

## استفاده از الگوریتم تکاملی برای بهینه‌سازی مدل انفیس به منظور مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایروی

محمد جواد اسدی<sup>۱</sup>، سعید شعبانلو<sup>۲</sup>، محسن نجارچی<sup>۱\*</sup> و محمد مهدی نجفی‌زاده<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۸/۲۰)

### چکیده

در این مطالعه، ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای با استفاده از یک روش ترکیبی جدید، مدل‌سازی شد. ترکیبات انجام شده در این مطالعه، به دو قسمت تقسیم شد: (۱) ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) و ارائه الگوریتم PSOGA، (۲) استفاده از الگوریتم ترکیبی PSOGA جهت بهینه‌سازی شبکه انفیس (ANFIS) و ارائه روش ANFIS-PSOGA. با شناخت پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایروی، ۱۱ ترکیب مختلف ارائه شد. تحلیل حساسیت انجام شده با استفاده از ANFIS، نشان داد که عدد فرود و نسبت عمق جریان به قطر روزنه (Ym/D) مؤثرترین پارامترها در مدل‌سازی ضریب دبی شناسایی شدند. همچنین، بهترین ترکیب در برآورد ضریب دبی استفاده از متغیرهای فرود جریان (Fr)، نسبت عرض کانال اصلی به قطر روزنه جانبی (B/D)، نسبت ارتفاع تاج روزنه به قطر روزنه (W/D) و نسبت عمق جریان به قطر روزنه (Ym/D) بود. مقادیر MAPE، RMSE و R برای این مدل، به ترتیب برابر ۰/۰۲۱، ۰/۰۲ و ۰/۸۷۱ به دست آمد. پس از انتخاب بهترین ترکیب، عملکرد روش ANFIS-PSOGA با دو روش ANFIS and ANFIS-PSO، مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش ANFIS-PSOGA برای مدل‌سازی ضریب دبی، دارای خطای کمتری بود.

واژه‌های کلیدی: انفیس، مدل ترکیبی، بهینه‌سازی، روزنه جانبی دایروی، ضریب دبی

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۳. گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m-najarchi@iau-arak.ac.ir

## مقدمه

روزنه‌های جانبی برای کنترل و تنظیم جریان داخل کانال‌های با استفاده می‌شوند. این سازه‌ها به صورت گسترده‌ای درون شبکه‌های آبیاری، سیستم‌های زهکشی، تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل کاربرد فراوان این نوع از سازه‌های هیدرولیکی، مطالعات مختلفی روی رفتار جریان در مجاورت روزنه جانبی انجام گرفته است. کاربالادا و همکاران (۲) در یک مطالعه نظری، با فرض جریان دوبعدی و با استفاده از نظریه خطوط جریان آزاد، یک جریان خروجی از سازه‌های انحرافی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها یک مدل هیدرودینامیکی را برای محاسبه جریان خروجی از این نوع از سازه‌های انحرافی توسعه دادند و نتایج مدل خود را با مقادیر آزمایشگاهی برای رژیم جریان زیربحرانی صحت‌سنجی کردند راماورتی و همکاران (۱۷) با استفاده از تئوری جریان دوبعدی رفتار هیدرولیکی روزنه‌های جانبی مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها ضریب دبی روزنه جانبی را به‌عنوان تابعی از مشخصات هندسی روزنه و هیدرولیکی جریان فرض کردند. اوجا و سابایا (۱۵) با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی جریان عبوری از داخل دریچه‌های کشویی مستطیلی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها با حل معادله دینامیکی جریان‌های متغیر مکانی معادله‌هایی را برای تعیین ظرفیت آگذری این دسته از سازه‌های هیدرولیکی ارائه کردند. همچنین آنها مقدار دبی محاسباتی را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه کردند و نشان دادند که خطای مدل مذکور تقریباً ۱۰ درصد است. همچنین قدسیان (۷) با استفاده از اصول انرژی، معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را برای دریچه‌های جانبی حل کرد و سپس با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، مشخصات جریان هیدرولیکی در امتداد این نوع از سازه‌ها را اندازه‌گیری کرد. وی مقادیر انرژی مخصوص و عدد فرود جریان را اندازه‌گیری کرد. حسین و همکاران (۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی دبی عبوری از میان روزنه‌های جانبی دایره‌ای شکل را اندازه‌گیری کردند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی خود رابطه‌هایی را

برای محاسبه ظرفیت آگذری این شکل از روزنه‌های جانبی ارائه کردند. آنها مقادیر دبی روزنه‌های جانبی دایروی شکل را از رابطه زیر محاسبه کردند:

$$Q = C_d \sqrt{2gH} \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1)$$

در اینجا  $Q$ ،  $C_d$ ،  $H$  و  $D$  شامل مقادیر دبی عبوری از میان روزنه جانبی دایروی، ضریب دبی روزنه، شتاب گرانش، هد جریان روی روزنه جانبی و قطر روزنه جانبی دایروی هستند. پروهاسکا و همکاران (۱۶) پارامترهای مؤثر روی ضریب دبی مربوط به روزنه‌های واقع بر دیواره مجاری دایره‌ای را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که ضریب آبدی این نوع از روزنه‌ها به‌عنوان تابعی از مشخصات هیدرولیکی جریان و پارامترهای هندسی روزنه است. حسین و همکاران (۱۰) مشخصات هیدرولیکی روزنه‌های جانبی مستطیلی واقع بر دیواره جانبی مجاری مستطیلی شکل را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. همچنین آنها رابطه‌هایی را به‌عنوان تابعی از عدد فرود و نسبت طول روزنه جانبی به عرض کانال اصلی برای محاسبه ظرفیت آگذری این نوع از روزنه‌های جانبی به‌دست آوردند. آنها علاوه بر اندازه‌گیری دبی، رفتار هیدرولیکی جریان در مجاورت روزنه‌های جانبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. همچنین حسین و همکاران (۱۱) در یک مطالعه تحلیلی و بر اساس توزیع فشار جریان در بالای روزنه، دبی جریان خروجی از روزنه‌های جانبی مستطیلی را محاسبه کردند. در ادامه میرنیا و وطن‌خواه (۱۳) در یک مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مثالی در شرایط جریان زیر بحرانی را ارزیابی و برای محاسبه ضریب دبی یک معادله ارائه کردند.

در سال‌های اخیر روش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و هوش مصنوعی در پیش‌بینی و الگوشناسی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی علوم گوناگون توسط بسیاری از پژوهشگران استفاده شده. همچنین مدل‌های نرو-فازی و الگوریتم‌های مختلف شبکه عصبی برای حل مسائل مختلف هیدرولیکی به‌کار گرفته شده‌اند. امیراللو و همکاران (۶) رابطه‌هایی برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی

ورودی- خروجی فازی است و توانایی شبیه‌سازی نگاشت غیرخطی پیچیده با استفاده از یادگیری شبکه‌های عصبی و متدولوژی استنتاج فازی را دارد. ساختار انفیس متشکل از پنج لایه مختلف است که هر یک از این لایه‌ها دارای گره‌های مختلفی که به وسیله توابع مختلفی توصیف می‌شوند، هستند. لایه اول، گره‌های ورودی هستند که هر گره از این لایه مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تولید می‌کنند. اگر  $O_i^1$  خروجی  $i$  ام گره در لایه  $i$  ام باشد، هر گره  $i$  یک گره تطبیقی با تابعی به شکل زیر است:

$$O_i^1 = \mu A_i(x) \quad i=1,2 \quad (2)$$

$$O_i^1 = \mu B_{i2}(x) \quad i=3,4 \quad (3)$$

در روابط فوق  $x$  (یا  $y$ ) ورودی‌های غیرفازی گره  $i$  ام و  $A_i$  (یا  $B_{i2}$ ) برحسب‌های زبانی هستند که با توابع عضویت  $\mu$  مشخص می‌شوند. تابع عضویت مورد استفاده در این مطالعه به شکل زنگوله‌ای است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu A_i(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - \Gamma_i}{p_i} \right|^{2q_i}} \quad (4)$$

که  $\{p_i, q_i, \Gamma_i\}$  مجموعه پارامترهایی هستند که به‌عنوان پارامترهای فرض مشخص می‌شوند و با تغییر آنها، توابع زنگوله‌ای شکل متفاوتی ایجاد می‌شود. در لایه دوم تمامی قوانین موجود میان ورودی با به‌کارگیری قاعده تقاطع یا همان اشتراک فازی (AND) فرمول‌بندی می‌شود. برای هر قانون عملیات ضرب برای برآورد ضریب استفاده می‌شود. خروجی هر گره نشان‌دهنده قدرت آتش یک قانون است:

$$Q_i^2 = W_i = \mu A_i(x) \cdot \mu B_{i2}(y) \quad i=1,2 \quad (5)$$

در لایه سوم نسبت قدرت آتش هر قانون نسبت به کل قوانین در گره‌ها به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i^3 = \bar{W}_i = W_i / (W_1 + W_2) \quad i=1,2 \quad (6)$$

خروجی این به‌عنوان قدرت آتش نرمال‌شده شناخته می‌شود. در لایه چهارم هر گره سهم قانون  $i$  ام به خروجی کل را به شکل زیر محاسبه می‌کند:

کنگره‌ای مثلثی واقع بر یک کانال مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی را با استفاده از تکنیک نرو- فازی انفیس (ANFIS) ارائه کردند. رابطه پیشنهادی آنها مقادیر ضریب آبگذری این شکل از سرریزها را برحسب مشخصات هندسی سرریز و پارامترهای هیدرولیکی جریان مدل‌سازی می‌کند. ابتهاج و همکاران (۴) ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی را با استفاده از مدل مدل برنامه‌نویسی بیان ژن شبیه‌سازی کردند. آنها یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی ارائه کردند که تابعی از عدد فرود و مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی است. همچنین محمدی و همکاران (۱۴) ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایروی شکل را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تخمین زدند. آنها نشان دادند که شبکه عصبی مصنوعی مقادیر ضریب دبی را به شکل قابل قبولی مدل‌سازی کرده است.

با مرور مطالعات گذشتگان مشاهده می‌شود که ضریب دبی روزنه‌های جانبی نیاز به بررسی بیشتری دارد. در مطالعه حاضر یک روش ترکیبی برای مدل‌سازی این پارامتر توسعه داده شد. نوآوری مطالعه حاضر شامل استفاده همزمان دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه انفیس است. همچنین استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و اعتبارسنجی ضربدری در حین مدل‌سازی ضریب دبی نیز بخش دیگری از نوآوری پژوهش حاضر محسوب می‌شود که در مطالعات قبلی در این زمینه استفاده نشده‌اند.

## مواد و روش‌ها

### مدل عددی

### سیستم استنتاج فازی عصبی

ترکیب سیستم‌های فازی که مبتنی بر قواعد منطقی هستند و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، منجر به ارائه سیستم‌های استنتاج فازی عصبی تطبیقی (انفیس) توسط یانگ (۱۲) شد. انفیس دارای ساختاری با قواعد اگر- آنگاه و جفت داده‌های

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (10)$$

که  $t=1,2,\dots, I_{max}$ ،  $i=1,2,\dots, N$  شماره تکرار و  $I_{max}$  بیشینه تکرار است. همچنین rand (0) برابر یک مقدار تصادفی در دامنه  $[0, 1]$ ،  $c_1$  و  $c_2$  دو مقدار ثابت با عنوان نرخ یادگیری شناختی و نرخ یادگیری اجتماعی هستند که بهترین حالت آنها زمانی است که مجموع آنها حداقل برابر با چهار باشند (5). در این مطالعه هر دو مقدار  $c_1$  و  $c_2$  در حالت بهینه برابر با  $2/05$  در نظر گرفته شده اند.  $pbest(t)$  بهترین جواب به دست آمده در تکرار  $t$ ام و  $gbest(t)$  بهترین جواب به دست آمده تا تکرار  $t$ ام است.  $w(t)$  وزن اینرسی است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$W(t) = W_{max} - \frac{(W_{max} - W_{min}) \times t}{I_{max}} \quad (11)$$

که  $W_{max}$  و  $W_{min}$  حداقل و حداکثر وزن اینرسی هستند که در این مطالعه به ترتیب برابر با  $0/3$  و  $0/9$  در نظر گرفته شده اند.

### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (8) روش جستجوی احتمالاتی فراگیر است که از فرایند تکامل زیست شناختی طبیعی پیروی می کند. این الگوریتم بر جمعیت جواب های نهفته عمل می کند و اصل تنازع بقا را در تولید تقریب های بهتر جواب مسئله، به کار می گیرد. در هر نسل، مجموعه جدیدی از تقریب ها با فرایند انتخاب بهترین عضو بر اساس میزان برازش آنها در دامنه مسئله و تکثیر با عملگرهای گرفته شده از ژنتیک طبیعی، ساخته می شود. این فرایند در نهایت به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می شود که نسبت به اعضای اولیه که در واقع والدین اصلی آنهاست، با محیط سازگاری بهتری دارند.

در این پژوهش تعداد زیر تکرارهای الگوریتم ژنتیک برابر با 30، تعداد نسل ها برابر با 1000، ثابت تقاطع برابر با 0/8 و ثابت جهش برابر با 0/2 در نظر گرفته شده است. روش تقاطع به صورت تقاطع دو نقطه مورد استفاده قرار گرفته است و برای انتخاب از روش چرخه رولت استفاده شده است. شرط توقف به صورت عدم پیشرفت تابع برای 70 نسل متوالی و یا به پایان رسیدن تعداد نسل ها در نظر

$$Q_i^4 = \bar{W}_i Z_i = \bar{W}_i (a_i x + b_i y + c_i) \quad i=1,2 \quad (7)$$

که  $\bar{W}_i$  خروجی لایه سوم و  $\{a_i, b_i, c_i\}$  پارامترهای تنظیمی هستند که به عنوان پارامترهای نتیجه شناخته می شوند.

در لایه پنجم، هر گره خروجی نهایی به صورت جمع همه سیگنال های ورودی محاسبه می شود و خروجی نهایی انفیس به شکل زیر به دست می آید:

$$Q_i^5 = \sum_i \bar{W}_i Z_i = \sum_i W_i Z_i / \sum_i W_i \quad (8)$$

### بهینه سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (3) عضوی از خانواده الگوریتم های تکاملی است که رفتار اجتماعی گروهی از ذرات مانند پرندگان و ماهی ها را در رسیدن به منابع غذایی در جامعه، تقلید می کنند. این الگوریتم امکان جستجوی محلی، سراسری و همگرایی سریع به بهینه سراسری را با تنظیم پارامترهای ساده فراهم می کند. مزیت اصلی این روش بر استراتژی های کمینه سازی دیگر این است که تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده، باعث پایداری روش در برابر مشکل کمینه محلی می شود. در این الگوریتم ابتدا یک مجموعه جواب اولیه تولید می شود. سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای پاسخ های ممکن، با به روزرسانی نسل ها، جستجوی پاسخ انجام می گیرد. هر ذره به صورت چندبعدی با دو مقدار موقعیت، سرعت تعریف می شود و در هر مرحله از حرکت ذره، با دو شاخص سرعت و موقعیت، بهترین پاسخ از لحاظ شایستگی برای تمامی ذرات تعیین می شوند. بهترین موقعیت به دست آمده در هر مرحله با عنوان  $pbest$  و در پایان تمامی مراحل به عنوان  $gbest$  شناخته می شود. تمامی ذرات بر مبنای  $pbest$  و  $gbest$  به دست آمده مکان خود را به روز می کنند تا راه حل بهینه سراسری حاصل شود. با فرض اینکه  $x$  مکان ذره  $i$ ام و  $v$  سرعت آن باشد، سرعت و موقعیت هر ذره در هر تکرار با استفاده از روابط زیر محاسبه و به روزرسانی می شود.

$$(9)$$

$$V_i(t+1) = w(t) \cdot V_i(t) + c_1 \cdot \text{rand}(\cdot) \cdot (pbest(t) - X_i(t)) + c_2 \cdot \text{rand}(\cdot) \cdot (gbest(t) - X_i(t))$$

کاهش می‌یابد. قانون به روزرسانی سرعت در الگوریتم PSO با استفاده از GA به صورت زیر است:

$$V_{i,t} = w_{i,t} \cdot V_{i,t} + C_1 R_{i,t} (P_{i,t}(GA) - X_{i,t}) + C_2 R_{2,t} (P_{g,t}(GA) - X_{i,t}) \quad (12)$$

مرحله ساخت جمعیت اولیه به صورت تصادفی است. در این مرحله از الگوریتم، به طور تصادفی به اندازه  $N_{pop}$  جواب اولیه (تعداد ذرات مورد نیاز) تولید می‌کند. همچنین، سرعت مربوط به هر ذره (جواب) نیز به صورت تصادفی تولید می‌شود. در این مرحله، به ذرات اجازه داده می‌شود که در فضای مسئله به طور آزادانه به حرکت درآیند و هر کدام جواب جدید از مسئله را نشان دهند. در واقع در فضای مسئله مورد نظر، به تعداد متغیرهای تأثیرگذار انتخاب شده به عنوان ورودی مسئله برای تعیین پارامتر هدف، به ذرات اجازه داده می‌شود که به پرواز درآیند و یک نقطه از فضا را انتخاب کنند. این نقطه از فضا با توجه به مقدار عوامل مؤثر بر پارامتر هدف، مقدار جدیدی از پارامتر هدف را به ما می‌دهد که با مقایسه آن با مقادیر واقعی در نظر گرفته شده برای آموزش مدل، خطای مدل‌سازی، تعیین می‌شود. حال باید به ارزیابی ذرات جمعیت تولید شده پرداخت. تابع برازندگی که برای این منظور استفاده می‌شود، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Y_i P_i}{Y_i} \right) \quad (13)$$

که در آن  $Y_i$  مقدار واقعی از ذره  $i$ th،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی شده از ذره  $i$ th و  $N$  تعداد داده‌های مشخص شده برای آموزش مدل است. حال، نسل جدید به وسیله عملگرهای دو الگوریتم PSO و GA، تولید می‌شود. در این قسمت، ابتدا الگوریتم PSO روی داده‌ها پیاده‌سازی می‌شود و در انتهای هر تکرار این الگوریتم، عملگرهای مربوط به الگوریتم ژنتیک شامل *mutation* و *crossover* روی ذرات عمل می‌کنند و آنها را بر فضای جواب به پرواز بیشتری در می‌آورند، تا جستجوی انجام شده حالت عمومی‌تری به خود بگیرد. به بیان دیگر، در این مرحله پس از هر تکرار الگوریتم PSO، با توجه به اینکه امکان گیر

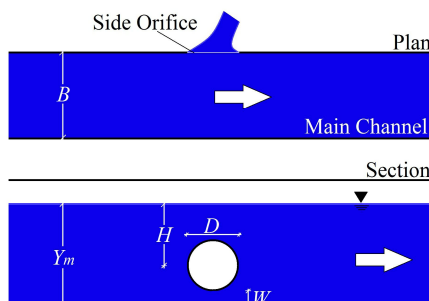
گرفته شده است. همچنین برای جایگزینی فرزندان تازه متولد شده با جمعیت نسل قبل، میزان تابع شایستگی مربوط به یک ذره از کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شود و آنهایی که دارای شایستگی بیشتری هستند، به عنوان جمعیت جایگزین انتخاب می‌شوند.

### روش ترکیبی

با مطالعه کاربردهای الگوریتم مختلف هوش مصنوعی مشخص شده است که هر کدام از این الگوریتم‌ها دارای نقاط ضعف و قوت مربوط به خود هستند. رویکرد جدید در استفاده از این الگوریتم‌ها ترکیب آنها برای رسیدن به الگوریتمی با کارایی بهتر است. برای این منظور با شناخت نقاط ضعف و قوت این الگوریتم‌ها آنها را طوری با هم ترکیب می‌کنند که از نقاط قوت این الگوریتم‌ها برای برطرف کردن و پوشش ضعف‌ها استفاده شود (۱). یکی از مهم‌ترین مشکلات الگوریتم PSO همگرایی سریع است. به این ترتیب که الگوریتم قبل از اینکه فضای جواب را کامل جستجو کند به بهترین جواب ممکن می‌رسد که باعث می‌شود احتمال گیر افتادن در نقاط بهینه محلی افزایش یابد. لازم به ذکر است یکی از موارد مهم در طراحی یک الگوریتم جستجو این است که الگوریتم بتواند فضای جواب را خوب پیمایش و با این کار احتمال گیر افتادن در نقاط بهینه محلی را کمتر کند. در این پژوهش برای برطرف کردن مشکل ذکر شده در الگوریتم PSO، از GA که دارای قدرت جستجوگری بالایی است و می‌تواند جستجوی قابل قبولی در فضای جواب انجام دهد و از نقاط بهینه محلی فرار کند، استفاده می‌شود. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، بعد از هر تکرار الگوریتم PSO، با انتخاب نیمی از جمعیت ذرات که عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند، با استفاده عملگرهای GA، ذرات را در فضای جواب به شکلی دوباره به پرواز در آورده و باعث می‌شود که فضای جواب بیشتر پیمایش شود و به این ترتیب احتمال همگرایی سریع و گیر افتادن در نقاط بهینه محلی

جدول ۱. محدوده اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

متغیر	$Q_m(m^3/s)$	$Q(m^3/s)$	$D(m)$	$Y_m(m)$	$V(m/s)$	$W(m)$	$Fr(-)$
محدوده	۰/۰۱۶۵۴-۱۵۶۴۷	۰/۰۰۱۴۴-۰/۰۲۹۴۲	۰/۰۵-۰/۱۵	۰/۱۷۱۶-۰/۵۹۳۸	۰/۰۷۷۱-۰/۸۹۰۱	۰/۰۵-۰/۲۵	۰/۰۳۶-۰/۵۲۱



شکل ۱. طرح کلی مدل آزمایشگاهی حسین و همکاران (۹)

اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسین و همکاران (۹) استفاده شد. مدل آزمایشگاهی متشکل از یک کانال مستطیلی است که یک روزنه جانبی دایروی روی دیواره جانبی کانال اصلی نصب شده است. کانال اصلی دارای ۹/۱۵ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع است. روزنه‌های جانبی در فاصله ۵/۱۸ متری از ورودی کانال اصلی قرار گرفته‌اند. در جدول ۱ محدوده اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی حسین و همکاران (۹) نشان داده شده است. در این جدول  $Q, Q_m, D, Y_m, V, W$  و  $Fr$  به ترتیب عبارت‌اند از: دبی کانال اصلی، دبی روزنه جانبی، قطر روزنه جانبی دایروی، عمق جریان داخل کانال اصلی، سرعت جریان، ارتفاع تاج روزنه جانبی و عدد فرود جریان. همچنین طرح کلی مدل آزمایشگاهی حسین و همکاران در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ضریب دبی

حسین و همکاران، ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایروی را به‌عنوان تابعی از قطر روزنه جانبی ( $D$ )، عرض کانال اصلی ( $B$ )، ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی ( $W$ )، سرعت جریان داخل کانال اصلی ( $V$ )، عمق جریان درون کانال اصلی ( $Y_m$ )، چگالی سیال ( $\rho$ )، ویسکوزیته جریان ( $\mu$ ) و شتاب

افتادن در کمینه‌های محلی وجود دارد و ممکن است فضای مسئله به‌طور کامل مورد جستجو قرار نگیرد، از GA استفاده می‌شود. بدین صورت که با استفاده از موتورهای جستجوی قوی الگوی ژنتیک و جهش‌هایی که به‌صورت تصادفی ایجاد می‌کنیم، ذرات را وادار به پرواز در نقاط دیگر فضای چندوجهی مسئله می‌کنیم. این روند را در هر تکرار ادامه می‌دهیم تا جایی که فضای مسئله به‌طور کامل بررسی شود و در نهایت به شرط توقف مسئله برسیم. به‌عبارتی اگر تعداد تکرارها برابر تعداد تعیین شده باشد، روند اجرای الگوریتم خاتمه می‌یابد و در غیر این صورت به مرحله مربوط رفته و فرایند بالا را تکرار می‌کنیم. با خاتمه اجرای الگوریتم، بهترین ذره در نسل آخر به‌عنوان جواب نهایی سیستم پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شود. حال به‌منظور آموزش شبکه ANFIS، از الگوریتم ترکیبی ارائه شده در این مطالعه (PSOGA) استفاده می‌شود. استفاده از این الگوریتم در ترکیب با ANFIS برای بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به تابع عضویت گوسی ( $c, \sigma$ ) استفاده می‌شود.

#### مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه، به‌منظور صحت سنجی نتایج مدل‌های عددی از

برای اعتبارسنجی مدل عددی مورد نظر استفاده می‌شود. در این مطالعه، مقدار  $k$  برابر پنج در نظر گرفته شد.

### معیار دقت مدل‌های عددی

در این مطالعه، برای بررسی دقت مدل‌های عددی از شاخص‌های آماری درصد خطای مطلق میانگین (MAPE)، خطای مربع میانگین ریشه (RMSE)، شاخص آماری BIAS، ضریب همبستگی (R)، شاخص پراکندگی (SI) و شاخص  $\rho$  به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|(C_d)_{(Predicted)_i} - (C_d)_{(Observed)_i}|}{(C_d)_{(Observed)_i}} \right) \times 100 \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((C_d)_{(Predicted)_i} - (C_d)_{(Observed)_i})^2} \quad (17)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((C_d)_{(Predicted)_i} - (C_d)_{(Observed)_i}) \quad (18)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((C_d)_{(Observed)_i} - \overline{(C_d)_{(Observed)}}) ((C_d)_{(Predicted)_i} - \overline{(C_d)_{(Predicted)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((C_d)_{(Observed)_i} - \overline{(C_d)_{(Observed)}})^2 \sum_{i=1}^n ((C_d)_{(Predicted)_i} - \overline{(C_d)_{(Predicted)}})^2}} \quad (19)$$

$$SI = \frac{RMSE}{(C_d)_{(Observed)}} \quad (20)$$

$$\rho = \frac{SI}{1 + R}$$

در اینجا  $(C_d)_{(Observed)_i}$  ضریب دبی آزمایشگاهی،  $(C_d)_{(Predicted)_i}$  ضریب دبی مدل‌سازی شده به وسیله مدل‌های عددی،  $(C_d)_{(Observed)_i}$  میانگین ضریب دبی آزمایشگاهی و  $n$  برابر تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. شاخص‌های آماری معرفی شده، خطا بین نتایج آزمایشگاهی و عددی را ارائه می‌کنند و توضیحات کافی در ارتباط با نحوه توزیع خطا توسط مدل‌های عددی بیان نمی‌کنند. بنابراین برای

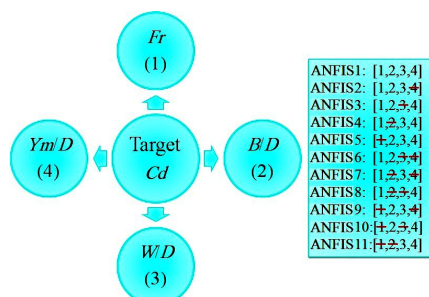
جاذبه (g) در نظر گرفتند (۹):

$$C_d = f_1 (D, B, W, V, Y_m, \rho, \mu, g) \quad (14)$$

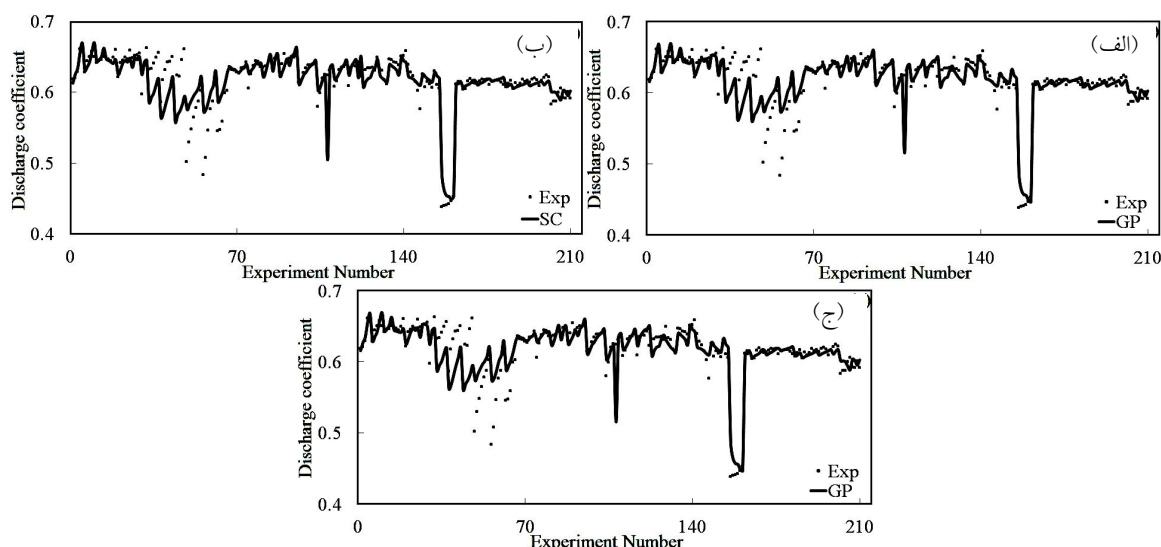
با توجه به اینکه عدد فرود جریان عبارت است از  $F_r = V/\sqrt{g Y_m}$  و همچنین مقدار چگالی، ویسکوزیته و شتاب جاذبه ثابت در نظر گرفته می‌شود و در مقابل مقادیر  $B$ ،  $W$  و  $Y_m$  به قطر روزنه جانبی دایروی بدون بعد می‌شوند. بنابراین معادله (۱۵) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$C_d = f_2 \left( F_r, \frac{B}{D}, \frac{W}{D}, \frac{Y_m}{D} \right) \quad (15)$$

بنابراین در این مطالعه اثر پارامترهای بدون بعد معادله (۱۵) روی ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایروی در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایروی توسط مدل‌های عددی، ۱۱ مدل ANFIS مختلف معرفی شده است. نحوه ترکیب پارامتری ورودی برای مدل‌های ANFIS در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین در این مطالعه، برای بررسی توانایی مدل‌های عددی از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو استفاده شد. شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک طبقه‌بندی گسترده از الگوریتم‌های محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج عددی استفاده می‌کند. علاوه بر این، از روش اعتبارسنجی چند لایه‌ای برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌های مذکور بهره گرفته شد. در روش اعتبارسنجی چند لایه‌ای، نمونه اصلی به طور تصادفی به  $k$  نمونه‌های فرعی به اندازه مساوی تقسیم می‌شود. در بین نمونه‌های فرعی  $k$ ، یک نمونه به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و بقیه آنها به عنوان داده‌های تست برای هر یک از مدل‌های عددی استفاده می‌شوند. سپس روند اعتبارسنجی چند لایه،  $k$  بار تکرار می‌شود (برابر تعداد لایه‌ها)، هر کدام از نمونه‌های فرعی  $k$ ، دقیقاً یک بار به عنوان داده‌های اعتبارسنجی استفاده می‌شوند. سپس نتایج به دست آمده از  $k$  لایه مذکور متوسط‌گیری و به عنوان یک تخمین ارائه می‌شود. مزیت این روش، تکرار تصادفی نمونه‌های فرعی در روند تست و آموزش برای کلیه مشاهدات است. به عبارت دیگر، هر مشاهده دقیقاً یک بار



شکل ۲. نحوه ترکیب پارامترهای مختلف برای مدل‌سازی ضریب دبی با استفاده از مدل مختلف ANFIS



شکل ۳. مقایسه مقادیر مدل‌سازی شده توسط FIS generation مدل FCM (الف: ANFIS، ب: GP و ج: SC)

شده است. مقدار RMSE برای GP، SC و FCM به ترتیب مساوی ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۰ محاسبه شد. همچنین برای GP، مقادیر MAPE و ضریب همبستگی برای این نسل سیستم استنتاج فازی به ترتیب برابر ۰/۰۲۲ و ۰/۸۵۵ تخمین زده شد. در مقابل برای SC مقادیر شاخص‌های آماری SI، BIAS و R برابر ۰/۰۱۳، ۰/۰۳۵ و ۰/۸۵۰ بود. این در حالی است که مقدار ضریب همبستگی برای FCM برابر ۰/۸۷۱ تخمین زده شد. علاوه بر این مقادیر MAPE، SI و  $\rho$  برای این نسل سیستم استنتاج فازی به ترتیب مساوی ۰/۰۲۱، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۱۷ محاسبه شد. بنابراین همان گونه که مشاهده شد، SC دارای کمترین دقت در مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای بود. در مقابل FCM دارای بیشترین دقت در تخمین ظرفیت آبدی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی شناسایی شد. بنابراین در ادامه برای مدل‌سازی ضریب دبی از این

محاسبه نحوه توزیع خطا توسط مدل‌های عددی، شاخص  $TS_X$  ارائه می‌شود:

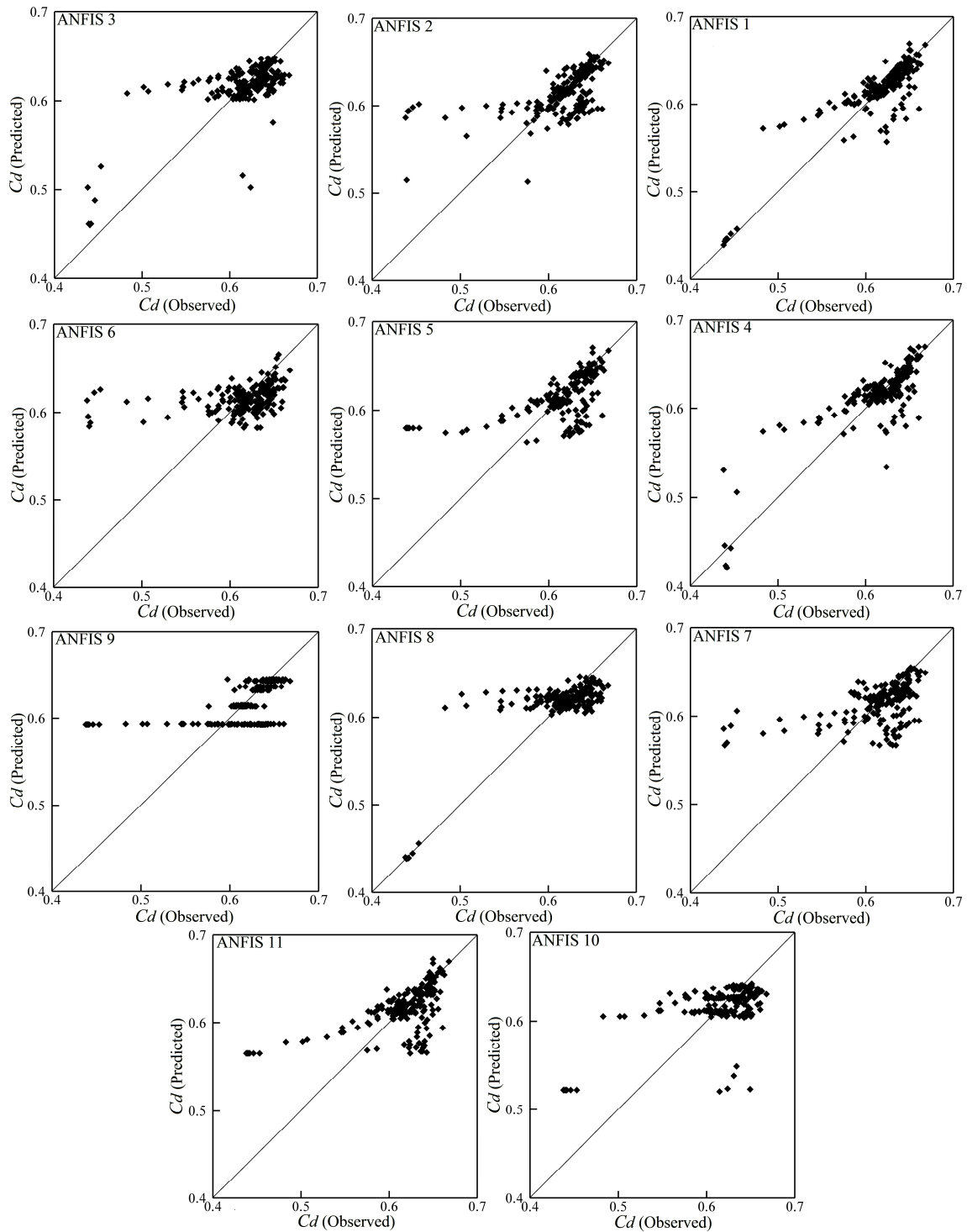
$$TS_X = \frac{Y_X}{n} \times 100 \quad (22)$$

عبارت  $Y_X$  است از مقادیر MAPE مدل‌سازی شده توسط مدل‌های عددی که مقدار خطای آن کوچکتر از  $X\%$  است.

## نتایج

در ابتدا عملکرد سه نسل سیستم استنتاج فازی شامل تقسیم‌بندی شبکه‌ای (GP)، خوشه بندی کاهشی (SC) و خوشه‌بندی فازی (FCM) در مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳ مقایسه مقادیر مدل‌سازی شده توسط سه نسل سیستم استنتاج فازی مدل ANFIS نشان داده





شکل ۴. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی با مدل‌های مختلف ANFIS

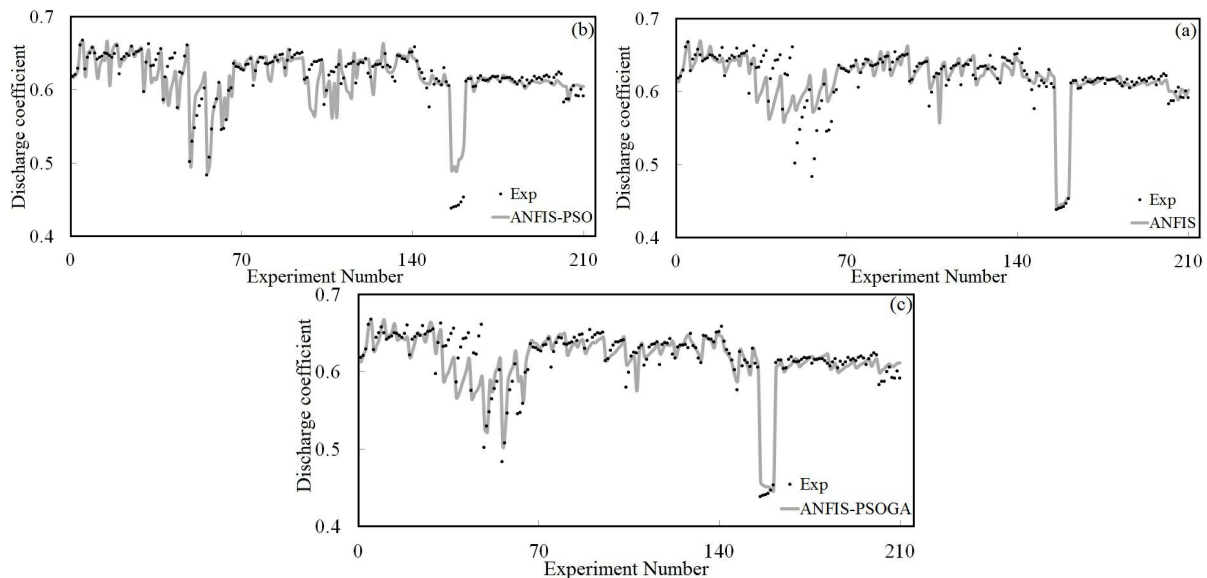
دایره‌ای مدل‌سازی شده توسط مدل‌های ۱ ANFIS تا ANFIS ۱۱ با مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. در مدل ANFIS ۱ تأثیر کلیه پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی ضریب

نسل سیستم استنتاج فازی استفاده شد. در این مطالعه ۱۱ مدل مختلف ANFIS برای تخمین ضریب دبی معرفی شد. در شکل ۴ مقایسه ضریب دبی روزانه جانبی

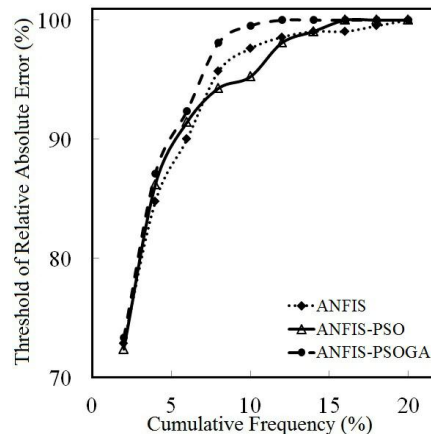
نادیده گرفته شد. برای این مدل مقادیر  $R$ ،  $BIAS$  و  $scatter$  index به ترتیب مساوی  $0/024$ ،  $0/363$  و  $0/062$  محاسبه شد. در بین مدل‌های با دو پارامتر ورودی این مدل دارای کمترین دقت در تخمین ضریب دبی بود. در بین مدل‌های با دو پارامتر ورودی این مدل دارای کمترین دقت در مدل‌سازی ضریب دبی روزنه جانبی دایروی بود. مدل  $ANFIS$  ۷ تابعی از عدد فرود و نسبت ارتفاع تاج روزنه به قطر روزنه است. برای این مدل مقادیر  $RMSE$ ،  $MAPE$  و ضریب همبستگی به ترتیب برابر  $0/035$ ،  $0/038$  و  $0/52$  محاسبه شد. برای مدل  $ANFIS$  ۸ مقدار  $R$  مساوی  $0/760$  تخمین زده شد. این مدل مقادیر ضریب دبی را برحسب  $Fr$  و  $Y_m/D$  مدل‌سازی کرد. در بین مدل‌های با دو پارامتر ورودی، مدل  $ANFIS$  ۸ دارای بیشترین دقت در مدل‌سازی ضریب دبی بود. همچنین مدل  $ANFIS$  ۹ تابعی از  $(B/D)$  و  $(W/D)$  است. علاوه بر این، شاخص‌های آماری  $MAPE$  و  $BIAS$  به ترتیب مساوی  $0/036$  و  $0/020$  بود. برای  $ANFIS$  ۱۰ مقادیر  $RMSE$ ،  $MAPE$  و  $R$  به ترتیب مساوی  $0/033$ ،  $0/038$  و  $0/589$  بودند. این مدل مقادیر ضریب دبی را برحسب نسبت عرض کانال اصلی به قطر روزنه جانبی  $(B/D)$  و نسبت عمق جریان به قطر روزنه  $(Y_m/D)$  تخمین زد. تأثیرات پارامترهای  $Fr$  و  $B/D$  برای مدل  $ANFIS$  ۱۱ نادیده گرفته شد. برای مدل مذکور، مقادیر ضریب همبستگی،  $SI$  و  $\rho$  به ترتیب مساوی  $0/582$ ،  $0/054$  و  $0/034$  محاسبه شد. بنابراین با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های  $ANFIS$  ۱ تا  $ANFIS$  ۱۱، مدل  $ANFIS$  ۱ به عنوان بهترین پارامترها در مدل‌سازی ضریب دبی با استفاده از مدل  $ANFIS$  معرفی شدند. علاوه بر این، با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، پارامتر نسبت عرض کانال اصلی به قطر روزنه جانبی  $(B/D)$  به عنوان پارامتری که تأثیر قابل توجهی روی ضریب دبی نداشت شناسایی شد.

در قسمت قبل بهترین مدل  $ANFIS$  برای تخمین ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای انتخاب شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم‌های  $PSO$  و  $GA$  مقادیر تابع عضویت مدل  $ANFIS$

دبی روزنه‌های جانبی دایروی در نظر گرفته شد. این مدل مقادیر ضریب را برحسب عدد فرود جریان  $(Fr)$ ، نسبت عرض کانال اصلی به قطر روزنه جانبی  $(B/D)$ ، نسبت ارتفاع تاج روزنه به قطر روزنه  $(W/D)$  و نسبت عمق جریان به قطر روزنه  $(Y_m/D)$  مدل‌سازی کرد. برای مدل  $ANFIS$  ۱ مقادیر  $RMSE$ ،  $MAPE$  و ضریب همبستگی به ترتیب مساوی  $0/020$ ،  $0/021$  و  $0/871$  محاسبه شدند. در بین ۱۱ مدل  $ANFIS$ ، مدل  $ANFIS$  ۱ دارای بیشترین دقت بود. همچنین مدل‌های  $ANFIS$  ۲ تا  $ANFIS$  ۵ با ترکیبی از سه پارامتر ورودی مقادیر ضریب دبی را مدل‌سازی کرد. به عنوان مثال، مدل  $ANFIS$  ۲ تابعی از عدد فرود جریان، نسبت عرض کانال اصلی به قطر روزنه جانبی و نسبت ارتفاع تاج روزنه به قطر روزنه مدل‌سازی می‌کند. برای این مدل تأثیر نسبت عمق جریان به قطر روزنه  $(Y_m/D)$  نادیده گرفته شد. برای این مدل، مقادیر  $SI$ ، ضریب همبستگی و  $\rho$  به ترتیب مساوی  $0/054$ ،  $0/575$  و  $0/034$  بودند. برای مدل  $ANFIS$  ۳ تأثیر نسبت ارتفاع تاج روزنه به قطر روزنه  $(W/D)$  حذف شد. این مدل مقادیر ضریب دبی را برحسب  $Fr$ ،  $B/D$  و  $Y_m/D$  مدل‌سازی کرد. برای این مدل مقدار شاخص  $R$  مساوی  $0/698$  بود. برای مدل  $ANFIS$  ۴ مقادیر  $\rho$ ،  $SI$  و  $RMSE$  به ترتیب برابر  $0/020$ ،  $0/037$  و  $0/022$  محاسبه شد. 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  $0/832$  محاسبه شد. این مدل مقادیر ضریب دبی روزنه جانبی دایروی را برحسب عدد فرود جریان  $(Fr)$ ، نسبت ارتفاع تاج روزنه به قطر روزنه  $(W/D)$  و نسبت عمق جریان به قطر روزنه  $(Y_m/D)$  مدل‌سازی کرد. در بین مدل‌های با سه پارامتر ورودی، مدل  $ANFIS$  ۵ دارای کمترین دقت و کوچک‌ترین ضریب همبستگی بود. برای این مدل مقدار  $R$  مساوی  $0/575$  به دست آمد. برای این مدل تأثیرات عدد فرود نادیده  $(Fr)$  گرفته شد. همچنین شش مدل  $ANFIS$  ۶ تا  $ANFIS$  ۱۱ مقادیر ضریب دبی را با ترکیبی از دو پارامتر ورودی تخمین می‌زنند. به عنوان مثال مدل  $ANFIS$  ۶ تابعی از  $(Fr)$  و  $(B/D)$  است و تأثیرات  $(W/D)$  و  $(Y_m/D)$



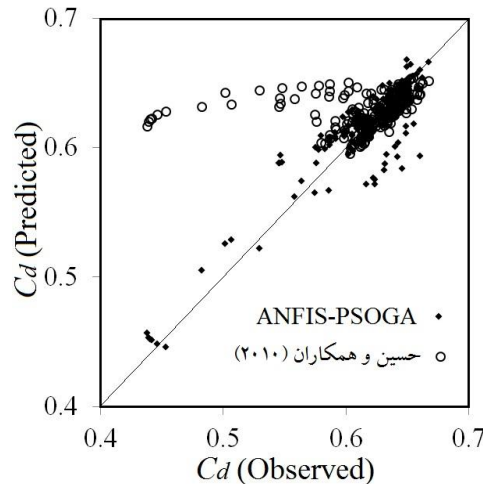
شکل ۵. مقایسه نتایج مدل‌سازی ضریب دبی روزنه جانبی دایروی توسط: الف) ANFIS، ب) ANFIS-PSO و ج) ANFIS-PSOGA



شکل ۶. توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS، ANFIS-PSO و ANFIS-PSOGA

تخمین زد. مقدار RMSE، MAPE و SI برای مدل ANFIS-PSO به ترتیب مساوی ۰/۰۱۹، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۳۱ محاسبه شد. همچنین مقدار شاخص آماری R برای این مدل برابر ۰/۸۳ تخمین زده شد. برای مدل ANFIS-PSO تقریباً ۹۴ درصد نتایج دارای خطایی کمتر از هشت درصد بودند. علاوه بر این، برای مدل مذکور در حدود ۹۵ درصد نتایج مدل‌سازی شده خطایی کمتر از ۱۲ درصد به خود اختصاص دادند. این در حالی است که برای مدل ANFIS-PSOGA تقریباً ۹۲ درصد ضرایب دبی شبیه‌سازی شده خطایی کمتر از شش درصد داشتند. همچنین کلیه نتایج مدل‌سازی شده توسط ANFIS-PSOGA دارای

بهینه شد. به بیان دیگر، بعد از شناسایی مدل برتر (۱) ANFIS، نتایج این مدل با نتایج مدل‌های ANFIS-PSO، ANFIS-PSOGA و ANFIS-FA مقایسه می‌شود. در شکل ۵ ضریب دبی مدل‌های انتخاب شده توسط مدل‌های ANFIS، ANFIS-PSO و ANFIS-PSOGA با مقادیر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. همچنین توزیع خطا برای مدل‌های ANFIS، ANFIS-PSO و ANFIS-PSOGA در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی، تقریباً ۸۴ درصد نتایج مدل ANFIS خطایی کمتر از چهار درصد داشتند. همچنین این مدل در حدود ۹۷ درصد مقادیر ضریب دبی را با خطایی کمتر از ۱۰ درصد



شکل ۷. مقایسه ضریب دبی محاسبه شده توسط معادله ارائه شده توسط حسین و همکاران (۹) و مدل ANFIS-PSOGA

مقادیر ضریب دبی را با دقت بسیار بیشتری تخمین زد.

### نتیجه گیری

در این مطالعه یک مدل هیبریدی برای تخمین ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای توسعه داده شد. در ابتدا با استفاده از پارامترهای مؤثر روی ضریب دبی و توسط مدل ANFIS، ۱۱ مدل عددی مختلف معرفی شد. سپس با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی، مدل برتر معرفی شد. مقدار MAPE، BIAS و SI برای مدل برتر به ترتیب مساوی ۰/۰۲۱، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۳۳ به دست آمد. همچنین عدد فرود جریان و نسبت عمق جریان به قطر روزنه (Ym/D) به عنوان مؤثرترین پارامترها در مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای شکل شناسایی شدند. سپس با استفاده از (Particle Swarm Optimization) PSO و (Genetic Algorithm) GA دو مدل هیبریدی توسعه داده شد (ANFIS-PSO، ANFIS-PSOGA). تجزیه و تحلیل نتایج مدل برتر و مدل‌های هیبریدی نشان داد که مدل ANFIS-PSOGA مقادیر ضریب دبی را به شکل قابل ملاحظه‌ای با دقت بالایی تخمین زد. مقدار ضریب همبستگی برای ANFIS-PSOGA برابر ۰/۹۱۳ محاسبه شد.

خطایی کمتر از ۱۲ درصد بودند. مقادیر R، MAPE و BIAS برای این مدل به ترتیب برابر ۰/۹۱۳، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۱ محاسبه شد. برای این مدل تقریباً ۹۲ درصد مقادیر شبیه‌سازی شده دارای خطایی کوچکتر از شش درصد داشتند. بر اساس نتایج مدل فرا ابتکاری ANFIS-PSOGA، صددرصد نتایج مدل‌سازی شده توسط مدل مذکور خطایی کمتر از ۱۴ درصد داشتند. همچنین شاخص پراکندگی برای این مدل تقریباً مساوی ۰/۰۲۹ محاسبه شد. بنابراین همان‌گونه که مشاهده شد مدل ترکیبی ANFIS-PSOGA مقادیر ضریب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای را در مقایسه با مدل‌های ANFIS و ANFIS-PSO با دقت بیشتری مدل‌سازی کرد. به عبارت دیگر ترکیب الگوریتم‌های ANFIS، PSO و GA منجر به معرفی یک مدل بهینه‌سازی شده برای تخمین ضرایب دبی روزنه‌های جانبی دایره‌ای شد.

در ادامه نتایج مدل برتر (ANFIS-PSOGA) با نتایج رابطه ارائه شده توسط حسین و همکاران مقایسه شد که این مقایسه در شکل ۷ نشان داده شده است. برای معادله حسین و همکاران، مقادیر RMSE، MAPE و SI به ترتیب مساوی ۰/۰۴۲، ۰/۰۳۹ و ۰/۰۶۸ محاسبه شد. با توجه به مقایسه نتایج مدل ANFIS-PSOGA و معادله حسین و همکاران، مدل ANFIS-PSOGA

## منابع مورد استفاده

1. Asadi, S., J. Shahrabi, P. Abbaszadeh and S. Tabanmehr. 2013. A new hybrid artificial neural networks for rainfall-runoff process modeling. *Neurocomputing* 121: 470-480.
2. Carballada, B. L. 1979. Some characteristics of lateral flows [Thesis]. Concordia Univ. Montreal, PQ.
3. Eberhart R. and J. Kennedy. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on IEEE. Nagoya, Japan, pp. 39-43.*
4. 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.
5. Ebtehaj, I. and H. Bonakdari. 2016. Assessment of evolutionary algorithms in predicting non-deposition sediment transport. *Urban Water Journal* 13(5): 499-510.
6. Emiroglu, M. E., O. Kisi and O. Bilhan. 2010. Predicting discharge capacity of triangular labyrinth side weir located on a straight channel by using an adaptive neuro-fuzzy technique. *Advances in Engineering Software* 41(2): 154-160.
7. Ghodsian, M. 2003. Flow through side sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(6): 458-462.
8. Holland, J. H. 1975. *Adaptation in Natural And Artificial Systems. an Introductory Analysis with Application to Biology, Control, and Artificial Intelligence.* University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
9. Hussein, A., Z. Ahmad and G. L. Asawa. 2010. Discharge characteristics of sharp-crested circular side orifices in open channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 21(3): 418-424.
10. Hussein, A., Z. Ahmad and G. L. Asawa. 2011. Flow through sharp-crested rectangular side orifices under free flow condition in open channels. *Agricultural Water Management* 98: 1536-1544.
11. Hussein, A., Z. Ahmad and C. S. P. Ojha. 2014. Analysis of flow through lateral rectangular orifices in open channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 36: 32-35.
12. Jang, J. S. R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *Journal of IEEE. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 23(3): 665-685.
13. Mirnia, S. H. and E. Vatankhah. 2016. Equation of discharge coefficient of triangular sharp-edge side orifices in subcritical flow regime. In: *Proceeding of the Fifteen National Conference of Iranian hydraulic, Qazvin, Iranian Hydraulic Society, Imam Khomeini International University.*
14. Mohammadi, K., S. Farzin, K. Kardan and H. Hassan Zadeh. 2011. Study of effectiveness of discharge coefficient in terms of dimensions' parameters and determination of flow intensity coefficient in side orifices using intelligence simulation. In: *Proceeding of the Sixth Congress of National Civil Engineering, Semnan University, Semnan.*
15. Ojha, C. S. P. and D. Subbaiah. 1997. Analysis of flow through lateral slot. *Irrigation and Drainage Engineering* 123(5): 402-405.
16. Prohaska, P. D., A. A. Khan and N. B. Kaye. 2010. Investigation of flow through orifices in riser pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(5): 340-347.
17. Ramamurthy, A. S., S. T. Udoyara and S. Serraf. 1986. Rectangular lateral orifices in open channel. *Journal of Environmental Engineering* 135(5): 292-298.

## Application of Evolutionary Algorithm to Optimization of ANNIS Model for Discharge Coefficient Circular Side Spillway Modeling

M. Javad Asadi<sup>1</sup>, S. Shabanlou<sup>2</sup>, M. Najarchi<sup>1\*</sup> and M. M. Najafizadeh<sup>3</sup>

(Received: April 30-2018 ; Accepted: November 11-2018)

### Abstract

In this study, the discharge coefficient of the circular side orifices was predicted using a new hybrid method. Combinations made in this study were divided into two sections: 1) the combination of two algorithms including Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA) and providing the PSOGA algorithm 2) using the PSOGA algorithm in order to optimize the Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) network and providing the ANFIS-PSOGA method. Next, by identifying the parameters affecting on the discharge coefficient of the circular side orifices, 11 different combinations were provided. Then, the sensitivity analysis conducted by ANFIS showed that the Froude number and the ratio of the flow depth to the orifice diameter ( $Y_m/D$ ) were identified as the most effective parameters in modeling the discharge coefficient. Also, the best combination including the Froude number ( $Fr$ ), the ratio of the main channel width to the side orifice diameter ( $B/D$ ), the ratio of the orifice crest height to its diameter ( $W/D$ ) and the ratio of the flow depth to the orifice diameter ( $Y_m/D$ ) for estimating the discharge coefficient was introduced. For this model, the values of Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Root Mean Square Error (RMSE) and correlation coefficient ( $R$ ) were obtained 0.021, 0.020 and 0.871, respectively. Additionally, the performance of the ANFIS-PSOGA method was compared with the ANFIS-PSO and ANFIS methods. The results showed that the ANFIS-PSOGA method for predicting the discharge coefficient was the superior model

**Keywords:** ANFIS, Hybrid model, Optimization, Circular side orifices, Discharge coefficient

1. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

2. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

3. Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: m-najarchi@iaau-arak.ac.ir