محیط شناسی، سال سی و ششم، شمارهٔ ۵۳ بهار ۸۹، صفحهٔ ۱-۱۰

پیش‌بینی کیفی رودخانه‌ها با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

چکیده

اخیراً استفاده از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها توسعه زیادی یافته که به دلیل پیچیدگی و تعدد فرایندهای کیفی منابع آب سطحی و وجود ضرایب و ثابت‌های شیمیایی و بیولوژیکی متعدد، استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی، روشی نو جهت پیش‌بینی کیفی رودخانه‌هاست. در این مقاله ضمن بیان مبانی این سیستم به‌منظور پیش‌بینی کیفی آبهای سطحی، کاربرد آن با مجموعه‌ای از داده‌های ۱۶ ساله از اکسیژن محلول (DO) و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD) از رودخانهٔ زاینده رود نشان داده شده است. فرایند توسعه و ارزیابی سه نوع مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در پیش‌بینی (BOD) براساس مجموعه عوامل مؤثر در یک و دو ایستگاه قبل نشان داد که دبی، درجهٔ حرارت و مقدار اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی در یک و دو ایستگاه قبل با مقدار ضریب تبیین ۰/۹۵۳ در مرحلهٔ واسنجی و ۰/۹۳۱ در مرحلهٔ اعتبارسنجی مناسب‌ترین مدل و برای پیش‌بینی اکسیژن محلول عوامل سرعت، عمق، درجهٔ حرارت، عرض در سطح آب و اکسیژن محلول در یک ایستگاه قبل با مقدار ضریب تبیین ۰/۹۲۱ در مرحلهٔ واسنجی و ۰/۹۰۴ در مرحلهٔ اعتبارسنجی، مناسب‌ترین مدل است. در نهایت مقادیر پیش‌بینی شده بهنگام توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد و نشان داده شد که سیستم استنباط فازی عصبی-تطبیقی عملکرد مناسبی دارد. استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی می‌تواند به عنوان رهیافت کاربردی جدیدی در پیش‌بینی وضعیت کیفی رودخانه‌هایی که داده‌های کافی برای مراحل آموزش، واسنجی و اعتبارسنجی دارند، مطرح باشد. هرچند ساخت مدل‌های پیش‌بینی کیفی رودخانه‌ها با این سیستم نیاز به متخصص خبره و حجم داده‌پردازی زیاد دارد، ولی دقت پیش‌بینی آنها بسیار مناسب است.

کلید واژه

کیفیت آب، رودخانه، منطق فازی، شبکهٔ عصبی، رودخانهٔ زاینده رود، مدیریت منابع آب

سرآغاز

در طی چند دههٔ گذشته به دلیل محدودیت منابع آب شیرین بحث حفاظت کیفی از منابع آب بیشتر مورد توجه محققان و مدیران منابع آب شده است. در این میان مدیریت کیفی منابع آب سطحی اعم از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و خورها به دلیل سهل‌الوصول‌تر بودن و در معرض مستقیم بودن انواع آلاینده‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. طی دو دههٔ اخیر به دلیل گسترش صنایع و افزایش جمعیت و تولید انواع آلاینده‌ها در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی، دفع انواع آلاینده‌ها به منابع پذیرندهٔ آب سطحی،که بیشتر تأمین‌کنندهٔ اصلی نیازهای آبی‌اند، سلامت و بهداشت جوامع را به خطر انداخته است. برای بررسی و تخمین توانایی منابع پذیرنده با رعایت معیارهای کیفی منابع آب، نیاز به مدل‌سازی کیفی و بررسی رفتار منابع سطحی نسبت به تخلیهٔ انواع آلودگی‌هاست. بدون شک این مدل‌سازی کیفی نمی‌تواند مستقل از مشخصات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی رودخانه و مشخصات کیفی آلاینده‌ها باشد. با دفع انواع آلودگی‌ها به رودخانه‌ها، انتقال، جذب و پخشیدگی آنها به پایین دست همراه با واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. با فرض یک بعدی بودن جریان در رودخانه‌ها به دلیل عمق و عرض محدود آنها نسبت به طول رودخانه‌ها، غالباً بررسی تغییرات کیفی آن به صورت یک بعدی در جهت طولی صورت می‌گیرد، و از پخشیدگی‌های عرضی و عمقی که در طول به‌نسبت کوتاهی از محل ورود آلودگی صورت می‌گیرد، صرف‌نظر می‌شود.

استفاده مناسب و کارامد از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه‌ها برای تعیین خط‌مشی‌های جامع و مناسب و در نهایت ارزیابی روش‌های کاهش بار آلودگی و بویژه مدیریت آنها بسیار حایز اهمیت است. از اواسط دههٔ ۱۹۷۰ با توسعهٔ سریع ابزارهای محاسباتی و کامپیوترها و توسعه روش‌های عددی در حل معادلات دیفرانسیلی، مدلسازی کیفی رودخانه‌ها رشد چشمگیری یافت (Little, and Williams, 1975).

طی دو دههٔ اخیر مدل‌های بسیار متنوعی به لحاظ انواع فرایندها در نظر گرفته شده، تعداد مشخصه‌های مورد شبیه‌سازی، یک یا چند بعدی بودن، روش‌های حل عددی معادلات دیفرانسیلی جزئی حاکم و مکانیسم‌های انتقال و آنالیز عدم قطعیت توسعه‌یافته و در مناطق مختلف جهان استفاده شده است. در تمامی این مدل‌ها محدودیت‌هایی به لحاظ کالیبراسیون ضرایب واکنش‌ها و صحت‌سنجی آنها وجود دارد که بخصوص با افزایش تعداد مشخصه‌ها و تأثیرات متقابل آنها بر روی یکدیگر، دقت آنها در پیش‌بینی رفتار کیفی رودخانه‌ها کاهش می‌یابد.

به‌منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌های کیفی رودخانه‌ها نیز تاکنون تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته که می‌توان به کارهای Yih, and Davidson (1975) در تعیین ضریب پخشیدگی طولی، Mulligan and Brown (1998) در استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون مدل‌های کیفی رودخانه Van Griensven, (2002) در تحلیل حساسیت کالیبراسیون مدل‌های کیفی رودخانه‌ها در حالت دینامیکی، صفوی، (۱۳۸۷) در استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌های کیفی رودخانه‌ها اشاره کرد. به دلیل وجود معادلات غیرخطی حاکم بر فرایندهای انتقال آلودگی در رودخانه‌ها و پیچیدگی حل همزمان آنها و وجود ثوابت و ضرایب سینتیکی متعدد، استفاده از مدل‌ها و روش‌های با پایه‌های فیزیکی، مشکل و گاه غیرممکن است. بسیاری از این مدل‌ها برای حالت‌های ساده‌شده و فقط در محدودهٔ شرایطی که کالیبره و صحت‌سنجی شده‌اند توانایی کاربرد دارند و برای شرایطی خارج از محدودهٔ مورد نظر دقت مناسبی ندارند. عدم قطعیت و ابهامات در این زمینه، استفاده از سیستم استنباط فازی و بویژه ترکیب آن را با شبکه‌های عصبی به صورت تطبیقی به عنوان رهیافتی نو مورد نظر قرار داده است. هدف اصلی در این تحقیق استفاده از توانایی‌های سیستم استنتاج فازی–عصبی تطبیقی در پیش‌بینی کیفیت رودخانه‌ها با تأکید بر میزان اکسیژن محلول (DO) و نیز اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD) است. بدین منظور رودخانه زاینده‌رود به دلیل وجود داده‌های کیفی و هیدرولیکی کافی و مناسب به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است.

مواد و روش‌ها

فرایندهای کیفی آب در رودخانه‌ها غالباً غیرخطی و پیچیده‌اند، بنابراین استفاده از مدل‌های با پایه‌های فیزیکی و بیشتر با معادلات خطی می‌تواند محدودیت‌های زیادی را در مدل‌سازی و پیش‌بینی به‌وسیلهٔ آنها ایجاد کند. در نتیجه استفاده از شبکه‌های عصبی، سیستم‌های استنباط فازی، و یا ترکیب آنها می‌تواند به عنوان روش‌های نو جایگزین مطرح باشد. روش سیستم استنباط فازی–عصبی تطبیقی[1](ANFIS)، روشی در حل مسائل پیچیده‌ای است‌که الگوریتم مشخصی برای حل آنها وجود ندارد، و یا استفاده از مدل‌های با پایه‌های فیزیکی مستلزم استفاده از تقریبات و محدودیت‌های جدی بر روی آنهاست. از توانایی‌های مهم این سیستم، درک رفتارهای غیرخطی سیستم مورد نظر است (Jang, 1993).

سیستم فازی، سیستمی منطبق بر قواعد منطقی شرط و نتیجه است که با نظریه‌های احتمال کلاسیک قابل تحلیل نیست. هدف از منطق فازی، استخراج نتایج دقیق با استفاده از مجموعه‌ای از معلومات غیردقیق است که با الفاظ و جملات زبانی توسط افراد خبره و متخصص تعریف شده است. نقطه شروع ساخت سیستم فازی به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر–آنگاه فازی است. داشتن روشی که بتوان به وسیلهٔ آن از اطلاعات موجود برای ساخت این قواعد استفاده کرد، ابزاری کارامد محسوب می‌شود. از طرف دیگر شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی‌های آموزش‌پذیری با استفاده از الگوهای مختلف آموزشی می‌تواند ارتباط مناسبی بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد کند. شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های دینامیکی هستند که با پردازش بر روی داده‌های تجربی، دانش، و یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. این سیستم دارای ۵ ویژگی عمدهٔ توانایی یادگیری، استفاده از داده‌های پراکنده، توانایی تعمیم، پردازش موازی و درنهایت مقاوم بودن است. بنابراین استفاده ترکیبی از سیستم استنباط فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی که توانایی استفاده از داده‌های عددی موجود را به‌منظور پیش‌بینی نتایج دارند، می‌تواند ابزاری قدرتمند تحت عنوان سیستم استنباط فازی–عصبی تطبیقی را ایجاد کند (Jang and Gulley, 1995).

در این روش ترکیبی بخش فازی رابطه بین متغیرهای ورودی و

خروجی برقرار و مشخصه‌های مربوط به توابع عضویت بخش فازی به‌وسیلهٔ شبکه عصبی تعیین می‌شود (تشنه‌لب و همکاران، ۱۳۷۸).

در سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی، ابتدا ساختار مدل با مشخصه‌های مشخص، که متناسب با ورودی‌ها، درجهٔ عضویت و قوانین و توابع درجهٔ عضویت خروجی است، انتخاب می‌شود. سپس بخشی از داده‌های موجود به عنوان ورودی-خروجی که قابل استفاده برای آموزش این سیستم باشد انتخاب می‌شود. در مرحلهٔ آموزش با اصلاح مشخصه‌های درجهٔ عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مشخصه‌های مدل به مقادیر واقعی نزدیک می‌شوند. پس از آموزش سیستم و انتخاب مشخصه‌های آن نیاز به صحت‌سنجی، یا بررسی اعتبار مدل است. از آنجا که داده‌های مورد استفاده در آموزش سیستم الزاماً نماینده کاملی برای آموزش جامع نیست، بنابراین مرحلهٔ اعتبارسنجی مدل از اهمیت خاصی برخوردار است. بخش دیگری از مجموعه داده‌های ورودی-خروجی موجود که برای آموزش سیستم استنباط فازی استفاده نشده است به عنوان داده‌های ورودی به سیستم مورد استفاده قرار گرفته تا بتوان از دقت و اعتبار مدل سیستم فازی تهیه شده، به‌منظور پیش‌بینی مقادیر خروجی داده‌های متناظر ورودی، اطمینان حاصل کرد. با استفاده از مجموعه‌ای دیگر از داده‌ها نیز اعتبار مدل سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی تعیین می‌شود که به‌عنوان مجموعهٔ داده‌های کنترلی مطرح است. در انتخاب داده‌های کنترلی باید دقت کرد که این داده‌ها نمایندهٔ تمامی مجموعه داده‌های آموزشی باشند تا مدل بتواند پیش‌بینی مناسب داشته باشد. غالباً در هنگام استفاده از این سیستم، بیش از نیمی از داده‌ها برای مرحلهٔ آموزش و بقیه برای اعتبارسنجی و کنترل مدل استفاده می‌شود (Chang and Chang, 2001). سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی را بیشتر با استفاده از سیستم فازی سوگنو و به صورت ساختار شبکه‌ای پیشرونده استفاده می‌شود که دارای ۵ لایه مطابق شکل شمارهٔ (۱) به شرح زیر است (Nayak, et al., 2004):

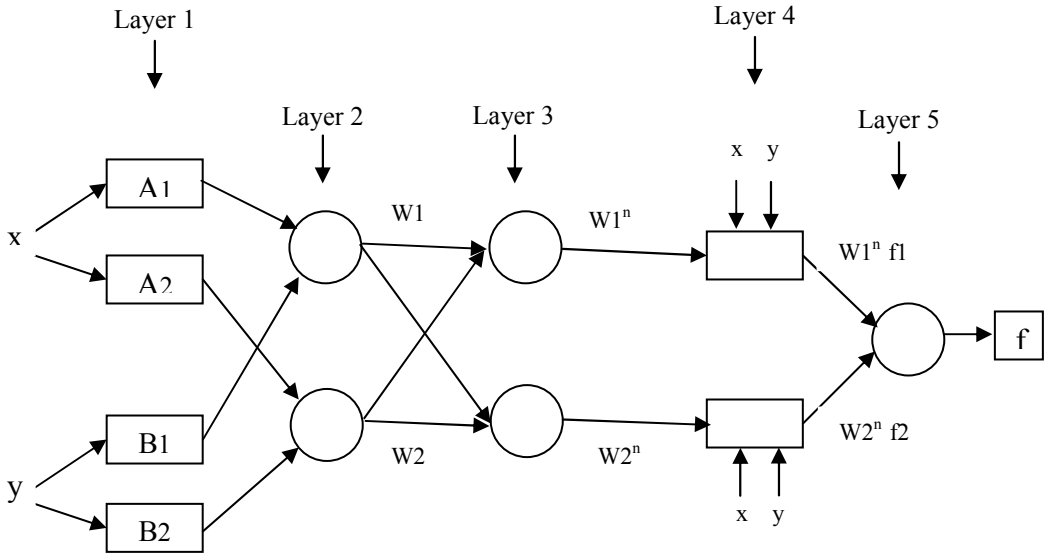
لایهٔ اوّل: شامل گره‌های ورودی که هر گرهٔ آن یک مجموعه فازی و خروجی هر گره درجهٔ عضویت متغیر ورودی در این مجموعه فازی است.

لایهٔ دوم: شامل گره‌های قوانین است که هر گره در این لایه درجهٔ فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند.

لایهٔ سوم: شامل گره‌های میانگین است که نسبت درجه فعالیت قانون به مجموع درجات فعالیت کلیه قوانین را محاسبه می‌کند.

لایهٔ چهارم: مشتمل بر گره‌های نتیجه است که با استفاده از مشخصه‌های نتیجه، خروجی هر گره محاسبه می‌شود.

لایهٔ پنجم: مشتمل بر گره‌های خروجی است که هر گره مقدار خروجی نهایی را به دست می‌دهد.



شکل شمارهٔ (۱): معماری کلی سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی (Nayak, et al., 2004)

شیوهٔ آموزش در این سیستم نیز روش پس‌انتشار خطاست. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش می‌شود و مشخصه‌ها تصحیح می‌شوند. بنابراین در هر دور آموزش، هنگام حرکت رو به جلو، خروجی‌های گره‌ها تا لایهٔ

چهارم محاسبه می‌شوند و سپس مشخصه‌های نتیجه به روش‌های "کمترین مجموع مربعات خطا" محاسبه می‌شوند. پس از محاسبه خطا در بازگشت رو به عقب نسبت خطا بر روی مشخصه‌های شرط پخش شده و مقدار آنها با استفاده از روش "شیب نزولی خطا "اصلاح می‌شود. برای ارزیابی عملکرد مدل از معیارهای مختلفی نظیر ضریب همبستگی (R^2)، میانگین مربعات خطا(RMSE)، میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NMSE) و میانگین قدرمطلق خطای نسبی(MAPE) بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده مطابق روابط زیر استفاده می‌شود:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(\hat{x}-\bar{\hat{x}}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{x}_i-\bar{\hat{x}}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\hat{x}_i\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\hat{x}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \qquad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|x_i-\hat{x}_i\right|}{x_i} \qquad (4)$$

که در روابط فوق x_i مقدار مشاهداتی و $\hat{x}_i$ مقدار پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌هاست. برای بررسی توزیع خطا در پیش‌بینی نیز از معیار آستانه خطا (TS_x) استفاده می‌شود. این معیار برای $x\%$ از پیش‌بینی‌ها، مبین توزیع خطا در مقادیر پیش‌بینی شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TS_x = \frac{Y_x}{n}\times 100 \qquad (5)$$

که در آن Y_x تعداد داده‌هایی است که در آنها قدرمطلق نسبی (APE)کمتر از $x\%$ و n تعدادکل داده‌هاست. هر چه معیار آستانه در سطوح مختلف $x\%$ بیشتر باشد، مدل پیش‌بینی مناسب‌تر خواهد بود.

منطقهٔ مورد مطالعه

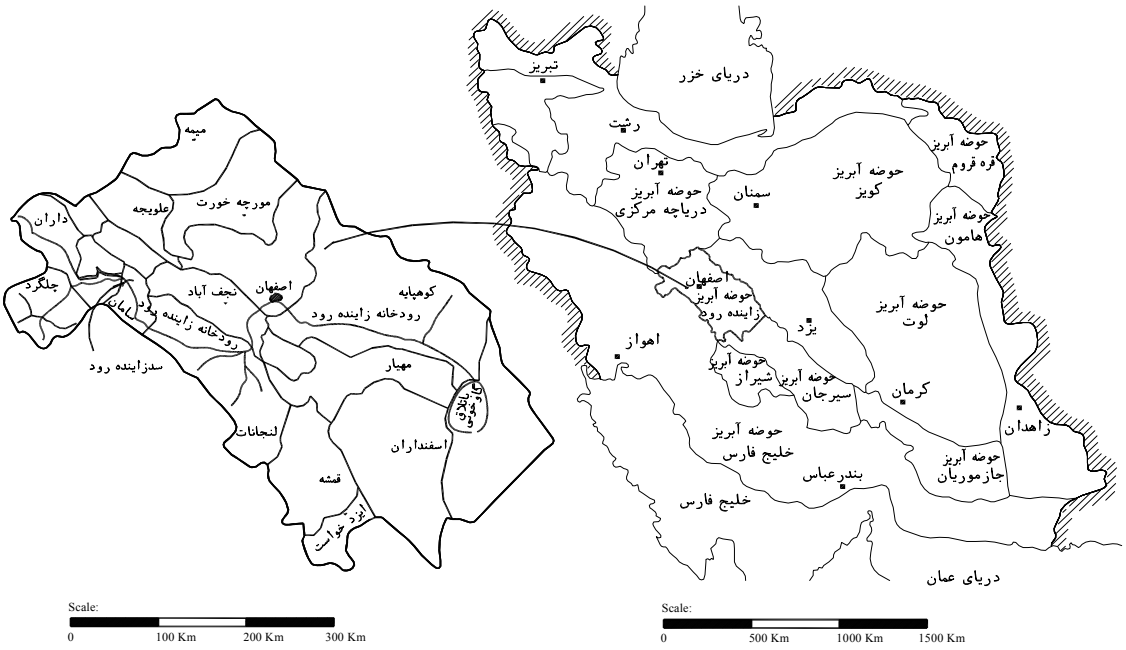
رودخانهٔ زاینده‌رود مهم‌ترین رودخانه مرکزی ایران به طول تقریبی ۳۶۰ کیلومتر از ارتفاعات زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و در نهایت با عبور از شهر اصفهان به باتلاق گاوخونی ختم می‌شود (شکل شمارهٔ ۲). مساحت حوضهٔ آبریز این رودخانه حدود ۴۱۳۴۷ کیلومترمربع بوده که علاوه بر رودخانه زاینده‌رود، رودخانه‌های مرغاب، شور و رحیمی نیز در این حوضه جاری هستند.

سرچشمه‌های این رودخانه در فاصله ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان به سد مخزنی زاینده‌رود به حجم ۱۴۵۰ میلیون مترمکعب وارد شده و علاوه بر آوردهای طبیعی از چشمه‌های مختلف، آب از طریق تونل‌های کوهرنگ و چشمه لنگان از حوضه‌های مجاور به آن اضافه می‌شود.

آوردهای طبیعی رودخانه سالانه به‌طور متوسط حدود ۹۵۰ میلیون مترمکعب و آورد از تونل‌های اول، دوم و چشمه لنگان مجموعاً حدود ۸۵۰ میلیون مترمکعب است. آوردهای طبیعی در پایین دست سد زاینده‌رود نیز سالانه حدود ۲۰۰ میلیون مترمکعب است (مهندسان مشاور جاماب، ۱۳۷۷).

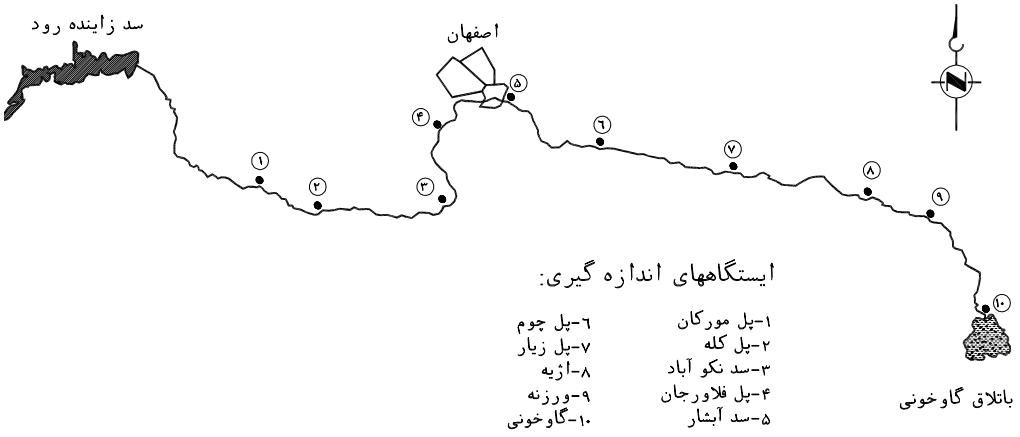
به دلیل وجود مصارف گوناگون از جمله کشاورزی، شرب و صنعت از این رودخانه و محدودیت نسبی منابع آب در حوضهٔ آبریز زاینده رود، حفظ کیفیت آب این رودخانه، بویژه در بخش شرقی از شهر اصفهان تا باتلاق گاوخونی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به لحاظ مصارف سالانه، حدود ۱۳۵۰ میلیون مترمکعب برای مصارف کشاورزی، ۲۰۰ میلیون مترمکعب مصارف شهری و بهداشتی و ۱۰۰ میلیون مترمکعب مصارف صنعتی از رودخانهٔ زاینده‌رود برداشت می‌کنند و این در حالی است که سالانه حداقل ۱۰۰ میلیون مترمکعب حق آبه زیست‌محیطی برای باتلاق گاوخونی به‌منظور حفظ اکوسیستم‌های طبیعی آن مورد نیاز است.

این رودخانه به دلیل موقعیت جغرافیایی آن و وجود شهرها، اراضی کشاورزی و صنایع پراکنده در مجاورت خود، پذیرندهٔ آلودگی‌های گوناگونی است که باعث می‌شود کیفیت آب از محل سد مخزنی زاینده‌رود تا باتلاق گاوخونی بشدت کاهش یابد، به‌طوری‌که صنایع اطراف آن به‌طور میانگین سالانه حدود ۷/۲ میلیون مترمکعب، پساب‌های شهری حدود ۴۷/۵ میلیون مترمکعب و زهکش‌های اراضی کشاورزی حدود ۱۷ میلیون مترمکعب زهاب به این رودخانه تخلیه می‌کنند (کارآموز و همکاران، ۱۳۷۹).



شکل شمارهٔ (۲): موقعیت حوضه آبریز زاینده رود و رودخانه زاینده رود در آن

برای بررسی وضعیت کیفی آب رودخانهٔ زاینده‌رود و شبیه‌سازی و مدل‌سازی آن تا کنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است که بیشتر براساس داده‌های جمع‌آوری شده از ۲۲ ایستگاه نمونه‌برداری اداره حفاظت محیط زیست استان اصفهان است. شایان ذکر است که از بین این ۲۲ ایستگاه، کامل‌ترین مجموعه داده‌ها مربوط به ۱۰ ایستگاهی است که نام و موقعیت آنها در طول رودخانه در شکل شمارهٔ (۳) نشان داده شده است.



شکل شمارهٔ (۳): موقعیت ایستگاههای اندازه‌گیری کیفیت آب بر روی رودخانهٔ زاینده‌رود

مشخصه‌های کیفی متعددی از جمله اسیدیته، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، کل مواد جامد محلول، نیترات، سولفات، فسفات، کلراید و انواع فلزات از سال ۱۳۶۸ تاکنون غالباً به صورت ماهانه اندازه‌گیری شده است.

برای پیش‌بینی کیفی رودخانه زاینده‌رود مشخصه‌های اکسیژن محلول و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی به عنوان شاخص‌های اصلی در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌گونه‌که بیان شد، درعمل کیفیت آب رودخانه پس از شهر اصفهان و به‌ویژه از ایستگاه سد آبشار به بعد کاهش شدید یافته و بحرانی‌ترین حالت‌ها به لحاظ کمترین مقدار برای اکسیژن محلول و بیشترین مقدار برای اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی در ایستگاه پل زیار ثبت شده است. بنابراین پیش‌بینی کیفی با استفاده از سیستم استنتاج فازی–عصبی تطبیقی برای آب این رودخانه در ایستگاه پل زیار صورت گرفته است. قابل ذکر است که این سیستم پیش‌بینی را می‌توان برای مشخصه‌های دیگر و در کلیهٔ ایستگاهها نیز استفاده کرد.

نتایج

براساس مدل‌های با پایه‌های فیزیکی و معادلات حاکم در فرایندهای کمی–کیفی در آبهای سطحی، عوامل اصلی هیدرودینامیکی و کیفی مؤثر در مقدار BOD در هر مقطع از رودخانه عبارتند از: دبی رودخانه (Q) در آن مقطع، درجه حرارت آب رودخانه(T)، عمق آب(d)، سرعت جریان(V)، مقدار BOD اندازه‌گیری شده در یک و دو ایستگاه قبل.

همچنین عوامل اصلی مؤثر در مقدار DO عبارتند از: دبی رودخانه (Q) در آن مقطع، درجهٔ حرارت آب رودخانه (T)، عمق آب(d)، عرض در سطح آب (W)، سرعت جریان(V)، مقدار DO اندازه‌گیری شده در یک و دو ایستگاه قبل. در این تحقیق از داده‌های ۱۶ ساله موجود، ۱۰ سال برای آموزش، ۳ سال واسنجی و ۳ سال نیز برای اعتبارسنجی و کنترل استفاده شده است.

مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار مشخصه‌های BOD و DO در جدول شمارهٔ (۱) درج شده است.

مشخصات هیدرولیکی این مقطع از رودخانه، از جمله دبی، سرعت، عمق و عرض در سطح آب، از ایستگاه هیدرومتری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان استخراج شد.

جدول شمارهٔ (۱): مشخصه‌های آماری BOD و DO اندازه‌گیری شده در ایستگاه پل زیار رودخانهٔ زاینده رود

پارامتر	حداقل (mg/l)	حداکثر (mg/l)	میانگین (mg/l)	انحراف معیار (mg/l)
BOD	۱۶	۴۵	۳۱/۲	۶/۴۱
DO	۱/۵	۵/۱	۲/۶	۰/۸۲

برای هر مشخصه با اجرای ۱۱۲ سیستم استنتاج فازی–عصبی تطبیقی با افرازبندی به روش شبکه‌بندی، نشان داده شد که برای پیش‌بینی میزان اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی در ایستگاه پل زیار، مدل‌هایی که بردار داده‌های ورودی آنها شامل دبی رودخانه در محل ایستگاه و یک و دو ایستگاه قبل، درجهٔ حرارت و BOD در یک و دو ایستگاه قبل هستند دارای بهترین نتایج در مرحله اعتبارسنجی است. شایان ذکر است که در جعبهٔ ابزار نرم‌افزار (MATLAB 7.4)، برای استفاده از سیستم فازی–عصبی از هر دو روش جداسازی شبکه‌ای و خوشه‌بندی جزئی می‌توان استفاده کرد که در این تحقیق از روش جداسازی شبکه‌ای که نوع و تعداد تابع عضویت بردار اطلاعات ورودی توسط کاربر تعیین می‌شود استفاده شده است.

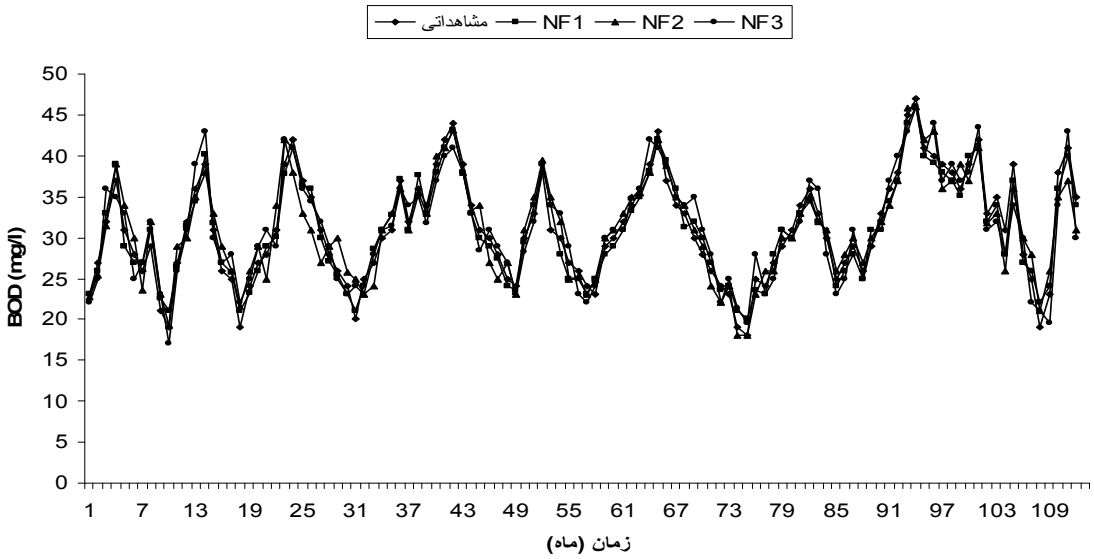
در جدول شمارهٔ (۲) معیارهای ارزیابی خطای سه نوع مدل مختلف ANFIS با داده‌های متفاوت برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی شاخص کیفی BOD ارائه شده است.

در شکل شمارهٔ (۴) نیز مقادیر پیش‌بینی شده بهنگام توسط سه مدل NF1، NF2 و NF3 در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده شده است.

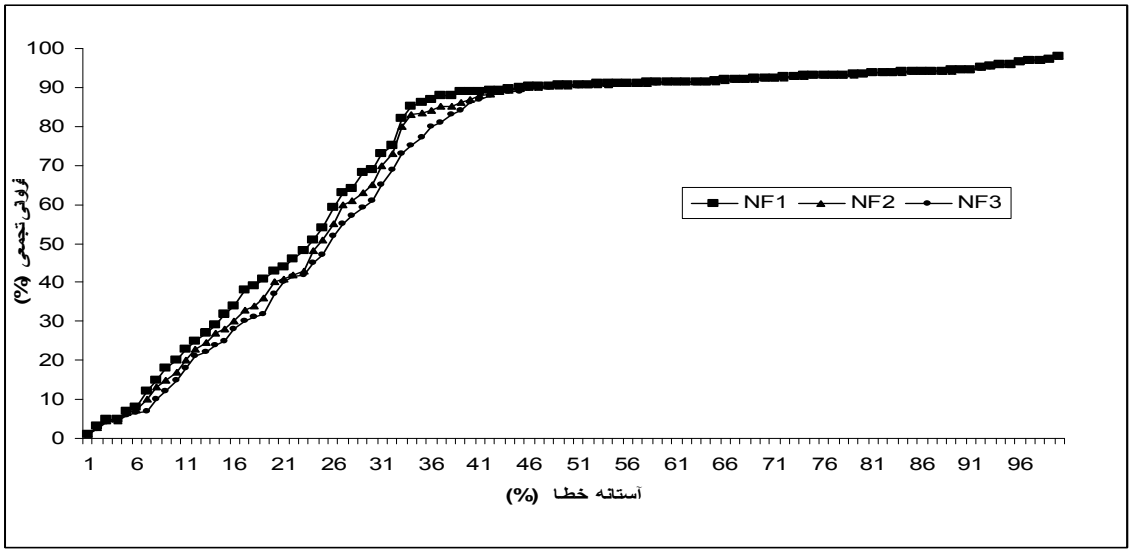
همان‌گونه‌که مشخص است عملکرد هر سه مدل در پیش‌بینی مقدار BOD مناسب است که مبین توانایی مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی بر اساس مجموعه داده‌های ورودی است. از طرف دیگر مدل اوّل(NF1)، که مجموعه ورودی‌های آن شامل دبی، درجهٔ حرارت و BOD در یک و دو ایستگاه قبل است عملکرد بهتری را نسبت به دو مدل دیگر نشان می‌دهد. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که سرعت جریان و عمق آب به عنوان داده‌های ورودی نقش کمتری در پیش‌بینی مقدار BOD داشته و حساسیت بیشتر بر روی دبی و درجهٔ حرارت آب رودخانه است. برای بررسی توزیع خطا در پیش‌بینی نیز از معیار آستانه خطا (TSx) استفاده شده است. در شکل شمارهٔ (۵) نحوهٔ توزیع خطا در سه مدل مختلف ارائه شده است. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود، مدل NF1 در مورد نحوهٔ توزیع خطا نیز عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر دارد.

جدول شمارهٔ (۲): ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف ANFIS براساس ورودی‌های مختلف برای BOD

مدل	متغیرهای ورودی	R^2		RMSE		NMSE		MAPE	
		واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی
NF1	BOD_{-1}, BOD_{-2}, T, Q	۰/۹۵۳	۰/۹۳۱	۱/۱۸۲	۱/۳۷۶	۰/۴۳۲	۰/۵۱۲	۰/۰۴۳	۰/۰۶۸
NF2	d ,V ,BOD_{-1} , BOD_{-2} , T ,Q	۰/۸۴۹	۰/۷۶۸	۲/۱۴۱	۲/۴۳۷	۰/۳۸۶	۰/۴۱۸	۰/۰۳۶	۰/۰۵۱
NF3	d ,V ,T ,Q	۰/۷۹۶	۰/۷۲۹	۲/۶۸۵	۲/۹۱۵	۰/۶۱۶	۰/۷۲۱	۰/۰۵۶	۰/۰۷۲



شکل شمارهٔ (۴): مقایسهٔ پیش‌بینی بهنگام مقدار BOD به‌وسیلهٔ مدل‌های مختلف (NF3 ,NF2 ,NF1)

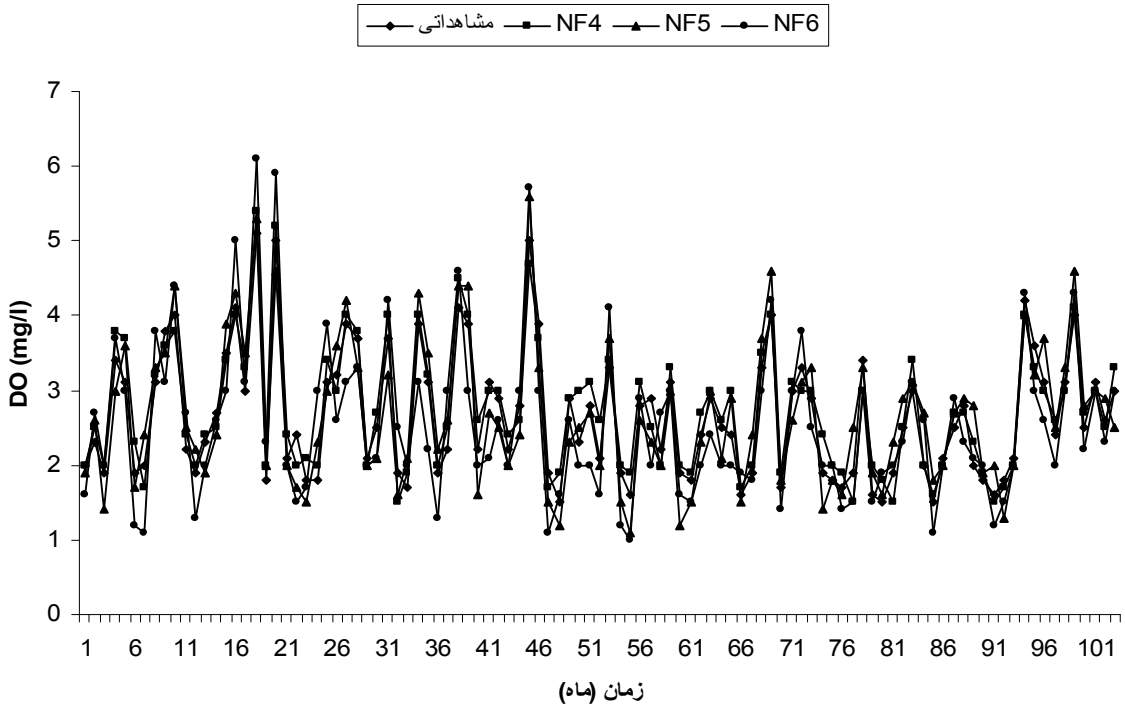


شکل شمارهٔ (۵): نحوهٔ توزیع خطا در سه نوع مدل مختلف (NF3 ,NF2 ,NF1)

در جدول شمارهٔ (۳) معیارهای ارزیابی خطای سه نوع مدل مختلف ANFIS با داده‌های متفاوت برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مشخصه DO ارائه شده است. در شکل شمارهٔ (۶) نیز مقادیر پیش‌بینی شده بهنگام به وسیلهٔ سه مدل NF4، NF5 و NF6 در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده شده است.

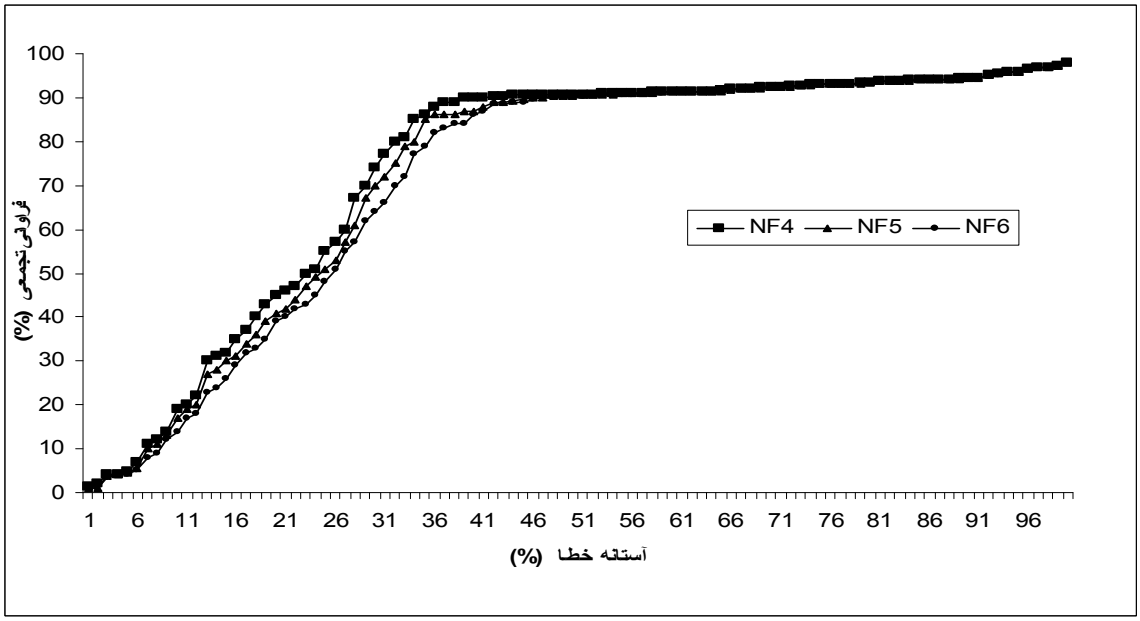
جدول شمارهٔ (۳): ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف ANFIS براساس ورودی‌های مختلف برای DO

مدل	متغیرهای ورودی	R^2		RMSE		NMSE		MAPE	
		واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی
NF4	DO_{-1}, W, T, d, V	۰/۹۲۱	۰/۹۰۴	۱/۴۹۶	۱/۶۵۴	۰/۵۴۸	۰/۵۹۳	۰/۰۵۸	۰/۰۶۹
NF5	d , DO_{-1} , DO_{-2} , T ,Q	۰/۷۹۳	۰/۷۲۶	۱/۷۴۳	۱/۹۷۸	۰/۶۲۱	۰/۷۶۸	۰/۰۶۶	۰/۰۷۱
NF6	d , W, DO_{-1} , Q	۰/۷۲۶	۰/۶۷۹	۲/۲۳۴	۲/۴۳۱	۰/۷۱۵	۰/۷۲۶	۰/۰۷۳	۰/۰۷۹



شکل شمارهٔ (۶): مقایسهٔ پیش‌بینی بهنگام مقدار DO به‌وسیلهٔ مدل‌های مختلف (NF4 ,NF5 ,NF6)

همان‌گونه‌که از شکل شمارهٔ (۶) مشخص است عملکرد هر سه مدل در پیش‌بینی مقدار DO در ایستگاه پل زیار مناسب است که این موضوع مبین توانایی مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی بر اساس مجموعه داده‌های ورودی است. از طرف دیگر مدل (NF4)، که مجموعه ورودی‌های آن شامل اکسیژن محلول در ایستگاه قبل، عرض در سطح آب، درجه حرارت، عمق و سرعت جریان در ایستگاه پل زیار است، عملکرد بهتری را نسبت به دو مدل دیگر نشان می‌دهد. از این‌رو به حساسیت مقدار اکسیژن محلول به سرعت، عمق جریان و عرض در سطح آب رودخانه پی می‌بریم.برای بررسی توزیع خطا در پیش‌بینی نیز از معیار آستانهٔ خطا (TSx) استفاده شده است. در شکل شمارهٔ (۷) نحوهٔ توزیع خطا در سه مدل مختلف ارائه شده است. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود، مدل NF4 در مورد نحوهٔ توزیع خطا نیز عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر در پیش‌بینی مقدار اکسیژن محلول دارد.



شکل شمارهٔ (۷): نحوهٔ توزیع خطا در سه نوع مدل مختلف (NF6 ,NF5 ,NF4)

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر به دلیل وجود حجم زیادی از داده‌های جمع‌آوری شده از کمیت و کیفیت منابع آب، استفاده از روش‌های داده‌محور توسعهٔ چشمگیری یافته است. در بین روش‌های داده‌محور، تلفیق شبکه‌های عصبی با سیستم‌های استنتاج فازی، بویژه برای مسائل کیفی منابع آب که دارای رفتار پیچیده و غیرخطی‌اند بسیار حایز اهمیت و کاربردی است. در این تحقیق ضمن بیان مبانی کاربرد سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در پیش‌بینی کیفی منابع آب سطحی برای رودخانه‌هایی که داده‌های کافی برای سه مرحله آموزش، واسنجی و اعتبارسنجی را دارند، دقت این مدل‌ها بررسی و مشخص شد که چنانچه مفهوم فرایندها و مشخصه‌های مؤثر ورودی بخوبی تشخیص داده شوند، هرچند مجموعه فرایندها به صورت تحلیلی پیچیده و غیرخطی هستند و به‌صورت کلی نیاز به تخمین بسیاری از ثوابت و ضرایب دارند، نتایج قابل قبولی را می‌توان به‌دست آورد. به‌طوری‌که در مطالعهٔ موردی رودخانهٔ زاینده‌رود برای پیش‌بینی BOD با ضریب همبستگی ۰/۹۵۳ در مرحله واسنجی و ۰/۹۳۱ در مرحلهٔ اعتبارسنجی و برای پیش‌بینی DO با ضریب همبستگی ۰/۹۲۱ در مرحلهٔ واسنجی و ۰/۹۰۴ در مرحله اعتبارسنجی توسط این سیستم حاصل شد. نتایج مقایسه‌ای حاصل از کاربرد شش نوع مدل مختلف (سه مدل BOD و سه مدل برای DO) نشان داد که الزاماً افزایش تعداد مشخصه‌های ورودی موجب افزایش دقت مدل پیش‌بینی نمی‌شود و شناخت تأثیر عوامل ورودی و بررسی حساسیت نتایج به آنها از اهمیت بالایی برخوردار است.

مقایسهٔ نتایج مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی با داده‌های اندازه‌گیری شده دقت بالای این سیستم را نشان داد. به هر حال همواره باید توجه کرد که هرچند مدل‌های دادهٔ محور نیازی به معادلات با پایه‌های فیزیکی که بیشتر به صورت غیرخطی و پیچیده‌اند، ندارند، ولی درک فرایندها و تأثیر عوامل مورد نظر در داده‌های ورودی بر روی تولید خروجی از آن بسیار مهم است و درصورت عدم این درک نمی‌توان انتظار نتایج مطلوبی را داشت. هرچند ساخت مدل‌های پیش‌بینی کیفی رودخانه‌ها با این سیستم نیاز به متخصص خبره و حجم داده‌پردازی زیاد دارد، ولی در عوض دقت پیش‌بینی آنها بسیار مناسب است.

پیشنهادها

۱- مشخصه‌های کیفی دیگر، نظیر کل جامدات محلول(TDS) ، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) و نیز آلاینده‌هایی نظیر نیترات، فسفات، سولفات‌ها و همچنین فلزات سنگین نیز بررسی شود و ضمن بررسی عوامل مؤثر در تغییرات آنها در طول رودخانهٔ زاینده رود، کاربرد سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی آنها مورد بررسی قرار گیرد.

۲- با استفاده از داده‌های کمی و کیفی موجود از دیگر رودخانه‌های کشور و با عنایت به منابع آلاینده هر رودخانه و نیز مشخصات هیدرولیکی آنها، اقدام به کاربرد سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی کرده تا بتوان در مورد جامعیت کاربرد این سیستم در پیش‌بینی کیفی رودخانه‌ها قضاوت جامعی به‌عمل آورد.

۳- مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از اجرای مدل‌های شبیه‌ساز رایج در زمینهٔ کیفیت رودخانه‌ها با نتایج حاصل از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی صورت گیرد تا بتوان ضمن بررسی دقت هریک، معایب و مزایای کاربرد هر کدام را به‌طور دقیق‌تری بررسی کرد. بدیهی است در این زمینه نیاز است توانایی اتصال این مدل‌های شبیه‌سازی به مدل‌های بهره برداری کیفی از رودخانه‌ها نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

۴- مدل بهینه بهره‌برداری کمی-کیفی از رودخانه زاینده‌رود با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی تهیه شد تا با عنایت به وضعیت کنونی آن بتوان نحوهٔ بهره‌برداری بهینه از رودخانه و نیز وضعیت تخلیه‌کننده‌های آلاینده‌ها را مشخص کرد.

یادداشت

1-Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

منابع مورد استفاده

تشنه لب، م.، صفارپور، ن. و افیونی، د. ۱۳۷۸. سیستم‌های فازی و کنترل فازی. (ترجمه) دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

صفوی،ح.ر. ۱۳۸۷. کالیبراسیون و صحت سنجی مدل‌های کیفی رودخانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ زاینده‌رود. پذیرفته شده جهت چاپ، مجلهٔ علمی پژوهشی شریف.

کارآموز، م و همکاران. ۱۳۷۹. گزارش طرح جامع کاهش آلودگی منابع آب استان اصفهان. ادارهٔ کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان، اصفهان.

مهندسان مشاور جاماب.۱۳۷۷. طرح جامع آب حوضهٔ آبریز زاینده رود. جاماب، تهران.

Chang,L.C. and F.L.,Chang. 2001. Intelligent control for modeling of real-time reservoir operation. Hydrological Processes, 15, 1621-1631.

Jang,J.S.R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. IEEE Transaction Systems, Man. and Cybernetics. 23, 665-685.

Jang,J.S.R. and N.,Gulley. 1995. The Fuzzy Logic Tool Box for Use with MATLAB. The Mathworks Inc. Natick, MA.

Little,K.W., and R.E.,Williams. 1975. Least-squares calibration of QUAL2E. Water Environment Research, 64(2), 179-185.

Mulligan,A.E., and L.C.,Brown. 1998. Genetic algorithms for calibrating water quality models. Journal of Environmental Engineering, 124 (3), 202-211.

Nayak,P.C.and et al. 2004. A Nero-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. Journal of Hydrology, 291, 52-66.

Van Griensven,A., A.,Francos, and W.,Bauwens. 2002. Sensitivity analysis and auto calibration of an integral dynamic model for river water quality. Water Science and Technology, 43(7), 321-328.

Yih,S.M., B.,Davidson. 1975. Identification in nonlinear, distributed water quality models. Water Resources Research, 11 (5), 693-704.