

## ارزیابی روش‌های استنتاج فازی - عصبی و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد بار رسوب معلق رودخانه سفیدرود

علیرضا مردوخ پور\*<sup>۱</sup>

حسین جاماسبی<sup>۲</sup>

### چکیده

در تحقیق حاضر، مقایسه تخمین بار رسوب معلق در سدهای مخزنی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. ورودی مدل‌سازی شامل دبی متوسط روزانه رودخانه سفیدرود و خروجی از مدل، غلظت رسوب در گام زمانی با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB بوده است. از تعداد ۲۲۹ داده موجود ۱۸۲ داده به‌عنوان داده‌های آموزشی و ۴۷ داده برای آزمون بکار برده شده است. ورودی و خروجی رسوب دارای روند مثبت بوده و ۸۰ درصد داده‌ها جهت آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها جهت آزمون شبکه مورداستفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که پیش‌بینی غلظت بار معلق رسوب حاصل از سیستم استنتاج فازی-عصبی به داده‌های واقعی غلظت رسوب نزدیک‌ترند و ضریب همبستگی حاصل از سیستم استنتاج فازی-عصبی معادل ۹۰ درصد می‌باشد. این در حالی است که ضریب همبستگی برای مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی معادل ۸۳ درصد بدست آمده است. لذا سیستم استنتاج فازی-عصبی در پیش‌بینی میزان رسوب معلق نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای کارایی بهتری می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی:

سیستم استنتاج فازی-عصبی، شبکه عصبی مصنوعی، غلظت بار رسوب

\*. استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران. alireza.mardookpour@yahoo.com

۲. دانشجو دکتری مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران.

## مقدمه

اشاره نمود (اکیت و کوپلون<sup>۵</sup> ۱۳۸۶). مقایسه استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های معمولی (منحنی سنجه) نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی بهره‌وری بهتری نسبت به روش‌های مرسوم (منحنی سنجه) ارائه می‌دهد (اموتا و پرکلوان<sup>۶</sup> ۱۳۹۱). در زمینه استفاده از منطق فازی برخی محققین توانستند میزان رسوبات معلق را با استفاده از داده‌های عصبی و با به‌کارگیری شبکه‌های فازی-عصبی پیش‌بینی نماید (دستورانی و افخمی<sup>۷</sup> ۱۳۹۰). بر اساس این تحقیق، روش فازی-عصبی انعطاف‌پذیری بیشتر و نیز تطابق بیشتری با داده‌های میدانی رسوب داشته است (عیسی زاده و گوی<sup>۸</sup> ۱۳۹۴). در پیش‌بینی بار رسوب معلق روزانه در رودخانه کر مقایسه‌ای بین سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی و منحنی سنجه رسوب صورت گرفت که نتایج نشان داد شبکه دارای دقت بالاتری نسبت به منحنی سنجه رسوب داشته است (اسلمن<sup>۹</sup> ۱۳۸۹). هدف از این تحقیق مقایسه دو روش شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی در برآورد رسوبات معلق در رودخانه سفیدرود استان گیلان می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

سفیدرود یکی از رودخانه‌های مهم حوزه البرز است که از ارتفاعات کردستان و نیز قزوین سرچشمه می‌گیرد و به دریای خزر می‌ریزد. شکل (۱) موقعیت بخشی از زیر حوضه سفیدرود را نشان می‌دهد. از آنجاکه رودخانه سفیدرود از پیوستن دو رودخانه سیاه رود و قزل‌اوزن تشکیل می‌شود بخشی از حوضه که در محدوده رودخانه سیاه‌رود است مورد توجه قرار گرفته است. مساحت حوزه آبریز در بخش مورد اشاره در تحقیق ۱۲۴۴ کیلومترمربع است. برداشت داده‌ها از ایستگاه رودبار در حاشیه سد سفیدرود اشاره در تحقیق ۱۲۴۴ کیلومترمربع می‌باشد. برداشت داده‌ها از ایستگاه رودبار در حاشیه سد سفیدرود بوده است و آمار موردنیاز از اداره آبفا استان گیلان تهیه شده است.

برآورد بار رسوبی در رودخانه‌ها یکی از بنیادی‌ترین مسائل مطالعات مربوط به انتقال رسوب است که باوجود تلاش‌هایی که محققین انجام داده‌اند، هنوز روش جامع و دقیقی برای محاسبه دقیق آن ارائه نگردیده است. هنگامی که سدی در مسیر یک رودخانه احداث می‌شود، به دلیل کاهش سرعت جریان، به‌جا ماندن تمامی یا بخشی از رسوب در مخزن غیرقابل اجتناب است. اطلاع از حجم رسوب و چگونگی توزیع آن در مخزن سد، می‌تواند بر طول عمر مفید سد و طراحی سازه‌های هیدرولیکی وابسته، تأثیرگذار باشد. تخمین رسوب منتقل شده توسط رودخانه‌ها یکی از مشکلات اساسی در طرح‌های آبی است. در حال حاضر بسیاری از سدهای کشور با مشکل پر شدن پیش از موعد مخازن مواجه هستند. گزارشی که در مورد رسوب‌گذاری در سد سفیدرود منتشر شده است نشان می‌دهد که در هفدهمین سال بهره‌برداری، رسوبات ورودی، نزدیک به نیمی از حجم مخزن را اشغال کرده است (احمدی<sup>۱</sup> ۱۳۹۰). همچنین در سد شهید عباسپور تخمین اولیه برای رسوب ورودی به مخزن در طی هفت سال اول بهره‌برداری از این سد، نشان می‌دهد که سالیانه به‌طور متوسط، ۳۸ میلیون مترمکعب رسوب‌گذاری رخ داده است (وزارت نیرو<sup>۲</sup> ۱۳۹۰). برای تخمین رسوب، روش‌های زیادی پیشنهاد شده است ولی عدم وجود روش‌های دقیق تخمین رسوب، محققان را به استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه عصبی-مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی هدایت کرده است (عبداله پورآزادوستاری<sup>۳</sup> ۱۳۹۳). در دهه اخیر استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی، تغییرات شگرفی داشته و تأثیر موفقیت‌آمیزی در بسیاری از زمینه‌ها از جمله مهندسی منابع آب داشته است (یکتا و سلطانی<sup>۴</sup> ۱۳۸۵).

منطق فازی تاکنون در زمینه پیش‌بینی سیلاب، مسائل کیفیت آب، مدیریت آبخیز، فرآیند بارش و فرسایش خاک نیز به کار رفته است (نائینی و همکاران<sup>۱۳۸۸</sup>). استفاده از روش‌های هیدروانفورماتیک برای محاسبات رسوب به تدریج رو به گسترش است که از آن جمله می‌توان به استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در محاسبه رسوب معلق رودخانه‌ها

<sup>۵</sup>. Achite and Ouillon

<sup>۶</sup>. Amutha and Porchelvan

<sup>۷</sup>. Dastorani and Afkhami

<sup>۸</sup>. Issazadeh and Govay

<sup>۹</sup>. Aselmen

<sup>۱</sup>. Ahmadi

<sup>۲</sup>. Power ministry

<sup>۳</sup>. Apdullahpour Azad and Sattari

<sup>۴</sup>. Yekta and Soltani

لایه‌ای می‌باشد که در آن‌ها پردازش انجام می‌شود. شبکه می‌تواند یک یا بیشتر از یک‌لایه میانی داشته باشد. تعداد این لایه‌ها و تعداد گره‌ها در هر لایه توسط طراح و اغلب طی فرآیند آزمون و خطا بدست می‌آید.

### لایه خروجی:

در این لایه، خروجی‌ها به دنیای خارج متصل می‌شوند و در آن بردارهای خروجی، نگاشت و استقرار می‌یابند.

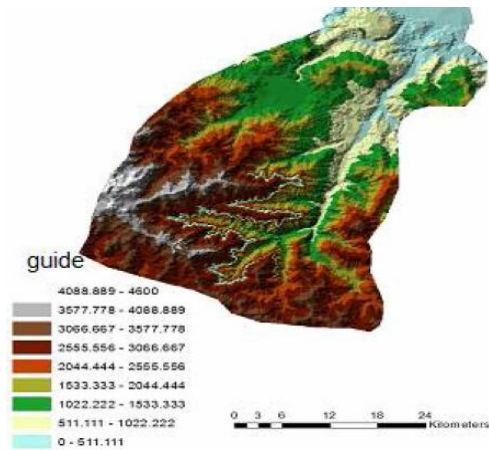
در آموزش شبکه‌های عصبی و سیستم استنتاج فازی نرمال‌سازی داده‌ها قبل از استفاده در مدل الزامی است. این عمل خصوصاً وقتی دامنه تغییرات ورودی‌ها زیاد باشد کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. اصولاً وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. برای کار با این نرم‌افزار نیاز است تا داده‌ها استاندارد شود یعنی تبدیل داده‌ها به اعدادی بین ۰ و ۱ است. در سال‌های اخیر از ترکیب منطق فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی-عصبی به وجود آمده‌اند. سیستم حاصل یک شبکه تطبیقی و یک ساختار پیشرو چندلایه است که رفتار کلی خروجی آن به وسیله مقدار یک مجموعه از پارامترهای قابل اصلاح تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر ساختار شبکه تطبیقی شامل یک مجموعه از گره‌های متصل به هم است که به طور مستقیم به هم مرتبط شده‌اند و در آن هر گره یک واحد پردازش محسوب می‌شود. برای آنکه بتوان جواب بهتری از شبکه عصبی مصنوعی گرفت لازم است داده‌ها نرمال و استانداردسازی شوند تا اعداد در محدوده ۰ و ۱ قرار بگیرند. برای نرمال کردن از نرم‌افزار Minitab و برای استاندارد کردن داده‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$X_n = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

### سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی در تخمین

#### میزان رسوب:

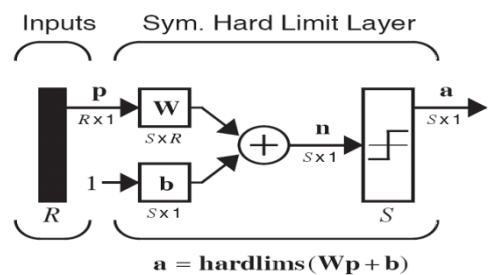
منطق فازی برای اولین بار توسط دکتر لطفی عسگرزاده (۱۹۶۵) ابداع شد. تحقیقات نسبتاً زیادی در مورد کاربرد سیستم‌های فازی در علوم مهندسی صورت گرفته است. از کارهای انجام شده در زمینه مهندسی سازه‌های هیدرولیکی و آب با استفاده از سیستم‌های فازی می‌توان به مواردی همچون پیش‌بینی دبی سیلاب، پیش‌بینی عمق آب شستگی، مدل‌سازی خشک‌سالی، مدیریت مخازن آب، برآورد رسوب، پیش‌بینی هوا، فرآیند بارش-روان آب و پیش‌بینی



شکل (۱): موقعیت زیرحوزه رودخانه سفیدرود در بخش سیاه‌رود

### سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی

در این تحقیق نوع شبکه استفاده شده، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه با الگوریتم پس انتشار خطا است و سیستم استنتاج فازی-عصبی یک ساختار پیشرو چندلایه است که رفتار کلی خروجی آن به وسیله مقدار یک مجموعه از پارامترهای قابل اصلاح تعیین می‌گردد. شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی اساساً توسط یک سری محدود از داده‌های واقعی آموزش می‌بینند (رضایی و فریدونی<sup>۱</sup>، ۱۳۹۴). چنانچه پارامترهای مؤثر بر پدیده مورد بررسی به صورت صحیح انتخاب و به شبکه داده شوند می‌توان انتظار داشت که جواب‌های منطقی از شبکه دریافت نمود که شامل قسمت‌های شکل (۲) است:



شکل (۲): ساختمان شبکه عصبی استفاده شده در تحقیق

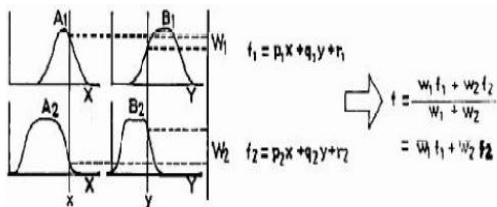
#### لایه ورودی:

در این لایه، ورودی‌ها به دنیای خارج متصل شده‌اند. این لایه اساساً یک‌لایه کشنده است که در آن ورودی‌ها پس از دریافت به گونه‌ای ساده به لایه بعدی شبکه متصل شده‌اند. در این لایه هیچ پردازشی صورت نمی‌گیرد.

#### لایه پنهان:

<sup>۱</sup>. Rezaei and Fereydooni

محاسبات دانست. سیستم استنتاج فازی قادر به دریافت ورودی‌ها به دو صورت فازی و قطعی است، اما خروجی آن در اکثر موارد به صورت مجموعه‌های فازی است. در کاربردهای عملی اغلب لازم است که خروجی به صورت قطعی مشخص شده باشد. بدین منظور لازم است مرحله‌ای در مدل‌سازی به نام غیرفازی نیز در نظر گرفته شود. شکل (۳) ساختار یک سیستم استنتاج فازی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): سیستم استنتاج فازی

### مدل فازی (سوغنو) Sugeno:

مدل فازی Sugeno که توسط Sugeno, Takagi و Kang معرفی شده و به عنوان مدل فازی TSK نیز شناخته شده است، سعی در ایجاد و توسعه یک روش اصولی برای تولید قواعد فازی از مجموعه مشخصی از داده‌های ورودی-خروجی دارد. این سیستم یکی از متداول‌ترین سیستم‌های عصبی-فازی است این سیستم برای فرآیند آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش پس انتشار خطا و کمینه مربعات خطا بهره‌گیری می‌کند. سیستم سوگنو برای فرآیند آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش پس انتشار خطا و کمینه مربعات خطا بهره‌گیری می‌کند (رضا پور و همکاران<sup>۱</sup> ۱۳۹۰).

مفهوم کلی یک قاعده فازی سوگنو در این مدل به شکل زیر است:

اگر  $X$  برابر  $A$  و  $Y$  برابر  $B$  باشد آنگاه  $Z=f(X,Y)$  که در آن  $A$  و  $B$  مجموعه‌های فازی در بخش مقدم و  $Z=f(x,y)$  یک تابع قطعی در بخش تالی می‌باشد.  $f(x,y)$  معمولاً به صورت یک چندجمله‌ای برحسب متغیرهای ورودی  $X$  و  $Y$  بیان می‌شود. در کاربردهای عملی و به منظور کاهش بار محاسباتی اضافی، به خصوص در مرحله آموزش سیستم استنتاج فازی، عملگر میانگین وزنی ( $w$ ) توسط عملگر جمع وزنی،  $Z=w_1Z_1 + w_2Z_2$ ، جایگزین می‌شود؛ اما این ساده‌سازی می‌تواند منجر به کاهش معانی زبانی توابع عضویت شود، مگر در شرایطی که مجموع وزنی قواعد،  $\sum I W_i$ ، به مقدار واحد نزدیک باشد.

جریان رودخانه اشاره کرد. به طور کلی یک سیستم فازی از سه بخش فازی‌سازی، سیستم استنتاج فازی و غیرفازی‌سازی تشکیل شده است. با توجه به اینکه در اغلب کاربردها، ورودی و خروجی سیستم فازی اعداد حقیقی هستند، لازم است واسطه‌هایی بین سیستم استنتاجی فازی و محیط به وجود آید. این واسطه‌ها همان فازی‌سازها و غیرفازی‌سازها می‌باشند. عمل فازی‌سازی با استفاده از توابع عضویت انجام می‌گیرد. تابع عضویت مقدار فازی بودن یک کمیت را مشخص می‌کند و در واقع میزان درجه عضویت المان‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد که این میزان تعلق به این مجموعه با عددی بین صفر تا یک مشخص می‌شود. غیرفازی‌سازی در واقع عکس عمل فازی‌سازی است و نتایج حاصل از استنتاج فازی را که به صورت فازی، یعنی اعدادی بین صفر و یک است را به اعداد حقیقی تبدیل می‌کند. در واقع مفهوم اعداد فازی از این واقعیت سرچشمه می‌گیرد که بسیاری از پدیده‌های کمی به وسیله‌ی یک عدد مطلق و بدون ابهام قابل بیان نیستند. یک عبارت فازی به این معنا است که مقادیر اطراف عدد نیز در مفهوم فازی مذکور، شامل می‌شوند؛ یعنی اعداد پیرامون مقدار مرکزی با درجه عضویت کمتری نسبت به این مقدار با آن تطابق دارند.

به طور کلی اعداد فازی دسته‌ای از مجموعه‌های فازی هستند که دارای ویژگی‌های زیر می‌باشند:

- نرمال می‌باشد.
- تابع عضویت آن‌ها به طور قطعه‌ای پیوسته است.
- روی اعداد حقیقی تعریف می‌شوند.
- تک‌نمایی می‌باشند یعنی تنها و تنها در یک نقطه مقدار عضویت به یک می‌رسد.

شرط تک‌نمایی بودن بیان می‌کند که تنها در یک نقطه اندازه‌ی عضویت یک است. اگر این شرط حذف شود به تعریف بازه‌های فازی رسیده می‌شود. در این حالت در بیش از یک نقطه مقدار عضویت یک است. اعداد فازی می‌توانند نماینده پارامترها، کمیت‌های نادقیق مسائل و مدل‌های ریاضی در مهندسی می‌باشند. این اعداد عدم قطعیت موجود در تعیین این پارامترها را با شکل‌های خود نشان می‌دهد. در اکثر موارد بعد از انجام عملیات جبری و توابع فازی لازم است که عدد فازی حاصل، به یک عدد حقیقی تبدیل شود تا بتوان مقایسه‌ای بین محاسبات معمولی و فازی انجام داد. فرآیند غیرفازی‌سازی یک عدد حقیقی معمولی را به دست می‌دهد که می‌توان آن را نماینده‌ی عدد فازی حاصل از

<sup>۱</sup>. Rezapou et al.

جهت رسیدن به ساختار مناسب شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌های مختلف با تعداد لایه مخفی و تعداد گره‌های مختلف طراحی و آزمون شده و نتایج مربوطه مورد مقایسه قرار گرفت. شبکه‌ای که کمترین میزان خطا را داشته باشد، به‌عنوان بهترین شبکه انتخاب می‌شود. معیار انتخاب شبکه RMSE و R است. سعی و خطای انجام‌شده جهت انتخاب بهترین شبکه در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول (۲) مشخص است، انتخاب تعداد متفاوت گره‌ها در لایه میانی تأثیر قابل توجه روی کیفیت نتایج مدل داشته است به طوری که به‌عنوان مثال مقادیر R از حدود ۰/۷۳ در مدل با ۵ گره به حدود ۰/۸۳ در مدل با ۳ گره افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش قابل ملاحظه صحت نتایج با تغییر تعداد گره در لایه میانی از ۵ به ۳ است.

جدول (۲): مشخصات تعدادی از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بررسی شده جهت انتخاب ساختار مناسب شبکه

تعداد لایه پنهان	تعداد گره	تعداد دور	مرحله	ضریب رگرسیون	میانگین خطای مربعات
۲	۱	۲۰۰۰	آموزش	۰/۷۴	۰/۱۷۱
			آزمون	۰/۷۱	۰/۲۱
۲	۲	۲۰۰۰	آموزش	۰/۸۴	۰/۱۷۵
			آزمون	۰/۷۴	۰/۱۹۵
۲	۲	۳۰۰۰	آموزش	۰/۸۸	۰/۱۵
			آزمون	۰/۷۸	۰/۱۹
۲	۳	۲۰۰۰	آموزش	۰/۸۶	۰/۱۵
			آزمون	۰/۸	۰/۱۹
۲	۳	۳۰۰۰	آموزش	۰/۹۲	۰/۱۴
			آزمون	۰/۸۳	۰/۱۸
۲	۴	۲۰۰۰	آموزش	۰/۷۵	۰/۱۶۸
			آزمون	۰/۷۵	۰/۱۵
۲	۵	۲۰۰۰	آموزش	۰/۸	۰/۱۷
			آزمون	۰/۷	۰/۲

لازم به ذکر است که تعداد مناسب لایه پنهان دو عدد بوده و تعداد دورها جهت رسیدن به نتیجه نهایی از ۲۰۰۰ به ۳۰۰۰ متفاوت بوده است. در رابطه با تعداد گره‌ها (نورون‌ها) در لایه‌های پنهان مشخص گردید که بهترین حالت در زمانی است که تعداد گره‌ها در لایه پنهان ۳ گره باشد. در شکل (۴) می‌توان تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی را در حالتی که اعداد به‌صورت استاندارد شده و عادی می‌باشند مشاهده کرد. همان‌گونه که شکل (۴) نشان می‌دهد شبکه عصبی نقطه اوج اصلی را به مراتب بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است. در سایر نقاط اوج نیز شبکه عصبی

ساختار نهایی شبکه عصبی مورد استفاده برای این تحقیق نوع پرسپترون چندلایه و متد آموزشی پس انتشار خطا انتخاب گردید و مدل نهایی سیستم استنتاج فازی-عصبی مورد استفاده برای این تحقیق مدل ANFIS می‌باشد که یکی از متداول‌ترین سیستم‌های عصبی-فازی است.

### اجرای شبکه:

برای آموزش شبکه ابتدا تعدادی از داده‌ها که معرف شرایط مسئله باشد را برای آموزش انتخاب کرده و بقیه داده‌ها جهت آزمون عملکرد شبکه آموزش دیده به کار می‌رود. در نتیجه از تعداد ۲۲۹ داده موجود ۱۸۲ داده به‌عنوان داده‌های آموزشی و ۴۷ داده برای آزمون بکار برده شده است. در جدول (۱) پارامترهای آماری مربوط به رودخانه سفیدرود نشان داده شده است. آمار دبی رسوب رودخانه مذکور از اداره آبغای گیلان شهر رشت و سازمان آب منطقه‌ای استان تهیه گردیده و مورد استفاده تحقیق قرار گرفته است. برای مقایسه نتایج شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. بر اساس تعداد کل داده‌های موجود (سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۶۶)، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمون شبکه اختصاص داده شده است.

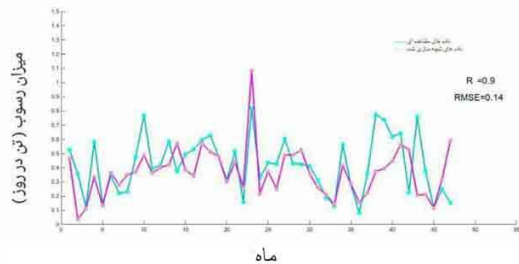
لازم به ذکر است بهترین شبکه، شبکه‌ای است که کمترین خطا را مخصوصاً در مرحله آزمون مدل داشته باشد.

در این پژوهش مدل شبکه عصبی مصنوعی بر اساس مدل سه لایه پیش خور با الگوریتم پس انتشار خطا و سیستم استنتاج فازی-عصبی نوع سوگنو استفاده شد و در آخر برای تعیین معیارهای خطا و همبستگی برای انتخاب مدل نهایی از آموزش و آزمون شبکه انتخاب شده است. از آنجاکه دبی سیلابی رودخانه تنها در برخی مواقع از سال رخ می‌دهد، پارامترهای آماری مربوط به داده‌های رسوب (تن در روز) برحسب میانگین دبی متوسط روزانه رودخانه در نظر گرفته شده‌اند و سپس از جمع میانگین روزانه مقدار ماهانه رسوب تعیین شده است.

جدول (۱): پارامترهای آماری مربوط به داده‌های رسوب (تن در روز)

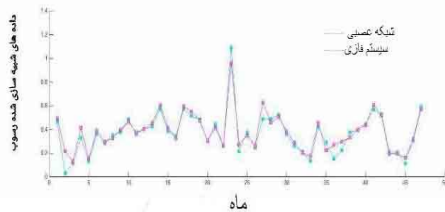
نوع داده‌ها	متوسط ط	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب تغییرات	ضریب چولگی
داده‌های آموزشی رسوب	۷۳/۷۹	۲۲۴۴/۷	۰/۱۸	۵۴/۲۵۸	۳/۵۰	۰/۷۵۷
داده‌های آزمون رسوب	۵۳/۲۵	۵۷۱/۸۴	۰/۳۱	۷۱/۱۲۳	۲/۳۲	۱/۱۱۹

### نتایج و بحث

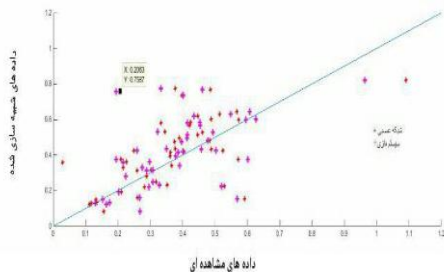


شکل (۵): مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی در حالت استاندارد شده توسط سیستم استنتاج فازی-عصبی در مرحله ارزیابی مدل

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی همان‌گونه که شکل‌های (۶) و (۷) نشان می‌دهند، نشان‌دهنده آن است که استفاده از منطق فازی باعث کاهش خطای پیش‌بینی رسوب به میزان فراوان، می‌شود و با توجه به نتایج بدست آمده، مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی در پیش‌بینی رسوب در شبکه از قابلیت بهتری برخوردار است.



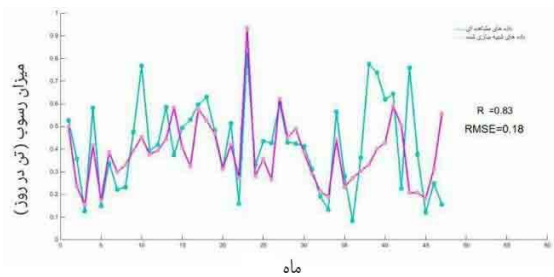
شکل (۶): مقایسه روش شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی



شکل (۷): مقایسه پراکنش روش شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی

مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی به داده‌های واقعی غلظت رسوب نزدیک‌تر هستند و ضریب همبستگی حاصل از سیستم استنتاج فازی-عصبی معادل ۹۰ درصد می‌باشد. این در حالی است که ضریب همبستگی برای مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی معادل ۸۳ درصد طبق جدول (۴) است.

برآوردی کمتر و یا بیشتری از مقادیر مشاهده‌ای دارد که این می‌تواند یکی از ضعف‌های شبکه عصبی در برآورد رسوبات معلق باشد.



شکل (۴): مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی در حالت استاندارد شده توسط شبکه عصبی مصنوعی در مرحله ارزیابی مدل

برای سیستم فازی-عصبی سعی و خطای انجام شده جهت انتخاب بهترین شبکه در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به ارقام بدست آمده در جدول (۳) به نظر می‌رسد در بین محدوده تغییرات مختلف روش فازی-عصبی، الگوی دوم به بعد با  $R=0.14$  و  $RMSE=0.09$  در مرحله آزمون به‌عنوان بهترین محدوده و محدوده اول با  $R=0.15$  و  $RMSE=0.085$  به‌عنوان محدوده ضعیف شناخته می‌شود. در شکل (۵) می‌توان تفاوت مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی را در حالتی که اعداد به‌صورت استاندارد شده و عادی می‌باشند مشاهده کرد. همان‌گونه که شکل (۵) نشان می‌دهد سیستم استنتاج فازی تطابق بیشتری با مقادیر واقعی دارد.

جدول (۳): مشخصات تعدادی از مدل‌های سیستم استنتاج فازی-عصبی بررسی شده جهت انتخاب ساختار مناسب شبکه

محدوده تغییرات	مرحله	ضریب رگرسیون	میانگین خطای مربعات
۰/۱۲	آموزش	۰/۸۸	۰/۱۲
۰/۱۵	آزمون	۰/۸۵	۰/۱۵
۰/۲۵	آموزش	۰/۹۳	۰/۱۱
۰/۱۴	آزمون	۰/۹	۰/۱۴
۰/۲۷	آموزش	۰/۹۳	۰/۱۱
۰/۴	آموزش	۰/۹۳	۰/۱۱
۰/۴	آموزش	۰/۹۳	۰/۱۱
۰/۴	آزمون	۰/۹	۰/۱۴

جدول (۴): مقایسه مدل‌های سیستم استنتاج فازی-عصبی و شبکه عصبی مصنوعی بررسی شده جهت انتخاب ساختار مناسب شبکه

تعداد لایه پنهان	تعداد گره	تعداد دور	محدوده تغییرات	مرحله	ضریب رگرسیون خطای مربعات	میانگین
شبکه عصبی مصنوعی	۲	۳	۳۰۰۰	آموزش	۰/۹۲	۰/۱۴
				آزمون	۰/۸۳	۰/۱۸
سیستم استنتاج فازی	-	-	-	آموزش	۰/۹۳	۰/۱۱
				آزمون	۰/۹	۰/۱۴

#### نتیجه

در تحقیق حاضر شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی به‌عنوان روش‌های مؤثر جهت تخمین مقدار رسوب معلق به کار گرفته شد بررسی داده‌ها توسط ارائه اطلاعات و پردازش آن‌ها به کمک برنامه **MATLAB** انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که پیش‌بینی غلظت بار معلق رسوب حاصل از سیستم استنتاج فازی-عصبی به داده‌های واقعی نزدیک‌تر است. ضریب همبستگی حاصل از سیستم استنتاج فازی-عصبی معادل ۹۰ درصد حاصل شده است. این در حالی است که ضریب همبستگی برای مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی معادل ۸۳ درصد می‌باشد. مقایسه سیستم استنتاج فازی-عصبی با شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد که سیستم استنتاج فازی-عصبی تطابق بهتری در پیش‌بینی بار معلق رسوب دارد.

#### سپاسگزاری

مؤلفان این مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان به دلیل در اختیار گذاشتن امکانات برای انجام تحقیق کمال تقدیر و تشکر را می‌نمایند.

#### مراجع

- تطبیقی (ANFIS) ". مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک: ۳: ص ۳۷-۴۲.
- وزارت نیرو، "بانک آمار و اطلاعات ایستگاه‌های آب و هواشناسی کشور"، (۱۳۹۰)، دفتر مطالعات پایه منابع آب (تماب سابق).
- یکتا الف و سلطانی ف، (۱۳۸۵)، "تخمین رسوبات معلق رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های ANN و ANFIS و منحنی سنجه". هفتمین سمینار مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز. ص ۳۸۴-۳۷۵
- Achite, M. Ouillon, S. (2007).Suspended sediment transport in a semiarid watershed, *J. Hydro.* 84: pp187-202.
- Amutha, R.Porchelvan, P.(2011). Seasonal Prediction of Ground Water Levels Using Anfis and Radial Basis Neural Network, *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences.*7(3): pp34-56
- Asselman, N.E.M.(2000).fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234(3-4): pp228-248.
- Dastorani, M.T., Afkhami. D.(2011). Evaluation of the application of artificial neural networks on drought prediction in Yazd (Iran), *Journal of Desert*, 16 (1): pp39-49.
- Issazadeh, L.Govay, B.(2014).Reservoir Sediment Prediction in Duhok Dam Using Artificial Neural Network and Conventional Methods.*Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences.*4: pp56-67.
- Naeini, S.T. M. Montazeri Namin, M. Mohammad Zamani and F. Soltani. (2008). Sensitivity analysis of the artificial neural networks activation functions in suspended sediment prediction, *4th Iran national civil engineering conference, TehranUniversity.* 6199 pp.
- Rezaei, M. Fereydooni, M.(2015).comparative evaluation of adaptive neuro-fuzzy inference system (Anfis) and artificial neural network (ANN) in simulation of suspended sediment load. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences.*6 pp78-86.

- احمدی، م، (۱۳۹۱)، "برآورد رسوب رودخانه‌ها از طریق RBF و MLP". یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ایران.
- عبداله پورآزاد، محمدرضا، ستاری، محمدتقی، (۱۳۹۳)، "پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه اهرچای با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه آن با سیستم استنتاج فازی-عصبی