

جغرافیا و توسعه شماره ۲۶ بهار ۱۳۹۱

وصول مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۱۵

تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۸/۲۱

صفحات: ۶۱-۷۲

پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل فازی-عصبی، شاخص‌های اقلیمی، بارندگی و شاخص خشکسالی (مطالعه موردی: زاهدان)

دکتر مهدی اژدری‌مقدم^۱، دکتر محمود خسروی^۲، حسین حسین‌پورنیکنام^۳، احسان جعفری‌ندوشن^۴

چکیده

هدف تحقیق حاضر، پیش‌بینی خشکسالی‌های پاییزه‌ی زاهدان به وسیله متغیرهای ورودی مختلف می‌باشد. این متغیرها عبارتند از: بارندگی، مقادیر پیشین شاخص خشکسالی SPI و ۱۹ عدد از شاخص‌های اقلیمی. برای این منظور، میانگین سه ماهه اکتبر- نوامبر- دسامبر شاخص خشکسالی SPI به عنوان متغیر خروجی انتخاب شد. سپس هرکدام از متغیرهای ورودی یاد شده، در تأخیرهای زمانی صفر، ۱، ۲ و ۳ ماهه (به ترتیب میانگین سه ماهه اکتبر- نوامبر- دسامبر، سپتامبر- اکتبر- نوامبر، آگوست- سپتامبر- اکتبر و ژولای- آگوست- سپتامبر) وارد مدل شدند. مدل‌های پیش‌بینی نیز با استفاده از مدل فازی-عصبی ANFIS توسعه داده شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، در تأخیر زمانی صفر، بارندگی و شاخص اقلیمی Nin03 به ترتیب با ضرائب همبستگی ۰.۷۵ و ۰.۱۳ خطاهای ۰.۳۳ و ۰.۳۳ مناسب‌ترین متغیرهای ورودی را تشکیل دادند؛ در تأخیر زمانی ۱ ماهه، بارندگی، شاخص خشکسالی SPI و شاخص اقلیمی AMO به ترتیب با ضرائب همبستگی ۰.۶۷، ۰.۷۲، ۰.۶۵ و خطاهای ۰.۳۶، ۰.۳۵ و ۰.۳۹ بهترین متغیرهای ورودی را شامل شدند؛ در تأخیر زمانی ۲ ماهه، شاخص اقلیمی SOI با ضریب همبستگی ۰.۷۸ و خطای ۰.۳۱ به عنوان بهترین متغیر ورودی انتخاب شد و در نهایت در تأخیر زمانی ۳ ماهه، شاخص اقلیمی AMO با ضریب همبستگی ۰.۵۹ و خطای ۰.۴۲ مناسب‌ترین متغیر ورودی را تشکیل داد. کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی خشکسالی، شاخص SPI، شاخص‌های اقلیمی، مدل فازی-عصبی ANFIS، زاهدان.

مقدمه

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد. بر خلاف سیل و بارندگی که می‌توان فهمید در چه زمانی شروع شده، در چه زمانی خاتمه پیدا کرده و در چه محدوده‌ای بوده است، توصیف زمانی و مکانی خشکسالی بسیار مشکل است. ممکن است هفته‌ها یا ماه‌ها طول بکشد تا مشخص شود که آیا واقعاً خشکسالی اتفاق افتاده است یا خیر (علیزاده، ۱۳۸۳: ۲۸۰). خشکسالی با اینکه از نظر فراوانی رخداد، در سطح پایین‌تری نسبت به بسیاری از دیگر بلایای طبیعی قرار دارد، اما در به جای گذاشتن خسارات جانی و مالی رتبه‌ی اول را در کشور ما دارا می‌باشد (پایگاه بین‌المللی بلایای طبیعی، ۲۰۰۹).

تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که شهر زاهدان با ۴۳٪ فراوانی خشکسالی، رتبه‌ی سوم در کشور را از آن خود کرده است (پایگاه اطلاع‌رسانی سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۵). جهت بیان کمی خشکسالی از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود. با استفاده از این شاخص‌ها اطلاعات لازم درباره‌ی آغاز، خاتمه و شدت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌آید. در بین انواع شاخص‌های ارائه شده برای این منظور، شاخص بارندگی استاندارد شده^۱ بیشترین توجه محققان را به خود معطوف داشته است. این شاخص بر مبنای احتمالات بارندگی در مقیاس‌های زمانی مختلف ارائه گردیده است و بسیاری از محققان به توانایی آن در پایش جنبه‌های مختلف خشکسالی اشاره داشته‌اند (فرخ‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷: ۲). از سویی دیگر اگرچه در بررسی خشکسالی‌ها، استفاده از مدل‌هایی بر اساس روش‌های تصادفی و احتمالاتی سابقه‌ای طولانی دارد، اما بسیاری از این روش‌ها روابط بین متغیرها را خطی فرض نموده و در

مدل کردن پدیده‌های غیرخطی مانند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی با شکست مواجه می‌شوند. از این رو پژوهشگران برای ساختن مدل‌های پیش‌بینی معتبر، به استفاده از تکنیک‌های مدل‌کننده‌ی غیرخطی نظیر سیستم‌های فازی و مدل‌های فازی-عصبی^۲ که در سال‌های اخیر به جمع مدل‌های پیش‌بینی افزوده شده‌اند، روی آورده‌اند (فرخ‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷: ۲؛ انوری، ۱۳۸۷: ۳؛ باقرزاده‌چهره، ۱۳۸۴: ۳). در استفاده از مدل‌هایی نظیر مدل فازی-عصبی، انتخاب متغیرهای ورودی از مهمترین بخش‌های محاسبات مربوط می‌باشد. در سال‌های اخیر با شناخت شاخص‌های بزرگ مقیاس اقلیمی، تلاش محققین به این سمت سوق پیدا کرد که روابطی بین این سیگنال‌ها و تغییرات بارش تعریف کنند که بتواند در پیش‌بینی خشکسالی‌ها به کار رود (فرخ‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷: ۲؛ باقرزاده‌چهره، ۱۳۸۴: ۳). در این زمینه تحقیقات مختلفی انجام گرفته است که در ادامه به تعدادی از این موارد اشاره می‌شود.

پوستی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷: ۳۴-۲۳) در تحقیقی با استفاده از سیستم استنتاج فازی و بر اساس میزان متوسط دبی از ۶ ماه گذشته، مقدار متوسط دما در یک‌ماه قبل و مجموع بارش از ۴ ماه قبل، به پیش‌بینی دبی فروردین ماه در رودخانه‌ی بختیاری پرداختند. تجزیه و تحلیل مدل‌های مشابه با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره، نشانگر نتایج مناسب‌تر سیستم استنتاج فازی بود.

صداقت‌کردار و فتاحی (۱۳۸۷: ۷۶-۵۹) ارتباط بین سیگنال‌های هواشناسی و بارش را برای نواحی مختلف ایران مورد بررسی قرار دادند و در نهایت مدل‌های پیش‌بینی را با استفاده از روش شبکه عصبی-مصنوعی توسعه دادند. بررسی‌ها نشان داد که تقریباً در تمام نواحی کشور، ENSO در مناطق Nino1+2 و Nino3 پراهمیت‌ترین سیگنال در بارش ایران می‌باشد. مقدار

مردودهمکاران^۶ (۲۰۰۷: ۲۱۱۱-۲۱۰۳) امکان پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شبکه‌های عصبی-مصنوعی را در استان تهران بررسی نمودند. آنها دو شاخص EDI و SPI را به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی شونده و ترکیبات مختلفی از شاخص‌های مزبور، بارندگی و سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی SOI و NAO ماقبل را به‌عنوان پیش‌گویی کننده مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که بهترین مدل‌ها، آنهایی بودند که شامل مقدار شاخص خشکسالی ماه مشابه در سال گذشته می‌شدند. نتایج همچنین نشان داد که SOI و NAO قابلیت چندانی برای پیش‌بینی خشکسالی در منطقه‌ی مطالعه‌ی ندارند. نایاک و همکاران^۷ (۲۰۰۴: ۵۲-۶۶) کاربرد یک مدل ANFIS را در مدل‌سازی جریان رودخانه‌ی بایتارانی^۸ در هند مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین همچنین به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد مدل‌ها، یک مدل شبکه عصبی-مصنوعی و یک مدل میانگین محرک خود رگرسیون^۹ را نیز برای همان حوضه توسعه دادند دادند که عملکرد بهتر مدل ANFIS هم از لحاظ روند ساخت و هم از لحاظ نتایج را نتیجه داد. به علاوه عملکرد مدل‌های ANFIS با تبدیل داده‌های ورودی به-محدوده‌ی نرمال پیش از ساخت مدل، به‌طور چشمگیری بهبود یافت.

پونگراکز و همکاران^{۱۰} (۱۹۹۹: ۱۱۴-۱۰۰) از روشی مبتنی بر منطق فازی برای تخمین شاخص پالمر اصلاح شده^{۱۱}، در نبراسکا استفاده نمودند که چرخش عمومی جو و پدیده ENSO را نیز مورد توجه قرار می‌داد. همانطور که مشاهده می‌شود در بیشتر تحقیقات صورت گرفته، به ارزیابی مدل ANFIS در پیش‌بینی بارندگی و خشکسالی پرداخته شده است که تمامی آنها به ارجحیت این مدل در مقایسه با روش‌های دیگر

این شاخص در منطقه Nino4 به جز تأثیر اندکی که در بارش نواحی شمال غرب و شمال کشور دارد، نقشی در بارش سایر نقاط کشور ندارد.

فرخ‌نیا و همکاران (۱۳۸۷: ۱-۸) از سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی به منظور پیش‌بینی خشکسالی استان تهران استفاده نمودند. بررسی‌ها نشان داد که ارتباط مناسبی بین سیگنال‌های SLP و SST شهریور ماه در نقاطی از منطقه با شاخص خشکسالی SPI در سال آبی بعد وجود دارد. سپس از روش‌های شبکه‌های عصبی-مصنوعی^۱ و فازی-عصبی به منظور مدل‌سازی پیش‌بینی استفاده گردید.

باکانلی و همکاران^۲ (۲۰۰۸: ۱-۱۲) از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی^۳ به منظور پیش‌بینی خشکسالی در کشور ترکیه استفاده نمودند. مدل‌های پیش‌بینی مختلفی برای SPI با مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ترکیب مقادیر پیشین بارندگی و شاخص SPI با یکدیگر، بهبود عملکرد مدل‌ها را به همراه دارد. مقایسات انجام گرفته با نتایج روش‌های شبکه‌ی عصبی FFNN و رگرسیون خطی چندگانه، نشان از ارجحیت مدل ANFIS نسبت به دو مدل دیگر داشت.

ذونعمت و تشنه‌لب^۴ (۲۰۰۸: ۹۳۶-۹۲۸) از یک مدل ANFIS به منظور پیش‌بینی جریان روزانه سه رودخانه واقع در ایالات متحده امریکا استفاده نمودند. نتایج نشان داد که در حالتی که پراکندگی داده‌ها زیاد باشد افزایش توابع عضویت در ANFIS نتایج مناسب‌تری را نسبت به افزایش تعداد ورودی‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر آن نتایج به دست آمده از شبکه‌ی فازی-عصبی، با یک مدل رگرسیونی^۵ مورد مقایسه قرار گرفت که نشانگر برتری مدل فازی-عصبی در پیش‌بینی بود.

6-Morid, et al

7-Nayak, et al

8-Baitarani River

9-Auto Regressive Moving Average (ARMA)

10-Pongracz, et al

11-Modified Palmer Drought Severity Index (PMDI)

1-Artificial Neural Network (ANN)

2-Bacanli, et al

3-Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System (ANFIS)

4-Zounemat & Teshnehlab

5-Auto Regressive (AR)

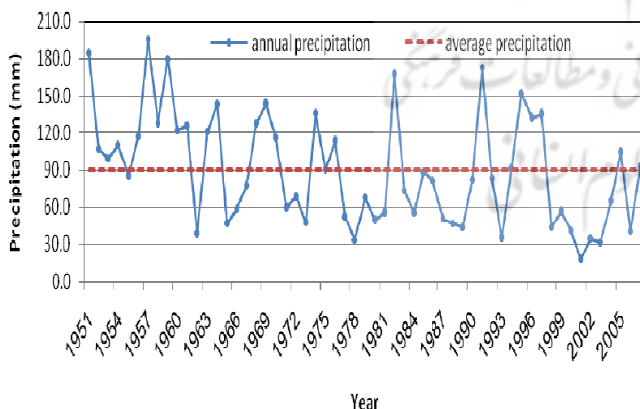
داده‌ها، وجود روند در داده‌ها و تصادفی بودن داده‌ها به کار رفتند. توضیحات تکمیلی در مورد این آزمون‌ها در منابع معرفی شده در انتهای مقاله آمده‌اند (انوری، ۱۳۸۷: ۶۷-۵۷؛ مهدوی، ۱۳۸۵: ۲۳۰-۲۱۳).

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه
(پایگاه اطلاع‌رسانی سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۵) و
اطلاعات آماری سری زمانی بارندگی سالیانه آن

نام ایستگاه	ارتفاع دریا (متر)	مختصات جغرافیایی		اطلاعات آماری سری زمانی بارندگی سالیانه (۱۹۵۱-۲۰۰۷)					
		عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	میانگین (mm)	حداکثر (mm)	حداقل (mm)	انحراف از معیار	جولگی °	درجه اوج °
زاهدان	۱۳۷۰	۲۸° ۲۹'	۵۳° ۶۰'	۸۹/۹	۱۹۶/۱	۱۸/۳	۴۴/۹	۰/۵۳	-۰/۶

* skewness ** kurtosis

شکل ۱، ری زمانی بارندگی سالیانه ایستگاه سینوپتیک زاهدان را به همراه مقدار میانگین آن در بازه زمانی ۱۹۵۱-۲۰۰۷ نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نمودار بارندگی سالیانه و میانگین آن در ایستگاه سینوپتیک زاهدان

مأخذ: پایگاه اطلاع‌رسانی سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۵

اذعان داشته‌اند. در تعدادی از تحقیقات از سری‌های زمانی پیشین خشکسالی و در تعدادی نیز از یک یا دو شاخص بزرگ‌مقیاس اقلیمی جهت پیش‌بینی بارش و خشکسالی استفاده شده است. در تحقیق حاضر علاوه بر استفاده از مقادیر پیشین سری‌های زمانی بارش و شاخص SPI، به بررسی تأثیر ۱۹ عدد شاخص اقلیمی مختلف بر خشکسالی شهر زاهدان نیز پرداخته شده است که بسیاری از این شاخص‌ها در چندساله اخیر کشف و معرفی گردیده‌اند. همچنین از قابلیت‌های روش ANFIS برای مدل‌سازی استفاده گردیده و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی بر مبنای میانگین سه ماهه شاخص خشکسالی SPI در فصل پاییز صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

شهرستان زاهدان به عنوان مرکز استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران قرار گرفته است. این استان در منطقه‌ای گرم و خشک واقع شده و از نظر برخورداری از مواهب طبیعی، وضعیت نامساعدی دارد. کمی نزولات جوی، به همراه پراکندگی زمانی و مکانی از یک سو و بالا بودن میزان تبخیر از سوی دیگر باعث شده تا منابع آب در دسترس، ناچیز باشد (خداعی، ۱۳۸۷: ۵۷). داده‌های بارندگی مورد نیاز برای این تحقیق، از ایستگاه سینوپتیک زاهدان متعلق به سازمان هواشناسی اخذ گردید. این داده‌ها در دوره‌ی آماری ۱۹۵۱-۲۰۰۷ قرار داشته و علاوه بر آنکه از طول دوره مناسبی برخوردار بودند به لحاظ آماری نیز با کمترین نواقص روبرو بودند. اطلاعات آماری سری زمانی بارندگی سالیانه و همچنین موقعیت جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. جهت بررسی صحت و سقم داده‌های مورد استفاده، از آزمون‌های مختلف آماری استفاده گردید. بدین منظور، آزمون‌های ناپارامتریک اسپیرمن و دنباله‌ها جهت بررسی استقلال

شاخص خشکسالی SPI

جدول ۲: تعیین کلاس خشکسالی بر اساس مقادیر SPI

مقادیر SPI	طبقه‌بندی مکی	طبقه‌بندی اگنیو
کمتر از -۲.۰۰	خشکسالی بسیار شدید	
کمتر از -۱.۶۵		خشکسالی بسیار شدید
کمتر از -۱.۵۰	خشکسالی شدید	
کمتر از -۱.۲۸		خشکسالی شدید
کمتر از -۱.۰۰	خشکسالی ملایم	
کمتر از -۰.۸۴		خشکسالی ملایم
کمتر از ۰.۰۰	نزدیک به نرمال	بدون خشکسالی

مأخذ: اگنیو، ۲۰۰۰: ۶

شاخص‌های اقلیمی

الگوهای ارتباط از دور، منعکس‌کننده‌ی تغییرات در مقیاس وسیع در امواج اتمسفری و موقعیت رودبادهای بوده و بر درجه حرارت، بارش، مسیر طوفان‌ها و موقعیت و شدت رودبادهای بر روی مناطق وسیع تأثیر می‌گذارد (خسروی، ۱۳۸۳: ۱۶۹). این الگوها عمدتاً با استفاده از شاخص‌های اقلیمی که بر اساس فشار هوا و دمای سطح آب اقیانوس‌ها محاسبه می‌شوند به صورت کمی بیان می‌گردند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که تأثیر الگوهای ارتباط از دور بر شدت خشکسالی استان سیستان و بلوچستان متقارن نبوده و به عبارت دیگر برخی از الگوها در شرایط خشکسالی نمود بیشتری پیدا کرده و فعال‌تر ظاهر می‌شوند. در مجموع حدود ۷۰ درصد از تغییرات SPI سالانه‌ی استان به وسیله‌ی این الگوها تبیین می‌گردد (خسروی، ۱۳۸۳: ۱۸۶؛ خسروی، ۱۳۸۲: ۱۰). در مجموع ۱۹ عدد شاخص اقلیمی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت که این شاخص‌ها به همراه کد مربوطه (i) در جدول ۳ آمده‌اند. شاخص‌های مزبور در مرحله مدل‌سازی به‌عنوان ورودی‌های مدل ANFIS به‌کار خواهند رفت. این شاخص‌ها از وب‌سایت اینترنتی اداره ملی اقیانوس و اتمسفر^۴ ایالات متحده آمریکا اخذ گردیدند (NOAA, 2009).

در سال ۱۹۹۳ محققین دانشگاه ایالتی کلرادو (مکی و همکاران^۱، ۱۹۹۳: ۱۸۴-۱۷۹) جهت هشدار اولیه اولیه و کمک به ارزیابی شدت خشکسالی، یک شاخص بدون بعد و بسیار پرکاربرد با مبنای احتمالاتی به نام شاخص بارندگی استاندارد شده ارائه دادند. محاسبه SPI از آنجا که توزیع بارندگی معمولاً از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند، تا حدودی پیچیده می‌باشد. برای محاسبه آن می‌توان ابتدا بارندگی ماهیانه و یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه (۳ ماهه، ۶ ماهه و...) را با استفاده از یک توزیع مناسب مانند توزیع گاما و یا پیرسون تیپ سه برازش داد. بدین ترتیب مقادیر SPI در توزیع نرمال استاندارد، مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید (رضیعی و همکاران، ۱۳۸۶: ۲۹-۲۸؛ باکانلی و همکاران^۲، ۲۰۰۸: ۳).

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، X_i مقادیر بارندگی، \bar{X} متوسط مقادیر بارندگی و σ انحراف از معیار مقادیر بارندگی می‌باشد. طبقه‌بندی خشکسالی ارائه شده توسط مکی برحسب مقادیر شاخص SPI، مطابق جدول ۲ می‌باشد. علاوه بر این طبقه‌بندی، اگنیو نیز از کلاس‌های احتمالاتی به‌جای شدت خشکسالی به‌منظور طبقه‌بندی خشکسالی استفاده کرده است. این طبقه‌بندی نیز در جدول زیر نشان داده شده است (اگنیو^۳، ۲۰۰۰: ۱۲-۶).

1- Mckee, et al
2- Bacanli, et al
3-Agnew C.T

4- National Oceanic & Atmospheric Administration

جدول ۳: شاخص‌های اقلیمی به کار رفته در مدل‌ها به همراه شماره مربوطه

شماره (i)	نام شاخص	توضیح	ادامه شماره (i)	نام شاخص	توضیح
۱	SOI	شاخص نوسانات جنوبی	۱۱	Nino 3	شاخص دمای سطح اقیانوس آرام
۲	PNA	الگوی آرام / آمریکای شمالی	۱۲	Nino 1+2	شاخص دمای سطح اقیانوس آرام
۳	WHWP	الگوی استخر گرم نیمکره غربی	۱۳	MEI	شاخص چندمتغیره انسو
۴	TSA	الگوی حاره‌ای جنوب اقیانوس اطلس	۱۴	EPO	الگوی نوسان آرام شرقی
۵	TNI	شاخص ترنس-نینو	۱۵	BEST	شاخص سری‌های زمانی انسو دو متغیره
۶	TNA	الگوی حاره‌ای اطلس شمالی	۱۶	AMO	شاخص نوسان چنددهه‌ای اقیانوس اطلس
۷	SW Monsoon	شاخص بارندگی موسمی ناحیه جنوب غربی	۱۷	AMM	شاخص مد جنوبی اقیانوس اطلس
۸	QBO	شاخص شبه دو سالانه	۱۸	NAO	نوسانات اطلس شمالی
۹	Nino 3.4	شاخص دمای سطح اقیانوس آرام	۱۹	WP	الگوی آرام غربی
۱۰	Nino 4	شاخص دمای سطح اقیانوس آرام			

مأخذ: نویسندگان

نمود (فرخ‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷: ۴). یک نمونه از سیستم استنتاج فازی سوگنو در شکل ۲- (a) نشان داده شده است. برای سادگی کار، فرض می‌شود که FIS مورد بررسی از دو ورودی x و y و یک خروجی f تشکیل شده و همچنین پایگاه قانون در آن شامل دو قانون "اگر- آنگاه" باشد. قوانین موجود در این سیستم عبارتند از:

قانون اول: **IF** $x=A_1$ **AND** $y=B_1$, **THEN** $f_1=p_1+q_1+r_1$.

قانون دوم: **IF** $x=A_2$ **AND** $y=B_2$, **THEN** $f_2=p_2+q_2+r_2$.

که در آن A_1 و A_2 توابع عضویت برای ورودی x ، B_1 و B_2 توابع عضویت برای ورودی y و در نهایت p_1 ، q_1 ، r_1 ، p_2 ، q_2 ، r_2 پارامترهای تابع خروجی هستند (Zounemat & Teshnehlab, 2008: 929-931). شکل ۲- (b)، ساختار ANFIS معادل با سیستم استنتاجی فوق را نشان می‌دهد.

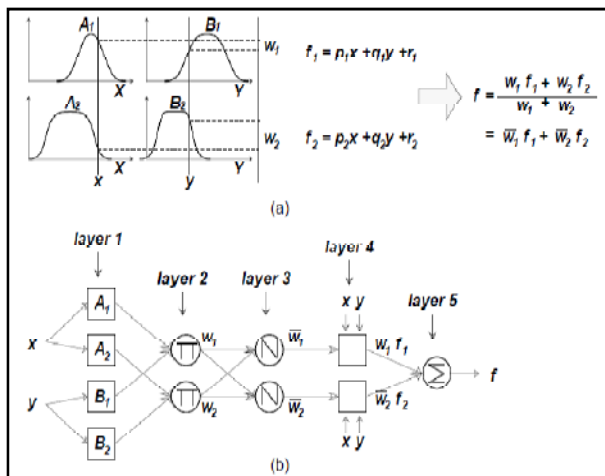
سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) مدل‌های فازی-عصبی که توسط جنگ^۱ (۱۹۹۳: ۶۱۳-۶۶۵) گسترش یافت، جهت تسهیل فرآیند یادگیری و انطباق، منطق فازی را با شبکه‌های عصبی-مصنوعی ترکیب می‌کند. در واقع در مدل‌های فازی-عصبی، برای حل مشکل شناسایی پارامترهای سیستم استنتاج فازی^۲، از یک شبکه تطبیقی که حالت عمومی شبکه عصبی پیشرو چندلایه می‌باشد، استفاده می‌شود. یک شبکه تطبیقی، ساختار پیشرو چندلایه‌ای است که رفتار کلی خروجی آن به وسیله مقدار یک مجموعه از پارامترهای قابل اصلاح تعیین می‌گردد. با استفاده از این شبکه عصبی تطبیقی، مشکل اصلی استفاده از سیستم استنتاج فازی که همان به دست آوردن "اگر آنگاه" فازی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل می‌باشد برطرف می‌گردد. معمول‌ترین نوع سیستم استنتاج فازی که قابلیت قرارگیری در یک شبکه تطبیقی را دارا می‌باشد سیستم فازی تاکاگی-سوگنو می‌باشد که خروجی آن یک رابطه خطی است و پارامترهای آن را می‌توان با ترکیب روش‌های حداقل مربعات خطا و انتشار خطا به عقب بر اساس کاهش گرادیان برآورد

1-Jang

2-Fuzzy Inference System (FIS)

SPI در مقیاس ۱ماهه (SPI-1) در تمام سال‌های دوره‌ی آماری محاسبه گردیده و به عنوان پارامتر پیش‌بینی شونده یا همان خروجی مدل‌ها در نظر گرفته شد. طول دوره‌ی آماری مجموعاً ۵۶ سال (۱۹۵۲-۲۰۰۷) می‌باشد که ۷۰ درصد از این دوره (معادل ۳۹ سال) جهت آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده (معادل ۱۷ سال) جهت ارزیابی مدل‌های ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای مختلفی نیز در حالات مختلف به عنوان ورودی مدل‌ها استفاده گردیدند، که این پارامترها عبارتند از شاخص‌های اقلیمی، بارندگی و همچنین مقادیر پیشین شاخص خشکسالی SPI.

در ابتدا مدل‌های ساخته شده به چهار گروه کلی تقسیم می‌شوند که هر گروه، یک بازه زمانی سه ماهه از مجموع سری‌های زمانی ماهیانه متغیرهای ورودی را مورد استفاده قرار می‌دهد. این بازه‌های زمانی عبارتند از: الف: اکتبر- نوامبر- دسامبر، ب: سپتامبر- اکتبر- نوامبر، ج: آگوست- سپتامبر- اکتبر و د: ژولای- آگوست- سپتامبر. گروه‌های تشکیل شده، در آخرین ستون جدول ۴ نشان داده شده‌اند. سپس هر کدام از متغیرهای بارندگی (R)، شاخص‌های اقلیمی (CI) و شاخص خشکسالی SPI (SPI)، در هر یک از گروه‌های ذکر شده جای گرفتند (جدول ۴).



شکل ۲: (a) مکانیزم سیستم استنتاج فازی سوگنو با دو متغیر ورودی و دو قانون؛ (b) ساختار ANFIS معادل سیستم فازی قسمت a (Jang, 1993)

در تحقیق حاضر از روش خوشه‌بندی کاهشی برای استخراج قوانین سیستم فازی-عصبی و بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت استفاده شده است. نوع سیستم استنتاج فازی به کار رفته همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، سیستم سوگنو با توابع عضویت گوسین می‌باشد. برای آموزش مدل از الگوریتم آموزش ترکیبی با تعداد تکرار epoch=100 استفاده گردید. تعداد بهینه قوانین نیز با سعی و خطا به دست آمد.

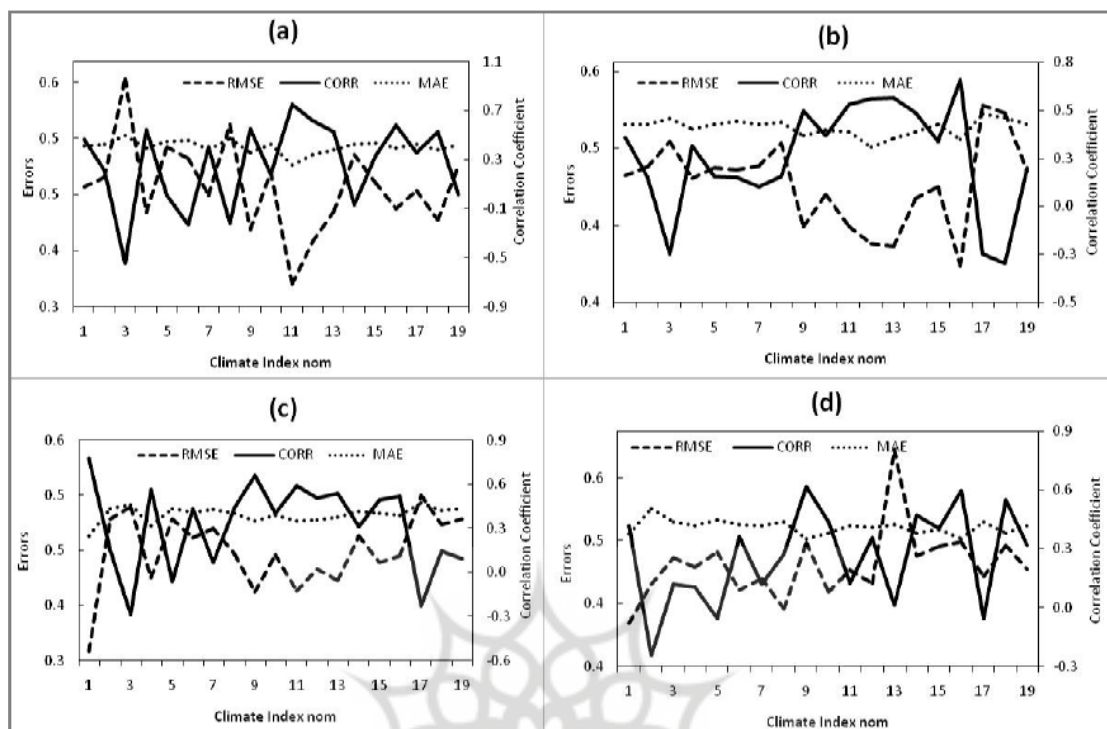
ساخت مدل‌های پیش‌بینی

جهت پیش‌بینی خشکسالی پاییزه، میانگین سه ماهه اکتبر- نوامبر- دسامبر برای شاخص خشکسالی

جدول ۴: شرح مدل‌های ساخته شده برای پیش‌بینی خشکسالی پاییزه

ردیف	کد مدل	متغیرهای ورودی	بازه زمانی متغیرهای ورودی
a	OND-CI-i (i=1 to 19)	شاخص‌های اقلیمی	گروه OND (میانگین سه ماهه اکتبر- نوامبر- دسامبر)
	OND-R	بارندگی	
c	SON-CI-i (i=1 to 19)	شاخص‌های اقلیمی	گروه SON (میانگین سه ماهه سپتامبر- اکتبر- نوامبر)
	SON-SPI	شاخص خشکسالی SPI	
	SON-R	بارندگی	
f	ASO-CI-i (i=1 to 19)	شاخص‌های اقلیمی	گروه ASO (میانگین سه ماهه آگوست- سپتامبر- اکتبر)
	ASO-SPI	شاخص خشکسالی SPI	
	ASO-R	بارندگی	
i	JAS-CI-i (i=1 to 19)	شاخص‌های اقلیمی	گروه JAS (میانگین سه ماهه ژولای- آگوست- سپتامبر)
	JAS-SPI	شاخص خشکسالی SPI	
	JAS-R	بارندگی	

مأخذ: نویسندگان



شکل ۳: نتایج پیش‌بینی خشکسالی پاییزه با استفاده از میانگین سه ماهه‌ای: (a) اکتبر - نوامبر - دسامبر (b) سپتامبر - اکتبر - نوامبر، (c) آگوست - سپتامبر - اکتبر، (d) ژولای - آگوست - سپتامبر شاخص‌های اقلیمی
 مأخذ: نویسندگان

بحث و نتایج

بررسی مدل‌های ساخته شده

معیار ارزیابی فوق‌نمایش می‌دهد. در تمام این مدل‌ها، متغیرهای ورودی عبارتند از شاخص‌های اقلیمی. در شکل فوق، محور افقی شماره شاخص‌های اقلیمی را نشان می‌دهد که قبلاً در جدول شماره ۳ به آنها اشاره شد. دوجور عمودی نیز شامل محور Errors (خطاهای RMSE و MAE) و محور Correlation Coefficient (ضریب همبستگی) می‌باشند.

در میان بازه‌های زمانی سه ماهه مورد بررسی در شکل ۳، شاخص‌های اقلیمی که مدل‌های ساخته شده توسط آنها دارای کمترین خطاهای RMSE و MAE بوده و ضرایب همبستگی آنها در سطح ۹۵٪ ($P\text{-Value} < 0.05$) و ۹۹٪ ($P\text{-Value} < 0.01$) معنی‌دار باشند انتخاب شده و در جدول ۵ به ترتیب با علامت * و ** نشان داده شده‌اند.

در بخشی دیگر به مدل‌هایی پرداخته شد که در آنها بارندگی و مقادیر پیشین شاخص خشکسالی SPI برای

جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های ساخته شده، از سه معیار ضریب همبستگی (CORR)، ریشه میانگین مطلق خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده شده است. شاخص CORR که رابطه بین دو متغیر را تعیین می‌کند، هرچه به +۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده قوی‌تر بودن رابطه مستقیم همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی می‌باشد. شاخص‌های RMSE و MAE مثبت بوده و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند، دلالت بر وجود اختلافات کمتر بین مقادیر پیش‌بینی شده یک‌متغیر توسط یک‌مدل و مقادیر واقعی مشاهده شده آن متغیر می‌باشند.

شکل ۳ نتایج بخش صحت‌سنجی مدل‌های موجود در ردیف‌های a، c، f و i جدول ۴ را بر اساس سه

است. در مجموع نتایج قابل‌قبولی در دو بازه‌ی زمانی اکتبر- نوامبر- دسامبر و سپتامبر- اکتبر- نوامبر مشاهده شد (جدول شماره ۵).

جدول زیر (جدول شماره ۶) نتایج ارزیابی و تعداد قوانین فازی مدل‌هایی که در جدول ۵ با علامت * مشخص شده‌اند را نشان می‌دهد. ضرایب همبستگی تمامی این مدل‌ها در سطح اعتماد ۹۹٪ معنی‌دار می‌باشد.

پیش‌بینی خشکسالی پاییزه مورد استفاده قرار گرفتند. این مدل‌ها در جدول ۴، در ردیف‌های a, b, c, d, e, g, h, j و k جای گرفته‌اند. نتایج به دست آمده نشان داد که شاخص خشکسالی SPI تنها در بازه‌ی زمانی سه ماهه سپتامبر- اکتبر- نوامبر نتایج قابل‌قبولی را برای پیش‌بینی خشکسالی پاییزه به دست می‌دهد. همچنین، بررسی امکان پیش‌بینی خشکسالی پاییزه توسط بارندگی سه ماهه، نشان داد که افزایش تأخیر زمانی متغیرهای ورودی، با کاهش عملکرد مدل‌ها همراه

جدول ۵: مناسب‌ترین متغیرهای ورودی و بهترین بازه‌های زمانی برای پیش‌بینی خشکسالی پاییزه

مقادیر پیشین SPI	بارندگی	شاخص‌های اقلیمی								بازه زمانی مورد استفاده برای متغیر ورودی
		NAO	AMO	MEI	Nino1+2	Nino3	Nino3,4	TSA	SOI	
	**	*	*	*	*	**	*	*		اکتبر- نوامبر- دسامبر
**	**		**	*	*	*				سپتامبر- اکتبر- نوامبر
			*	*	*	*	*	*	**	اگوست- سپتامبر- اکتبر
		*	**				*			ژولای- اگوست- سپتامبر

مأخذ: نویسندگان

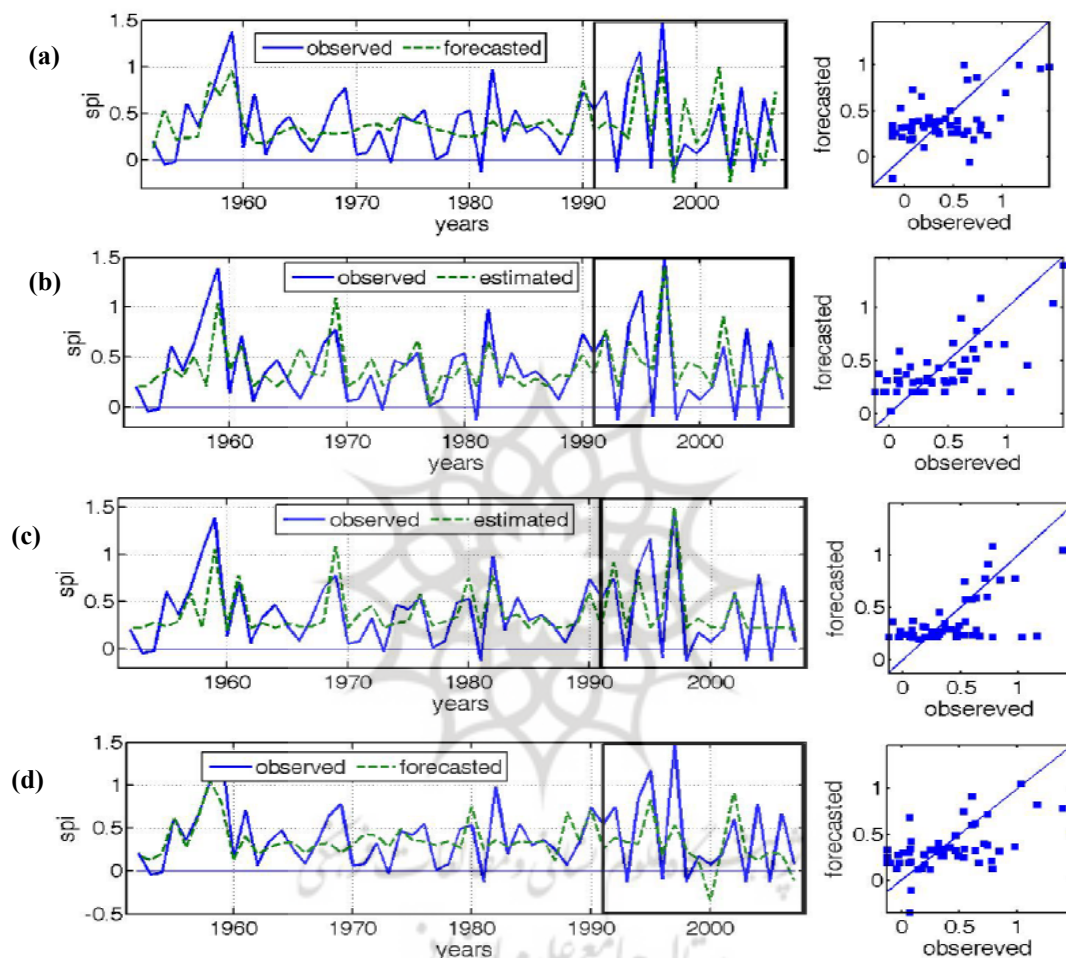
جدول ۶: ارزیابی عملکرد برترین مدل‌های ساخته شده برای پیش‌بینی خشکسالی پاییزه

ارزیابی			آموزش			تعداد قوانین فازی	متغیر ورودی
MAE	RMSE	CORR	MAE	RMSE	CORR		
۰.۲۶	۰.۳۳	۰.۷۵	۰.۱۸	۰.۲۳	۰.۷۲	۱۲	میانگین سه ماهه اکتبر- نوامبر- دسامبر شاخص اقلیمی Nino3
۰.۱۰	۰.۱۳	۰.۹۷	۰.۶۶	۰.۰۷	۰.۹۷	۳	میانگین سه ماهه اکتبر- نوامبر- دسامبر بارندگی
۰.۳۵	۰.۳۹	۰.۶۵	۰.۲۲	۰.۲۷	۰.۵۶	۲	میانگین سه ماهه سپتامبر- اکتبر- نوامبر شاخص اقلیمی AMO
۰.۳۰	۰.۳۵	۰.۷۲	۰.۱۹	۰.۲۵	۰.۶۶	۴	میانگین سه ماهه سپتامبر- اکتبر- نوامبر شاخص خشکسالی SPI
۰.۲۸	۰.۳۶	۰.۶۷	۰.۱۸	۰.۲۳	۰.۷۰	۴	میانگین سه ماهه سپتامبر- اکتبر- نوامبر بارندگی
۰.۲۵	۰.۳۱	۰.۷۸	۰.۱۴	۰.۲۳	۰.۶۹	۱۳	میانگین سه ماهه اگوست- سپتامبر- اکتبر شاخص اقلیمی SOI
۰.۳۵	۰.۴۲	۰.۵۹	۰.۱۹	۰.۲۶	۰.۶۲	۴	میانگین سه ماهه ژولای- اگوست- سپتامبر شاخص اقلیمی AMO

مأخذ: نویسندگان

ناحیه مشخص شده به وسیله‌ی مستطیل، محدوده‌ی ۱۷ ساله‌ی ارزیابی هر مدل را نشان می‌دهد.

روند تغییرات مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده شاخص SPI توسط تعدادی از مدل‌های موجود در جدول فوق، در شکل ۴ آمده است. در این شکل،



شکل ۴: مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده خشکسالی پاییزه توسط میانگین سه ماهه‌ی: (a) سپتامبر - اکتبر - نوامبر شاخص اقلیمی AMO، (b) سپتامبر - اکتبر - نوامبر شاخص خشکسالی SPI، (c) سپتامبر - اکتبر - نوامبر بارندگی، (d) ژولای - آگوست - سپتامبر شاخص اقلیمی AMO.

مأخذ: نویسندگان

شد. سپس هر کدام از متغیرهای ورودی مذکور در تأخیرهای زمانی صفر، ۱، ۲ و ۳ ماهه (به ترتیب اکتبر - نوامبر - دسامبر - سپتامبر - اکتبر - نوامبر - آگوست - سپتامبر - اکتبر و ژولای - آگوست - سپتامبر) وارد مدل شدند. مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از مدل فازی - عصبی ANFIS توسعه داده شده و در نهایت

نتیجه

در مطالعه‌ی حاضر عملکرد شاخص‌های اقلیمی، بارش و مقادیر پیشین شاخص خشکسالی SPI جهت پیش‌بینی خشکسالی پاییزه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، میانگین سه ماهه اکتبر - نوامبر - دسامبر شاخص SPI به عنوان متغیر خروجی انتخاب

- ۳- پایگاه اطلاع‌رسانی سازمان هواشناسی کشور، (۱۳۸۵).
<http://www.weather.ir>.
- ۴- پوستی‌زاده، ندا؛ جمال محمدولی سامانی؛ امین کوره‌پزان دزفولی (۱۳۸۷). پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از سیستم استنتاج فازی، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال چهارم، شماره دوم، تهران.
- ۵- خداعی، محمدرضا (۱۳۸۷). هیدرولیک رودخانه‌های خشک و نیمه‌خشک مطالعه موردی رودخانه کاجو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران آب. دانشگاه سیستان و بلوچستان. زاهدان.
- ۶- خسروی، محمود (۱۳۸۳). بررسی روابط بین الگوهای چرخش جوی کلان مقیاس نیمکره شمالی با خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان، مجله جغرافیا و توسعه. زاهدان.
- ۷- خسروی، محمود (۱۳۸۲). نقش الگوهای ارتباط از دور نیمکره‌ی شمالی در شدت و گستره خشکسالی‌های فراگیر استان س و ب، معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان. زاهدان.
- ۸- رضیئی، طیب؛ پیمان دانش‌کارآراسته؛ روح انگیز اختری؛ بهرام ثقفیان (۱۳۸۶). بررسی خشکسالی‌های هواشناسی (اقليمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکوف، تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره اول، تهران.
- ۹- صداقت‌کردار، عبدالله؛ ابراهیم فتحی (۱۳۸۷). شاخص‌های پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱۱، زاهدان.
- ۱۰- علیزاده، امین (۱۳۸۳). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ هفدهم، مشهد، دانشگاه امام رضا.
- ۱۱- فرخ‌نیا، اشکان؛ سعید مرید؛ هوشنگ قائمی (۱۳۸۷). داده کاوی روی سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی برای پیش‌بینی بلندمدت خشکسالی، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز، تبریز.
- ۱۲- مهدوی، محمد (۱۳۸۵). هیدرولوژی کاربردی، چاپ پنجم، دانشگاه تهران، تهران.
- نتایج به‌دست آمده ارزیابی شدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود:
- هر کدام از متغیرهای ورودی اعم از بارندگی، مقادیر پیشین SPI و شاخص‌های اقلیمی، در یکی از بازه‌های زمانی سه ماهه از قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی خشکسالی پاییزه بهره‌مند هستند.
- از میان همه شاخص‌های اقلیمی وارد شده در مدل‌ها به منظور پیش‌بینی خشکسالی پاییزه، شاخص‌های AMO، Nino3 و SOI مناسب‌ترین نتایج را ارائه دادند. استفاده از شاخص Nino3 بدون تأخیر زمانی، ضریب همبستگی ۰.۷۵ و خطای ۰.۳۳ را نشان داد. شاخص SOI با ۲ ماه تأخیر زمانی، ضریب همبستگی ۰.۷۸ و خطای ۰.۳۱ را نشان داد. شاخص AMO با ۱ و ۳ ماه تأخیر زمانی، به ترتیب ضرایب همبستگی ۰.۶۵ و ۰.۵۹ و خطاهای ۰.۳۹ و ۰.۴۲ را نشان داد.
- استفاده از متغیر بارندگی به عنوان ورودی مدل‌ها، با تأخیرهای زمانی صفر و ۱ ماه نتایج قابل قبولی را ارائه داد. ضرایب همبستگی ۰.۹۷ و ۰.۶۷ و خطاهای ۰.۱۳ و ۰.۳۶ نتایج حاصله از مدل‌سازی با تأخیرهای زمانی مذکور می‌باشد.
- مقادیر پیشین شاخص خشکسالی SPI تنها در تأخیر زمانی ۱ ماهه نتایج قابل قبولی را برای پیش‌بینی خشکسالی پاییزه ارائه دادند. این نتایج عبارتند از ضریب همبستگی ۰.۷۲ و خطای ۰.۳۵.

منابع

- ۱- انوری، صدیقه (۱۳۸۷). ارتقاء مدل‌های هوشمند جهت پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از داده‌های توزیع مکانی اقلیمی و سطح برف، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- باقرزاده‌چهره، کیارش (۱۳۸۴). ارزیابی سیگنال‌های هواشناسی در پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در استان تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.

- 18- Nayak, P, Sudheer, K, Rangan, D & Ramasa, K. (2004). A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. *Journal of Hydrology*, Vol. 291.
- 19- NOAA (2009). Earth System Research Laboratory. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>.
- 20- Pongracz, R, Bogardi, I & Ducksteinc, L. (1999). Application of fuzzy rule-based modeling technique to regional drought. *Journal of Hydrology*, Vol. 224.
- 21- The OFDA/CRED International Disaster Database, (2009). www.em-dat.net.
- 22- Zounemat Kermani, M., & Teshnehlab, M. (2008). Using adaptive neuro-fuzzy inference system for hydrological time series prediction, *Applied Soft Computing*, Applied Soft Computing, Vol 8.
- 13- Agnew, C.T (2000). Using the SPI to Identify Drought. *Issue of Drought Network News*, Vol. 12, No. 1.
- 14- Bacanli, U, Firat, M., & Dikbas, F (2008). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for drought forecasting, *Stoch Environ Res Risk Assess*, DOI 10.1007/s00477-008-0288-5, Springer .
- 15- Jang, J.-S.R, (1993). ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3), 665-683.
- 16- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J, (1993). The relationship of drought frequency and duration to time steps, Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22 Anaheim, California.
- 17- Morid, S, Smakhtin, V & Bagherzadeh, K (2007). Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices, *International Journal of Climatology*, Vol. 27.