

مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی

سعید شهبانلو^{۱*}، فریبرز یوسفوند^۲، حامد عظیمی^۳، عیسی ابتهج^۴

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

۱- گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

۲- گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران آب. مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۴- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب. گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: saeid.shabanlou@gmail.com

چکیده

در این تحقیق، مقادیر ضریب دبی روزنه‌های جانبی با استفاده از روش‌های ANFIS و ANFIS-GA تخمین زده شد. برای مدل‌سازی ضریب دبی، تاثیرات نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی (B/L)، نسبت ارتفاع روزنه جانبی به طول روزنه جانبی (W/L)، نسبت عمق جریان در کانال اصلی به طول روزنه جانبی (Y_m/L) و عدد فرود (F_r) در نظر گرفته شد. برای محاسبه ضریب دبی یازده مدل مختلف برای هر یک از مدل‌های ANFIS و ANFIS-GA معرفی گردید. سپس به منظور مقایسه نتایج مدل‌های محاسبات نرم با مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، ضریب دبی روزنه جانبی با استفاده از مدل FLOW-3D شبیه‌سازی شد. برای آشفتگی میدان جریان از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG استفاده گردید. بر اساس نتایج مدل عددی، مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG آشفتگی میدان جریان را با دقت بیشتری نسبت به مدل $k-\varepsilon$ استاندارد شبیه‌سازی نمود. همچنین مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای مدل‌های مدل‌سازی شده توسط حل عددی به ترتیب برابر ۱۲/۲۰۴ و ۰/۰۰۱ است. با تحلیل نتایج مدل‌های ANFIS، ANFIS-GA و CFD، مدل ANFIS-GA مدل برتر معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، انفیس، روزنه‌های جانبی، شبیه‌سازی CFD، ضریب دبی

Modeling Discharge Coefficient of Rectangular Side Orifices

S Shabanlou^{1*}, F Yosefvand², H Azimi³, I Ebtehaj⁴

Received: Accepted:

1- Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Kermanshah Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Kermanshah Branch, Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

3- M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Eng., Iran- Water and Wastewater Research Center, Razi Univ., Kermanshah, Iran

4- Ph.D. Student, Dept. of civil Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran- Water and Wastewater Research Center, Razi Univ., Kermanshah, Iran

*Corresponding Author, Email: saeid.shabanlou@gmail.com

Abstract

In this research, the discharge coefficient values of side orifices are modeled using ANFIS and the ANFIS-GA methods. To simulate the discharge coefficient, the effects of the ratio of the main channel width to the side orifice length (B/L), the ratio of the side orifice height to its length (W/L), the ratio of the flow depth in the main channel to the side orifice length (Y_m/L) and the Froude number (F_r) were considered. Eleven different models were introduced for each of the ANFIS and ANFIS-GA models to estimate the discharge coefficient. Next, in order to compare the soft computing models' results with the results of the computational fluid dynamics (CFD), the side orifice discharge coefficient was simulated using FLOW-3D model. To model the flow field turbulence, the standard $k-\varepsilon$ and RNG $k-\varepsilon$ turbulence models were used. According to the CFD model results, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model simulated the flow field turbulence with higher accuracy as compared to $k-\varepsilon$ model. Also, the $MAPE$ and $RMSE$ values for the estimated discharges by the CFD model were equal to 12.204 and 0.001, respectively. By analyzing the results of the ANFIS, ANFIS-GA and CFD models, the ANFIS-GA model was introduced as the premier model.

Keywords: ANFIS; CFD simulation; Discharge coefficient; Genetic Algorithm; Side orifices

مقدمه

کاربالادا (۱۹۷۸) به صورت تحلیلی یک مدل هیدرودینامیکی برای محاسبه جریان خروجی از میان روزنه‌های جانبی ارائه داد. وی مدل خویش را با فرض دو بعدی جریان انحرافی توسعه داد. اوچها و ساب بایاح (۱۹۹۷) معادله دینامیکی جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی را برای روزنه‌های جانبی مستطیلی حل نمودند. همچنین آنها به اندازه‌گیری دبی جریان از روی دریچه‌های مذکور به صورت آزمایشگاهی مبادرت نمودند. آنها با فرض ثابت بودن توزیع فشار بر روی روزنه‌های مستطیلی رابطه را برای تعیین ضریب دبی این دسته از سازه‌های هیدرولیکی ارائه کردند:

$$C_d = \frac{Q}{Lb\sqrt{2gH_0}} \quad [1]$$

روزنه‌های جانبی به شکل گسترده‌ای در تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری، مزارع کشاورزی و شبکه‌های زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رامامورتی و همکاران (۱۹۸۶) جز اولین کسانی بودند که مشخصات جریان انحرافی از داخل یک روزنه جانبی مستطیلی را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آنها با استفاده از تئوری جریان دو بعدی معادله‌ای را برای محاسبه ضریب دبی روزنه جانبی پیشنهاد دادند. همچنین رامامورتی و همکاران (۱۹۸۷) جریان متغیر تدریجی از میان سیستم روزنه و سرریز جانبی را بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی نمودند. آنها در مطالعه خود نحوه توزیع دبی جریان انحرافی از سیستم روزنه و سرریزجانبی را مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه

مقادیر دبی را با $\pm 5\%$ درصد خطا پیش‌بینی می‌نماید. هاشد و همکاران (۲۰۱۵) به‌صورت آزمایشگاهی دبی عبور از داخل روزنه‌های جانبی زنگوله‌ای شکل را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی پیشنهاد دادند.

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های عددی شامل شبیه‌سازی میدان جریان در سازه‌های هیدرولیکی به شکل قابل ملاحظه‌ای گسترش یافته است (عظیمی و شبانلو ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶). با استفاده از تئوری جریان دو بعدی و شبیه‌سازی عددی عظیمی و همکاران (۲۰۱۵) دبی سرریزهای جانبی مستطیلی واقع بر کانال‌های دایروی را مدل‌سازی نمودند. همچنین آنها تاثیر دبی ورودی را بر روی مشخصات میدان جریان مورد بررسی قرار دادند. جریان زیربحرانی در کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی به وسیله روش حجم سیال^۱ و مدل آشفتگی RNG k-ε توسط عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۵) شبیه‌سازی شد. آنها تاثیر عدد فرود ورودی را بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان کانال اصلی مورد مطالعه عددی قرار دادند. در دهه اخیر تکنیک‌های مختلف شبکه عصبی و هوش مصنوعی در الگوشناسی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی علوم مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. ابتهاج و همکاران (۲۰۱۵a) ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی را با استفاده از GMDH مدل‌سازی کردند. آنها برای تخمین ضریب دبی روزنه‌های جانبی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی را در نظر گرفتند. همچنین ابتهاج و همکاران (۲۰۱۵b) به وسیله GMDH ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه‌تیز مستطیلی را پیش‌بینی کردند. آنها ضریب دبی این نوع از سازه‌های انحرافی را بر حسب مشخصات هیدرولیکی جریان و پارامترهای هندسی کانال اصلی و روزنه جانبی در نظر گرفتند. همچنین آنها نتایج مدل خود را با روش سایر محققین مقایسه نمودند که نشان دادند مدل آنها از

در اینجا C_d ، Q ، L ، b ، g و H_0 به ترتیب ضریب دبی، دبی انحرافی، طول روزنه، ارتفاع روزنه، شتاب جاذبه و هد جریان روی مرکز روزنه است. قدسیان (۲۰۰۳) رفتار جریان انحرافی از میان دریچه‌های کشویی مستطیلی را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار داد. او در مطالعه خود تغییرات انرژی مخصوص در امتداد سازه انحرافی مذکور برای هر دو شرایط جریان مستغرق و آزاد را مورد بررسی قرار داد. حسین و همکاران (۲۰۱۰) مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی رفتار جریان عبوری از داخل کانال‌های مستطیلی دارای روزنه جانبی دایروی انجام دادند. آنها یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی روزنه‌های جانبی لبه تیز دایروی ارائه نمودند. رابطه آنها به‌عنوان تابعی از عدد فرود و نسبت قطر روزنه جانبی دایروی به عرض کانال اصلی ارائه شد. حسین و همکاران (۲۰۱۱) یک بررسی آزمایشگاهی بر روی مشخصات جریان در کانال اصلی دارای یک روزنه جانبی مستطیلی انجام دادند. آنها پارامترهای موثر بر روی جریان عبوری از روزنه‌های جانبی مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی را با معادله ۲ محاسبه نمودند و یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سازه‌های انحرافی به‌عنوان تابعی از عدد فرود و نسبت عرض روزنه جانبی مستطیلی به عرض کانال اصلی ارائه نمودند:

$$C_d = \frac{3}{2} \frac{Q}{L \sqrt{2g} (H_1^{3/2} - H_2^{3/2})} \quad [2]$$

در اینجا H_1 و H_2 به ترتیب برابر بار جریان در تراز فوقانی و تحتانی روزنه جانبی مستطیلی هستند. حسین و همکاران (۲۰۱۴) یک مطالعه تحلیلی بر روی دبی جریان از داخل روزنه‌های جانبی مستطیلی انجام دادند. آنها مقدار دبی روزنه جانبی مستطیلی را با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه کرده و آن را با دبی آزمایشگاهی مقایسه کردند و نشان دادند روش تحلیلی

همدگیر مقایسه شده و در انتها مدل برتر برای مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی معرفی گردیده است.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌های عددی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی حسین و همکاران (۲۰۱۱) استفاده می‌شود. مدل آزمایشگاهی آنها شامل یک کانال مستطیلی روباز به طول ۹/۱۵ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر است. محدوده مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط حسین و همکاران (۲۰۱۱) در جدول (۱) مرتب شده است. در این جدول $Q, Q_m, Y_m, L, V_1, W, F_r$ به ترتیب عبارتند از: دبی در کانال اصلی، دبی جریان از روزنه جانبی، عرض روزنه جانبی، عمق جریان در کانال اصلی، سرعت جریان در کانال اصلی، ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال و عدد فرود جریان در کانال اصلی می‌باشد.

ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی

حسین و همکاران (۲۰۱۱) ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی را به‌عنوان تابعی از طول روزنه جانبی (L)، ارتفاع روزنه جانبی (b)، عرض کانال اصلی (B)، ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی (W)، سرعت جریان در کانال اصلی (V_1)، عمق جریان در کانال اصلی (Y_m)، چگالی سیال (ρ)، ویسکوزیته جریان (μ) و شتاب جاذبه (g) در نظر گرفتند:

$$C_d = f_1(L, b, B, W, V_1, Y_m, \rho, \mu, g) \quad [3]$$

در ادامه با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد بدست آمدند که با حذف پارامترهای غیر موثر معادله (۴) به صورت ذیل نوشته می‌شود:

$$C_d = f_2\left(\frac{B}{L}, \frac{W}{L}, \frac{Y_m}{L}, F_r\right) \quad [4]$$

برتری قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. آنها با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج مدل عددی خود، رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی ارائه نمودند. اقبال‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مقادیر دبی روزنه‌های جانبی را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آنها نتایج مدل عددی خود را با مدل رگرس یونی مقایسه نمودند و نشان دادند مدل شبکه عصبی مقادیر دبی را با دقت بیشتری برآورد می‌کند.

علاوه بر این عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) در یک مطالعه عددی و با استفاده از روش رگرسیون خطی، یک رابطه برای ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع بر مجاری دایروی ارائه نمودند. در ادامه عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۶) مشخصات هیدرولیکی جریان زیربحرانی درون کانال‌های دایروی دارای سرریزجانبی را مدل‌سازی کردند. آنها نشان دادند که برای مقادیر مختلف دبی جریان تقریباً یک رابطه خطی بین دبی کانال اصلی و ارتفاع نقاط سکون وجود دارد.

با بررسی مطالعات گذشتگان مشاهده می‌شود که تاکنون شبیه‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی توسط مدل‌های CFD و ترکیبی هوش مصنوعی به صورت هم‌زمان انجام نشده است. همچنین استفاده از مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی برای تخمین ضریب دبی این نوع از سازه‌های انحرافی برای اولین بار در این تحقیق استفاده گردیده است. به بیان دیگر، هدف اصلی در این مطالعه، مقایسه ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی شبیه‌سازی شده توسط مدل CFD و یک روش ترکیبی هوش مصنوعی است. در ابتدا، با استفاده از مدل عددی FLOW-3D که یک روش مبتنی بر CFD است و یک روش فرا ابتکاری که ترکیبی از ANFISs-GA می‌باشد، ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی مدل‌سازی می‌شود. در مدل CFD، تغییرات سطح آزاد جریان و آشفتگی میدان جریان به ترتیب با استفاده از طرح VOF و مدل آشفتگی RNG k-ε مدل‌سازی می‌شود. سپس نتایج مدل CFD و مدل‌های هوش مصنوعی با

بنابراین در این مطالعه اثر پارامترهای بدون بعد معادله (۴) بر روی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی در نظر گرفته شد. به منظور بررسی دقت نتایج مدل‌سازی ضریب دبی روزنه جانبی توسط مدل‌های عددی از شاخص‌های آماری درصد میانگین مطلق خطا

برای این مطالعه اثر پارامترهای بدون بعد معادله (۴) بر روی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی در نظر گرفته شد. به منظور بررسی دقت نتایج مدل‌سازی ضریب دبی روزنه جانبی توسط مدل‌های عددی از شاخص‌های آماری درصد میانگین مطلق خطا

جدول ۱- محدوده مقادیر آزمایشگاهی

پارامتر	$Q(m^3 s^{-1})$	$Q_m(m^3 s^{-1})$	$L(m)$	$Y_m(m)$	$V_i(m s^{-1})$	$W(m)$	$F_T(-)$
محدوده	۰/۰-۰۰۰۹/۰۲۸۸	۰/۰-۱۴۷/۲۸۱	۰/۰-۰۰۴۴/۱۳۳	۰/۰-۱۵۴/۵۹۰	۰/۰-۱۲/۷۹	۰/۰-۰۰۵/۲	۰/۰-۰۰۵/۴۸

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

[۵]

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

$$SI = \frac{RMSE}{(C_d)_{(Observed)}} \quad [۶]$$

[۷]

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

[۸]

که چگونه این پارامترها به منظور کمینه کردن خطا به روز شوند. ساختار یک FIS شامل سه جز اصلی شامل پایگاه قواعد، پایگاه داده و یک مکانیسم استدلال است. یک پایگاه قواعد فازی شامل قواعد IF-THEN می‌باشد. بطور مثال "اگر مقدار x کم باشد، آنگاه مقدار y کم می‌شود" می‌توان یک قاعده فازی باشد. بطوری که "کم" و "زیاد" در این قاعده متغیرهای کلامی هستند. پایگاه داده، توابع عضویت به کار برده شده در قواعد فازی و همچنین مکانیسم استدلال، رویه استنتاج خروجی از متغیرهای ورودی را اجرا می‌کند.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (هولند، ۱۹۷۵) روش جستجوی احتمالاتی فراگیر است که از فرایند تکامل ریست‌شناختی طبیعی پیروی می‌کند. این الگوریتم بر جمعیت جواب‌های

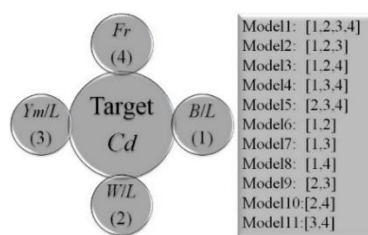
در اینجا $(C_d)_{(Observed)_i}$ ضریب دبی آزمایشگاهی، $(C_d)_{(Predicted)_i}$ ضریب دبی مدل‌سازی شده، $(C_d)_{(Observed)_i}$ میانگین ضریب دبی‌های آزمایشگاهی، $(C_d)_{(Observed)_i}$ میانگین ضریب دبی‌های شبیه‌سازی شده و n برابر تعداد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است.

مدل‌های هوشمند

انفیس

ANFIS برای اولین بار با آموزش FIS در چارچوب یک شبکه عصبی تطبیقی توسط جنگ (۱۹۹۳) ارائه شده است. ساختار یک شبکه عصبی تطبیقی شامل تعدادی گره در لایه‌های مختلف است که با یکدیگر ارتباط دارند. خروجی این شبکه وابسته به پارامترهای قابل تنظیم در گره‌ها است. قواعد یادگیری شبکه تعیین می‌کند

تعریف می‌شود. این بردار شامل پارامترهای تابع عضویت می‌باشد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار آن‌ها بهینه می‌شود. مقدار fitness function تعریف شده در این مطالعه به صورت تابع MSE می‌باشد. در ابتدا پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک به صورت تصادفی تعیین شده و در ادامه با استفاده از الگوریتم، مقادیر تعیین شده بروز رسانی می‌شوند. در هر مرحله از تکرار، یکی از پارامترهای تابع عضویت بروز رسانی می‌شود و این مراحل برای تمامی پارامترها ادامه می‌یابد و پس از اینکه تمامی پارامترها یکبار بروز رسانی شدند، در تکرار بعدی پارامتر اول برای بار دوم بروز رسانی می‌شود. بنابراین به صورت تکرار به تکرار تمامی پارامترها جهت رسیدن به سمت نقطه بهینه بروز رسانی می‌شوند. برای مدل‌سازی ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی با استفاده از مدل‌های ANFIS و ANFIS-GA از ۱۷۳ اندازه‌گیری آزمایشگاهی استفاده می‌شود که ۵۰٪ آن‌ها برای آموزش مدل‌ها و ۵۰٪ درصد باقی مانده به منظور آزمون شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شوند. در ادامه ۱۱ مدل مختلف برای هر یک از مدل‌های ANFIS و ANFIS-GA معرفی می‌شود که نحوه این ترکیب‌ها در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- ترکیب پارامترهای بدون ورودی برای مدل- های ANFIS و ANFIS-GA

مدل CFD

معادلات حاکم

برای حل عددی میدان جریان غیر دائمی و سیال غیر قابل تراکم، معادلات پیوستگی و متوسط‌گیری شده ناویر استوکس به شکل زیر حل می‌شود:

بالقوه عمل می‌کند و اصل تنازع بقا را در تولید تقریب‌های بهتر جواب مساله، به کار می‌گیرد. در هر نسل، مجموعه جدیدی از تقریب‌ها با فرایند انتخاب بهترین عضو بر اساس میزان برآزش آن‌ها در دامنه مسئله و تکثیر با عملگرهای گرفته شده از ژنتیک طبیعی، ساخته می‌شود. این فرایند نهایتاً به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می‌شود که نسبت به اعضای اولیه که در واقع والدین اصلی آن‌ها است، با محیط سازگاری بهتری دارند.

ANFIS-GA

در این روش، جهت تعیین مقدار توابع عضویت ANFIS که منجر به آموزش بهینه این شبکه می‌شود، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد. مزیت این روش افزایش دقت محاسباتی برای توپولوژی داده شده است. در ادامه مراحل شبیه‌سازی ضریب دبی روزنه جانبی مستطیلی با استفاده از الگوریتم ترکیبی توضیح داده می‌شود:

در ابتدا داده‌ها به دو قسمت داده‌های آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند (۵۰ درصد برای آموزش و ۵۰ درصد برای آزمون). درصد قابل توجهی از داده‌های آموزش جهت صحت سنجی مدل در حین آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از داده‌های مرتب شده، آموزش ANFIS شروع می‌شود. روند آموزش به سیستم این امکان را می‌دهد که پارامترهای تعریف شده به عنوان ورودی و یا خروجی مدل را تنظیم کند. روند آموزش زمانی متوقف می‌شود که معیارهای تعیین شده جهت توقف برنامه، اقلان شوند. بعد از تعیین داده‌های آموزش، نوع توابع عضویت و سیستم استنتاج فازی با استفاده از تطبیق پارامترهای تابع عضویت بهینه می‌شود که در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک جهت تعیین پارامترهای وابسته به توابع عضویت در سیستم استنتاج فازی استفاده می‌گردد. در ادامه یک بردار که دارای N بعد مختلف می‌باشد، (N تعداد توابع عضویت است)

شده‌اند. لایه فوقانی میدان جریان به‌عنوان شرایط مرزی تقارن در نظر گرفته شده است.

محدوده محاسباتی و طرح شبکه‌بندی

در حل عددی، جریان روزنه جانبی به داخل یک مخزن که در محل روزنه به کانال اصلی متصل شده است، ریخته می‌شود. کل میدان محاسباتی توسط یک بلوک مش غیریکنواخت منفصل شده است. میدان جریان در راستاهای X ، Y و Z به ترتیب توسط ۱۵۶ ، ۷۴ و ۵۸ سلول منفصل می‌شود. در جدول (۲) مشخصات یک نمونه استقلال از شبکه‌بندی‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی دبی روزنه‌جانبی مرتب شده است. همچنین در شکل (۲) تغییرات مقادیر خطا در مقابل افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی نشان داده شده است. برای بررسی حساسیت شبکه‌بندی مدل عددی، از شاخص‌های آماری $MAPE$ و $RMSE$ که توسط روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند. بر اساس جدول (۲)، اختلاف بین نتایج شبکه‌بندی ۳ و ۴ قابل صرف نظر کردن بوده و شبکه‌بندی ۳ برای انفصال میدان جریان انتخاب شده است. شبکه‌بندی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج حساسیت شبکه‌بندی مدل عددی برای تخمین دبی روزنه جانبی.

شبکه‌بندی	تعداد جزء	$MAPE$	$RMSE$
۱	۳۴۸۴۸۰	۱۴/۳۷۲	۰/۰۰۱۲
۲	۵۰۹۱۸۴	۹/۰۵۸	۰/۰۰۰۸
۳	۶۶۹۵۵۲	۶/۷۰۵	۰/۰۰۰۶
۴	۷۹۸۷۲۰	۵/۸۷۳	۰/۰۰۰۵۵
۵	۸۶۵۹۲۰	۵/۰۱۸	۰/۰۰۰۵

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

[۹]

[۱۰]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} \left[-P \delta_{ij} + \rho v_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right]$$

در اینجا U_i ، U_j و x ($i, j = 1, 2, 3$) به ترتیب مولفه‌های سرعت و محورهای مختصات در سیستم مختصات کارتزین می‌باشند. همچنین t زمان، ρ چگالی سیال، P فشار، δ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) دلتای کرونیگر، v_i ویسکوزیته آشفتگی است. در شبیه‌سازی‌های عددی میدان جریان، مدل‌سازی سطح آزاد از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از مهمترین روش‌هایی که با استفاده از روش تسخیر سطح مشترک سطح آزاد میدان جریان را شبیه‌سازی می‌کند، روش حجم سیال است. اگر یک سلول محاسباتی مشخص پر از سیال باشد $F=1$ خواهد شد. اگر $F=0$ سلول مورد نظر خالی است و اگر $0 < F < 1$ سلول مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا می‌باشد. در این مطالعه، برای تخمین تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده می‌شود. در این روش، برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial X_i} = 0.0$$

[۱۱]

شرایط مرزی

در شبیه‌سازی میدان جریان، شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی منطبق بر مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به مشخص بودن دبی و عمق جریان در ورودی کانال اصلی، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص که معادل شرایط مرزی نرخ جریان حجمی می‌باشد، در این شرایط مرزی استفاده شده است. در خروجی کانال اصلی از شرایط مرزی خروجی استفاده می‌گردد. کلیه دیواره‌های جامد کانال اصلی به‌عنوان شرایط مرزی دیواره تعریف

RNG k-ε ۶/۷۰۵ ۰/۰۰۰۶

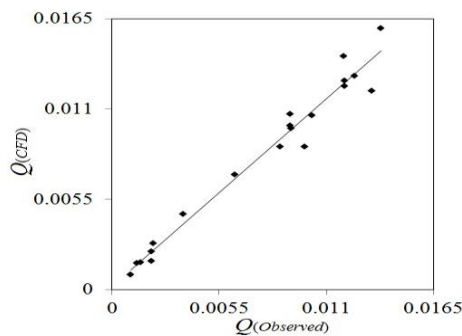
اعتبارسنجی

در ادامه دبی‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل CFD با مقادیر آزمایشگاهی حسین و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه می‌شوند که در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است. در جدول (۴) شاخص‌های آماری مدل CFD نیز مرتب شده است. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل CFD مقادیر $RMSE$ ، $MAPE$ و شاخص پراکندگی برای مدل‌های شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر ۱۲/۲۰۴، ۰/۰۰۱ و ۰/۱۳۰ محاسبه شده است. در مقابل مقدار ضریب همبستگی برای این مدل عددی برابر ۰/۹۸۴ محاسبه گردیده است. بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده، مدل CFD مقادیر دبی روزنه جانبی را با دقت مناسبی مدل‌سازی نموده است.

جدول ۴- مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ ، SI و R برای مدل CFD در

تخمین دبی روزنه جانبی.

$MAPE$	$RMSE$	SI	R
۱۲/۲۰۴	۰/۰۰۱	۰/۱۳۰	۰/۹۸۴

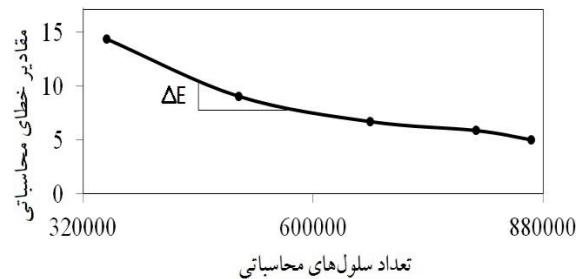


شکل ۴-مقایسه دبی روزنه جانبی مدل CFD و مقادیر آزمایشگاهی.

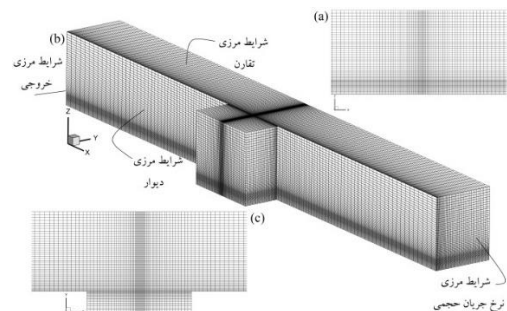
نتایج و بحث

ضریب دبی

در شکل ۵ مقایسه $MAPE$ ، $RMSE$ شاخص پراکندگی و ضریب همبستگی برای مدل‌های



شکل ۲- تغییرات مقادیر خطا در مقابل افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی.



شکل ۳- میدان جریان منفصل شده (a) مقطع طولی (b) دید سه بعدی (c) پلان.

مدل آشفتگی

در این مطالعه برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ استفاده شده است. نتایج مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای دبی روزنه جانبی مدل $L=0.089m$ ، $W=0.1m$ و $Q_m=0.08384m^3/s$ و $Y_m=0.2959m$ نشان داده شده است. مقدار $MAPE$ برای مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ به ترتیب مساوی ۹/۳۴۱ و ۶/۷۰۵ بوده و در مقابل شاخص آماری $RMSE$ برای این مدل‌های آشفتگی به ترتیب مساوی ۰/۰۰۰۸ و ۰/۰۰۰۶ بدست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دقت مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ بیشتر از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد است. بنابراین برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ استفاده می‌شود.

جدول ۳-مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ برای مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$

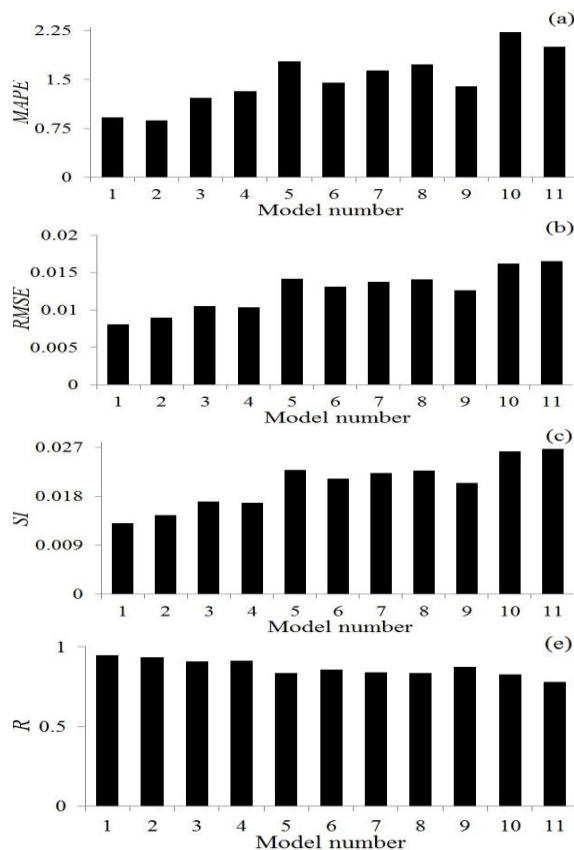
استاندارد و RNG $k-\epsilon$.

مدل آشفتگی	$MAPE$	$RMSE$
Standard $k-\epsilon$	۹/۳۴۱	۰/۰۰۰۸

می‌زند. برای این مدل تاثیر نسبت عمق جریان در کانال اصلی به طول روزنه جانبی نادیده گرفته شده است. مقدار ضریب همبستگی برای ANFIS(3) مساوی ۰/۹۱۱ و محاسبه گردیده است. همچنین مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ و SI برای این مدل به ترتیب مساوی ۱/۲۱۹، ۰/۱۱ و ۰/۰۱۷ است. برای ANFIS(4) تاثیر پارامتر W/L برای این مدل نادیده گرفته شده است. به عبارت دیگر این مدل مقادیر Ca را با ترکیبی از پارامترهای B/L ، Fr و Y_m/L بدست می‌آورد. مقدار $MAPE$ و $RMSE$ برای ANFIS(4) به ترتیب برابر ۱/۳۲۳ و ۰/۰۱۰ بدست آمده است. برای این مدل تقریباً ۸۱٪ نتایج خطایی کمتر از ۲٪ به خود اختصاص داده‌اند. مقدار شاخص‌های آماری SI و R برای ANFIS(4) به ترتیب مساوی ۰/۰۱۷ و ۰/۹۱۴ محاسبه گردیده است. تاثیر پارامتر بدون بعد B/L به منظور تخمین ضریب دبی روزنه جانبی برای ANFIS(5) نادیده گرفته شده است. این مدل به عنوان تابعی از W/L ، Y_m/L و Fr می‌باشد که مقدار ضریب همبستگی مساوی ۰/۸۳۷ بدست آمده است. در بین مدل‌های با سه پارامتر ورودی، ANFIS(5) دارای بیشترین مقدار خطا است ($MAPE=1.784$ ، $RMSE=0.014$). تقریباً ۶۶٪ نتایج مدل‌سازی‌های ANFIS(5) دارای خطایی کمتر از ۲٪ هستند و حدوداً ۹۲٪ نتایج این مدل دارای خطایی کمتر از ۴٪ هستند. در ادامه ۶ مدل مختلف ضریب دبی را با ترکیبی از دو پارامتر ورودی مدل‌سازی می‌کند (مدل‌های ANFIS(6) تا ANFIS(11)). ANFIS(6) با ترکیب دو پارامتر بدون بعد نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی (B/L) و نسبت ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی به طول روزنه جانبی (W/L) مقدار ضریب دبی را مدل‌سازی می‌کند. برای این مدل حدوداً ۷۸٪ داده‌ها خطایی کمتر از ۲٪ دارند و تقریباً ۹۸٪ نتایج نیز دارای خطایی کمتر از ۸٪ می‌باشند. مقدار شاخص R برای ANFIS(6) مساوی ۰/۸۵۹ است و $RMSE$ برای این مدل برابر ۰/۰۱۳ می‌باشد. همچنین ANFIS(7) مقادیر ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی را به عنوان

مختلف ANFIS در حالت آزمون نشان داده شده است. برای ANFIS(1) تاثیر کلیه پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است. ANFIS(1) ضریب دبی روزنه جانبی را بر حسب نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی (B/L)، نسبت ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی به طول روزنه جانبی (W/L)، نسبت عمق جریان در کانال اصلی به طول روزنه جانبی (Y_m/L) و عدد فرود (Fr) مدل‌سازی می‌کند. برای ANFIS(1) مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ و شاخص پراکندگی به ترتیب برابر ۰/۹۱۹، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱۳ بدست آمده است. برای این مدل تقریباً ۹۳٪ نتایج خطایی کمتر از ۲٪ دارند و ۱۰۰٪ داده‌ها مقدار خطایی کوچکتر از ۱۰٪ به خود اختصاص داده‌اند. مقدار ضریب همبستگی برای ANFIS(1) مساوی ۰/۹۵۰ محاسبه شده است. مدل‌های ۲ تا ۵ مقدار ضریب دبی روزنه جانبی مستطیلی را با ترکیبی از سه پارامتر ورودی مدل‌سازی می‌کنند. مدل ANFIS(2) مقادیر ضریب دبی را به عنوان تابعی از نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی (B/L)، نسبت ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی به طول روزنه جانبی (W/L)، نسبت عمق جریان در کانال اصلی به طول روزنه جانبی (Y_m/L) مدل‌سازی می‌کند. در بین مدل‌های با سه ورودی، ANFIS(2) دارای بیشترین دقت می‌باشد. برای این مدل اثرات عدد فرود جریان حذف شده است. مقدار $MAPE$ و SI برای این مدل به ترتیب ۰/۸۷۴ و ۰/۰۱۵ به دست آمده است. همچنین مقدار R برای این مدل مساوی ۰/۹۳۶ بدست آمده است. برای این مدل تقریباً ۹۸٪ داده‌های شبیه‌سازی شده دارای خطایی کمتر از ۴٪ هستند و در مقابل ۱۰۰٪ نتایج این مدل خطایی کمتر از ۱۰٪ دارند. تقریباً ۸۶٪ نتایج مدل ANFIS(3) دارای مقدار خطایی کمتر از ۲٪ هستند و در مقابل تقریباً ۹۷٪ داده‌ها دارای خطایی کمتر از ۶٪ می‌باشند. مدل ANFIS(3) با ترکیبی از سه پارامتر ورودی نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی، نسبت ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی به طول روزنه جانبی و عدد فرود جریان، ضریب دبی را تخمین

و ۰/۷۷۹ محاسبه گردیده است. این در حالی است که تقریباً ۶۰٪ داده‌های مدل سازی شده توسط این مدل خطایی کمتر از ۲٪ دارند. در مقابل مقدار شاخص‌های $RMSE$ برای این مدل برابر ۰/۰۱۷ است. بنابراین در بین کلیه مدل‌های ANFIS(1)، ANFIS(1) به‌عنوان مدل برتر معرفی می‌شود.



شکل ۵- مقایسه (a) $MAPE$ (b) $RMSE$ (c) شاخص

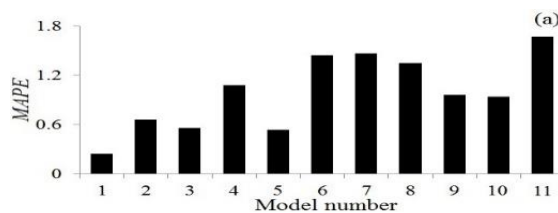
پراکندگی (e) ضریب همبستگی برای مدل‌های

مختلف ANFIS در حالت آزمون.

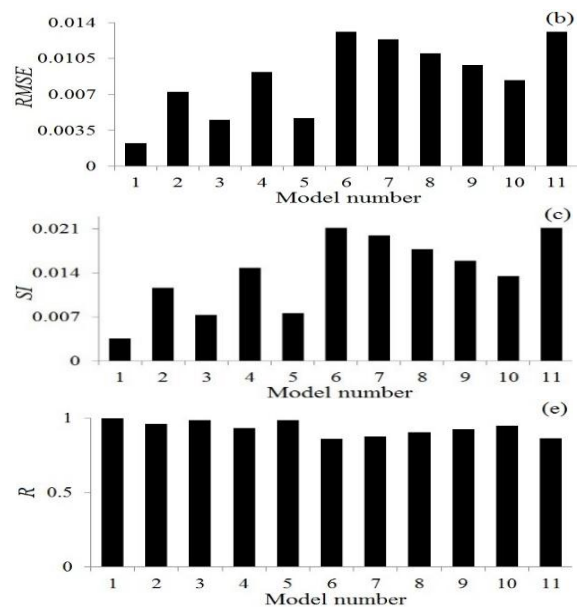
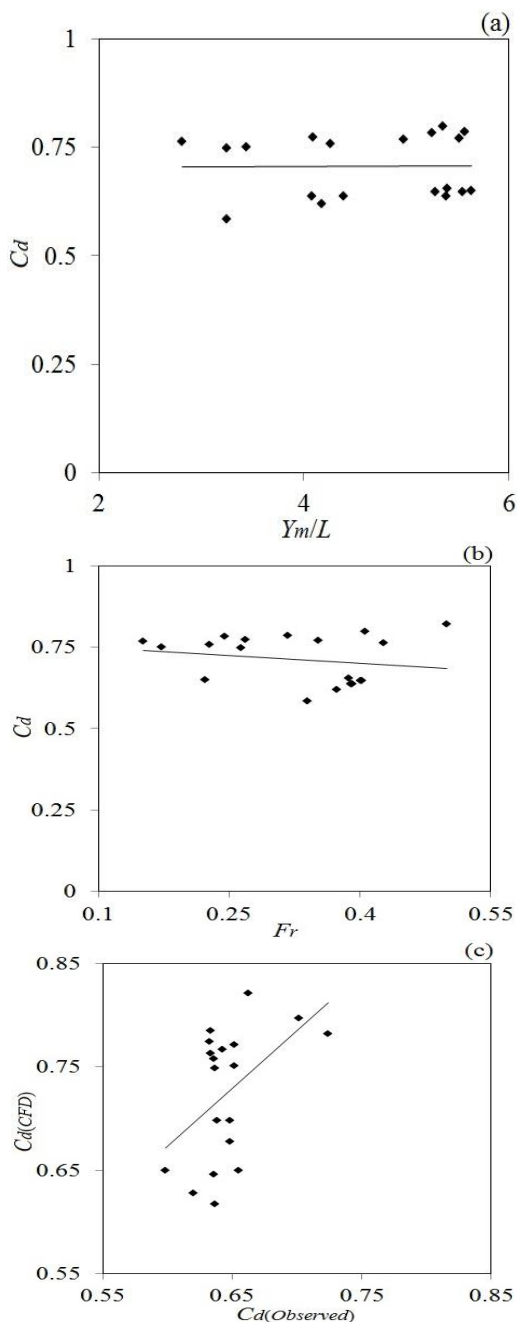
همچنین در شکل (۶) مقایسه شاخص‌های آماری $RMSE$ ، $MAPE$ شاخص پراکندگی و ضریب همبستگی برای ANFIS-GA 1 to 11 در حالت آزمون قابل مشاهده می‌باشد. در بین کلیه مدل‌های ANFIS-GA، ANFIS-GA(1) دارای بیشترین مقدار همبستگی و کمترین مقدار خطا است. ۱۰۰٪ نتایج شبیه‌سازی شده توسط این مدل دارای خطایی کمتر از ۴٪ هستند. مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای این مدل به‌ترتیب مساوی ۰/۲۴۴ و ۰/۰۰۲ می‌باشد.

تابعی از B/L و Y_m/L مدل‌سازی می‌کند. تاثیرات W/L و F_r برای ANFIS(7) در نظر گرفته نشده است. ANFIS(7) حدوداً ۷۲٪ داده‌ها را با خطایی کمتر از ۲٪ مدل‌سازی نموده است. همچنین تقریباً ۹۷٪ نتایج ANFIS(7) خطایی کمتر از ۶٪ دارند. برای این مدل، مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ به‌ترتیب مساوی ۱/۶۴۰ و ۰/۰۱۴ بدست آمده است. برای ANFIS(8) مقدار ضریب همبستگی مساوی ۰/۸۳۶ می‌باشد. این مدل مقدار ضریب دبی را بر حسب نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی (B/L) و عدد فرود (F_r) مدل‌سازی می‌کند. مقادیر SI برای این مدل مساوی ۰/۰۲۳ محاسبه گردیده است. برای ANFIS(8) حدوداً ۶۷٪ نتایج مدل‌سازی‌ها دارای خطایی کمتر از ۲٪ می‌باشند. در مقابل تقریباً ۹۷٪ داده‌های شبیه‌سازی شده توسط این مدل خطایی کمتر از ۶٪ دارند. ANFIS(9) مقادیر ضریب دبی را به‌عنوان تابعی از W/L و Y_m/L در نظر می‌گیرد و تاثیر نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی و عدد فرود جریان را نادیده می‌گیرد. برای این مدل ۹۴٪ شبیه‌سازی‌ها مقدار خطایی کمتر از ۴٪ دارند. شاخص‌های آماری $RMSE$ ، SI و R برای ANFIS(9) به‌ترتیب مساوی ۱/۴۰۰، ۰/۰۲۰ و ۰/۸۷۵ محاسبه گردیده است. در بین مدل‌های با دو پارامتر ورودی، ANFIS(9) دارای بیشترین دقت می‌باشد. تقریباً ۵۰٪ نتایج ANFIS(10) خطایی کمتر از ۲٪ دارند و در مقابل حدوداً ۸۸٪ نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده توسط این مدل دارای مقدار خطایی کمتر از ۴٪ می‌باشند. این مدل مقدار ضریب دبی را بر حسب نسبت ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی به طول روزنه جانبی (W/L) و عدد فرود جریان (F_r) تخمین می‌زند. مقادیر $MAPE$ ، $RMSE$ و ضریب همبستگی به‌ترتیب برابر ۲/۲۳۱، ۰/۰۱۶ و ۰/۸۲۷ بدست آمده است. علاوه بر این، ANFIS(11) ضریب دبی را با ترکیبی از دو پارامتر ورودی نسبت عمق جریان در کانال اصلی به طول روزنه جانبی و عدد فرود جریان مدل‌سازی می‌کند. مقادیر شاخص پراکندگی و ضریب همبستگی برای این مدل به‌ترتیب برابر ۰/۰۲۷ و

مدل‌سازی‌های دارای خطایی کمتر از ۲٪ هستند. شاخص R برای ANFIS-GA(7) مساوی ۰/۸۷۶ محاسبه گردیده است. برای ANFIS-GA(8) تقریباً ۹۶٪ نتایج خطایی کمتر از ۴٪ دارند. همچنین ۷۶٪ داده‌های مدل‌سازی شده توسط ANFIS-GA(8) خطایی کمتر از ۲٪ دارند. مقدار ضریب همبستگی و شاخص پراکنندگی برای این مدل به ترتیب مساوی ۰/۹۰۳ و ۰/۰۱۸ است. همچنین مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای ANFIS-GA(8) به ترتیب برابر ۱/۳۵۰ و ۰/۰۱۱ محاسبه گردیده است. حدوداً ۸۹٪ نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده توسط ANFIS-GA(9) دارای خطایی کمتر از ۲٪ هستند. در مقابل شاخص‌های $MAPE$ و R برای این مدل به ترتیب مساوی ۰/۹۵۹ و ۰/۹۲۴ بدست آمده است. در بین مدل‌های ANFIS-GA با دو پارامتر ورودی، ANFIS-GA(10) دارای بیشترین دقت است. مقدار ضریب همبستگی برای این مدل مساوی ۰/۹۴۷ می‌باشد. همچنین تقریباً ۸۱٪ نتایج این مدل درصد خطایی کمتر از ۲٪ دارند. این در حالی است که مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای ANFIS-GA(10) به ترتیب برابر ۰/۹۳۶ و ۰/۰۰۸ محاسبه شده است. تقریباً ۶۶٪ نتایج ANFIS-GA(11) دارای خطایی کمتر از ۲٪ هستند و حدوداً ۹۳٪ مقادیر ضریب دبی مدل‌سازی شده توسط این مدل دارای خطایی کمتر از ۴٪ می‌باشند. برای ANFIS-GA(11) مقدار شاخص‌های $RMSE$ و شاخص پراکنندگی به ترتیب مساوی ۰/۰۱۳ و ۰/۰۲۱ محاسبه گردیده است. بنابراین با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های ANFIS-GA، مشاهده می‌شود که ANFIS-GA(1) دارای بیشترین دقت و کمترین مقدار خطا می‌باشد.



از طرف دیگر شاخص پراکنندگی برای ANFIS-GA(1) برابر ۰/۰۰۴ و ضریب همبستگی نیز مساوی ۰/۹۹۶ می‌باشد. برای ANFIS-GA(2) تقریباً ۹۶٪ نتایج خطایی کمتر از ۲٪ دارند و در مقابل، ۱۰۰٪ داده‌ها درصد خطایی کمتر از ۱۰٪ به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مقدار شاخص‌های آماری $RMSE$ و R برای این مدل به ترتیب مساوی ۰/۰۰۷ و ۰/۹۵۹ بدست آمده است. در بین مدل‌های با سه پارامتر ورودی ANFIS-GA(3) دارای کمترین مقدار $RMSE$ و بیشترین مقدار ضریب همبستگی می‌باشد ($R=0.984$, $RMSE=0.004$). مقدار شاخص پراکنندگی برای این مدل مساوی ۰/۰۰۷ محاسبه گردیده است. همچنین برای ANFIS-GA(3) حدوداً ۹۸٪ نتایج مدل‌سازی‌ها دارای درصد خطایی کمتر از ۲٪ می‌باشند. تقریباً ۸۳٪ مدل‌سازی‌ها توسط ANFIS-GA(4) درصد خطایی کمتر از ۲٪ به خود اختصاص داده‌اند. این در حالی است که برای این مدل مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ به ترتیب برابر ۱/۰۸۰ و ۰/۰۰۹ محاسبه شده است. همچنین مقدار R برای ANFIS-GA(4) مساوی ۰/۹۳۴ و شاخص آماری SI برابر ۰/۰۱۵ بدست آمده است. بنابراین ANFIS-GA(4) دارای کمترین دقت در بین مدل‌های با سه پارامتر ورودی می‌باشد. برای ANFIS-GA(5) مقادیر ضریب همبستگی و $RMSE$ به ترتیب برابر ۰/۹۸۳ و ۰/۰۰۵ محاسبه گردیده است. برای این مدل حدوداً ۹۷٪ داده‌ها دارای خطایی کمتر از ۲٪ هستند. همچنین برای این مدل مقادیر $MAPE$ و SI به ترتیب برابر ۰/۵۳۷ و ۰/۰۰۸ است. حدوداً ۷۹٪ نتایج ANFIS-GA(6) دارای خطایی کمتر از ۲٪ دارند و در مقابل تقریباً ۹۷٪ ضریب دبی‌های مدل‌سازی شده توسط این مدل درصد خطایی کمتر از ۶ به خود اختصاص داده‌اند. مقدار شاخص پراکنندگی برای این مدل برابر ۰/۰۲۱ محاسبه شده است. این در حالی است که شاخص آماری R برای این مدل مساوی ۰/۸۶۱ می‌باشد. مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای ANFIS-GA(7) به ترتیب ۱/۴۶۸ و ۰/۰۱۲ مدل‌سازی شده است. برای این مدل حدوداً ۷۳٪ نتایج



شکل ۶- مقایسه (a) $MAPE$ (b) $RMSE$ (c) شاخص پراکندگی (e) ضریب همبستگی برای مدل‌های مختلف ANFIS-GA در حالت آزمون.

شکل ۷- تغییرات ضریب دبی مدل‌سازی شده توسط مدل CFD در برابر (a) Y_m/L (b) Fr (c) ضریب دبی آزمایشگاهی.

جدول ۵- مقادیر $MAPE$ $RMSE$ SI و R برای مدل CFD در تخمین ضریب دبی روزنه جانبی.

$MAPE$	$RMSE$	SI	R
۱۱/۷۱۷	۰/۰۹۳	۰/۱۴۴	۰/۵۵۱

در ادامه نتایج مدل CFD در تخمین ضریب دبی روزنه جانبی مستطیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۷) تغییرات پارامترهای هیدرولیکی نسبت عمق جریان در کانال اصلی به طول روزنه جانبی (Y_m/L) و عدد فرود (Fr) بر روی ضریب دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل CFD مورد بررسی قرار گرفته است. برای محاسبه ضریب دبی مدل CFD از رابطه (۲) استفاده شده است. شاخص‌های آماری محاسبه شده برای ضریب دبی مدل CFD در جدول (۵) مرتب شده است. مقادیر $RMSE$ و شاخص پراکندگی برای مدل CFD به ترتیب مساوی ۰/۰۹۳ و ۰/۱۴۴ محاسبه شده است. برای مدل CFD مقدار $MAPE$ برابر ۱۱/۷۱۷ بدست آمده و شاخص ضریب همبستگی مساوی ۰/۵۵۱ است.

بنابراین بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های عددی ANFIS، ANFIS-GA، ANFIS-GA(1) و CFD، مدل ANFIS-GA(1) به عنوان مدل برتر در تخمین ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی معرفی می‌شود. این مدل برتری قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با سایر مدل‌های معرفی شده دارد.

نتیجه‌گیری کلی

مدل CFD محاسبه شد. مقادیر $MAPE$ و $RMSE$ برای مدل CFD به ترتیب مساوی ۱۱/۷۱۷ و ۰/۰۹۳ محاسبه شد. با مقایسه نتایج مدل CFD با مدل‌های برتر ANFIS و ANFIS-GA، مشاهده شد که مدل ANFIS-GA ضریب دبی روزنه جانبی مستطیلی را با دقت بسیار بالایی تخمین زد. این مدل مقادیر ضریب دبی را بر حسب نسبت عرض کانال اصلی به طول روزنه جانبی (B/L)، نسبت ارتفاع روزنه جانبی از بستر کانال اصلی به طول روزنه جانبی (W/L)، نسبت عمق جریان درون کانال اصلی به طول روزنه جانبی (Y_m/L) و عدد فرود (F_r) مدل‌سازی کرد.

در این مطالعه ضریب دبی روزنه‌های جانبی مستطیلی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، مدل ANFIS و روش هیبریدی ANFIS-GA مدل‌سازی شد. با توجه به پارامترهای موثر بر ضریب دبی روزنه جانبی، یازده مدل مختلف برای مدل‌های ANFIS و ANFIS-GA ارائه شد. بعد از تجزیه و تحلیل نتایج محاسبات نرم، مدل‌های برتر برای هر یک از مدل‌های ANFIS و ANFIS-GA معرفی شد. مقدار ضریب همبستگی برای مدل برتر ANFIS و ANFIS-GA به ترتیب مساوی ۰/۹۵۰ و ۰/۹۹۶ بدست آمد. همچنین در ادامه، دبی خروجی از روزنه جانبی با استفاده از مدل عددی FLOW-3D شبیه‌سازی شد. مدل CFD مقدار دبی روزنه جانبی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کرد. سپس ضریب دبی با استفاده از نتایج

منابع مورد استفاده

- Azimi H, Hadad H, Shokati Z and Salimi MS, 2015. Discharge and flow field of the circular channel along the side weir. Canadian Journal of Civil Engineering 42(4): 273-280.
- Azimi H and Shabanlou S, 2015. The flow pattern in triangular channels along the side weir for subcritical flow regime. Flow Measurement and Instrumentation 46: 170-178.
- Azimi H, Shabanlou S. 2016. Numerical simulation of free surface and flow field in circular channels along the side weirs in subcritical conditions. Water and Soil Science- University of Tabriz 26(1/1): 225-238.
- Azimi H, Shabanlou S. 2017. Numerical study of the effects of bed slope change of circular channels in supercritical conditions along the side weirs. Water and Soil Science- University of Tabriz 27(3): 53-64.
- Azimi H, Shabanlou S, Ebtehaj I and Bonakdari H, 2016. Discharge coefficient of rectangular side weirs on circular channels. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation 17(7-8): 391-399.
- Carballada BL, 1978. Some characteristics of lateral flows. PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Ebtehaj I, Bonakdari H, Khoshbin F and Azimi H. 2015a. 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.
- Ebtehaj I, Bonakdari H, Zaji AH, Azimi H and Khoshbin F, 2015b. GMDH-type neural network approach for modeling the discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs. Engineering Science and Technology, an International Journal 18(4): 746-757.
- Eghbalzadeh A, Javan M, Hayati M and Amini A, 2016. Discharge prediction of circular and rectangular side orifices using artificial neural networks. KSCE Journal of Civil Engineering 20(2): 990-996.
- Ghodsian M, 2003. Flow through side sluice gate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE 129(6): 458-462.
- Hashid M, Hussain A and Ahmad Z, 2015. Discharge characteristics of lateral circular intakes in open channel flow. Flow Measurement and Instrumentation 46: 87-92.
- Hussein A, Ahmad Z and Ojha CSP, 2014. Analysis of flow through lateral rectangular orifices in open channels. Flow Measurement and Instrumentation 36: 32-35.
- Holland JH, 1975. Adaptation in natural and artificial system. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Hussein A, Ahmad Z and Asawa GL, 2010. Discharge characteristics of sharp-crested circular side orifices in open channels. Flow Measurement and Instrumentation 21(3): 418-424.
- Hussein A, Ahmad Z and Asawa GL, 2011. Flow through sharp-crested rectangular side orifices under free flow condition in open channels. Agricultural Water Management 98: 1536-1544.
- Jang JSR, 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Trans. on 23(3): 665-685.
- Ojha CSP and Subbaiah D, 1997. Analysis of flow through lateral slot. Irrigation and Drainage Engineering ASCE 123(5): 402-405.

- Ramamurthy AS, Udoyara ST and Serraf S, 1986. Rectangular lateral orifices in open channel. Journal of Environmental Engineering ASCE 135(5): 292-298.
- Ramamurthy AS, Udoyara ST and Rao MVJ, 1987. Weir orifice units for uniform flow distribution. Journal of Environmental Engineering ASCE 113(1): 155-166.