

بررسی کارایی منطق فازی در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه

مرتضی نبی‌زاده^۱، ابوالفضل مساعدی^{۲*} و امیراحمد دهقانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
^۲ دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
 (تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۱/۲۴)

چکیده

پیش‌بینی و برآورد جریان رودخانه برای هر منطقه و حوضه آبریز به عنوان یکی از مهمترین پارامترها در استفاده بهینه از منابع آبی محسوب می‌شود. در این پژوهش از مدلی مبتنی بر منطق فازی (سیستم استنتاج فازی، Fuzzy Inference System FIS) برای انجام فرآیند پیش‌بینی جریان استفاده شده است. به این منظور از سه پارامتر بارندگی، دما و دبی روزانه حوضه آبریز ليقوان چای برای پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان، استفاده شد. در پیش‌پردازش اولیه داده‌ها، تصادفی بودن آن‌ها با استفاده از آزمون نقاط عطف مورد بررسی قرار گرفت. سپس جهت تعیین مدل‌های بهینه ورودی به سیستم‌ها، همبستگی نگار داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نهایتاً جهت بررسی تأثیر دما در پیش‌بینی، این فرآیند با تفکیک ماه‌ها، انجام شد. ارزیابی نتایج پیش‌بینی‌ها با استفاده از معیارهای آماری از جمله معیار ناش-ساتکلیف نشان داد که مدل FIS دقت بالا ($C_{NS}=0/9976$) و خطای کمی ($RMSE=0/113$) در پیش‌بینی داشته است و این روش می‌تواند به عنوان روشی کارآمد و دقیق در پیش‌بینی جریان رودخانه به‌کار گرفته شود. همچنین با بررسی نتایج نهایی، مشخص شد که دما در برخی از ماه‌ها (فروردین و آذر) در پیش‌بینی موثر بوده است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی آبدی، منطق فازی، سیستم استنتاج فازی (FIS)، رگرسیون خطی، حوضه ليقوان چای

مقدمه

در طول دهه گذشته کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در مسائل غیرخطی و پیچیده در هیدرولوژی گسترش یافته است. این روش‌ها به‌عنوان مدل مبتنی بر داده قادرند که بدون در نظر گرفتن محدودیت فیزیکی محیط، یک ارتباط منطقی بین ورودی و خروجی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای برقرار کنند. شاید مهمترین ویژگی منطق فازی در مقام مقایسه با منطق کلاسیک این باشد که دانش و تجربه را در این منطق می‌توان به روابط ریاضی بیان نمود. سامانه‌های فازی عموماً قادر به مدل‌سازی دو نوع از عدم قطعیت‌ها در پدیده‌های موجود در جهان می‌باشند. نوع اول عدم قطعیت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری جهت شناخت پیچیدگی‌های یک پدیده می‌باشد. نوع دوم از عدم قطعیت‌ها به عدم صراحت و شفافیت یک پدیده مربوط شده و یا سلیقه‌ای بودن یک ویژگی از یک پدیده را نشان می‌دهد. این‌گونه موارد کیفی دارای تعریف واحد نبوده و عدم قطعیت و صراحت در آن نمایان است. مجموعه سامانه‌های فازی و منطق آن، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی این قبیل مسائل است (Nabavianpour et al., 2008).

منطق فازی، برای اولین بار توسط Zadeh (1956) ارائه شد که انگیزه اصلی معرفی آن، عدم رضایت از منطق کلاسیک و دقیق در مواجهه با جهان واقعی و نادقیق بود، اما ظهور این روش در مسائل مهندسی آب در سال ۱۹۹۰ برای محاسبات رگرسیون در هیدرولوژی اتفـساق افتـاد (Bardossy et al., 1990). پس از آن دانشمندی چون Kindler (1992)، Capra (1994) و Russel (1996) از منطق فازی در مدیریت منابع آب استفاده کردند.

امروزه نیز محققین از این روش در هیدرولوژی استفاده وسیعی می‌نمایند. Aqil et al. (2007) مزایای مدل تطبیقی عصبی- فازی و مدل شبکه عصبی مصنوعی را در مدل‌سازی پیوسته رفتار ساعتی و روزانه رواناب مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بیانگر خروجی رضایت بخش از مدل حاوی داده‌های تبدیل شده بود. ضمن آن‌که مدل تطبیقی عصبی- فازی بهتر از مدل دیگر اجرا شده و این قابلیت را به کاربر می‌دهد که به راحتی داده‌ها را پردازش نموده و با استفاده از این تکنیک فرآیند بارش- رواناب را با انواع ورودی مورد آموزش و آزمون قرار دهد. Shu & Ouarda, (2008) برای آنالیز منطقه‌ای سیلاب در حوضه‌های آبخیز بدون ایستگاه از مدل فازی- عصبی استفاده نمودند. این تکنیک در ۱۵۱ حوضه آبخیز در ایالت کبک کانادا اجرا شد و نتایج حاصل از آن با مدل شبکه

عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی مقایسه شد. نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که مدل عصبی- فازی قابلیت بهتری در برآورد سیل در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری نسبت به دو مدل دیگر دارد.

Kisi et al. (2009) برای پیش‌بینی رسوب ماهانه در ترکیه از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS^۱) استفاده کردند. بدین منظور، از داده‌های دبی و رسوب ماهانه دو ایستگاه حوزه آبریز کیزیلیرمک استفاده کرده و نتایج پیش‌بینی مدل ANFIS را با نتایج شبکه عصبی و منحنی سنج رسوب مقایسه کردند. نتیجه این مقایسه نشان داد که می‌توان از ANFIS به عنوان یک روش موفق در پیش‌بینی رسوب ماهانه استفاده کرد. Ahmadi et al. (2009) به منظور مدل‌سازی میزان رسوب معلق روزانه ایستگاه کلینگ واقع بر رودخانه طالقان، از سیستم استنتاج فازی و روش معادله همبستگی چندمتغیره استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش فازی توان تشخیص محدوده زمانی وقوع تغییرات رژیم رسوبی را در رودخانه دارا می‌باشد.

Nabizadeh (2011) با استفاده از سیستم استنتاج فازی و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی به پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه ليقوان چای پرداخت. ایشان ابتدا با بررسی کرولوگرام داده‌ها و مقادیر خودهمبستگی دبی در تاخیرهای مختلف، مدل‌های ورودی را طراحی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که پیش‌بینی مدل فازی- عصبی به داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق بررسی کارایی منطق فازی در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان است. بدین منظور نتایج پیش‌بینی منطق فازی با نتایج رگرسیون خطی مورد مقایسه قرار گرفته است.

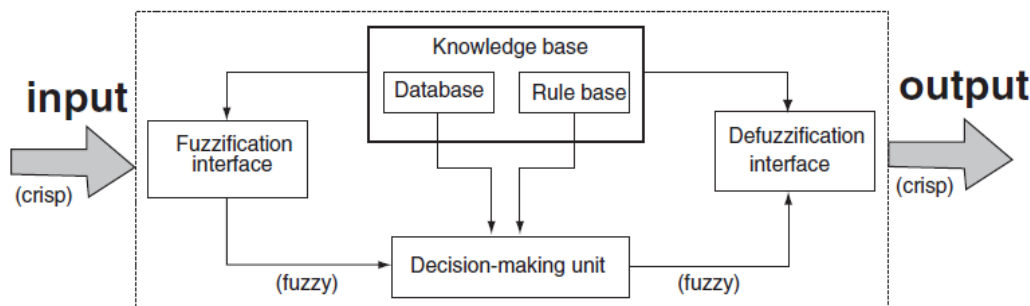
مواد و روش‌ها

سیستم استنتاج فازی (FIS)

سیستم استنتاج فازی که از آن با عناوینی چون سیستم‌های قاعده- بنیاد فازی، مدل فازی و سیستم خبره فازی نیز یاد می‌شود، واحد اصلی یک سیستم منطق فازی می‌باشد. تصمیم‌گیری یک بخش مهم در تمام سیستم‌ها می‌باشد. سیستم استنتاج فازی، 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"

¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

فازی و استدلال فازی انجام می‌گیرد (Sivanandam, 2007). داده شده‌است. یک سیستم استنتاج فازی با پنج بلوک اصلی در شکل ۱ نشان



شکل ۱- بخش‌های اصلی یک سیستم استنتاج فازی

این مدل، هدف یافتن ضرایب a و b به نحوی است که e حداقل شود.

بنابراین پس از یافتن مقادیر a و b مدل خطی به صورت رابطه ۲ خواهد بود که در این معادله مقدار y پیش‌بینی شده y می‌باشد (Nabizadeh, 2011).

$$y' = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (2)$$

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ليقوان یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه بوده (شکل ۲) 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. به طور کلی حوضه آبریز ليقوان به علت وجود پوشش‌های برفی دائمی در ارتفاعات مختلف آن دارای رژیم برفی است. ذوب برف در جریان دائمی آن مؤثر و قابل ملاحظه است. ریزش باران‌ها در ماه‌های بهار و تابستان شدید بوده و این امر اثر قابل توجهی در بالا بردن مقدار دبی رودخانه دارد (Nabizadeh, 2011). متوسط جریان رودخانه در طی دوره آماری مورد مطالعه (از سال آبی ۶۷-۱۳۶۶ تا سال آبی ۸۶-۱۳۸۵) برابر با ۰/۸۲ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است. مشخصات آماری این داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

کاربرد هر کدام از بلوک‌ها به شرح ذیل است:

۱. پایگاه قانون^۱ شامل تعدادی قانون اگر-آنگاه فازی.
۲. پایگاه داده^۲ که توابع عضویت مجموعه‌های فازی بکار رفته در قوانین فازی را تعریف می‌کند.
۳. واحد تصمیم‌گیری^۳ که عملگرهای استنتاج را بر روی قوانین اعمال می‌کند.
۴. رابط فازی‌ساز^۴ که ورودی‌های ترد^۵ را به درجه‌های مطابق با مقادیر زمانی تبدیل می‌کند.
۵. رابط غیرفازی‌ساز^۶ که نتایج فازی استنتاج را به یک خروجی ترد تبدیل می‌کند (Jang, 1993).

مدل‌های همبستگی خطی

لفظ مدل‌های همبستگی به گروهی از مدل‌های آماری اطلاق می‌شود که یک متغیر وابسته، با استفاده از یک یا چند متغیر مستقل پیش‌بینی می‌گردد، برای این منظور معمولاً از یک مدل خطی استفاده می‌شود. این مدل به صورت رابطه ۱ نشان داده می‌شود:

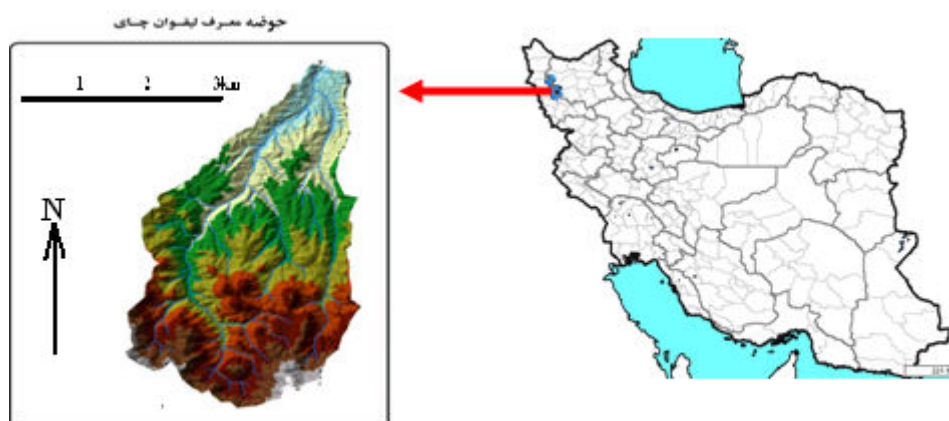
$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e \quad (1)$$

در رابطه فوق، y متغیر وابسته، x_i متغیر مستقل، a عرض از مبدا، b_i ضریب رگرسیون و e خطای پیش‌بینی می‌باشد. در

¹ Rule Base
² Data Base
³ Decision-Making Unit
⁴ Fuzzification Interface
⁵ Crisp
⁶ Defuzzification Interface

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های روزانه مورد استفاده حوضه ليقوان

بارندگی (mm)	دما (درجه سانتیگراد)	دبی (m ³ /s)	
۴۸/۲	۳۱	۶/۱۸	حداکثر
۰	-۱۹/۵	۰	حداقل
۰/۸۹	۶/۶۹	۰/۸۲	میانگین
۸/۰۴	۷۴/۶۴	۰/۸۳	واریانس
۲/۸۴	۸/۶۴	۰/۹۱	انحراف معیار



شکل ۲- موقعیت کلی حوضه ليقوان در کشور

پیش‌پردازش داده‌ها

قبل از هرگونه پردازشی بر روی داده‌ها، ابتدا باید تصادفی بودن آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این مرحله از تحقیق، آزمون نقاط عطف برای این امر مورد استفاده قرار گرفت که به علت رعایت اختصار، از شرح این روش خودداری شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که داده‌ها کاملاً تصادفی است و

مقادیر Z برای هر سه پارامتر در محدوده مجاز ($1/96 < z < 1/96$) قرار دارد. نتایج این مرحله در جدول ۲ قابل مشاهده است. در این جدول، p : تعداد نقاط عطف، $E(p)$: تعداد نقاط عطف مورد انتظار، $Var(p)$: واریانس p و z : توصیف کننده p بر حسب استاندارد نرمال می‌باشد (Alizadeh, 2006).

جدول ۲- نتایج آزمون نقاط عطف

پارامتر	مقادیر اجزای مختلف آزمون نقاط عطف		
	z	$Var(p)$	$E(p)$
دما	۱۴	۳/۲۳	۱۲
بارندگی	۱۱	۳/۲۳	۱۲
دبی	۱۳	۳/۲۳	۱۲

تعیین مدل‌های ورودی و تأخیرهای زمانی مناسب

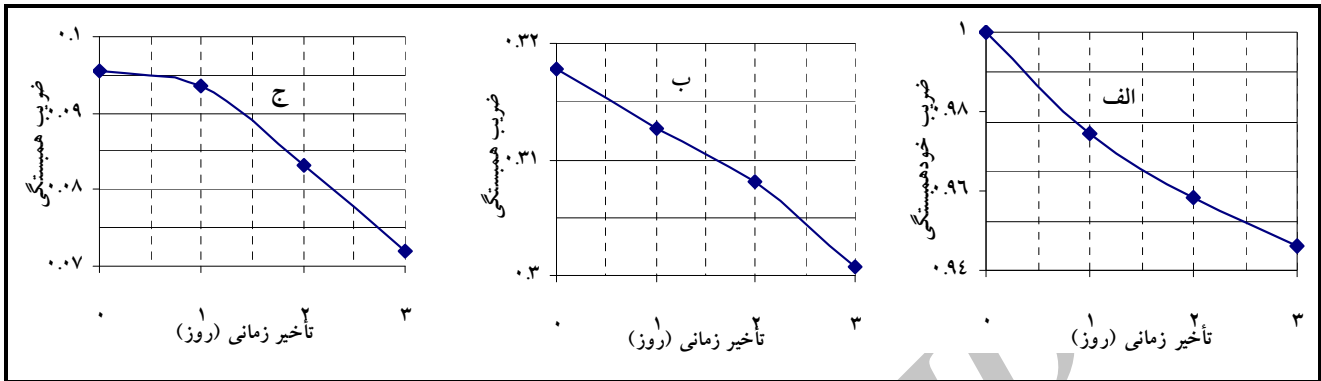
در این تحقیق آمار داده‌های روزانه مقدار بارندگی، میانگین دما و میانگین دبی روزانه به مدت ۱۵ سال (از سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۶ تا سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۸۱) به عنوان داده‌های آموزش^۱ و ۵ سال (از سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ تا

سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵) به عنوان آزمون^۲ انتخاب شد. برای تعیین مناسب‌ترین تأخیرهای زمانی، به بررسی همبستگی نگار داده‌ها پرداخته شد. با توجه به نمودار خودهمبستگی دبی

^۱ Train^۲ Test

که همین روز به عنوان بهترین تأخیر دما انتخاب شد، برای بارندگی نیز به همین صورت عمل شده است.

(شکل ۳- الف)، تأخیر یک روز به عنوان مناسب‌ترین تأخیر انتخاب شد. با توجه به شکل ۳- ب ملاحظه می‌شود که بیشترین همبستگی دبی با دما در روز اول اتفاق افتاده است



شکل ۳- همبستگی نگار داده‌ها: الف) دبی و دبی، ب) دبی و دما، ج) دبی و بارندگی

در این دوره یعنی ۲۰ ماه مهر) به صورت مجزا پیش‌بینی انجام شده است. مدل‌های ورودی طراحی شده این بخش در جدول (۳) ارائه شده است.

در این مرحله جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر پیش‌بینی و آزمودن مدل‌های مختلف، پیش‌بینی جریان به صورت تفکیک ماه‌ها از هم در طول دوره آماری مورد مطالعه (۲۰ سال) انجام شد. یعنی برای هر ماه (مثلاً تمام ماه‌های مهر

جدول ۳- ساختار ریاضی مدل‌های طراحی شده

نام مدل	ساختار ریاضی مدل	توضیحات
M1	$Q_t = f(Q_{t-1}, R_t, T_t)$	مدل وابسته به دما
M2	$Q_t = f(Q_{t-1}, R_t)$	مدل مستقل از دما

موجود در بین داده‌ها محاسبه و استخراج شده و فراوانی هر یک از این قوانین محاسبه شد. به عنوان مثال مجموعه قوانین مربوط به پیش‌بینی دبی با مدل M1 و ماه مهر در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بخش مقدم قوانین این مدل دارای سه جزء بارش روز جاری، دمای روز جاری و دبی روز قبل و بخش تالی آن‌ها دارای یک جزء دبی روز جاری می‌باشد. به عنوان نمونه، مفهوم قانون اول جدول ۴ این است که «اگر بارش روز جاری کم (L) و دمای روز جاری زیاد (M) و دبی روز قبل کم (L) باشد، آنگاه دبی روز جاری کم (L) خواهد بود». در این قانون عبارت "اگر بارش روز جاری کم و دمای روز جاری زیاد و دبی روز قبل کم باشد"، بخش مقدم و عبارت "آنگاه دبی روز جاری کم خواهد بود"، بخش تالی نام دارد.

پیش‌بینی جریان با سیستم استنتاج فازی

فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی مدل‌ها: سری-های زمانی متغیرهای ورودی و خروجی مرحله قبل به صورت یک مجموعه، که هر ردیف آن دارای یک سری داده ورودی در ستون‌های اولیه و داده خروجی در ستون آخر می‌باشد، مرتب می‌شوند. بنابراین تعداد ستون‌ها برابر است با تعداد ورودی‌ها به علاوه یک (خروجی). در مرحله بعد برای این داده‌ها ۳ بازه مختلف کم^۱، متوسط^۲ و زیاد^۳ در نظر گرفته می‌شود به طوری که توزیع داده‌ها در هر بازه تقریباً یکسان می‌باشد.

تعیین قوانین مدل‌ها: پس از این بازه‌بندی داده‌ها، با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار اکسل^۴ ۲۰۰۳ قوانین

¹ Low
² Medium
³ High
⁴ Excel

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 نیز بر اساس روش سعی و خطا تعیین شدند.

واسنجی (آموزش) سیستم استنتاج فازی: در مرحله واسنجی باید به روش سعی و خطا به حالت بهینه توابع عضویت و سایر عملگرهای سیستم فازی رسید. برای این منظور پس از تعیین تابع عضویت مناسب، هریک از عملگرهای فازی به صورت سعی و خطا مورد آزمایش قرار گرفت تا

جدول ۴- قوانین استخراج شده مربوط به مدل M1 در ماه مهر

فراوانی قانون	دبی روز جاری (خروجی)	دبی روز قبل	دمای روز جاری	بارندگی روز جاری
۵۵	L	L	H	L
۴۴	M	M	L	L
۴۴	H	H	M	L
۳۷	L	L	M	L
۳۴	L	L	L	L
۳۴	M	M	M	L
۳۴	H	H	L	L
۳۲	M	M	M	L
۳۰	H	H	H	L
۸	H	H	L	M
۷	H	H	L	H
۵	M	L	H	L

(رابطه ۵) استفاده گردید. معیار ناش- ساتکلیف که میزان رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد، در بازه $-\infty$ تا $+1$ تغییر می‌کند. نزدیکی این معیار به یک، نشان‌دهنده رابطه قوی بین دو متغیر است (Nash & Sutcliffe, 1970). دو معیار دیگر نیز مقادیری مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، میزان خطای دو متغیر نسبت به هم کمتر و دو متغیر به هم نزدیک‌تر هستند. در این تحقیق جهت انتخاب بهترین مدل ورودی، به معیار ناش- ساتکلیف توجه بیشتری شده است.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - \bar{Q}_i^o)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2} \quad (4)$$

$$RE_p = \frac{|Q_p^o - Q_p^s|}{Q_p^o} \times 100 \quad (5)$$

صحت‌سنجی (آزمون) سیستم استنتاج فازی:

بر اساس 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 شد. بدین ترتیب بر اساس مطالب بیان شده، خروجی هریک از مدل‌های طراحی شده جدول (۳) با استفاده از سیستم فازی بهینه شده در مراحل قبل، محاسبه شد.

فازی‌زدایی خروجی مدل: در این مرحله که مرحله

نهایی و گام آخر هر سیستم استنتاج فازی می‌باشد، جواب نهایی سیستم که به صورت یک عدد فازی است، با استفاده از یکی از روش‌های غیرفازی‌ساز به یک عدد معمولی تبدیل می‌شود. این روش نیز مانند سایر اجزای سیستم به صورت سعی و خطا بدست می‌آید. در این پژوهش از جعبه ابزار منطق فازی^۱ در نرم‌افزار متلب^۲ استفاده شده است.

شاخص‌های ارزیابی: به منظور ارزیابی دقت مدل‌های

پیش‌بینی از معیارهای ناش- ساتکلیف (رابطه ۳)، ریشه میانگین مربعات خطا (رابطه ۴) و خطای نسبی دبی پیک

^۱-Fuzzy logic toolbox

^۲-Matlab

نتایج

پس از بررسی مدل‌های مختلف با توابع عضویت مختلف، و طی مراحل مختلف مدل‌سازی با سیستم استنتاج فازی، نتایج پیش‌بینی در هر ماه و برای هر دو مدل در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌است.

در روابط فوق، n تعداد داده‌ها، Q_i^o دبی مشاهداتی، Q_i^s دبی شبیه‌سازی شده، Q_p^o دبی پیک مشاهداتی، Q_p^s دبی پیک شبیه‌سازی شده، C_{NS} معیار ناش-ساتکلیف، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا و RE_p خطای نسبی دبی پیک می‌باشند.

جدول ۵- مقادیر معیارهای ارزیابی برای مدل‌های جدول (۲) در شش ماهه نخست سال آبی

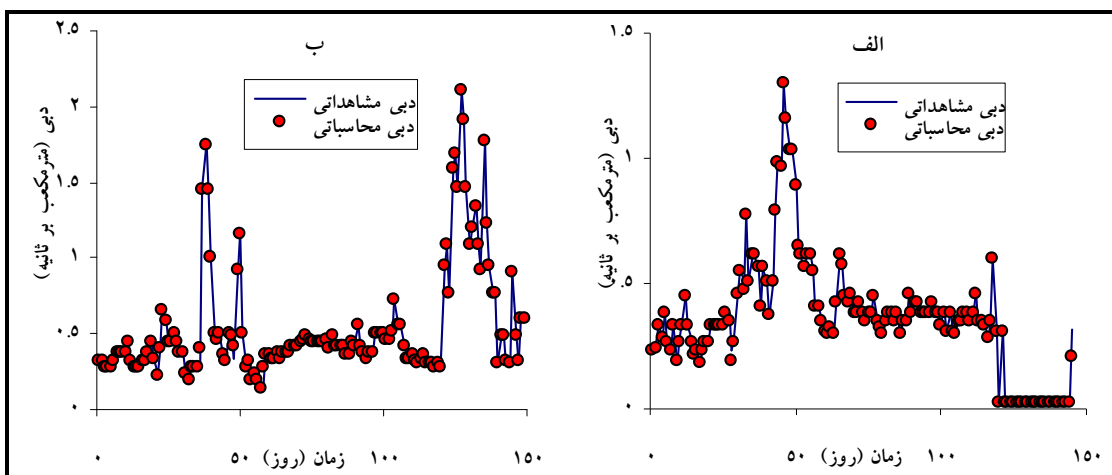
ماه	مدل	تابع عضویت	C_{NS}		$\%RE_p$		$RMSE$	
			آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
مهر	M1	گوسی ۲	۰/۷۸۵	۰/۸۳۸	۳۰/۵	۱۴/۶۳۵	۰/۰۸۲	۰/۰۹۵
	M2	مثلثی	۰/۹۴۸۴	۰/۹۷۵۵	۰	۰/۱۳۹۳	۰/۰۴۰۴	۰/۰۳۷
آبان	M1	زنگوله‌ای	۰/۷۸۶	۰/۹۹۵	۰	۰	۰/۱۰۹	۰/۰۲۸
	M2	گوسی	۰/۸۳	۰/۹۹۷۸	۰	۰	۰/۰۹۶۷	۰/۰۱۷۵
آذر	M1	مثلثی	۰/۹۲۸	۰/۹۲۷	۰/۹۶۵	۰/۵۷۶	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸
	M2	مثلثی	۰/۵۵۳۸	۰/۷۰۷۴	۱۰/۶۱۵۷	۲۶/۲۰۵۲	۰/۰۹۲۹	۰/۰۷۷۱
دی	M1	گوسی ۲	۰/۷۲۸	۰/۹۶۲	۱۴/۷۵۸	۱۴/۷۵۸	۰/۰۷۴	۰/۱۰۳
	M2	مثلثی	۰/۵۲۸۱	۰/۹۸۴۳	۰	۰	۰/۰۹۶۹	۰/۰۶۶۶
بهمن	M1	مثلثی	۰/۵۱۴	۰/۹۱۸	۱/۴۷۴	۱/۴۷۴	۰/۰۹۲	۰/۰۹۱
	M2	مثلثی	۰/۴۶۵۴	۰/۹۴۹۹	۰	۰	۰/۰۹۶۲	۰/۰۷۱
اسفند	M1	مثلثی	۰/۰۶۳	۰/۷۴۴	۱/۹۵۵	۱/۹۵۵	۰/۱۱۶	۰/۱۱۶
	M2	گوسی	۰/۸۰۸۳	۰/۹۹۷۶	۰	۰	۰/۰۵۱۲	۰/۰۱۱۳

جدول ۶- مقادیر معیارهای ارزیابی برای مدل‌های جدول (۲) در شش ماهه دوم سال آبی

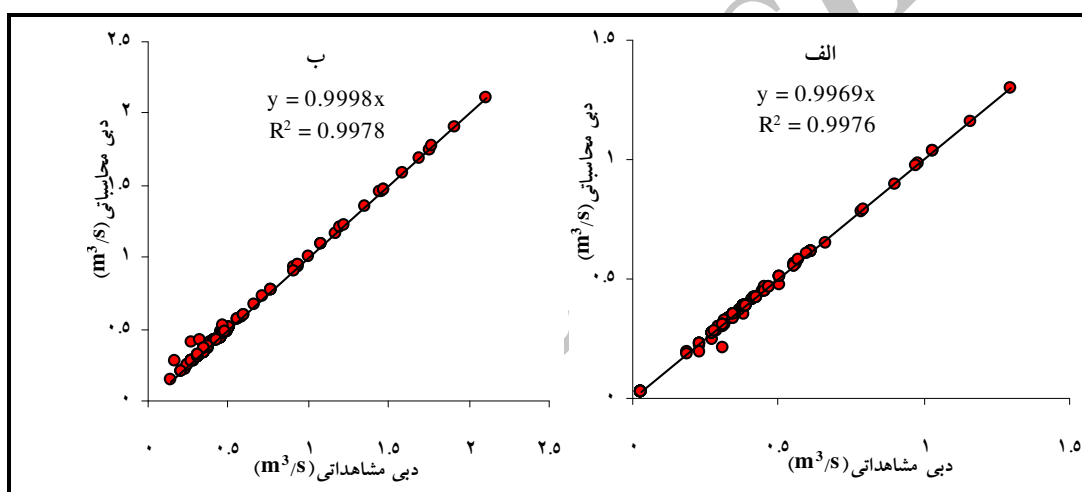
ماه	مدل	تابع عضویت	C_{NS}		$\%RE_p$		$RMSE$	
			آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
فروردین	M1	مثلثی	۰/۷۵۲	۰/۹۸۶	۰	۰	۰/۲۰۹	۰/۰۹۸
	M2	مثلثی	۰/۷۲۲۷	۰/۹۷۹۱	۵/۹۵۵۸	۳/۴۷۴۲	۰/۲۲۰۸	۰/۱۲۱۷
اردیبهشت	M1	مثلثی	۰/۹۱۴	۰/۹۱۲	۲/۴۹۶	۲/۴۹۶	۰/۲۳۴	۰/۳۷۲
	M2	گوسی	۰/۸۷۲۴	۰/۹۴۵	۰/۴۹۹۲	۰/۴۹۹۲	۰/۲۸۵۲	۰/۲۹۴۵
خرداد	M1	مثلثی	۰/۵۷۲	۰/۷۲۵	۰	۴۶/۴۴۵	۰/۹۳	۰/۳۸۴
	M2	دوزنقه‌ای	۰/۹۳۰۳	۰/۸۹۱۸	۱۹	۱/۸۸۱۵	۰/۳۷۵۳	۰/۲۴۰۹
تیر	M1	مثلثی	۰/۷۴۲	۰/۵۰۳	۱۵	۱/۰۲	۰/۵۸۸	۰/۳۷۲
	M2	دوزنقه‌ای	۰/۹۶۷۶	۰/۹۲۹۶	۲۱	۱/۰۲۰۴	۰/۲۰۸۴	۰/۱۴
مرداد	M1	گوسی ۲	۰/۹۲۶	۰/۸۹۴	۴۵	۱۳/۱۳	۰/۱۳۶	۰/۰۹۱
	M2	زنگوله‌ای	۰/۸۷۹۷	۰/۹۶۵۹	۲	۱/۳۹۱۳	۰/۱۷۴۳	۰/۰۵۱۶
شهریور	M1	مثلثی	۰/۲۷۱	۰/۷۵۷	۱۱	۱۱	۰/۲۲۲	۰/۲۰۳
	M2	مثلثی	۰/۷۹۱۲	۰/۹۰۳۷	۱۳	۱۳	۰/۱۱۸۹	۰/۱۲۷۷

دقیق‌ترین نتایج پیش‌بینی دبی با مدل M2 و در ماه‌های آبان و اسفند اتفاق افتاده است. نتایج این ماه‌ها در شکل‌های ۴ تا ۶ قابل مشاهده است.

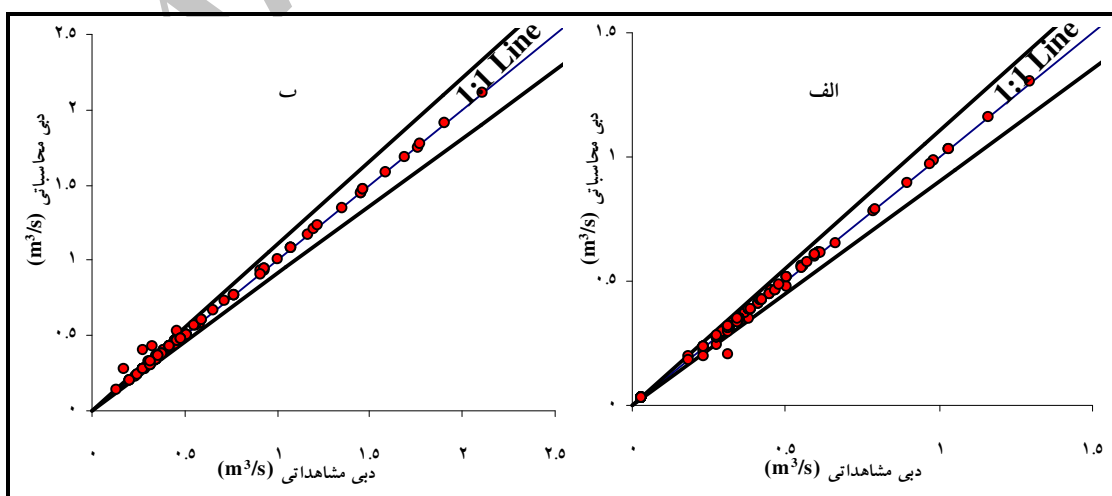
بر اساس جدول‌های ۵ و ۶ و با توجه به معیارهای محاسباتی برای هر مدل در هر ماه، ملاحظه می‌شود که مدل M2 نتایج دقیق‌تری را نسبت به مدل M1 ارائه کرده‌است. با توجه به شاخص‌های ارائه شده در جداول، مشاهده می‌شود که



شکل ۴- مقادیر دبی مشاهده‌ای و محاسباتی (مدل M2): الف) ماه اسفند ب) ماه آبان



شکل ۵- نمودار پراکنش دبی مشاهده‌ای و محاسباتی (مدل M2): الف) ماه اسفند ب) ماه آبان



شکل ۶- پراکنش داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با حدود اطمینان ۹۵ درصد (مدل M2): الف) ماه اسفند ب) ماه آبان

سال به عنوان آموزش و ۵ سال به عنوان آزمون انتخاب شد و نتایج این روش با شاخص‌های آماری معرفی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بخش در جدول ۷ ارائه شده است. جهت مقایسه، نتایج پیش‌بینی مدل فازی نیز در این جدول آورده شده است. همچنین مدل رگرسیونی در جدول به صورت مخفف یعنی REG نشان داده شده است.

مقایسه پیش‌بینی مدل فازی با مدل رگرسیون خطی

در بخش پایانی جهت مقایسه پیش‌بینی سیستم استنتاج فازی با مدل‌های دیگر، از مدل رگرسیون خطی استفاده شد. بدین منظور، دبی ماه‌های آبان و اسفند که در بخش قبل بهترین نتایج را ارائه داد، با استفاده از روش رگرسیون خطی پیش‌بینی شد. به عبارتی دبی این ماه‌ها تحت الگوی M2 با مدل رگرسیون خطی پیش‌بینی شد. همانند بخش قبل، ۱۵

جدول ۷- مقادیر معیارهای ارزیابی برای مدل رگرسیون خطی تحت الگوی M2

ماه	مدل	تابع عضویت	C _{NS}		%RE _p		RMSE	
			آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
آبان	FIS	گوسی	۰/۸۳۰۰	۰/۹۹۷۸	۰	۰	۰/۰۹۶۷	۰/۰۱۷۵
	REG	-	۰/۸۷۳۰	۰/۹۷۸۳	۵/۷۱۶۰	۵/۷۱۶۰	۰/۰۸۰۰	۰/۰۵۵۴
اسفند	FIS	گوسی	۰/۸۰۸۳	۰/۹۹۷۶	۰	۰	۰/۰۵۱۲	۰/۰۱۱۳
	REG	-	۰/۸۱۳۷	۰/۹۷۱۲	۱۱/۲۴۲۳	۱۱/۲۴۲۳	۰/۰۵۰۵	۰/۰۳۹۱

(۰/۵۷۶ و صفر در ماه‌های آذر و فروردین در دوره آزمون) و ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۳۸ و ۰/۰۹۸ در ماه‌های آذر و فروردین در دوره آزمون) از مدل M2 دقیق‌تر است. این موضوع بیانگر آنست که دما تنها در این دو ماه در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان مؤثر است. این موضوع را می‌توان ناشی از تأثیر این پارامتر در روند ذوب برف و یا تأثیر آن بر رژیم بارش در این ماه‌ها دانست. زیرا با توجه به اینکه پیش‌بینی به صورت روزانه (مقیاس زمانی کوتاه‌مدت) انجام شده است، تأثیر دما در این ماه‌ها (آذر، فروردین) بر جریان به علل بیان شده کوتاه‌مدت بوده و به عبارتی دما در این ماه‌ها در زمان سریع‌تری بر جریان (در این منطقه) اثر می‌گذارد. با دقت در قوانین استخراج شده برای مدل‌های پیش‌بینی (جدول ۴)، مشاهده می‌شود که فراوانی بازه " کم " برای پارامتر بارندگی از دو بازه دیگر بیشتر می‌باشد. علت این امر، بیش‌تر بودن داده‌های صفر این پارامتر نسبت به داده‌های غیرصفر آن است، به‌طوری‌که از ۷۳۰۵ روز این دوره، ۵۶۹۰ روز مقدار بارندگی برابر صفر می‌باشد. این امر باعث بیش‌تر شدن فراوانی بازه " کم " نسبت به دو بازه دیگر شده است. بر اساس مجموعه قواعد استخراج شده، همان‌گونه که بر اساس تجربه نیز انتظار می‌رفت، در بیشتر موارد ملاحظه می‌شود که بارش روز جاری و دبی روز قبل با خروجی (دبی روز جاری) رابطه مستقیم و دمای روز جاری با خروجی رابطه عکس دارد که Poustizadeh (2006) نیز در تحقیقات خود به این رابطه اشاره کرده است.

با توجه به نتایج جدول ۷ ملاحظه می‌شود که مدل فازی با دقت بیشتری دبی ماه‌های اسفند و آبان را پیش‌بینی کرده است. در این جدول مشاهده می‌شود مقدار خطای نسبی دبی پیک برای مدل رگرسیون خطی در ماه‌های آبان و اسفند به ترتیب ۵/۷۱۶۰ و ۱۱/۲۴۲۳ می‌باشد که مقدار این شاخص برای سیستم استنتاج فازی در این دو ماه برابر صفر است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده شد. در ابتدا جهت بررسی تصادفی بودن داده‌ها، از آزمون نقاط عطف استفاده شد. پس از تأیید تصادفی بودن داده‌ها با این آزمون، جهت طراحی ساختار مدل‌های ورودی به سیستم‌ها، همبستگی‌نگار داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و بهترین تأخیرها بر اساس همبستگی داده‌ها با دبی روز جاری تعیین شد. نهایتاً جهت بررسی تأثیر دما در پیش‌بینی، این فرآیند با تفکیک ماه‌ها، انجام شد. در بررسی جداول ۵ و ۶ و شاخص‌های محاسباتی، مشاهده می‌شود که نتایج مدل M2 (مدل مستقل از پارامتر دما) در بیشتر ماه‌ها دقیق‌تر از مدل M1 (مدل وابسته به پارامتر دما) است. اما نتایج ماه‌های آذر و فروردین عکس این واقعیت را نشان می‌دهد. بطوری‌که نتایج مدل M1 در این دو ماه افزایش قابل توجهی داشته و از نظر هر سه شاخص ناش- ساتکلیف (۰/۹۲۷ و ۰/۹۸۶ در ماه‌های آذر و فروردین در دوره آزمون) خطای نسبی دبی پیک

دقت بسیار بیشتری نسبت به مدل رگرسیون خطی برآورد کرده است. از مزیت‌های مهم روش‌های مبتنی بر منطق فازی، حساس نبودن آنها به وجود مقداری خطا در داده‌ها است. در واقع این مزیت مدل را قادر ساخته تا در شرایطی که سیستم دارای پیچیدگی و عدم قطعیت است، نتایج رضایت‌بخشی را ارائه دهد که نتایج *Ahmadi et al.* (2009) گواه این مطلب است. از مزایای دیگر این سیستم می‌توان سادگی، انعطاف‌پذیری و جعبه‌سیاه نبودن آن اشاره کرد که این مزیت به کاربر امکان اصلاح و کالیبره کردن مدل، جهت افزایش کارایی آن را می‌دهد. از معایب این روش نیز می‌توان به نحوه آموزش و عدم وجود یک الگوریتم مشخص برای تعیین پارامترها (مثلاً پارامترهای توابع عضویت) اشاره کرد. صحت این مطلب در نتایج تحقیقات *Salajegheh & Fathabadi* (2009) به اثبات رسیده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم استنتاج فازی می‌تواند به عنوان روشی دقیق و کارآمد در پیش‌بینی جریان رودخانه به کار برده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که از این روش برای مسائل مختلفی از جمله تصمیم‌گیری و مدیریت منابع آب استفاده شود.

با دقت در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص می‌شود که مدل M2 دبی‌های بین بازه ۰ تا ۰/۵ متر مکعب بر ثانیه را با دقت کمتری برآورد کرده و پراکندگی این نقاط بیشتر است. ولی سایر نقاط با دقت بالایی برآورد شده‌اند، بخصوص نقاط پیک که دقیقاً بر روی خط روند نمودار پراکنش داده‌ها واقع شده‌اند. علت عمده این خطا 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 نشده‌است. *Fallah Ghalhari et al.* (2007) نیز این عامل را از عوامل اصلی ضعف سیستم استنتاج فازی در پیش‌بینی ارزیابی کرده‌اند. البته نمی‌توان اثر منفی خطاهای احتمالی موجود در داده‌ها (خطا در ثبت، قرائت و اندازه‌گیری داده‌ها) را در پیش‌بینی نادیده گرفت که *Poustizadeh* (2006) نیز به این نکته اشاره دارد.

همچنین در بخش پایانی، مقایسه نتایج مدل فازی و رگرسیون خطی در ماه‌های اسفند و آبان (نتایج جدول ۷) نشان می‌دهد که دقت مدل فازی در پیش‌بینی دبی بیشتر از مدل رگرسیون خطی بوده و این مدل مقادیر دبی پیک را با

منابع

- Ahmadi, H., Tahmoures, M., and Mohammad Asgari, H. 2009. Application of Fuzzy Method for Estimation of Suspended Load (Case Study: Taleghan Basin), *Journal of Watershed Management Science & Engineering* 2(5), 53-62. (In Persian).
- Alizadeh, A. 2006. Principles of Applied Hydrology, Ferdowsi University of Mashhad, 19th edition, 807p. (In Persian).
- 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.
- Bardossy, A., Bogardi, I. and Duckstein, L. 1990. Fuzzy Regression in Hydrology, *Water Resource Research* 26(7), 1497-1508.
- Capra, A. 1994. Application of Fuzzy sets to Drought Classification, *Advances in Water Resource Technology and Management*, Balkema Publication, P: 479-483.
- 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, 8th Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 6p. (In Persian).
- Jang, J.S.R. 1993. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 23(3), 665-683.
- Kindler, J. 1992. Rationalizing Water Requirements with Aid of Fuzzy Allocation Model, *Journal of Water Resource Planning and Management* 118(3), 308-323.

- Kisi, O., Haktanir, T., Ardiclioglu, M., Ozturk, O., Yalcin, E. and Uludag, S. 2009. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation, *Advances in Engineering Software* 40, 438-444.
- Nabavianpour, M., Pourabadeh, M., and Pourabadeh, T. 2008. Optimizing of water supply line by artificial intelligence (fuzzy logic (FDM)) Case study: water supply to Siahpoush village, 4th National Congress of Civil Engineering, Tehran University, 8p. (In Persian).
- 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).
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Poustizadeh, N. 2006. River Flow Forecasting Using Fuzzy Inference System, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, 153p. (In Persian).
- Russel, S.O. 1996. Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming, *Journal of Water Resource Planning and Management* 122(3), 165-170.
- 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).
- Shu, C. and Ouarda, T.B.M.J. 2008. Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Hydrology* 349, 31-43.
- Sivanandam, S.N., Sumathi, S. and Deepa, S. N. 2007. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, Springer Berlin Heidelberg, New York. 444p.
- Zadeh, L.A. 1965. Quantative fuzzy sets. *Information and Control (Elsevier)* 8(3), 338–353.

Archive of SID

Performance of fuzzy logic in stream flow forecasting

M. Nabizadeh¹, A. Mosaedi^{2*} and A. A. Dehghani³

1 M.Sc. student, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

2 Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, I.R. Iran

3 Assistant Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

(Received: 10-Jan.2011 – Accepted: 13-Feb.2012)

Abstract

River flow forecasting for a region has a special and important role for optimal allocation of water resources. In this research, for forecasting river flow process, Fuzzy Inference System (FIS) is used. Three parameters including precipitation, temperature and daily discharge are used for forecasting of daily river flow of Lighvan River located in Lighvanchai watershed. For the initial preprocessing, the randomness of data was examined by return points test. Then, for determination of the optimum lags for input parameters, correlogram of data was considered. Finally to investigate the effects of temperature on river flow forecasting, the process were done for any months separately. Assessments of prediction by using various criteria such as Nash-Sutcliff coefficient showed that FIS model had high precision (CNS=0.9976) and low error (RMSE=0.0113) in prediction which shows that the FIS model can be employed successfully in river flow forecasting. Final assessment of the results was also revealed the effects of temperature on prediction in some months (April and December).

Keywords: Discharge forecasting, Fuzzy logic, Fuzzy Inference System (FIS), Liner regression, Lighvanchai watershed