دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بررسی امکان کاربرد سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) در برآورد بار رسوب معلق بابل‌رود

عیسی کیا[۱]، علیرضا عمادی[۲] و رامین فضل اولی[۳]

۱ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (نویسنده مسوول: emadia355@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱/۲۷

چکیده

برآورد بار رسوبی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در مدیریت رودخانه‌ها و مخازن سدها و به طور کلی در پروژه‌های آبی اهمیت بسزائی دارد. تعداد روابط تجربی ارائه شده نشان می‌دهد هنوز روش تحلیلی یا تجربی مناسبی برای تخمین صحیح بار رسوب معلق پیشنهاد نشده است. در پژوهش حاضر، به منظور دستیابی به تخمینی نزدیک به واقعیت از میزان حمل رسوبات ایستگاه قرآن تالار بابل‌رود، از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) به عنوان یکی از روش‌های هوش مصنوعی استفاده شده است. ابتدا، ترکیبات مختلفی بر حسب دبی‌های با تأخیر زمانی به عنوان پارامترهای ورودی و دبی رسوب معلق به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. سپس با آموزش شبکه و تعیین ساختار مطلوب بر اساس نوع، تعداد تابع عضویت و قوانین مربوطه به کمک نرم‌افزار MATLAB، مناسب‌ترین مدل بر اساس شاخص‌های آماری؛ میانگین مربعات خطا، کارآیی مدل و ضریب تبیین بدست آمد. در نتیجه، ورودی با ترکیب یک بعدی دارای سیستم استنتاج سوگنو با دو تابع عضویت مثلثی به عنوان مناسب‌ترین مدل معرفی گردید و با نتایج حاصل از روش منحنی سنجه رسوب مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت نتایج نشان داد که روش ANFIS (MSE=۰/۰۸، EF=۰/۷۸ و R^2=۰/۷۲) از صحت و دقت بالاتری نسبت به منحنی سنجه (MSE=۰/۱۶، EF=۰/۵۷ و R^2=۰/۷۳) برخوردار است و عملکرد بهتری در برآورد بار رسوب معلق دارد.

واژه‌های کلیدی: بابل‌رود، بار معلق، تابع عضویت، فازی- عصبی، منحنی سنجه، ANFIS

مقدمه

پدیده رسوب یکی از عوامل ایجاد بحران کمی و کیفی آب‌های سطحی بوده به طوری که حجم رسوبات، نه تنها حجم آب خالص ورودی به مخازن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه با گذشت زمان از حجم مخازن و سدها می‌کاهد (۱۴). به طور کلی رسوباتی که همراه با آب حرکت می‌کنند به سه دسته بار بستر، بار معلق و بار شسته تقسیم می‌شوند. برآورد صحیح بار رسوب معلق که یک جریان مشخص قادر به حمل آن است یکی از موضوعات اصلی تحقیقات رسوب می‌باشد که در بسیاری از پروژه‌های مهندسی همچون برنامه‌ریزی و طراحی منابع ذخیره آب، مورفولوژی، تغییرات بار معلق رودخانه، برآورد بار معلق سالانه برای آبگیرهای رودخانه، طراحی و نگهداری کانال‌های آبیاری پایدار، حفاظت سواحل و لایروبی کانال‌ها حائز اهمیت است (۱). برای برآورد بار معلق روش‌های مختلفی وجود دارد، اما هنوز روش تحلیلی یا تجربی مناسبی که بر اساس آن بتوان به تخمین درستی از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان دست یافت ارائه نشده است (۶). یکی از رویکردهای تخمین دبی رسوب، استفاده از مدل‌های ریاضی با توجه به مفاهیم فیزیکی انتقال ذرات و حل معادلات هیدرودینامیک رسوب به همراه حل میدان جریان است. با توجه به این که معمولاً این مدل‌ها به داده‌های متنوع هیدرولیکی نیازمند بوده و در اکثر موارد چنین داده‌هایی به اندازه کافی یافت نمی‌شوند، محققان روشی موسوم به منحنی سنجه رسوب را پیشنهاد نموده‌اند (۱۱). در این روش، با برازش یک تابع مناسب توانی بین داده‌های همزمان اندازه‌گیری شده دبی جریان و دبی رسوب در ایستگاه هیدرومتری، رابطه بین آنها محاسبه و بر اساس آن، مقادیر رسوبات حمل شده تعیین می‌گردد. اما این روش نیز توان تفکیک ویژگی‌های خاص داده‌های جمع‌آوری شده را نداشته و از این جهت نه تنها برآورد چندان دقیقی از میزان حمل رسوبات ارائه نمی‌دهد، بلکه امکان بررسی تغییرات زمانی رسوب حمل شده توسط جریان در آنها وجود ندارد (۱۳). رویکرد دیگری که در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی از جمله سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) است که در مدل‌سازی فرآیندهایی همچون هیدرولوژی و هیدروژئولوژی، مدیریت مخازن و برآورد بار رسوب معلق بسیار قدرتمند می‌باشد.

نظام خیاوی و همکاران (۱۳)، مدلی در ANFIS بر اساس قواعد منطق فازی با ساختار دبی رودخانه در ماه جاری و دبی رسوب در ماه قبل به عنوان داده‌های

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

ورودی و دبی رسوب به عنوان داده خروجی برای تخمین بار معلق رسوب رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل معرفی کردند که در مقایسه با روش‌های کلاسیک و شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهتری داده است.

رجائی و همکاران (۱۵)، عملکرد مدل‌های شبکه عصبی، نروفازی، رگرسیون چند متغیره و منحنی سنجه را در پیش‌بینی آورد رسوب دو ایستگاه اندازه‌گیری رودخانه سیاه کوچک و نمک در ایالت میسیوری آمریکا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد مدل نروفازی از کارآیی بهتر و دقت بالاتری نسبت به بقیه مدل‌ها برخوردار است.

کیسی (۷) با بهره‌گیری از تکنیک فازی- عصبی، شبکه عصبی، رگرسیون چند متغیره و منحنی سنجه، بار معلق روزانه را در دو ایستگاه کوئبرادا بلانکا و ریو والنسیانو آمریکا برآورد نمود. در این بررسی از دبی جریان روز جاری و روز قبل و دبی رسوب روز قبل به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد و بر اساس آن، چهار مدل مختلف تعریف و دبی رسوب روز جاری به‌عنوان خروجی از مدل استخراج گردید. نتایج حاکی از برتری مدل فازی- عصبی نسبت به سایر روش‌ها بوده است.

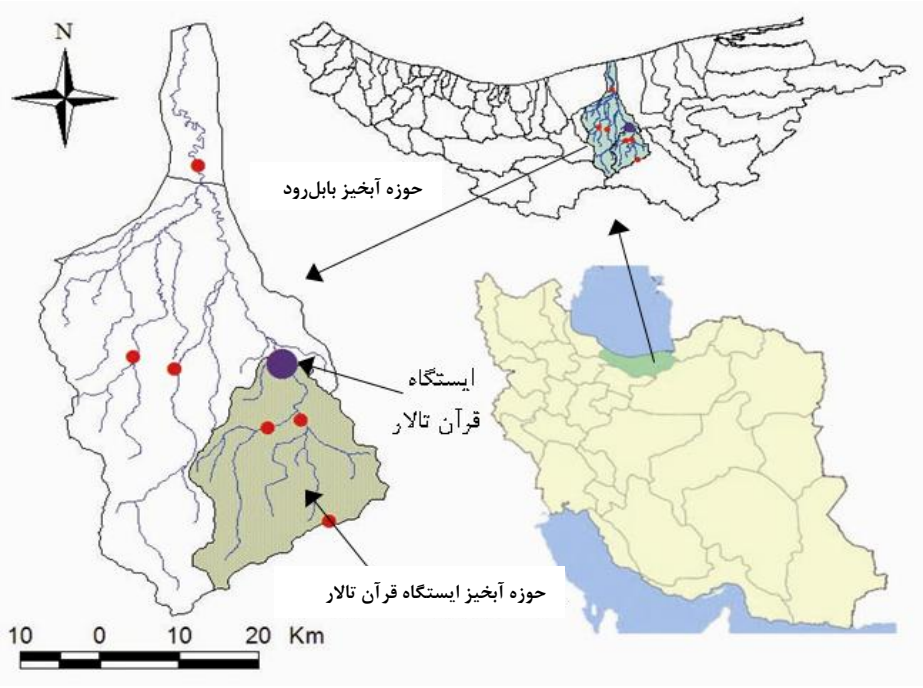
کیسی و همکاران (۹)، دقت تکنیک محاسباتی ANFIS در برآورد بار معلق ماهانه دو ایستگاه در حوزه کیزیلیرمارک کشور ترکیه را مورد بررسی دادند. نتایج نشان داد که این روش عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و منحنی سنجه رسوب داشته است.

با توجه به عدم قطعیت‌ها و غیرخطی بودن رابطه بین دبی آب و دبی رسوب و نداشتن کارآیی روش‌های سنتی منحنی سنجه رسوب، در این پژوهش با بهره‌گیری از شبکه نروفازی (ANFIS) بار معلق رودخانه بابل‌رود در ایستگاه قرآن تالار برآورد و با روش منحنی سنجه رسوب مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

بابل‌رود با حوزه آبخیزی به وسعت بیش از ۴۵۰ کیلومتر مربع از دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و در بخش کوهستانی با شیب قابل ملاحظه‌ای جریان دارد. این رودخانه با ورود به پهنه ساحلی خزر (قرآن‌کلا و امیرکلا) بدلیل شیب اندک به صورت پیچان‌رود به جریان خود ادامه می‌دهد (۱۰). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران و ایران

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

در این پژوهش، ابتدا داده‌های روزانه دبی جریان و دبی رسوب شش ایستگاه هیدرومتری واقع بر رودخانه مورد مطالعه از شرکت آب منطقه‌ای مازندران جمع‌آوری و پس از بررسی، تنها ایستگاه قرآن تالار به دلیل داشتن آمار متوالی و طولانی مدت ۲۳ ساله، از سال آبی ۵۷-۱۳۵۶ تا ۷۹-۱۳۷۸، مناسب تشخیص داده شد. قبل از هرگونه اقدام برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، به منظور اطمینان از کیفیت، همگنی و کامل‌بودن سری آماری، تست همگنی داده‌ها از آزمون ران تست، کفایت داده‌ها از روش ماکوس و برای رفع نواقص آماری از ضریب همبستگی بین ایستگاه‌های همجوار استفاده گردید. آنگاه داده‌ها به صورت تصادفی به دو قسمت، ۸۰ درصد برای آموزش شبکه و ۲۰ درصد برای آزمون و تعیین خطای مدل‌سازی تفکیک گردید. از آنجایی که در روش هوش مصنوعی، در صورت وجود اختلاف زیاد دامنه تغییرات داده‌های آموزش با داده‌های آزمون، پیش‌بینی ضعیف خواهد بود، بدین منظور برای گزینش آنها سعی شد داده‌ها به شیوه سعی و خطا طوری انتخاب شوند که از نظر معیارهای آماری، میانگین و انحراف معیار همانند یکدیگر باشند و مقادیر حدی در دسته آموزش واقع گردند. مشخصه‌های آماری داده‌های آموزش و آزمون در جدول ۱ درج شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های آماری داده‌های آموزش و آزمون

پارامترهای آماری	مرحله آموزش		مرحله آزمون	
	دبی جریان (m^3/s)	دبی رسوب (ton/day)	دبی جریان (m^3/s)	دبی رسوب (ton/day)
میانگین	۷/۰۰	۲۰۷/۹۱	۵/۳۴	۱۵۷/۳۱
حداکثر	۴۹/۲۵	۸۳۰۵/۲۹	۱۶/۰۰	۲۸۹۶/۵۸
حداقل	۰/۱۰	۰/۲۷	۰/۳۵	۵/۳۲
انحراف معیار	۷/۰۹	۶۸۱/۲۹	۳/۵۴	۳۴۴/۹۱
ضریب تغییرات	۱/۰۱	۳/۲۸	۰/۶۶	۲/۱۹

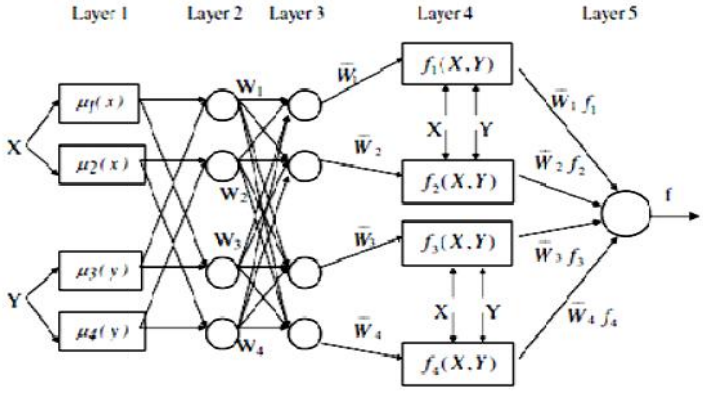
در نهایت برای ساخت مدل‌ها و تخمین دبی رسوب، ترکیبات زیر به عنوان ورودی شبکه ANFIS به کار گرفته شد.

۱. Q_t
۲. Q_{t-1}
۳. Q_{t-2}
۴. Q_{t-3}
۵. Q_{t-1} ، Q_t
۶. Q_{t-2} ، Q_{t-1} ، Q_t
۷. $Q_{s(t-1)}$ ، Q_t
۸. $Q_{s(t-1)}$ ، Q_{t-1} ، Q_t

که در آن، Q_t و $Q_{s\ (t)}$ به ترتیب دبی جریان و دبی رسوب معلق در زمان t می‌باشند. خروجی شبکه تنها شامل دبی رسوب روز جاری می‌باشد.

سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی

این روش برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط جانگ مطرح شد (۵). الگوریتم ساده‌ای از عملکرد و ارتباط بین لایه‌های آن در شکل (۲) آورده شده است (۲).



شکل ۲- شمای ساده‌ای از مدل ANFIS

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

ساختار ANFIS شامل پنج لایه است که به ترتیب شامل گره‌های ورودی، گره‌های قاعده، گره‌های متوسط، گره‌های نتیجه و گره‌های خروجی می‌باشند و به طور مستقیم با هم ارتباط دارند. هر گره دارای تابعی با پارامترهای قابل تنظیم یا ثابت است (۹).

ساختار مناسب تکنیک ANFIS متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع عضویت ورودی و خروجی انتخاب می‌گردد. در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند (۱۶).

تکنیک ANFIS از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی دارد. همچنین دارای این مزیت است که اجازه استخراج قوانین فازی را از اطلاعات عددی یا دانش متخصص می‌دهد و به طور تطبیقی یک قاعده- بنیاد می‌سازد. علاوه بر این، می‌تواند تبدیل پیچیده هوش بشری به سیستم‌های فازی را تنظیم کند (۱۳). قانون یادگیری آن بر پایه الگوریتم پس انتشار خطا[1] با نگرش بر حداقل کردن میانگین مربعات خطا بین خروجی شبکه و خروجی واقعی می‌باشد.

اکثر سیستم‌های استنتاج فازی شامل سه نوع، سیستم ممدانی، سیستم سوگنو و سیستم سوکاموتو می‌باشند که در بیشتر موارد از سیستم ممدانی استفاده می‌شود، اما سیستم سوگنو در محاسبات عملکرد بهتری دارد و از خروجی قطعی برخوردار می‌باشد (۹). بنابراین در این پژوهش با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، مدل‌سازی به روش ANFIS با بهره‌گیری از سیستم سوگنو انجام شد و تابع عضویت مطلوب از میان توابع مختلف مثلثی، ذوزنقه‌ای، زنگوله‌ای، گوسی، پی، گوسی نوع ۲ و سیگموئیدی و درجه عضویت مناسب آنها برای هر ترکیب ورودی از آزمون سعی و خطا بدست آمد. همچنین از الگوریتم یادگیری پیوندی[2] که ترکیبی از الگوریتم پس انتشار خطا و روش حداقل مربعات می‌باشد، برای آموزش و تطبیق با سیستم استنتاج فازی استفاده شده است.

در نهایت به‌منظور مقایسه مدل‌های مختلف در هر مرحله از معیارهای آماری میانگین مربعات خطا[3]، شاخص کارآیی مدل[4] و ضریب تبیین[5] که به صورت روابط (۱) تا (۳) می‌باشند، استفاده گردید.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{N} \qquad (۱)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \qquad (۲)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n} (P_i - \overline{P})^2 . \sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \qquad (۳)$$

که در این روابط، MSE، میانگین مربعات خطا، EF، شاخص کارآیی مدل، R^2 ضریب تبیین، P_i، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، O_i، مقادیر مشاهده شده (واقعی)، N، تعداد داده‌ها در هر بخش از مدل، $\overline{P}$، میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و $\overline{O}$، میانگین مقادیر مشاهده شده می‌باشد. بنابراین، هر مدلی که از مقدار MSE کمتر و از شاخص کارآیی مدل (دامنه تغییرات منفی بی‌نهایت تا یک) و ضریب تبیین نزدیک‌تر به یک برخوردار باشد، آن مدل نسبت به سایر مدل‌ها دقت بالاتری خواهد داشت (۸،۴،۳).

همچنین، جهت مقایسه دو روش منحنی سنجه رسوب و تکنیک ANFIS، بار کل رسوب که در مدیریت مخازن حائز اهمیت می‌باشد بر اساس مناسب‌ترین ترکیب ورودی این روش‌ها برای داده‌های مرحله آزمون برآورد گردید.

نتایج و بحث

از ۴۱۳ جفت داده اندازه‌گیری شده دبی جریان- دبی رسوب به‌صورت روزانه جهت ساخت مدل‌ها، ۳۳۸ داده (۸۰ درصد) جهت آموزش و ۷۵ داده (۲۰ درصد) جهت آزمون یا تست مدل و تعیین شاخص‌های آماری برای مقایسه هشت ترکیب ورودی استفاده شد. از آنجا که در روش ANFIS، توابع عضویت تنها مقادیر بین صفر و یک را به‌عنوان ورودی می‌پذیرند، داده‌های ورودی بر مبنای حداقل و حداکثر مقادیر مشاهداتی و با استفاده از رابطه زیر به مقیاس [۱ و ۰] تبدیل شده‌اند.

$$x_i' = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (۴)$$

که در آن دسته اطلاعات $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ به بازه مورد نظر نگاشته می‌شوند. x_{max} و x_{min} به ترتیب حداکثر و حداقل داده‌های ورودی می‌باشند (۱۲).

در تکنیک ANFIS، مسئله اصلی تعیین نوع تابع عضویت و درجه عضویت آنهاست که برای این امر راه حل مشخصی وجود ندارد و با بهره‌گیری از سعی و خطا، بهترین ساختار مدل تعیین می‌گردد. بدین منظور

1- Back Propagation
2- Hybrid Learning Algorithm
3- Mean of Square Error
4- Modeling Efficiency (EF)
5- Determination Coefficient

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

برای هر ترکیب ورودی، با بهره‌گیری از داده‌های آموزش و آزمون و انتخاب تابع عضویت ورودی و خروجی از میان توابع مختلف و درجه عضویت آنها، شبکه را اجرا کرده تا دبی رسوب تخمین زده شود. آنگاه با تعیین معیارهای آماری MSE، EF و R^2 بین داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده، بهترین ساختار شبکه بدست آمد که نتایج حاصل از آن به همراه نتایج روش مرسوم منحنی سنجه رسوب در ایستگاه مورد نظر در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش ANFIS و منحنی سنجه رسوب برای ایستگاه قرآن تالار

شماره ترکیب	ترکیبات مختلف ورودی مدل	ساختار مطلوب مدل		MSE	EF	R^2 آزمون
		تابع عضویت مناسب	تعداد توابع عضویت			
۱	Q_t	مثلثی	۲	۰/۰۸	۰/۷۸	۰/۷۲
۲	Q_{t-1}	گوسی	۲	۰/۳۳	۰/۱۰	۰/۰۸
۳	Q_{t-2}	ذوزنقه‌ای	۳	۰/۴۰	-۰/۱۶	۰/۰۱
۴	Q_{t-3}	گوسی	۶	۰/۳۹	-۰/۰۹	۰/۰۰
۵	Q_{t-1}، Q_t	زنگوله‌ای	۲	۰/۰۸	۰/۷۱	۰/۶۷
۶	Q_{t-2}، Q_{t-1}، Q_t	پی	۲	۰/۱۰	۰/۵۶	۰/۵۵
۷	$Q_{s(t-1)}$، Q_t	پی	۴	۰/۰۹	۰/۷۵	۰/۶۵
۸	$Q_{s(t-1)}$، Q_{t-1}، Q_t	پی	۲	۰/۰۸	۰/۶۴	۰/۵۶
۹	روش منحنی سنجه رسوب	-	-	۰/۱۶	۰/۵۷	۰/۷۳

برای منحنی سنجه رسوب، یک رابطه رگرسیونی از نوع توانی بین داده‌های همزمان دبی جریان و دبی رسوب برقرار کرده که رابطه بدست آمده به صورت رابطه (۵) می‌باشد.

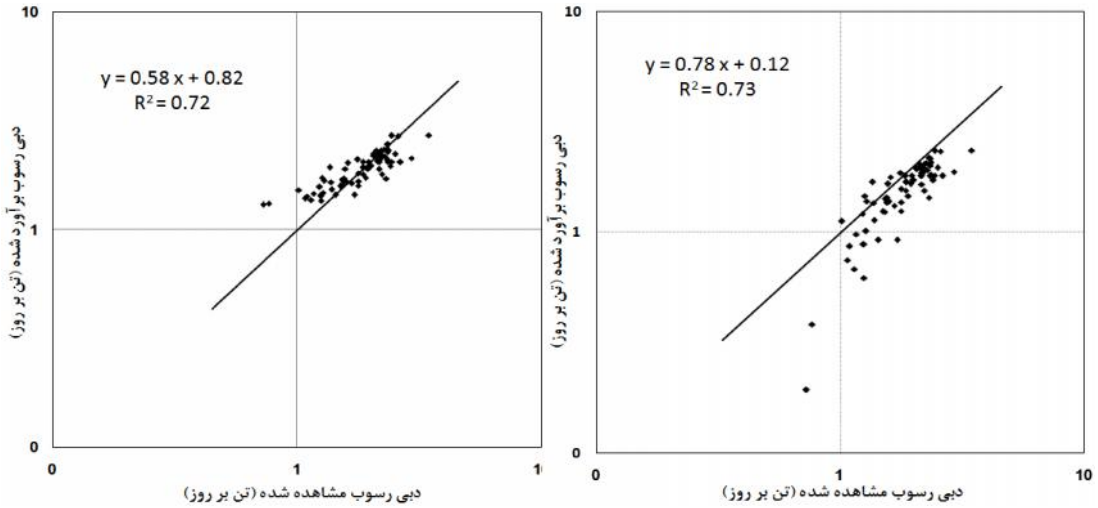
$$Q_s = 6.12 Q_w^{1.30} \quad (۵)$$

که در این معادله Q_s دبی رسوب و Q_w دبی جریان رودخانه است.

در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که ترکیبات ورودی ۲ تا ۴ یعنی استفاده از دبی جریان روز قبل تا سه روز قبل به‌عنوان ورودی برای تخمین رسوب روز جاری، از MSE بالاتر و EF و R^2 پائین‌تری نسبت به ترکیب اول برخوردارند و نشان‌دهنده آن است که رسوب هر روز با دبی همان روز رابطه بیشتری دارد و هرچه دبی مربوط به روزهای قبل‌تر باشد، همبستگی آن با رسوب همان روز کمتر است که منطقی به نظر می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزودن دبی و رسوب روزهای قبل‌تر به دبی روز جاری (ترکیبات ورودی ۴ تا ۸)، اگرچه مقدار MSE آنها با مقدار حاصله در ترکیب اول یعنی ۰/۰۸ تقریباً برابر می‌باشند، اما شاخص کارآیی مدل و ضریب تبیین آنها نسبت به ترکیب شماره اول کاهش یافته است. این مسأله بدین معناست که در سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی با افزایش ابعاد ورودی مدل از یک بعدی به دو و سه بعدی و حتی بالاتر، عملکرد مدل افزایش نیافته و مدل با ورودی یک بعدی بهتر جواب می‌دهد که با نتایج کیسی (۷) در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه کوئبرادا بلانکا و نیز سلاجقه و همکاران (۱۷) در ایستگاه چادز فورد آمریکا مطابقت دارد. بنابراین از لحاظ معیارهای سنجش خطا، ترکیب اول یعنی کاربرد دبی روز جاری در تعیین رسوب روز جاری با ساختار دو تابع عضویت مثلثی، نسبت به سایر ترکیبات ورودی و روش منحنی سنجه رسوب از صحت و دقت بالاتری برخوردار است و به عنوان مدل مناسب در ایستگاه قرآن تالار رودخانه بابل‌رود معرفی می‌گردد.

در شکل ۳ نمودار پراکندگی داده‌های مشاهده شده و برآورد شده نسبت به خط یک به یک برای مقایسه مناسب‌ترین مدل ANFIS (ترکیب اول) و روش منحنی سنجه رسوب آورده شده است. جهت مشاهده بهتر پراکندگی داده‌ها از نمودار لگاریتمی استفاده گردید.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]



شکل ۳- نمودار پراکندگی داده‌های مشاهده شده و برآورد شده به روش منحنی سنجه (سمت راست) و ANFIS (سمت چپ)

لازم به ذکر است که هرچه داده‌ها به نمودار یک به یک نزدیک‌تر باشند، نشان دهنده توانایی بیشتر مدل در تخمین رسوب می‌باشد. همان طوری که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، در مدل ANFIS، پراکندگی داده‌ها در اطراف خط یک به یک نسبت به مدل منحنی سنجه رسوب کمتر است و به نظر می‌رسد این مدل بهتر از منحنی سنجه، بار رسوب معلق را برآورد کرده است.

برای مقایسه دو روش از لحاظ تخمین میزان بار رسوب، بار کل رسوب معلق مناسب‌ترین مدل ANFIS (ترکیب اول) و منحنی سنجه رسوب در مرحله آزمون و طی دوره آماری ۲۳ ساله ایستگاه قرآن تالار برآورد گردید و با بار رسوب مشاهده شده در این دوره‌ها مقایسه شد که نتایج به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است.

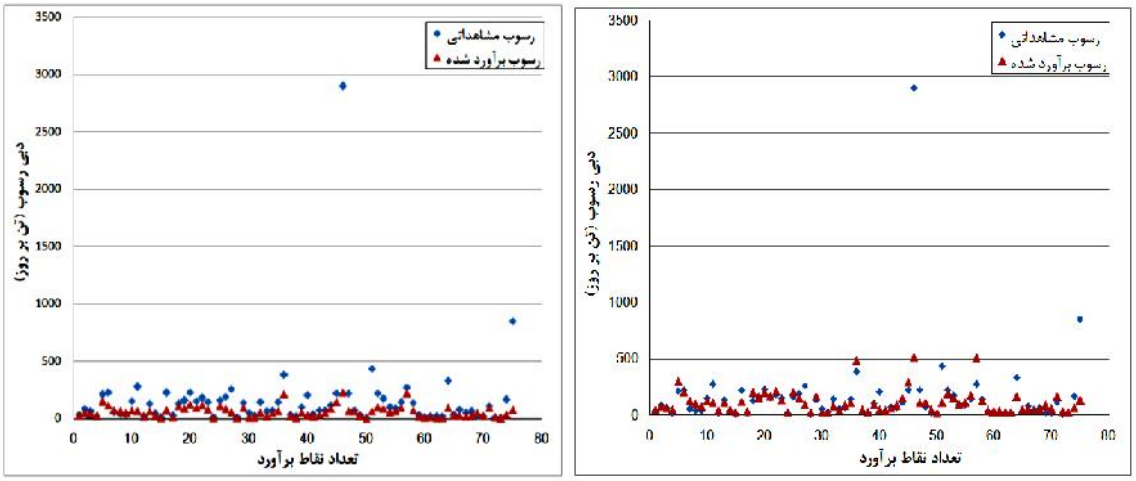
جدول ۳- برآورد بار کل رسوب طی مرحله آزمون و کل دوره آماری در ایستگاه قرآن تالار

	مشاهده شده		ANFIS		منحنی سنجه رسوب	
	مرحله آزمون	کل دوره	مرحله آزمون	کل دوره	مرحله آزمون	کل دوره
رسوب برآورد شده (تن)	۱۱۷۹۸/۱	۸۲۰۷۱/۷	۸۴۲۳/۳	۷۸۶۹۵/۸	۴۳۹۸/۲	۳۴۳۰۵/۹
خطای نسبی (٪)	-	-	-۲۸/۶	-۴/۱	-۶۲/۷	-۵۸/۲

طبق جدول ۳، بار کل رسوب معلق در مرحله آزمون و کل دوره آماری ۲۳ ساله به ترتیب برابر ۱۱۷۹۸/۱ و ۸۲۰۷۱/۷ تن اندازه‌گیری شده بود که مدل ANFIS مقدار آن را به ترتیب برابر ۸۴۲۳/۳ و ۷۸۶۹۵/۸ تن و یا ۲۸/۶ و ۴/۱ درصد کمتر از مقدار مشاهده شده و مدل منحنی سنجه رسوب مقدار آن را به ترتیب برابر ۴۳۹۸/۲ و ۳۴۳۰۵/۹ تن و یا ۶۲/۷ و ۵۸/۲ درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. بنابراین مقادیر حاصله توسط مدل ANFIS با داشتن مقدار خطای نسبی کمتر در هر دو مرحله، به مقدار واقعی نزدیک‌تر بوده و به مراتب بهتر از روش منحنی سنجه بار کل رسوب را برآورد کرده است.

همچنین، در شکل ۴ کل داده‌های دبی رسوب مشاهداتی و برآورد شده در مرحله آزمون، برای مقایسه دو روش مذکور نشان داده شده است. با توجه به شکل، روش ANFIS میزان رسوب را تقریباً در محدوده بار مشاهداتی برآورد نموده و عملکرد بهتری داشته است، اما منحنی سنجه میزان رسوب را پایین‌تر از حد معمول برآورد نموده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]



شکل ۴- میزان رسوب برآورد شده و مشاهداتی با روش منحنی سنجه رسوب (سمت راست) و ANFIS (سمت چپ)

بنابراین، در این پژوهش با بهره‌گیری از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی یا نروفازی (ANFIS) به عنوان یکی از تکنیک‌های نوین محاسباتی و هوش مصنوعی و روش سنتی منحنی سنجه رسوب، بار معلق ایستگاه قرآن تالار واقع در رودخانه بابل‌رود برآورد شد. بدین منظور ترکیبات مختلفی از دبی جریان روز جاری به همراه دبی جریان و رسوب روزهای قبل به عنوان ورودی مدل درنظر گرفته و دبی رسوب روز جاری پیش‌بینی گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که بهترین ترکیب ورودی در روش ANFIS مربوط به حالتی است که تنها از دبی جریان روز جاری به عنوان ورودی مدل استفاده شده و تعداد توابع عضویت کم انتخاب گردد. افزایش شمار توابع عضویت باعث پیچیدگی مدل گشته و تأثیر منفی روی کارآیی مدل خواهد گذاشت. آنگاه برای مقایسه دو روش از شاخص‌های آماری سنجش خطا، پراکندگی داده‌ها حول خط یک به یک، تعیین میزان بار رسوب مشاهداتی و برآورد شده و پراکندگی آنها در مرحله آزمون استفاده شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد، تکنیک ANFIS در همه موارد مقایسه، نسبت به روش منحنی سنجه رسوب عملکرد بهتری در برآورد بار رسوب معلق رودخانه داشته است که با نتایج نظام خیاوی و همکاران (۱۳) در برآورد رسوب رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل، کیسی (۷) در برآورد رسوب دو ایستگاه کوئبرادا بلانکا و ریو والنسیانو آمریکا و کوبانر و همکاران (۲) در برآورد بار معلق روزانه رودخانه مد در آمریکا مطابقت دارد. برتری روش ANFIS را می‌توان در این امر دانست که این تکنیک ترکیبی از دو مدل فازی و عصبی است، یعنی برای آموزش داده‌ها از شبکه عصبی استفاده کرده و با بهره‌گیری از یک تابع عضویت خاص و یک سری قوانین فازی، مدل ساخته می‌شود. در نتیجه مدل به خوبی قادر است مسئله پیچیدگی رسوب و غیرخطی بودن آن را مدل‌سازی و میزان رسوب معلق را برآورد نماید.

در مجموع، آنچه که می‌توان گفت این است که دقت روش ANFIS به مراتب از دقت روش سنتی منحنی سنجه که عملاً در تمامی مطالعات فرسایش و رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد، بالاتر است و می‌توان از این روش در برآورد بار رسوبی رودخانه برای پروژه‌های آبی استفاده نمود.

منابع

1. Cigizoglu, K. 2003. Estimation and forecasting of daily suspended sediment data by multi-layer perceptrons. Advances in Water Resources. 27: 185-195.
2. Cobaner, M., B. Unal and O. Kisi. 2009. Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data. Journal of Hydrology. 367: 52-61.
3. Faalian, A., H. Ansari and A.A. Sadraddini. 2011. Simulation of water distribution pattern of single sprinkler using fuzzy logic. Journal of Water and Soil. 25: 1421-1433. (In Persian)
4. Heydarnejad, M., S. Golmaei, A. Mosaedi and M.Z. Ahmadi. 2004. Optimized sediment load estimation model (case study: inlet and outlet of Karaj Hydrometric stations). Bulletin of Khazar Agricultural Sciences and Natural Resources. 2: 54-67. (In Persian)
5. Jang, J-SR. 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. 23: 665-685.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

6. Javaheri, N., M. Ghomshi and S.M. Kashefipour. 2005. Comparison of Statistical Regression and Fuzzy methods for sediment load estimation in Karoon and Dez River. Journal of Agriculture science. 28. (In Persian)
7. Kisi, O. 2005. Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches. Hydrological Science Journal. 50: 683-696.
8. Kisi, O. 2010. River suspended sediment concentration modeling using a neural differential evolution approach. Journal of Hydrology. 389: 227-235.
9. Kisi, O., T. Haktanir, M. Ardiclioglu, O. Ozturk, E. Yalcin and S. Uludag. 2009. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. Advances in Engineering Software. 40: 438-444.
10. Mazandaran regional water authority. 1985. Water resources Development Plan of Talar, Babol and Haraz Rivers. Phase 1. Hydrology Report. Vol. 3: 195 pp. (In Persian)
11. Mirbagheri, S.A., G.R. Rakhshanderoo and T. Rajaei Hajiagha. 2004. The use of Artificial Neural Network in Suspended Load estimation of Rivers. 1st annual Conference of Water Resources Management. Iran. 11 p. (In Persian)
12. Nayak, P.C., K.P. Sudheer, D.M. Rangan and K.S. Ramasastri. 2004. A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. Journal of Hydrology. 291: 52-66.
13. Nezamkhiavi, Kh.S. and K. Nezamkhiavi. 2010. Usage of Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in river suspended sediment load estimation (case study: Gharesoo River in Ardabil province). Iran. 9th Hydraulic Conference. Tarbiat Modares University. (In Persian)
14. Pourmoghadam, M., H. Ojaghlo and B. Ghanbarian. 2008. Investigation and estimation of yield transported sediment: case study: Taleghanrood Basin. 1st international conference on water challenge. Zabol University. (In Persian)
15. Rajaee T., S.A. Mirbagheri, M. Zunemat-Kermani and V. Nourani. 2009. Daily suspended sediment concentration simulation using ANN and neuro-fuzzy models. Science of total environment. 407: 4916-4927. (In Persian)
16. Sabziparvar, A.A. and M. Bayat Varkeshi. 2010. Accuracy evaluation of ANN and Neuro-Fuzzy in global solar radiation. Iranian Journal of Physics Research. 10: 347-357. (In Persian)
17. Salajeghe, A., A.H. Fathabadi, S. Salajegheh and M. Sanjari. 2011. Investigation of the Multi Layer Perceptron, Fuzzy logic and Neuro-Fuzzy for estimating of suspended load. International Conference on Chemical, Biological and Environment Science. Bangkok.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

Investigation for Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) in Babolroud Suspended sediment Load Estimation

Easa Kia[1], Alireza Emadi[2] and Ramin Fazlola[3]

1 and 3- M.Sc. Student and Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2- Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
(Corresponding author: emadia355@yahoo.com)
Received: October 13, 2012 Accepted: April 16, 2013

Abstract

Sediment load estimation is one of the most important issues in rivers & dam reservoirs management and generally in water projects. Various empirical equations show that proper analytical or empirical method is not suggested for correct estimation of suspended sediment, yet. In the present study, to assessment of closer estimation to actual data of transported sediment in Ghoran Talar station located in Babolroud River, the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) technique is used as an Artificial Intelligence method. At first, various combinations of discharges based on time delay is considered as input parameters and the suspended sediment load is applied as output of the model. After Learning the network and assessment of the best structure according to type, number of membership function and related rules by use of MATLAB software, appropriate model is obtained based on statistical indices viz. mean square error, model efficiency and determination coefficient. As a result, one dimensional input according to Sugeno inference system with two triangular membership functions is introduced as an appropriate model and is compared with sediment rating curve values. Finally, the results showed that ANFIS method (MSE=0.08, EF=0.78, R^2=0.72) has higher accuracy than sediment rating curve (MSE=0.16, EF=0.57, R^2=0.73) and has better efficiency in suspended sediment load estimation.

Keywords: Babolroud, Suspended load, Membership function, Neuro-fuzzy, Rating curve, ANFIS

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]