



Technical Note

یادداشت فنی

Prediction of Discharge Coefficient for Broad and Sharp Crested Weirs by Fuzzy Inference System and Neural Fuzzy Inference System

پیش‌بینی ضریب دبی در سرریز لبه پهن و لبه تیز با بهره‌گیری از سامانه استنتاج فازی و فازی-عصبی تطبیقی

Y. Mehri^{1*}, N. Abbasi² and H. Arvanaghi³یاسر مه‌ری^{۱*}، نادر عباسی^۲ و هادی ارونقی^۳

Abstract

Sharp and broad crested weirs are the most commonly used tools for measuring the flow in irrigation and drainage networks. Considering the importance of exact calculation of discharge and the just allocation of water, estimating the discharge coefficient for the weirs is so essential and important. In this research, application and reliability of two intelligent models of fuzzy inference system and ANFIS models were studied for estimation of the rectangular sharp-crested and broad crest weir discharge coefficient. For this purpose, a laboratory flume was used to determine the flow velocity and flow rate over different weirs. Then, analytical evaluations were made using optimization models for determination of weirs' discharge coefficients. Statistical analysis of the results showed that ANFIS model with the least amount of RMSE and $R^2 = 0.96$ for sharp-crested and $R^2 = 0.95$ for broad-crested weirs is the most reliable method in comparison to the others.

Keywords: Intelligent Techniques, Physical Model, ANFIS, Fuzzy logic.

Received: August 20, 2016

Accepted: November 30, 2016

چکیده

سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن از متداول‌ترین ابزارها برای اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به شمار می‌روند. با توجه به اهمیت محاسبه دقیق مقدار دبی عبوری از روی این سرریزها و نیل به اهداف توزیع عادلانه آب، برآورد صحیح ضریب دبی، بسیار مهم است. در این پژوهش با انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی، کاربرد دو مدل سامانه استنتاج فازی و مدل فازی-عصبی تطبیقی در برآورد ضریب دبی سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن مستطیلی بررسی شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی، آزمایش‌ها بر روی سرریزها انجام شد. سپس توانایی مدل‌های سامانه استنتاج فازی و فازی-عصبی تطبیقی بهینه شده با الگوریتم تکرار شونده در پیش‌بینی ضریب دبی بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص گردید. با توجه به تحلیل‌های آماری انجام شده، مدل هوشمند استنتاج فازی-عصبی به علت دارا بودن کمترین خطا با $RMSE=0.042$ و $R^2=0.96$ برای برآورد ضریب دبی سرریز لبه‌تیز و با $RMSE=0.044$ و $R^2=0.95$ برای ضریب دبی در سرریز لبه‌پهن به عنوان مناسب‌ترین روش جهت برآورد ضریب دبی سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن معرفی شد.

کلمات کلیدی: مدل‌های هوشمند، مدل فیزیکی، مدل استنتاج فازی-عصبی، منطق فازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۹/۱۰

1- M.Sc. Student, Irrigation and Drainage Engineering Department, Abouraihan Campus, University of Tehran, Iran. Email: Yaser.mehri@ut.ac.ir

2- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3- Associate Professor, water Engineering Department, Tabriz University, Iran

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۲- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان اسفند ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

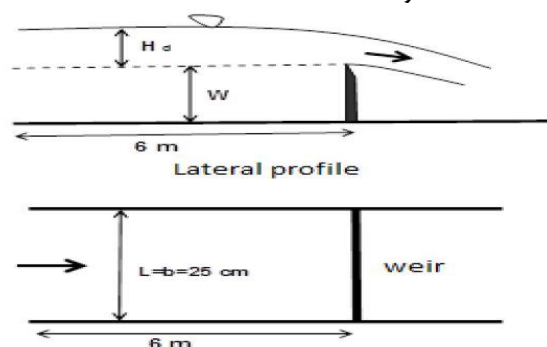
داد. (2016) Parsaie دقت شبکه عصبی مصنوعی را در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریز جانبی لبه‌تیز مستطیلی مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که دقت شبکه عصبی دارای مقدار مناسبی است. همچنین (2012) Dursun et al. از سامانه استنتاج فازی-عصبی برای پیش‌بینی ضریب دبی سرریز جانبی استفاده نمودند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی با دیوار شیشه‌ای به طول ۱۰، عرض ۰/۲۵ و ارتفاع ۰/۵ متر واقع در گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. همچنین، جهت تکمیل آزمایش‌ها از داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع (Salmasi et al., 2013) استفاده شده است. در این تحقیق از دو مدل سامانه استنتاج فازی و فازی-عصبی تطبیقی برای برآورد ضریب دبی در سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن مستطیلی استفاده و مدل‌ها در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شد. جهت مدل‌سازی و ارزیابی دقت مدل‌های نام برده برای سرریز لبه‌تیز پارامترهای ارتفاع سرریز P و ارتفاع آب روی سرریز H به عنوان پارامتر ورودی و ضریب دبی C_d به عنوان پارامتر خروجی یا هدف در نظر گرفته شد. همچنین، جهت ارزیابی دقت مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای لبه‌پهن نیز با توجه به زیاد بودن پارامترهای مؤثر از پارامترهای بدون بعد $\frac{H}{L}$ و $\frac{H}{P}$ استفاده گردید. شکل ۱ فلوم آزمایشگاهی مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد.

در این تحقیق از الگوریتم حل ممدانی در سامانه استنتاج فازی استفاده می‌شود؛ زیرا سبب ایجاد نتایج منطقی با ساختاری نسبتاً ساده می‌شود. با دقت بر داده‌های موجود و تجزیه و تحلیل آن و همچنین با توجه به مطالعات گذشته به طور کلی قوانین فازی را می‌توان به صورت جدول ۱ مشاهده نمود.



به کار بردن روش‌های مدیریتی مناسب در مصرف آب کشاورزی جهت افزایش راندمان آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک مهم و ضروری است. بنابراین یکی از جنبه‌های مهم تحقق این هدف عرضه مناسب آب در زمان و مقدار مناسب است. با توجه به نقش و اهمیت ضریب دبی در محاسبه مقدار جریان آب، تعیین و برآورد دقیق این ضریب به منظور اندازه‌گیری دقیق جریان آب و به تبع آن توزیع عادلانه آب در شبکه‌های آبیاری از اهمیت زیادی برخوردار است. (2002) Boiten رابطه‌ای تجربی با بررسی آزمایشگاهی برای برآورد ضریب دبی در سرریزهای لبه‌پهن برای یک محدوده خاص بر اساس عمق آب بالادست ارائه داد. (1994) Hager and Schwalt با انجام تعدادی از آزمایش‌ها ویژگی‌های جریان بر روی سرریز لبه‌پهن را مورد بررسی قرار دادند. (2011) Aydin et al. رابطه‌ای تجربی برای سرریزهای لبه‌تیز با فشردگی جانبی ارائه کرد. برای بررسی مقدار ضریب دبی در سرریزها با توجه به اینکه رویکرد نظری و تحلیلی مناسبی وجود ندارد و بایستی از مدل‌های آزمایشگاهی جهت بررسی ضریب دبی در شرایط مختلف هیدرولیک جریان و مشخصات هندسی سرریز استفاده گردد که زمان بر و هزینه زیادی را طلب می‌کند. بنابراین لازم است از روش‌هایی استفاده گردد که هم از لحاظ هزینه و هم از لحاظ زمان مقرون به صرفه باشند. اخیراً متناسب با توسعه و پیشرفت علم، روش‌های نوین برای حل و یا بهینه‌سازی مسائل مهندسی توسعه یافته‌اند. روش‌های هوش مصنوعی از جمله روش‌هایی هستند که ضمن کم هزینه بودن، زمان کمی نیز جهت انجام محاسبات نیاز دارند. لذا با توجه به هزینه‌بر بودن مدل‌های آزمایشگاهی و زمان زیادی که برای بررسی ضریب دبی در این شرایط صرف می‌شود، استفاده از روش‌های جایگزین^۱ می‌تواند سبب دستیابی به اهداف ذکر شده گردد. از هوش مصنوعی در علم هیدرولیک استفاده‌های زیادی شده است. (2013) Salmasi et al. دقت پیش‌بینی ضریب دبی را با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و GP در سرریزهای لبه‌پهن مورد بررسی قرار



Fig. 1- Test flume
شکل ۱- نمای کانال مورد آزمایش

Table 1- Fuzzy rules (rectangular sharp crested weir)

جدول ۱- قوانین فازی (سرریز لبه تیز مستطیلی)

H	P	Cd
Medium	Low	Medium
Low	Medium	High
High	High	Low

Table 2- Fuzzy rules (broad-crested weir)

جدول ۲- قوانین فازی (سرریز لبه پهن)

$\frac{H}{L}$	$\frac{H}{P}$	Cd
High	High	High
Low	Low	Low
Medium	Medium	Medium

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برآورد ضریب دبی با استفاده از سامانه استنتاج فازی

با انجام مدل سازی توسط الگوریتم تکرار شونده در سامانه استنتاج فازی جدول بهینه شده ۳ و ۴ به ترتیب برای سرریزهای لبه تیز و لبه پهن ارائه می شود. در این الگوریتم توابع عضویت با گام های ۰/۰۰۱ آن قدر جا به جا می شوند تا بهینه ترین مقدار برای توابع عضویت استخراج شود و از روش مرکز جرم برای غیرفازی کردن استفاده می شود. مقادیر بهینه سبب ایجاد کمترین خطا در برآورد ضریب دبی برای هر دو نوع سرریز لبه تیز و لبه پهن شده است. الگوریتم تکرار شونده با هدف بهتر شدن آموزش انجام شد. این الگوریتم سبب بهتر شدن آموزش و در نهایت دقیق تر شدن تعیین مقدار مرکز و واریانس توابع عضویت شده است. همچنین نحوه ارتباط پارامترهای ورودی جهت مدل سازی که شامل پارامترهای $\frac{H}{L}$ و $\frac{H}{P}$ با ضریب دبی در شکل ۲ قابل مشاهده است. در این شکل مشاهده می شود که رابطه بین داده های ورودی و خروجی ایجاد شده در سامانه استنتاج فازی به شکل رویه ای است که در فضای سه بعدی تشکیل شده است.

در این تحقیق پارامترهای ورودی در سه متغیر توصیفی کم، متوسط و زیاد برای ارتفاع سرریز و سه متغیر توصیفی مشابه برای عمق آب بر روی سرریز برقرار شد. همچنین با توجه به اینکه تابع عضویت گوسی، شکلی نرم و به دو پارامتر واریانس و میانگین وابسته است از تابع عضویت گوسی استفاده گردید. برای سرریز لبه پهن نیز مشابه سرریز لبه تیز مراحل یاد شده انجام می شود.

در روش فازی- عصبی با استفاده از توانایی یادگیری شبکه عصبی، مشکل اصلی سامانه استنتاج فازی که تعیین توابع عضویت و بهینه سازی آن است، حل می شود (Jang et al., 1997). این ورودی ها از ۵ لایه عبور کرده و پارامترهای ورودی در توابع عضویت طی فرآیند یادگیری تغییر می کنند. از مدل استنتاج فازی عصبی با الگوریتم نوع سوگینو^۲ برای این تحقیق استفاده شد. ساختار مدل فازی- عصبی دارای پنج لایه است که هر کدام از لایه ها به ترتیب شامل گره های ورودی، گره های قاعده، گره های متوسط، گره های نتیجه و گره های خروجی می باشند. هر گره دارای تابعی با پارامترهای قابل تنظیم یا ثابت است (Kisi et al., 2009).

Table 3- Optimal Membership functions (sharp crested weir)

جدول ۳- مقادیر بهینه شده توابع عضویت (سرریز لبه تیز)

Variable	Membership functions	μ	σ
P	Low	0.0594	0.263
	Medium	0.39	0.206
	High	0.912	0.289
H	Low	0.0936	0.137
	Medium	0.408	0.170
	High	0.530	0.172
Cd	Low	0.118	0.145
	Medium	0.140	0.134
	High	0.644	0.230

Table 4- Optimal Membership functions (broad crested weir)
جدول ۴- مقادیر بهینه توابع عضویت (سرریز لبه پهن)

Variable	Membership functions	μ	σ
$\frac{H}{P}$	Low	0.089	0.161
	Medium	0.329	0.177
	High	0.946	0.260
$\frac{H}{L}$	Low	0.079	0.175
	Medium	0.321	0.166
	High	0.890	0.256
Cd	Low	0.263	0.253
	Medium	0.802	0.098
	High	0.985	0.124

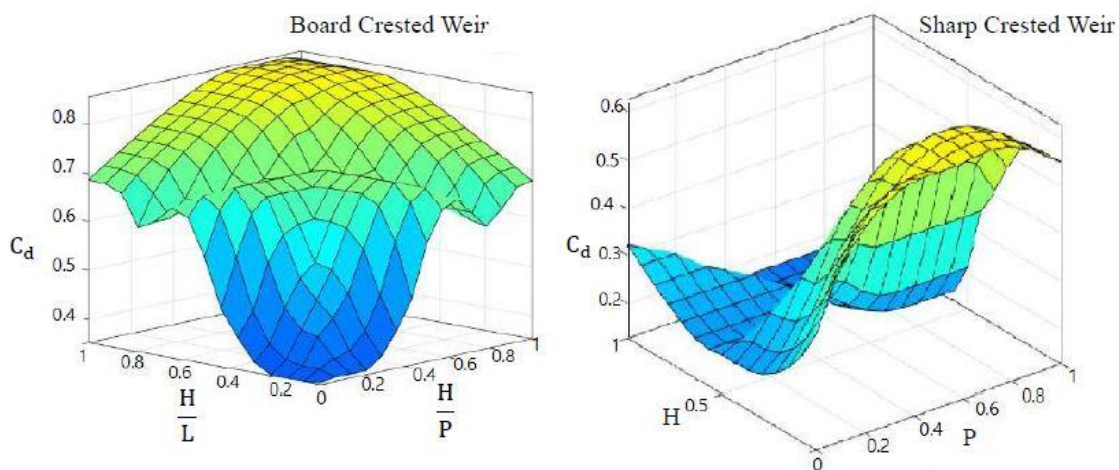


Fig. 2- The relationship between inputs and outputs in Fuzzy Inference System
شکل ۲- رابطه‌ی بین ورودی‌ها و خروجی در سامانه استنتاج فازی

می‌دهد. به طوری که مقدار تکرار برای سرریز لبه‌تیز مقدار ۱۰ و برای سرریز لبه‌پهن مقدار ۲۰ انتخاب گشت. انتخاب تکرارهای بهینه در نهایت به کمتر شدن محاسبات و یادگیری بهتر نرون‌ها منجر گردیده است.

در نهایت با مدلسازی توسط مدل فازی عصبی تطبیقی با توجه به شکل ۵ می‌توان نحوه پراکنش داده‌های ورودی و داده‌های پیش‌بینی شده را مشاهده نمود. همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، نقطه‌های توخالی داده‌های واقعی و نقطه‌های توپر داده‌های پیش‌بینی شده مدل فازی عصبی هستند.

۳-۳- مقایسه کارایی و عملکرد مدل‌ها

پس از محاسبه ضریب دبی بر اساس مدل‌های مختلف نتایج حاصل از آنها با استفاده از شاخص‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفت. جدول

۲-۳- برآورد ضریب دبی با استفاده از مدل فازی- عصبی تطبیقی

الگوریتم تکرار شونده در این مدل با هدف بهتر شدن یادگیری نرون‌ها انجام شد. در این الگوریتم توابع عضویت در هر گره در لایه دوم بهینه می‌شوند. با توجه به شکل ۳ می‌توان نشان داد که مقدار خطا با استفاده از الگوریتم تکرار شونده در داده‌های آموزش کاهش یافته و به کمترین مقدار خود رسیده است. همانطور که مشخص است جهت سریع‌تر شدن محاسبات برای پیش‌بینی هرچقدر تعداد تکرارها در محاسبات کمتر شود حجم محاسبات کمتر می‌شود، بنابراین با مشاهده شکل ۳ مقدار بهینه تکرارها جهت بهینه‌سازی تعداد نرون‌ها برای هر یک از سرریزها تعیین شد به گونه‌ای که در سرریزها تعداد تکرارها بهینه برای مقدار خطای بهینه در مرحله آموزش را برای سرریز لبه‌تیز ۵ تکرار و برای سرریز لبه‌پهن ۱۰ تکرار انتخاب شد. همچنین شکل ۴ تعداد تکرار بهینه برای بهینه کردن مقدار خطای پیش‌بینی داده‌های آزمون را نشان

۴- نتیجه گیری

بهینه‌سازی با الگوریتم تکرار شونده برای سامانه استنتاج فازی مفید بوده و سبب کاهش خطای پیش‌بینی شده می‌شود. اما یافتن قوانین فازی یکی از دشوارترین کارها در مباحث این چینی است؛ زیرا علاوه بر اینکه برای پیدا کردن روابط نیاز به انجام آزمایشات مربوط می‌باشد نیاز به یک فرد با مهارت در آن مبحث نیز هست تا بتواند تعیین توابع عضویت و قوانین فازی بر عهده داشته باشد. مدل فازی - عصبی مدل کارآمدتری برای برآورد ضریب دبی در هردو سرریز نسبت به سه مدل رگرسیون غیرخطی و سامانه استنتاج فازی و همچنین شبکه عصبی است.

۶ و ۷ عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق را به ترتیب برای سرریز لبه تیز و لبه پهن نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار خطای سامانه استنتاج فازی عصبی برابر با $RMSE=0.042$ و $R^2=0.96$ برای سرریز لبه تیز و $RMSE=0.044$ و $R^2=0.95$ برای سرریز لبه پهن است.

با توجه به اینکه مدل فازی-عصبی دارای دقت بهتری نسبت به مدل دیگر است آنالیز حساسیت بر روی این مدل بررسی شد که نتیجه این بررسی را می‌توان در جدول ۸ مشاهده نمود.

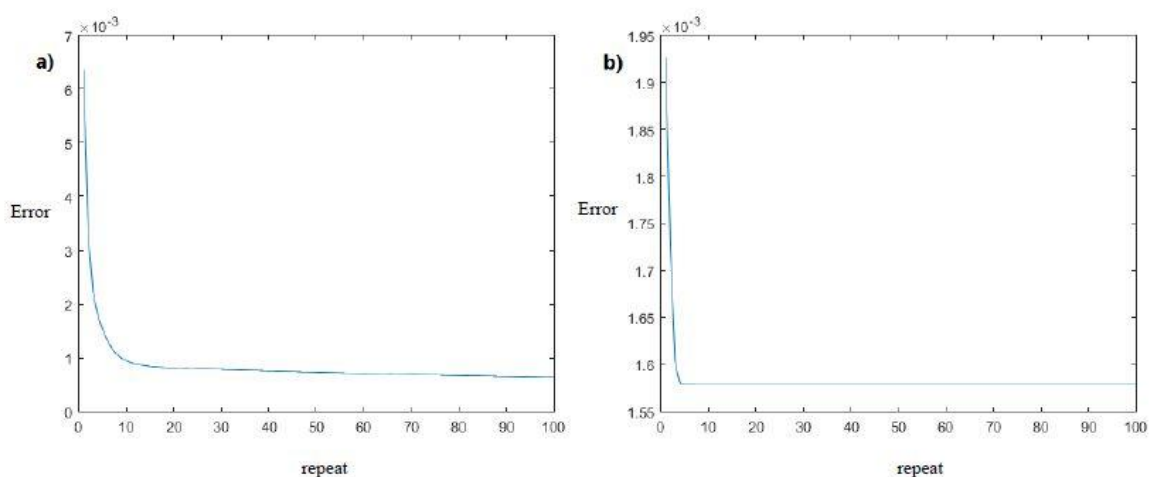


Fig. 3- Number of optimal trial and error iterations in train stage; (a) Broad crested weir. (b) Sharp crested weir

شکل ۳- تعداد تکرارهای بهینه در آموزش (الف: سرریز لبه پهن و ب: سرریز لبه تیز)

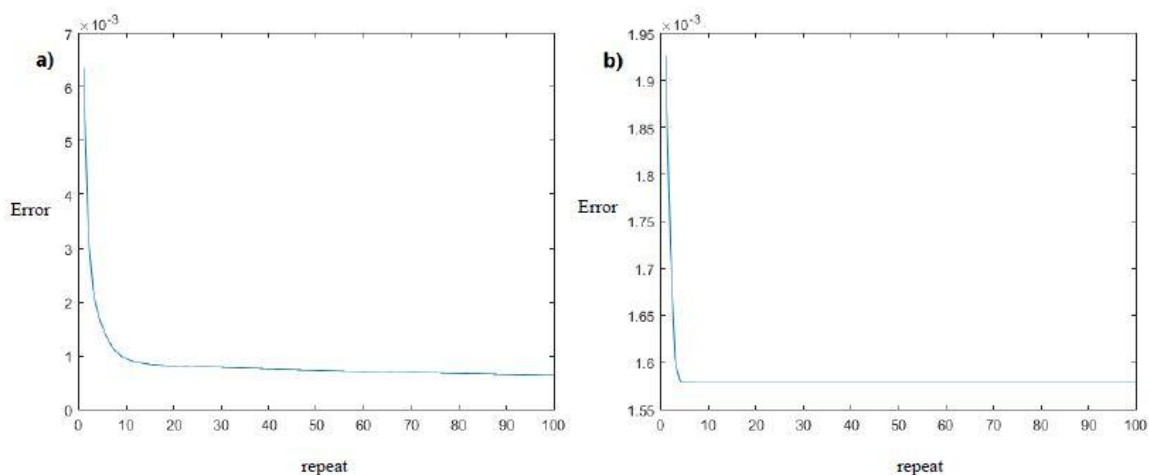


Fig. 4- Number of optimal trial and error iterations in test stage; (a) Broad crested weir. (b) Sharp crested weir

شکل ۴- تعداد تکرارهای بهینه در آزمون (الف: سرریز لبه پهن و ب: سرریز لبه تیز)

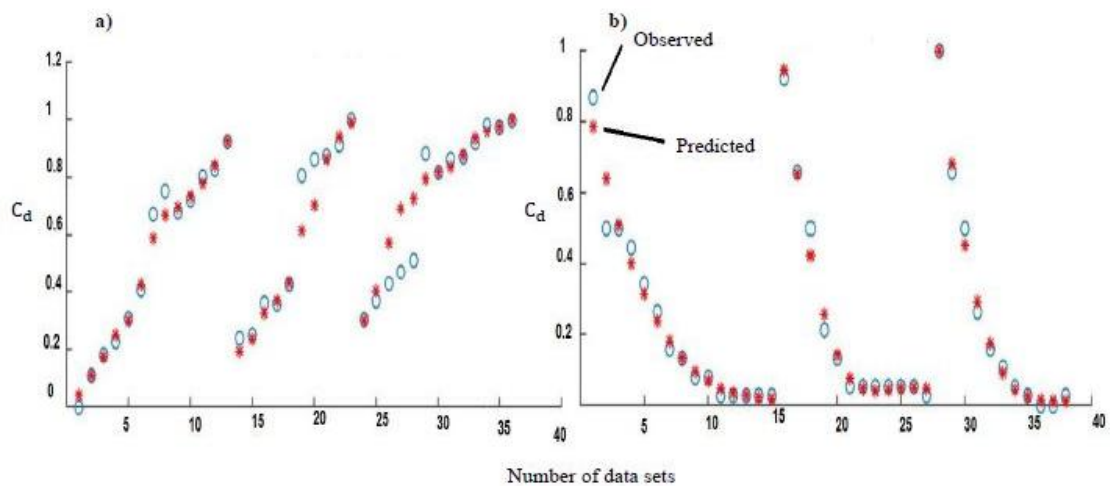


Fig. 5- The relationship between observed and predicted values using discharge coefficient yield in ANFIS model. (a) Broad crested weir (b) Sharp crested weir

شکل ۵- رابطه بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده در مدل فازی-عصبی برای ضریب دبی (الف سرریز لبه پهن و ب سرریز لبه تیز)

Table 6- Model Comparison (Sharp crested weir)

جدول ۶- مقایسه بین مدل‌ها (سرریز لبه تیز)

Model	RMSE	R ²
Fuzzy Inference System	0.211	0.510
Neural Fuzzy Inference System	0.042	0.960
Rebok (1920)	0.160	0.621

Table 7- Model Comparison (Broad crested weir)

جدول ۷- مقایسه بین مدل‌ها (سرریز لبه پهن)

Model	RMSE	R ²
Fuzzy Inference System	0.151	0.504
Neural Fuzzy Inference System	0.044	0.947
Salmasi (2013)	0.065	0.942

Table 8- Sensitivity analysis results for the inputs in ANFIS model

جدول ۸- نتایج آنالیز حساسیت متغیرهای ورودی در مدل فازی-عصبی

Neural Fuzzy Inference System	Sharp crested weir		Board crested weir	
	f (H)	f (P)	f ($\frac{H}{P}$)	f ($\frac{H}{L}$)
Sensitivity analysis				
RMSE	0.094	0.26	0.162	0.11
R ²	0.82	0.18	0.43	0.72

می‌شود با شبیه‌سازی هیدرودینامیک این دو سرریز ویژگی‌های جریان بیشتر مورد بحث و مطالعه قرار گیرد.

به گونه‌ای که با تلفیق دو مدل استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی نواقص هر دو مدل رفع شده و مدل کارآمدتری معرفی شد. پیشنهاد می‌شود برای برآورد ضریب دبی در سرریزهای لبه تیز و لبه پهن از مدل فازی-عصبی با توجه به میزان خطای کمتر و مقدار ضریب همبستگی بیشتر به جای سه مدل ذکر شده استفاده گردد. همچنین پیشنهاد

پی‌نوشت‌ها

- 1- Alternative methods
- 2- Sugeno

- Jang J, Sun C, Mizutani E (1997) Neuro-fuzzy and soft computing. Journal of a computational approach to learning and machine intelligence, 42(10):1482-1484
- Kisi O, Haktanir T, Ardiclioglu M, Ozturk O, Yalcin E, Uludag S (2009) Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. Advances in Engineering Software, 40(6):438-444
- Parsaie A (2016) Predictive modeling the side weir discharge coefficient using neural network. Journal of Modeling Earth Systems and Environment, 2(2): 1-11
- Salmasi F, Yıldırım G, Masoodi A, Parsamehr P (2013) Predicting discharge coefficient of compound broad-crested weir by using genetic programming (GP) and artificial neural network (ANN) techniques. Arabian Journal of Geosciences, 6(7):2709-2717
- Aydin I, Altan-Sakarya A, Sisman C (2011) Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. Journal of Flow Measurement and Instrumentation, 22(2): 144-151
- Boiten W (2002) Flow measurement structures. Journal of Flow Measurement and Instrumentation, 13(5): 203-207
- Dursun O, Kaya N, Firat M (2012) Estimating discharge coefficient of semi-elliptical side weir using ANFIS. Journal of Hydrology, 426:55-62
- Kisi O, Haktanir T, Ardiclioglu M, Ozturk O, Yalcin E, Uludag S (2009) Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. Advances in Engineering Software, 40(6):438-444
- Hager W, Schwalt M (1994) Broad-crested weir. Journal of irrigation and drainage engineering, 120(1):13-26