

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هفت، مهر ماه ۹۸

ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS در تخمین جریان ورودی به سد

رئیس‌علی دلواری

علی اسکندری*^۱

alieskandari.eskandari@gmail.com

روح‌اله نوری^۲

محمدرضا وصالی ناصح^۳

فریمه سعیدی^۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۲۰

چکیده

زمینه و هدف: اطلاع دقیق از کمیت آب جاری در رودخانه‌ها تاثیر فراوان بر مدیریت کمی و کیفی منابع آب در جوامع وابسته با آن دارد. در این راستا هدف تحقیق حاضر ارزیابی عدم قطعیت در فرآیند تخمین جریان رودخانه شاپور، ورودی به سد رئیس‌علی دلواری، واقع در استان بوشهر می‌باشد.

روش بررسی: برای تخمین جریان ماهانه ورودی به سد رئیس‌علی دلواری از مدل‌های هوش مصنوعی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج نروفازی تطبیقی (ANFIS) استفاده گردید. همچنین به منظور بهبود استفاده از نتایج این مدل‌ها در تصمیمات مدیریتی در بخش آب، تعیین عدم قطعیت هر یک از آن‌ها در فرآیند مدل‌سازی جریان انجام شد. در این راستا از نتایج شبیه‌سازی شده در اجرای هر مدل تحت الگوهای متفاوتی از داده‌های واسنجی، استفاده و برای ارزیابی عدم قطعیت هر مدل نیز از دو شاخص عرض محدوده اطمینان (d -factor) و ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها واقع شده در این محدوده (95PPU) استفاده گردید.

یافته‌ها: مطابق نتایج به دست آمده از مدل‌های ANN و ANFIS بهینه اجرا شده، مشخص گردید که اگر چه مقادیر آماره‌های ضریب تعیین (R^2) و قدرمطلق میانگین خطاها (MAE) برای هر دو مدل از مقادیر مناسبی برخوردار بودند، اما عملکرد آن‌ها در برخی نقاط با دبی بالا با خطای قابل توجهی همراه بود. همچنین با بررسی نتایج عدم قطعیت مدل‌ها مشخص شد مدل ANFIS با مقدار d -factor کم‌تر و مقدار شاخص 95PPU بزرگ‌تر، از عدم قطعیت کم‌تری نسبت به مدل ANN برخوردار بود.

۱- مربی مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران* (مسئول مکاتبات)

۲- استادیار مهندسی محیط‌زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار مهندسی محیط‌زیست، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۴- کارشناس مهندسی محیط‌زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

بحث و نتیجه‌گیری: با توجه به عملکرد تقریباً یکسان هر دو مدل ANN و ANFIS در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، می‌توان مدل ANFIS را به عنوان مدل بهینه تخمین جریان ماهانه ورودی به سد رئیس‌علی دلواری به دلیل دارا بودن عدم قطعیت کمتر پیشنهاد نمود.

واژه‌های کلیدی: تخمین جریان، تحلیل عدم قطعیت، رودخانه شاپور، سد رئیس‌علی دلواری

Uncertainty Evaluation of ANN and ANFIS Models in Inflow Forecasting into the Raees-Ali Delvari Dam

Ali Eskandari^{1*}

alieskandari.eskandari@gmail.com

Roohollah Noori²

Mohammad Reza Vesali Naseh³

Farimah Saeedi⁴

Accepted:2016.10.31

Received:2016.04.08

Abstract

Background and Objective: Accurate information about the river flow significantly influences the water resources management for the communities that use the water. In this regard, this study aims to present a reliable prediction of the monthly discharge of Shahpour River, inflow to Raees-Ali Delvari Dam, located in the Boushehr Province, Iran.

Methods: To forecast the monthly inflow to Raees-Ali Delvari Dam, the artificial intelligence models, i.e. artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), were applied. Also, uncertainty determination of the both models was carried out in order to improve the application of their results in the management decisions in the water sector. In this regard, the simulated results of the models, tuned with the different pattern of calibration data, were used. Two indices, i.e. the width of confidence band (*d*-factor) and the values bracketed by 95 percent prediction uncertainties (95PPU) were applied in order to evaluate the models' uncertainty.

Findings: Results of tuned ANN and ANFIS models indicated that although the both models had the appropriate values of determination coefficient (R^2) and mean absolute error (MAE), their performance was along with considerable errors in the high extreme values. Besides, a look at through the uncertainty results of the models indicated the ANFIS model, that included the less *d*-factor and higher 95PPU values, had less uncertainty than the ANN.

Discussion and Conclusion: Considering the same performance of the both ANN and ANFIS models in the calibration and test steps, it can be concluded that the ANFIS model was the best selection for monthly inflow prediction into Raees-Ali Delvari Dam due to its less uncertainty than ANN model.

Keywords: Inflow Forecasting, Uncertainty Analysis, Shahpour River, Raees-Ali Delvari Dam

1- Lecturer in Civil and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Boushehr Branch, Islamic Azad University, Boushehr, Iran * (Corresponding Author)

2- Assistant Professor, Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Arak University, Arak, Iran

4- Staff, Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

مقدمه

از حساسیت کم‌تری نسبت به وجود خطا ناشی از اعمال نشدن برخی پارامترها برخوردار باشند، می‌تواند موثر باشد. لذا مدل‌های هوش مصنوعی که از قابلیت‌های بالایی در مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی برخوردارند، می‌توانند به عنوان گزینه‌ای مناسب برای حل مشکل ذکر شده و ارایه الگوی مناسب پیش‌بینی جریان باشند (۱-۳).

به هر حال اگرچه مدل‌های هوشمند با دقت و انعطاف‌پذیری خود، کاربرد موفقیت‌آمیزی در تخمین جریان طی چند دهه اخیر داشته‌اند، اما آن‌ها نیز مانند سایر مدل‌های هیدرولوژیکی فیزیک مبنا دارای عدم قطعیت فراوانی در تخمین جریان می‌باشند. با توجه به استفاده از خروجی مدل‌های تخمین جریان برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی منابع آب، عدم اطلاع از عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند مدل‌سازی جریان می‌تواند اثرات نامطلوب زیادی خصوصاً در مواقع سیل و خشک‌سالی به همراه داشته باشد. در این راستا اگرچه مطالعات زیادی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی فیزیک مبنا انجام شده اما سابقه تحقیق در تعیین عدم قطعیت مدل‌های هوشمند برای تخمین جریان بسیار اندک است. اولین مطالعه انجام شده برای تعیین عدم قطعیت مدل‌های هوشمند توسط مارسه^۱ و همکاران (۴) انجام شد. در تحقیق مذکور از مدل سیستم استنتاج فازی تطبیقی^۲ (ANFIS) برای تخمین مواد مغذی استفاده و در نهایت تحلیل عدم قطعیت این مدل ارایه گردید. اقیل^۳ و همکاران (۵) در تحقیقی به بررسی قابلیت مدل ANFIS به عنوان مدلی بهتر در جایگزینی با مدل‌های کلاسیک رگرسیونی برای تخمین دبی رودخانه‌ای واقع در کشور اندونزی اقدام نمودند. در گام بعد نیز با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو به انتخاب نمونه‌های تصادفی به عنوان الگوهای انتخابی واسنجی مدل ANFIS پرداختند. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده از الگوهای متعدد واسنجی و

رودخانه‌ها نقش مهمی در توسعه جوامع انسانی و اکوسیستم اطراف خود دارند. بنابراین با توجه به نقش اساسی این سیستم آبی در پویایی محیط اطراف خود، برآورد جریان رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معمولاً جریان رودخانه به متغیرهای متعدد هواشناسی، هیدرولوژیکی، خاک‌شناسی، و مولفه‌های توسعه جوامع انسانی وابسته می‌باشد و در بسیاری از موارد تعریف دقیق و کاملی از فیزیک جریان یک رودخانه وجود ندارد. بنابراین در بسیاری از موارد، نیاز به اطلاعات وسیع و به تبع آن وجود عدم قطعیت‌های فراوان در تخمین آورد یک رودخانه توسط مدل‌های فیزیک مبنای هیدرولوژیکی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی مطرح می‌باشد. برای این منظور استفاده از مدل‌هایی که بتوانند بخوبی در مورد فرآیندهایی که تعریف دقیق و کاملی از فیزیک آن‌ها وجود ندارد، موثر عمل نمایند و همچنین از حساسیت کم‌تری نسبت به وجود خطا ناشی از اعمال نشدن برخی پارامترها برخوردار باشند، می‌تواند موثر باشد. لذا مدل‌های رودخانه‌ها نقش مهمی در توسعه جوامع انسانی و اکوسیستم اطراف خود دارند. بنابراین با توجه به نقش اساسی این سیستم آبی در پویایی محیط اطراف خود، برآورد جریان رودخانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معمولاً جریان رودخانه به متغیرهای متعدد هواشناسی، هیدرولوژیکی، خاک‌شناسی، و مولفه‌های توسعه جوامع انسانی وابسته می‌باشد و در بسیاری از موارد تعریف دقیق و کاملی از فیزیک جریان یک رودخانه وجود ندارد. بنابراین در بسیاری از موارد، نیاز به اطلاعات وسیع و به تبع آن وجود عدم قطعیت‌های فراوان در تخمین آورد یک رودخانه توسط مدل‌های فیزیک مبنای هیدرولوژیکی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی مطرح می‌باشد. برای این منظور استفاده از مدل‌هایی که بتوانند بخوبی در مورد فرآیندهایی که تعریف دقیق و کاملی از فیزیک آن‌ها وجود ندارد، موثر عمل نمایند و همچنین

1 -Marce

2 -Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

3 -Aqil

رنجان در جنوب غرب استان فارس می‌گذرد و بعد از آن در مسیر خود ورودی به سد رئیس‌علی دلواری را تشکیل می‌دهد. سد مخزنی رئیس‌علی دلواری نیز در بخش شبانکاره و در ۶۰ کیلومتری شهر برازجان در استان بوشهر قرار دارد. این سد، در جنوب غربی ایران و در ۷۳ کیلومتری شمال شرقی بوشهر، بر روی رود شاپور ساخته شده است. قرارداد ساخت این سد، در سال ۱۳۷۵ ابلاغ و در سال ۱۳۸۶ کار ساخت آن به اتمام رسید. مهم‌ترین اهداف ساخت این سد، آبیاری ۲۴ هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی، تولید سالانه ۹۶ هزار مگاوات انرژی برق آبی، کنترل سیلاب، ایجاد اشتغال، جلوگیری از بروز خسارات ناشی از سیل به زمین‌های کشاورزی، نخلستان‌ها و تخریب سواحل رودخانه‌ها بوده است. در این تحقیق برای پیش‌بینی جریان یک ماه بعد، اطلاعات بارندگی (R) و دبی رودخانه (Q) در مقیاس ماهانه، به مدت ۲۵ سال (از نیمه دوم سال ۱۳۶۴ تا نیمه اول سال ۱۳۸۹) از ایستگاه جره‌بالا که در بالادست مخزن سد رئیس‌علی دلواری قرار دارد، اخذ گردید. در گام بعد با توجه به اثرپذیری جریان رودخانه از سری زمانی اطلاعات مذکور، پارامترهای معرفی شده هر کدام با دو تاخیر زمانی به عنوان ورودی به مدل‌های ANN و ANFIS برای پیش‌بینی جریان ماه آینده مورد استفاده قرار گرفت. قابل ذکر است که بر اساس تحلیل انجام شده اگرچه بین متغیر هدف با دبی و بارش ماه‌های گذشته تا حدودی همبستگی وجود داشت، اما متغیر هدف تنها با دبی و بارش با یک و دو تاخیر زمانی از همبستگی مناسبی (بیش‌تر از ۰/۴) برخوردار بود. به همین دلیل نیز از دو تاخیر زمانی استفاده گردید. در نتیجه فضای بردار ورودی به مدل‌ها برای پیش‌بینی دبی ماه بعد شامل ۶ متغیر می‌باشند. در ادامه روند تغییرات مربوط به هر یک از پارامترهای بارش و دبی رودخانه شاپور، ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری جره‌بالا، در شکل ۲ آمده است.

صحت‌سنجی، عدم قطعیت این مدل در پیش‌بینی جریان رودخانه مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. نوری و همکاران (۶) برای تحلیل عدم قطعیت مدل ANFIS در فرآیند پیش‌بینی اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی ۵ روزه^۱ رودخانه سفیدرود از روش نمونه‌گیری مونت کارلو استفاده کردند. در تحقیق مذکور ابتدا با استفاده از روش تجزیه متعامد سره^۲ بهترین الگوی ورودی به مدل ANFIS مشخص شد و در گام بعد با استفاده از تغییر در الگوهای انتخابی برای واسنجی مدل، عدم قطعیت مدل ANFIS مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیقی دیگر نیز نوری و همکاران (۷) الگویی مناسب برای تحلیل عدم قطعیت مدل ماشین بردار پشتیبان^۳ (SVM) در تخمین اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی ۵ روزه ارائه نمودند. همچنین مطالعه‌ای نیز توسط نوری و همکاران (۸) برای مقایسه عدم قطعیت سه مدل شبکه عصبی مصنوعی^۴ (ANN)، ANFIS و SVM در فرآیند پیش‌بینی ضریب پخش طولی در رودخانه‌ها انجام شد.

بسیار واضح است که طی سالیان اخیر کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی در علوم مرتبط با آب در کشور از جایگاه خاصی چه در تحقیقات دانشگاهی و چه در پروژه‌های کاربردی برخوردار بوده است. از طرفی دیگر نیز آگاهی از عدم قطعیت این مدل‌ها راهکار اتخاذ تصمیمات مدیریتی در بخش آب را تا حدود زیادی بهبود می‌بخشد. بنابراین با توجه به مطالب مذکور در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ANN و ANFIS اقدام به مدل‌سازی جریان ماهانه رودخانه شاپور واقع در استان بوشهر، ورودی به سد رئیس‌علی دلواری، گردد.

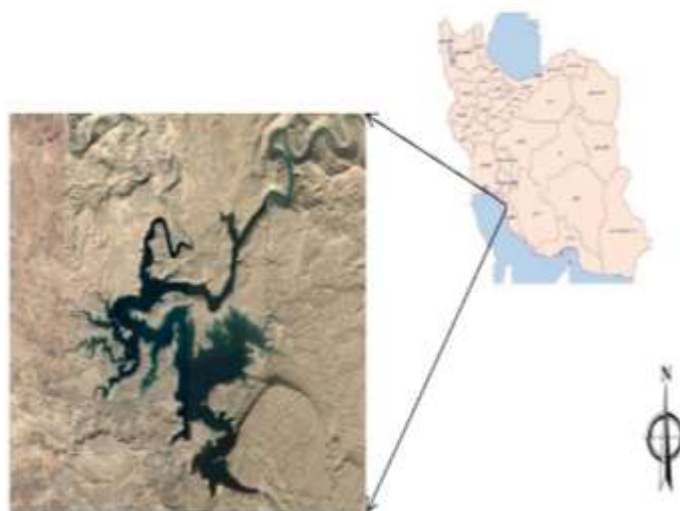
محدوده مورد مطالعه و اطلاعات تحقیق

محدوده مورد مطالعه این تحقیق رودخانه شاپور، ورودی به سد رئیس‌علی دلواری، واقع در استان بوشهر است (شکل ۱). سرچشمه رودخانه شاپور از ارتفاعات کازرون، چنارشاهیجان و

- 1-The 5-Day Biochemical Oxygen Demand
- 2-Proper Orthogonal Decomposition
- 3-Support Vector Machine (SVM)
- 4-Artificial Neural Network (ANN)

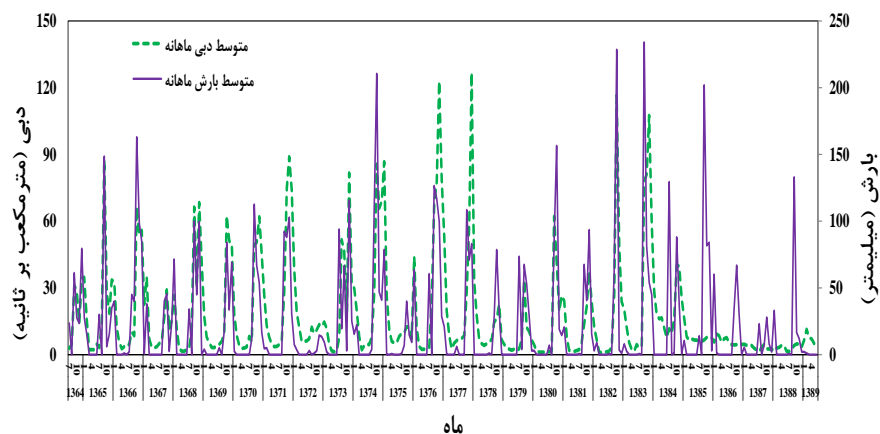
همین دلیل نیز از دو تاخیر زمانی استفاده گردید. در نتیجه فضای بردار ورودی به مدل‌ها برای پیش‌بینی دبی ماه بعد شامل ۶ متغیر می‌باشند. در ادامه روند تغییرات مربوط به هر یک از پارامترهای بارش و دبی رودخانه شاپور، ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری جره‌بالا، در شکل ۲ آمده است.

ANFIS برای پیش‌بینی جریان ماه آینده مورد استفاده قرار گرفت. قابل ذکر است که بر اساس تحلیل انجام شده اگرچه بین متغیر هدف با دبی و بارش ماه‌های گذشته تا حدودی همبستگی وجود داشت، اما متغیر هدف تنها با دبی و بارش با یک و دو تاخیر زمانی از همبستگی مناسبی (بیش‌تر از ۰/۴) برخوردار بود. به



شکل ۱- موقعیت سد رئیس‌علی دلواری

Figure 1- Location of Raees-Ali Delvari dam



شکل ۲- روند تغییرات بارش و دبی ماهانه در ایستگاه جره‌بالا طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۸۹

Figure 2- Trend of monthly discharge and rainfall in the Jareh-Bala station during 1985 to 2010

روش تحقیق

در این بخش با توجه به منابع فراوان در زمینه مدل‌های ANN و ANFIS (۹-۱۳) و همچنین جهت رعایت اختصار در مطالب، به معرفی مولفه‌های اصلی ANN و ANFIS استفاده شده در این تحقیق پرداخته شده است. همچنین در ادامه نحوه تعیین عدم قطعیت این دو مدل شرح داده شده است.

ANN روشی هوشمند است که الگویی مناسب برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی را فراهم می‌نماید. در میان انواع مختلف ANN معرفی شده تا به حال، شبکه عصبی پیشخور^۱ (FFNN) با الگوریتم آموزش پس‌انتشار با عملکرد مناسب به عنوان تقریب‌زن جهانی شناخته شده است (۱۰). ساختار FFNN عملاً متشکل از چهار مولفه بوده که عبارتند از: الگوریتم آموزش، لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان، و توابع محرک. در این تحقیق از FFNN با یک لایه پنهان و الگوریتم لونیبرگ-ماردکویت^۲ (LM) برای بهینه‌سازی پارامترهای شبکه استفاده شده است. همچنین توابع محرک در لایه پنهان و خروجی به ترتیب تابع سیگموئید تانزانتی^۳ و تابع خطی انتخاب شدند.

مدل ANFIS عملاً به روش استفاده از تکنیک‌های متفاوت یادگیری در شبکه عصبی برای سیستم استنتاج فازی^۴ (FIS) اطلاق می‌گردد. FIS با استفاده از تعدادی قوانین اگر (بخش مقدم) - آنگاه (بخش تالی) یک رابطه جزء به جزء غیرخطی را از فضای ورودی به فضای خروجی ارایه می‌دهد. این مدل به گونه‌ای توسعه یافته تا از مزیت‌های مدل ANN و همچنین سیستم فازی برخوردار باشد (۹). برای بهینه‌سازی FIS در ساختار مدل ANFIS معمولاً از FFNN استفاده می‌شود. در مقایسه با ANN، مدل ANFIS از یک الگوریتم ترکیبی، برای تعیین الگوی موجود در بین داده‌ها استفاده می‌کند (۹). در این روش، از ترکیب روش‌های کاهش گرادیان و حداقل مربعات برای بهینه‌سازی

پارامترهای مدل استفاده می‌شود. هر تکرار این روش ترکیبی شامل فازهای پیش‌رو و پس‌رو می‌باشد. در فاز پیش‌رو پارامترهای بخش مقدم ثابت بوده و پارامترهای بخش تالی با استفاده از روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. اما در فاز پس‌رو پارامترهای بخش مقدم با استفاده از روش کاهش گرادیان محاسبه شده و پارامترهای بخش تالی نیز ثابت است. اطلاعات بیش‌تر در مورد الگوریتم ترکیبی در مراجع (۹) و (۱۴) آمده است. همچنین قابل ذکر است که در این تحقیق از ساختار FIS مرتبه اول معرفی شده توسط سوگنو (۹)، به دلیل عملکرد موفقیت‌آمیز آن در مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی، استفاده شده است. برای ارزیابی دقت هر یک از مدل‌های ANN و ANFIS نیز از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای مطلق^۵ (MAE) و میانگین مطلق خطای نسبی^۶ (AARE) استفاده گردید.

با توجه به مطالب ذکر شده برای مدل‌های ANN و ANFIS، ضروری است تابع خطای مربوط به داده‌های ورودی مدل بهینه شود که این مهم در مدل ANN توسط الگوریتم LM و در مدل ANFIS نیز توسط الگوریتم ترکیبی معرفی شده انجام شد. بنابراین، لازم است تا کارکرد مدل تحت الگوهای واسنجی متفاوت ارزیابی شده تا عدم قطعیت مدل حاصل از تغییرات ایجاد شده در داده‌های ورودی بررسی گردد. قابل ذکر است که مدل‌های داده‌محور مانند مدل‌های ANN و ANFIS به شدت تحت تاثیر داده‌های مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشند. عملاً روند آموزش در این مدل‌ها بر مبنای داده‌های ورودی انجام شده و با توجه به اطلاعات ورودی به این مدل‌ها، بهترین ساختار برای پیش‌بینی متغیر هدف ایجاد می‌گردد. بنابراین واضح است که با تغییر داده‌های مورد استفاده برای واسنجی، این مدل‌ها عدم قطعیت و عملکردهای متفاوتی از خود نشان دهند. در این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل‌های ANN و ANFIS، هر یک از آن‌ها

- 1-Feed-Forward Neural Network (FFNN)
- 2-Levenberg-Marquardt (LM)
- 3-Tangent Sigmoid
- 4-Fuzzy Inference System (FIS)

5-Mean Absolute Error (MAE)

6-Average Absolute Relative Error (AARE)

لازم است ۲/۵ درصد حد پایین پیش‌بینی‌ها (X_L) و ۹۷/۵ درصد حد بالای آن (X_U) حاصل از توزیع نرمال تجربی ناشی از ۱۰۰۰ مرتبه اجرای مدل‌ها با الگوهای متفاوتی از داده‌های واسنجی، تعیین گردد (شکل ۳-ی). همچنین برای ارزیابی عرض باند اطمینان، معیار d -factor که بیان‌گر عرض میانگین باند اطمینان می‌باشد مطابق فرمول ۲ مورد استفاده قرار گرفت (۱۴). به طور کلی معیار 95PPU بین صفر تا صد درصد و d -factor نیز بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است. مقادیر بیش‌تر معیار 95PPU به همراه مقادیر کمتر d -factor بیان‌گر عدم قطعیت کم‌تر مدل است (۱۷).

$$\text{Bracketed by } 95\text{PPU} = \frac{1}{k} \text{Count}(k | X_L \leq k \leq X_U) \times 100 \quad (1)$$

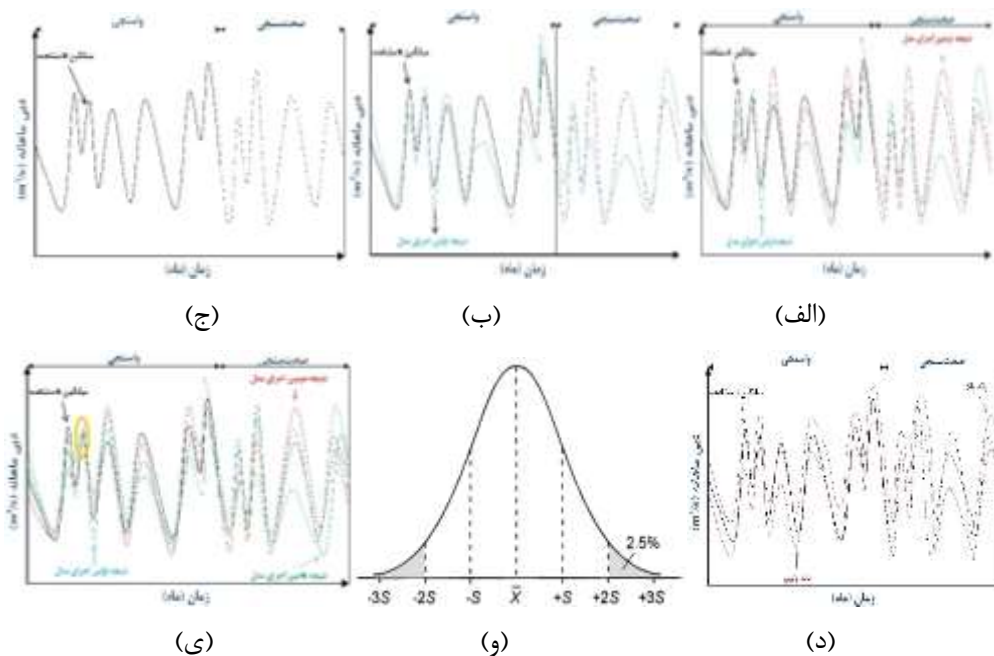
$$d - \text{factor} = \frac{\overline{d_x}}{\sigma_x} \quad (2)$$

در رابطه ۲، σ_x انحراف معیار متغیر اندازه‌گیری شده x و $\overline{d_x}$ میانگین فاصله کران بالا و پایین به‌دست آمده از رابطه ۳ است (۵).

$$\overline{d_x} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (X_U - X_L) \quad (3)$$

در رابطه بالا، k بیانگر تعداد نقاط داده‌های مشاهده شده است. شکل ۳ مراحل تصویری تعیین عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS را به طور کامل نشان می‌دهد.

با الگوهای متفاوتی از اطلاعات ورودی واسنجی شدند و در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده، عدم قطعیت آن‌ها محاسبه گردید. بدین منظور، یک الگوریتم برای انتخاب الگوهای متفاوتی از داده‌ها برای واسنجی در محیط MATLAB توسعه داده و به دنبال آن داده‌های خروجی برای هر یک از این الگوها توسط مدل‌های ANN و ANFIS محاسبه شد. لازم به ذکر است که فرآیند مذکور باید به تعداد زیادی تکرار شود (۱۵). در این پژوهش، مدل‌های ANN و ANFIS توسط درصدی از داده‌ها واسنجی شد و فرآیند نمونه‌گیری داده‌ها برای واسنجی این مدل‌ها با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده در محیط MATLAB به تعداد مناسب مورد تکرار قرار گرفت (در این تحقیق، ۱۰۰۰ مرتبه). برای ارزیابی دقت در هر مرحله نیز، از مقادیر میانگین الگوهای انتخاب شده در ۱۰۰۰ مرتبه تکرار مطابق شکل ۳ (الف) تا (د) استفاده شد. با استفاده از این روند در هر اجرا به دلیل متفاوت بودن داده‌های واسنجی، پارامترهای بهینه شده مدل‌های ANN و ANFIS مقادیر متفاوتی خواهند داشت که این امر عملکرد آن‌ها را در هر اجرا تحت تاثیر قرار می‌دهد. بدین روی، دامنه‌ای از داده‌های خروجی مربوط به عدم قطعیت مدل‌های واسنجی شده ANN و ANFIS با بکارگیری این روش محاسباتی حجیم تعیین گردید. به منظور ارزیابی عدم قطعیت مدل‌ها، آماره ۹۵ درصد عدم قطعیت‌های پیش‌بینی^۱ (95PPU) مطابق معادله ۱ محاسبه گردید (۱۶). در این راستا



شکل ۳- مراحل گرافیکی تحلیل عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS

Figure 3- Graphical steps of uncertainty analysis of ANN and ANFIS models

آموزش و ۶۹ ماه برای اعتبارسنجی) و ۱۷ درصد باقی‌مانده نیز که ۵۱ ماه است برای مرحله صحت‌سنجی FFNN مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله بعد نیز با اجرای شبکه برای دفعات زیاد بهترین مدل FFNN اجرا شده که مطابق آماره‌های R^2 ، MAE و AARE بالاترین دقت را داشت به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی جریان یک ماه بعد، ورودی به مخزن سد رئیس‌علی دلواری، پیشنهاد گردید. در این راستا مدل FFNN اجرا شده با ترکیب ۶ نرون در لایه پنهان به عنوان بهترین مدل در این مرحله انتخاب گردید که نتایج اجرای این مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۱ و همچنین شکل‌های ۴ تا ۵ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

نتایج مدل ANN

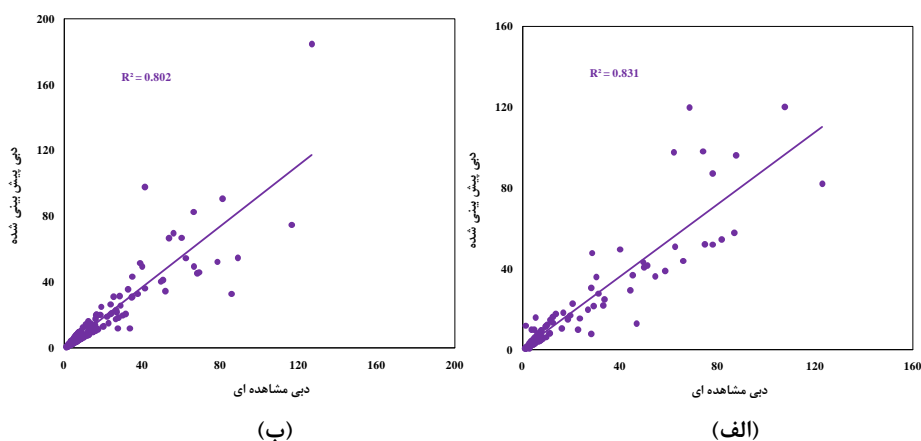
در این تحقیق با توجه به عملکرد موثر FFNN در مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی و غیرخطی، از این نوع شبکه برای مدل‌سازی جریان یک ماه بعد، ورودی به مخزن سد رئیس‌علی دلواری، استفاده گردید. برای این منظور در این بخش ابتدا ۶ متغیر اولیه در بازه ۱- تا ۱ نرمال‌سازی شدند. برای جلوگیری از بروز مشکل فوق‌برازشی و کم‌تخمینی FFNN نیز از الگوریتم توقف آموزش^۱ (STA) استفاده شد.

با توجه به مطالب ذکر شده در این تحقیق حدود ۸۳ درصد اطلاعات که شامل ۲۴۹ ماه می‌باشد برای واسنجی (۱۸۰ ماه برای

جدول ۱- نتایج مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های ANN و ANFIS

Table 1- Results of ANN and ANFIS models during calibration and verification steps

مرحله صحت‌سنجی	مرحله واسنجی	آماره	مدل
۰/۸۳	۰/۸۰	R^2	ANN
۱/۴۲	۱/۳۸	MAE	
۰/۹۶	۰/۸۸	AARE	
۰/۸۰	۰/۷۸	R^2	ANFIS
۱/۴۲	۱/۴۵	MAE	
۰/۹۱	۰/۸۵	AARE	



شکل ۴- مقادیر پیش‌بینی شده دبی توسط ANN در مقابل مقادیر مشاهده‌ای آن در مراحل الف) واسنجی و ب) صحت‌سنجی

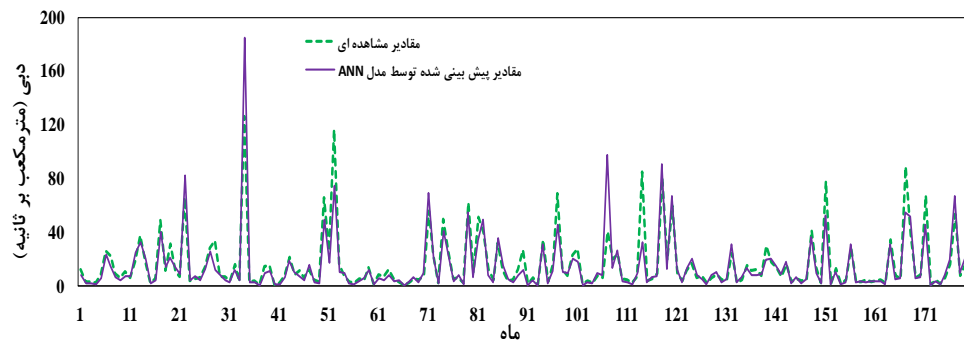
Figure 4- Predicted discharge by ANN versus observed discharge values in (a) calibration and (b) verification steps

مخزن سد رئیس‌علی دلواری، را مطلوب ارزیابی نمود. شکل ۴ نیز به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل FFNN را در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. در مورد این شکل قابل ذکر است که هرچه خط بهینه عبوری از نقاط نزدیکتر به زاویه ۴۵ درجه با محورهای مختصات باشد، بیان‌گر دقت بیشتر مدل است. مطابق این شکل‌ها نیز مشخص است که اگرچه عملکرد مدل تا اندکی با خطا همراه بوده اما دقت مدل مطلوب می‌باشد به طوری که خط عبوری از نقاط در هر دو شکل زاویه‌ای در حدود ۴۵ درجه با محورهای مختصات می‌سازند.

مطابق نتایج به دست آمده از FFNN بهینه اجرا شده مندرج در جدول ۱ می‌توان مشاهده نمود که مقدار R^2 این مدل در مرحله واسنجی ۰/۸۰ و در مرحله صحت‌سنجی مدل نیز برابر ۰/۸۳ است. این واقعیت بیان‌گر دقت قابل قبول مدل در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی است. همچنین آماره‌های MAE و AARE نیز برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهینه FFNN اجرا شده مقادیر مناسبی دارا هستند و به طور کلی هرچه این مقادیر نزدیک به صفر باشند بیان‌گر خطای کمتر مدل است. بنابراین بر مبنای نتایج جدول ۱ می‌توان دقت مدل پیشنهادی FFNN برای مدل‌سازی جریان یک ماه بعد، ورودی به

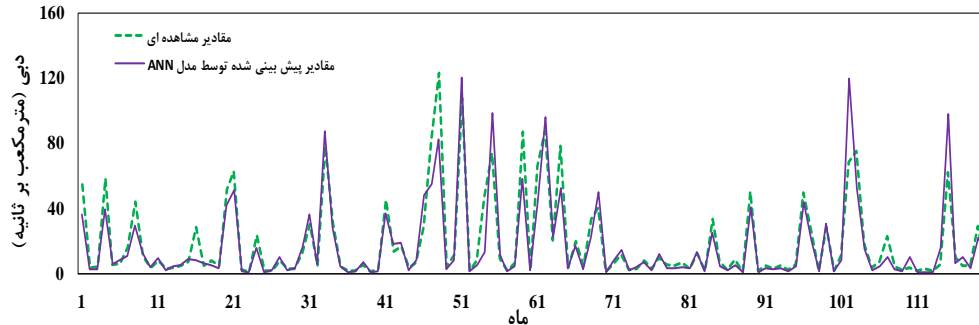
پیش‌بینی شده توسط مدل FFNN نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای هستند اما عملکرد این مدل در برخی نقاط با دبی بالا در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل با خطای قابل توجهی همراه است.

در نهایت نتایج روند تغییرات دبی مشاهده‌ای در مقابل دبی پیش‌بینی شده توسط مدل FFNN برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که اگرچه مقادیر



شکل ۵- روند تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده دبی توسط ANN در مقابل مقادیر مشاهده‌ای آن در مرحله واسنجی

Figure 5- Trend of predicted discharge variations by ANN versus observed values in the calibration step



شکل ۶- روند تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده دبی توسط مدل ANN در مقابل مقادیر مشاهده‌ای آن در مرحله صحت‌سنجی

Figure 6- Trend of predicted discharge variations by ANN versus observed values in the verification step

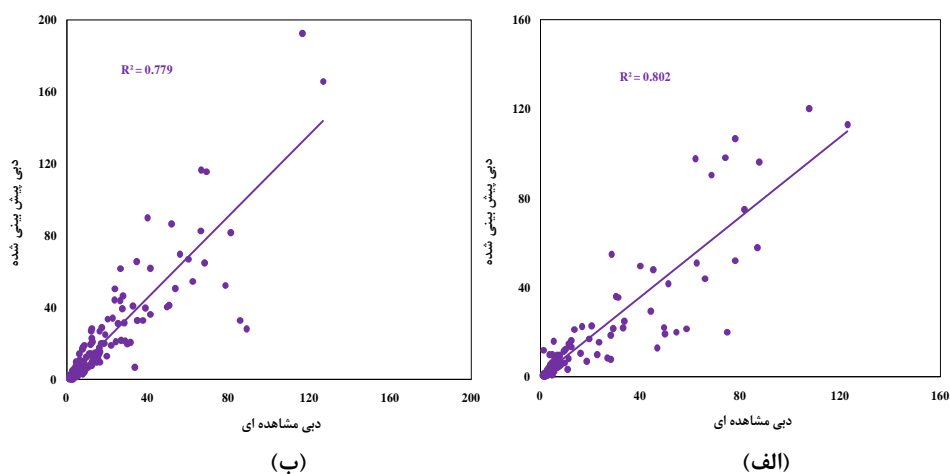
نتایج مدل ANFIS

فوق برازشی و کم تخمینی مدل از روش STA استفاده شد. در نهایت نیز مانند مرحله قبل ۸۳ درصد اطلاعات که شامل ۲۴۹ ماه می‌باشد برای واسنجی (۱۸۰ ماه برای آموزش و ۶۹ ماه برای اعتبارسنجی) و ۱۷ درصد باقی‌مانده نیز که ۵۱ ماه است برای مرحله صحت‌سنجی مدل ANFIS مورد استفاده قرار گرفتند. در

در این مرحله تعداد بردارهای ورودی به مدل ANFIS مانند مرحله قبل ۶ ورودی استفاده گردید. همچنین متغیرهای ورودی به مدل ANFIS و متغیر خروجی (دبی یک ماه بعد ورودی به مخزن سد رئیس علی دلواری) در بازه ۱- تا ۱ نرمال‌سازی شدند. در این مرحله نیز مانند مرحله قبل برای جلوگیری از بروز مشکل

قبولی برخوردارند. مطابق نتایج به دست آمده از مدل‌های ANN و ANFIS بهینه اجرا شده مشخص است که مقادیر آماره‌ها برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی از مقادیر تقریباً یکسانی برخوردارند. بنابراین بر مبنای نتایج جدول ۱ می‌توان قضاوت نمود که تفاوت معنی‌دالی بین عملکرد دو مدل ANN و ANFIS وجود ندارد. شکل ۷ نیز به ترتیب مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل ANFIS را در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. در مورد این شکل نیز می‌توان مشاهده نمود که خط بهینه عبوری از نقاط در زاویه مطلوبی (مقدار مطلوب ۴۵ درجه می‌باشد) با محورهای مختصات قرار دارد که بیانگر عملکرد مناسب مدل ANFIS است.

این گام نیز مانند اجرای مدل FFNN، با اجرای مدل برای دفعات زیاد بهترین مدل ANFIS اجرا شده که مطابق آماره‌های مورد بررسی بالاترین دقت را داشت به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی جریان یک ماه بعد، ورودی به مخزن سد رئیس‌علی دلواری، پیشنهاد گردید. نتایج اجرای این مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۱ و همچنین شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده مندرج در جدول ۱ می‌توان مشاهده نمود که مقدار R^2 این مدل در مرحله واسنجی ۰/۷۸ و در مرحله صحت‌سنجی نیز برابر ۰/۸۰ است. این واقعیت بیان‌گر دقت قابل قبول مدل در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل است. همچنین آماره‌های MAE و AARE نیز برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل ANFIS از عملکرد قابل

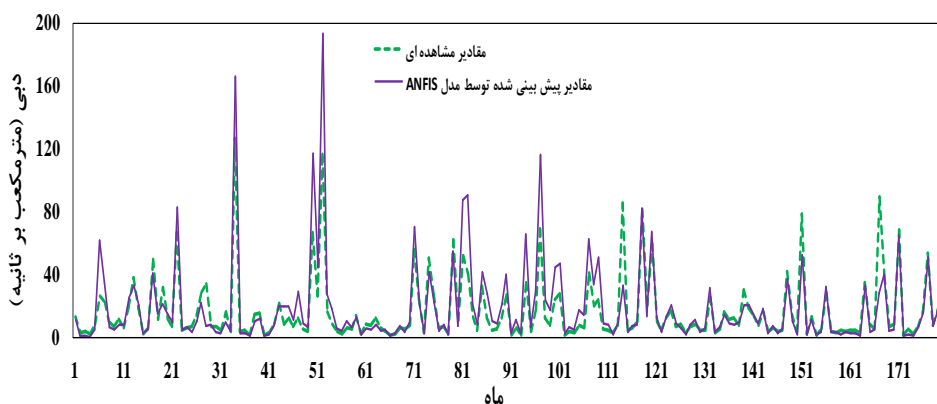


شکل ۷- مقادیر پیش‌بینی شده دبی توسط مدل ANFIS در مقابل مقادیر مشاهده‌ای آن در مراحل واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب)

Figure 7- Predicted discharge by ANFIS versus observed discharge values in (a) calibration and (b) verification steps

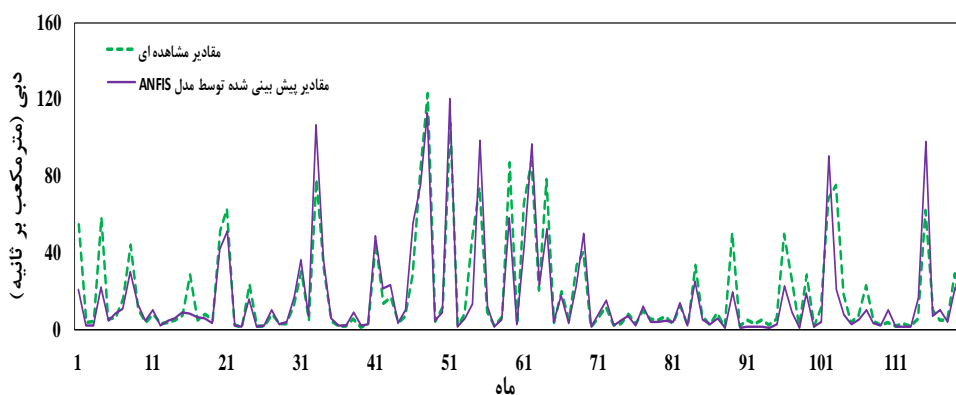
است. مطابق این شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل ANFIS نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای هستند.

در نهایت نتایج روند تغییرات دبی مشاهده‌ای در مقابل دبی پیش‌بینی شده توسط مدل ANFIS برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده



شکل ۸- روند تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده دبی توسط مدل ANFIS در مقابل مقادیر مشاهده‌ای آن در مرحله واسنجی

Figure 8- Trend of predicted discharge variations by ANFIS versus observed values in the calibration step



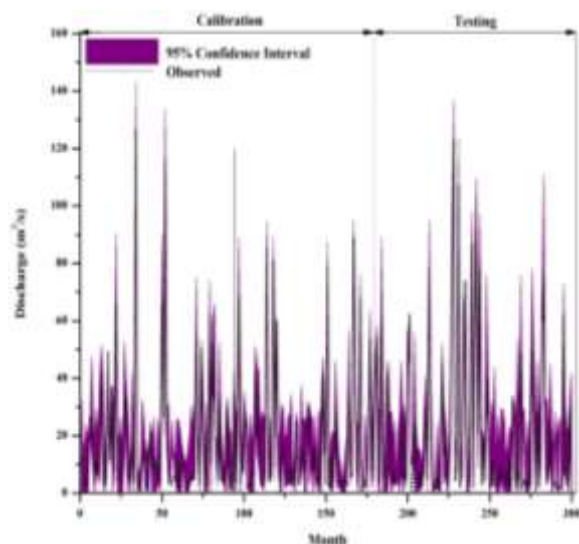
شکل ۹- روند تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده دبی توسط مدل ANFIS در مقابل مقادیر مشاهده‌ای آن در مرحله صحت‌سنجی

Figure 9- Trend of predicted discharge variations by ANFIS versus observed values in the verification step

که با توجه به یکسان نبودن اطلاعات در هر اجرا خروجی متفانی برای هر مدل نتیجه داد. اطلاعات موردنیاز برای محاسبه باند اطمینان هر یک از مدل‌ها در طی ۱۰۰۰ بار اجرا به دست آمد که با استفاده از آن‌ها آماره‌های معرفی شده برای قضاوت در مورد عملکرد هر یک از مدل‌ها محاسبه گردید. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب عدم قطعیت محاسبه شده مدل ANN و ANFIS را نشان می‌دهند.

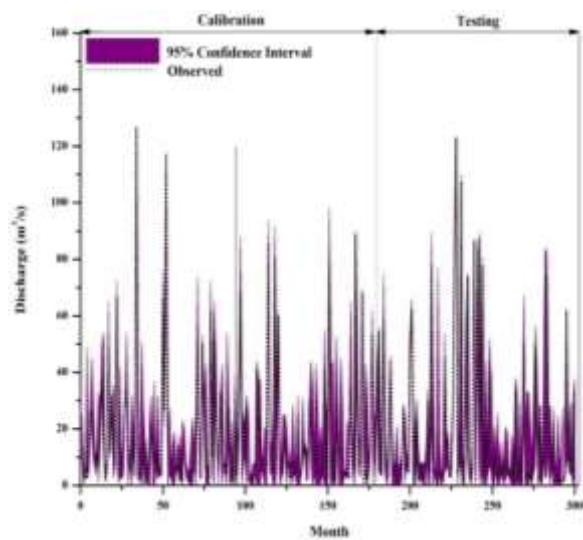
نتایج تحلیل عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS

در این مرحله از تحقیق مشابه مراحل قبل از اطلاعات ۲۴۹ ماه به عنوان اطلاعات واسنجی و همچنین از اطلاعات ۵۱ ماه برای صحت‌سنجی استفاده شد. همان‌طور که در بخش روش‌شناسی تحقیق نیز مورد اشاره قرار گرفت اساس کار جهت تعیین عدم قطعیت هر یک از مدل‌های ANN و ANFIS، این دو مدل با الگوهای متفاوت انتخابی برای واسنجی به دفعات زیاد اجرا شدند



شکل ۱۰- عدم قطعیت مدل ANN با سطح اطمینان ۹۵ درصد در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 10- ANN model uncertainty with 95% confidence level in the calibration and verification steps



شکل ۱۱- عدم قطعیت مدل ANFIS با سطح اطمینان ۹۵ درصد در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 11- ANFIS model uncertainty with 95% confidence level in the calibration and verification steps

رئیس‌علی دلواری است.

با دیدی دقیق‌تر در نتایج به دست آمده از تحلیل عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS می‌توان دریافت که بیش از ۸۸ و ۸۷ درصد از پیش‌بینی‌های مدل ANFIS به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده باند 95PPU قرار می‌گیرند در حالی که این مقادیر برای باند اطمینان مدل ANN به ترتیب برابر با ۸۴ و ۸۲ درصد است. همچنین آماره d -factor برای مدل ANFIS در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مقادیری کم‌تر نسبت به مدل ANN دارند. این حقیقت بیان‌گر عملکرد مناسب‌تر مدل ANFIS در مقایسه با مدل ANN برای پیش‌بینی دبی یک ماه بعد ورودی به مخزن سد رئیس‌علی دلواری است.

همچنین معیارهای آماری برای ارزیابی عدم قطعیت مدل‌ها شامل آماره d -factor و مقادیر محدود شده به باند 95PPU در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، بیش از ۸۴ و ۸۲ درصد از پیش‌بینی‌های مدل ANN به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده باند 95PPU قرار می‌گیرند در حالی که این مقادیر برای باند اطمینان مدل ANFIS به ترتیب برابر با ۸۷ و ۸۸ درصد می‌باشد. همچنین آماره d -factor برای مدل ANN در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل کم‌تر از ۱ است. این حقیقت بیانگر عملکرد مناسب مدل ANN و عدم قطعیت قابل قبول آن برای پیش‌بینی دبی یک ماه بعد ورودی به سد

جدول ۲- نتایج تعیین عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS

Table 2- Results of uncertainty determination for ANN and ANFIS models

مدل		آماره	مرحله
ANFIS	ANN		
۰/۷۸	۰/۸۳	<i>d</i> -factor	واسنجی
۸۷	۸۴	Bracketed by 95PPU	
۰/۷۶	۰/۸۰	<i>d</i> -factor	صحت‌سنجی
۸۸	۸۲	Bracketed by 95PPU	

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

• با بررسی نتایج عدم قطعیت مدل‌ها مشخص شد که مدل ANFIS از عدم قطعیت کم‌تری نسبت به مدل ANN برخوردار است. عملاً مقادیر پیش‌بینی‌های محدود شده توسط سطح اطمینان ۹۵ درصد در مدل ANFIS بیش از مدل ANN بود که این مهم بیان‌گر عملکرد بهتر مدل ANFIS است. همچنین عرض باند اطمینان ۹۵ درصد مدل ANFIS کم‌تر از این مقدار برای مدل ANN محاسبه گردید به نحوی که مقدار *d*-factor برای این مدل در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی کم‌تر از *d*-factor محاسبه شده مدل ANN بود.

• روش‌شناسی معرفی شده در این تحقیق برای تعیین عدم قطعیت بر مبنای نمونه‌گیری کاملاً تصادفی استوار بود. مسلماً روش‌های دیگر نمونه‌گیری هدفمند که در هر نمونه مقادیر حدی اطلاعات نیز موجود باشد، می‌تواند در بهبود نتایج به دست آمده و همچنین کاربردی‌تر بودن آن‌ها مثرتر واقع گردد.

• روش‌شناسی معرفی شده در این تحقیق برای تعیین عدم قطعیت مدل‌های ANN و ANFIS کلی بوده و قابل تعمیم برای پیش‌بینی سایر پدیده‌ها در دیگر زمینه‌های علوم و مهندسی می‌باشد. بنابراین محققین می‌توانند با پیاده

با توجه به اهمیت سدها به عنوان یکی از اساسی‌ترین منابع تامین آب شرب، کشاورزی و صنعت و همچنین برآورد دبی ورودی به این سازه‌های عظیم، هدف اصلی این تحقیق نیز ارزیابی مدلی با استفاده از مدل‌های ANN و ANFIS برای تخمین جریان ماهانه رودخانه شاپور، ورودی به سد رئیس‌علی دلواری، قرار داده شد. همچنین به منظور ارزیابی بهتر عملکرد مدل‌ها، تحلیل عدم قطعیت هر یک از آن‌ها نیز انجام پذیرفت. به طور خلاصه می‌توان مهم‌ترین نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر را در بندهای ذیل خلاصه نمود:

• مطابق نتایج به دست آمده از مدل‌های ANN و ANFIS بهینه اجرا شده مشخص گردید که مقادیر آماره‌های R^2 ، MAE و AARE برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی از مقادیر مناسبی برخوردارند که این بیان‌گر دقت مطلوب مدل‌های پیشنهادی برای مدل‌سازی جریان یک ماه بعد ورودی به مخزن سد رئیس‌علی دلواری است.

• ارزیابی روند تغییرات دبی مشاهده‌ای در مقابل دبی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ANN و ANFIS برای هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مشخص نمود که اگرچه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای هستند اما عملکرد آن‌ها در برخی نقاط با دبی بالا با خطای قابل توجهی همراه است.

- varying human impact. *Limnology and Oceanography Methods*, Vol. 2, pp.342-355
5. Aqil, M., Kita, I., Yano, A., Nishiyama, S., 2007. Analysis and prediction of flow from local source in a river basin using a Neuro-fuzzy modeling tool. *Journal of Environmental Management*, Vol. 85, pp.215-223
 6. Noori, R., Safavi, S., Shahrokni, S.A.N., 2013. A reduced-order adaptive neuro-fuzzy inference system model as a software sensor for rapid estimation of five-day biochemical oxygen demand. *Journal of Hydrology*, Vol. 495, pp.175-185.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.052>
 7. Noori, R., Yeh, H.D., Abbasi, M., Kachoosangi, F.T., Moazami, S. (2015). Uncertainty analysis of support vector machine for online prediction of five-day biochemical oxygen demand. *Journal of Hydrology* 527: 833-843.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.046>
 8. Noori, R., Deng, Z., Kiaghadi, A., Kachoosangi, F.T., 2016. How reliable are ANN, ANFIS, and SVM techniques for predicting longitudinal dispersion coefficient in natural rivers? *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001062](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001062)
 9. Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* Vol. 23, pp.665-685
- نمودن روش‌شناسی مذکر اقدام به تعیین عدم قطعیت مدل‌های هوشمند برای دیگر پدیده‌های مورد بررسی نمایند.
- ### تشکر و قدردانی
- تحقیق حاضر برگرفته از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر تحت عنوان "ارایه روش‌شناسی مناسبی جهت تحلیل عدم قطعیت مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی جریان رودخانه شاپور، ورودی به سد رئیس‌علی دلواری" می‌باشد. بنابراین نگارندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر جهت تأمین مالی این تحقیق ابراز می‌دارند.
- ### منابع
1. Sanikhani, H., Kisi, O., 2012. River flow estimation and forecasting by using two different adaptive neuro-fuzzy approaches. *Water Resources Management*, Vol. 26, pp.1715-1729
 2. Patel, S.S., Ramachandran, P., 2015. A comparison of machine learning techniques for modeling river flow time series: the case of upper Cauvery river basin. *Water Resources Management*, Vol. 29, pp.589-602
 3. Noori, R., Farokhnia, A., Morid, S., Madvar, H.R., 2009. Effect of input variables preprocessing in artificial neural network on monthly flow prediction by PCA and wavelet transformation. *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 1, pp.13-22 (In: Persian).
 4. Marce, R., Comerma, M., García, J.C., Armengol, J., 2004. A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time-

15. Dehghani, M., Saghafian, B., Nasiri Saleh, F., Farokhnia, A., Noori, R., 2014. Uncertainty analysis of streamflow drought forecast using artificial neural networks and Monte-Carlo simulation. *International Journal of Climatology*, Vol. 34, pp.1169-1180.
<https://doi.org/10.1002/joc.3754>
16. Moazami, S., Noori, R., Amiri, B.J., Yeganeh, B., 2016. Reliable prediction of carbon monoxide using developed support vector machine. *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 7, pp.412-418.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.022>
17. Noori, R., Hoshyaripour, G., Ashrafi, K., Araabi, B.N., 2010. Uncertainty analysis of developed ANN and ANFIS models in prediction of carbon monoxide daily concentration. *Atmospheric Environment*, Vol. 44, pp.476-482.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.005>
10. Haykin, S., 1994. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall, New Jersey.
11. Jalili, M., Noori, R., 2008. Prediction of municipal solid waste generation by use of artificial neural network: a case study of Mashhad. *International Journal of Environmental Research*, Vol. 2, pp.13-22
12. Noori, R., Karbassi, A., Farokhnia, A., Dehghani, M., 2009. Predicting the longitudinal dispersion coefficient using support vector machine and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. *Environmental Engineering Science*, Vol. 26, pp.1503-1510.
<https://doi.org/10.1089/ees.2008.0360>
13. Noori, R., Karbassi, A.R., Mehdizadeh, H., Vesali-Naseh, M., Sabahi, M.S., 2011. A framework development for predicting the longitudinal dispersion coefficient in natural streams using an artificial neural network. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 30, pp.439-449.
<https://doi.org/10.1002/ep.10478>
14. Jang, J.S.R., Sun, C.T., 1995. Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceed. IEEE*, Vol. 83, pp.378-406.

