

پیش‌بینی میان مدت خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش استنتاج فازی

محسن ناصری^۳

بنفشه زهرایی^۲

روح‌اله ابراهیمی^۱

(دریافت ۸۸/۲/۱۴ پذیرش ۸۹/۶/۷)

چکیده

تلاش مؤثر به‌منظور تشخیص الگوی وقوع خشکسالی و پیش‌آن در تعیین رویکرد بهینه سیستم مدیریت منابع آب به‌ویژه در کلان‌شهرهایی که از منظر اقلیمی در معرض وقوع حوادث خشکسالی واقع هستند، حائز اهمیت است. در این میان شهر تهران با بهره‌گیری از پنج حوضه آبریز و سدهای مربوطه شامل سد امیرکبیر، لار، لتیان و طالقان در معرض خشکسالی و لطمات آن واقع است. در این مقاله، از اطلاعات جوی در محدوده جغرافیایی [۰°، ۶۰°] شمالی و [۰°، ۹۰°] شرقی با دقت ۱۰×۱۰ درجه شامل داده‌های ماهانه دما و ارتفاع معادل فشار از سال ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۸ میلادی در سطوح ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ میلی‌بار به‌عنوان ورودی مدل پیش‌بینی استفاده شد. این مدل که برای پیش‌بینی میان مدت خشکسالی هواشناسی توسعه داده شده قادر است با زمان پیش‌دید ۲/۵ و ۴/۵ ماه، نمایه بارش استاندارد شده در فصلهای زمستان و مجموع زمستان و بهار را پیش‌بینی نماید. این مدل با استفاده از داده‌های آماری در یک دوره ۳۱ ساله، برای حوضه‌های آبریز سدهای تأمین‌کننده آب تهران، کالیبره شد. در این مقاله، پس از بررسی نقطه-پارامترهای جوی مؤثر بر الگوی بارش در مناطق مورد نظر با استفاده از شاخص متقابل اطلاعات که مبتنی بر آنتروپی مزدوج اطلاعات است، ورودی‌های مدل پیش‌بینی برای فصلها و حوضه سدهای مختلف انتخاب شدند. برای تدوین مدل پیش‌بینی از سیستم استنتاج فازی استفاده شد. توابع عضویت فازی براساس قضاوت کارشناسی و با تحلیل حساسیت روی دقت پیش‌بینی‌ها انتخاب شدند. بررسی‌های انجام شده در مورد حوضه‌های مورد مطالعه نشان داد که اطلاعات جوی منتخب در این تحقیق، ارتفاع معادل فشار در دو سطح مختلف ۸۵۰ و ۳۰۰ میلی‌بار است. نتایج گویای کارایی مناسب مدل‌های تدوین شده برای پیش‌بینی نمایه بارش استاندارد شده فصلهای زمستان و بهار در حوضه سدهای کرج و طالقان و نمایه بارش استاندارد شده زمستان در حوضه سدهای ماملو، لتیان و لار بود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی خشکسالی، نمایه استاندارد شده بارش، سیستم استنتاج فازی، خشکسالی هواشناسی

Mid-term Prediction of Meteorological Drought Using Fuzzy Inference Systems

Roohollah Ebrahimi¹

Banafsheh Zahraie²

Mohsen Nasseri³

(Received May 4, 2009 Accepted Aug. 29, 2010)

Abstract

Forecasting and monitoring droughts are important elements of optimum water resources management specifically in the metropolitan areas. Tehran as the biggest city of Iran and its five dams (Amirkabir, Lar, Latyan, Mamloo and Taleghan) are also exposed to drought hazards. In the current article, monthly meteorological data in the geographic area covering [0°, 60°] Northern latitudes and [0°, 90°] Eastern longitudes with 10×10 degree resolution including air temperature and geopotential height at 1000, 850, 700, 500 and 300 mbar levels are used as the model predictors. These data recorded in the period of 1948 to 2008 have been used to develop a model for forecasting SPI (Standardized Precipitation Index) values in Winter and Winter-Spring seasons with 2.5 and 4.5 months leadtime. This model has been calibrated using 31 years of data. Mutual

1. M.Sc. Student of Civil Eng., Azad University, Sciences and Research Branch, Tehran

2. Assoc. Prof. of Civil Eng., Center of Excellence for Infrastructure Eng., Tehran University (Corresponding Author)
(+98 21) 61112237 bzahraie@ut.ac.ir

3- Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Tehran University

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) ۶۱۱۱۲۲۳۷ (۰۲۱) bzahraie@ut.ac.ir

۳- کاندیدای دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

Information (MI) index has been used to select the inputs (predictors) for each basin in each season. Fuzzy Inference System (FIS) has been used to formulate the model. The fuzzy membership functions have been selected based on sensitivity analysis and engineering judgment. The results of the study have shown that geopotential height in 850 and 300 mbar levels are the best predictors for forecasting SPI values in the selected seasons. The model results have had enough accuracy to be used for forecasting SPI values in Winter and Spring seasons in Karaj and Taleghan basins and SPI values in the Winter season in Mamloo, Latyan, and Lar basins.

Keywords: Drought Forecasting, Standardized Precipitation Index (SPI), Fuzzy Inference System (FIS), Meteorological Drought.

خاصی برخوردار بوده و بیشترین تأثیر را در دقت نتایج پیش‌بینی دارد [۲].

بناکورسو و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۳ با استفاده از اطلاعات اصلاح شده بارش در ۴۶ ایستگاه باران‌سنجی و همچنین اطلاعات استخراج شده از عکس‌های ماهواره‌ای، به پردازش خشکسالی با شاخص معرف SPI در سیسیل ایتالیا پرداختند. این اطلاعات بر اساس بارشهای ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه انجام پذیرفته است [۳]. اشتاین مان^۶ در سال ۲۰۰۳ به بررسی حساسیت و دامنه واکنش مدل‌های مختلف خشکسالی نسبت به وقوع آن پرداخت. با توجه به حساسیت مدل‌های مختلف نسبت به وقوع خشکسالی، وی به بررسی شاخصهای SPI، نمایه شدت خشکسالی پالم^۷ و شاخص خشکسالی احيایی^۸ پرداخت و حساسیت آنها را مورد ارزیابی قرارداد. روش مورد استفاده در تحقیق مذکور مارکوف چند پارامتره بوده است [۴]. لوکاس^۹ و وسیلیادس^{۱۰} در سال ۲۰۰۴ به ارائه پهنه‌بندی میانگین شدت خشکسالی با گامهای زمانی مختلف و شاخص SPI در منطقه تسالی^{۱۱} در یونان پرداخته و احتمال خشکسالی در دوره‌های مختلف را به صورت میانگین به دست آوردند [۵]. لابدزکی^{۱۲} و بک^{۱۳} در سال ۲۰۰۵ با استفاده از شاخص SPI، تعداد ماهها در هر کلاس از شرایط اقلیمی هلند را به صورت نقشه ارائه نمودند. اهمیت این تلاش در ارائه احتمالاتی وقوع هر کلاس در منطقه مورد نظر بوده است. تعداد ایستگاههای مورد استفاده در این تحقیق ۳۱ ایستگاه در طول سالهای ۱۹۵۴ تا ۱۹۹۸ بوده است [۶]. مورییا و همکاران^{۱۴} در سال ۲۰۰۶ با استفاده از یک مدل لگاریتمی خطی به پیش‌بینی مقدار و احتمال وقوع خشکسالی پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از دقت مناسب این روش بوده است. نکته قابل توجه، کنترل فرض استفاده از این روش

۱- مقدمه

خشکسالی اغلب با یک کاهش قابل ملاحظه بارش نسبت به متوسط بلند مدت بارندگی آغاز می‌شود و با گذر زمان سبب کاهش رطوبت خاک و در ادامه افت منابع آبهای سطحی و زیرزمینی می‌گردد.

ویلهایت^۱ و گلانتز^۲ در سال ۱۹۸۵ خشکسالی را به چهار دسته خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی- اجتماعی تقسیم‌بندی نموده‌اند. در تقسیم‌بندی ارائه شده توسط ایشان، هنگامی که بارندگی سالانه و یا هر بازه زمانی معین همانند ماهانه یا فصلی، کمتر از میانگین دراز مدت آن باشد، خشکسالی هواشناسی رخ داده که ادامه آن سبب بروز خشکسالی هیدرولوژی می‌شود و به دنبال آن سطح آب رودخانه‌ها، مخازن آب، دریاچه‌ها و آبهای زیرزمینی به پایین‌تر از میانگین دراز مدت تقلیل می‌یابد [۱].

معیارهای کمی خشکسالی عمدتاً براساس پردازش حجم وسیعی از اطلاعات بارش، برف، جریان‌های سطحی و غیره تهیه می‌شوند و به ارائه یک تصویر کلی از فرایند دینامیک آب در منطقه‌ای خاص منجر می‌گردند. شاخص نمایه استاندارد شده بارش^۳ به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه و قابلیت بسیار زیاد در مقایسه مکانی نتایج، به عنوان مناسب‌ترین شاخص برای تحلیل خشکسالی به‌ویژه تحلیل‌های مکانی شناخته می‌شود.

زه‌رایی و همکاران در سال ۲۰۰۴ روشی برای پیش‌بینی سالهای آبی پر بارش و کم بارش در حوضه آبریز کارون و دز ارائه نموده‌اند. نتایج کار ایشان گویای این است که قوانین فازی توسعه داده شده می‌تواند به شکل مؤثری در پیش‌بینی بارش زمستانه و بهاره در حوضه آبریز کارون و دز مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیق انجام شده توسط ایشان، انتخاب بازه‌های فازی و شکل توابع عضویت و نیز انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها^۴ در قوانین فازی از اهمیت

⁵ Bonaccorso et al.

⁶ Steinemann

⁷ Palmer Drought Severity Index (PDSI)

⁸ Reducing Drought Index (RDI)

⁹ Loukas

¹⁰ Vasilades

¹¹ Thessaly

¹² Labedzki

¹³ Bak

¹⁴ Moreira et al.

¹ Willhite

² Glantz

³ Standardized Precipitation Index (SPI)

⁴ Predictor

در تخمین است. اطلاعات استفاده شده در این تحقیق مربوط به یک دوره ۲۳ ساله بوده است [۷]. مشرا^۱ و دسای^۲ در سال ۲۰۰۶ به پیش‌بینی شاخص خشکسالی SPI با استفاده از یک شبکه عصبی برگشتی پرداختند [۸]. پائولو^۳ و پیرا^۴ در سال ۲۰۰۷ با استفاده از زنجیره مارکو و شاخص SPI به ایجاد یک مدل تصادفی هشدار خشکسالی پرداختند. ایشان با استفاده از اطلاعات ۶۷ ساله منطقه آجالتو در جنوب پرتقال به پیش‌بینی وقوع خشکسالی در سه ماه آتی پرداختند [۹]. در تحقیقی دیگر که توسط موری و همکاران در سال ۲۰۰۸ انجام پذیرفته است، اطلاعات مورد استفاده از ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی در جنوب پرتقال اخذ شده و در یک مدل لگاریتمی خطی قرار داده شده است. در تحقیق مذکور نتایج ارزیابی تقاطعی در محل ایستگاهها بسیار خوب ارزیابی شده‌اند [۱۰].

تنوع عوامل مؤثر در فرایندهای هیدرولوژیکی و اعمال آنها در طراحی، فرایند پیچیده‌ای است. همچنین وجود عدم قطعیت‌های بالا و غیر خطی بودن داده‌ها به مبهم بودن این مسئله می‌افزاید. به‌کارگیری روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر اطلاعات غیرقطعی، از راه حل‌های مطمئن برخوردار با این مسئله است. سیستم‌های استنتاج فازی یکی از این روشها هستند. انتخاب رویکرد مناسب در میان روش‌های فازی موجود، کاملاً به‌میزان پیچیدگی سیستم مورد مطالعه بستگی دارد. تاکنون استفاده از سیستم استنتاج فازی برای پیش‌بینی فصلی دوره‌های کم بارش و پر بارش با استفاده از شاخص SPI گزارش نشده است. اما تحقیقات نسبتاً زیادی در مورد کاربرد سیستم‌های استنتاج فازی در زمینه مهندسی آب انجام شده است که می‌توان به مواردی همچون مدل‌سازی خشکسالی، برآورد نیاز آبی، مدیریت مخازن، برآورد رسوب، پیش‌بینی هوا، پیش‌بینی رواناب، فرایند بارش-رواناب، پیش‌بینی جریان رودخانه و مدیریت منابع آب اشاره کرد [۱۱-۱۶]. به‌عنوان مثال جمالی در سال ۱۳۸۶ مدلی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی برای بهره‌برداری مخزن سد زاینده‌رود ارائه نمود. بهره‌برداری از مخزن با توجه به محدودیت‌های فیزیکی از قبیل ظرفیت مخزن، سرریز و ظرفیت کانال پایین دست، محدودیت‌های تقاضا، عدم قطعیت در پیش‌بینی جریان رودخانه و تلفات ناشی از تبخیر، توانمندی سیستم‌های فازی (FIS) را نشان می‌دهد [۱۷].

در این مقاله با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران، به بررسی امکان پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز سدهای تأمین کننده آب تهران با استفاده از سیستم استنتاج فازی

پرداخته شد. برای این منظور، با بهره‌گیری از مدل‌سازی غیر قطعی استنتاج فازی و سری زمانی سی ساله بارش ماهانه متوسط در این حوضه‌ها، به پیش‌بینی بارش با زمان‌های پیش‌دید متفاوت پرداخته شد. شاخص مورد استفاده برای ارزیابی شدت خشکسالی هواشناسی، شاخص استاندارد شده بارش (SPI) بود.

۲- منطقه مطالعاتی

حوضه‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل حوضه سدهای کرج، لار، لتیان، طالقان و ماملو بود. سد لار بر روی رودخانه لار با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۶۷۵ کیلومتر مربع و متوسط جریان آب سالانه ۴۸۱ میلیون متر مکعب در استان مازندران قرار دارد. تأمین آب کشاورزی، تأمین بخشی از نیاز آب شرب تهران و انتقال آب به میزان ۱۴۰ میلیون مترمکعب به نیروگاه کلان برای تولید انرژی برقابی از اهداف بهره‌برداری از این سد مخزنی است.

سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۷۱۴ کیلومتر مربع و با متوسط جریان آب سالانه به میزان ۳۵۰ میلیون متر مکعب در استان تهران قرار دارد. تأمین بخشی از آب مصرفی شهر تهران و همچنین تولید انرژی برقابی از اهداف این سد است.

سد طالقان بر روی رودخانه طالقان احداث شده که مساحت حوضه آبریز آن ۹۶۰ کیلومتر مربع است. اهداف ساخت آن عبارت‌اند از تأمین آب کشاورزی دشت قزوین، تأمین بخشی از نیاز آب شرب شهرهای تهران و کرج، تغذیه مصنوعی دشت قزوین و کنترل سیلابهای فصلی رودخانه طالقان.

سد کرج (امیرکبیر) بر روی رودخانه کرج با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۷۶۴ کیلومتر مربع و با متوسط جریان آب سالیانه به میزان ۴۷۲ میلیون متر مکعب در استان تهران قرار دارد که هدف از احداث آن، کنترل سیلابهای بهاره، تأمین بخشی از نیاز آب شرب تهران و تولید انرژی برقابی است.

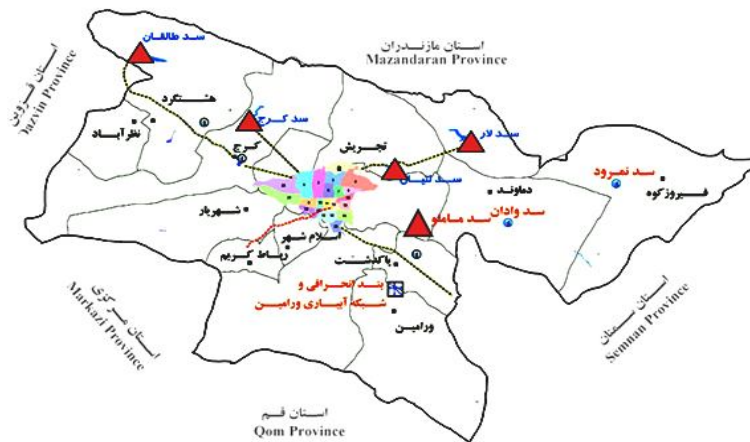
سد ماملو در ۴۰ کیلومتری جنوب تهران قرار گرفته و حجم کل این مخزن ۲۵۰ میلیون متر مکعب است که ۸۰ میلیون متر مکعب آن به تأمین آب شرب تهران اختصاص دارد. حوضه آبریز این سد دارای مساحتی برابر با ۱۷۵۰ کیلومتر مربع است و بر روی رودخانه جاجرود قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت سدها در محدوده استان تهران را نشان می‌دهد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهانه بارش ثبت شده در ۳۰ ایستگاه باران‌سنجی واقع در محدوده حوضه سدهای تهران و اطراف این حوضه‌ها که در حدود سی سال آمار را دارا هستند به بررسی تغییرات شاخص SPI پرداخته شده است. شکل ۲ موقعیت حوضه‌های آبریز مورد مطالعه و ایستگاههای باران‌سنجی مورد استفاده در این تحقیق را نشان

¹ Mishra

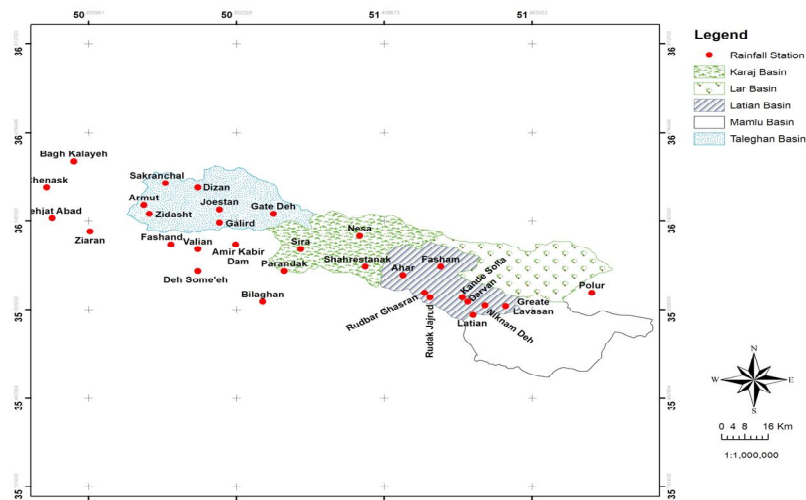
² Desai

³ Paulo

⁴ Pereira



شکل ۱- موقعیت سد های استان تهران



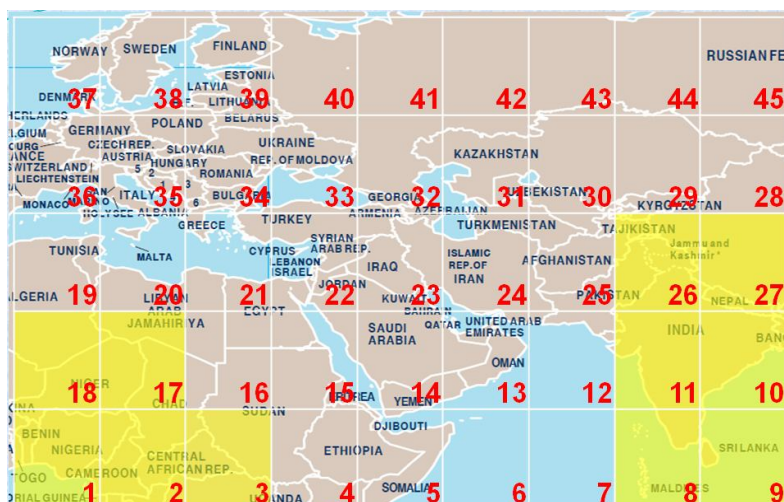
شکل ۲- موقعیت ایستگاه های باران سنجی مورد استفاده نسبت به پنج حوضه مورد بررسی

مذکور، داده ها با دقت ۲/۵ در ۲/۵ درجه موجود هستند و متوسط گیری در بازه ۱۰ در ۱۰ درجه به طور خودکار توسط سایت بانک مذکور صورت گرفته است. در شکل ۳ حدود قرارگیری این شبکه در آسیا و شاخ آفریقا و همچنین جنوب اروپا به وسیله یک شبکه منظم آورده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب این محدوده جغرافیایی با در نظر گرفتن سامانه های تأثیرگذار بر بارش های ایران صورت گرفت و سعی شد حتی الامکان بزرگ ترین محدوده ممکن در نظر گرفته شود. سامانه های مؤثر بر اقلیم بخش های مختلف ایران را می توان به چهار گروه عمده مرکز فشار زیاد سیبری، مرکز فشار زیاد آزر، مرکز فشار مدیترانه یا چرخندزای مدیترانه ای و مرکز کم فشار سودان تقسیم بندی کرد [۱۹].

با استفاده از این اطلاعات، به پیش بینی میان مدت خشکسالی هواشناسی با زمان پیش دید ۲/۵ و ۴/۵ ماه و با استفاده از نمایه بارش استاندارد

می دهد. به منظور محاسبه مقدار بارش متوسط ماهانه و فصلی در حوضه های مورد مطالعه، از روش معکوس فاصله وزندار که در آن شاخص های فاصله و دامنه تأثیر هر ایستگاه بهینه شده اند، استفاده شد [۱۸]. بارش متوسط محاسبه شده برای هر یک از حوضه ها برای محاسبه شاخص SPI مورد استفاده قرار گرفت. داده های پیش بینی کننده مورد استفاده در این تحقیق، داده های ارتفاع معادل فشار^۱ اخذ شده از بانک اطلاعاتی NCEP/NCAR بودند. این اطلاعات در محدوده جغرافیایی [۶۰°، ۰°] شمالی و [۹۰°، ۰°] شرقی (با دقت ۱۰×۱۰ درجه) و شامل مقادیر ماهانه دما و ارتفاع معادل فشار از سال ۱۹۴۸ تا ۲۰۰۸ میلادی در سطوح ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰ میلی بار بودند. لازم به ذکر است که در بانک اطلاعاتی

^۱ Geopotential Height



شکل ۳- موقعیت شبکه نقاط مورد استفاده در دامنه ۰° تا ۶۰° شمالی و ۰° تا ۹۰° شرقی برای انتخاب متغیرهای هواشناسی

پایه‌ریزی شده است. استفاده از این شاخص، کاهش عدم قطعیت در شناسایی یک دنباله را با داشتن دنباله دیگر بیان می‌دارد. این نمایه، شاخص متقابل اطلاعات^۲ نام دارد. روابط زیر، شاخص متقابل اطلاعات در صورتی که دنباله‌های x و y گسسته و یا پیوسته باشند را بیان می‌دارد

$$I(x, y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right) \quad (۱) \text{ در حالت گسسته}$$

$$I(x, y) = \iint_{Y \times X} p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right) dx dy \quad (۲) \text{ در حالت پیوسته}$$

که در این رابطه

$I(x, y)$ شاخص مورد نظر و $p(x, y)$, $p(x)$, $p(y)$ به ترتیب تابع چگالی احتمال پارامترهای x , y و تابع توزیع احتمالاتی توأم^۳ پارامترهای x و y هستند. در مطالعه موردی، x و y به ترتیب نشان دهنده سری زمانی اطلاعات هریک از متغیرهای جوی شرح داده شده در بخش قبل و سری زمانی SPI در فصل مورد پیش‌بینی هستند. لازم به ذکر است توابع چگالی احتمال $p(x, y)$, $p(x)$, $p(y)$ برای هر ترکیب از متغیرهای جوی و SPI در فصلهای مورد نظر جداگانه محاسبه می‌شود. در این تحقیق از رابطه ۱ در حالت گسسته استفاده شد و برای گسسته سازی از روش آنتروپی شانون^۴ استفاده شد.

شده در فصلهای زمستان و مجموع زمستان و بهار پرداخته شد. لازم به توضیح است که دلیل انتخاب این دو فصل، نقش بارشهای این دوره زمانی در آبیگری مخازن بوده و به پیش‌بینی نمایه بارش استاندارد شده در فصلهای تابستان و پاییز پرداخته نشد. همچنین به دلیل کوتاه بودن نسبی دوره ثبت اطلاعات در ایستگاههای منطقه مورد مطالعه از اطلاعات NCEP/NCAR در بازه ۳۱ ساله اخیر استفاده گردید.

۳- مواد و روشها

۳-۱- انتخاب پارامترهای مؤثر هواشناسی در پیش‌بینی شاخص SPI
انتخاب پارامترهای مؤثر و مرتبط با تغییرات SPI یکی از چالشهای مهم پیشروی این تحقیق بود. یکی از ساده‌ترین ابزارهایی که می‌تواند در این عرصه مورد استفاده قرار گیرد، ضریب همبستگی است. این معیار یکی از ساده‌ترین معیارهای موجود در گزینش ورودی‌های مؤثر است. طبیعتاً ضریب همبستگی در عین سادگی توانایی بالایی در کشف ارتباطات پیچیده و غیر خطی را نداشته و قدرت تفکیک آن شدیداً در این موارد کاهش می‌یابد. یکی دیگر از دسته روشهای مورد استفاده در این عرصه، روشهای بهینه‌سازی هستند که می‌توانند با توجه به دقت نتایج پیش‌بینی، بهترین ترکیب پیش‌بینی‌کننده‌ها را شناسایی کنند [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. استفاده از این گونه روشها علی‌رغم نتایج مناسب، دارای هزینه محاسباتی زیادی است.

خود همبستگی جزئی^۱ از دیگر شاخصهای استفاده شده برای این منظور است. [۲۲، ۲۳ و ۲۴]. در این راستا الگوریتمی جدید براساس شاخص آنتروپی و عدم قطعیت در سری‌های گسسته

^۲ Mutual Information index (MI)

^۳ Joint Probability Distribution Function

^۴ Shannon

^۱ Partial Auto Correlation Function (PACF)

جدول ۱- انتخاب مشخصات مدل استنتاج فازی، ورودی و خروجی هر مدل مربوطه به تفکیک حوضه آبریز

نام حوضه آبریز	سد کرج	سد طالقان	سد ماملو	سد لتیان	سد لار
پارامتر هواشناسی (ورودی مدل)	ارتفاع معادل فشار در سطح ۸۵۰ میلی بار	ارتفاع معادل فشار در سطح ۸۵۰ میلی بار در سطح ۸۵۰ میلی بار در محدوده جغرافیایی	ارتفاع معادل فشار در سطح ۳۰۰ میلی بار در محدوده جغرافیایی	ارتفاع معادل فشار در سطح ۳۰۰ میلی بار در محدوده جغرافیایی	ارتفاع معادل فشار در سطح ۳۰۰ میلی بار در محدوده جغرافیایی
ماه ورودی مدل	جولای	40°-50° N, 0°-10° E	40°-50° N, 80°-90° E	40°-50° N, 80°-90° E	40°-50° N, 80°-90° E
خروجی مدل فازی MI	SPI زمستان+ بهار ۰/۴۹	SPI زمستان+ بهار ۰/۴۵	SPI زمستان ۰/۴	SPI زمستان ۰/۴۲	SPI زمستان ۰/۳۸
تعداد قوانین	۵	۶	۶	۶	۵
توابع عضویت ورودی	۵ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای	۷ تابع مثلثی
دامنه تغییرات توابع ورودی	(۱۵۵۰ و ۱۵۰۰)	(۱۵۵۰ و ۱۵۰۰)	(۹۳۴۰ و ۹۳۲۰)	(۹۳۴۰ و ۹۳۲۰)	(۹۳۴۰ و ۹۳۲۰)
توابع عضویت خروجی	۵ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای	۶ تابع دوزنقه‌ای
دامنه تغییرات توابع خروجی	(-۳ و ۳)	(-۳ و ۳)	(-۳ و ۳)	(-۳ و ۳)	(-۳ و ۳)

و جنوب سبیری قرار دارد. بنابراین با داشتن مقدار پارامتر معادل فشار در سطح ۳۵۰ میلی بار در ماه سپتامبر در محدوده جغرافیایی مورد نظر، می توان SPI فصل زمستان را که از روز بیست و دوم ماه دسامبر آغاز می شود با پیش دید حدود ۲/۵ ماه پیش بینی نمود.

۳-۲- ساختار مدل استنتاج فازی مورد استفاده

مراحل ساختن سیستم استنتاج فازی در این تحقیق به شرح ذیل است:

۱- تعیین یک سیستم قاعده بنیاد فازی بر اساس داده‌های مشاهده‌ای: در این تحقیق از سیستم استنتاج فازی بر اساس روش استلزام ممدانی استفاده شد.

۲- تعیین ورودی مدل: در انتخاب نمونه های آماری، سری زمانی اطلاعات جوی که ارتباط قوی تری با تغییرات SPI داشته اند، شناسایی و مورد استفاده قرار گرفتند. در این قسمت از روش شاخص متقابل اطلاعات استفاده شد که توضیحات مربوط به آن در بخش قبل ارائه گردید.

۳- فازی سازی بخش مقدم و تالی با استفاده از توابع عضویت فازی و تعیین بازه های فازی: برای تعیین توابع عضویت فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی مدل پیش بینی، از قضاوت کارشناسی و بررسی ارتباط آماری مشاهده شده بین تغییرات این متغیرها در دوره تاریخی مورد مطالعه استفاده شد. برای سادگی، توابع عضویت مثلثی و دوزنقه‌ای که کاربرد گسترده‌ای در تحقیقات مشابه داشتند، مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به اینکه در این تحقیق یک ورودی برای مدل پیش بینی هر حوضه آبریز در نظر گرفته شد، تعداد توابع عضویت ورودی های مدل مورد استفاده برای حوضه

این شاخص دارای کاربردهای فراوانی است که از جمله می توان به تشخیص پارامترهای مؤثر در مدل ها و خوشه بندی اشاره نمود [۲۵-۲۸]. دامنه تغییرات این شاخص بین صفر و یک است. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد معرف ارتباط بیشتری در داده های مورد بررسی است. در این مقاله از این معیار به منظور انتخاب پیش بینی کننده SPI به شکل گسسته بهره گرفته شد. نتایج استفاده از این شاخص در جدول ۱ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود بیشترین مقادیر MI به عنوان ورودی، در حوضه های آبریز کرج و طالقان بین دو مقدار SPI (مجموع فصل زمستان و بهار) و پارامتر هواشناسی ارتفاع معادل فشار در سطح ۸۵۰ میلی بار در ماه جولای است که در محدوده جغرافیایی صفر تا ۱۰ درجه طول شرقی و ۴۰ تا ۵۰ درجه عرض شمالی و در بخش غربی دریای مدیترانه و سواحل شمالی قرار دارد. لازم به ذکر است که ضریب همبستگی برای این دو سری ۰/۰۴ است که نشان دهنده عدم وجود همبستگی بین دو سری است در حالی که شاخص MI مقداری معادل ۰/۴۸۶ را دارد که نشان دهنده ارتباط آماری نسبتاً قوی بین دو سری است. بنابراین با داشتن مقدار پارامتر معادل فشار در سطح ۸۵۰ میلی بار در ماه جولای در محدوده جغرافیایی مورد نظر می توان SPI مجموع فصلهای زمستان و بهار که از ابتدای دی ماه یا بیست و دوم ماه دسامبر آغاز می شود را با پیش دید حدود ۴/۵ ماه پیش بینی نمود. همچنین برای حوضه های آبریز ماملو، لتیان و لار این شاخص (MI) بین دو مقدار SPI فصل زمستان و پارامتر هواشناسی ارتفاع معادل فشار در سطح ۳۰۰ میلی بار ماه سپتامبر است که در محدوده جغرافیایی ۸۰ تا ۹۰ درجه طول شرقی و ۴۰ تا ۵۰ درجه عرض شمالی و در شمال غربی چین

نحوه تقسیم‌بندی، برگرفته از تقسیم‌بندی شاخص اقلیمی SPI است. با استفاده از روش شاخص متقابل اطلاعات، پارامترهای ورودی مناسب انتخاب شدند. با توجه به اینکه این تشخیص به صورت مجزا و بدون تأثیر سیستم استنتاج فازی صورت پذیرفت، از اصلاح این پارامترها صرف نظر شد. مقادیر شاخص متقابل و عنوان متغیرها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۲- علائم اختصاری به‌کار رفته شده در خروجی مدل

تابع عضویت خروجی	نمایه مربوطه
خیلی مرطوب	W
مرطوب متوسط	NW
نرمال بالا	NR
نرمال پایین	NL
خیلی خشک	D
فوق العاده خشک	VD

این متغیرها متشکل از ارتفاع معادل فشار در سطوح ۸۵۰ میلی‌بار برای حوضه آبریز سد کرج و طالقان و ۳۰۰ میلی‌بار برای حوضه‌های آبریز سدهای ماملو، لتیان و لار هستند. لازم به‌ذکر است که مقدار شاخص MI برای متغیرهای ذکر شده، بیشترین مقادیر را داشته و به صورت قابل ملاحظه‌ای از مقدار MI برای سایر متغیرهای انتخاب نشده بزرگ‌تر هستند. با توجه به نوع پارامترهای منتخب در جعبه ابزار منطق فازی، مقدار عددی ورودی‌ها برای حوضه آبریز سد کرج و طالقان در محدوده ۱۵۰۰ تا ۱۵۶۰ و برای حوضه آبریز سدهای ماملو، لتیان و لار در محدوده ۹۴۳۰ تا ۹۹۴۰ قرار دارند. با توجه به شاخص خشکسالی مورد استفاده SPI، مقادیر خروجی برای تمامی حوضه‌ها در محدوده (۳ و -۳) می‌باشند. لازم به‌ذکر است که مدل‌هایی با ۲ الی ۶ ورودی (بیشترین مقادیر شاخص متقابل اطلاعات) ساخته و مورد ارزیابی واقع شدند که همگی کارایی کمتری نسبت به مدل تک پارامتری داشتند.

به منظور رسیدن به حالات مناسب در تشکیل سیستم استنتاج فازی، با استفاده از روش آزمون و خطا قوانین مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین از مجموعه روشهای مرکز سطح، میانگین وزنی، میانه بیشینه، مرکز مجموعه‌ها، مرکز بزرگ‌ترین سطح و روش اولین یا آخرین بیشینه مرکز سطح برای غیر فازی نمودن بهره گرفته شد. در نهایت بهترین روش غیر فازی نمودن که کمترین خطای پیش‌بینی را به همراه داشت مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به مدل‌های توسعه داده شده بالا که به صورت سعی و خطا به ساختار مناسب نزدیک شدند، نتایج اجمالی مدل‌سازی به تفکیک مناطق مورد بررسی در دو دسته اطلاعات صحت‌سنجی و ارزیابی مورد بررسی قرار گرفتند. توابع استنتاج فازی مورد استفاده نیز در

کرج ۵، برای حوضه‌های آبریز ماملو، لتیان و طالقان ۶ و برای حوضه آبریز لار ۷ تابع بود. در حوضه آبریز سد کرج، تعداد توابع عضویت خروجی مدل ۵ تابع دوزنقه‌ای و برای حوضه‌های آبریز لار، ماملو، لتیان و طالقان، تعداد توابع عضویت خروجی ۶ تابع در نظر گرفته شد.

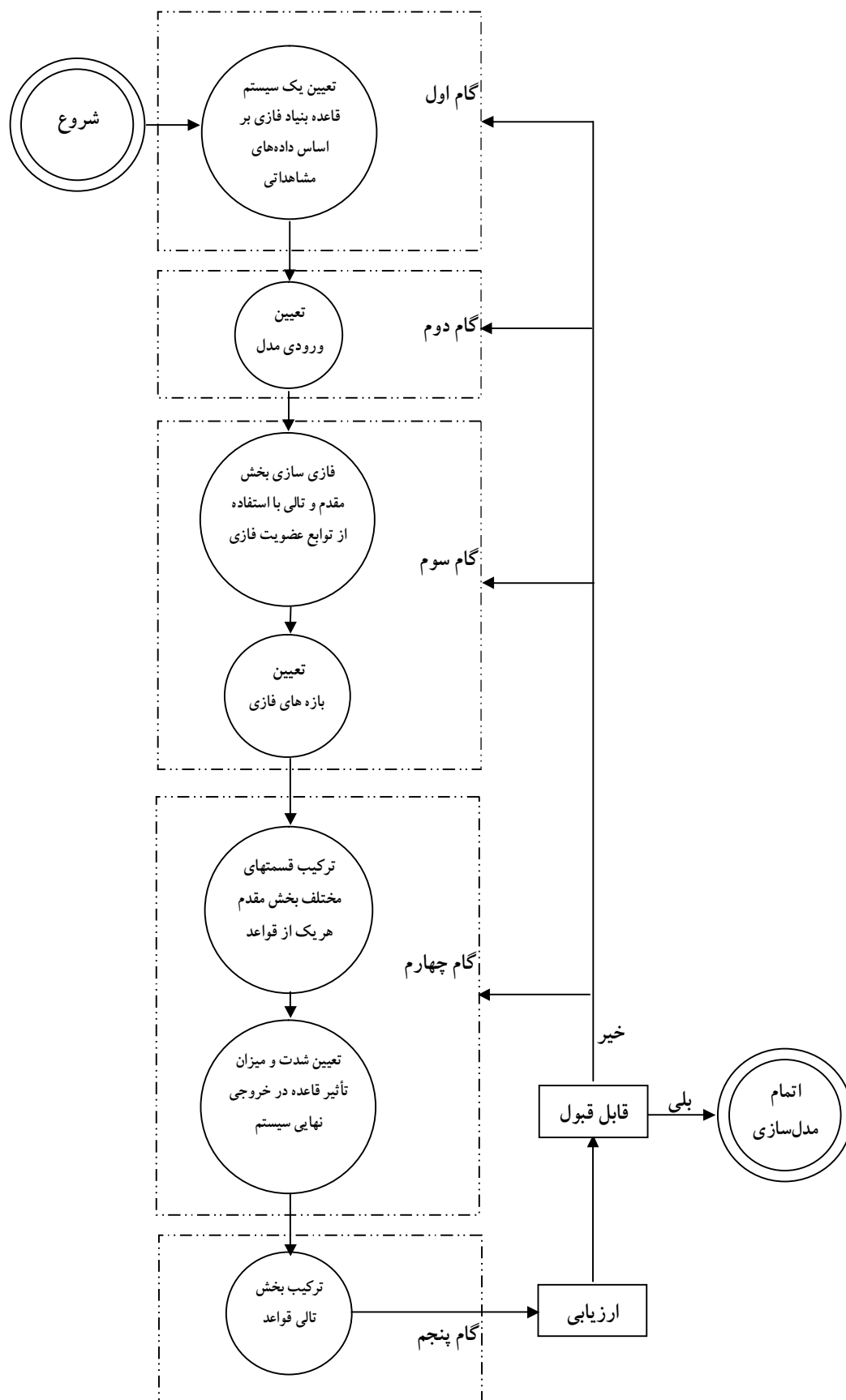
۴- ترکیب قسمت‌های مختلف بخش مقدم هر یک از قواعد و به‌دنبال آن تعیین شدت و میزان تأثیر قاعده مزبور در خروجی نهایی سیستم: ضریب وزنی برای تمامی توابع عضویت یکسان در نظر گرفته شد. با توجه به تعداد توابع عضویت ورودی و خروجی و ترکیب‌های مشاهده شده از مقادیر ورودی و خروجی در دوره صحت‌سنجی، ۵ تا ۷ قانون فازی از ترکیب بازه‌های فازی ذکر شده در بند قبل، تدوین شد.

۵- ترکیب بخش تالی قواعد به‌منظور به‌دست آوردن خروجی نهایی سیستم: از آنجا که تصمیم‌گیری بر اساس بررسی تمام قوانین در سیستم استنتاج فازی صورت می‌گیرد، لذا برای تصمیم‌گیری باید بتوان قوانین را به روشی ترکیب کرد. اجتماع (خروجی) روشی است که به‌واسطه آن تمام، مجموعه‌های خروجی قوانین مختلف به یک مجموعه فازی واحد ترکیب می‌شود. ورودی هر فرایند فازی یک مجموعه فازی است (حاصل اجتماع مجموعه‌های فازی خروجی) و خروجی غیر فازی شده آن، یک عدد است. اجتماع مجموعه‌های فازی، یک سری از مقادیر خروجی را در بر می‌گیرد و لذا باید غیر فازی شود تا از مجموعه فازی به یک عدد خروجی تبدیل شود.

چنانچه نتایج حاصله با توجه به مشاهدات قابل قبول نباشد، فرایند اصلاح و ترمیم قوانین و مشخصات سیستم استنتاج مورد استفاده، انجام خواهد پذیرفت. نمودار گردش فرایند بالا به تفکیک گامهای اشاره شده در شکل ۴ ارائه گردیده است. اطلاعات کلی در خصوص هر کدام از مدل‌های منتخب ایجاد شده به تفکیک حوضه آبریز در جدول ۱ آورده شده است. لازم به‌ذکر است که اطلاعات ورودی که با استفاده از شاخص MI مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، خود متعلق به ماههای مختلف هستند و بنابراین با انتخاب هر شاخص، طبعاً ماه آن نیز مشخص می‌شود. تهیه سیستم استنتاج فازی مورد استفاده و انتخاب تخمین‌گره‌های مورد استفاده با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام پذیرفت.

۳-۳- مدل‌سازی در مناطق مورد مطالعه

با استفاده از پارامترهای ورودی و همچنین فرایند شرح داده شده در بخش قبل، متغیرهای مدل با استفاده از سعی و خطا انتخاب و در هر حوضه آبریز، نتایج مدل‌سازی در قالب دو دسته اطلاعات واسنجی و ارزیابی به‌دست آمد. در جدول ۲ علائم اختصاری توابع عضویت خروجی‌های مدل در تمامی مناطق ارائه شده است. این

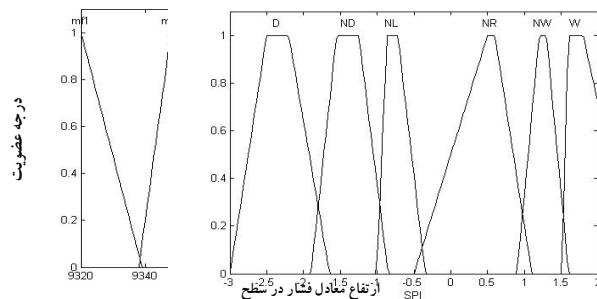


شکل ۴- نمودار گردش فرایند استنتاج فازی مورد استفاده

تمامی حوضه‌های مورد بررسی آورده شده است. با توجه به توانایی شاخص SPI به‌عنوان کلاس خشکسالی و همچنین توانایی تشخیص الگو توسط سیستم استنتاج فازی، نتایج مورد ارزیابی در سه کلاس نرمال، خشک و تر به‌صورت تشخیص الگو بررسی شد. نتایج هر دو رویکرد مدل‌سازی مقدار SPI و تشخیص الگوی خشکسالی بر اساس این معیار در جدولهای ۴ تا ۹ ارائه شده است.

شکلهای ۵ تا ۹ به تفکیک توابع ورودی و خروجی آورده شده است. از مجموع ۳۱ سال اطلاعات موجود، اطلاعات ۲۱ سال به‌منظور صحت‌سنجی مدل و اطلاعات ۱۰ سال به‌منظور ارزیابی استفاده شدند. در جدول ۳ قوانین فازی منتخب برای هر یک از مناطق و همچنین دامنه‌های زمانی مختلف ارائه شده است. نتایج نهایی مدل‌سازی تخمین مقدار شاخص SPI در شکلهای ۱۰ و ۱۱ در

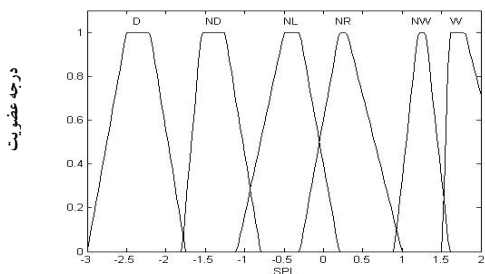
درجه عضویت



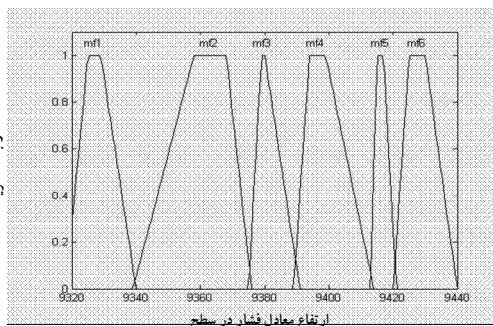
(ب)

(الف)

شکل ۵- توابع عضویت الف) ورودی و ب) خروجی مدل استنتاج فازی حوضه آبریز سد لار

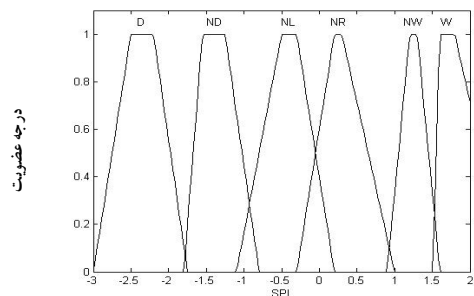


(ب)

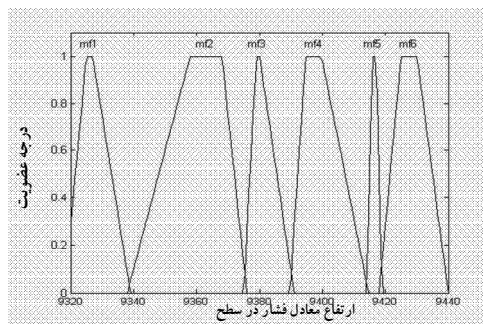


(الف)

شکل ۶- توابع عضویت الف) ورودی و ب) خروجی مدل استنتاج فازی حوضه آبریز سد ماملو

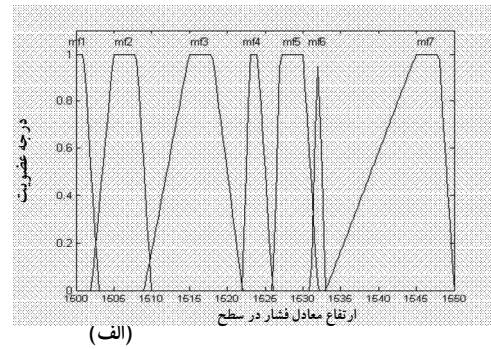
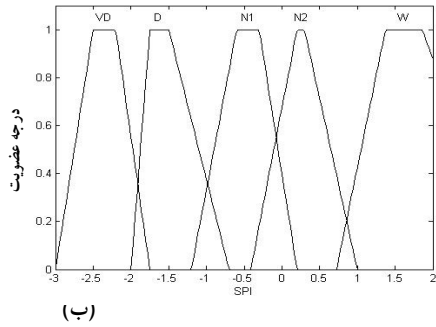


(ب)

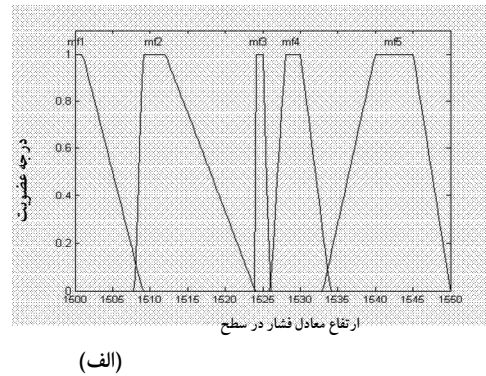
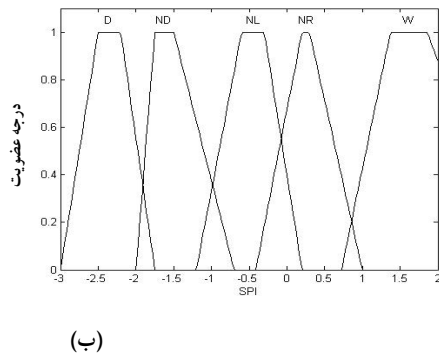


(الف)

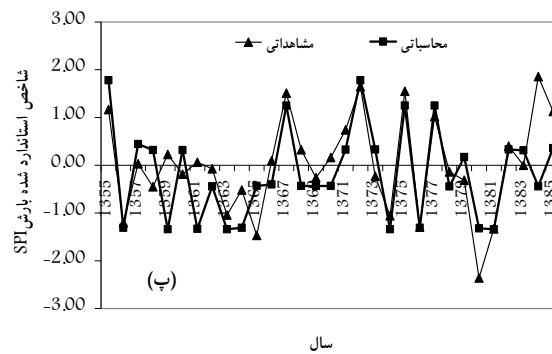
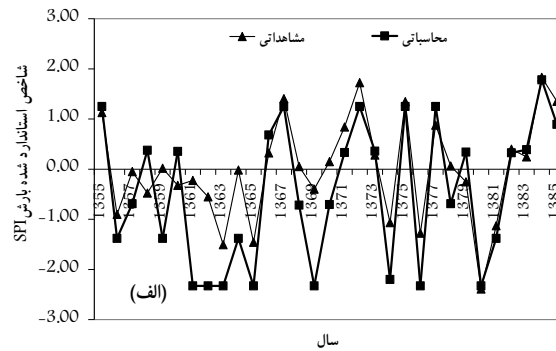
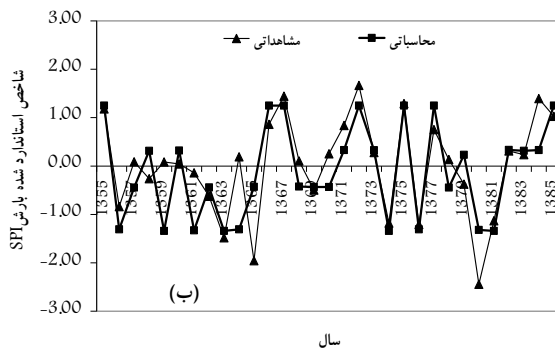
شکل ۷- توابع عضویت الف) ورودی و ب) خروجی مدل استنتاج فازی حوضه آبریز سد لتیان



شکل ۸- توابع عضویت الف) ورودی و ب) خروجی مدل استنتاج فازی حوضه آبریز سد طالقان



شکل ۹- توابع عضویت الف) ورودی و ب) خروجی مدل استنتاج فازی حوضه آبریز سد کرج

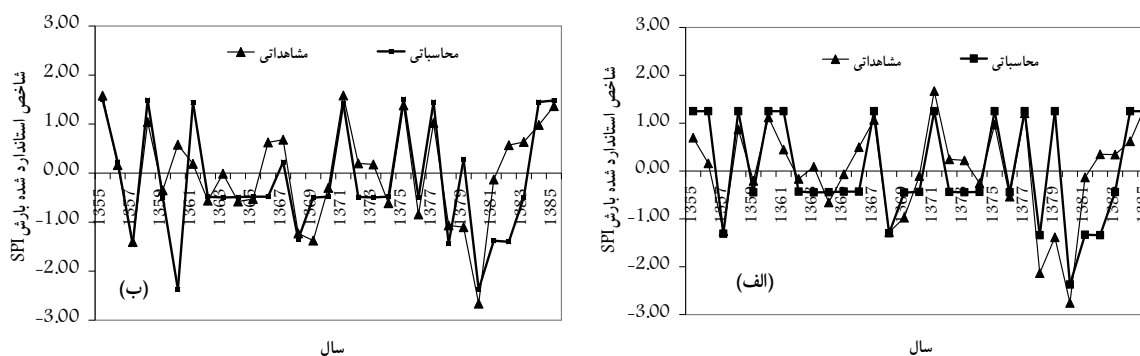


شکل ۱۰- مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی SPI در حوضه‌های آبریز پنج‌گانه مورد مدل‌سازی در فاصله سالهای ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۵ الف) لار، ب) لتیان، پ) ماملو

جدول ۳- مشخصات قوانین فازی مورد استفاده در حوضه های مورد مطالعه*

حوضه آبریز سد کرج		حوضه آبریز سد طالقان		حوضه آبریز سد ماملو		حوضه آبریز سد لتیان		حوضه آبریز سد لار		تعداد قاعده مورد استفاده	
تالی	مقدم	تالی	مقدم	تالی	مقدم	تالی	مقدم	تالی	مقدم		
SPI	850 GPH	SPI	850 GPH	SPI	300 GPH	SPI	300 GPH	SPI	300 GPH	۱	
D	Mf1	D	Mf1	W	Mf1	NW	Mf1	NW	Mf1		
ND	Mf2	NW	Mf2	ND	Mf2	ND	Mf2	D	Mf2		۲
NR	Mf3	ND	Mf3	NL	Mf3	NR	Mf3	VD	Mf3		۳
W	Mf4	NW	Mf4	NR	Mf4	NR	Mf4	W	Mf4		۴
NL	Mf5	NW	Mf5	NW	Mf5	NW	Mf5	NR	Mf5		۵
		NL	Mf6	NL	Mf6	NL	Mf6	NW	Mf6		۶
								NL	Mf7	۷	

* قاعده: هرگاه مقدم آنگاه تالی



شکل ۱۱- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی SPI در حوضه های آبریز پنج گانه مورد مدل سازی در فاصله سالهای ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۵ (الف) طالقان و (ب) کرج

جدول ۴- خلاصه نتایج آماری مدل پیش بینی SPI به تفکیک حوضه آبریز

ارزیابی			صحت سنجی			حوضه آبریز
RMSE	R ²	درصد تطابق	RMSE	R ²	درصد تطابق	
۱/۱۳	۰/۶۹۱	۵۰	۰/۷۴۴	۰/۷۵	۹۰	سد لار
۰/۷۴۴	۰/۴۳۱	۷۸	۰/۶۱۸	۰/۶۹۸	۸۲	سد لتیان
۰/۵۶۱	۰/۲۲۴	۶۶	۰/۶۵۲	۰/۶۳۰	۸۶	سد ماملو
۰/۷۳۸	۰/۵۷۴	۸۹	۰/۷۸۵	۰/۵۰۹	۷۶	سد طالقان
۱/۲۳	۰/۲۹۳	۷۶	۰/۶۲۴	۰/۶۷۳	۸۲	سد کرج

جدول ۵- نتایج مدل پیش بینی SPI در حوضه آبریز سد کرج بر اساس سه کلاس اقلیمی

ارزیابی (بر اساس ۱۰ سال داده)			صحت سنجی (بر اساس ۲۱ سال داده)			مرحله
D	N	W	D	N	W	
۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	نمایه مربوطه
۳	۵	۲	۳	۱۴	۴	حدود SPI
۲	۳	۲	۲	۱۱	۴	فراوانی
۶۷	۶۰	۱۰۰	۶۷	۷۹	۱۰۰	فراوانی خروجی مدل
	۷۶			۸۲		درصد تطابق مدل
						درصد تطابق کل

جدول ۶- نتایج مدل پیش‌بینی SPI در حوضه آبریز سد طالقان بر اساس سه کلاس اقلیمی

ارزیابی (بر اساس ۱۰ سال داده)			صحت سنجی (بر اساس ۲۱ سال داده)			مرحله
D	N	W	D	N	W	نمایه مربوطه
۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	حدود SPI
۲	۶	۲	۳	۱۵	۳	فراوانی
۲	۴	۲	۲	۹	۳	فراوانی خروجی مدل
۱۰۰	۶۷	۱۰۰	۶۷	۶۰	۱۰۰	درصد تطابق مدل
	۸۹			۷۶		درصد تطابق کل

جدول ۷- نتایج مدل پیش‌بینی SPI در حوضه آبریز سد ماملو بر اساس سه کلاس اقلیمی

ارزیابی (بر اساس ۱۰ سال داده)			صحت سنجی (بر اساس ۲۱ سال داده)			مرحله
D	N	W	D	N	W	نمایه مربوطه
۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	حدود SPI
۲	۵	۳	۵	۱۲	۴	فراوانی
۱	۴	۲	۵	۱۰	۳	فراوانی خروجی مدل
۵۰	۸۰	۶۷	۱۰۰	۸۳	۷۵	درصد تطابق مدل
	۶۶			۸۶		درصد تطابق کل

جدول ۸- نتایج مدل پیش‌بینی SPI در حوضه آبریز سد لتیان بر اساس سه کلاس اقلیمی

ارزیابی (بر اساس ۱۰ سال داده)			صحت سنجی (بر اساس ۲۱ سال داده)			مرحله
D	N	W	D	N	W	نمایه مربوطه
۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	حدود SPI
۲	۶	۲	۴	۱۲	۵	فراوانی
۱	۵	۲	۴	۸	۴	فراوانی خروجی مدل
۵۰	۸۳	۱۰۰	۱۰۰	۶۷	۸۰	درصد تطابق مدل
	۷۸			۸۲		درصد تطابق کل

جدول ۹- نتایج مدل پیش‌بینی SPI در حوضه سد لار بر اساس سه کلاس اقلیمی

ارزیابی (بر اساس ۱۰ سال داده)			صحت سنجی (بر اساس ۲۱ سال داده)			مرحله
D	N	W	D	N	W	نمایه مربوطه
۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۱ و بیشتر	۱- و کمتر	۰/۹۹ تا ۰/۹۹	و بیشتر	حدود SPI
۲	۶	۲	۴	۱۳	۴	فراوانی
۱	۳	۱	۴	۹	۴	فراوانی خروجی مدل
۵۰	۵۰	۵۰	۱۰۰	۶۹	۱۰۰	درصد تطابق مدل
	۵۰			۹۰		درصد تطابق کل

نتایج ارائه شده در جدولهای ۴ تا ۹ حاوی اطلاعات ارزیابی آماری در ۵ حوضه و در دو حالت صحت‌سنجی و ارزیابی است. در این جدول، علاوه بر ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا نیز آورده شده است. با توجه به تعداد معدود اطلاعات در دو دسته ارزیابی و صحت‌سنجی، لزوماً ضریب تبیین بیان‌کننده کیفیت قطعی نتایج مدل‌سازی نیست. بنابراین جذر میانگین مربعات خطا به‌عنوان شاخص دیگری مورد ارزیابی قرار گرفت. در میان

۴- نتایج مدل‌سازی

نتایج حاصله در جدولهای ۴ تا ۹، به تفکیک هر یک از حوضه‌های آبریز و دسته اطلاعات مورد بررسی و همچنین رویکرد مورد مدل‌سازی (تشخیص الگوی خشکسالی و یا مقدار SPI) آورده شده است. بر این اساس سد لار در صحت‌سنجی و طالقان در ارزیابی، بهترین درصد تطابق را دارا بوده‌اند. این تشخیص بر اساس شاخص آماری ضریب تبیین برای هر یک از مدل‌ها به‌دست آمده است.

مدل‌های ایجاد شده، مدل پیش‌بینی‌کننده حوضه‌های سدهای کرج و تیان در مرحله صحت‌سنجی و ماملو و طالقان در مرحله ارزیابی بهترین خروجی را دارا بودند. همچنین نتایج ارائه شده در حوضه سد طالقان در مرحله صحت‌سنجی و کرج در مرحله ارزیابی، بدترین نتایج ارزیابی را داشتند. در سایر موارد نتایج به‌دست آمده نسبت به نتایج سایر مدل‌ها، متوسط ارزیابی شدند. در شکل ۹، نتایج ایجاد شده توسط مدل در محدوده ۳۱ سال آمار (اطلاعات صحت‌سنجی و ارزیابی) به‌صورت کامل ارائه گردیده است. در جدول ۶ نتایج ارائه شده برای صحت‌سنجی دارای دقتی کمتر از نتایج ارزیابی هستند. با توجه به شکست اطلاعات بر اساس توالی زمانی و همچنین توجه به تشخیص صحیح الگوی خشکسالی و وضعیت بارش باید اذعان داشت که دقت مدل مناسب است زیرا در زمان‌های نرمال و تر، دارای دقتی هم‌ارز است و در سالهای خشک تنها در یک مورد تفاوت تشخیص دارد. این تشابه رفتاری با توجه به محدود بودن کل سالهای آماری، قابل قبول ارزیابی می‌شود.

۶- پیشنهاد

با توجه به تجربه حاضر به‌منظور توسعه ابزارهای پیش‌بینی در زمینه خشکسالی، استفاده از رویکردهای غیرخطی به‌جای قوانین شرطی به‌کار رفته در این تحقیق، امکان انجام پیش‌بینی‌های کوتاه یا میان مدت به‌صورت بازه‌های ممکن به‌جای یک مقدار خاص و همچنین امکان در نظر گرفتن مقادیر غیر صریح در تعریف پیش‌بینی‌کننده‌های اقلیمی در تحقیقات آتی توصیه می‌گردد. استفاده از سیستم ANFIS برای انتخاب توابع عضویت فازی و ترکیب‌های ورودی و خروجی می‌تواند یکی از زمینه‌های ادامه این تحقیق باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در این رویکرد، استفاده از روشی نامعین همچون سیستم استنتاج فازی از منظر تئوریک دارای توجیه فنی است. نتایج گویای توفیق روش به‌کار گرفته شده در تخمین وضعیت خشکسالی حاکم بر منابع تأمین‌کننده آب شرب تهران بود.

۷- مراجع

- 1- Wilhite, D.A., and Glantz, M.H. (1985). "Understanding the drought phenomenon: The role of definitions." *Water International*, 10, 111-120.
- 2- Zahraie, B., Karamouz, M., and Eghdami, S. (2004). "Seasonal precipitation forecasting using large scale climate signals: Application to the Karoon river basin in Iran." *Proc., of the 6th International Conference on Hydroinformatics-Liong, Phoon and Babovic (eds)*, Singapore.
- 3- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., and Sutera A. P. (2003). "Spatial variability of drought: An analysis of the SPI in sicily." *Water Resour. Manage.*, 17, 273-296.
- 4- Steinemann, A. (2003). "Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation." *J. of American Water Resources Association*, 39(5), 1217-1233.
- 5- Loukas, A., and Vasiliades, L. (2004). "Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly region, Greece." *J. Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 719-731.
- 6- Labeledzki, L., and Bak, B. (2005). "Drought mapping in poland using SPI." *ICID Probabilistic Analysis of Drought Spatiotemporal Characteristics in Thessaly 21st European Regional Conference*, Thessaly, Greece, 10-20.
- 7- Moreira, E.E., Paulo, A.A., Pereira, L.S., and Mexia, J.T. (2006). "Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models." *J. Hydrology*, 331, 349-359.
- 8- Mishra, A.K., and Desai, V.R. (2006). "Drought forecasting using feed-forward recursive neural network." *Ecol. Modell.*, 198, 127-138.

- 9- Paulo, A.A., and Pereira, L.S. (2007). "Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains." *J. Water Resour. Manage.*, 21, 1813-1827.
- 10- Moreira, E.E., Coelho, C.A., Paulo, A.A., Pereira, L.S., and Mexia, J.T. (2008). "SPI-based drought category prediction using loglinear models." *J. Hydrology*, 354, 116-130.
- 11- Mehmet, A. Y., and Mahmut, F. (2009). "Adaptive neuro fuzzy inference system approach for municipal water consumption modeling: An application to Izmir, Turkey." *J. Hydrology*, 365, 225-234.
- 12- Aurélio, A., and Carlos Roberto, D. (2008). "Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed." *Environmental Modelling and Software*, 23, 244-253.
- 13- Nourani, V., and Salehi, K. (2008). "Rainfall-runoff modeling using ANFIS and ANN-wavelet models." *4th National Civil Eng. Conf., University of Tehran*, Tehran. (CD ROM), (In Persian)
- 14- Zacharia, K., and John, N. (2009). "A fuzzy inference system for modeling stream flow: Case of Letaba river, south Africa." *J. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, 688-700.
- 15- Postizadeh, N. (2006). "River flow forecasting using fuzzy inference system." MSc. Thesis of Hydraulic Structures, Dept. of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran. (In Persian)
- 16- Karamouz, M., Tabesh, M., Nazif, S., and Moridi, A. (2005). "Estimation of hydraulic pressure in water network using artificial neural network and fuzzy logic." *J. of Water and Wastewater*, 56, 3-14. (In Persian)
- 17- Jamali, S., Abrishamchi, A., and Tajrishi, M. (2007). "River stream-flow and Zayanderoud reservoir operation modeling using the fuzzy inference system." *J. of Water and Wastewater*, 64, 25-34. (In Persian)
- 18- Abedini, M. J., and Nasserli, M. (2008). "Inverse distance weighted revisited." *4th APHW, Conf. Beijing, China*, (CD ROM).
- 19- Lashkari, H. (1996). "Synoptic precipitation pattern of extreme south west Iran." Ph.D. Thesis of Climatology, Tarbiat Modarres University, Tehran. (In Persian)
- 20- Bowden, G. J., Dandy G. C., and Maier, H. R. (2005a). "Input determination for neural network models in water resources applications, Part 1-background and methodology." *J. Hydrology*, 301, 75-92.
- 21- Bowden, G. J., Dandy, G. C., and Maier, H. R. (2005b). "Input determination for neural network models in water resources applications, Part 2. Case study: Forecasting salinity in a river." *J. Hydrology*, 301, 93-107
- 22- Nasserli, M., Asghari, K., and Abedini, M. J. (2008). "Optimized scenario of rainfall forecasting using genetic algorithms and artificial neural networks." *Expert Systems with Applications*, 35(3), 1415-1421.
- 23- Sudheer, K. P., Gosain, A. K., and Ramasastri, K. S. (2002). "A data driven algorithm for constructing artificial neural network rainfall-runoff models." *Hydrological Process*, 16, 1325-1330.
- 24- Witten, I. H., and Frank, E. (2005). *Data mining: Practical machine learning tools and techniques*, Morgan Kaufmann Pub., Amsterdam.
- 25- He, Z., Xu, X., and Deng, Sh. (2008). "k-ANMI: A mutual information based clustering algorithm for categorical data." *Information Fusion*, 9, 223-233.
- 26- Maya, R. J., Dandy, G., Maier, H. R., and Nixon J. B. (2008). "Application of partial mutual information variable selection to ANN forecasting of water quality in water distribution systems." *Environmental Modelling and Software*, 23, 1289-1299.
- 27- Maya, R. J., Maier H. R., Dandy, G., and Fernando, G.T.M.K. (2008). "Non-linear variable selection for artificial neural networks using partial mutual information." *Environmental Modelling and Software*, 23, 1312-1326.
- 28- Wua, J., Chen, J., Xiong, H., and Xie, M. (2008). "External validation measures for K-means clustering: A data distribution perspective." *Expert Systems with Applications*, 36 (2), 6050-6061.