

پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد (SPI) و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (مطالعه موردی: استان‌های تهران و البرز)

محمدحسین جهانگیر^{۱*}، میمنه خوش‌مشریان^۲، حسین یوسفی^۳

۱ و ۳. استادیار گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی طبیعت، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۰۹/۲۲ تاریخ تصویب ۱۳۹۴/۱۲/۱۹)

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های تکرارشونده در تمامی نقاط با اقلیم‌های پربارش و کم‌بارش است و بلایی طبیعی به‌شمار می‌رود. ایران نیز از جمله کشورهایی است که با این پدیده در نقاط مختلف به‌خصوص حوضه رودخانه‌ها درگیر است. استان تهران به دلیل اهمیت آن از نظر سیاسی و اجتماعی با رشد روزافزون جمعیت مواجه است که این امر به کاهش منابع آبی این استان دامن می‌زند. در این پژوهش به استان البرز که در گذشته یکی از شهرهای استان تهران محسوب می‌شد، توجه شد. خسارات واردشده از خشکسالی به این منطقه از نوع اقتصادی-اجتماعی است. در این پژوهش پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی، با استفاده از اطلاعات بارش ۳۸ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده دو استان تهران و البرز، به وسیله شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در بازه زمانی ۳۱ ساله بین سال‌های آبی ۱۳۶۲-۱۳۶۳ تا ۱۳۹۲-۱۳۹۳ در میانگین‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه انجام گرفت. نتایج بررسی شاخص SPI2 نشان داد حدود نیمی از ایستگاه در کل دوره مطالعاتی وضعیت نرمال داشته‌اند و حدود یک‌سوم ایستگاه‌ها در این مدت وضعیت خشکسالی را پشت سر گذاشته‌اند. با توجه به مقادیر عددی شاخص SPI دو بازه زمانی ۱۳۷۵-۱۳۷۶ و ۱۳۷۷-۱۳۷۸ به‌عنوان سال‌هایی که یک دوره کامل خشکسالی را تجربه کرده‌اند، انتخاب شدند. دوره‌های خشکسالی شدید و خیلی شدید، شدیدترین مقدار خشکسالی (کمترین مقدار SPI) برای تعدادی از ایستگاه‌ها در دوره‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه شد. همچنین پیش‌بینی با روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه انجام شد به طوری که حاصل به مقادیر مشاهداتی بسیار نزدیک بود.

کلیدواژه‌گان: استان تهران، پهنه‌بندی، پیش‌بینی خشکسالی، شاخص بارندگی استاندارد، شبکه عصبی پرسپترون.

مقدمه

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی پرخسارت است که آثار آن به‌کندی نمایان می‌شود. کشور ایران به‌دلیل واقع‌شدن در محدوده خشک و نیمه‌خشک جهان و تغییرات اقلیمی گسترده‌ای که در بیشتر نقاط آن دیده می‌شود، همواره خسارات زیادی ناشی از خشکسالی را متحمل می‌شود. با وجود این، تا کنون این پدیده به اندازه سایر بحران‌های طبیعی از قبیل سیل، زلزله، توفان و رانش زمین مورد توجه قرار نگرفته و بررسی نشده است، زیرا بیشتر بلایای طبیعی طی دوره‌های کوتاه خسارات سنگین مالی و جانی به جامعه وارد می‌کنند، اما خسارات سنگین ناشی از خشکسالی به تدریج و در مدت طولانی‌تری ظاهر می‌شود، در نتیجه به‌عنوان یک «بحران» کمتر به آن نگاه می‌شود.

خشکسالی به‌عنوان پدیده‌ای بی‌سروصدا جزء طبیعی هر اقلیمی (چه پربارش، چه کم‌بارش) محسوب می‌شود که ناشی از کاهش مقدار بارش در یک دوره نسبتاً طولانی‌مدت به نسبت میانگین نرمال منطقه است. از آنجاکه خشکسالی مانند سایر بلایای طبیعی از قبیل سیل و زلزله آنی نیست و ماهیت خزشی دارد، تعیین زمان شروع و خاتمه آن مشکل است. از این‌رو نیاز به تحقیقات گسترده در این زمینه کاملاً ضروری به نظر می‌رسد [۹]. در کشورهای توسعه‌یافته خشکسالی پدیده‌ای خطرناک به‌شمار می‌رود و پروژه‌های تحقیقاتی زیادی در این زمینه انجام شده و یا در حال انجام است. تعریف عملی خشکسالی به افراد کمک می‌کند تا شروع، خاتمه و شدت خشکسالی را تشخیص دهند. برای تعیین شروع خشکسالی تعاریف عملی، میزان انحراف از میانگین بارش یا سایر متغیرهای اقلیمی در طول یک دوره زمانی را مشخص می‌کند. این امر معمولاً با مقایسه وضعیت فعلی نسبت به متوسط‌های گذشته که اغلب مبتنی بر دوره آماری ۳۰ ساله است، انجام می‌شود. آستانه تعیین‌شده به‌عنوان شروع یک خشکسالی (مثلاً ۷۰ درصد بارش متوسط در طول یک دوره زمانی مشخص) معمولاً بیشتر به‌صورت قراردادی انتخاب می‌شود تا اینکه براساس رابطه دقیق تأثیرات آن بر محیط برگزیده شود.

تنوع مطالعات خشکسالی به‌دلیل پیچیدگی آن بسیار گسترده است. مطالعاتی که در زمینه خشکسالی انجام

می‌شوند، از نظر موضوع بررسی‌شده در چند گروه متمایز قابل طبقه‌بندی هستند. برخی از پژوهشگران به رابطه گردش عمومی جو با خشکسالی و علت وقوع خشکسالی توجه می‌کنند. گروه دیگری از پژوهشگران به شناخت زمان وقوع خشکسالی‌ها و عوامل تأثیرپذیر از آن می‌پردازند و گروهی دیگر احتمال وقوع خشکسالی و تأثیرات آن و خسارت‌های ناشی از آن را تجزیه و تحلیل می‌کنند. در این زمینه‌ها می‌توان به ترتیب به مطالعات چو^۱ و همکارانش، مک‌کی^۲ و همکارانش و ویلهایت^۳ و همکارانش اشاره کرد. پایش خشکسالی به‌منظور بررسی وضعیت منطقه از نظر شروع خشکسالی و چگونگی توسعه زمانی و مکانی خشکسالی انجام می‌شود. مرسوم‌ترین راه به‌منظور پایش خشکسالی استفاده از شاخص‌های خشکسالی است [۹]. از مشهورترین شاخص‌های خشکسالی می‌توان به شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) [۱۴] و شاخص بارندگی استاندارد^۴ (SPI) اشاره کرد [۱۰]. از آنجاکه شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه می‌شود، می‌تواند برای پایش خشکسالی در سه مقیاس کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت استفاده شود. SPI1 و SPI3 برای پایش خشکسالی کوتاه‌مدت، SPI6 و SPI9 برای پایش خشکسالی میان‌مدت و از SPI12 و SPI24 به‌منظور خشکسالی بلندمدت استفاده می‌شود. مزیت دیگر SPI این است که برای محاسبه این شاخص تنها اطلاعات بارندگی نیاز است. این مزایا سبب شده است که این شاخص کاربرد گسترده‌ای در مطالعات خشکسالی داشته باشد.

گیروکس^۵ و همکارانش (2001) تأثیر خشکسالی سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۹۹ برای التورمنت آمریکا را بررسی و عنوان کردند که در مقیاس یک‌ماهه SPI بهتر از شاخص پالمر در ثبت آغاز شرایط خشکی و شدت آن عمل می‌کند [۱۴]. بردی^۶ و همکارانش (2001) برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی از شاخص SPI استفاده کردند. هونگ^۷ و همکارانش (2005) از SPI در مکان‌های مختلف

1. Chu

2. Mckee

3. Wilhite

4. Standardized Precipitation Index

5. Girux

6. Bordi

7. Hong

در مقیاس‌های مختلف زمانی ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲ ماهه انجام شد. نتایج نشان داد که میزان همبستگی بین شاخص‌های یادشده با تغییر مقیاس زمانی متفاوت خواهد بود. بر این اساس ملاحظه شد با افزایش مقیاس زمانی، میزان همبستگی شاخص‌های مختلف با شاخص SPI افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد اثر بارش بر تغییر شاخص خشکسالی یادشده به صورت آنی نیست و بعد از گذر زمان نمایان می‌شود. به بیانی کاهش و افزایش بارش بعد از یک ماه تأثیری در مقدار شاخص پوشش گیاهی ندارد و همبستگی کمی بین شاخص SPI و شاخص‌های پوشش گیاهی مشاهده می‌شود، در حالی که بعد از ۹ ماه در یک حوضه و ۳ ماه در حوضه دیگر این همبستگی بیشتر به چشم می‌خورد [۲].

مواد و روش‌ها

معرفی محل مطالعه موردی

تهران به‌عنوان پایتخت کشور ایران، از پرجمعیت‌ترین و پرصرف‌ترین شهرها به حساب می‌آید. موقعیت مهم سیاسی آن و جذاب بودن آن برای ساکنان دیگر شهرها و شهرستان‌ها، مردم را بر آن داشته است تا به مهاجرت به این استان روی آورند. با توجه به اهمیت تهران و افزایش روزافزون جمعیت آن، استفاده از منابع آبی اعم از آب‌های زیرزمینی، ذخایر سدها و آب‌های سطحی نیز افزایش چشم‌گیری داشته است. استان تهران در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد در بین ۱۸۰۰ متر در شمال، ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است. تهران اقلیم‌های متنوع دارد، در شمال آب و هوای معتدل و کوهستانی و در جنوب آب و هوای نیمه‌خشک را شامل می‌شود. متوسط بارندگی سالانه به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این استان، حدود ۲۳۳ میلی‌متر و دمای به‌دست‌آمده بین میانگین کمینه و بیشینه ۱۱/۹ و ۲۲/۷ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است، همچنین تعداد روزهای یخبندان سالانه ۴۷ روز است. از منظر دیگر، استان تهران، شامل سامانه متنوعی از منابع آب همچون رودخانه‌ها، سدها و منابع آب زیرزمینی است که برای ارزیابی متدولوژی در این پژوهش مناسب هستند.

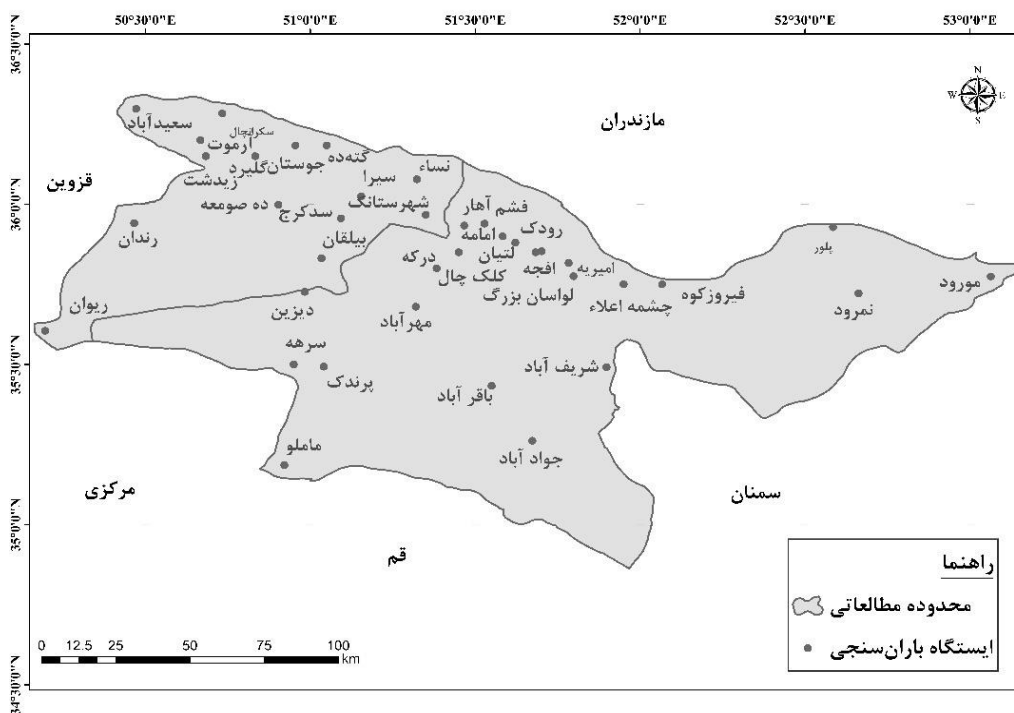
دنیا به‌منظور پایش خشکسالی بهره جستند و این شاخص را یکی از ابزارهای قوی برای مطالعه خشکسالی معرفی کردند. سلطانی و سعادت (۲۰۰۷) شاخص SPI را برای پهنه‌بندی خشکسالی در استان اصفهان به کار بردند و مناطق پرخطر را از نظر خشکسالی نشان دادند. مساعدی و همکارانش (۱۳۸۸) پس از برازش مدل استوکستیک^۱ بر سری‌های زمانی شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۳ تا ۴۸ ماهه به پیش‌بینی مقادیر SPI پرداختند و براساس مقایسه مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده، طولانی‌ترین مدت قابل پیش‌بینی برای هر یک از مقیاس‌های زمانی SPI را معین کردند. جهان‌دیده و شیروانی (۱۳۹۰) به پیش‌بینی خشکسالی براساس شاخص SPI با استفاده از مدل‌های سری زمانی در استان فارس پرداختند [۲].

پائولو و پیرا^۲ (۲۰۰۷) با استفاده از زنجیره مارکوف و شاخص SPI به ایجاد یک مدل تصادفی هشدار خشکسالی پرداختند. ایشان با استفاده از اطلاعات ۶۷ ساله منطقه آجاتو در جنوب پرتغال به پیش‌بینی وقوع خشکسالی در سه ماه آتی اقدام کردند. میسرا^۳ و همکارانش (۲۰۰۷) برای پیش‌بینی خشکسالی در حوضه‌ای در هند از یک مدل ترکیبی^۴ استفاده کردند. به این منظور آن‌ها مدل ترکیبی خود را از ترکیب یک مدل استوکستیک با ANNs ایجاد کردند. ایشان پیش‌بینی خشکسالی را براساس شاخص SPI با استفاده از یک مدل استوکستیک، دو مدل ANNs و دو مدل ترکیبی انجام دادند. سانجای^۵ و همکارانش (۲۰۱۰) به ارزیابی خشکسالی در سه منطقه در هند پرداختند. ایشان در تحقیق خود همبستگی بین SPI را با شاخص‌های پوشش گیاهی با عناوین شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال‌شده^۶ (NDVI)، شاخص تأمین آب پوشش گیاهی^۷ (WSVI) و شاخص شرایط پوشش گیاهی^۸ (VCI) بررسی کردند. آن‌ها در محاسبه شاخص پوشش گیاهی حوضه از اطلاعات ماهواره‌ای استفاده کردند که نتایج بیانگر کارایی مناسب اطلاعات ماهواره‌ای برای پایش حوضه در شرایط خشکسالی بوده است. آنالیز همبستگی

1. Stochastic Models
2. PauloandPereira
3. Mishra
4. Hybrid Model
5. Sanjay
6. Normalized Difference Vegetation Index
7. Water Supply Vegetation Index
8. Vegetation Condition Index

استان تهران، از جنوب غربی به استان مرکزی، از غرب به استان قزوین و از شرق نیز به استان تهران محدود است. ایستگاه‌های باران‌سنجی که اطلاعات آن‌ها در دسترس بود در سطح دو استان، داده‌های ورودی این مطالعه را تأمین می‌کنند. مشخصات ایستگاه‌ها و نیز محل قرارگیری آن‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.

استان البرز که با تهران هم‌مرز است و در حدود کمتر از ۶ سال گذشته شهری از استان تهران بوده است نیز در این پژوهش بررسی شده است. استان البرز با وسعتی حدود ۵۱۴۲ کیلومترمربع بین ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب شرقی به



شکل ۱. موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های مطالعاتی در دو استان تهران و البرز

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad x > 0 \quad (1)$$

در رابطه ۱، α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس توزیع و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

ضرایب α و β بهینه نیز از طریق روابط زیر حساب می‌شوند:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

شاخص بارش استاندارد (SPI)

مک‌کی و همکارانش برای پیش‌خشک‌سالی، شاخصی با عنوان شاخص بارندگی استاندارد (SPI) ارائه کردند [۱۱]. شاخص SPI تنها به اطلاعات بارندگی نیازمند است و می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شود. مسئله اصلی در محاسبه SPI برآزش توزیع آماری مناسب روی اطلاعات بارندگی است. تجربه نشان داده است که توزیع گاما توزیع مناسبی برای برآزش روی داده‌های بارندگی است، در صورتی که فرض شود بارندگی در یک منطقه از توزیع گاما تبعیت می‌کند و x مقادیر بارندگی باشد، تابع چگالی احتمال دو پارامتری گاما به صورت زیر تعریف می‌شود:

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۱ (MLP) شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) یکی از انواع شبکه‌های عصبی است که در این شبکه، وزن‌ها و بایاس‌ها می‌توانند برای تولید یک هدف مشخص آموزش داده شوند. MLP از آن جهت که عملکرد مناسبی از خود نشان داده است بسیار شایان توجه است. این شبکه مجموعه‌ای از نورون‌هاست که در لایه‌های مختلفی پشت سر هم قرار گرفته‌اند. نورون یک واحد ریاضی با یک دستگاه غیرخطی است. بنابراین، یک شبکه عصبی MLP که از اجتماع این نورون‌ها تشکیل می‌شود، یک سامانه پیچیده و غیرخطی خواهد بود [۹]. شبکه MLP از یادگیری نظارت‌شده که شامل ارائه ورودی‌ها و خروجی‌ها به شبکه و به حداقل رساندن خطای تخمین است، برای آموزش استفاده می‌کند [۷]. شکل ۲ شماتیک یک MLP را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای آموزش MLP از الگوریتم آموزشی پس‌انتشار خطا^۲ (BP) استفاده شد. همچنین تابع انتقال سیگموئید برای لایه مخفی و تابع انتقال خطی برای لایه خروجی در نظر گرفته شده است.

مدل‌های پیش‌بینی

به‌منظور پیش‌بینی کمی خشکسالی، چهار مدل مختلف استفاده شد. سپس براساس معیارهای ارزیابی بهینه‌ترین مدل در هر پیش‌بینی انتخاب شد. در مدل ۱، برای پیش‌بینی شاخص SPI در ماه بعد، از سری زمانی SPI با یک گام تأخیر استفاده شد، بدین‌صورت که برای پیش‌بینی مقدار شاخص SPI در زمان $t+1$ ، از مقدار شاخص در زمان t استفاده شد، در مدل ۲ پیش‌بینی شاخص در ماه بعد براساس مقادیر شاخص تا دو ماه قبل صورت پذیرفت و به‌طور مشابه در مدل ۳ و مدل ۴ پیش‌بینی براساس مقادیر شاخص تا سه و چهار ماه قبل انجام شد.

به‌منظور محاسبه A، باید دقت کرد که پارامتر n تعداد مشاهدات بارندگی است.

در محاسبه شاخص SPI از توزیع احتمال تجمعی گاما استفاده می‌شود، که رابطه آن به‌صورت زیر است:

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad t = x / \hat{\beta} \quad (5)$$

از آنجاکه در رابطه بالا مقدار لگاریتم صفر تعریف نشده است و توزیع بارندگی ممکن است مقادیر صفر داشته باشد، بنابراین در این شرایط احتمال تجمعی از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$H(x) = q + (1-q)F(x) \quad (6)$$

در این رابطه q احتمال بارندگی صفر است. برای محاسبه q می‌توان از رابطه کالیفرنیا (رابطه ۷) استفاده کرد.

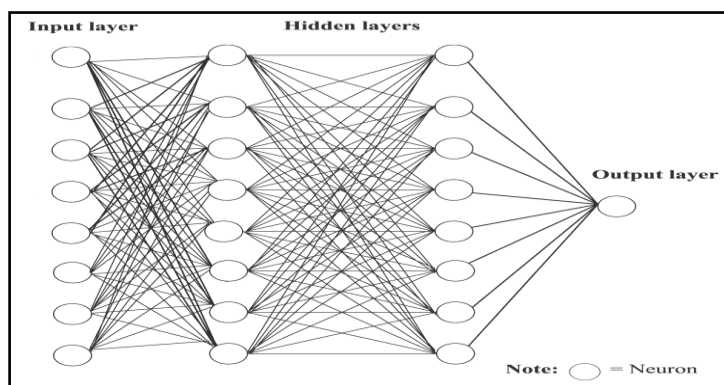
$$q = \frac{m}{n} \quad (7)$$

در این رابطه m تعداد داده‌های صفر موجود در سری زمانی و n نیز تعداد کل داده‌های بارندگی است.

گام بعدی در محاسبه SPI، انتقال احتمال تجمعی $H(x)$ که از توزیع گامای تجمعی به‌دست‌آمده به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف معیار یک است. در واقع SPI عبارت است از متغیری از تابع توزیع نرمال استاندارد، که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مد نظر در توزیع گاما مساوی باشد. جدول ۱ طبقه‌بندی شدت خشکسالی براساس شاخص SPI را نشان می‌دهد.

جدول ۱. طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SPI

مقدار SPI	طبقه خشکسالی
$SPI \leq -2$	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱/۴۹ تا ۱/۱۰	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نزدیک به نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
$SPI \leq -2$	خشکسالی بسیار شدید



شکل ۲. شکلی شمانیک از مدل پروسپترون چندلایه (MLP)

$$SPI_{(t+1)} = f(SPI_{(t)}) \quad \text{مدل ۱} \quad (۸)$$

$$SPI_{(t+1)} = f(SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}) \quad \text{مدل ۲} \quad (۹)$$

$$SPI_{(t+1)} = f(SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}) \quad \text{مدل ۳} \quad (۱۰)$$

$$SPI_{(t+1)} = f(SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}, SPI_{(t-3)}) \quad \text{مدل ۴} \quad (۱۱)$$

تحلیل نتایج به دست آمده

در سطح دو استان تهران و البرز، داده‌های بارش حاصل از ۳۸ ایستگاه باران‌سنجی، در بازه زمانی سال‌های آبی ۱۳۶۲-۱۳۶۳ تا ۱۳۹۲-۱۳۹۳ بررسی شدند. اطلاعات جغرافیایی این ایستگاه‌ها به همراه تعداد دوره‌های خشکسالی شدید و بسیار شدید، طول مدت خشکسالی‌ها و شدیدترین خشکسالی در هر ایستگاه، در هر یک از دوره‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه در این بازه زمانی ۳۱ ساله در جدول ۱ آورده شده‌اند.

پس از طبقه‌بندی مقادیر بارش در دسته‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه، مقادیر شاخص SPI برای هر ماه در تمامی ایستگاه‌ها در بازه زمانی مطالعه شده به کمک نرم‌افزار MATLAB محاسبه شد. پس از بررسی مقادیر حاصل در کلیه ایستگاه‌ها علاوه بر دوره‌های خشکسالی، نقشه‌های پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی با استفاده از مقادیر SPI12 در سال‌های خشک نیز با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS رسم شد. شکل‌های ۳ و ۴ نقشه‌های پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی با استفاده از مقادیر SPI در سال‌های ۱۳۷۵-۱۳۷۶ و ۱۳۷۷-۱۳۷۸ به‌عنوان دو سال خشک هستند. بیشتر ایستگاه‌ها در این دو سال در وضعیت خشکسالی شدید و بسیار شدید به سر می‌برند.

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه نتایج روش‌های مختلف، از سه معیار ارزیابی یعنی ضریب همبستگی^۱ (R)، جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا^۳ (MAE) استفاده شد. این معیارها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}} \quad (۱۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - f_i)^2} \quad (۱۳)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - f_i| \quad (۱۴)$$

در این روابط، O_i مقادیر مشاهداتی در گام زمانی t ام، f_i مقادیر پیش‌بینی شده در گام زمانی t ام، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{f} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها هستند. هر مدل که دارای R بیشتر، $RMSE$ و MAE کمتر باشد، مطلوبیت بیشتری دارد.

1. Correlation
2. Root Mean Square Error
3. Mean Absolute Error

جدول ۲. موقعیت جغرافیایی برخی ایستگاه‌ها، تعداد دوره‌های خشکسالی و شدیدترین خشکسالی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع شاخص	تعداد خشکسالی‌های خیلی شدید	تعداد خشکسالی‌های شدید	طولانی‌ترین دوره خشکسالی (ماه)	شدیدترین خشکسالی (مقدار SPI)
				SPI3	۲	۲۵	۶	-۳/۴۴
				SPI6	۱	۱۵	۸	-۲/۹۱
آرموت	۵۰ ۴۰'	۳۶ ۱۲'	۱۸۵۰	SPI9	۱	۱۲	۱۴	-۲/۶۹
				SPI12	۲	۹	۱۷	-۲/۵۱
				SPI24	۳	۶	۳۴	-۲/۴۲
				SPI3	۶	۲۱	۴	-۳/۲۳
				SPI6	۳	۱۴	۸	-۲/۳۸
آهار	۵۱ ۲۸'	۳۵ ۵۶'	۲۱۰۰	SPI9	۳	۱۲	۱۰	-۲/۵۳
				SPI12	۲	۸	۲۱	-۳/۰۵
				SPI24	۰	۷	۲۱	-۲/۰۰
				SPI3	۲	۱۵	۵	-۲/۶۷
				SPI6	۲	۱۹	۸	-۲/۴۷
باقرآباد	۵۱ ۰۳'	۳۵ ۵۰'	۹۵۰	SPI9	۲	۱۳	۱۰	-۲/۴۴
				SPI12	۲	۹	۱۰	-۲/۵۱
				SPI24	۰	۱۰	۱۱	-۱/۴۹
				SPI3	۶	۲۱	۵	-۲/۹۳
				SPI6	۴	۱۶	۱۰	-۲/۵۶
پلور	۵۲ ۳۵'	۳۵ ۵۶'	۲۲۷۳	SPI9	۲	۱۳	۱۰	-۲/۵۸
				SPI12	۱	۱۱	۱۲	-۲/۱۴
				SPI24	۰	۱۰	۱۹	-۲/۴۹
				SPI3	۴	۲۲	۷	-۲/۰۲
				SPI6	۳	۲۱	۹	-۴/۸۱
جوادآباد	۵۱ ۴۰'	۳۵ ۱۲'	۸۶۱	SPI9	۳	۱۳	۱۹	-۴/۳۱
				SPI12	۱	۹	۲۰	-۳/۹۷
				SPI24	۱	۸	۳۲	-۳/۳۵
				SPI3	۳	۱۲	۵	-۳/۰۸
				SPI6	۴	۷	۸	-۳/۴۶
درکه	۵۱ ۲۳'	۳۵ ۴۸'	۱۷۰۰	SPI9	۳	۹	۱۰	-۳/۳۳
				SPI12	۱	۹	۱۰	-۲/۶۱
				SPI24	۱	۸	۱۴	-۲/۲۵
				SPI3	۴	۲۴	۵	-۲/۹۱
				SPI6	۲	۱۶	۱۱	-۲/۷۶
زیدشت	۵۰ ۴۱'	۳۶ ۰۹'	۱۹۳۱	SPI9	۲	۱۱	۱۱	-۲/۷۲
				SPI12	۲	۹	۱۷	-۲/۶۴
				SPI24	۱	۸	۲۲	-۲/۵۹
				SPI3	۴	۲۶	۵	-۲/۸۴
				SPI6	۳	۱۴	۸	-۳/۵۳
سد کرج	۵۱ ۰۵'	۳۵ ۵۰'	۱۵۸۸	SPI9	۱	۱۷	۱۷	-۲/۹
				SPI12	۱	۱۱	۱۳	-۲/۷۲
				SPI24	۰	۸	۲۶	-۲/۵۵

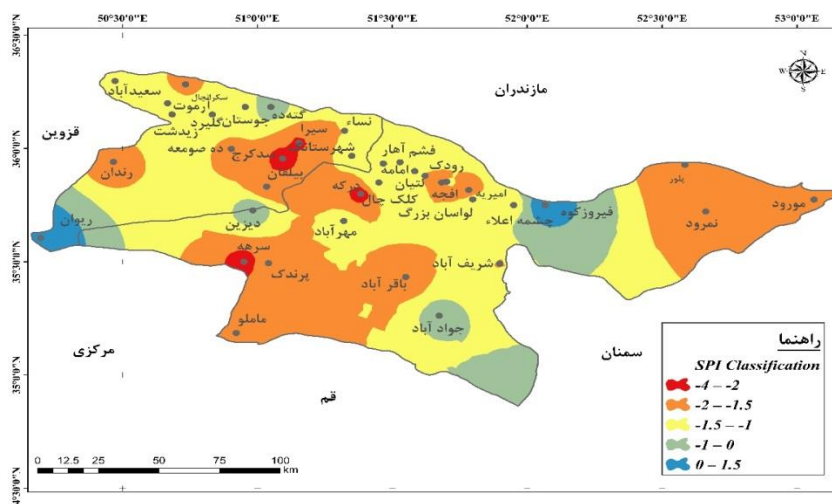
ادامه جدول ۲. موقعیت جغرافیایی برخی ایستگاه‌ها، تعداد دوره‌های خشکسالی و شدیدترین خشکسالی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع شاخص	تعداد خشکسالی‌های خیلی شدید	تعداد خشکسالی‌های شدید	طولانی‌ترین دوره خشکسالی (ماه)	شدیدترین خشکسالی (مقدار SPI)
				SPI3	۲	۲۴	۵	-۲/۶۹
				SPI6	۲	۱۸	۷	-۲/۶۳
فشم	۵۱ ۳۳'	۳۵ ۵۶'	۲۱۲۲	SPI9	۱	۱۹	۹	-۲/۵۱
				SPI12	۰	۱۶	۱۰	-۲/۰۸
				SPI24	۰	۵	۲۵	-۱/۹۲
				SPI3	۵	۲۰	۵	-۲/۵۶
				SPI6	۱	۱۹	۱۲	-۲/۲۶
فیروزکوه	۵۲ ۴۶'	۳۵ ۴۵'	۱۹۶۵	SPI9	۱	۱۴	۱۷	-۲/۶۱
				SPI12	۱	۱۵	۱۹	-۲/۲۷
				SPI24	۱	۴	۲۹	-۲/۷۱
				SPI3	۱	۱۳	۱۴	-۲/۰۶
				SPI6	۱	۱۴	۱۴	-۲/۳۲
کلک‌چال	۵۱ ۲۷'	۳۵ ۵۱'	۳۲۰۰	SPI9	۱	۷	۲۱	-۲/۷
				SPI12	۱	۵	۲۲	-۲/۳۸
				SPI24	۱	۴	۱۹	-۲/۱۹
				SPI3	۱	۲۹	۹	-۲/۳۴
				SPI6	۱	۱۴	۱۲	-۵/۶۱
لتیان	۵۱ ۴۱'	۳۵ ۴۶'	۱۵۶۳	SPI9	۱	۱۴	۱۴	-۵/۸۷
				SPI12	۲	۵	۱۵	-۵/۶۷
				SPI24	۱	۳	۲۵	-۲/۷۳

پیش‌بینی شده برای مقادیر شاخص SPI در دوره‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه ارائه می‌دهد. در بیشتر ایستگاه‌ها مقادیر خشک‌ترین زمان در قسمت پیش‌بینی شده حداکثر با یک ماه اختلاف با زمان‌های خشک مشاهده شده ملاحظه می‌شوند. مواردی هم مانند SPI6 و SPI9 در ایستگاه نمودار ملاحظه می‌شوند که مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده با هم متفاوت‌اند. در ایستگاه فشم، تفاوت‌ها در زمان‌های مربوط به SPI6، SPI9 و SPI12 مشاهده می‌شود، ولی در مقابل ایستگاه‌های باقراآباد، سرهه، سکران‌چال و کلک‌چال زمان‌های خشک در بخش پیش‌بینی و مشاهداتی در تمامی دوره‌های زمانی مربوط به محاسبه SPI، بسیار به هم نزدیک‌اند.

سپس با استفاده از مقادیر SPI محاسبه شده، پیش‌بینی وضعیت خشکسالی با رویکرد یک گام به جلو انجام گرفت. با آزمون و خطا مشخص شد مدل ۳ و ۴ که در بخش قبل توضیحات آن ارائه شد برای مقادیر SPI کوتاه‌مدت مناسب است و مدل‌های ۱ و ۲ برای مقادیر SPI بلندمدت نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. جدول ۳ نتایج را برای مقایسه بهتر مقادیر پیش‌بینی شده با واقعیت مشاهده شده نشان می‌دهد. نقشه‌های پهنه‌بندی در زمینه مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی در ادامه آورده می‌شود.

برای قسمت پیش‌بینی خشکسالی، ۶ ایستگاه از بین ۳۸ ایستگاه موجود، به‌طور تصادفی انتخاب شد. جدول ۳ زمان دوره خشک را در دو وضعیت مشاهده شده و

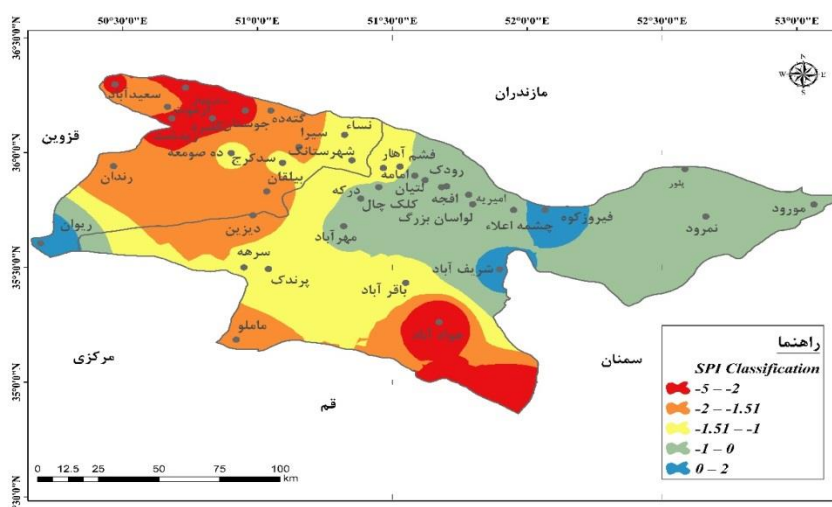


شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی در سال‌های ۱۳۷۵-۱۳۷۶

جدول ۳. مقایسه خشک‌ترین زمان‌ها در دو بخش مشاهده‌ای و پیش‌بینی

ایستگاه		باقرآباد		سرره		سکران چال		فشم		کلک چال		نمرود	
شاخص	*For.	*Obs.	For.	Obs.	For.	Obs.	For.	Obs.	For.	Obs.	For.	Obs.	
SPI3	اسفند ۱۳۷۵	فروردین ۱۳۷۶	بهمن ۱۳۷۵	بهمن ۱۳۷۵	تیر ۱۳۷۹	مرداد ۱۳۷۹	اردیبهشت ۱۳۸۷	فروردین ۱۳۸۷	فروردین ۱۳۶۸	فروردین ۱۳۶۸	دی ۱۳۷۵	آذر ۱۳۷۵	
SPI6	اسفند ۱۳۷۵	فروردین ۱۳۷۶	بهمن ۱۳۷۵	اسفند ۱۳۷۵	بهمن ۱۳۷۵	اسفند ۱۳۷۵	خرداد ۱۳۶۲	اسفند ۱۳۶۲	مهر ۱۳۶۸	آبان ۱۳۶۸	بهمن ۱۳۷۵	اردیبهشت ۱۳۸۰	
SPI9	آبان ۱۳۸۷	اردیبهشت ۱۳۷۶	بهمن ۱۳۷۵	بهمن ۱۳۷۵	اسفند ۱۳۷۵	فروردین ۱۳۷۶	دی ۱۳۶۹	اردیبهشت ۱۳۶۹	آبان ۱۳۶۸	آبان ۱۳۶۸	تیر ۱۳۸۵	آذر ۱۳۸۰	
SPI12	دی ۱۳۶۲	بهمن ۱۳۶۲	مهر ۱۳۷۶	آبان ۱۳۷۶	فروردین ۱۳۸۰	آبان ۱۳۸۰	مهر ۱۳۷۶	آذر ۱۳۷۵	دی ۱۳۶۸	آذر ۱۳۶۸	اردیبهشت ۱۳۸۵	اردیبهشت ۱۳۸۰	
SPI24	دی ۱۳۶۲	اسفند ۱۳۶۹	شهریور ۱۳۷۹	مهر ۱۳۷۹	شهریور ۱۳۷۹	شهریور ۱۳۷۹	فروردین ۱۳۸۵	اردیبهشت ۱۳۷۸	دی ۱۳۶۸	دی ۱۳۶۸	تیر ۱۳۸۰	مرداد ۱۳۸۰	

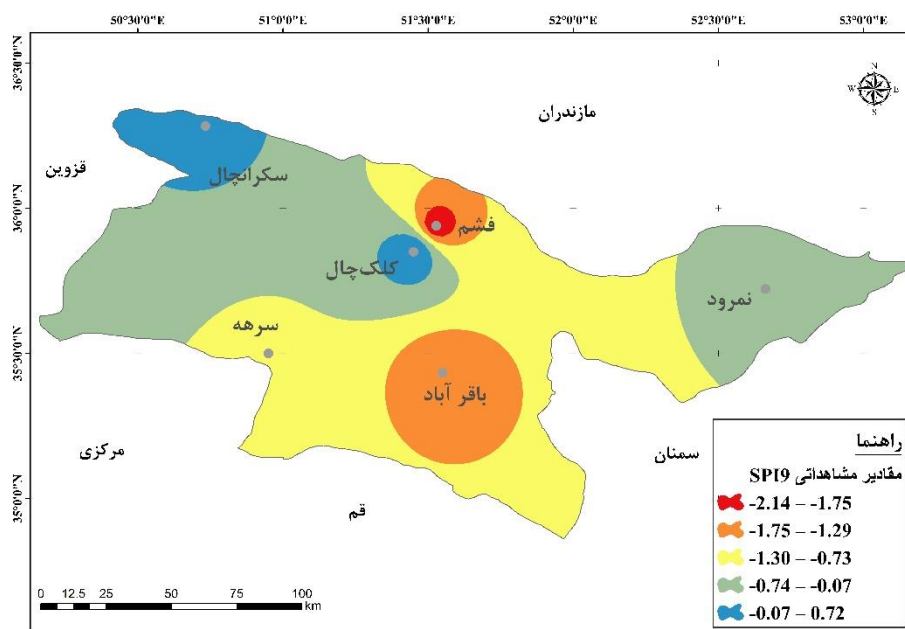
* نماد Obs. بیانگر وضعیت مشاهده‌ای (Observe) و نماد For. نشان‌دهنده وضعیت پیش‌بینی (Forecast) است.



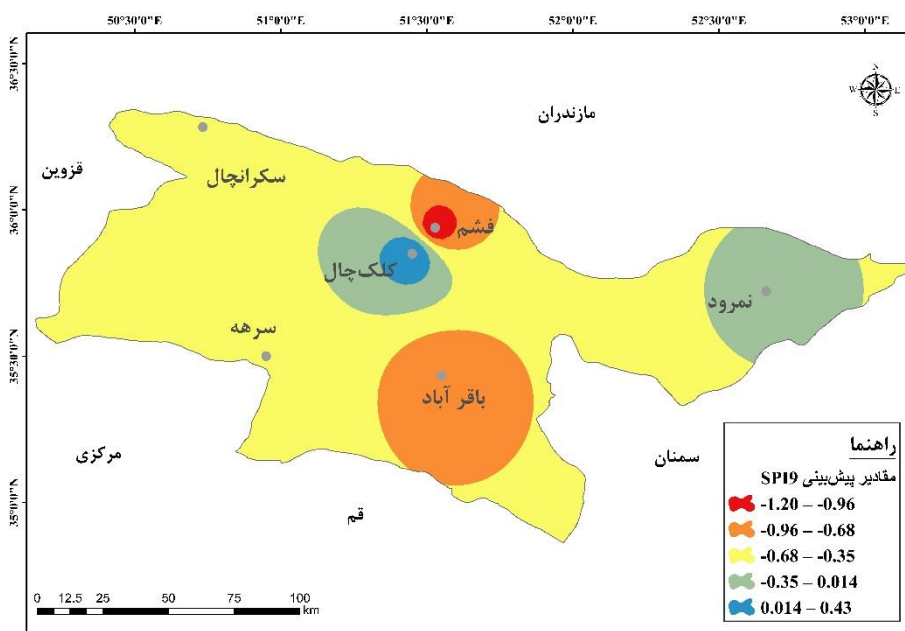
شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی در سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۷۸

ایستگاه‌های فشم، باقرآباد و سرهه در شکل ۵ وضعیت خشکسالی دارند. در شکل ۶ فشم، باقرآباد، سرهه و سکران چال نیز در وضعیت خشکسالی به سر می‌برند.

شکل‌های ۵ و ۶ علاوه بر نشان دادن موقعیت این ایستگاه‌ها، وضعیت خشکسالی در حالت مشاهداتی و پیش‌بینی را با استفاده از مقادیر SPI9 نشان می‌دهند.



شکل ۵. پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی با استفاده از مقادیر مشاهداتی SPI9



شکل ۶. پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده SPI9

<http://drought.iranhydrology.net/DroughtinIran.htm>

[۴]. کارآموز، محمد؛ و عراقی‌نژاد، شهاب؛ هیدرولوژی پیشرفته. ۱۳۹۰، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۴۶۰ صفحه.

[۵]. مجله اینترنتی خلیج فارس، آخرین دسترسی: ۱۳۹۵/۰۲/۲۲

[۶]. <http://parssea.org/?p=264>

[۷]. مرید، سعید؛ پایمزد، شهلا. «مقایسه روش‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی جهت پایش روزانه خشکسالی در تهران». علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال یازدهم، ش ۴۲، زمستان ۱۳۸۶، از ص ۳۲۵ تا ۳۳۳.

[8]. Araghinejad, S. 2014. Data-driven Modeling: Using MATLAB in Water Resources and Environmental Engineering. Springer. Mishra A. K., Desa, V. R. and Singh, V. P. 2007. Drought Forecasting Using a Hybrid Stochastic and Neural Network Model. Journal of Hydrologic Engineering, 12(6):626-638.

[9]. Chu P.S., Nash A.J., and Porter F.Y. 1993. Diagnostic studies of two contrasting rainfall episodes in Hawaii: Dry 1981 and wet 1982. Journal of climate, 6(7):1457-1462.

[10]. Karamouz, M., and Araghinejad S. 2009. Advanced Hydrology. Amirkabir University Press. Tehran.

[11]. McKee T.B., Doesken N.J., and Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22):179-183.

[12]. McKee T.B., Doesken N.J., and Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales, Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 233-236.

[13]. Morid S., Smakhtin V., and Bagherzadeh K. 2007. Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. International Journal of Climatology, 27(15):2103-2111.

[14]. Mishra A. K., Desa, V. R. and Singh, V. P. 2007. Drought Forecasting Using a Hybrid Stochastic and Neural Network Model. Journal of Hydrologic Engineering, 12(6):626-638.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اطلاعات بارش ماهانه ۳۸ ایستگاه باران‌سنجی در دو استان تهران و البرز بررسی شد. طول دوره مطالعه شده ۳۱ سال بین سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۳ بود. با استفاده از شاخص SPI مقادیر بارش ازریایی شد. نتایج نشان داد که طولانی‌ترین دوره خشکسالی حدود ۳۰ ماه محاسبه شده است. تعداد دوره‌های خشکسالی بسیار شدید در نهایت ۶ بار (مربوط به ایستگاه پلور، SPI3) و یا در بهترین حالت صفر بوده است. تعداد دوره‌های خشکسالی شدید بسیار متغیر و حدود ۳۰ بار برای SPI3 و تا ۴ بار برای SPI24 بیشتر بود. ایستگاه‌های آرموت و فیروزکوه طولانی‌ترین دوره‌های خشکسالی را پشت سر گذاشته‌اند. با توجه به نتایج، سال‌های ۱۳۷۵-۱۳۷۶ و ۱۳۷۷-۱۳۷۸ سال‌های خشک بوده و نقشه‌های پهنه‌بندی وضعیت خشکسالی در این دو سال در سطح منطقه مطالعاتی بیانگر آن بود که اغلب ایستگاه‌ها مقادیر بسیار منفی شاخص SPI را به خود اختصاص داده‌اند. در ادامه تحقیق با بهره‌گیری از اطلاعات ۶ ایستگاه نمود، باقرآباد، فشم، کلک‌چال، سره و سکران‌چال در سطح دو استان تهران و البرز، پیش‌بینی به کمک شبکه عصبی پروسپترون چندلایه (MLP) انجام گرفت. مقادیر پیش‌بینی شده با تقریب خوبی به مقادیر مشاهداتی نزدیک بودند. حتی مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی مقادیر SPI مشاهداتی و پیش‌بینی در سال تصادفی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ نشان داد که پیش‌بینی با شبکه عصبی پروسپترون چندلایه به خوبی عمل کرده است.

منابع

[۱]. حجازی‌زاده، زهرا؛ جوی‌زاده، سعید؛ مقدمه‌ای بر خشکسالی و شاخص‌های آن، ۱۳۸۹، انتشارات سمت، ۳۵۸ ص.

[۲]. حسینی موغاری، سید محمد؛ ۱۳۹۲، توسعه سامانه پایش و پیش‌بینی خشکسالی (مطالعه موردی: حوضه گرگان‌رود)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴۴ ص.

[۳]. سامانه خشکسالی هواشناسی ایران، آخرین دسترسی: ۱۳۹۴/۰۲/۲۵

- [15]. Palmer W.C. 1965. Meteorological drought. Washington, DC, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau, 58 p.
- [16]. Vafakhah M., and Bashari M. 2011. Probability study of hydrological drought and wet period's occurrence using markov Chain in Kashafrood Watershed. Watershed Management Research (Pajouhesh&Sazandegi), 25(1):1-9. (In Persian with English abstract)
- [17]. Wilhite D.A., and Pulwarty R.S. 2005. Drought and water crises: lessons learned and the road ahead. Drought and water crises, 431 p.
- [18]. Wilhite D.A., Hayes M.J., Knutson C., and Smith K.H. 2000. Planning for Drought: Moving from Crisis to Risk Management. Journal of the American Water Resources Association, 36(4):697-710.