ارزیابی آسیب‌پذیری استان یزد در برابر خشکسالی با استفاده از شاخص بارش معیار و روش‌های زمین‌آماری

علیرضا نسیمی[۱]، ضرغام محمدی[*۲]

تاریخ دریافت:۹۲/۴/۴ تاریخ پذیرش:۹۲/۱۰/۱۱

چکیده

شاخص بارش معیار، شاخصی است که به‌طور وسیعی در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص، عمدتا با استفاده از مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه به ارزیابی وضعیت خشکسالی می‌پردازد. با توجه به تشخیص مقیاس زمانی۱۲ ماهه از این شاخص، به عنوان شاخص خشکسالی مناسب استان یزد در مطالعات گذشته، در این تحقیق صرفا از مقیاس زمانی ۱۲ماهه شاخص بارش معیار برای ارزیابی وضعیت خشکسالی در استان یزد استفاده شده است. شاخص خشکسالی SPI 12 برای طول دوره‌ی آماری ۳۰ ساله در ۲۸ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک استان یزد محاسبه شده است. برای بررسی توزیع مکانی شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه در استان یزد، از روش‌های زمین آماری معکوس فاصله، کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی استفاده شده و این روش‌ها با استفاده از روش صحت‌سنجی متقاطع ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان دادند که، برای رسم نقشه‌ی توزیع مکانی SPI 12 در سال‌های ۷۹-۱۳۷۸، ۷۸-۱۳۷۷ و ۷۷-۱۳۷۶ به ترتیب شبیه‌های واریوگرام گوسی، گوسی و کروی روش درون‌یابی کریجینگ معمولی کم خطاترین شبیه‌ها هستند. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی، در کمترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰ (سال آبی ۷۹-۱۳۷۸)، بیش از ۹۸ درصد سطح استان در وضعیت خشکسالی و در بیشترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰ (سال آبی ۷۸-۱۳۷۷)، بیش از ۹۹ درصد سطح استان در وضعیت ترسالی قرار گرفته است. هم‌چنین در بارش سالانه متوسط (سال آبی ۷۷-۱۳۷۶)، شهرهای یزد، تفت، مهریز، بافق، نایبندان و خرانق در وضعیت خشکسالی قرار دارند و به عنوان مناطق آسیب‌پذیر استان در برابر خشکسالی شناخته می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: پایش خشکسالی، پهنه‌بندی شدت خشکسالی، شاخص بارش معیار۱۲ ماهه (*SPI* 12)، کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی.

[۱]- دانشجوی دکترای زمین‌شناسی- آبشناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.

[۲]- استادیار بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.

[*]- نویسنده‌ی مسئول: zmohammadi@shirazu.ac.ir

مقدمه

پدیده‌ی خشکسالی، اثرات منفی بزرگی بر منابع آب و محیطهای وابسته به آن می‌گذارد و در برخی سالها باعث خسارات جبران ناپذیری می‌شود. این خسارتها در مناطق خشک که از دیدگاه اقتصادی ساختار شکننده‌تری دارند، نمود بیشتری یافته و اثرات منفی ماندگاری را از جهات مختلف بر جای می‌گذارد.

در مطالعات مربوط به توصیف و پایش خشکسالی، این نیاز وجود دارد که در مشابهت با سایر پدیده‌های تأثیرگذار در وضعیت منابع آب و کشاورزی، پدیده‌ی خشکسالی از حالت کیفی و توصیفی به صورت کمّی و عددی درآید. لذا، برای آن شاخصهایی تعریف و ارائه شده است (شمس‌نیا و همکاران، ۱۳۸۸). با محاسبه‌ی شاخص خشکسالی، تصویر جامعی از عوامل مؤثر در خشکسالی فراهم می‌شود. در نتیجه، استفاده از آن برای ارزیابی وضعیت خشکسالی و تصمیم‌گیری درباره آن به مراتب مفیدتر و ساده‌تر از ردیفهای متعددی از اطلاعات متنوع مرتبط با خشکسالی است.

ارائه شاخصهای خشکسالی و ارزیابی وضعیت خشکسالی با استفاده از آنها همواره مد نظر بوده است، به طوری‌که حتی با وجود گذشت سالها از اولین پژوهشها در این زمینه (تورنث‌وایت، ۱۹۴۷)، تحقیق در این زمینه متوقف نشده و همچنان با استفاده از شاخصهای مختلفی به بررسی و ارزیابی خشکسالی پرداخته می‌شود. چنانچه در تحقیقی در کشور مغولستان، به ارزیابی ویژگیهای خشکسالی، با استفاده از شاخصهای بارش معیار و پالمر پرداخته شده است (ناندینتستسگ و شینودا، ۲۰۱۳)، و در تحقیقات دیگری، به تحلیل شرایط خشکسالی و خطرات ناشی از آن با استفاده از شاخص بارش معیار در منطقه پنینسولار مالزی (وان‌زین و همکاران، ۲۰۱۳)، و به بررسی آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی با استفاده از شاخص بارش معیار در جنوب مالاوی (جایانتی و همکاران، ۲۰۱۳) پرداخته شده است.

با توجه به اهمیت ارزیابی وضعیت خشکسالی در طول زمان و در مناطق مختلف جهان، تحقیقات متعددی نیز روی خشکسالیهای ایران و استان یزد انجام شده است. چنانچه خشکسالیهای ایران با هدف پایش خشکسالی با استفاده از شاخص RDI بررسی شده و نقشه پهنه‌بندی شدت خشکسالی با استفاده از شاخصهای RDI و SPI برای سال آبی ۲۰۰۰-۱۹۹۹ رسم شده است (اسدی زارچ و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین خشکسالیهای استان یزد با هدف بررسی تغییرات اقلیمی این استان بررسی شده و نقشه‌ی شدت خشکسالی استان، با استفاده از شاخص درصد از نرمال برای سال ۱۹۷۳ رسم شده است (بری ابرقویی و همکاران، ۱۳۷۹). پهنه‌بندی خشکسالی در استان یزد با استفاده از شاخص SPI نیز برای سالهای آبی ۷۹-۱۳۷۸ و ۶۵-۱۳۶۴ رسم شده است (فلاح‌پور و همکاران، ۱۳۸۸). علاوه بر این، به‌منظور بررسی نتایج روشهای مختلف پهنه‌بندی خشکسالی، نقشه پهنه‌بندی شدت خشکسالی در استان یزد با استفاده از شاخص درصد از نرمال، برای سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ رسم شده است (کریمی احمدآباد و قره چلو، ۱۳۸۸). همان‌طور که اشاره شد، اگرچه نقشه پهنه‌بندی شدت خشکسالی در برخی سالها برای استان یزد رسم شده است، ولی این نقشه با اهداف مختلف و با استفاده از شاخصهای متداول رسم شده است و بخشی از یک تحقیق منسجم و نظام‌مند، به‌منظور ارزیابی و تحلیل مناطق آسیب‌پذیر استان یزد با استفاده از شاخص خشکسالی مناسب این استان نبوده است.

شاخص بارش معیار، عمدتا با استفاده از مقیاسهای زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه به ارزیابی وضعیت خشکسالی می‌پردازد. قابلیت انعکاس وضعیت منابع آب با استفاده از شاخص بارش معیار، به‌وسیله‌ی تحقیقات مختلفی مورد تأکید قرار گرفته است (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳، سرانو و مورنو، ۲۰۰۵، دو، ۲۰۰۵، پالتینو و همکاران، ۲۰۰۹، نلبنتیس و زاکیریس، ۲۰۰۹، فیوریلو و گوداگنو، ۲۰۱۰، لیو و همکاران، ۲۰۱۲، نسیمی، ۱۳۹۰، و نسیمی و محمدی، ۱۳۹۲). مقیاس زمانی ۱۲ ماهه شاخص بارش معیار، به عنوان شاخص خشکسالی مناسب استان یزد معرفی شده است (نسیمی، ۱۳۹۰، شایق و سلطانی، ۱۳۹۰، و نسیمی و محمدی، ۱۳۹۲). این شاخص (SPI 12)، به‌وسیله‌ی نسیمی (۱۳۹۰)، و نسیمی و محمدی (۱۳۹۲)، بر مبنای وضعیت اقلیمی و آبهای زیرزمینی استان یزد و با توجه به تحقیقات مختلفی

(فیوریلو و گوداگنو، ۲۰۱۰، گاتمن، ۱۹۹۹، و سرانو مورنو، ۲۰۰۵) انتخاب شده است. همچنین، پنج شاخص درصد از نرمال بارندگی (PNPI)، دهکهای بارندگی (DPI)، ناهنجاری بارندگی (RAI)، بالم و مولی (BMDI) و شاخص بارش معیار (SPI) به‌وسیله‌ی شایق و سلطانی (۱۳۹۰)، مطالعه شده‌اند و شاخص SPI 12، جهت استفاده در استان یزد پیشنهاد شده است. در تأیید مقیاس زمانی انتخاب شده از شاخص بارش معیار، رفتار زمانی بارش نیز نشان می‌دهد که یک سال مرطوب یا ترسالی (سال با بارش فراوان) ممکن است از مجموع چند ماه خشک (و یا بسیار خشک) و چند ماه مرطوب (و یا بسیار مرطوب) تشکیل شده باشد و در مقابل سال خشک (خشکسالی) که در آن بارش کمتر از میانگین بلند مدت اقلیمی است، می‌تواند شامل چند ماه مرطوب و چند ماه خشک باشد (زارع ابیانه و محبوبی، ۱۳۸۳).

در بررسی پدیده‌ی خشکسالی، شاخص مورد استفاده برای ارزیابی وضعیت خشکسالی از مسائل بسیار مهمی است که می‌تواند نقش بسزایی در پیش‌آگاهی و مدیریت بحران در مواقع بروز خشکسالی داشته باشد. بنابراین، با توجه به انتخاب مقیاس زمانی ۱۲ ماهه از شاخص بارش معیار، به‌عنوان شاخص خشکسالی مناسب استان یزد (نسیمی، ۱۳۹۰، شایق و سلطانی، ۱۳۹۰، و نسیمی و محمدی، ۱۳۹۲)، در تحقیق حاضر به ارزیابی وضعیت خشکسالی در این استان با استفاده از SPI 12 پرداخته شده است. با توجه به نقش مهم منابع آب در توسعه‌ی پایدار اقتصادی، اجتماعی و سیاسی و نیز مدیریت مناطق خشک، در این پژوهش مناطق آسیب‌پذیر در برابر خشکسالی، از نقطه نظر بارش سالانه، به‌منظور مدیریت خشکسالی در استان یزد معرفی می‌شوند.

مواد و روشها

به منظور بررسی وضعیت خشکسالی در استان یزد با استفاده از شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه و ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری این استان در برابر خشکسالی، ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه ایستگاه‌های شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، ۱۳۸۹) با داده‌های بارندگی ماهانه ایستگاه‌های اداره کل هواشناسی یزد (اداره کل هواشناسی یزد، ۱۳۸۹) گردآوری شده و سپس ۲۸ ایستگاه باران‌سنجی در استان یزد انتخاب شده است. این ایستگاه‌ها به منظور پوشش مناسب اقلیمی، در مناطق مختلف استان قرار دارند و از نظر زمانی، شامل یک دوره‌ی آماری ۳۰ ساله هستند.

پس از تعیین ایستگاه‌های منتخب از لحاظ طول بازه‌ی آماری و توزیع مکانی، داده‌های ثبت نشده[1] هر ایستگاه باید تکمیل شوند. روشهای مختلفی برای تکمیل متغیرهای مختلف هواشناسی ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به روشهای درون‌یابی و برون‌یابی، روش تفاضلها و نسبتها، روش میانگین‌گیری و روشهای نموداری اشاره نمود (علیزاده، ۱۳۸۱). در این میان، روشهای دیگری نیز وجود دارد که با استفاده از معادلات ریاضی و دقت بالا در تخمین داده‌های مفقود شده، عمل می‌نمایند. یکی از این روشها، روش EM الگوریتم[2] با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه مبنا به‌وسیله‌ی نرم‌افزار SPSS است.

روش EM الگوریتم از روشهای جدیدی است که در بازسازی داده‌های مفقود شده با به‌کارگیری معادلات مختلف و تکرارهای متعدد، از دقت بسیار بالایی برخوردار است (فیگیوردو، ۲۰۰۴). اصول این روش، سالها قبل تدوین و تنظیم شده است (ارچارد و وودبوری، ۱۹۷۲). با این وجود، سالهای زیادی قبل از آن که اصول انگاره‌ای آن تدوین و تنظیم شود، نیز مورد استفاده قرار می‌گرفت. ولی مفهوم EM، پس از تحلیل و مشاهده‌ی رفتار الگوریتم در مواجهه با تعداد زیادی داده‌های کاربردی به وجود آمد (دمپستر و همکاران، ۱۹۷۷). با توجه به دقت بسیار بالای این روش که در نرم افزار SPSS قابل انجام است، اقدام به بازسازی داده‌های حذف شده و ثبت نشده با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه‌های مبنا شد. داده‌های حذف شده و ثبت نشده ناشی از نقایص احتمالی دستگاه‌ها، برداشت آمار غلط که به‌وسیله‌ی کارشناسان ارشد کنترل و از مجموعه آمار حذف شده‌اند و از بین رفتن ایستگاه‌ها در اثر سوانح طبیعی است.

شاخص بارش معیار، اولین بار در منطقه‌ی کلرادو برای ارزیابی شدت خشکسالی معرفی شده است (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳). این شاخص از سال ۱۹۹۴ به عنوان

[1]- Missing data
[2]- Expectation maximization algorithm

یک ابزار کاربردی در ارزیابی شدت خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص بارش معیار، یک ابزار قوی در تحلیل داده‌های بارندگی با هدف اختصاص ارزش عددی به بارندگی است که به‌وسیله‌ی آن می‌توان نواحی با آب و هوای کاملا متفاوت را با هم مقایسه کرد (نگارش و همکاران، ۱۳۸۹). این شاخص به دو صورت کوتاه مدت (۳، ۶ و ۹ ماهه) و بلند مدت (۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) محاسبه می‌شود. برای محاسبه‌ی این شاخص، ابتدا سری زمانی بارندگیهای تجمعی برای هر مقیاس مشخص می‌شود (به طور مثال بارش تجمعی برای هر ماه در مقیاس ۶ ماهه، مجموع بارندگی هر ماه و ۵ ماه قبل از آن است). سپس مقادیر بارندگیهای تجمعی در هر ماه به یک توزیع احتمال گاما برازش داده می‌شود. بعد از محاسبه‌ی احتمال تجمعی توزیع گاما در هر مقیاس زمانی و برای هر ماه از سال، تغییر شکل هم احتمال توزیع تجمعی گاما به نرمال انجام می‌شود. سپس متغییر تصادفی Z یا SPI مربوط به هر مقدار بارندگی استخراج می‌شود (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۹). میانگین شاخص بارش معیار در هر مقیاس زمانی در یک موقعیت صفر خواهد بود و انحراف معیار آن برابر یک است (بوردی و همکاران، ۲۰۰۱). طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص بارش معیار برای منطقه‌ی کلرادو به صورت جدول ۱ ارائه شده است (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳).

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص بارش معیار (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳).

شدت خشکسالی	مقدار شاخص بارش معیار
خشکسالی ملایم	۰ تا ۰/۹۹-
خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۵- تا ۱/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	۲-≤

شاخص بارش معیار مثبت، نمایانگر بارش بیشتر از مقدار متوسط، و مقدار منفی آن بیانگر بارش کمتر از مقدار متوسط است. زمانی که شاخص بارش معیار محاسبه شده منفی شود، نشانه‌ی شروع خشکسالی است و هنگامی که این شاخص مثبت شود، پایان خشکسالی را نوید می‌دهد (علیزاده و آشگر طوسی، ۱۳۸۷). همچنین شاخص بارش معیار از توزیع بهنجار تبعیت می‌کند که به این شاخص، قابلیت طبقه‌بندی شدت خشکسالی را برای هر محل و در هر مقیاس زمانی می‌دهد (لشنی‌زند، ۱۳۸۳).

مقادیر SPI 12 محاسبه شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک استان به صورت داده‌های نقطه‌ای می‌باشند، برای تعمیم داده‌های نقطه‌ای به سطح، از روشهای درون‌یابی استفاده می‌شود. هر روش درون‌یابی فراسنجهایی دارد که انتخاب این فراسنجها روی مقادیر براورد شده تأثیر زیادی دارد. لذا، لازم است که ابتدا فراسنجهای هر روش بهینه شود. بنابراین می‌توان در قالب روش صحت‌سنجی متقاطع[1]، هر یک از فراسنجها را تغییر داده و مناسب‌ترین آن (دارای کمترین خطای براورد) را شناسایی نمود. در روش صحت‌سنجی متقاطع، با استفاده از یک معیار مناسب براورد خطا می‌توان روشهای مختلف را مقایسه نمود و کم‌خطاترین روش را انتخاب کرد. روش صحت‌سنجی متقاطع نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های حاصل از شبیه چقدر مناسب می‌باشند. در این روش، مقادیر مشاهده شده به صورت موقت ازمجموعه داده‌های نمونه حذف شده و با استفاده از سایر نقاط نمونه برای آن مقادیر جدیدی براورد می‌شود. در این روش، مجموعه‌ای از مقادیر مشاهده شده و براورد شده در اختیار است که برای ارزیابی میزان اعتبار روشهای درون‌یابی استفاده خواهند شد. در این تحقیق، مقایسه‌ها بر اساس ریشه‌ی متوسط مجذور خطای[2] مقدار براورد شده نسبت به مقدار مشاهده شده می‌باشد. معادله‌ی این معیار به صورت زیر است (ثقفیان و همکاران، ۱۳۸۹):

[1]- Cross validation
[2]- Root mean square error or rMSE

$$RMSE = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(z^*(x_i) - z(x_i)\right)^2} \quad (۱)$$

که در آن، $z^*(x_i)$ مقدار براورد شده‌ی متغیر در x_i، $z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر در x_i و n تعداد نقاط با متغیر مشاهده‌ای است. این معیار نشان می‌دهد که، بین مقدار براورد شده و مشاهده شده چه میزان اختلاف وجود دارد. اگر این اختلاف برابر صفر باشد نشان می‌دهد که، مقادیر به صورت کاملاً دقیق براورد شده‌اند. اما در واقعیت، همیشه بین مقدار براورد شده و مقدار مشاهده شده اختلاف‌هایی وجود دارد (حسینی شفیع و علیمحمدی سراب، ۱۳۸۷).

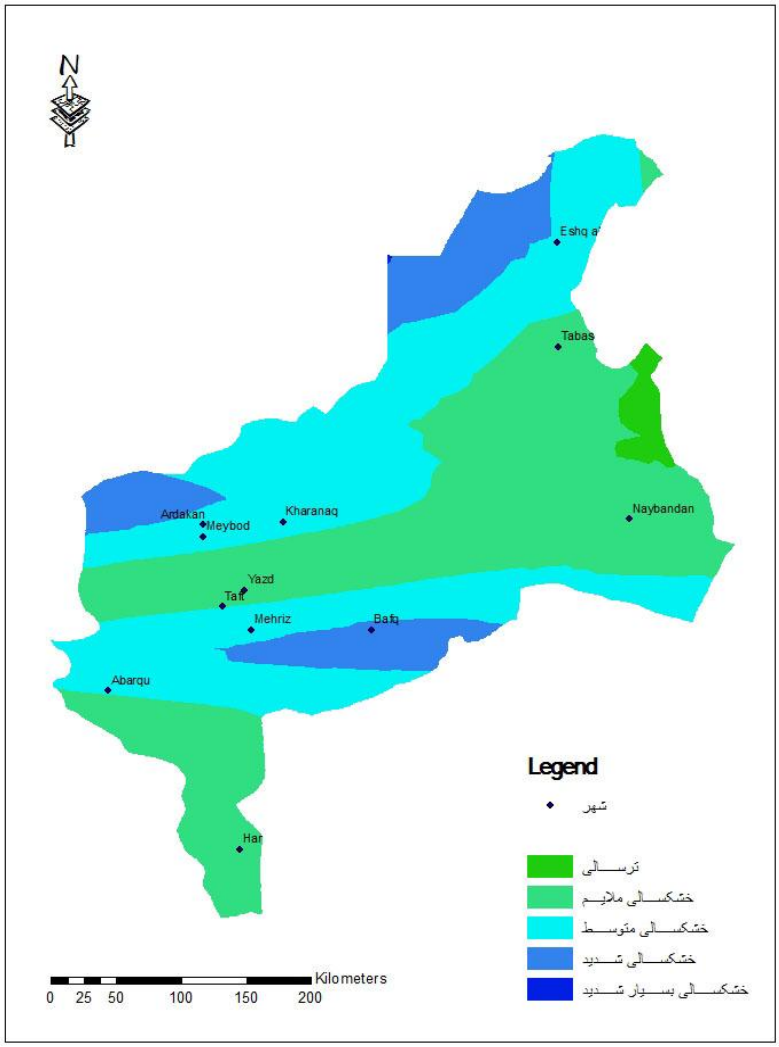
در این تحقیق، شاخص بارش معیار با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای طول بازه‌ی آماری ۲۸ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک در سطح استان یزد محاسبه شده و با استفاده از آن، به بررسی وضعیت خشکسالی در استان یزد پرداخته شده است. در ادامه با توجه به تأکید تحقیقات مختلف بر تطابق مقدار شاخص بارش معیار با شدت آثار خشکسالی (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳، سرانو و مورنو، ۲۰۰۵، دو، ۲۰۰۵، پالتیننو و همکاران، ۲۰۰۹، نلبنتیس و زاکیریس، ۲۰۰۹، فیوریلو و گوداگنو، ۲۰۱۰، لیو و همکاران، ۲۰۱۲، نسیمی، ۱۳۹۰، و جایانتی و همکاران، ۲۰۱۳)، به ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری استان یزد در برابر خشکسالی، با استفاده از شاخص بارش معیار و روشهای زمین‌آماری پرداخته شده است.

نتایج و بحث

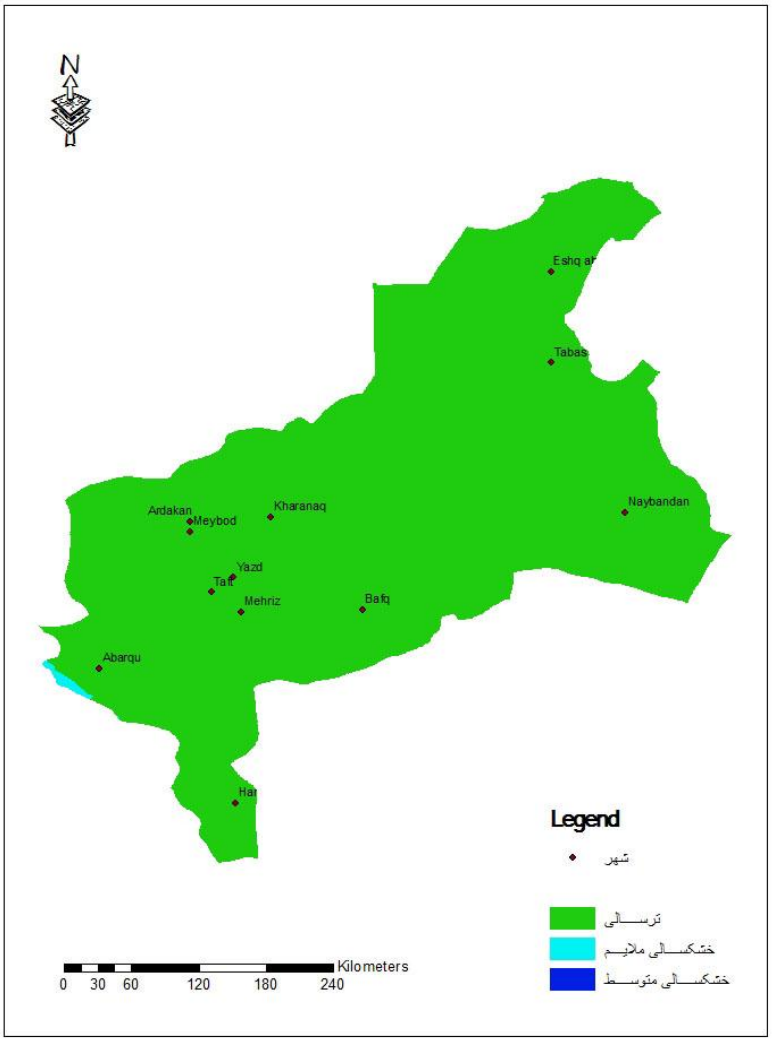
شاخص بارش معیار با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ۲۸ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک استان یزد در طول بازه‌ی زمانی ۳۰ ساله محاسبه شده است. بررسی مقادیر شاخص بارش معیار و بارش سالانه، بیانگر شاخص بارش معیار با مقادیر منفی (خشکسالی) در سال با کمترین بارش در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ و شاخص بارش معیار با مقادیر مثبت (ترسالی) در سال با بیشترین بارش در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ در تمام ایستگاه‌ها است. همچنین، شاخص بارش معیار در سالهایی که بارش متوسطی داشتند، بیانگر خشکسالی در برخی ایستگاه‌ها و ترسالی در برخی دیگر از ایستگاه‌ها است.

بارش سالانه برای طول بازه‌ی آماری تمام ایستگاه بررسی شده، و سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ به عنوان یک سال خشک (کمترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰)، سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ به عنوان یک سال تر (بیشترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰) و سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ به عنوان یک سال حدواسط (بارش سالانه متوسط) برای ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری استان یزد در برابر خشکسالی انتخاب شده است. در ادامه، با استفاده از شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه که به صورت داده‌های نقطه‌ای محاسبه شده است، به بررسی توزیع مکانی خشکسالی در سالهای مذکور پرداخته شده است.

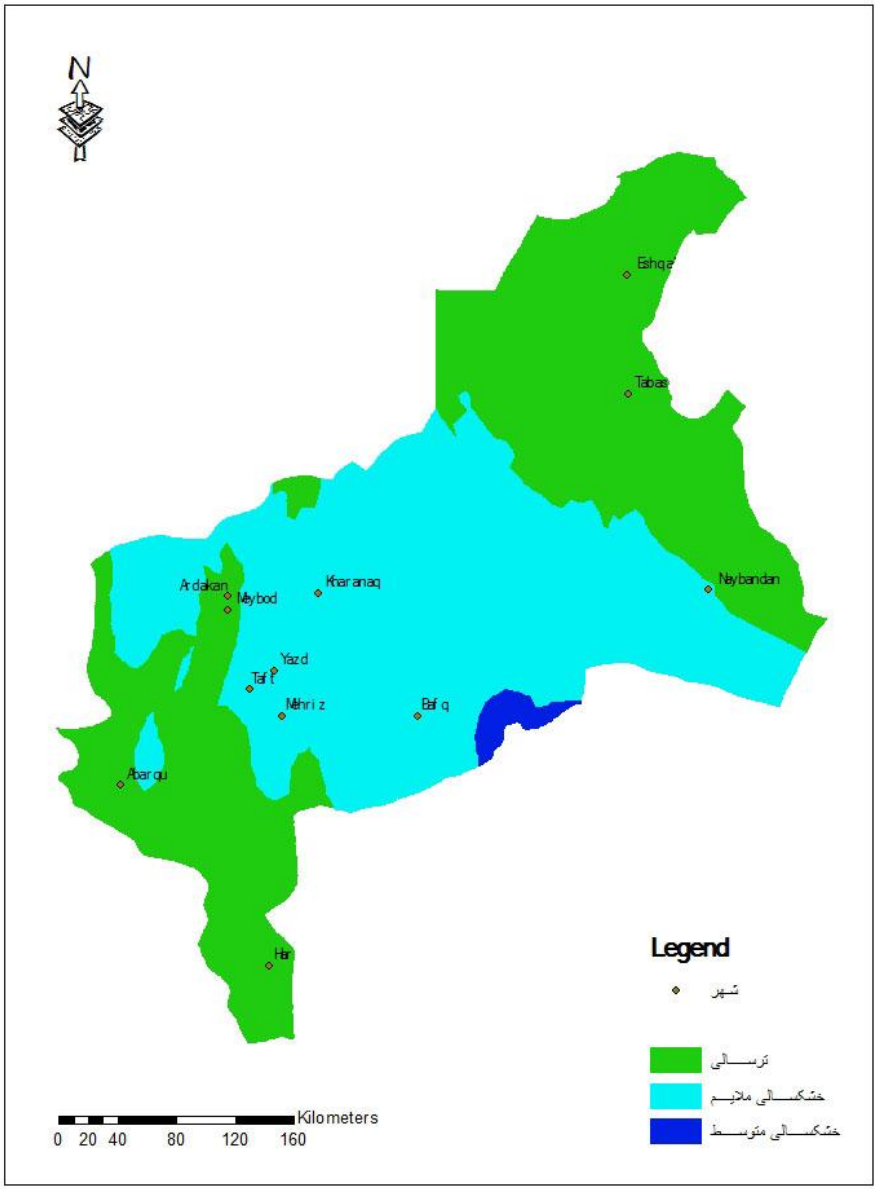
در این تحقیق، روشهای مختلف درون‌یابی از جمله روشهای درون‌یابی کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و معکوس فاصله، برای رسم نقشه‌های توزیع مکانی شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه در سالهای مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است و با استفاده از روش صحت‌سنجی متقاطع و در نظر گرفتن براورد ریشه‌ی متوسط مجذور خطا بین داده‌های واقعی و تخمین زده شده و نمودار مقادیر مشاهده‌ای در مقابل مقادیر براورد شده، می‌توان دریافت که شبیه واریوگرام گوسی، روش درون‌یابی کریجینگ معمولی برای رسم نقشه پهنه‌بندی شدت خشکسالی استان یزد در سالهای آبی ۷۹-۱۳۷۸ و ۷۸-۱۳۷۷ و شبیه واریوگرام کروی روش درون‌یابی کریجینگ معمولی برای رسم نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت خشکسالی استان یزد در سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ در مقایسه با سایر شبیه‌های روشهای کریجینگ معمولی و ساده و روش معکوس فاصله، تخمین‌گر دقیق‌تری هستند. بدین ترتیب، نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی استان یزد با استفاده از روشهای مذکور رسم شده‌اند (شکل‌های ۱ تا ۳). بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی استان یزد با استفاده از تمام شبیه‌ها و روشها نشان داد که، برای سالهای آبی ۷۹-۱۳۷۸ و ۷۸-۱۳۷۷ با افزایش دقت درون‌یابی (کاهش RMSE) محدوده‌ی خشکسالی کاهش، و برای سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ با افزایش دقت درون‌یابی (کاهش RMSE)، محدوده‌ی خشکسالی افزایش می‌یابد.



شکل ۱- نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت خشکسالی در استان یزد بر اساس SPI 12 در سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ (سال خشک).



شکل ۲- نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت خشکسالی در استان یزد بر اساس SPI 12 در سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ (سال تر).



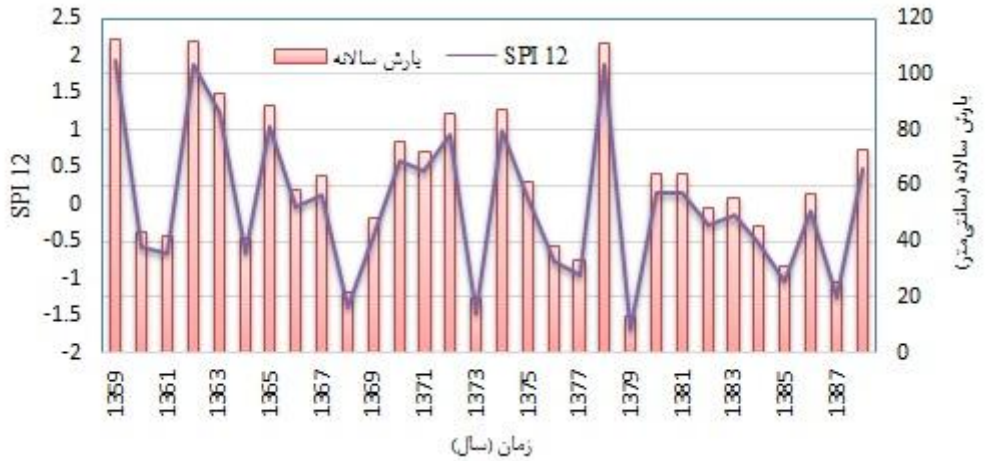
شکل ۳- نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت خشکسالی در استان یزد بر اساس SPI 12 در سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ (سال حدواسط).

شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه در سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ که کمترین بارش نیم قرن حاضر در استان یزد بوده است، در بیش از ۹۸ درصد استان منفی شده و خشکسالی را نشان می‌دهد (شکل ۱). این سال، در تحقیقات مختلف دیگری نیز با استفاده از شاخص SPI 12 مورد بررسی قرار گرفته و خشکسالی کل استان یزد را نشان داده است (فلاح‌پور و همکاران، ۱۳۸۸، شایق و سلطانی، ۱۳۹۰، و اسدی زارچ و همکاران، ۲۰۱۱). شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه در سال آبی ۷۸-۱۳۷۷، به عنوان بیشترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰، در بیش از ۹۹ درصد استان مثبت شده و ترسالی را نشان می‌دهد (شکل ۲). سال آبی ۶۵-۱۳۶۴ نیز در تحقیقی دیگر به عنوان مرطوب‌ترین سال در طول دوره‌ی آماری، با استفاده از شاخص SPI 12 بررسی شده و مشابه شکل ۲، به غیر از بخش کوچکی از غرب استان، بقیه مناطق بیانگر ترسالی بوده است (فلاح‌پور و همکاران، ۱۳۸۸). شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه در سال آبی ۷۷-۱۳۷۶، به عنوان یک سال با بارش متوسط، بیانگر خشکسالی در برخی مناطق و ترسالی در برخی مناطق دیگر استان یزد است (شکل ۳)؛ لذا، با توجه به خشکسالی ملایم شهرهای یزد، تفت، مهریز، بافق، نایبندان و خرانق

در یک سال با بارش متوسط، این شهرها به عنوان مناطق آسیب‌پذیر استان یزد در برابر خشکسالی تشخیص داده شدند. شهرستان بافق و مناطق اطراف آن در تحقیقات مختلف دیگری نیز به عنوان مناطق در معرض خطر خشکسالی معرفی شده است (بری ابرقویی و همکاران، ۱۳۷۹، و فلاح‌پور و همکاران، ۱۳۸۸). علاوه بر این، با توجه به تحقیق دیگری، نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت خشکسالی استان یزد با استفاده از شاخص درصد از نرمال برای سال ۲۰۰۰ (کمترین بارش نیم قرن حاضر)، بیانگر رخداد خشکسالی در کل استان و برای سال ۲۰۰۳ (بارش سالانه متوسط) بیانگر رخداد خشکسالی در مناطقی مشابه شکل ۳، اما با گسترش محدودتر است (کریمی احمدآباد و قره چلو، ۱۳۸۸).

مناطق آسیب‌پذیر استان به‌طور کلی دارای میانگین بلند مدت بارش سالانه کمتر نسبت به سایر مناطق استان است (نسیمی، ۱۳۹۰) و نیاز به مدیریت جامع با نگاه به تغییر الگوی کشت به سمت گیاهان با نیاز آبی کمتر در این مناطق احساس می‌شود (سلطانی و سعادتی، ۱۳۸۶). قابل تأمل این که، در اطراف شهرستان یزد که به عنوان منطقه‌ی آسیب‌پذیر در برابر خشکسالی شناخته شد و آبخوان آن در طول سالهای ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۸ شش متر افت داشته است (نسیمی، ۱۳۹۰، و نسیمی و محمدی، ۱۳۹۲)، بیشتر زمینهای شرکت میلشبار زیر کشت یونجه است که نیاز آبی آن نسبت به سایر محصولات زراعی کشت شده در منطقه بیشتر است (حوضی و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین، منطقه‌ی هرات و مروست قطب کشاورزی استان یزد است (حوضی و همکاران، ۱۳۸۸)، و در مناطق آسیب‌پذیر در برابر خشکسالی قرار ندارد. شهرهای هرات، ابرکوه، طبس و عشق‌آباد، به عنوان مناطق آسیب‌پذیر استان یزد در برابر خشکسالی شناخته نشدند.

در شکل ۴ بارش سالانه از سال آبی ۵۹-۱۳۵۸ تا سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ و مقادیر SPI 12 در پایان هر سال آبی در طول دوره‌ی آماری برای ایستگاه محمد آباد رسم شده است، که بیانگر تطابق خوب شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه با بارش سالانه است. همان‌طور که از این شکل بر می‌آید، با بیشتر شدن بارش سالانه از میانگین بارشهای تجمعی ۱۲ ماهه در طول دوره‌ی آماری، این ایستگاه از خشکسالی خارج، و با کمتر شدن بارش سالانه، از میانگین بارشهای تجمعی ۱۲ ماهه در طول دوره‌ی آماری، این ایستگاه وارد خشکسالی می‌شود. با توجه به این که برای مقادیر بارشهای تجمعی ۱۲ ماهه در این ایستگاه، آزمون اندرسون دارلینگ نسبت به توزیع احتمال گاما در نرم‌افزار مینی‌تب بیانگر بیشتر بودن مقدار P-Valu از خطای نوع اول آزمون است که نشان دهنده‌ی برازش این داده‌ها با توزیع احتمال گاما است، میانگین بارشهای تجمعی ۱۲ ماهه در طول دوره‌ی آماری (۵۹.۶۸ سانتی‌متر)، مرز ورود شاخص از ترسالی به خشکسالی و بالعکس در ایستگاه محمد آباد است. به عبارت دیگر، در ایستگاه محمد آباد در بارش تجمعی ۱۲ ماهه ۵۹.۶۸ سانتی‌متر شاخص برابر صفر، در مقادیر بارش تجمعی ۱۲ ماهه بیشتر از این مقدار ترسالی و در مقادیر بارش تجمعی ۱۲ ماهه کمتر از این مقدار خشکسالی است. در این ایستگاه، با کاهش بارش تجمعی ۱۲ ماهه تا ۳۲.۱۳ سانتی‌متر خشکسالی ملایم و از بارش تجمعی ۱۲ ماهه ۳۲.۱۳ سانتی‌متر تا ۱۸.۳۵ سانتی‌متر با خشکسالی متوسط مواجه هستیم. خشکسالیهای شدید و بسیار شدید نیز به ترتیب در بارشهای تجمعی ۱۲ ماهه ۱۸.۳۵ سانتی‌متر تا ۴.۵۸ سانتی‌متر و ۴.۵۸ سانتی‌متر تا صفر رخ می‌دهند. همچنین، دقت در نحوه‌ی محاسبه و نتایج حاصل از آن، بیانگر ارتباط شدت خشکسالی بیان شده با بارش تجمعی ۱۲ ماهه و میانگین و انحراف معیار آن برای طول دوره‌ی آماری مورد مطالعه است.



شکل ۴- تغییرات بارش سالانه و SPI 12 برای طول دوره‌ی آماری در ایستگاه معرف محمد آباد

نتیجه‌گیری

با توجه به وضعیت بارش استان یزد که در بیش از نیمی از ماهها مقدار بارش ماهانه صفر ثبت شده است، نیاز به بررسی خشکسالی به صورت سالانه است و از شاخص بارش معیار با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای بررسی خشکسالی در این استان استفاده شده است .

برای بررسی و بیان خشکسالی بر اساس شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه، سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ به عنوان کمترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰، سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ به عنوان بیشترین بارش سالانه دهه‌ی ۷۰ و سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ به عنوان یک سال با بارش متوسط در نظر گرفته شده است. بررسی نقشه‌ی پهنه‌بندی خشکسالی در این سالها، گسترش خشکسالی در بیش از ۹۸ درصد استان در سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ و گسترش ترسالی در بیش از ۹۹ درصد استان در سال آبی ۷۸-۱۳۷۷ را نشان داد. همچنین، بررسی حالت حدواسط، آسیب‌پذیری شهرهای یزد، تفت، مهریز، بافق، نایبندان و خرانق را در قسمتهای مرکزی استان نشان می‌دهد و در نتیجه، امکان اعمال مدیریت خطرپذیری را قبل از وقوع خشکسالی و مدیریت بحران فراهم می‌نماید. مناطق آسیب‌پذیر استان یزد در برابر خشکسالی که بر اساس شاخص بارش معیار تعیین شدند، با متوسط بارش سالانه و شاخص درصد از نرمال نیز سازگار هستند. همچنین، بررسیهای انجام شده در ایستگاه محمد آباد، بیانگر تطابق خوب بارش سالانه با شاخص بارش معیار ۱۲ ماهه است و با افزایش بارش سالانه، به بیشتر از میانگین بارش تجمعی ۱۲ ماهه در طول دوره‌ی آماری مورد بررسی، شاخص نشان دهنده‌ی ترسالی در منطقه و بالعکس است.

قابلیت وقوع خشکسالی در مناطق آسیب‌پذیر بیشتر است. بنابراین، با توجه به افزایش جمعیت شهری و مصرف آب در این بخش و بازده پایین بخش کشاورزی، هر گونه توسعه در منابع مصرف کننده‌ی آب مانند صنایع و طرحهای کشاورزی، می‌بایست با دقت فراوان صورت گرفته و مدیریت این مناطق به سمت کاهش مصرف آب حرکت کند. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مناطق آسیب‌پذیر، به‌جای پرداخت خسارت به آسیب‌دیده‌ها، سرمایه‌گذاری برای مقابله با خشکسالی انجام شود.

منابع

۱. اداره کل هواشناسی یزد. ۱۳۸۹. آمار و اطلاعات بلند مدت بارش ماهانه ایستگاه‌های استان یزد.

۲. بری ابرقویی، ح.، م. توکلی، و م.ص. طالبی. ۱۳۷۹. بررسی تغییرات اقلیمی و درصد فراوانی خشکسالی‌های استان یزد. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم آبی و خشکسالی، جهاد دانشگاهی استان کرمان، کرمان.

۳. ثقفیان، ب.، پ. دانش کار آراسته، س. رحیمی بندرآبادی، ا. فتاحی، و م. محمدزاده. ۱۳۸۹. راهنمای روشهای توزیع مکانی عوامل اقلیمی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای. وزارت نیرو، معاونت امور آب و آبفا، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه شماره ۳۶۸ الف.

۴. حسینی شفیع، ر.، و ع. علیمحمدی سراب. ۱۳۸۷. تحلیل روشهای مختلف درون‌یابی در مطالعات منابع آبهای زیرزمینی (مطالعه‌ی موردی: دشت رزن- قهاوند). دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز.

۵. حوضی، س. ح.، ر. خاتون آبادی، ا. دودانگه، و س. س. اسلامیان. ۱۳۸۸. بررسی مهمترین علل بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبهای زیرزمینی، مطالعه‌ی موردی دشت یزد اردکان. دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و ستاد حوادث غیرمترقبه استانداری اصفهان، اصفهان.

۶. زارع ابیانه، ح.، و ع. ا. محبوبی. ۱۳۸۳. بررسی وضعیت خشکسالی و روند آن در منطقه‌ی همدان بر اساس شاخصهای آماری خشکسالی. مجله‌ی پژوهش و سازندگی. ۱۷(۲): ۲-۷.

۷. سبزی‌پرور، ع. ا.، آ. کاظمی، ص. معروفی، م. غفوری، و ج. بذرافشان. ۱۳۸۹. ارزیابی تطبیقی هفت نمایه خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای. مجله‌ی علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۲(۱): ۹۷-۱۱۱.

۸. سلطانی، س.، و س.س. سعادتی. ۱۳۸۶. پهنه‌بندی خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از نمایه بارش معیار (SPI). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱(۲): ۶۴-۶۷.

۹. شایق، ا.، و س. سلطانی. ۱۳۹۰. مقایسه شاخصهای خشکسالی هواشناسی در استان یزد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۵(۳): ۲۳۱-۲۴۹.

۱۰. شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد. ۱۳۸۹. آمار و اطلاعات بلند مدت بارش روزانه ایستگاههای استان یزد.

۱۱. شمس‌نیا، س. ر.، ن. پیرمرادیان، و ف. بوستانی. ۱۳۸۸. مقایسه طبقه‌بندی‌های مختلف شاخص معیار شده بارش (SPI) و بومی‌سازی آن جهت ارزیابی خشکسالی در استان فارس. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

۱۲. علیزاده، ا. ۱۳۸۱. آیا می‌توان خشکسالی را پیش‌بینی و با آن مقابله کرد؟. مجله‌ی خشکی و خشکسالی کشاورزی. ۶: ۱-۱۲.

۱۳. علیزاده، ا.، و ش. آشگر طوسی. ۱۳۸۷. توسعه یک شبیه برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی (مطالعه‌ی موردی استان خراسان رضوی). مجله‌ی علوم و صنایع کشاورزی، ویژه آب و خاک. ۲۲(۱): ۲۲۳-۲۳۴.

۱۴. فلاح‌پور، م.، س. رضایی زارچی، م. ر. کوثری، و م. ا. اسدی. ۱۳۸۸. مدیریت و پهنه‌بندی خطر خشکسالی در استان یزد با استفاده از شاخص SPI. دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و ستاد حوادث غیرمترقبه استانداری اصفهان، اصفهان.

۱۵. کریمی احمدآباد، م.، و س. قره چلو. ۱۳۸۸. بررسی نتایج روشهای پهنه‌بندی خشکسالی با دو رویکرد مختلف در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی. همایش ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.

۱۶. لشنی‌زند، م. ۱۳۸۳. بررسی اقلیمی خشکسالیهای ایران. دانشگاه اصفهان. اصفهان. رساله دکتری.

۱۷. نسیمی، ع. ۱۳۹۰. ارزیابی شاخصهای خشکسالی و بررسی تطابق شدت خشکسالی با وضعیت منابع آب زیرزمینی در استان یزد. دانشگاه شیراز. شیراز. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد.

۱۸. نسیمی، ع.، و ض. محمدی. ۱۳۹۲. انتخاب شاخص خشکسالی SPI مناسب با تکیه بر وضعیت آبهای زیرزمینی در دشت یزد- اردکان. مجله‌ی پژوهش آب ایران. پذیرفته شده برای چاپ.

۱۹. نگارش، ح.، م. خسروی، م. شاه‌حسینی، و پ. محمودی. ۱۳۸۹. مطالعه‌ی خشکسالیهای کوتاه‌مدت شهرستان زاهدان. مجله‌ی جغرافیا و توسعه. ۸(۲): ۱۰۹-۱۳۴.

20. AsadiZarch, M.A., H. Malekinezhad, M.H. Mobin, M.T. Dastorani, and M.R. Kousari. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. Water Resour Manage. 25:3485–3504.

21. Bordi, I., S. Frigio, P. Parenti, A. Speranza, and A. Sutera. 2001. The analysis of standardizes precipitation index in the Mediterranean area: Large scale patterns. Annali di Geofisica. 44: 965–978.

22. Dempster, A.P., N.M. Laird, and D.B. Robin. 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM Algorithm. J. R. Stat. Soc. Ser. B Stat. Methodol. 39:1-38.

23. Do, A. 2005. Regional drought analysis and mitigation using the SPI. ICID 21st European Regional Conference. May. 15-

19. Frankfurt (Order) and Slubice. Germany and Poland.
24. Figueiredo, M.A.T. 2004. Lecture notes on the EM algorithm. Portugal. Instituto de Telecomunicacoes. Instituto Superior Tecnico. 1049-001 Lisboa.
25. Fiorillo, F., and F.M. Guadagno. 2010. Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. Water Resour. Manage. 24:1867–1884.
26. Jayanthi, H., G.J. Husak, C. Funk, T. Magadzire, A. Chavula, and J.P. Verdin. 2013. Modeling rain-fed maize vulnerability to droughts using the standardized precipitation index from satellite estimated rainfall – Southern Malawi case study. Int. J. Disaster Risk Reduct. 4: 71-81.
27. Guttman, N.B. 1999. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. J. Am. Water Resour. As. 35: 311-322.
28. Liu, L., Y. Hong, C.N. Bednarczyk, B. Yong, M.A. Shafer, R. Riley, and J.E. Hocker. 2012. Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in blue river basin, Oklahoma. Water Resour. Manage. 26:2761–2779.
29. McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. The 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. January. 17-22. Anaheim, California. pp. 170-184.
30. Nalbantis, I., and G. Tsakiris. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. Water Resour. Manage. 23:881–897.
31. Nandintsetseg, B., and M. Shinoda. 2013. Assessment of drought frequency, duration, and severity and its impact on pasture production in Mongolia. Nat. Hazards. 66:995–1008.
32. Orchard, T., and M.A. Woodbury. 1972. A missing information principle: theory and applications. The 6th Symposium on Math Stat and Prob. Berkeley. pp. 697-715.
33. Paltineanu, C., I.F. Mihailescu, Z. Prefac, C. Dragota, F. Vasenciuc, and N. Claudia. 2009. Combining the standardized precipitation index and climatic water deficit in characterizing droughts: a case study in Romania. Theor. Appl. Climatol. 97:219–233.
34. Serrano, S.M., and J.I. Moreno. 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin. Hydrol. Earth Syst. Sc. 2:1221-1246.
35. Thornthwaite, C.W. 1947. Climate and moisture conservation. Annals of the Assn. Amer-Geogr. 37:87-100.
36. Wan Zin, W.Z., A.A. Jemain, and K. Ibrahim. 2013. Analysis of drought condition and risk in Peninsular Malaysia using standardised precipitation index. Theor. Appl. Climatol. 111:559–568.