. Dey, S. 2001. EDR in circular channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(2): 110-112.
6. Dey, S. 2002. Free overall in circular channels with flat base: a method of open channel flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation* 13(5): 209-221.
7. Dursun, O. F., N. Kaya and M. Firat. 2012. Estimating discharge coefficient of semi-elliptical side weir using ANFIS. *Journal of Hydrology* 426-427: 55-62.
8. Ebtehaj, I., H. Bonakdari, F. Khoshbin and H. Azimi. 2015. Pareto genetic design of group method of data handling type neural network for prediction discharge coefficient in rectangular side orifices. *Flow Measurement and Instrumentation* 41: 67-74.
9. Jang, J. S. R., C. T. Sun and E. Mizutani. 1997. Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall. ISBN 0-13-261066-3.
10. Nabavi, S. V., M. K. Beirami, M. R. Chamani and M. Sterling. 2011. Free overfalls in flat-based circular and U-shaped channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(1): 17-24.
11. Rehbock, T. 1929. Discussion of "precise weir measurements" by Schoder E. W. and K. B. Turner. *Trans* 93: 1143-1162.
12. Shabanlou, S. 2018. Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on the end of circular channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 59: 63-71.
13. Sterling, M. and D. W. Knight. 2001. The free overfall as a flow measuring device in a circular channel. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering (148(4): 235-243). Thomas Telford Ltd.
14. Vatankhah, A. R. 2010. Flow measurement using circular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 21(2): 118-122.
15. Vatankhah, A. R. and S. Khalili. 2016. Sharp-crested weir located at the end of a circular channel. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (170(6): 287-297). Thomas Telford Ltd.
16. Yang, X. -S. 2010. Nature-inspired metaheuristic algorithms: Luniver Press, Bekhington.



www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil Science
Vol. 24, No. 2, Summer 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

# Simulation of Discharge Coefficient of Sharp-Crested Circular Weirs Using Hybrid ANFIS-Firefly Model

**A. Alizadeh, B. Yaghoubi* and S. Shabanlou[1]**

(Received: December 18-2018 ; Accepted: September 24-2019)

## Abstract

In this study, the discharge coefficient of sharp-crested weirs located on circular channels was modeled using the ANFIS and ANFIS-Firefly (ANFIS-FA) algorithm. Also, the Monte Carlo simulations (MCs) were used to enhance the compatibilities of the soft computing models. However, the k-fold cross validation method (k=5) was used to validate the numerical models. According to the input parameters, four models of ANFIS and ANFIS-FA were introduced. Analyzing the numerical results showed that the superior model simulated the discharge coefficient as a function of the Froude number (*Fr*) and the ratio of flow depth over weir crest to the weir crest height (*h/P*). The values of the mean absolute relative error (*MARE*), root mean square error (*RMSE*) and correlation coefficient (*R*) for the superior model were calculated 0.001, 0.002 and 0.999, respectively. However, the maximum error value for this study was less than 2%.

**Keywords**: Circular weir, Discharge coefficient, Modeling, ANFIS, ANFIS-FA

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.
*: Corresponding author, Email: behrouz.yaghoubi.h@gmail.com



www.SID.ir