



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد نوزدهم، شماره اول، ۱۳۹۱

<http://jwfst.gau.ac.ir>

مقایسه عملکرد مدل‌های مبتنی بر منطق فازی در پیش‌بینی آبدهی روزانه رودخانه ليقوان

مرتضی نبی‌زاده^۱،* ابوالفضل مساعدی^۲، موسی حسام^۳ و امیراحمد دهقانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آدانشيار دانشكده منابع طبيعي و

محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ^۲استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۹

چکیده

پیش‌بینی آبدهی رودخانه و بررسی عوامل مؤثر بر آن از مهم‌ترین مباحث مدیریت منابع آب به‌شمار می‌رود. در سال‌های اخیر استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی جهت مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی که دارای عدم قطعیت بالایی هستند، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش از مدل‌های مبتنی بر منطق فازی شامل سیستم استنتاج فازی (FIS, Fuzzy Inference System) و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (ANFIS, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) به‌منظور پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه استفاده شده است. به‌این‌منظور، از سه پارامتر بارندگی، دما و دبی روزانه حوضه آبریز ليقوان‌چای برای پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان، استفاده شده است. در پیش‌پردازش اولیه داده‌ها، تصادفی بودن آن‌ها با استفاده از آزمون نقاط عطف (نقطه بازگشت) مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای تعیین مدل‌های بهینه ورودی به سیستم‌ها، همبستگی نگار داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پیش‌بینی در دو بخش ترکیبی و پیش‌بینی بر اساس دبی روزهای قبل انجام شد. ارزیابی نتایج پیش‌بینی‌ها با استفاده از معیارهای گوناگون از جمله معیار ناش - ساتکلیف (Nash-Sutcliffe Criterion (C_{NS}) نشان داد که مدل ANFIS با دقت بالاتر (C_{NS}=۰/۹۹۸) و پراکندگی کمتری نسبت به مدل FIS (C_{NS}=۰/۹۹۳) دبی این رودخانه را پیش‌بینی کرده است.

* مسئول مکاتبه: mosaedi@um.ac.ir

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۱۹)، شماره (۱) ۱۳۹۱

همچنین با بررسی دو بخش طراحی شده، مشخص شد که به‌طور کلی، در بررسی دوره‌های سالیانه، دما در پیش‌بینی جریان روزانه این رودخانه تأثیر چندانی نداشته و بارندگی روز جاری مؤثرتر از دبی دو روز قبل در پیش‌بینی جریان روزانه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی جریان، سیستم استنتاج فازی (FIS)، و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (ANFIS)، همبستگی‌نگار، حوضه ليقوان‌چای

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در مهندسی منابع آب، پیش‌بینی میزان آورد رودخانه می‌باشد که از نظر برنامه‌ریزی منابع آب دارای اهمیت است. پیش‌بینی در هیدرولوژی به معنی تخمین شرایط هیدرولوژیکی و هواشناسی در یک بازه زمانی خاص می‌باشد. تفاوت پیش‌بینی با پیش‌گویی در این است که پیش‌گویی، پیش‌بینی شرایط آینده است، بدون این‌که به شرایط خاصی مربوط باشد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۲۰۰۵). برای پیش‌بینی جریان رودخانه، استفاده از مدل‌های آماری، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی از سابقه به‌نسبت طولانی برخوردار است. تجربه نشان داده که این مدل‌ها در کنار نقاط قوت دارای نقاط ضعف مهمی نیز هستند. چرا که عوامل مؤثر در فرآیندهای هیدرولوژیکی بسیار متنوع بوده و اعمال کلیه آن‌ها در مدل‌های طراحی شده بسیار مشکل می‌باشد. علاوه بر این، نبود قطعیت‌ها و غیرخطی بودن قوی روابط بین متغیرها، مسأله را پیچیده می‌کند. هم‌چنین مدل‌های فیزیکی و مفهومی هیدرولوژیکی به‌دلیل نیاز به اطلاعات فراوان، پارامترهای گوناگون و واسنجی وقت‌گیر، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین، در سال‌های اخیر، رویکرد به تئوری مجموعه‌های فازی و شبکه‌های عصبی و سایر مدل‌های هوشمند به‌عنوان فناوری‌های جدید و ابزاری توانمند در فرآیندهای هیدرولوژیکی نظیر پیش‌بینی، افزایش یافته است. زیرا با استفاده از آن‌ها، عدم قطعیت‌های موجود را به‌همراه درک روابط ذاتی میان داده‌ها (که ریاضیات کلاسیک قادر به حل آن‌ها نمی‌باشد)، می‌توان مدل‌سازی نمود (پوستی‌زاده، ۲۰۰۶).

نورانی و صالحی (۲۰۰۸) در پژوهش خود، با استفاده از سه روش شبکه عصبی، استنتاج فازی و شبکه تطبیقی عصبی - فازی مدل بارش - رواناب حوضه ليقوان‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی را ارائه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی و منطق فازی، به تنهایی قادر به تبیین این

مدل نمی‌باشد، ولی در صورت تلفیق این دو روش، نتیجه مطلوب برای مدل‌سازی بارش-رواناب در سطح حوضه مورد بررسی حاصل می‌شود. سلاجقه و فتح‌آبادی (۲۰۰۹) با بهره‌گیری از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی، میزان بار معلق رودخانه کرج در ایستگاه سیرا را برآورد نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که منطق فازی عملکرد بهتری نسبت به دو روش شبکه عصبی مصنوعی و منحنی سنج رسوب داشته و بهره‌گیری از آن را برای برآورد بار معلق رودخانه پیشنهاد نمودند. معتمد وزیری و همکاران (۲۰۰۹) با روش‌های هیدرولوژیکی USBR و FAO، و مدل طراحی شده در محیط ویژوال بیسیک^۱ بر پایه اصول منطق فازی، میزان رسوب معلق ایستگاه سرچم (حوضه آبریز زنجان‌رود) را برآورد نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش فازی، به‌علت شناخت دقیق‌تر الگو انتقال رسوب به‌ویژه در شرایط سیلابی، نسبت به روش‌های یاد شده نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌نماید.

عقیل و همکاران (۲۰۰۷) مزایا مدل تطبیقی عصبی-فازی و مدل شبکه عصبی مصنوعی را در مدل‌سازی پیوسته رفتار ساعتی و روزانه رواناب مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل تطبیقی عصبی-فازی بهتر از مدل دیگر اجرا شده و این قابلیت را به کاربر می‌دهد که به‌راحتی داده‌ها را پردازش نموده و با استفاده از این تکنیک فرآیند بارش-رواناب را با انواع ورودی مورد آموزش و آزمون قرار دهد. نبی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش فازی و مدل عصبی-فازی به پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه ليقوان‌چای پرداختند. ایشان ابتدا با بررسی همبستگی‌نگار داده‌ها و مقادیر خودهمبستگی دبی در تاخیرهای مختلف، الگوهای مختلف را طراحی و سپس با دو مدل بالا به پیش‌بینی دبی روزانه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پیش‌بینی مدل عصبی-فازی به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر می‌باشد.

باکانلی و همکاران^۲ (۲۰۰۸) از مدل ANFIS برای پیش‌بینی خشکسالی در کشور ترکیه استفاده نمودند. به‌منظور ارزیابی بهتر نتایج مدل‌های ANFIS، همان داده‌ها با روش‌های شبکه عصبی FFNN^۳ و مدل رگرسیون خطی چندگانه^۴ نیز مورد آزمون قرار گرفتند که نتایج به‌دست آمده در تمام ایستگاه‌ها بیانگر ارجحیت مدل ANFIS نسبت به دو مدل دیگر بود. ذونعمت کرمانی و تشن‌لب (۲۰۰۸)، از مدل ANFIS به‌منظور پیش‌بینی رفتار روزانه جریان سه رودخانه واقع در امریکا استفاده

- 1- Visual Basic 6.0
- 2- Bacanli et al
- 3- Feed Forward Neural Network
- 4- Multiple Linear Regression

نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه نمی‌توان از یک ساختار ثابت و یکتا به‌عنوان بهترین ساختار برای شبکه عصبی- فازی استفاده نمود، اما در حالتی که پراکندگی داده‌ها زیاد باشد افزایش توابع عضویت در ANFIS نتایج مناسب‌تری را نسبت به افزایش تعداد ورودی‌ها نشان می‌دهد. شو و اوردا^۱ (۲۰۰۸) برای آنالیز منطقه‌ای سیلاب در حوضه‌های آبریز بدون ایستگاه (۱۵۱ حوضه آبخیز در ایالت کبک کانادا) از مدل عصبی- فازی، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی استفاده کردند. نتایج به دست آمده از این پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل عصبی- فازی قابلیت بهتری در برآورد سیل در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری نسبت به دو مدل دیگر دارد.

امروزه استفاده از روش‌های هوشمند و از جمله منطق فازی در مباحث مدل‌سازی و پیش‌بینی در مهندسی منابع آب گسترش یافته است ولی روش‌های مختلف نتایج متفاوتی را در شرایط مختلف هیدرولوژیکی ارائه داده‌اند. بنا بر این، هدف از انجام این پژوهش، مقایسه عملکرد مدل‌های مبتنی بر منطق فازی (ANFIS و FIS) و تعیین مناسب‌ترین مدل در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه در یک منطقه سردسیر (رودخانه لیقوان)، بر اساس مقادیر دبی در روزهای مختلف و مقادیر بارش و متوسط دما همان روز و تاثیرپذیری آبدهی روزانه و سالیانه از این عوامل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سیستم استنتاج فازی^۲ (FIS): تصمیم‌گیری یک بخش مهم در تمام سیستم‌ها می‌باشد. FIS، قوانین مناسب را تنظیم کرده و تصمیمات را برپایه این قوانین اخذ می‌نماید. این عمل بر اساس مفاهیمی چون تئوری مجموعه‌های فازی، قوانین "اگر- آنگاه" فازی و استدلال فازی انجام می‌گیرد (سوناندم^۳ و همکاران، ۲۰۰۷).

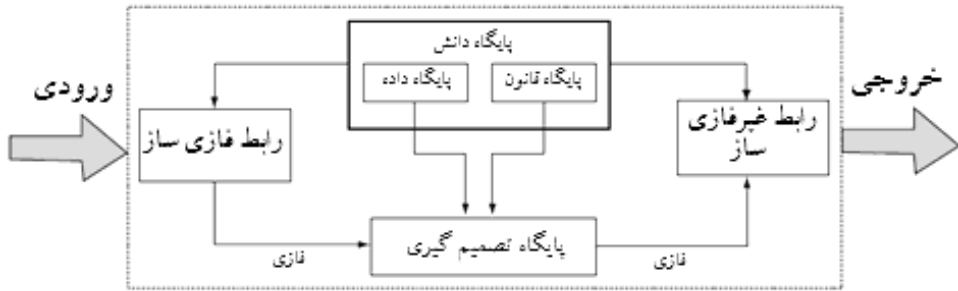
یک سیستم استنتاج فازی (FIS) با پنج بلوک اصلی در شکل ۱ نشان داده شده است. کاربرد هریک از بلوک‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

۱- پایگاه قانون^۴ شامل تعدادی قانون اگر- آنگاه فازی.

۲- پایگاه داده^۵ که توابع عضویت مجموعه‌های فازی به‌کار رفته در قوانین فازی را تعریف می‌کند.

- 1- Shu and Ouarda
- 2- Fuzzy Inference System
- 3- Sivanandam et al
- 4- Rule Base
- 5- Data Base

- ۳- واحد تصمیم‌گیری^۱ که عملگرهای استنتاج را بر روی قوانین اعمال می‌کند.
- ۴- رابط فازی‌ساز^۲ که ورودی‌های ترد^۳ را به درجه‌های مطابق با مقادیر زبانی تبدیل می‌کند.
- ۵- رابط غیرفازی‌ساز^۴ که نتایج فازی استنتاج را به یک خروجی ترد تبدیل می‌کند (جنگ، ۱۹۹۳).



شکل ۱- بخش‌های اصلی یک سیستم استنتاج فازی (جنگ، ۱۹۹۳).

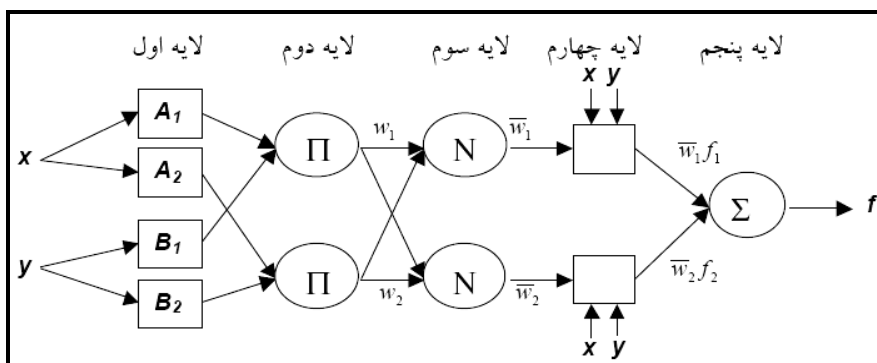
سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی^۵ (ANFIS): اصول بنیادین منطق فازی که اساس این مدل می‌باشد، توسط عسکرزاده (۱۹۶۵) ارائه شد. اما مدل ANFIS که ترکیبی از مدل شبکه عصبی و منطق فازی می‌باشد، توسط جنگ (۱۹۹۳) طراحی شد. مدل‌های تطبیقی عصبی - فازی به‌تازگی محبوبیت زیادی برای واسنجی روابط غیرخطی به‌دست آورده‌اند، زیرا این مدل‌ها مزایای بیشتری را نسبت به مدل‌های رایج ارائه می‌دهند. ازجمله، این مدل‌ها قادرند شمار زیادی از داده‌های شلوغ و درهم را از سیستم‌های دینامیکی و غیرخطی به‌کار برده و مدل کنند، به‌خصوص زمانی که درک کاملی از روابط فیزیکی و اساسی سیستم مورد نظر وجود ندارد. به‌منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که سیستم استنتاجی موردنظر دو ورودی X و Y و یک خروجی Z دارد. برای یک مدل فازی تاکاگی - سوگنو درجه اول، می‌توان یک مجموعه قانون نمونه را با دو قانون اگر - آنگاه فازی به‌صورت زیر بیان کرد:

- 1- Decision-Making Unit
- 2- Fuzzification Interface
- 3- Crisp
- 4- Defuzzification Interface
- 5- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

قانون اول: اگر x برابر A_1 و y برابر B_1 باشد آنگاه $z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

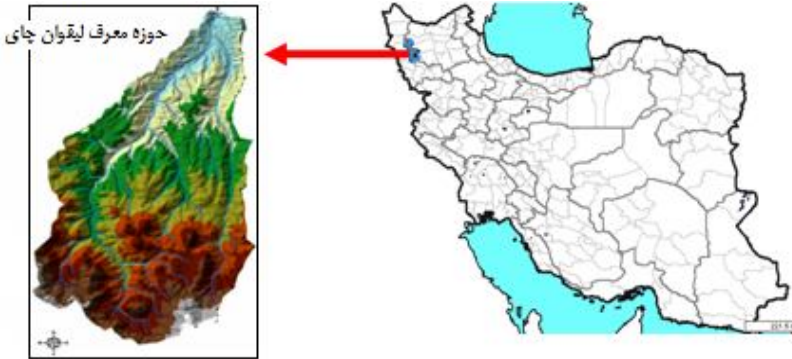
قانون دوم: اگر x برابر A_2 و y برابر B_2 باشد آنگاه $z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

که p_i, q_i, r_i ($i=1,2$) پارامترهای خطی تالی مدل فازی تاکاگی - سوگنو درجه اول هستند. نمونه طراحی شده از مدل تطبیقی عصبی - فازی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- معماری کلی مدل تطبیقی عصبی - فازی (نبی‌زاده، ۲۰۱۱).

منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز ليقوان يکي از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه بوده و با وسعتی معادل ۷۶ کیلومتر مربع در دامنه شمالی سهند بین طول‌های شرقی ۴۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۲۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه و عرض‌های شمالی ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۹ دقیقه و ۳۰ ثانیه، گسترده شده است. به‌طور کلی حوضه آبریز ليقوان به‌علت وجود پوشش‌های برفی دائمی در ارتفاعات مختلف آن دارای رژیم برفی است. ذوب برف در جریان دائمی آن مؤثر و قابل ملاحظه می‌باشد. ریزش باران‌ها در ماه‌های بهار و تابستان شدید بوده و این امر اثر قابل توجهی در بالا بردن مقدار دبی رودخانه دارد. متوسط جریان رودخانه در طی دوره آماری مورد مطالعه (از سال آبی ۱۳۶۶-۶۷ تا سال آبی ۱۳۸۵-۸۶) برابر با ۰/۸۲ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است (شکل ۳).



شکل ۳- موقعیت کلی حوضه لیقوان در کشور.

پیش پردازش داده‌ها: قبل از هر گونه پردازشی روی داده‌ها، ابتدا باید تصادفی بودن آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این مرحله از پژوهش، آزمون نقاط عطف (بازگشت) برای این امر مورد استفاده قرار گرفت. مراحل انجام آزمون نقاط عطف به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- کلیه داده‌ها رتیب زمان وقوع ردیف می‌شود (به فرض N عدد).
- ۲- تعداد نقطه بازگشت در سری داده‌ها محاسبه می‌شود. نقطه بازگشت (عطف) به حالتی گفته می‌شود که هر عدد از عدد قبل و بعد خود بزرگ‌تر باشد $[x_{i-1} < x_i > x_{i+1}]$ و یا آن‌که از آن دو کوچک‌تر باشد $[x_{i-1} > x_i < x_{i+1}]$.
- ۳- تعداد نقاط بازگشت P نامیده می‌شود.
- ۴- تعداد نقاط بازگشت (عطف) مورد انتظار از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$E(P) = \frac{2(N-3)}{3} \quad (1)$$

۵- واریانس P ($Var(P)$) از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$Var(P) = \frac{16N-29}{90} \quad (2)$$

۶- مقدار Z که توصیف‌کننده P بر حسب استاندارد نرمال است، از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$z = \frac{[P - E(P)]}{[Var(P)]^{.5}} \quad (3)$$

۷- چنانچه $1/96 < Z < 1/96$ - باشد، آن‌گاه تصادفی بودن داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد مورد قبول است (علیزاده، ۲۰۰۸).

تعیین مدل‌های ورودی و تأخیرهای زمانی مناسب: برای پیش‌بینی آبدهی روزانه (Q) رودخانه ليقوان، داده‌های روزانه میانگین دما روزانه (T)، میانگین بارندگی روزانه (R) و میانگین دبی روزانه (Q) این رودخانه از سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۶ تا سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ یعنی در مجموع ۲۰ سال به‌عنوان ورودی انتخاب گردید. از این میان، داده‌های روزانه ۱۵ سال (از سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۶ تا سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۰) به‌عنوان آموزش^۱ و ۵ سال دیگر (از سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶) به‌عنوان آزمون^۲ انتخاب شد. برای تعیین مناسب‌ترین تأخیرهای زمانی، به بررسی همبستگی‌نگار داده‌ها پرداخته شد. برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر پیش‌بینی و آزمون مدل‌های مختلف، پیش‌بینی جریان به دو بخش مطابق جدول ۱ تقسیم شد. در بخش اول مدل‌هایی با ترکیب هریک از پارامترهای دبی، دما و بارندگی و در بخش دوم مدل‌هایی صرفاً متشکل از دبی‌های روزهای قبل طراحی گردید.

جدول ۱- ساختار مدل‌های طراحی شده.

بخش کلی	شماره مدل	ساختار مدل
۱- مدل‌های مبتنی بر دبی و سایر پارامترها	۱	$Q_t = f(Q_{t-1}, R_t, T_t)$
	۲	$Q_t = f(Q_{t-1}, R_t)$
۲- مدل‌های صرفاً مبتنی بر دبی‌های روزهای قبل	۳	$Q_t = f(Q_{t-1}, Q_{t-2})$
	۴	$Q_t = f(Q_{t-2}, Q_{t-3})$
	۵	$Q_t = f(Q_{t-3}, Q_{t-4})$
	۶	$Q_t = f(Q_{t-4}, Q_{t-5})$

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی از معیارهای ناش - ساتکلیف^۳ (رابطه ۴)، ریشه میانگین مربعات خطا (رابطه ۵) و میانگین قدر مطلق خطا (رابطه ۶) استفاده شد. معیار ناش - ساتکلیف که میزان رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد، در بازه $-\infty$ تا $+1$ تغییر می‌کند. نزدیکی این معیار به یک،

- 1- Train
- 2- Test
- 3- Nash-Sutcliffe Criterion (CNS)

نشان‌دهنده رابطه قوی بین دو متغیر است (ناش - ساتکلیف، ۱۹۷۰). دو معیار دیگر نیز مقادیری مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، میزان خطا دو متغیر نسبت به هم کمتر و دو متغیر به هم نزدیک‌تر هستند.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - \bar{Q}_i^o)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i^o - Q_i^s|}{n} \quad (6)$$

در رابطه‌های بالا، n تعداد داده‌ها، Q_i^o دبی مشاهداتی، Q_i^s دبی شبیه‌سازی شده، C_{NS} معیار ناش - ساتکلیف، $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا و MAE میانگین قدر مطلق خطا می‌باشند. لازم به یادآوری است که این شاخص‌ها برای تمام مدل‌ها محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفتند و سپس بهترین مدل با توجه به بهترین نتایج شاخص‌های محاسبه شده به‌ویژه شاخص معیار ناش - ساتکلیف انتخاب شد. به‌عبارت دیگر در این پژوهش برای انتخاب بهترین مدل ورودی، به معیار ناش - ساتکلیف توجه بیشتری شده است، زیرا این معیار از دقت قابل قبولی در ارزیابی کارایی مدل‌ها، نسبت به سایر شاخص‌های آماری برخوردار است.

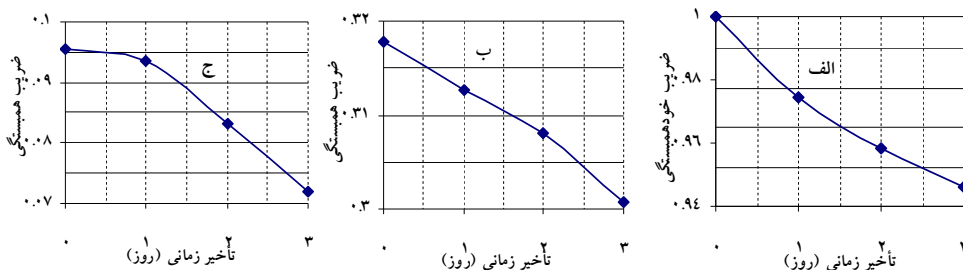
نتایج

نتایج آزمون نقاط عطف نشان می‌دهد که داده‌ها (دما، بارندگی و دبی) به‌طور کامل تصادفی است و مقادیر Z برای هر سه پارامتر در محدوده مجاز آن قرار دارد. نتایج این آزمون در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج آزمون نقاط عطف.

مقادیر اجزا مختلف آزمون نقاط عطف				پارامتر
z	Var(p)	E(p)	p	
۱/۱۱	۳/۲۳	۱۲	۱۴	دما
-۰/۵۶	۳/۲۳	۱۲	۱۱	بارندگی
۰/۵۶	۳/۲۳	۱۲	۱۳	دبی

نمودار همبستگی نگار سه متغیر دبی، دما و بارندگی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار خودهمبستگی دبی (شکل ۴- الف)، تأخیر یک روز به‌عنوان مناسب‌ترین تأخیر در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۴- ب ملاحظه می‌شود که بیشترین همبستگی دبی با دما در همان روز اتفاق افتاده است، بنابراین رابطه آبدهی با دما بدون تأخیر زمانی در نظر گرفته شد. برای بارندگی نیز (با توجه به شکل ۴- ج) به‌همین صورت عمل شده است. همان‌گونه که بیان شد، به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر پیش‌بینی و آزمون مدل‌های مختلف، پیش‌بینی جریان به دو بخش مطابق جدول ۱ تقسیم شد. در بخش اول مدل‌هایی با ترکیب هر یک از پارامترهای دبی، دما و بارندگی طراحی شدند و در بخش دوم مدل‌هایی صرفاً بر مبنای دبی روزهای قبل طراحی گردید.



شکل ۴- همبستگی نگار داده‌ها: الف) دبی و دبی، ب) دبی و دما، ج) دبی و بارندگی.

پیش‌بینی جریان با سیستم استنتاج فازی

فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی مدل‌ها: سری‌های زمانی متغیرهای ورودی و خروجی مرحله قبل به‌صورت یک مجموعه، که هر ردیف آن دارای یک سری داده ورودی در ستون‌های اولیه و داده خروجی در ستون آخر می‌باشد، مرتب می‌شوند. در مرحله بعد برای این داده‌ها ۳ بازه مختلف

کم^۱، متوسط^۲ و زیاد^۳ در نظر گرفته می‌شود (که به ترتیب با حروف L, M و H نشان داده می‌شوند) به طوری که توزیع داده‌ها در هر بازه تقریباً یکسان می‌باشد.

تعیین قوانین مدل‌ها: پس از بازه‌بندی داده‌ها، با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار اکسل^۴ ۲۰۰۳ قوانین موجود در بین داده‌ها محاسبه و استخراج شده و فراوانی هر یک از این قوانین محاسبه شد. پارامتر فراوانی، تعداد دفعات تکرار هر قانون را در مجموعه قوانین نشان می‌دهد که بر اساس این پارامتر، قوانین انتخاب و وارد سیستم می‌شوند. به عنوان مثال مجموعه قوانین مربوط به پیش‌بینی دبی با مدل ۱ در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش مقدم قوانین این مدل دارای سه جزء بارش روز جاری، دما روز جاری و دبی روز قبل و بخش تالی آن‌ها دارای یک جزء دبی روز جاری می‌باشد.

جدول ۳- قوانین استخراج شده مربوط به مدل ۱.

فراوانی	بخش تالی		بخش مقدم قوانین	
	دبی روز جاری	دبی روز قبل	دما روز جاری	بارندگی روز جاری
۸۳۵	H	H	H	L
۵۸۲	M	M	L	L
۵۳۴	L	L	L	L
۴۹۴	L	L	H	L
۴۳۳	H	H	M	L
۳۹۹	L	L	M	L
۳۹۱	M	M	M	L
۲۵۵	M	M	H	L
۱۴۳	H	H	M	H
۱۱۴	M	M	L	M
۹۱	M	M	L	H
۹۰	H	H	H	M

- 1- Low
- 2- Medium
- 3- High
- 4- Excel

واسنجی (آموزش) سیستم استنتاج فازی: در مرحله واسنجی پس از تعیین تابع عضویت مناسب، هر یک از عملگرهای فازی به صورت سعی و خطا مورد آزمایش قرار گرفت تا بهترین آن‌ها انتخاب و پیش‌بینی انجام گیرد. در این مرحله توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، زنگوله‌ای، گوسی و گوسی ۲ مورد استفاده قرار گرفتند. هم‌چنین تعداد قوانین ورودی به مدل فازی نیز بر اساس روش سعی و خطا تعیین شدند، که این تعداد از ۳ تا ۱۱ قانون برای مدل‌های مختلف به‌دست آمد.

صحت‌سنجی (آزمون) سیستم استنتاج فازی: براساس سیستمی که با ۱۵ سال داده، آموزش دیده بود، میزان خروجی مدل برای ۵ سال آماری دوره آزمون (از سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ تا سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵) محاسبه گردید. به‌این‌ترتیب بر اساس مطالب بیان شده، خروجی هر یک از مدل‌های طراحی شده جدول ۲ با استفاده از سیستم فازی بهینه شده در مراحل قبل، محاسبه شد.

فازی‌زدایی خروجی مدل: در این مرحله که گام آخر هر سیستم استنتاج فازی می‌باشد، جواب نهایی سیستم که به‌صورت یک عدد فازی است، با استفاده از یکی از روش‌های غیرفازی‌ساز (مرکز ثقل، میانگین مراکز، ماکزیمم و ...) به یک عدد حقیقی تبدیل می‌شود. این روش نیز مانند سایر اجزا سیستم به‌صورت سعی و خطا به‌دست آمد.

پیش‌بینی جریان با سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی: در این مرحله هم داده‌ها در دو دوره ۱۵ ساله و ۵ ساله به‌عنوان داده‌های آموزش و آزمون از هم مجزا شده و وارد مدل عصبی- فازی شدند. برای هر مدل، ۵ تابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، زنگوله‌ای، گوسی و گوسی ۲ مورد آزمون قرار گرفت. تعداد تکرارهای^۱ بهینه نیز به روش سعی و خطا به‌دست آمد. پس از بررسی مدل‌های مختلف با توابع عضویت متفاوت، بهترین نتایج هر مدل تعیین شد که در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

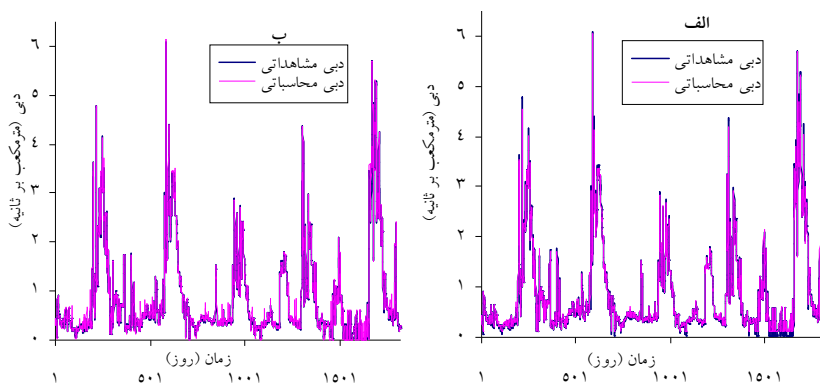
جدول ۴- مقادیر معیارهای ارزیابی برای مدل‌های بخش اول (مدل‌های مبتنی بر دما، بارندگی و دبی روزانه).

شماره مدل	نوع سیستم فازی	تابع عضویت	تعداد تکرار	C_{NS}		$RMSE (m^3/s)$		$MAE (m^3/s)$	
				آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	FIS	دوزنقه‌ای	-	۰/۹۰۳	۰/۹۲۳	۰/۲۸۴	۰/۲۵۳	۰/۰۸۴	۰/۰۸۰
	ANFIS	دوزنقه‌ای	۳۳۰	۰/۹۹۸	۰/۹۸۵	۰/۰۴۵	۰/۱۱۱	۰/۰۲۱	۰/۰۳۰
۲	FIS	مثلثی	-	۰/۹۹۴	۰/۹۹۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۸	۰/۰۲۸	۰/۰۳۲
	ANFIS	مثلثی	۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۰۴۰	۰/۰۴۵	۰/۰۲۰	۰/۰۲۴

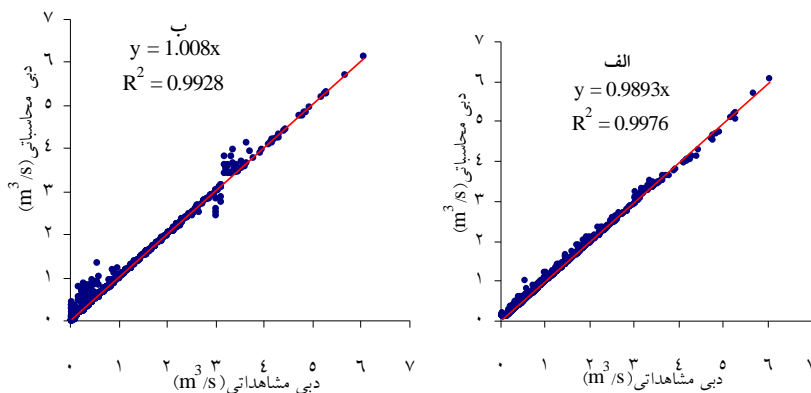
جدول ۵- مقادیر معیارهای ارزیابی برای مدل‌های بخش دوم (مدل‌های صرفاً مبتنی بر دبی‌های روزهای قبل).

شماره مدل	نوع سیستم فازی	تابع عضویت	تعداد تکرار	C_{NS}		$RMSE (m^3/s)$		$MAE (m^3/s)$	
				آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۳	FIS	مثلثی	-	۰/۹۶۷	۰/۹۴۲	۰/۱۶۶	۰/۲۱۹	۰/۱۰۰	۰/۱۱۹
	ANFIS	گوسی ۲	۲۶۲	۰/۹۹۵	۰/۹۸۹	۰/۰۶۶	۰/۰۹۶	۰/۰۱۷	۰/۰۲۳
۴	FIS	مثلثی	-	۰/۹۲۳	۰/۸۴۱	۰/۲۵۳	۰/۳۶۲	۰/۱۳۷	۰/۱۸۹
	ANFIS	دوزنقه‌ای	۲۵۶	۰/۹۵۲	۰/۸۹۳	۰/۲۰۰	۰/۲۹۷	۰/۰۸۸	۰/۱۴۷
۵	FIS	مثلثی	-	۰/۸۶۶	۰/۷۴۰	۰/۳۳۴	۰/۴۶۳	۰/۲۳۶	۰/۲۹۱
	ANFIS	دوزنقه‌ای	۲۸۰	۰/۹۲۶	۰/۸۱۶	۰/۲۴۹	۰/۳۸۹	۰/۱۱۹	۰/۲۰۳
۶	FIS	مثلثی	-	۰/۸۷۳	۰/۷۲۰	۰/۳۲۶	۰/۴۸۱	۰/۱۷۹	۰/۲۶۶
	ANFIS	گوسی ۲	۶۰۲	۰/۹۰۶	۰/۷۶۳	۰/۲۷۹	۰/۴۴۲	۰/۱۴۰	۰/۲۳۵

با توجه به نتایج جدول ۴ و مقایسه پارامترهای آماری دو مدل این بخش (مدل‌های مبتنی بر دما، بارندگی و دبی روزانه)، مشخص می‌شود که نتایج مدل شماره ۲ بهتر از مدل شماره ۱ می‌باشد. نتایج هر دو مدل ANFIS و FIS این موضوع را به خوبی تأیید می‌کند. در نتیجه مدل شماره ۲ در بخش اول به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. با مقایسه نتایج مدل‌های بخش دوم (جدول ۵)، مشاهده می‌شود که مدل شماره ۳ از نظر هر سه پارامتر آماری ارائه شده بهتر از سایر مدل‌های این بخش می‌باشد. به همین ترتیب مدل شماره ۳ در بخش دوم به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. حال با مقایسه نتایج مدل‌های ۲ و ۳، ملاحظه می‌شود که نتایج مدل ۲ بر اساس معیارهای آماری و به‌خصوص معیار ناش-ساتکلیف بهتر از مدل ۳ می‌باشد و مدل ۲ نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است. نتایج پیش‌بینی این مدل با روش‌های FIS و ANFIS در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۵- مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی بر اساس مدل ۲ در بخش آزمون الف (ANFIS ب) FIS



شکل ۶- نمودار پراکنش و همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی بر اساس مدل ۲ در بخش آزمون الف (ANFIS ب) FIS

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بخش اول پیش‌بینی (جدول ۴) و مقایسه پارامترهای آماری دو مدل این بخش، مشخص می‌شود که نتایج مدل شماره ۲ بهتر از مدل شماره ۱ می‌باشد، یعنی به‌طور کلی دما روزانه در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان تأثیری نداشته و در صورت حذف این پارامتر، دقت پیش‌بینی افزایش می‌یابد. نتایج هر دو مدل ANFIS و FIS این موضوع را به‌خوبی تأیید می‌کند. در نتیجه مدل ۲ در بخش اول به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. با مقایسه نتایج مدل‌های بخش دوم (جدول ۵)، مشاهده می‌شود که مدل شماره ۳ از نظر هر سه پارامتر آماری ارائه شده بهتر از سایر مدل‌های این

بخش می‌باشد که باز هم نتایج هر دو مدل ANFIS و FIS این موضوع را به خوبی تأیید می‌کند. به‌همین ترتیب مدل شماره ۳ در بخش دوم به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. حال با مقایسه نتایج مدل‌های ۲ و ۳، ملاحظه می‌شود که نتایج مدل ۲ بر اساس معیارهای آماری و به‌خصوص معیار ناش-ساتکلیف بهتر از مدل ۳ می‌باشد و مدل ۲ نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر پارامتر بارندگی روز جاری از پارامتر دبی دو روز قبل بیشتر بوده و این پارامتر یکی از مؤثرترین پارامترها در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که مدل ANFIS در پیش‌بینی جریان نسبت به مدل FIS از دقت بالاتری برخوردار است. مقادیر پارامترهای آماری جدول ۴ و به‌خصوص معیار ناش-ساتکلیف به خوبی این موضوع را تأیید می‌کند. همچنین با توجه به نمودارهای پراکنش داده‌ها (شکل ۶) مشاهده می‌شود که مدل FIS مقادیر دبی‌های کم (بازه صفر تا ۱ مترمکعب بر ثانیه) و متوسط (بازه ۳ تا ۴ متر مکعب بر ثانیه) را به خوبی شبیه‌سازی نکرده است که پراکندگی زیاد داده‌ها در این بازه‌ها به وضوح قابل مشاهده است. اما مدل ANFIS با پراکندگی بسیار کمتری موفق به پیش‌بینی جریان رودخانه شده است. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که مدل FIS مقادیر دبی پیک را در بیشتر موارد بهتر از مدل ANFIS برآورد کرده است.

یکی از معایب سیستم استنتاج فازی، وقت‌گیر بودن آموزش آن می‌باشد. این در حالی است که مدل عصبی- فازی به وقت کمتری برای آموزش احتیاج دارد و از این نظر روشی مناسب می‌باشد، به‌طوری‌که می‌توان چندین تابع عضویت را برای این مدل مورد آزمایش قرار داد. نتایج تحقیقات پهلوانی (۲۰۰۹) نیز این موضوع را تأیید می‌کند. عمده‌ترین علت ضعف هر دو مدل در پیش‌بینی دبی برخی سال‌ها از آن‌جا ناشی می‌شود که این سال‌ها در دوره کالیبراسیون تکرار نشده‌اند و به همین دلیل، قوانین فازی تدوین شده به این رخدادها پوشش داده نشده است. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج فلاح قاله‌ری و همکاران (۲۰۰۷) و فلاح قاله‌ری و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

هم‌چنین نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که هر چه پراکندگی داده‌های ورودی مدل بیشتر باشد، مدل فازی- عصبی دارای توانایی بیشتری در شبیه‌سازی این نوع از داده‌ها می‌باشد، که نورانی و صالحی (۲۰۰۸) در تحقیقات خود به این نکته اشاره کرده‌اند. یکی از محدودیت‌های مدل عصبی- فازی، تعداد ورودی‌های آن است. در حالی‌که سیستم استنتاج فازی دچار این مشکل نیست. دلیل این محدودیت در شبکه‌های عصبی- فازی می‌تواند این باشد که با افزایش قوانین فازی، که آن

نیز متناسب با تعداد متغیرهای ورودی مدل است، ساختار پیچیده‌ای از مدل تشکیل می‌شود که روند شبیه‌سازی را بسیار طولانی می‌کند که پهلوانی (۲۰۰۹) در تحقیقات خود به این نکته اشاره کرده است. با جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده از این دو روش، می‌توان دریافت که دقت سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی از سیستم استنتاج فازی بیشتر می‌باشد. اما در صورتی که تعداد ورودی‌ها، بیش از ۵ پارامتر بوده و یا بتوان با روشی بهینه‌کننده، پارامترهای مدل فازی را به‌صورت هوشمند بهینه کرد، سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی توصیه می‌شود.

منابع

1. Alizadeh, A. 2008. Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University Press, 24th edition, 870p. (In Persian)
2. Aqil, M., Yano, A., and Nishiyama, S. 2007. A comparative study of artificial neural network and neuro-fuzzy in continuous modeling of the daily and hourly behavior of runoff. *Journal of hydrology* 337: 22-34.
3. Bacanlı, U., Firat, M., and Dikbas, F. 2008. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for drought forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 23:8. 1143-1154.
4. Fallah Ghalhari, Gh. A., Mousavi Baygi, M., and Habibi Nokhandan, M. 2009. Results Compression of Mamdani Fuzzy Interface System and Artificial Neural Networks in the Seasonal Rainfall Prediction, Case Study: Khorasan Region, *Iranian Water Resources Research Journal*, 5:2, 40-52. (In Persian)
5. Fallah Ghalhari, Gh.A., Vahidian Kamyad, A., Mousavi Baygi, M., and Habibi Nokhandan, M. 2007. Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and fuzzy inference system in the Rainfall Prediction. CD's of 8th Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 6p. (In Persian)
6. Jang, R. 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23:3. 665-685.
7. Karamouz, M., and Araghinejad, Sh. 2005. *Advanced Hydrology*, Amir Kabir University Press, 480p. (In Persian)
8. Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Mahdavi, M., Sharifi, F., and Javaheri, N. 2009. Modeling river suspended load using fuzzy logic approach (Case study: Zanjanroud basin), *J. Range and Watershed Management* 62:2. 283-298. (In Persian)
9. Nabizadeh, M., Mosaedi, A., Hesam, M., Dehghani, A.A., Zakerinia, M., and Meftah, M. 2010. River Flow Forecasting Using Fuzzy Inference System (FIS) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), CD's of 6th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Tarbiat Modares University, 8p. (In Persian)

10. Nabizadeh, M. 2011. Daily River Flow Forecasting Using Fuzzy Inference System (Case Study: Lighvanchai Basin), M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 159p. (In Persian)
11. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles, *J. Hydrology*, 10:3. 282-290.
12. Nourani, V., and Salehi, K. 2008. Rainfall-runoff modeling using Adaptive Neuro-Fuzzy network in comparison with Neural Network and Fuzzy Inference methods. CD's of 4th national congress of civil engineering, Tehran University, 8p. (In Persian)
13. Pahlavani, H. 2009. Efficiency of Artificial Neural Networks (ANNs) in intelligent estimation of flood hydrograph for Shirindarreh Reservoir dam in comparison with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 123p. (In Persian)
14. Poustizadeh, N. 2006. River Flow Forecasting Using Fuzzy Inference System, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, 153p. (In Persian)
15. Salajegheh, A., and Fathabadi, A. 2009. Estimation of the suspended sediment load of Karaj River using fuzzy logic and neural network, *Journal of Range and Watershed Management*, 62:2. 271-282. (In Persian)
16. Shu, C., and Ouarda, T.B.M.J. 2008. Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system. *J. Hydrology*, 349:31-43.
17. Sivanandam, S.N., Sumathi, S., and Deepa, S.N. 2007. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB, Springer. New York. 430p.
18. Zadeh, L.A. 1965. Quantative fuzzy sets. *Information and Control*, 8: 338-353.
19. Zounemat Kermani, M., and Teshnehlab, M. 2008. Using adaptive neuro-fuzzy inference system for hydrological time series prediction, *Applied Soft Computing*, 8: 928-936.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 19(1), 2012
<http://jwfst.gau.ac.ir>

Comparing the Performance of Fuzzy Based Models in Stream Flow Forecasting on Lighvan River

M. Nabizadeh¹, * A. Mosaedi², M. Hesam³ and A.A. Dehghani³

¹M.Sc. Student of Water Resources Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²Associate Prof., Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, ³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 2010/12/04; Accepted: 2011/12/10

Abstract

River discharge forecasting and analyzing its influencing factors is one of the most important issues in water resources management. In this research, fuzzy based models (Fuzzy Inference System (FIS) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)) is used for performance of river flow forecasting process. Three parameters of precipitation, temperature, and daily discharge of the Lighvanhai basin is used for daily river flow forecasting in Lighvan river. On initial preprocessing of data, the randomness of data studied by return points test. Then, for determination of optimum lags of input parameters correlogram of data was studied. Finally, prediction was performed in two parts of synthetics and discharge of previous days. Assessment of prediction results by using various values as Nash-Sutcliff value showed that ANFIS model could predict discharge of these river with high exact ($C_{NS}=0.998$) and low dispersion rather than FIS model ($C_{NS}=0.993$). Also, in prediction of daily discharge through assessment of two designed parts, temperature had no significant effects, but precipitation of current day is more effective than discharge of two days ago.

Keywords: River flow forecasting, Fuzzy Inference System (FIS), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Lighvanhai Basin, Correlogram

*Corresponding author; Email: mosaedi@um.ac.ir