



بررسی روند خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPEI اصلاح شده و MSPI در مقیاس‌های زمانی مختلف (مطالعه موردی: استان فارس)

سمیرا رهنما^۱، علی شهیدی^{۲*}، مصطفی یعقوب‌زاده^۳، علی‌اکبر مهران^۴

^۱دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۳گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۴دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۵استادیار، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه ایالتی سن خوزه، سن خوزه، کالیفرنیا، آمریکا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۵

چکیده

پایش مؤثر و به‌موقع خشکسالی می‌تواند به توسعه سامانه‌های خشکسالی و مدیریت بهینه منابع آبی کمک کند. بنابراین، در این پژوهش وضعیت خشکسالی ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس (آباده، شیراز، فسا و لار) در مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) با استفاده از شاخص‌های بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) و بارش استاندارد چند متغیره (MSPI) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، به منظور بررسی روند شاخص‌های مورد بررسی از آزمون من-کندال استفاده شده است. بر اساس نتایج، در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد است. اما با افزایش مقیاس‌های زمانی، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد و تداوم آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. از لحاظ شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۳ ماهه شدیدترین خشکسالی در ایستگاه آباده (۵/۲۰-) و شدیدترین ترسالی در ایستگاه شیراز (۵/۲۱) می‌باشد. در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی و ترسالی به ترتیب در ایستگاه‌های آباده (۳/۴۵-) و شیراز (۳/۱۰) مشاهده شد. در مقیاس زمانی ۹ ماهه شدیدترین خشکسالی و ترسالی در ایستگاه لار به ترتیب با مقادیر ۳/۶۳- و ۲/۴۸ می‌باشد. همچنین در مقیاس ۱۲ ماهه شدیدترین خشکسالی در ایستگاه شیراز (۳/۳۷-) و شدیدترین ترسالی در ایستگاه آباده (۲/۳۷) می‌باشد. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی سری زمانی SPI نشان داد که اولین مؤلفه اصلی (PC1) می‌تواند درصد زیادی از تغییرات را در سری‌های زمانی SPI اصلی در تمام مناطق مورد مطالعه در این پژوهش، به خود اختصاص دهد. همچنین نتایج نشان داد که MSPI ها از نوسانات سری زمانی SPI به‌ویژه در دوره‌های خشک و مرطوب طولانی مدت پیروی می‌کنند. به طوری که، دوره‌های خشک و مرطوب جزئی در دوره‌های خشک یا مرطوب شدید و طولانی، ممکن است توسط MSPI حذف شوند.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، پایش، پنجره زمانی، شاخص بارش-تبخیر و تعرق، MSPI

مقدمه

این حال، احتمال وقوع آن در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه خشک و اثرات پیش‌بینی شده آن عمیق‌تر بوده و پیامدهای نامطلوبی دارد. کمبود بارش و نوسان‌های شدید آن، سبب عدم اطمینان کافی برای دریافت حداقل بارش مورد نیاز جهت مصارف کشاورزی، تغذیه آب‌های سطحی و مصارف انسانی می‌شود. از طرفی افزایش تقاضا برای آب به سبب فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شرب، تغییرات اقلیمی (افزایش دما و کاهش بارندگی) به مرور زمان بر منابع آبی تأثیر منفی گذاشته و کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (رهنما

خشکسالی، کاهش در مقدار بارش دریافتی در دوره زمانی معین اطلاق می‌شود. در بروز و تشدید خشکسالی‌ها عوامل مختلفی از جمله دماهای بالا، رطوبت نسبی پایین، بادهای شدید، کمبود بارش و توزیع نامناسب آن در طول سال، دخیل می‌باشند (بذرافشان و حجابی، ۱۳۹۶: ۱). خشکسالی بر مناطق مختلف جغرافیایی در سراسر جهان تأثیرگذار است. با

خشکسالی می‌باشد (مسود^۸ و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۵۲). رابطه بین شاخص SPEI در مقیاس‌های مختلف زمانی و NDVI در فلات لس در چین توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که اگر چه اختلافات مکانی و فصلی در زمان‌های مختلف رخ داده است، بیشترین همبستگی بین SPEI سه ماهه و فصل تابستان است (ژائو^۹ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۶۵). خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران را با استفاده از شاخص‌های خشکسالی بارش استاندارد (SPI) و SPEI در پژوهشی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش جهت بررسی افزایش تبخیر و تعرق واقعی در مناطق مرتفع، با نظارت مکانی و زمانی بر سطح پوشیده از برف با استفاده از تصاویر MODIS و مجموعه داده ERA5 به این نتیجه رسیدند که افزایش دما در دهه‌های اخیر منجر به تبخیر زیاد و در نتیجه کاهش سطح برف در این مناطق شده است. در نتیجه، بر اساس شاخص SPEI، بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در نزدیکی دریاچه و در کوه‌های مرتفع اتفاق می‌افتد (حبیبی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰: ۱). پژوهشی به منظور بررسی خشکسالی با استفاده از دو شاخص خودتنظیم پالم^{۱۱} (sc-PDSI) و SPEI در چهار دوره زمانی (۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) و در ۱۰۱ ایستگاه کشور ایران و در یک دوره زمانی ۲۴ ساله (۱۹۹۲-۲۰۱۵) انجام شد. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید در بخش‌هایی از کشور که از وضعیت بارشی نسبتاً مناسب‌تری برخوردار هستند، اتفاق افتاده است و آغاز دوره خشکسالی بر اساس شاخص SPEI سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ بوده است (خیری و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۷۱). نیک‌بخت و هادلی (۲۰۲۴: ۱۴۰۰) پژوهشی به منظور پایش خشکسالی ایستگاه کرمانشاه با استفاده از شاخص‌های SPEI، شاخص شناسایی خشکسالی^{۱۲} (RDI) و SPEI طی دوره آماری ۱۹۶۳-۲۰۱۹ انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در هر سه شاخص و در پنجره‌های زمانی ۱۲ و ۲۴

و همکاران، ۱۴۰۰: ۲). از این رو، خشکسالی به عنوان یکی از موضوعات مهم در مطالعه بلایای طبیعی و تأثیرگذار در کشاورزی مطرح می‌شود که در چند دهه اخیر از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در سال‌های اخیر، به دلیل وقوع متعدد خشکسالی، مطالعات در این زمینه افزایش یافته و محققان برای پایش خشکسالی از روش‌ها و شاخص‌های متفاوتی استفاده کرده‌اند.

بذرافشان^۱ و همکاران (۲۰۱۴: ۱۰۵۸) برای به تصویر کشیدن تغییرپذیری سری‌های زمانی شاخص بارش استاندارد^۲ (SPI) در چهار ایستگاه مختلف هواشناسی ایران، از شاخص بارش استاندارد چند متغیره^۳ (MSPI)، استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نخستین مؤلفه اصلی قادر است بیش از ۷۴ درصد از تنوع را برای مجموعه‌های انتخابی مقیاس‌های زمانی SPI در اقلیم‌های مورد مطالعه توجیه کند. پژوهشی به منظور تحلیل و بررسی شرایط خشکسالی حال حاضر و آینده با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد^۴ (SPEI) در اردن پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص SPEI ۶ ماهه بالاترین ارتباط را با رطوبت خاک برآوردی دارد (تورنروس و منزل^۵، ۲۰۱۴: ۳۰۸). استیگ^۶ و همکاران (۲۰۱۵: ۴۰۳۸) نیز به مقایسه توزیع‌های فراوانی شاخص‌های SPI و SPEI در اروپا پرداختند. ایشان توزیع‌های دو پارامتری گاما و مقادیر حدی عمومی را به ترتیب برای شاخص SPI و SPEI مناسب تشخیص دادند. در پژوهشی بر روی حوضه رودخانه ساسکاتچوان^۷ کانادا، به تجزیه و تحلیل خشکسالی هواشناسی با استفاده از روابط تک‌متغیره و چندمتغیره (براساس دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI) پرداخته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مقایسه تحلیل‌های SPI و SPEI تنها تأثیر کمی از توجه به دما، به شکل تبخیر و تعرق، در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر

¹ Bazrafshan

² Standardized Precipitation Index (SPI)

³ Multivariate Standardized Precipitation Index

⁴ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

⁵ Törnros and Menzel

⁶ Stagge

⁷ Saskatchewan

⁸ Masud

⁹ Zhao

¹⁰ Habibi

¹¹ Celf- Calibrating Palmer Drought Severity Index

¹² Reconnaissance Drought Index

می‌شود. در این پژوهش از داده‌های ۴ ایستگاه سینوپتیک (آباد، شیراز، فسا و لار) واقع شده در استان فارس در یک دوره آماری ۳۰ ساله مربوط به سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰ به علت کفایت و کامل بودن داده‌ها استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات جغرافیایی و در شکل ۱ محدوده مناطق مطالعاتی ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، ایستگاه‌های منتخب محدوده ارتفاعی ۷۹۲ متر از سطح دریا (لار) تا ۲۰۳۰ متر از سطح دریا (آباد) را شامل می‌شوند. شکل ۲ روندنمای روش این پژوهش را نشان می‌دهد.

شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI): شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) توسط ویسینته-سرانو^۳ و همکاران (۱۷۱۶:۲۰۱۰) به عنوان یک شاخص خشکسالی اقلیمی معرفی گردید. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی^۴ استوار می‌باشد. این رابطه به صورت رابطه (۱) تعریف شده است.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

که در آن P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع، D اختلاف آن‌ها و i شماره ماه مورد نظر می‌باشد. روش پنمن-مانتیت-فائو (آلن^۵ و همکاران، ۱۹۹۸) در صورت عدم محدودیت داده، برای محاسبه PET استفاده می‌گردد. همچنین می‌توان از روش ساده تورنت‌وایت^۶ (۱۹۴۸) استفاده نمود، که کاربرد هر یک از آن‌ها محدودیتی برای SPEI وجود ندارد. در این پژوهش با توجه به کامل و دسترس بودن داده‌ها، از روش پنمن-مانتیت-فائو جهت محاسبه شاخص SPEI مورد استفاده قرار گرفت.

ماهه، بزرگی خشکسالی در دوره بعد از سال ۱۹۹۴ نسبت به دوره قبل از آن، افزایش می‌یابد.

با توجه به اقلیم نیمه خشک استان فارس و افزایش خشکسالی‌های اخیر و زیان‌های وارده بر بخش کشاورزی و منابع آب، بررسی ویژگی‌های خشکسالی در این منطقه ضروری می‌باشد. بنابراین این پژوهش به بررسی خشکسالی استان فارس با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPEI و MSPI در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) می‌پردازد. در واقع، هدف از پژوهش حاضر توسعه یک شاخص خشکسالی جدید (MSPI) بر اساس تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA)، بر روی SPEI محاسبه شده برای مجموعه‌ای از مقیاس‌های زمانی می‌باشد. برای محاسبه شاخص SPEI به داده‌های بارندگی و دمای هوا نیاز است. همچنین معادلات مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل وجود دارد که در استفاده از هر یک از آن‌ها محدودیتی برای SPEI وجود ندارد. لذا در این پژوهش، به دلیل عدم محدودیت داده از روش پنمن-مانتیت-فائو جهت محاسبه شاخص SPEI مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین تعیین پنجره زمانی، بستگی به نوع خشکسالی مورد بررسی دارد، و طبق مراجع مختلف پنجره‌های کوچکتر برای بررسی خشکسالی کشاورزی و پنجره‌های بزرگتر برای بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژی و منابع آبی می‌باشد (لابدزکی^۲، ۲۰۰۷:۷۶ و بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۴:۱۰۴۷). بنابراین در این پژوهش به وضعیت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: استان فارس با مساحت ۱۲۲۶۰۸ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی ۳۶° ۵۰' تا ۳۵° ۵۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱° ۲۷' تا ۴۰° ۳۱' شمالی واقع شده است. آب و هوای این استان بر اساس سیستم طبقه‌بندی دوماترن به سه ناحیه اقلیمی کوهستانی، معتدل و گرم تقسیم

³ Vicente-Serrano

⁴ Climatic Water Balance

⁵ Allen

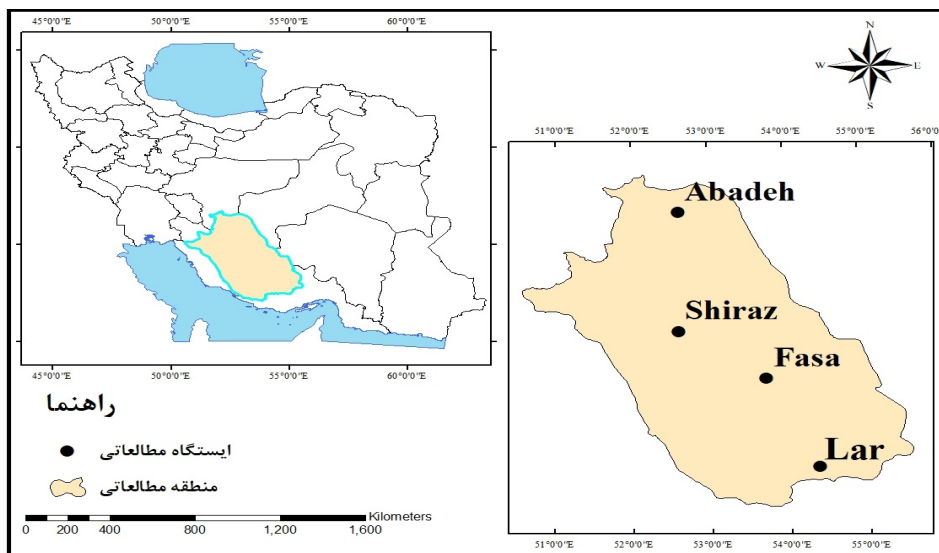
⁶ Thornthwaite

¹ Principle Components Analysis

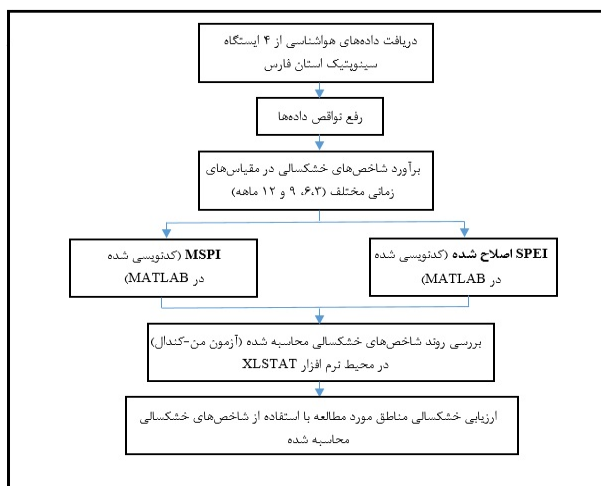
² Łabędzki

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه- دقیقه)	طول جغرافیایی (درجه- دقیقه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	متوسط بارش (میلی‌متر)	متوسط دما (سانتی‌گراد)
آباده	۳۱° ۱۱'	۵۲° ۴۰'	۲۰۳۰	۱۳۷/۵۰	۱۴/۴۵
شیراز	۲۹° ۳۲'	۵۲° ۳۶'	۱۴۸۴	۳۳۰/۲۰	۱۸/۵۸
فسا	۲۸° ۵۸'	۵۳° ۴۱'	۱۲۸۸	۲۸۵/۶۰	۱۹/۵۸
لار	۲۷° ۴۲'	۵۴° ۱۷'	۷۹۲	۲۲۵/۵۰	۲۳/۸۷



شکل ۱- پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در این پژوهش بر گستره استان فارس



شکل ۲- روندنمای روش پژوهش

سه پارامتری (رابطه ۲) به عنوان یک توزیع احتمال مناسب بر سری X برازش داده می‌شود.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-y}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-y}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (2)$$

سپس طبق بررسی‌های ویسینته-سرانو و همکاران (۲۰۱۰) برای محاسبه مجموع مقادیر متوالی سری D در پنجره‌های زمانی مختلف، توزیع لوگ-لجستیک^۱

¹ Log-Logistic

و $P=1-F(x)$ اگر $P>0.5$ باشد، $1-P$ جایگزین P در معادله (۱۰) می‌شود. ثابت‌های معادله SPEI عبارتند از:

$$\begin{aligned} C_0 &= 2.515517. & C_1 &= 0.802853. & C_2 &= 0.010328 \\ d_1 &= 1.432788. & d_2 &= 0.189269. & d_3 &= 0.001308 \end{aligned}$$

چنانچه شاخص SPEI در محدوده اعداد مثبت قرار گیرد، بیانگر بیلان زیاد (مثبت) و در صورت قرار گرفتن در محدوده اعداد منفی حاکی از بیلان کم (منفی) می‌باشد. با رسیدن مقادیر این شاخص به منفی یک، خشکسالی شروع و با مثبت شدن آن خشکسالی پایان می‌پذیرد. طبقه‌بندی این شاخص در جدول ۲ نشان داده شده است.

شاخص بارش استاندارد چندمتغیره (MSPI):

شاخص بارش استاندارد چندمتغیره (MSPI) که توسط بذرافشان و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شد، قادر است چندین سری زمانی SPI را در یک سری زمانی جدید تلفیق کند. نیاز اولیه این شاخص، وجود K سری زمانی شاخص بارش استاندارد (SPI)، هر یک معرف یک پنجره زمانی خاص، در یک ایستگاه معین است. آشکار است که بررسی همزمان K سری زمانی می‌تواند اطلاعات زیادی در مورد ویژگی‌های انواع خشکسالی ارائه دهد. در این شاخص از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، به عنوان روشی که به کمک آن بتوان بخش زیادی از تغییرپذیری شدت خشکسالی در پنجره‌های مختلف زمانی را در یک سری زمانی مشخص خلاصه کرد، استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در واقع ترکیب‌های خطی متغیرهای اصلی K را به صورت رابطه (۱۱) ارائه می‌دهند.

$$PC_i = E_i^T X = \sum_{k=1}^K e_{ki} X_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (11)$$

که در آن α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل، γ پارامتر مبدأ و X سری تجمعی مقادیر D در پنجره زمانی معین می‌باشد. این پارامترها با استفاده از روابط (۳)، (۴) و (۵) قابل محاسبه هستند (هاسکینگ^۱، ۱۹۹۰: ۱۰۷).

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})} \quad (4)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta}) \quad (5)$$

که در آن‌ها $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما و w_0, w_1, w_2 گشتاورهای وزنی احتمال^۲ نامیده می‌شوند، که با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه هستند.

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (6)$$

که در آن s مرتبه گشتاور (در اینجا برابر صفر، ۱ و ۲ در نظر گرفته می‌شود)، N تعداد کل داده‌ها، i شماره ردیف در داده‌های مرتب‌شده صعودی و F تابع توزیع تجربی است که با استفاده از رابطه (۷) (تابع تجربی هاسکینگ (۱۹۹۰))، محاسبه می‌شود.

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (7)$$

پس از تعیین پارامترهای توزیع، تابع توزیع تجمعی لوگ-لجستیک X به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (8)$$

حال به کمک تقریب ابراموویتز و استگن^۳ (۱۹۶۵) می‌توان توزیع تجمعی لوگ-لجستیک ($F(x)$) را به توزیع نرمال استاندارد (با میانگین صفر و واریانس یک) تبدیل کرد. این تبدیل معادله محاسبه SPEI خواهد بود که به صورت رابطه (۹) می‌باشد.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (9)$$

که در آن،

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad \text{for } P \leq 0.5 \quad (10)$$

¹ Hosking

² Probability Weighting Moments

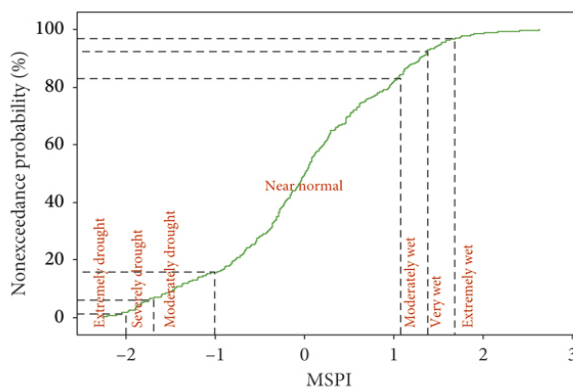
³ Abramowitz and Stegun

جدول ۲- حدود و توصیف طبقات مختلف شاخص SPEI

وضعیت طبقه	ترسالی	نرمال	خشکسالی
خفیف	$+1/5 \leq SPEI \leq +1/0$	$-1/0 \leq SPEI \leq +1/0$	$-1/5 \leq SPEI \leq -1/0$
متوسط	$+1/5 \leq SPEI \leq +2/0$		$-2/0 \leq SPEI \leq -1/5$
شدید	$+2/0 \leq SPEI$		$SPEI \leq -2/0$

یک است، PC_1 از چنین ویژگی برخوردار نیست. بنابراین لازم است سری زمانی PC_1 نسبت به میانگین و انحراف معیار ماه‌های مختلف سال استاندارد شود. به منظور تعیین طبقات شدت خشکسالی (طبقه‌بندی MSPI)، سری زمانی MSPI به صورت صعودی مرتب و توزیع احتمال تجربی آن در یک نمودار (شکل ۳) ترسیم می‌شود (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۴:۱۰۵۱). سپس، مقادیر متناظر با آستانه‌های احتمالاتی طبقات مختلف SPI (جدول ۳) از نمودار مذکور استخراج می‌شود. این مقادیر همان آستانه‌های MSPI است که می‌تواند در طبقه‌بندی سری زمانی MSPI از نظر شدت خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش برای محاسبه شاخص‌های مورد بررسی از کدنویسی این روابط در نرم افزار MATLAB 2018a استفاده شده است.

که در آن PC_i مولفه اصلی i ام، E_i^T بردار ویژه i ام و X_k متغیر اصلی k ام، است و e_{ki} ، k امین عنصر بردار ویژه می‌باشد. اگر همبستگی بین متغیرهای اصلی زیاد باشد PCA می‌تواند مفید باشد. این باعث می‌شود که PC_1 بتواند بخش بزرگی از واریانس کل در متغیرهای اصلی را توجیه کند. تشکیل ماتریس همبستگی متقابل متغیرهای اصلی پیش نیاز PCA است. هنگامی که این ماتریس تشکیل شد، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه مربوط به هر مقدار ویژه را می‌توان محاسبه کرد. این شاخص مبتنی بر نخستین مؤلفه اصلی (PC_1) می‌باشد. PC_1 ترکیبی خطی از K متغیر اولیه (K سری زمانی SPI متناظر با K پنجره زمانی) است که می‌تواند بیشترین درصد تغییرپذیری در K متغیر اولیه را توضیح دهد. به دلیل خصلت جبری PC_1 ، مقادیر آن بین ماه‌ها و مکان‌های مختلف قابل مقایسه نیست، یعنی برخلاف SPI که دارای میانگین صفر و واریانس



شکل ۳- صدک‌های MSPI (برای پنجره‌های زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه)

خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره نمود. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند، نیز از دیگر مزایای استفاده از آن است. در این پژوهش محاسبات تعیین روند نیز در محیط نرم افزار XLSTAT صورت گرفته است.

آزمون روند من-کندال: آزمون من-کندال ابتدا توسط من^۱ (۱۹۴۵) و سپس توسط کندال^۲ (۱۹۴۸) توسعه یافت. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی از توزیع

¹ Mann

² Kendall

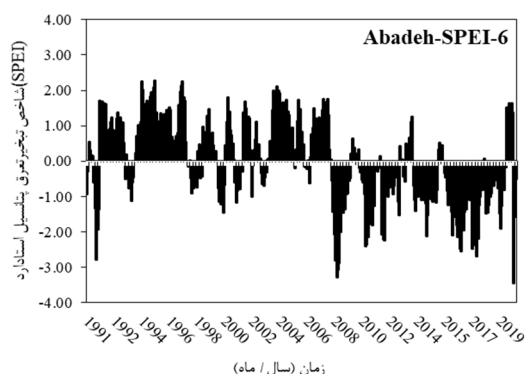
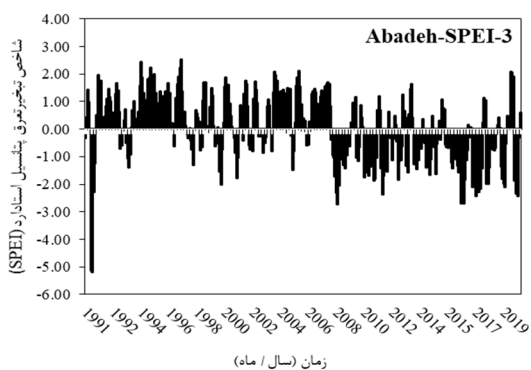
جدول ۳- طبقه‌بندی مقادیر SPI و آستانه‌های احتمال مربوطه (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳)

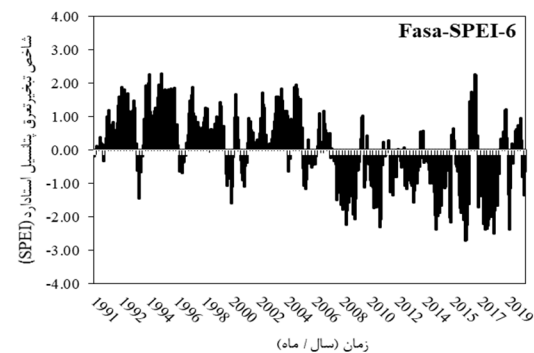
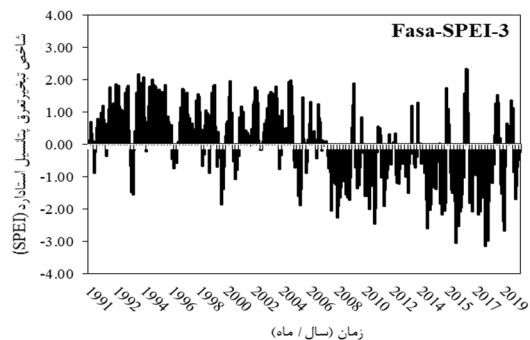
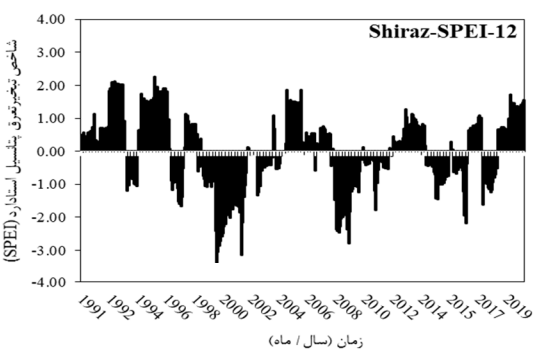
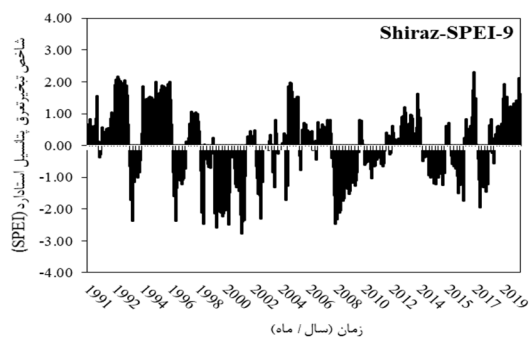
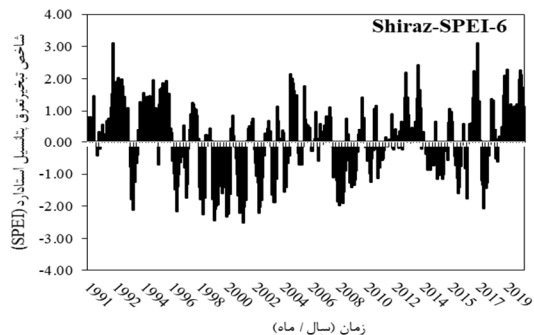
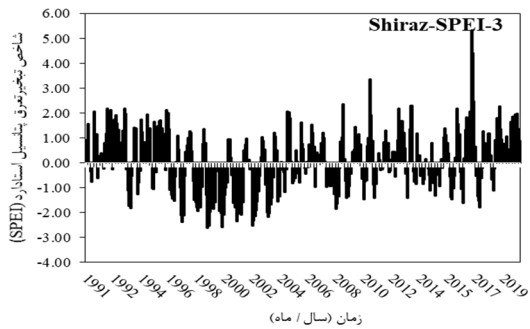
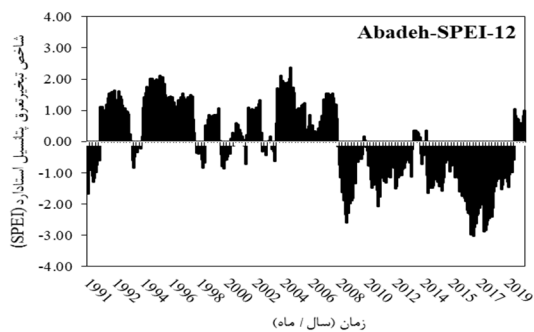
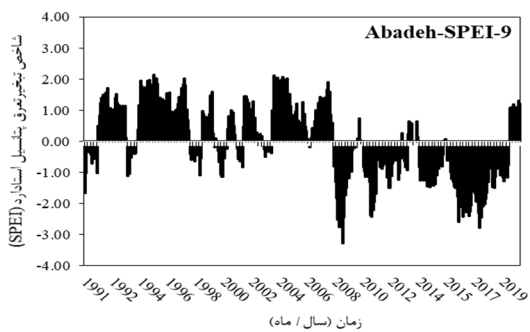
مقادیر SPI	آستانه احتمال	وضعیت طبقه
$SPI \geq +2/0$	$\geq 97\%$	بسیار مرطوب
$+2/0 \geq SPI \geq +1/5$	$93/3 - 97/7$	مرطوب
$+1/5 \geq SPI \geq +1/0$	$84/1 - 93/3$	نسبتاً مرطوب
$+1/0 \geq SPI \geq -1/0$	$15/9 - 84/1$	نرمال
$-1/0 \geq SPI \geq -1/5$	$6/7 - 15/9$	نسبتاً خشک
$-1/5 \geq SPI \geq -2/0$	$2/3 - 6/7$	خشک
$SPI \leq -2/0$	$\leq 2/3$	بسیار خشک

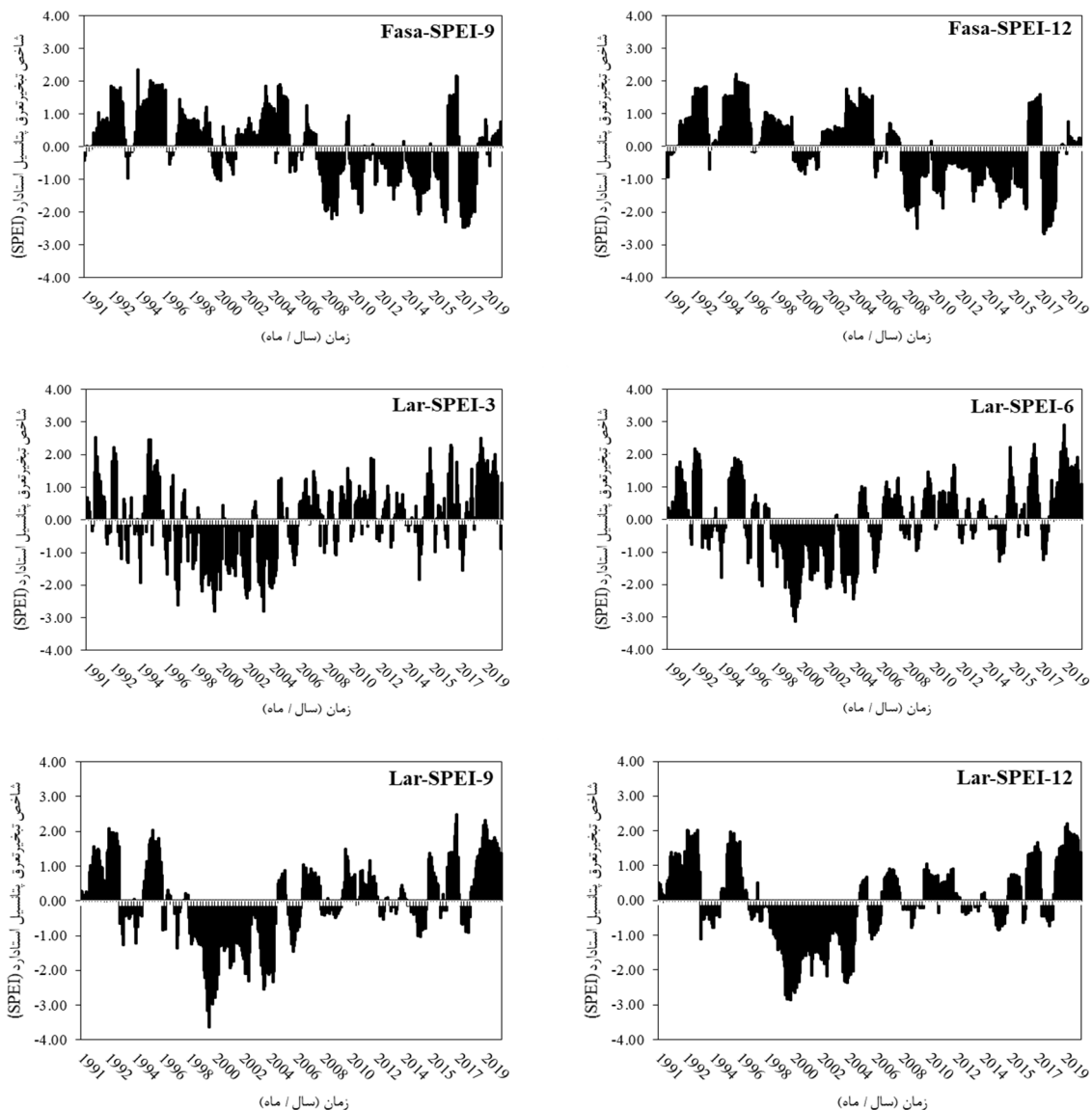
مدت، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد می‌باشد. در صورتیکه با افزایش مقیاس‌های زمانی، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آن افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش میرزایی حسنلو و همکاران (۱۳۹۹:۱۸۱) در حوزه دریاچه ارومیه نیز نشان داد که افزایش تداوم خشکسالی و فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب به ترتیب با افزایش مقیاس‌های زمانی رابطه مستقیم و معکوس دارد، که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. بر اساس گزارشات فائو در سال ۲۰۰۵ که نشان از یک خشکسالی بلندمدت و شدید بر نقاط مختلف کشور در بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ می‌باشد که باعث افت شدید آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش تولیدات کشاورزی و بحران آب و غذا گردید (فائو، ۲۰۰۵) که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد و در طی این سال‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه خشکسالی مشاهده شد.

نتایج و بحث

با اعمال مقیاس زمانی مختلف روی هر ماه، تأثیرات ماه‌های قبل از آن ماه نیز نشان داده می‌شود. به طوری که مقیاس زمانی سه ماهه، تأثیرات دو ماه قبل از هر ماه، مقیاس زمانی شش ماهه آثار پنج ماه قبل از هر ماه و سایر مقیاس‌های ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه به ترتیب آثار ماه‌های قبل را به تناسب مقیاس‌های منتخب در ماه مدنظر لحاظ می‌کند. به همین دلیل مقیاس‌های زمانی مختلف می‌تواند بر روند خشکسالی، ترسالی، سال‌های نرمال، شدت وقوع و تأثیرات آن بر منابع آب مؤثر باشد (منتصری و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۹۶). بنابراین در این پژوهش، شاخص SPEI سه، شش، نه و ۱۲ ماهه برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس به طور جداگانه محاسبه شد. شکل ۴ توزیع زمانی SPEI را در ایستگاه‌های آباده، شیراز، فسا و لار در مقیاس‌های زمانی (۳، ۶، ۹ و ۱۲) نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در مقیاس‌های زمانی کوتاه



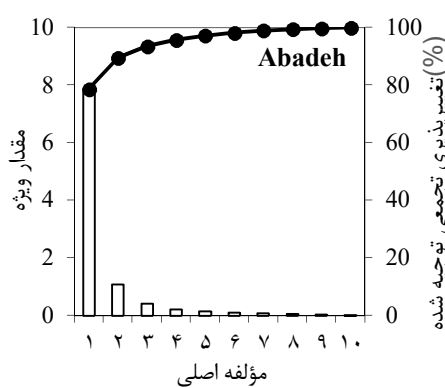




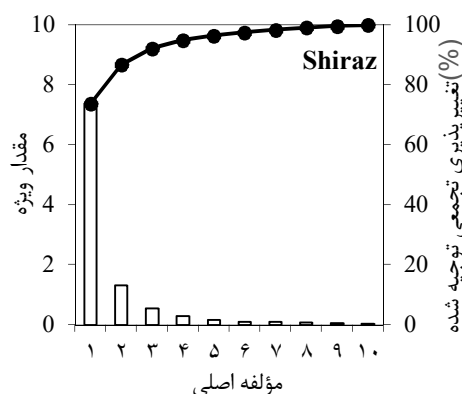
شکل ۴- سری زمانی شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه استان فارس (آباده، شیراز، فسا و لار)

اصلی در تمام مناطق مورد مطالعه در این پژوهش، به خود اختصاص دهد. در ایستگاه آباده، شیراز، فسا و لار به ترتیب ۸۹/۵۷، ۸۷/۱۰، ۹۲/۷۳ و ۸۶/۷۹ درصد تغییرات توسط مؤلفه اصلی نخست توجیه می‌شود. سری‌های زمانی MSPI در ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این ارقام، مشاهده می‌شود که MSPI ها از نوسانات سری زمانی SPI به‌ویژه در دوره‌های خشک و مرطوب طولانی مدت پیروی می‌کنند.

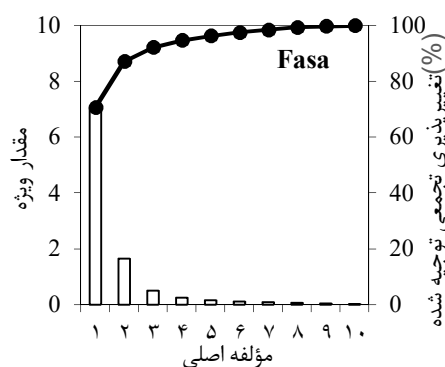
محاسبات شاخص MSPI بر مبنای پنجره‌های زمانی ۳ تا ۱۲ ماه SPI در ایستگاه‌های مورد مطالعه انجام شد. درصد تغییرات توجیه شده توسط ۱۰ مؤلفه اصلی در ایستگاه‌های مذکور در شکل ۵ ارائه شده است. شاخص MSPI چندین سری زمانی از شاخص SPI را با استفاده از تکنیک چند متغیره تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در یک سری خلاصه می‌کند. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی سری زمانی SPI نشان داد که اولین مؤلفه اصلی (PC₁) می‌تواند درصد زیادی از تغییرات را در سری‌های زمانی SPI



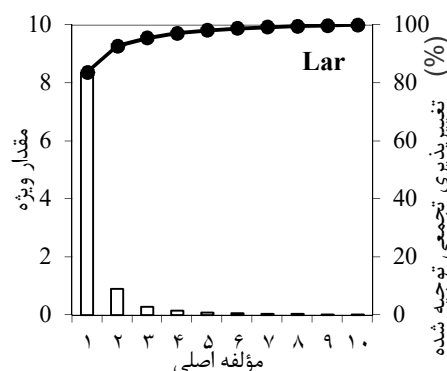
الف - آباده



ب - شیراز



ج - فسا



د - لار

شکل ۵- درصد تغییرات و مقادیر ویژه ۱۰ متغیر MSPI بر مبنای پنجره‌های زمانی ۳ تا ۱۲ ماه در ایستگاه‌های مورد مطالعه (الف - آباده، ب - شیراز، ج - فسا و د - لار)

هر مجموعه دلخواه از مقیاس‌های زمانی اعمال شود (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۴:۵۸).

جدول ۴ خصوصیات مقادیر شاخص‌های مورد بررسی، شامل شدیدترین خشکسالی، ترسالی و تعداد ماه‌های مرطوب و خشک را در مناطق مطالعاتی در مقیاس‌های زمانی مختلف ارائه می‌دهد. طبق این جدول در ارتباط با شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۳ ماهه شدیدترین خشکسالی در ایستگاه آباده (۲۰/۵-) و شدیدترین ترسالی در ایستگاه شیراز (۲۱/۵) می‌باشد. در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی و ترسالی به ترتیب در ایستگاه‌های آباده (۴۵/۳-) و شیراز (۱۰/۳) مشاهده شد. در مقیاس زمانی ۹ ماهه شدیدترین خشکسالی و ترسالی در

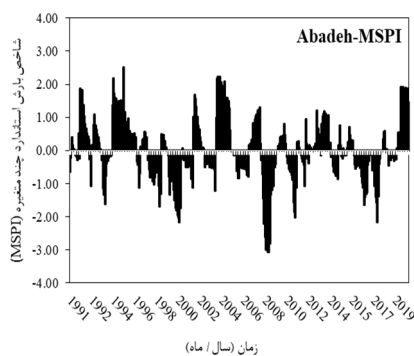
همچنین، دوره‌های خشک و مرطوب جزئی در دوره‌های خشک یا مرطوب شدید و طولانی ممکن است توسط MSPI حذف شوند. همچنین در مواردی که تجمیع مقیاس‌های زمانی از قبل برای محاسبه SPI مشخص نباشد، توصیه می‌گردد از MSPI استفاده شود. نتایج پژوهش‌های بذرافشان و همکاران (۲۰۱۴:۱۰۵۸) و عاقل‌پور و ورشوین^۱ (۲۰۲۱:۱۴) نیز این نتایج را تایید می‌کند. از آنجایی که MSPI مبتنی بر مجموعه‌ای از سری‌های زمانی SPI است، مزایای SPI را دارد (میشرا و سینگ^۲، ۲۰۱۰:۲۰۷). شاخص MSPI آنقدر ساده و منعطف است که می‌تواند برای

¹ Aghelpour and Varshavian

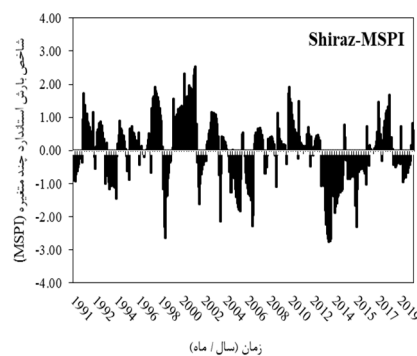
² Mishra and Singh

مقدار را به خود اختصاص داد. از لحاظ شاخص MSPI می‌توان بیان کرد که تعداد ماه‌های نرمال، خشک و مرطوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه تقریباً برابر می‌باشد. شدیدترین خشکسالی در ایستگاه آباده با مقدار $-۳/۰۷$ مشاهده شد. به طور کلی می‌توان بیان کرد که با افزایش گام زمانی تعداد ماه‌های خشک افزایش می‌یابد، زیرا هر چه گام زمانی بیشتر می‌شود، مقادیر میزان بارش دریافتی در ماه‌ها و سال‌های قبل نیز در محاسبه شدت دخالت داده می‌شود (مبین و همکاران، ۱۳۹۸، ۱۱۸).

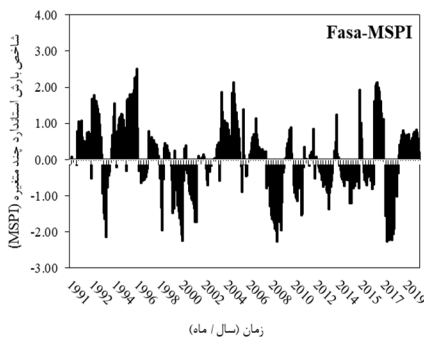
ایستگاه لار به ترتیب با مقادیر $-۳/۶۳$ و $۲/۴۸$ می‌باشد. همچنین در مقیاس ۱۲ ماهه شدیدترین خشکسالی در ایستگاه شیراز ($-۳/۳۷$) و شدیدترین ترسالی در ایستگاه آباده ($۲/۳۷$) می‌باشد. بیشترین تعداد ماه‌های خشک در مقیاس زمانی ۳ ماهه در ایستگاه‌های آباده و فسا (۸۴ ماه)، در مقیاس ۶ ماهه در ایستگاه فسا (۸۳ ماه)، در مقیاس زمانی ۹ ماهه در ایستگاه آباده (۸۷ ماه) و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه آباده (۹۷ ماه) مشاهده شد. از لحاظ تعداد ماه‌های نرمال نیز ایستگاه لار در تمامی مقیاس‌های زمانی بیشترین



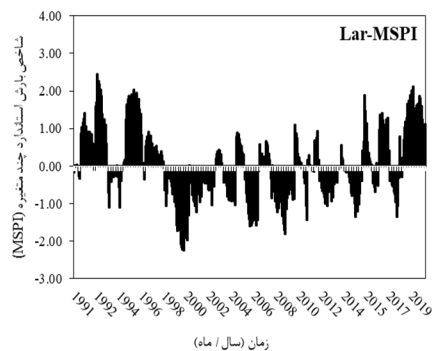
الف - آباده



ب - شیراز



ج - فسا



د - لار

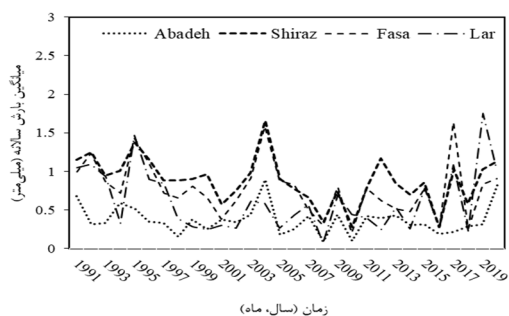
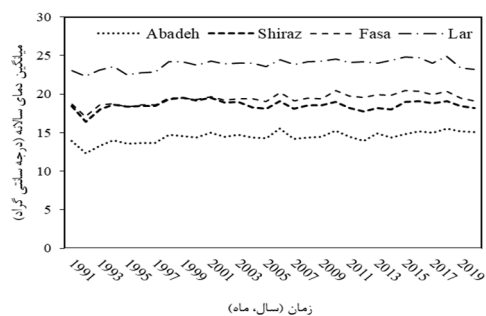
شکل ۶- سری زمانی شاخص بارش استاندارد چند متغیره (MSPI) برای پنجره‌های زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه استان فارس (الف - آباده، ب - شیراز، ج - فسا و د - لار)

ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، می‌توان بیان کرد که شاخص SPEI شاخص مناسبی در تشخیص روند وقوع دوره‌ای خشکی با در نظر گرفتن عامل درجه حرارت در مناطق مختلف باشد که با نتایج ذبیحی و همکاران (۱۳۹۶:۱۲۸) و میرزایی حسنلو و همکاران (۱۳۹۹:۱۸۳) مطابقت دارد.

شکل ۷ میانگین بارش و دمای سالانه را در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، با توجه به روند کاهشی بارش، هر دو شاخص SPI و SPEI به تغییرات بارندگی واکنش یکسانی نشان می‌دهند. همچنین، در مجموع با توجه به روند صعودی دما و کاهش روند بارش در سطح

جدول ۴ - خصوصیات مقادیر شاخص‌های مورد بررسی در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱۹۹۱-۲۰۲۰) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد (SPEI)					
ایستگاه				آماره	مقیاس زمانی
لار	فسا	شیراز	آباده		
-۲/۸۰	-۳/۱۳	-۲/۶۲	-۵/۲۰	حداقل	۳ ماهه
۲/۵۲	۲/۳۳	۵/۳۱	۲/۵۳	حداکثر	
۷۸	۸۴	۷۵	۸۴	تعداد ماه‌های خشک	
۷۱	۸۹	۹۴	۹۱	تعداد ماه‌های مرطوب	
۲۱۱	۱۸۷	۱۹۱	۱۸۵	تعداد ماه‌های نرمال	
ایستگاه				آماره	مقیاس زمانی
لار	فسا	شیراز	آباده		
-۳/۱۴	-۲/۷۱	-۲/۵۱	-۳/۴۵	حداقل	۶ ماهه
۲/۹۲	۲/۲۸	۳/۱۰	۲/۲۷	حداکثر	
۶۷	۸۳	۷۸	۷۹	تعداد ماه‌های خشک	
۷۳	۸۰	۷۸	۹۴	تعداد ماه‌های مرطوب	
۲۲۰	۱۹۷	۲۰۴	۱۸۷	تعداد ماه‌های نرمال	
ایستگاه				آماره	مقیاس زمانی
لار	فسا	شیراز	آباده		
-۳/۶۳	-۲/۴۷	-۲/۷۶	-۳/۲۸	حداقل	۹ ماهه
۲/۴۸	۲/۳۵	۲/۲۹	۲/۱۵	حداکثر	
۷۰	۷۳	۸۰	۸۷	تعداد ماه‌های خشک	
۶۹	۷۳	۶۸	۹۷	تعداد ماه‌های مرطوب	
۲۲۱	۲۱۴	۲۱۲	۱۷۶	تعداد ماه‌های نرمال	
ایستگاه				آماره	مقیاس زمانی
لار	فسا	شیراز	آباده		
-۲/۸۶	-۲/۶۸	-۳/۳۷	-۳/۰۱	حداقل	۱۲ ماهه
۲/۲۲	۲/۲۳	۲/۲۶	۲/۳۷	حداکثر	
۶۳	۷۰	۷۴	۹۷	تعداد ماه‌های خشک	
۶۹	۷۳	۶۹	۹۸	تعداد ماه‌های مرطوب	
۲۲۸	۲۱۷	۲۱۷	۱۶۵	تعداد ماه‌های نرمال	
شاخص بارش استاندارد چندمتغیره (MSPI)					
ایستگاه				آماره	مقیاس زمانی
لار	فسا	شیراز	آباده		
-۲/۲۴	-۲/۲۷	-۲/۷۶	-۳/۰۷	حداقل	۳ تا ۱۲ ماهه
۲/۴۵	۲/۵۲	۲/۵۴	۲/۵۲	حداکثر	
۵۷	۵۶	۵۷	۵۶	تعداد ماه‌های خشک	
۵۷	۵۷	۵۷	۵۷	تعداد ماه‌های مرطوب	
۲۴۶	۲۴۷	۲۴۶	۲۴۷	تعداد ماه‌های نرمال	



شکل ۷- میانگین بارش و دمای سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره مطالعاتی (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. با توجه به این آزمون مقادیر آماره بزرگتر و کوچکتر از ۱/۹۶ به ترتیب نشان‌دهنده روند افزایشی و کاهشی معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد.

جدول ۵ روند ماهانه شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش (SPEI و MSPI) در مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) به‌دست آمده در سطح اطمینان ۹۵٪ حاصل از آزمون آماری من-کندال در

جدول ۵- آماره آزمون من-کندال در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه

SPEI-3												
ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
آباده	-۰/۳۱۳	-۰/۳۱۲	-۰/۳۰۷	-۰/۲۹۸	-۰/۲۹۳	-۰/۲۹۳	-۰/۳۰۴	-۰/۳۱۵	-۰/۳۲۵	-۰/۳۲۹	-۰/۳۳۰	-۰/۳۲۳
شیراز	-۰/۰۳۶	-۰/۰۴۰	-۰/۰۴۵	-۰/۰۴۷	-۰/۰۵۰	-۰/۰۵۲	-۰/۰۵۶	-۰/۰۶۶	-۰/۰۷۴	-۰/۰۸۲	-۰/۰۸۴	-۰/۰۸۶
فسا	-۰/۰۴۰۲	-۰/۰۴۰۲	-۰/۰۳۹۸	-۰/۰۳۹۶	-۰/۰۳۹۲	-۰/۰۳۹۱	-۰/۰۳۹۵	-۰/۰۳۹۷	-۰/۰۳۹۹	-۰/۰۴۰۰	-۰/۰۴۰۱	-۰/۰۳۹۹
لار	-۰/۱۵۰	-۰/۱۵۷	-۰/۱۶۲	-۰/۱۶۸	-۰/۱۷۳	-۰/۱۷۷	-۰/۱۸۱	-۰/۱۹۰	-۰/۱۹۵	-۰/۲۰۰	-۰/۲۰۱	-۰/۲۱۰
SPEI-6												
آباده	-۰/۳۸۱	-۰/۳۸۴	-۰/۳۸۳	-۰/۳۷۸	-۰/۳۷۳	-۰/۳۶۷	-۰/۳۶۵	-۰/۳۶۴	-۰/۳۶۶	-۰/۳۷۶	-۰/۳۸۵	-۰/۳۸۲
شیراز	-۰/۰۳۹	-۰/۰۳۴	-۰/۰۲۹	-۰/۰۲۲	-۰/۰۱۶	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۵	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۴	-۰/۰۱۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۱۸
فسا	-۰/۰۴۰۵	-۰/۰۴۰۷	-۰/۰۴۰۷	-۰/۰۴۰۵	-۰/۰۴۰۳	-۰/۰۴۰۰	-۰/۰۳۹۹	-۰/۰۳۹۶	-۰/۰۳۹۶	-۰/۰۳۹۹	-۰/۰۴۰۲	-۰/۰۴۰۱
لار	-۰/۱۱۴	-۰/۱۲۱	-۰/۱۲۷	-۰/۱۳۲	-۰/۱۳۹	-۰/۱۴۴	-۰/۱۵۰	-۰/۱۵۸	-۰/۱۶۷	-۰/۱۷۴	-۰/۱۸۰	-۰/۱۸۸
SPEI-9												
آباده	-۰/۴۳۳	-۰/۴۴۰	-۰/۴۴۳	-۰/۴۴۰	-۰/۴۳۷	-۰/۴۳۵	-۰/۴۳۴	-۰/۴۳۳	-۰/۴۳۰	-۰/۴۲۹	-۰/۴۲۹	-۰/۴۲۴
شیراز	-۰/۰۹۲	-۰/۰۸۶	-۰/۰۷۹	-۰/۰۷۲	-۰/۰۶۶	-۰/۰۶۰	-۰/۰۵۴	-۰/۰۴۶	-۰/۰۳۷	-۰/۰۳۳	-۰/۰۲۹	-۰/۰۲۵
فسا	-۰/۰۳۹۳	-۰/۰۳۹۶	-۰/۰۳۹۶	-۰/۰۳۹۵	-۰/۰۳۹۴	-۰/۰۳۹۴	-۰/۰۳۹۲	-۰/۰۳۹۱	-۰/۰۳۸۷	-۰/۰۳۸۷	-۰/۰۳۸۴	-۰/۰۳۸۲
لار	-۰/۰۸۳	-۰/۰۹۰	-۰/۰۹۵	-۰/۱۰۲	-۰/۱۰۸	-۰/۱۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۱۲۸	-۰/۱۳۵	-۰/۱۴۳	-۰/۱۵۰	-۰/۱۵۹
SPEI-12												
آباده	-۰/۴۵۶	-۰/۴۶۳	-۰/۴۶۷	-۰/۴۶۶	-۰/۴۶۷	-۰/۴۶۹	-۰/۴۷۱	-۰/۴۷۲	-۰/۴۷۳	-۰/۴۷۳	-۰/۴۷۳	-۰/۴۶۷
شیراز	-۰/۱۰۷	-۰/۱۰۳	-۰/۱۰۶	-۰/۱۰۹۱	-۰/۱۰۸۵	-۰/۱۰۷۹	-۰/۱۰۷۳	-۰/۱۰۶۷	-۰/۱۰۶۱	-۰/۱۰۵۴	-۰/۱۰۴۸	-۰/۱۰۳۹
فسا	-۰/۰۴۰۴	-۰/۰۴۰۶	-۰/۰۴۰۶	-۰/۰۴۰۶	-۰/۰۴۰۶	-۰/۰۴۰۷	-۰/۰۴۰۷	-۰/۰۴۰۷	-۰/۰۴۰۷	-۰/۰۴۰۶	-۰/۰۴۰۵	-۰/۰۴۰۲
لار	-۰/۰۷۶	-۰/۰۸۳	-۰/۰۹۰	-۰/۰۹۷	-۰/۱۰۳	-۰/۱۰۹	-۰/۱۱۵	-۰/۱۲۲	-۰/۱۲۹	-۰/۱۳۶	-۰/۱۴۳	-۰/۱۵۲
MSPI 3-12												
آباده	-۰/۱۳۵	-۰/۱۳۴	-۰/۱۲۸	-۰/۱۲۱	-۰/۱۱۵	-۰/۱۱۰	-۰/۱۰۵	-۰/۱۰۰	-۰/۰۹۷	-۰/۰۸۹	-۰/۰۸۵	-۰/۰۷۵
شیراز	-۰/۱۲۳	-۰/۱۳۰	-۰/۱۳۶	-۰/۱۴۳	-۰/۱۴۹	-۰/۱۵۴	-۰/۱۵۸	-۰/۱۶۲	-۰/۱۶۴	-۰/۱۶۶	-۰/۱۵۸	-۰/۱۵۰
فسا	-۰/۱۸۳	-۰/۱۸۳	-۰/۱۸۰	-۰/۱۷۸	-۰/۱۷۵	-۰/۱۵۰	-۰/۱۶۹	-۰/۱۶۷	-۰/۱۶۰	-۰/۱۵۲	-۰/۱۴۸	-۰/۱۴۳
لار	-۰/۰۷۲	-۰/۰۶۷	-۰/۰۶۱	-۰/۰۵۵	-۰/۰۵۰	-۰/۰۴۵	-۰/۰۴۱	-۰/۰۳۳	-۰/۰۲۵	-۰/۰۱۸	-۰/۰۱۳	-۰/۰۰۴

نتایج، در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد است. اما با افزایش مقیاس‌های زمانی، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد و تداوم آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. همچنین در ارتباط با شاخص SPEI و در مقیاس زمانی ۳ ماهه شدیدترین خشکسالی در ایستگاه آباده (۵/۲۰-) و شدیدترین ترسالی در ایستگاه شیراز (۵/۲۱) می‌باشد. در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی و ترسالی به ترتیب در ایستگاه‌های آباده (۳/۴۵-) و شیراز (۳/۱۰) مشاهده شد. در مقیاس زمانی ۹ ماهه شدیدترین خشکسالی و ترسالی در ایستگاه لار به ترتیب با مقادیر ۳/۶۳- و ۲/۴۸ می‌باشد. همچنین در مقیاس ۱۲ ماهه شدیدترین خشکسالی در ایستگاه شیراز (۳/۳۷-) و شدیدترین ترسالی در ایستگاه آباده (۲/۳۷) می‌باشد. تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی سری زمانی SPI نشان داد که اولین مؤلفه اصلی (PC_1) می‌تواند درصد زیادی از تغییرات را در سری‌های زمانی SPI اصلی در تمام مناطق مورد مطالعه در این پژوهش، به خود اختصاص دهد. از لحاظ شاخص MSPI می‌توان بیان کرد که تعداد ماه‌های نرمال، خشک و مرطوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه تقریباً برابر می‌باشد. همچنین در ایستگاه آباده، شیراز، فسا و لار به ترتیب ۸۹/۵۷، ۸۷/۱۰، ۹۲/۷۳ و ۸۶/۷۹ درصد تغییرات توسط مؤلفه اصلی نخست توجیه می‌شود. از لحاظ آزمون من-کندال در ارتباط با بررسی روند موجود در شاخص مورد بررسی نیز می‌توان بیان کرد که در همه ایستگاه‌ها به جز لار در اکثر ماه‌های مورد بررسی روند نزولی و غیر معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ مشاهده شد. در ارتباط با شاخص MSPI نیز در تمامی ایستگاه‌ها (آباده، شیراز، فسا و لار) در روند نزولی و در واقع افزایش خشکسالی در سطح ۹۵ درصد مشاهده شد. از آنجا که خشکسالی همانند سایر پدیده‌های طبیعی با استفاده از دانش، آگاهی، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح و به موقع قابل پیش‌بینی و کنترل می‌باشد، امید است که تدابیر مؤثرتری در جهت پیش‌بینی و پیش‌گیری این پدیده به عمل آید.

در ارتباط با شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۳ ماهه در ایستگاه‌های آباده و فسا در تمامی ماه‌ها روند نزولی (افزایش خشکسالی) مشاهده شد اما در هیچ کدام از ماه‌ها روند معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ مشاهده نشده است. همچنین در ایستگاه‌های شیراز و لار در مقیاس ۳ ماهه در تمامی ماه‌ها روند صعودی و غیرمعنی‌داری مشاهده شد. در مقیاس ۶ ماهه در ایستگاه‌های آباده و فسا تمامی ماه‌های مورد مطالعه روند نزولی و غیرمعنی‌داری تجربه کرده‌اند. در ایستگاه شیراز در مقیاس ۶ ماهه از ماه‌های ژانویه تا جولای روند نزولی و در واقع افزایش خشکسالی و از ماه‌های آگوست تا دسامبر روند صعودی و غیرمعنی‌داری مشاهده شد. در همین مقیاس زمانی نیز در ایستگاه لار در تمامی ماه‌ها روند صعودی (آماره Z مثبت) و غیرمعنی‌داری وجود داشت. در مقیاس‌های زمانی ۹ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های آباده، شیراز و فسا می‌توان چنین بیان کرد که چون مقدار آماره Z در تمامی ماه‌ها منفی است، روند نزولی (افزایش خشکسالی) وجود داشت اما در هیچ کدام روند معنی‌داری در سطح ۹۵٪ مشاهده نشده است. همچنین در ایستگاه لار نیز در مقیاس ۹ و ۱۲ ماهه روند صعودی و غیرمعنی‌داری مشاهده شد. در ارتباط با شاخص MSPI نیز در تمامی ایستگاه‌ها (آباده، شیراز، فسا و لار) در تمامی ماه‌های مورد مطالعه روند نزولی و در واقع افزایش خشکسالی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی و ارزیابی خشکسالی بر مبنای شاخص‌های خشکسالی SPEI و MSPI در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب استان فارس (آباده، شیراز، فسا و لار) می‌باشد. بدین منظور از اطلاعات هواشناسی این ایستگاه‌ها در یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) استفاده شد. سپس با استفاده از آزمون آماری من-کندال روند موجود در شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه گردید. همچنین، تبخیر و تعرق پتانسیل به منظور استفاده در شاخص SPEI با معادله پنمن-مانتیث-فائو محاسبه شد. بر اساس

9. Abramowitz, M., and Stegun, I.A. 1965. Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications, New York.
10. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper (FAO), No. 56, 300p.
11. Aghelpour, P., and Varshavian, V. 2021. Forecasting Different Types of Droughts Simultaneously Using Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPI), MLP Neural Network, and Imperialistic Competitive Algorithm (ICA). Complexity, <https://doi.org/10.1155/2021/6610228>
12. Bazrafshan, J., Hejabi, S., and Rahimi, J. 2014. Drought monitoring using the Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPI). Water Resources Management. Doi: 10.1007/s11269-014-0533-2.
13. Chen, H., Guo, S., Xu, C.Y., and Singh, V.P. 2007. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. Journal of hydrology, 344(3-4): 171-184.
14. FAO. 2005. http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_iran/en#tcN90064
15. Habibi, M., Schoner, W., and Babaeian, I. 2020. Drought monitoring Using Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) and Normalized-Difference Snow Index (NDSI) with observational and ERA5 dataset, within the uremia lake basin, Iran, EGU General Assembly 2020, Online, 4-8 May 2020, EGU2020-11543, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11543>, 2020
16. Hosking, J.R.M. 1990. L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. Journal of Royal Statistical Society B, 52, 105-124.
17. Kendall, M.G. 1948. Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London.

منابع

۱. بذرافشان، جواد؛ حجابی، سمیه. ۱۳۹۶. خشکسالی: روش‌های پایش (همراه با برنامه‌های کاربردی در محیط برنامه‌نویسی متلب). انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم.
۲. خیری، راضیه؛ مجرد، فیروز؛ معصوم‌پور، جعفر؛ فرهادی، بهمن. ۱۴۰۰. ارزیابی تغییرات خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های SPEI و SC-PDSI. برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۲۵(۱)، ۱۴۳-۱۷۴.
۳. ذبیحی، محسن؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ شرری، معراج. ۱۳۹۶. تحلیل شدت و تداوم دوره‌های خشک و مرطوب بر اساس شاخص‌های مبتنی بر بارش و تبخیر-تعرق. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸(۱۵)، ۱۲۵-۱۳۶.
۴. رهنما، سمیرا؛ شهیدی، علی؛ یعقوب‌زاده، مصطفی؛ مهران، علی‌اکبر. ۱۴۰۰. ارزیابی و پهنه‌بندی خشکسالی هواشناسی در استان خراسان جنوبی. پنجمین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه بیرجند.
۵. مبین، محمدحسین؛ زارعی، زهرا؛ سودایی‌زاده، حمید. ۱۳۹۸. بررسی و ارزیابی برخی از ویژگی‌های شدت خشکسالی‌های آب و هوایی در گام‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های هواشناسی کرمان و شیراز. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۱۹)، ۱۰۳-۱۲۲.
۶. منتصری، مجید؛ نورجو، امیر؛ بهمنش، جواد؛ اکبری، مهدی. ۱۳۹۷. بررسی ترسالی و خشکسالی هواشناسی در حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز زرینه رود و سیمینه رود). مجله اکوهیدرولوژی، ۵(۱)، ۱۸۹-۲۰۲.
۷. میرزایی‌حسنلو، ایوب؛ عبقری، هیراد؛ عرفانیان، مهدی. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص خشکسالی SPEI و تحلیل روند با استفاده از روش ناپارامتریک در ایستگاه‌های منتخب حوزه آبریز دریاچه ارومیه، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۱(۲۲)، ۱۷۵-۱۸۷.
۸. نیک‌بخت، جعفر؛ هادلی، فاطمه. ۱۴۰۰. مقایسه شاخص‌های RDI، SPI و SPEI جهت پایش خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: ایستگاه کرمانشاه). نشریه هواشناسی کشاورزی، ۹(۱)، ۲۵-۱۴.

23. Mishra, A.K., and Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2):202–216
24. Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., Van Loon, A.F., and Stahl, K. 2015. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35, 4027-4040
25. Thornthwaite, C.W. 1948. An approach to a rational classification of climate. *Geographical review*, 38: 85-94.
26. Törnros, T., and Menzel, L. 2014. Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 305-318
27. Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J.I. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI. *Journal of Climate*, 23, 1696-1718
28. Zhao, A., Zhang, A., Cao, Sen., Liu, X., Liu, J., and Cheng, D. 2018. Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. *CATENA*, 163:165–171. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.058>
18. Keyantash, J.A., and Dracup, J.A. 2004. An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle surface water storage, *Water Resources Research*, 40, W09304.
19. Łabędzki, L. 2007. Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index SPI. *Irrigation and Drainage*, 56:67–77
20. McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc Eighth Conference Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston pp. 179–184
21. Mann, H.B. 1945. Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica*, 13: 245-259.
22. Masud, M.B., Khaliq, M.N., and Wheater, H.S. 2015. Analysis of meteorological droughts for the Saskatchewan River Basin using univariate and bivariate approaches. *Journal of Hydrology*, 522:452–466. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.058>