

## واکاوی خشک‌سالی‌های نهان در آب و هوای فراخشک ایران مطالعه موردی: مرکز، جنوب و شرق ایران

مجید گزل‌خو

دانشجوی دکتری تخصصی آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رضا برنا\*

دانشیار گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

حسین محمدی

استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، ایران

فریده اسدیان

استادیار گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۳

### چکیده

خشک‌سالی از جمله مخاطرات اقلیمی است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از مشکلات مطالعات خشک‌سالی بارش‌های بیش از نرمال در کنار یک دوره خشکی به نسبت طولانی است. این موضوع باعث به انحراف کشیده شدن شاخص پراکندگی نظیر SPI می‌شود؛ تا جایی که گاه باوجود رخداد خشک‌سالی، شاخص به‌غلط آن دوره را نرمال و یا حتی تر سال نشان می‌دهد و باعث تصمیم‌گیری نادرست در برنامه‌ریزی‌های مقابله با خشک‌سالی می‌شود. در این مطالعه شاخص خشک‌سالی SPI در سطح ۱۸ استان با تعداد ۲۷ ایستگاه سینوپتیک واقع در مرکز، جنوب و شرق ایران با اقلیم فراخشک به روش دومارتن گسترش یافته در بازه زمانی ۳۴ ساله (۱۳۶۴-۱۳۹۸) برای بازه دوازده ماهه محاسبه و مورد واکاوی قرار گرفت. در این پژوهش برای اولین بار شاخص اصلاحی EP-SPI ارائه شده است که در آن داده‌های بارش مؤثر به‌عنوان ورودی برنام‌مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب اثر بارش‌های قدیمی‌تر کاهش یافته و شاخص، برآورد بهتری از خشک‌سالی ارائه نموده است. نتایج تحلیل آماری مقادیر EP-SPI مقابل SPI نظیر نشان از همبستگی معنی‌دار در سطح ۵٪ دارد. ۸۳ درصد وقایع با اختلاف بیش از یک در ماه‌های مهر تا اسفند دیده شده و بیشترین اختلاف دو روش معادل چهار سطح جابه‌جایی شاخص خشک‌سالی از ترسال شدید به خشک‌سال متوسط بوده است. در این پژوهش مشخص شد که ۹/۳ درصد از وقایع خشک‌سالی دوازده‌ماهه از دید شاخص SPI پنهان مانده است. از این‌رو می‌توان گفت کارایی روش EP-SPI جهت آشکارسازی خشک‌سالی‌های نهان در بازه دوازده ماهه، مورد تأیید است.

واژگان کلیدی: خشک‌سالی نهان، شاخص اصلاحی EP-SPI، شاخص بارش استاندارد، شاخص بارش مؤثر استاندارد، فراخشک.

## مقدمه

خشک‌سالی یک پدیده طبیعی، آرام و تکرار شونده است که در هر اقلیمی حتی اقلیم مرطوب رخ می‌دهد، گرچه مشخصات آن از یک منطقه به منطقه دیگر کاملاً تفاوت می‌کند. خشک‌سالی از جمله مخاطرات طبیعی- اقلیمی است که در مقایسه با سایر مخاطرات، از نقطه‌نظر میزان، شدت، طول مدت واقعه، گسترش منطقه، تلفات جانی، خسارت‌های اقتصادی و اثرات بلندمدت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در دهه‌های اخیر از میان حوادث طبیعی که زندگی انسان را بر روی کره خاکی تحت تأثیر قرار داده فراوانی بیشتری داشته است (فرج زاده و همکاران، ۱۳۷۵؛ ۲۳). کردوانی معتقد است که خشک‌سالی یک رویداد اقلیمی است که ویژگی‌های آن را مدت استمرار، شدت و وسعت منطقه تحت پوشش تشکیل می‌دهد. این رویداد اقلیمی که معمولاً بر اساس کاهش بارش سالانه نسبت به میانگین بارش دراز مدت محل بروز پیدا می‌کند ممکن است کوتاه مدت یا دراز مدت بوده و همچنین ممکن است اثرات آن ملایم و یا بسیار شدید باشد (کردوانی، ۱۳۸۰). از طرفی چون از دیدگاه جغرافیایی تعریف خشک‌سالی مفهومی مکانمند می‌باشد، شدت خشک‌سالی در هر محل تابعی از ضریب تغییرپذیری بارش در همان محل است؛ بنابراین از نظر اقلیم‌شناسی خشک‌سالی پدیده‌ای است که با درجه خشک‌سالی و ترسالی تعیین می‌گردد. با توجه به زمینه‌های فعالیت پژوهشگران رشته‌های مختلف تعاریف ویژه‌ای از خشک‌سالی ارائه شده است که در نهایت طبقه‌بندی و تفکیک این پدیده را به وجود آورده است. این امر سبب گردیده است که روش‌های مطالعاتی خاص با توجه به زمینه‌های مورد توجه همچون بارندگی، رطوبت خاک، جریان‌های سطحی، مخازن زیرزمینی، خسارت‌های اقتصادی و ... ابداع گردد (غریب و حسینی، ۱۳۸۸). روش‌های مطالعاتی فوق در قالب شاخص‌های مشخصی ارائه می‌گردد. یکی از این شاخص‌ها، شاخص استاندارد شده بارش (SPI<sup>۱</sup>) می‌باشد که در سال ۱۹۹۳ توسط مک‌کی<sup>۲</sup> و همکارانش ارائه شد. این شاخص نمایه‌ای است که بستگی به احتمال بارش برای هر زمان و مقیاس دارد. شکل ساده‌شده محاسبه آن بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها عوامل مؤثر در محاسبه این شاخص عنصر بارندگی است. این شاخص را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۳-۶-۱۲-۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد. شاخص SPI به کرات مورد استناد و استفاده پژوهشگران قرار گرفته و به عقیده بسیاری از پژوهشگران شاخص مناسبی برای بیان شروع، تداوم، شدت و پایان خشک‌سالی است. به نظر برخی از پژوهشگران شاخص‌های طراحی شده قادر به ارائه تمام ویژگی‌های مختلف آب و هوایی یک منطقه نیستند. از آنجا که مساحت عظیمی از ایران را مناطق فراخشک تشکیل می‌دهد از این‌رو بررسی خشک‌سالی جهت برنامه‌ریزی‌های اقلیمی در این مناطق از حساسیت بیشتری برخوردار است.

یکی از مشکلات اصلی مطالعات خشک‌سالی ریزش بارش‌های سیل آسا و کم تکرار در دوره‌هایی با خشکی طولانی است. این موضوع باعث به انحراف کشیده شدن شاخص‌های پرکاربرد نظیر SPI می‌شود. توزیع این بارش‌ها تا آن حد

<sup>۱</sup> Standardized Precipitation Index

<sup>۲</sup> McKee

است که گاه با وجود رخداد خشک‌سالی در بخش کشاورزی نتایج شاخص‌ها به غلط آن سال را نرمال و یا حتی ترسال نشان می‌دهند. این موضوع به‌دفعات در مناطق مختلف مشاهده و در گزارش‌ها و نشریات متعددی منعکس شده است. این تناقض در برخی موارد نیز نارضایتی نهادهای محلی را به جهت توزیع ناعادلانه غرامت خشک‌سالی در کشور نسبت به اعلام وضعیت خشک‌سالی یا ترسالی توسط سازمان هواشناسی کشور در پی داشته که توسط نمایندگان مردم مطرح شده است. در ادامه به مطالعات دانشگاهی و علمی که در آن خشک‌سالی مورد بررسی قرار گرفته، پرداخته می‌شود. مک‌کی و همکاران شاخص بارش استاندارد شده (SPI) را به منظور تعریف و پایش خشک‌سالی و تعیین کمبود بارش برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در ایالت کلرادو توسعه دادند (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳؛ ۱۷۹-۱۸۴). در سال ۲۰۰۹، شرکت کنندگان در کارگاه بین منطقه‌ای شاخص‌ها و سیستم‌های هشدار زودرس برای خشک‌سالی که در دانشگاه نبراسکا-لینکلن برگزار شد، "اعلامیه لینکلن در مورد شاخص‌های خشک‌سالی" را منتشر کردند (هیز و همکاران، ۲۰۱۱؛ ۴۸۵-۴۸۸). این سند ارزش پایش خشک‌سالی را تأیید می‌کند و به‌طور صریح استفاده از SPI را برای توصیف خشک‌سالی‌های هواشناسی توصیه می‌کند. به‌طور خلاصه طبق نظر جمعی از پژوهشگران مانند هایز (2000)، لیوید هوگس و ساوند (۲۰۰۲)، کاراویتیز و همکاران (۲۰۱۱)، بونسال و همکاران (۲۰۱۱، ۲۰۱۲) و ردموند (۲۰۰۲) توسعه SPI به جنبه‌های روش‌شناختی یا منطقه‌ای محدود می‌شود. دلایل محکمی از جمله پیشینه نظری محکم و بررسی گسترده و دقیق ویژگی‌های آن در نزدیک به ۱۲۰۰ ایستگاه برای استفاده از SPI هم در زمینه عملی و هم در مطالعات بنیادی ارائه داد. با این حال، تاکنون هیچ مرور جامعی از کاربری این شاخص وجود ندارد، در حالی که کتابشناسی گسترده‌ای به کاربردهای مختلف شاخص SPI اشاره دارد (چوال، ۲۰۱۵؛ ۶۴-۱۷). ویسنت<sup>۱</sup> و همکاران با بررسی شاخص SPI در منطقه والنسیا در مقیاس‌های ۱ و ۳ و ۱۲ و ۲۴ ماهه بر اساس این توزیع و استفاده از روش زمین آمار برای ۴۶ ایستگاه نشان دادند که می‌توان از شاخص SPI برای پیش‌بینی و هشدار وقوع خشک‌سالی استفاده کرد (ویسنت و همکاران، ۲۰۰۴؛ ۱۵-۵). کورتولیس<sup>۲</sup> و همکاران برای مطالعه ویژگی‌های فضایی-زمانی خشک‌سالی‌های هواشناختی جزیره کرت یونان، با ایجاد اصلاحاتی در تشخیص فضایی شدت خشک‌سالی‌ها بر روی شاخص SPI شاخص متفاوت<sup>۳</sup> SN-SPI را مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و ۱۰ مدل منطقه‌ای تغییر اقلیم، نتایج حاصل از دو شاخص SPI و SN-SPI را برای بررسی رفتار خشک‌سالی‌های گذشته و آینده جزیره کرت استفاده کرده‌اند (کورتولیس و همکاران، ۲۰۱۰؛ ۱۳۴-۱۲۱). برای حل کردن محدودیت‌های شاخص SPI، کائو و گویندراجو (۲۰۱۰) شاخص SPI اصلاح شده را پیشنهاد کردند (کائو و گویندراجو، ۲۰۱۰؛ ۱۳۴-۱۲۱). زو و همکاران در مطالعه خود امکان محاسبه شاخص استاندارد بارش (SPI) با بازه‌های کوتاه مدت در چین را بر اساس داده‌های ۲۴۱۶ ایستگاه، در بازه زمانی ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۹ بررسی کردند. نتیجه نشان داد که محاسبه شاخص SPI برای ایستگاه‌های متوالی با فاصله کوتاه بر اساس درون‌یابی جزئی که از

<sup>1</sup> Vicente

<sup>2</sup> Koutroulis

<sup>3</sup> Spatially Normalized-Standardized Precipitation Index

پارامترهای توزیع بارش از ایستگاه‌های متوالی با فاصله زیاد گرفته شده بود، امکان پذیر است. ولی در بلند مدت تجزیه و تحلیل خطا نشان می‌دهد که خطای SPI در شرق چین کوچک و در غرب چین بزرگ است و زمانی که ایستگاه‌ها متراکم‌تر بودند، SPI دقیق‌تر بود (زو و همکاران ۲۰۲۱؛ ۶۰۳).

از جمله پژوهش‌هایی که در ایران در رابطه با این موضوع انجام گرفته می‌توان به بابایی فینی و علیجانی اشاره کرد. بابایی فینی و علیجانی به منظور پایش و پهنه بندی خشک‌سالی بلند مدت ایران با استفاده از داده‌های ۷۰ ایستگاه هواشناسی سراسر کشور که آمار بالای ۳۰ سال داشته‌اند و با استفاده از نمایه SPI برای بازه‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان دادند که در بازه ۱۲ ماهه قسمت‌های شرق، جنوب غرب، غرب و مرکز کشور، خشک‌سالی‌ها بسیار شدید و شدید برقرار است، اما در مناطق شمال شرق، شمال غرب و شمال کشور خشک‌سالی‌ها متوسط و ملایم است. در بازه ۲۴ ماهه غرب، شرق، جنوب شرق، جنوب و مرکز کشور خشک‌سالی‌ها بسیار شدید و شدید است (بابایی فینی و علیجانی، ۱۳۹۲؛ ۱-۱۲). فاضل دهکردی و همکاران پایش خشک‌سالی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (MODIS<sup>1</sup>) در مناطق خشک مطالعه موردی مراتع استان اصفهان مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند تغییرات مقادیر بارش ماهانه بر روند تغییرات شاخص SPI در بازه زمانی کوتاه مدت مؤثر است. مقایسه آماری بین نتایج بدست آمده از محاسبه شاخص‌های ماهواره‌ای با شاخص خشک‌سالی هواشناسی نشان داد که شاخص SPI در بازه کوتاه مدت با شاخص‌های حرارتی و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI<sup>2</sup>) در سطح یک درصد بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد (فاضل دهکردی و همکاران، ۱۳۹۵؛ ۱۵۴-۱۴۱). مجیدی و همکاران برای تحلیل روند خصوصیات خشک‌سالی‌های استان همدان شامل شدت، مدت و زمان بین آغاز دو خشک‌سالی متوالی، از شاخص بارش استاندارد شده اصلاحی (SPI<sub>mod</sub>) بر اساس داده‌های بارش ماهانه ۱۱ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی استان همدان طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۲ استفاده کردند (مجیدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ۳۰۵-۲۹۵). رضایی و همکاران با استفاده از آمار هواشناسی سی ایستگاه همدیدی در ایران، سری داده‌های سالانه بارندگی و نسبت بارش به تبخیر- تعرق پتانسیل را به‌دست آوردند. تابع توزیع نرمال یا گاما برای تعیین مقادیر سالانه شاخص SPI و تابع توزیع لاگ‌نرمال یا گاما برای تعیین مقادیر سالانه شاخص RDI استفاده شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از توابع توزیع رایج به‌جای تابع توزیع برتر در تعیین هر دو شاخص SPI و RDI سالانه، باعث تغییر فراوانی و در نتیجه جابجایی طبقات مختلف خشک‌سالی می‌شود (رضایی و همکاران ۱۳۹۷؛ ۴۰-۲۹). حمصی و همکاران برای ارزیابی اثرهای پدیده تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر خشک‌سالی حوضه آبخیز دشت کاشان شاخص SPI با بازه دوازده ماهه را برای پایش و پیش بینی خشک‌سالی به کار بردند. مطالعه هم‌زمان تغییر کاربری و اقلیم با توجه به خشک‌سالی طولانی مدت، آسیب پذیربودن و خشک بودن، حاکی از تحمیل فشارهای زیاد بر محیط زیست منطقه است (حمصی و همکاران ۱۳۹۸؛ ۶۱۳). نادى و شیوخی سوغانلو در پژوهشی که روی پنج ایستگاه از نقاط مختلف ایران با شرایط متفاوت دمایی و رطوبتی، در طی دوره ۵۵ ساله (۲۰۱۰-۱۹۵۶) انجام دادند؛ برای رفع ایرادات SPI اولاً توزیع مناسب

<sup>1</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

<sup>2</sup> Normalized Difference Vegetation Index

بارش را از بین ۸ توزیع مختلف انتخاب و ثانیاً برای رفع مشکل تغییرات فصلی از نمایه بارش استاندارد اصلاح شده ( $SPI_{mod}$ ) استفاده کردند. نتایج نشان داد اختلاف این دو شاخص در ایستگاه‌های خشک‌تر آشکارتر بود؛ بنابراین استفاده از  $SPI_{mod}$  به جای  $SPI$  به دلیل حذف اثرات فصلی بارش، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد (نادی و شیوخی سوغانلو، ۱۳۹۹؛ ۱۱۸-۱۰۸). مجردی و همکاران (۱۳۹۹) به منظور پایش و پهنه‌بندی خشک‌سالی، ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی  $VCI$  را با استفاده از شاخص بارش استاندارد اصلاح شده  $MSPI$  مورد بررسی قرار دادند. نتایج برای پایش خشک‌سالی نشان داد که دقت شاخص بارش استاندارد اصلاح شده ( $MSPI$ ) از شاخص بارش استاندارد ( $SPI$ ) و دیگر شاخص‌ها بیشتر است. برای ارزیابی دقیق‌تر خشک‌سالی، شاخص وضعیت پوشش گیاهی ( $VCI$ ) با استفاده از محصول ماهانه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده ( $NDVI$ ) سنجنده  $MODIS$  محاسبه شد. همبستگی بین  $MSPI$  و  $VCI$  نشان می‌دهد، شاخص  $MSPI$  تا حدود زیادی نتایج شاخص  $VCI$  را تأیید می‌کند (مجردی و همکاران ۱۳۹۹؛ ۷۲۵).

در این مطالعه به جهت در دسترس بودن آمار بارش و سهولت محاسبه و فراگیری به‌کارگیری آن در محاسبات خشک‌سالی توسط پژوهشگران داخلی و خارجی از شاخص  $SPI$  استفاده شد. از این‌رو با عنایت به نقص شاخص  $SPI$  در مناطق فراخشک مرکز، جنوب و شرق ایران، در این پژوهش به دنبال یافتن روش مناسبی جهت رفع این نقیصه می‌باشیم. در راستای بررسی و ارائه راه‌حل‌های مناسب برای این مشکل، در این مقاله تمرکز بر روی مطالعه و پژوهش بر روی شاخص جدیدی است که ضمن در نظر گرفتن توزیع فراوانی بارش بتواند اثرات بلند مدت بارش‌های سیل‌آسا را کاهش داده و جلوه واقع‌بینانه‌تری از شرایط حاکم بر محیط نشان دهد.

### خشک‌سالی نهان

استفاده از عنوان خشک‌سالی نهان تا این زمان توسط هیچ‌یک از پژوهشگران به کار برده نشده است و منظور از خشک‌سالی نهان، خشک‌سالی است که از رصد شاخص‌های خشک‌سالی، پنهان بوده و شاخص‌های معمول قادر به نشان دادن آن نمی‌باشند؛ به عبارت دیگر با وجود این خشک‌سالی انباشته در منطقه، شاخص‌های موجود ترسالی نشان می‌دهند. این پدیده را با عنوان خشک‌سالی نهان تعریف می‌کنیم.

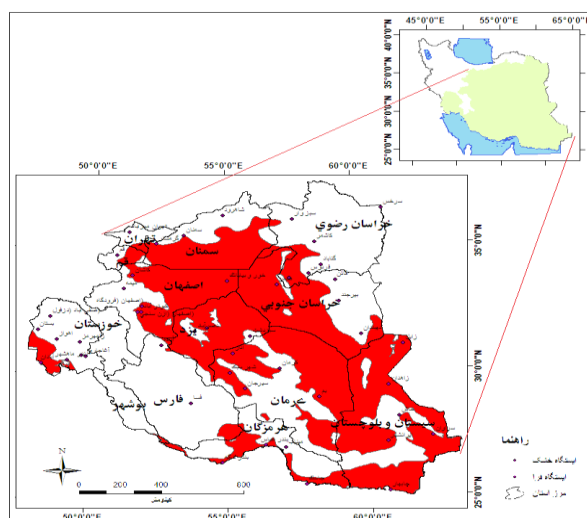
یکی از راه‌های مدیریت و تعدیل اثرات خشک‌سالی، ارزیابی و پایش خشک‌سالی بر اساس شاخص‌هایی است که میزان شدت، تداوم و سطح درگیر با خشک‌سالی را در یک منطقه به درستی نشان دهند. در پژوهش حاضر، شاخص  $SPI$  در بازه ۱۲ ماهه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین صورت که با استفاده از روش میرا کردن، اثر بارش با تابع زمان کاهش یافته و شاخص اصلاحی جدید با عنوان  $EP-SPI^1$  معرفی و مقادیر آن با شاخص  $SPI$  نظیر مقایسه و تحلیل می‌شود.

<sup>1</sup> Effective Precipitation- Standardized Precipitation Index

## داده‌ها و روش‌ها

### محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، مرکز، جنوب و شرق ایران می‌باشد که شامل استان‌های سمنان، اصفهان، یزد، کرمان در مرکز ایران و استان‌های خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان در شرق ایران و استان‌های هرمزگان و خوزستان در جنوب ایران بین ۲۵ تا ۳۸ درجه عرض شمالی و ۴۸ تا ۶۴ درجه طول شرقی می‌باشد. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مناطق فراخشک و ایستگاه‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی مناطق فراخشک و ایستگاه‌های مورد مطالعه

## داده‌ها و روش‌ها

در این مطالعه در نظر است شاخص خشک‌سالی SPI را در مناطق شرق، مرکز و جنوب کشور در بازه زمانی ۳۴ ساله اخیر مورد واکاوی قرار دهیم. با عنایت به این که برای محاسبه شاخص SPI نیاز به حداقل آمار ۳۰ ساله می‌باشد، بدین منظور آمار ماهیانه ۳۴ ساله بارش ایستگاه‌های سینوپتیک محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۱۳۶۴-۱۳۹۸ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. در موارد نیاز به اصلاح، ترمیم و یا تکمیل آمار ماهانه، با بهره‌گیری از آمار روزانه شبکه بارانسنجی اصلاح صورت گرفت. با توجه به این که کاربرد شاخص ابداعی برای مناطق فراخشک (طبقه‌بندی به روش دومارتن گسترش یافته) مورد تاکید می‌باشد، تعداد ۲۷ ایستگاه سینوپتیک در این ناحیه مشتمل بر ۸ استان، برای محاسبات شاخص SPI مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).

### ۱- روش شاخص بارش استاندارد SPI

شاخص استاندارد شده بارش SPI، نمایه‌ای است که بستگی به احتمال بارش برای هر زمان و مقیاس دارد، برای مقیاس‌های زمانی مختلف قابل محاسبه است و می‌تواند به عنوان هشدار اولیه پایش خشک‌سالی و کمک به ارزیابی شدت آن به کار

گرفته شود. این روش به وسیله مکی، دوسکن، جان کلست<sup>۱</sup>، اعضای مرکز اقلیمی کلرادو در سال ۱۹۹۳، با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر روی آبهای زیرزمینی، ذخایر آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه ارائه شده است.

شاخص SPI از رابطه زیر به دست می‌آید (مکی و همکاران، ۱۹۹۳، ۱۷۹)

$$\text{SPI} = \frac{p_i - \bar{p}}{s} \quad \text{رابطه (۱)}$$

Pi مقدار بارش در دوره مورد نظر؛

$\bar{P}$  میانگین بارندگی ماهانه بلند مدت به میلی‌متر؛

S انحراف معیار مقدار بارش.

برای محاسبه نمایه SPI، از توزیع گاما برای برازش داده‌های بلند مدت بارش استفاده شد. مقادیر شاخص SPI که از داده‌های بلندمدت بارش برای یک دوره زمانی مورد نظر به دست می‌آید و از یک توزیع نرمال تبعیت می‌کند که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است. این نتیجه عددی، موجب می‌شود تا بتوان اقلیم‌های مرطوب و خشک را به یک روش بررسی کرد.

## ۲- روش شاخص بارش مؤثر استاندارد EP-SPI

از آنجا که شاخص SPI تأثیر زمان بارش را در دوره مورد بررسی مورد توجه قرار نمی‌دهد، امکان برآورد ترسالی غیر واقعی وجود دارد. شاخص خشک‌سالی بارش مؤثر (EDI) توسط بیون و ویلهایت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۹ ارائه شد. این شاخص از داده روزانه استفاده می‌کند و این باعث بالا رفتن حجم عملیات می‌شود و همچنین در مواردی که داده‌های ماهانه در دسترس می‌باشد، این شاخص نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. از این رو در این پژوهش برای اولین بار شاخص SPI با داده‌های بارش مؤثر محاسبه شد تا اثر بارش‌های قدیمی‌تر کاهش یافته و شاخص برآورد بهتری از خشک‌سالی ارائه کند. در این روش ابتدا داده‌های ماهانه بارش ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه به صورت ستونی و براساس سال و ماه وقوع برای هر ایستگاه مرتب گردید. سپس با استفاده از رابطه (۲) اقدام به محاسبه بارش مؤثر ۱۲ ماهه بطور جداگانه شد.

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^n \frac{p_m}{n} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن i تداوم فرضی و  $P_m$  بارندگی ماه مورد نظر تا  $m-1$  ماه قبل (برای مثال  $P_1$  بارندگی ماهی که بایستی بارش مؤثر محاسبه شود و  $P_2$  بارندگی یک ماه قبل) می‌باشد. به عنوان مثال اگر i برابر 12 ماه باشد، به صورت رابطه (۳) مطابق زیر برآورد خواهد شد:

$$EP_{12} = (P_1)/1 + (P_1+P_2)/2 + \dots + (P_1+P_2+\dots+P_{12})/12 \quad \text{رابطه (۳)}$$

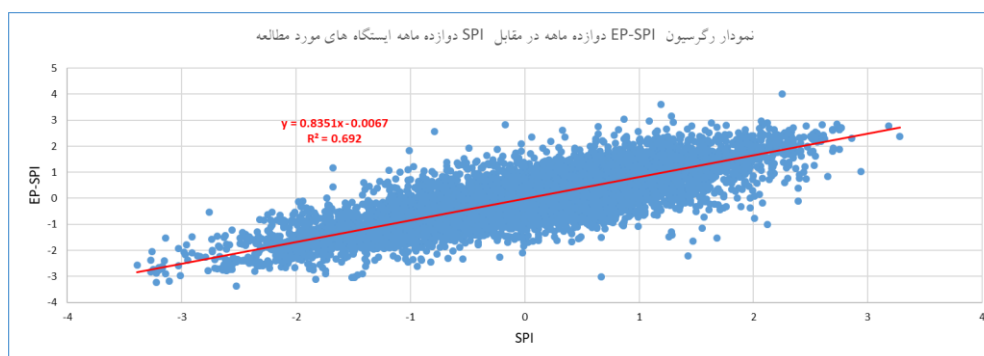
<sup>1</sup> Jan Kleist

<sup>2</sup> Byun and Wilhite

همانطور که مشاهده می‌شود، اثر بارش در ماه اول نزدیک به واقعه ۱۲ بار، ماه دوم ۱۱ بار و همینطور ماه‌های قبل به تعداد کمتر در محاسبه آورده شده است. تا آنجا که ماه دوازدهم عملاً اثر چندانی در خشک‌سالی حال حاضر ندارد، تنها یک بار آن هم با نسبت یک دوازدهم در محاسبه شرکت داده می‌شود. این رابطه به خوبی تأثیر بالاتر بارش‌های اخیر نسبت به بارش‌های قدیمی‌تر را نشان می‌دهد. بدین ترتیب برای هر دوره، EP هرماه با در نظر گرفتن تداوم مورد نظر محاسبه شد. حال به جای بارش ماهانه، بارش مؤثر ماهانه در محاسبات مربوط به شاخص SPI وارد می‌شود. برای این کار از نرم افزار SPIGenerator که در سال ۲۰۱۹ توسط مرکز پایش خشک‌سالی آمریکا<sup>۱</sup> ارائه شده استفاده شد. نکته کلیدی در استفاده از این روش در محاسبه شاخص EP-SPI این است که بازه مورد استفاده باید یک ماهه باشد. علت این امر آن است که در مقدار بارش مؤثر هر ماه، بارش n ماه مورد نظر قبل نیز گنجانده شده و چنانچه بازه مورد محاسبه در نرم افزار، n ماه باشد، در عمل 2n-1 ماه درگیر محاسبه می‌شوند و مقایسه صورت گرفته با شاخص اصلی SPI درست نیست. در ادامه به بیان نتایج پرداخته می‌شود.

## یافته‌ها

ابتدا تمام داده‌های موجود مشتمل بر ۱۰۳۰۶ داده بصورت زوجی در یک دستگاه مختصات رسم شد؛ نتیجه مطابق شکل (۲) با ضریب تعیین ۰٫۶۹۱ بدست آمد. از آنجا که روش محاسبه و داده‌های اولیه در دو روش یکی بوده، این نتیجه دور از انتظار نشان نمی‌داد.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۲: رگرسیون EP-SPI دوازده ماهه در مقابل SPI دوازده ماهه ایستگاه‌های مورد مطالعه

برای آزمودن همبستگی دو روش با استفاده از نرم افزار SPSS آزمون همبستگی روی داده‌ها صورت گرفت و نتیجه مطابق جدول (۱) ضریب همبستگی ۰٫۸۳۲ با معنی‌داری بسیار زیاد بدست آمد.

<sup>1</sup> National Drought Mitigation Center



**جدول ۱:** همبستگی دوروش SPI و EP-SPI دوازده ماهه در ایستگاه‌های ناحیه فراخشک

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	SPI12 & EP_SPI12	۱۰۳۰۶	.۸۳۲	.۰۰۰

مأخذ: نگارندگان

## آزمون‌های آماری

برای مقایسه دو روش SPI و EP-SPI نیازمند انجام آزمون‌های آماری هستیم. اگر داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند امکان استفاده از آزمون پارامتریک وجود دارد و در غیر این صورت باید از آزمون ناپارامتریک استفاده کنیم. یکی از روش‌های تعیین توزیع آماری داده‌ها آزمون کولموگروف-اسمیرنوف می‌باشد.

### ۱- آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۱</sup> نرمال بودن توزیع داده‌ها را مشخص می‌کنیم. جدول (۲) نتیجه این آزمون را برای مقادیر SPI و EP-SPI و اختلاف آنها نشان می‌دهد.

**جدول ۲:** آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای نرمال بودن داده‌ها

	Statistic	df	Sig.
SPI12	.۰۲۳	۱۰۳۰۶	.۰۰۰
EP_SPI12	.۰۱۴	۱۰۳۰۶	.۰۰۰
Delta12	.۰۴۹	۱۰۳۰۶	.۰۰۰

مأخذ: نگارندگان

در اینجا فرض صفر، نرمال بودن جامعه آماری برای هر یک از اختلافات است. با توجه به مقدار صفر برای Sig که از خطای  $\alpha=0.05$  کمتر است، توزیع مقادیر SPI و EP-SPI و اختلاف بین دو روش، نرمال نبوده از این رو برای انجام آزمون مقایسه‌ای بین میانگین آن دو از آزمون‌های زوجی ناپارامتری باید استفاده شود. یکی از آزمون‌های توصیه شده که اختلاف میانگین دو سری داده را در روش‌های ناپارامتری مشخص می‌کند «آزمون ویلکاکسون<sup>۲</sup>» است. در ادامه به توضیحات و نتایج این آزمون پرداخته می‌شود.

### ۲- آزمون ویلکاکسون رتبه علامت دار

آزمون ویلکاکسون رتبه علامت دار به منظور انجام بررسی دو نمونه وابسته یا انطباق بین دو نمونه به کار گرفته می‌شود. این آزمون را می‌توان مشابه آزمون t برای گروه‌های وابسته برای میانگین جامعه غیر نرمال، در نظر گرفت. هر چند این آزمون، ناپارامتری بوده و به توزیع داده‌ها بستگی ندارد ولی برای انجام این آزمون داده‌ها باید به صورت زوجی و

<sup>1</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>2</sup> Wilcoxon Signed Rank Test

از یک جامعه گرفته شده باشند، هر مؤلفه از زوج‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده و مستقل از نمونه‌های دیگر باشند و نوع یا مقیاس داده‌ها باید به صورت فاصله‌ای یا نسبی باشند تا بتوان تفاوت بین مقدار آن‌ها را بدست آورد و این تفاضل‌ها را رتبه‌بندی کرد. به این ترتیب باید مطمئن شد که تفاضل مقادیرهای زوج‌ها به صورت مقیاس ترتیبی باشند. جدول (۳) نتایج این آزمون را برای مقادیر SPI و EP-SPI دوازده ماهه نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج آزمون آماری ویلکاکسون رتبه علامت دار

الف) رتبه بندی

		N	Mean Rank	Sum of Ranks
EP_SPI12 - SPI12	Negative Ranks	۵۱۷۶a	۵۱۲۰.۶۷	۲۶۵۰۴۵۸۵.۵۰
	Positive Ranks	۵۰۴۸b	۵۱۰۴.۱۲	۲۵۷۶۵۶۱۴.۵۰
	Ties	۸۲c		
	Total	۱۰۳۰۶		

a. EP\_SPI12 < SPI12 b. EP\_SPI12 > SPI12 c. EP\_SPI12 = SPI12

ب) آزمون آماری

EP_SPI12 - SPI12	
Z	-۱.۳۳۸b
Asymp. Sig. (2-tailed)	.۲۱۶

a. Wilcoxon Signed Ranks Test b. Based on positive ranks

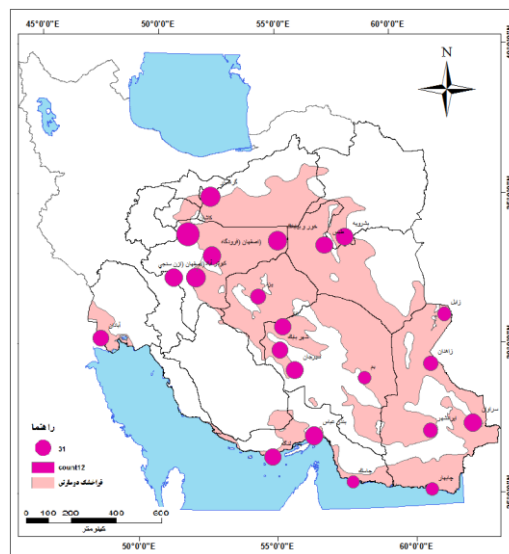
مأخذ: نگارندگان

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار احتمال (۰,۲۱۶) محاسبه شده بزرگتر از مقدار احتمال خطای نوع اول ( $\alpha=0.05$ ) است. از این رو فرض صفر که یکسان بودن دو روش بوده، در سطح خطای آزمون ۵٪ رد نمی‌شود و دو روش از نظر آماری تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ با یکدیگر ندارند. در ادامه به تفاوت دو روش و شرایطی که این تفاوت‌ها را ایجاد می‌نماید پرداخته می‌شود.

### موارد تفاوت با حداقل یک سطح جابه‌جایی شاخص خشک‌سالی (خشک‌سالی نهان)

در بررسی دوازده ماهه ۲۷ ایستگاه مورد مطالعه طی ۳۴ سال، خشک‌سالی نهان که SPI مثبت و EP\_SPI منفی بود، از ۱۰۳۰۶ واقعه دوازده ماهه، ۹۵۷ واقعه (۹/۳ درصد) خشک‌سالی نهان رخ داده که تعداد ۳۱۱ مورد اختلاف مقادیر شاخص SPI و EP-SPI بیش از ۱ بوده است. مقادیر اختلاف بیش از ۱ از آن جهت مورد توجه است که مبین حداقل یک سطح جابه‌جایی در طبقه‌بندی خشک‌سالی می‌باشد. به بیان دیگر در ۳۱۱ مورد اختلاف شاخص SPI مثبت شده درحالی‌که شاخص EP-SPI درجاتی از خشک‌سالی را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج بررسی کلی از موارد اختلاف ارائه می‌شود. ابتدا به بیان حادث‌ترین وقایع و بیشینه موارد اختلاف در هر ایستگاه می‌پردازیم.

مطابق بررسی صورت گرفته، تعداد واقعه با اختلاف بیش از ۱ بین ایستگاه‌های مورد بررسی از ۶ تا ۲۲ مورد در نوسان بود. کمترین تعداد اختلاف مربوط به ایستگاه‌های جاسک در استان هرمزگان و چابهار در استان سیستان و بلوچستان با ۶ واقعه و بیشترین تعداد اختلاف مربوط به ایستگاه کاشان در استان اصفهان با ۲۲ واقعه به ثبت رسیده است. این مطلب در شکل (۳) مشاهده می‌شود. در جدول (۴) اطلاعات کلی به تفکیک استان ارائه شده است. توزیع درجات خشک‌سالی به روش EP-SPI و تعداد مورد اختلاف هر درجه خشک‌سالی با اختلاف بیش از ۱ با روش SPI مورد کاوش قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۳: تعداد وقایع دوازده ماهه با اختلاف بیش از ۱ EP-SPI از SPI در ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۴: اطلاعات استانی خشک‌سالی ۱۲ ماهه به روش EP-SPI

استان	تعداد ایستگاه	تعداد اختلاف SPI و EP-SPI	تعداد نسبی	کمینه اختلاف	میانگین اختلاف	بیشینه اختلاف
اصفهان	۵	۸۲	۱۶	۱	۱,۳۸	۲,۷
سمنان	۲	۳۰	۱۵	۱	۱,۶۸	۳,۷
خراسان جنوبی	۲	۲۳	۱۲	۱	۱,۳۳	۱,۹
خوزستان	۲	۲۲	۱۱	۱	۱,۴۶	۲,۲
هرمزگان	۶	۶۰	۱۰	۱	۱,۳۸	۲,۵
کرمان	۴	۴۰	۱۰	۱	۱,۳۲	۲,۸
یزد	۱	۱۰	۱۰	۱,۱	۱,۸۵	۳,۲
سیستان و بلوچستان	۵	۴۴	۹	۱	۱,۲۳	۲,۱
کل محدوده	۲۷	۳۱۱	۱۲	۱	۱,۴۵	۳,۷

مأخذ: نگارندگان

**جدول ۵:** توزیع درجه خشک‌سالی ۱۲ ماهه به روش EP-SPI\*

محدوده EP-SPI	درجه خشک‌سالی	تعداد مورد اختلاف بیش از ۱ با SPI	حداقل سطح جابه‌جایی شاخص
۰ تا -۰/۹۹	خفیف یا ملایم	۲۵۵	یک سطح
-۱/۴۹ تا -۱/۰	متوسط	۴۴	دو سطح
-۱/۹۹ تا -۱/۵	شدید	۱۰	سه سطح
کمتر از -۲	بسیار شدید یا حاد	۲	چهار سطح

مأخذ: نگارندگان

\* طبقه‌بندی بر اساس شاخص SPI مک کی و همکاران، ۱۹۹۳

مطابق جدول (۵) در ۵۶ مورد از وقایع درجه خشک‌سالی ۲ تا ۴ سطح اختلاف با SPI داشته که نشانگر وجود خشک‌سالی نهان در مناطق مورد مطالعه بوده است. همچنین این ۳۱۱ مورد اختلاف جدول (۵)، طی ۱۱۰ تاریخ مجزا ثبت شده که جدول (۶) توزیع ماهیانه این این وقایع را نشان می‌دهد.

**جدول ۶:** توزیع ماهانه تعداد ایستگاه-ماه با اختلاف بیش از ۱ روش EP-SPI با SPI ۱۲ ماهه

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
تعداد	۴	۶	۴	۱	۲	۲	۱۰	۱۸	۱۶	۲۰	۱۸	۹
میانگین اختلاف	۱.۲۳	۱.۳۰	۱.۳۱	۱.۴۲	۱.۲۶	۱.۱۵	۱.۱۱	۱.۳۲	۱.۴۵	۱.۴۵	۱.۴۷	۱.۳۵

مأخذ: نگارندگان

همانطور که دیده می‌شود، ۸۳ درصد این اختلاف‌ها در ماه‌های مهر تا اسفند بروز می‌کند و به لحاظ میانگین، اختلاف در بهمن ماه شدیدتر است. با عنایت به اهمیت موارد بسیار شدید، ۲ واقعه حاد مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. این واقعه در استان سمنان در تاریخ بهمن ۱۳۷۵ به وقوع پیوسته است. با نگاهی به مقادیر اختلاف مشخص می‌شود که در این ۲ ایستگاه درجه خشک‌سالی حداقل ۴ سطح جابه‌جا شده است. جدول (۷) تاریخ وقوع حادثه‌ترین ایستگاه‌های درگیر و جزئیات آن را نشان می‌دهد.

**جدول ۷:** وقایع خشک‌سالی ۱۲ ماهه بسیار شدید به روش EP-SPI

تاریخ	نام ایستگاه	استان	EP-SPI	SPI	اختلاف
بهمن ۷۵	گرمسار	سمنان	-۳/۰۱	۰/۶۷	۳/۶۸
بهمن ۷۵	سمنان	سمنان	-۲/۲۱	۱/۴۳	۳/۶۴

مأخذ: نگارندگان

در ادامه به بررسی ۱۲ ماهه حادثه‌ترین وقایع ترسالی شاخص SPI از ۳۱۱ مورد اختلاف بیش از ۱ می‌پردازیم. جدول (۸) توزیع درجات ترسالی به روش SPI و تعداد مورد اختلاف بیش از ۱ با روش EP-SPI در هر سطح را نشان می‌دهد. با عنایت به اهمیت موارد بسیار شدید، ۴ واقعه مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. جدول (۹) تاریخ وقوع و ایستگاه‌های درگیر را نشان می‌دهد.

**جدول ۸:** توزیع درجات ترسالی ۱۲ ماهه به روش SPI\*

محدوده SPI	درجه ترسالی	تعداد مورد اختلاف	حداقل سطح جابه جایی شاخص
۰ تا ۰/۹۹	خفیف یا ملایم	۲۳۶	یک سطح
۱/۴۹ تا ۱/۰	متوسط	۵۴	دو سطح
۱/۹۹ تا ۱/۵	شدید	۱۷	سه سطح
بیشتر از ۲	بسیار شدید	۴	چهار سطح

مأخذ: نگارندگان

\* طبقه بندی شاخص SPI بر اساس لوید هیوز و ساندرز (۲۰۰۲)

این ۴ واقعه در استان های سمنان، هرمزگان و کرمان طی ۳ تاریخ به وقوع پیوسته که ۳ واقعه از ۴ مورد در ماه آذر دیده شده است. با نگاهی به مقادیر اختلاف مشخص می شود که در این ۴ واقعه شاخص خشک سالی حداقل ۴ سطح جابه جا شده است. این مطلب لزوم بازنگری در استفاده از روش SPI دوازده ماهه را در مناطق فراهشک بیش از پیش مشخص می کند.

**جدول ۹:** وقایع ترسالی ۱۲ ماهه بسیار شدید به روش SPI با اختلاف بیش از ۱ با EP-SPI

تاریخ	نام ایستگاه	SPI	EP-SPI	اختلاف
آذر ۱۳۷۵	سمنان	۲/۰۸	-۰/۱۸	۲/۲۶
دی ۱۳۷۵	سمنان	۲/۱۲	-۱	۳/۱۲
آذر ۱۳۷۵	جزیره سیری	۲/۳۹	-۰/۱	۲/۴۹
آذر ۱۳۷۲	سیرجان	۲/۰۱	-۰/۷۶	۲/۷۷

مأخذ: نگارندگان

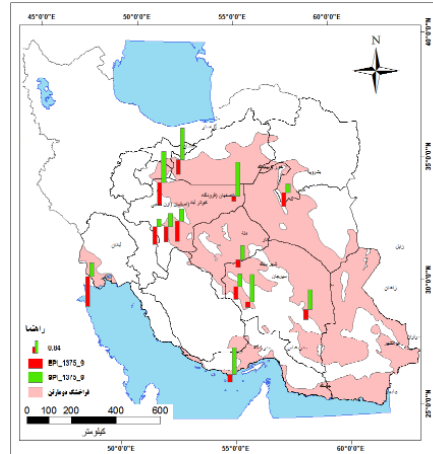
همانطور که در بالا گفته شد، در بررسی وقایع ۱۲ ماهه اختلاف بیش از ۱ بین دو روش SPI و EP-SPI در ۱۱۰ ماه دیده شد. در برخی از این ماهها اختلاف تنها در یک ایستگاه مشاهده شده بود و در برخی اختلاف دو روش بطور فراگیر در چندین ایستگاه دیده می شود. وقایعی با بیش از ۱۰ ایستگاه مشترک در مجموع ۵ رخداد را به خود اختصاص می دهند که شرح آن در جدول (۱۰) آمده است.

**جدول ۱۰:** تعداد وقایع ۱۲ ماهه فراگیر و ایستگاه های بیشینه

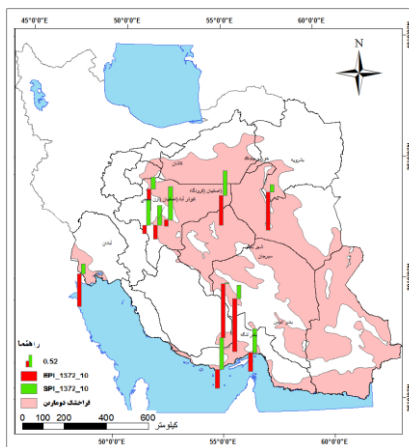
ایستگاه بیشینه	بیشینه اختلاف	تعداد ایستگاه	ماه	سال
کاشان	۲۶۹	۱۷	۹	۷۵۳۱
سیرجان	۲۰۷	۱۴	۹	۷۲۳۱
سیرجان	۲	۱۳	۹	۷۷۳۱
یزد	۲۳۴	۱۰	۹	۷۸۳۱

مأخذ: نگارندگان

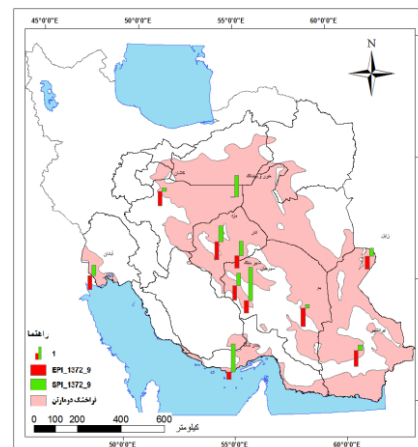
شکل (۴) موقعیت این ایستگاه‌ها و مقادیر اختلاف دو روش در وقایع فراگیر با ۱۰ ایستگاه و بیشتر در هر واقعه را نشان می‌دهد. در هر یک از نقشه‌های شکل (۴) مطابق راهنمای نقشه نمودار میله‌ای سبز رنگ نشان دهنده مقدار شاخص SPI دوازده ماهه و نمودار میله‌ای قرمز رنگ نشان دهنده مقدار شاخص EP-SPI دوازده ماهه می‌باشد.



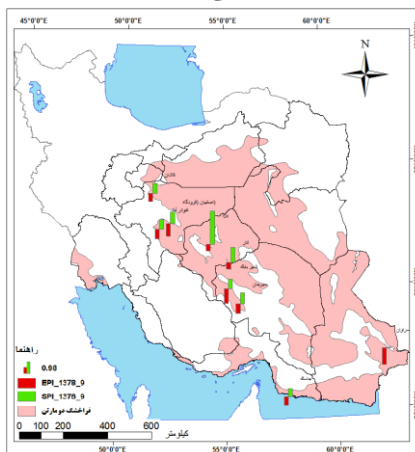
(الف)



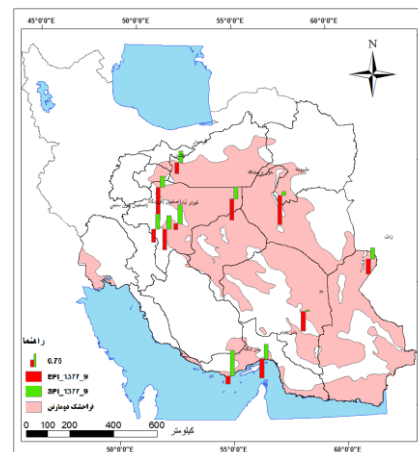
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

مأخذ: نگارندگان

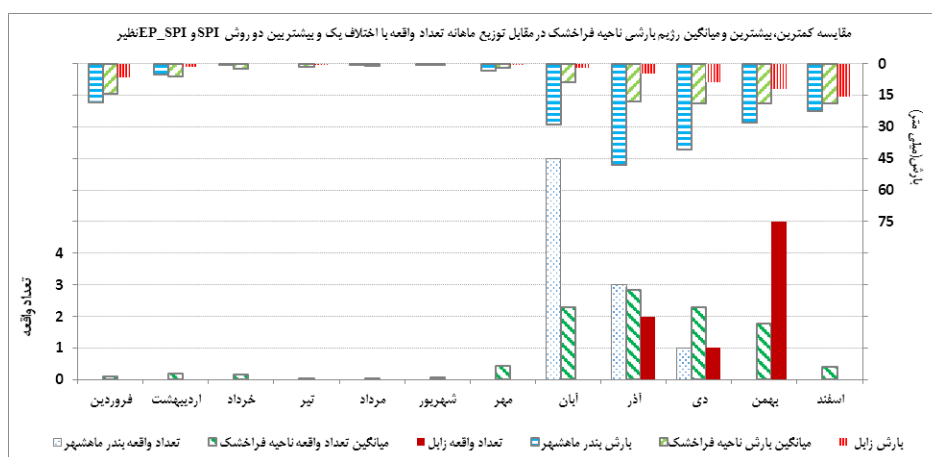
شکل ۴: ایستگاه‌های هم واقعه دوازده ماهه منتهی به الف) آذر ۱۳۷۵ (ب) آذر ۱۳۷۲ (ج) دی ۱۳۷۲ (د) آذر ۱۳۷۷ (ه) آذر ۱۳۷۸

از ۵ تاریخی که اختلاف SPI و EP-SPI به صورت فراگیر در ۱۰ تا ۱۷ ایستگاه مشاهده شده، ۴ واقعه در آذر، ۱ واقعه در دی بوده است. همچنین ایستگاه کاشان و گرمسار به ترتیب در ۲۲ و ۱۶ واقعه با اختلاف بیش از یک دیده شده‌اند.

در نگاه کلی اختلاف بارش‌ها از سالی به سال دیگر بیشتر در ابتدا یا انتهای فصل بارش، مقادیر SPI را تحت تأثیر زیاد قرار داده است. در حالی که در روش EP-SPI اثر آنها با گذشت زمان میرا شده و برداشت بهتری از وضعیت واقعی منطقه ارائه کرده است. در ادامه به ذکر تحلیل نتایج از زاویه رژیم بارشی ایستگاه‌های مورد مطالعه و بررسی یک واقعه شاخص با جزئیات بیشتر پرداخته می‌شود.

### رژیم‌های بارشی در اقلیم فراخشک

از آنجا که اختلاف دو روش SPI و EP-SPI در ماه‌های پربارش بیش از سایر ماه‌ها به چشم می‌خورد، این سؤال در ذهن شکل می‌گیرد که آیا رژیم بارشی در این مناطق از الگوی خاصی تبعیت می‌کند که باعث به وجود آمدن این اختلاف می‌شود؟ جهت بررسی بیشتر موضوع، کمترین، بیشترین و میانگین رژیم بارشی در اقلیم فراخشک ایران در شکل (۵) نشان داده شده است.



مأخذ: نگارندگان

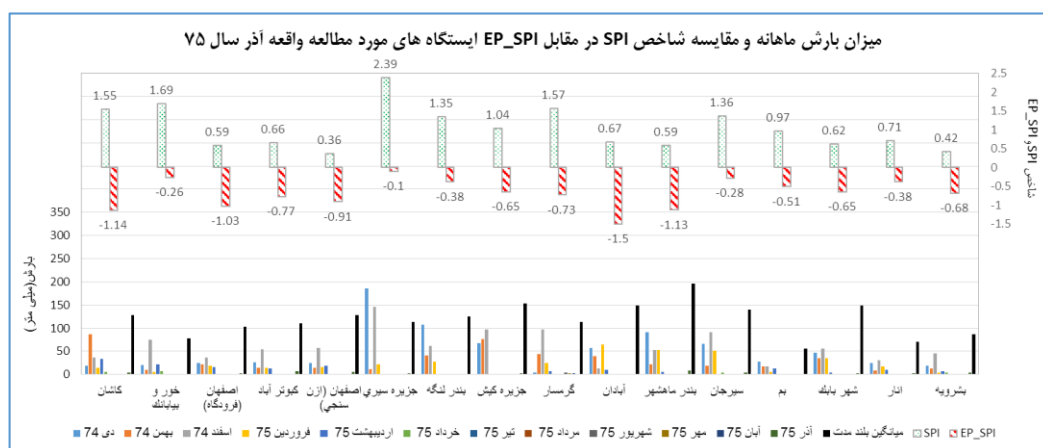
**شکل ۵:** مقایسه کمترین، بیشترین و میانگین رژیم بارشی ناحیه فراخشک در مقابل توزیع ماهانه تعداد واقعه با اختلاف یک و بیشتر بین دو روش SPI و EP-SPI نظیر

همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین و کمترین بارش سالانه در این ۲۷ ایستگاه، به ترتیب مربوط به ایستگاه بندرماهشهر با مقدار ۱۹۶ میلی‌متر و زابل با مقدار ۵۱/۷ میلی‌متر به ثبت رسیده است. بارش‌های بیش از ۱۰ میلی‌متر بطور میانگین در ماه‌های آذر تا فروردین دیده می‌شود. با مقایسه رژیم بارشی ناحیه فراخشک مشخص شد که الگوی بارشی نسبت به توزیع ماهانه تعداد واقعه با اختلاف یک و بیشتر بین روش SPI با EP-SPI دوازده ماهه با یک ماه

تأخیر از هماهنگی خوبی برخوردار بوده است. این بدان علت است که ماه بیشینه بارش (در بندرماهشهر آذر ماه و در زابل اسفند ماه) منطبق بر ماه یازدهم قبل از ماه مورد بررسی می‌باشد. از آنجا که در روش حاضر کمترین اثر بارشی به ماه یازدهم پسین داده شده این اختلاف در یازده ماه بعد (بندرماهشهر ماه آبان و زابل بهمن ماه) بیشتر نمود پیدا می‌کند.

### تحلیل واقعه فراگیر آذر سال ۱۳۷۵

در بررسی دوازده ماهه بطور نمونه به بررسی گسترده‌ترین این وقایع که در آذر سال ۱۳۷۵ اتفاق افتاده است، پرداخته می‌شود. در این واقعه در ۱۶ ایستگاه اختلاف بیش از یک بین مقادیر دو شاخص SPI و EP\_SPI دوازده ماهه مشاهده شد. نمودار (۳) میزان دو شاخص SPI و EP\_SPI دوازده ماهه در مقابل بارش ماهانه آذر سال ۱۳۷۵ و یازده ماه قبل از آن را در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. ایستگاه کاشان با مقدار ۲/۶۹ بیشترین اختلاف دو روش SPI و EP\_SPI را به خود اختصاص داده است که معادل چهار سطح جابجایی شاخص خشک‌سالی از ترسال شدید به خشک‌سال متوسط می‌باشد. همچنین کمترین اختلاف مربوط به ایستگاه انار با مقدار ۱/۰۹ است که معادل یک سطح جابجایی شاخص خشک‌سالی می‌باشد. نکته مشترک بین تمام ایستگاه‌های نشان داده شده در این نمودار بارش چند برابر نرمال در ماه‌های دی تا اسفند و بارش ناچیز در آذر ماه می‌باشد. همچنین بارش فصل زمستان در ۵۵ درصد ایستگاه‌ها از میانگین بارش یک سال کامل بیشتر بوده است. در واقع در روش SPI این بارش‌ها باعث بالا رفتن مقدار شاخص دوازده ماهه شده است و با این وجود که بارش در ماه‌های خرداد تا آذر کمتر از نرمال بوده، مقدار شاخص مثبت شده است. این درحالی است که در روش جدید اثرات کمتری از بارش فصل زمستان گذشته در محاسبه خشک‌سالی دوازده ماهه آذر دخالت داده شده است.



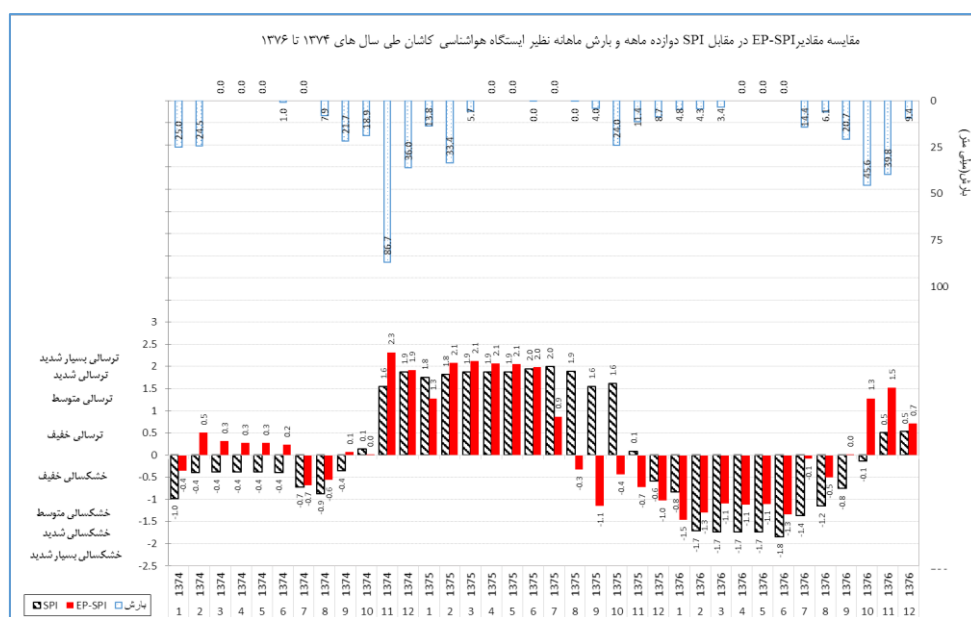
مأخذ: نگارندگان

شکل ۶: میزان بارش ماهانه و مقایسه شاخص SPI در مقابل EP\_SPI ایستگاه‌های مورد مطالعه واقعه آذر سال ۱۳۷۵

در اینجا برای روشن شدن مطلب بارش ماهانه ایستگاه کاشان از ابتدای سال ۷۴ تا انتهای سال ۱۳۷۶ آورده شده است (شکل ۶). در این نمودار علاوه بر بارش، شاخص SPI دوازده ماهه در کنار شاخص EP\_SPI ترسیم شده است. به



وضوح می‌توان دید که بارش  $۸۶/۷$  میلی‌متری در بهمن ماه سال  $۱۳۷۴$  مقدار هر دو شاخص را بالا برده و این بالا رفتن در شاخص EP-SPI سریع‌تر و شدیدتر بوده است. با گذشت زمان به علت ادامه بارش‌ها تا فروردین ماه، هر دو شاخص تا شهریور در همان حدود می‌مانند؛ اما در مهر ماه به علت تلاطم بی‌بارشی، شاخص EP-SPI نزدیک به  $۱/۱$  واحد افت می‌کند. این درحالی است که شاخص SPI این افت را به صورت پله‌ای در آذر و بهمن ماه و با دو تا چهار ماه تأخیر نشان می‌دهد. از این رو اختلاف دو شاخص در ماه‌های مهر تا دی بیش از یک واحد می‌باشد و در آذر ماه به اوج خود یعنی  $۲/۶۹$  می‌رسد. همانطور که ملاحظه می‌شود با وجود این بی‌بارشی ۵ ماهه قبل از آذر  $۱۳۷۵$  و بارش کم طی ۷ ماه خرداد تا آذر ماه، شاخص SPI همچنان بالای  $۱/۵$  است یعنی تر سالی شدید نشان می‌دهد! این درحالی است که این شاخص در ماه بهمن  $۱۳۷۵$  با وجود بارش مجموع به میزان  $۴۴/۱$  میلی‌متر از دی تا اسفند  $۱۳۷۵$  که  $۳۴$  درصد بارش نرمال سالانه است، شاخص همچنان پایین بوده و مقدار  $-۰/۶$  که مبین خشک‌سالی خفیف است را نشان می‌دهد که این حالت یکی دیگر از خطاهای این شاخص است که می‌توان از آن با عنوان تر سالی نپنهان یاد کرد. این حالت‌ها برای تمام ایستگاه‌های نشان داده شده در شکل (۷) قابل مشاهده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۷: مقایسه مقادیر EP-SPI در مقابل SPI دوازده ماهه و بارش ماهانه نظیر ایستگاه هواشناسی کاشان

## نتیجه‌گیری

هدف علمی این مقاله ارائه روش جدیدی جهت بررسی خشک‌سالی در مناطق فراخشک می‌باشد. این پژوهش به شناخت صحیح شدت و مدت خشک‌سالی در مرکز، جنوب و شرق ایران کمک می‌نماید.

در بررسی صورت گرفته روی بیشینه اختلاف EP-SPI با SPI دوازده ماهه ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقادیر اختلافی بیش از ۳ در استان‌های سمنان و یزد مشاهده شد. از این‌رو در این استان‌ها و وضعیت از ۱۶ استان دیگر حادث می‌باشد. همچنین ماه‌های آبان تا بهمن ۸۹ درصد بیشترین رکورد را در این ۲۷ ایستگاه به خود اختصاص دادند.

مطابق این بررسی الگوی بارشی، با توزیع ماهانه موارد اختلاف بیش از یک بین دو روش SPI و EP-SPI دوازده ماهه تا حدودی در اقلیم فراخشک منطبق است. از این‌رو با توجه به این که بیشترین اثر در بروز اختلاف بین دو روش SPI و EP-SPI دوازده ماهه از بارش‌های ۱۱ ماه قبل و بعد از آن به ترتیب از بارش ماه‌های دهم تا یک ماه قبل ایجاد می‌شود، این الگو در ماه‌های پربارش آذر تا بهمن و کم بارش خرداد تا مهر منطبق بر رژیم بارشی منطقه مورد نظر بوده و در ماه آبان به عنوان شروع فصل بارش و ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت با توجه به تنوع الگوی بارشی منطقه، به عنوان پایان فصل بارش، از انطباق کمتری برخوردار است.

بارش‌های با فاصله زمانی بیشتر نسبت به زمان مورد نظر، اختلاف بیشتری در محاسبه خشک‌سالی بین دو روش SPI و EP-SPI ایجاد می‌کند. در نگاه کلی اختلاف بارش‌ها از سالی به سال دیگر بیشتر در ابتدا یا انتهای فصل بارش، مقادیر SPI را تحت تأثیر زیاد قرار داده، در حالی که در روش EP-SPI اثر آنها با گذشت زمان میرا شده و برداشت بهتری از وضعیت واقعی منطقه ارائه کرده است. از این‌رو می‌توان گفت کارایی روش EP-SPI جهت آشکارسازی خشک‌سالی‌های نهان در بازه‌های زمانی طولانی، بهتر است.

هرچند مشابه این پژوهش تا این تاریخ یافت نشده، لیکن برخی از جمله رضایی و همکاران (۱۳۹۷) استفاده از توابع توزیع رایج به جای تابع توزیع برتر در تعیین شاخص SPI سالانه را باعث تغییر فراوانی و در نتیجه جابجایی طبقات مختلف خشک‌سالی در بیشتر ایستگاه‌ها می‌دانند. همچنین نادری و شیوخی سوغانلو (۱۳۹۹) مشاهده کردند اختلاف دو شاخص  $SPI_{mod}$  و SPI در ایستگاه‌های با آب و هوای خشک‌تر، آشکارتر است؛ بنابراین به این نتیجه رسیدند که استفاده از  $SPI_{mod}$  به جای SPI به دلیل حذف اثرات فصلی بارش، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج دو پژوهش فوق همخوانی داشته است.

در این پژوهش مشخص شد که ۹/۳ درصد از وقایع خشک‌سالی دوازده ماهه در آب و هوای فراخشک از دید شاخص SPI پنهان مانده است. با توجه به ارقام مرگ و میر و خسارت‌های مالی<sup>۱</sup> ناشی از خشک‌سالی، آشکارسازی خشک‌سالی نهان می‌تواند در برنامه‌ریزی جهانی برای حفظ زندگی و کاهش خسارت مالی، مؤثر واقع گردد.

<sup>۱</sup> - در جهان ۱۹۴۴۶۵۳ مرگ و میر ناشی از حوادث جوی و اقلیمی به ثبت رسیده که از این تعداد، خشک‌سالی با ۳۵ درصد در میان دیگر بلایای جوی و اقلیمی در جایگاه دوم بعد از طوفان قرار دارد. طی این سال‌ها مبلغ ۲۳۹۰٫۷ میلیارد دلار خسارات وارده از حوادث جوی و اقلیمی در دنیا گزارش شده که خشک‌سالی با ۸ درصد در میان دیگر بلایای جوی و اقلیمی در جایگاه سوم بعد از طوفان و سیل قرار دارد. (اطلس مرگ و میر و تلفات اقتصادی از شرایط هواشناسی، آب‌وهوا و آب (۲۰۱۲-۱۹۷۰) سازمان هواشناسی جهانی)

حدود ۵۵ میلیون نفر در جهان سالانه تحت تأثیر خشک‌سالی قرار دارند و این تقریباً جدی‌ترین خطر برای دام و محصولات زراعی در همه نقاط جهان است. طبق گزارش گروه بلندپایه سازمان ملل و بانک جهانی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۸، خشک‌سالی معیشت مردم را تهدید می‌کند، خطر بیماری و مرگ را افزایش می‌دهد و به مهاجرت گسترده دامن می‌زند. کمبود آب ۴۰٪ از جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه خشک‌سالی تا سال ۲۰۳۰، ۷۰۰ میلیون نفر در معرض خطر آواره شدن هستند. (پورتال سازمان بهداشت جهانی<sup>۲</sup>-تاریخ نقل قول: ژوئن ۲۰۲۱). همچنین در اجرای بند ۳۳ سند ۲۰۳۰ نظارت و مدیریت خشک‌سالی برای کاهش خطر فاجعه ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و اهداف توسعه پایدار ضروری می‌باشد. از این‌رو لازمه برنامه‌ریزی صحیح، داشتن اطلاعات دقیق از حوزه مدیریتی ذیربط است. عدم توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و پنهان ماندن خشک‌سالی‌های نهان که جایجایی سطوح مختلف خشک‌سالی را به همراه داشته است؛ موجب تشدید خسارات در بخش‌های کشاورزی، منابع آب و مراتع می‌شود. علاوه بر این عدم توجه به خشک‌سالی‌های نهان باعث ضعف در برنامه‌ریزی برای پوشش مناسب بیمه محصولات کشاورزی به علت عدم انطباق مستندات موجود با شرایط واقعی شده و سردرگمی مسئولین در تخصیص درست منابع را به دنبال خواهد داشت. از این‌رو استفاده از شاخص EP-SPI به‌خصوص در بازه‌های طولانی انطباق بهتری با شرایط واقعی داشته و مسئولان را در راستای برنامه‌ریزی صحیح طرح‌های مقابله و سازگاری با خشک‌سالی یاری می‌کند.

## منابع

- ۱- آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی کشور.
- ۲- بابایی فینی، ام‌السلمه؛ علیجانی، بهلول (۱۳۹۲): تحلیل فضایی خشک‌سالی‌های بلندمدت ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۳: ۱-۱۲.
- ۳- رضایی، حسین؛ خان‌محمدی، ندا؛ منتظری، مجید؛ و بهمنش، جواد (۱۳۹۷): ارزیابی انتخاب تابع توزیع احتمالاتی مناسب در استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی SPI و RDI. نشریه دانش آب‌وخاک، جلد ۲۸ شماره ۱: ۴۰ - ۲۹.
- ۴- حمصی، ملیحه‌سادات؛ یاراحمدی، داریوش؛ اونق، مجید؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر (۱۳۹۸): ارزیابی تغییر اقلیم و کاربری زمین و ارائه برنامه پیشنهادی آمایش کم‌کربن در حوضه آبخیز دشت کاشان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۱(۴): ۶۱۳-۶۳۲.
- ۵- غریب، معصومه؛ حسینی، عزت‌اله (۱۳۸۸): بررسی منحنی‌های آمبروترمیک در تفسیر پدیده خشک‌سالی (مطالعه موردی استان سمنان سال ۱۳۸۴)؛ پنجمین همایش علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. گرگان، قابل دسترس از: <https://civilica.com/doc/87078>
- ۶- فاضل‌دهکردی، لیلیا؛ آذرینوند، حسین؛ زارع‌چاهوکی، محمدعلی؛ محمودی‌کهن، فرهاد؛ و خلیقی‌سیگارودی، شهرام (۱۳۹۵): پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI (مطالعه موردی: مراتع استان ایلام). منابع طبیعی ایران، ۱۵۴: ۱-۱۴۱.

<sup>1</sup> United Nations/World Bank High Level Panel on Water (HLPW)

<sup>2</sup> World Health Organization, health-topics/drought (cited: Jun 2021)

<sup>۲</sup>- بند ۳۳ دگرگون ساختن جهان ما (دستورکار ۲۰۳۰ یونسکو برای توسعه پایدار)

- ۷- فرج زاده، منوچهر؛ موحد دانش، علی‌اصغر؛ قائمی، هوشنگ (۱۳۷۵): خشک‌سالی در ایران با استفاده از شاخص‌های آماری. مجله دانش کشاورزی جلد ۵.
- ۸- کردوانی، پرویز (۱۳۸۰): خشک‌سالی و راه‌های مقابله با آن در ایران. موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران.
- ۹- مجردی، برات؛ میری، جواد؛ علیزاده، حسین (۱۳۹۹): ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI با استفاده از شاخص بارش استاندارد اصلاح شده MSPI به‌منظور پایش و پهنه‌بندی خشک‌سالی؛ مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۳).
- ۱۰- مجیدی، علی‌اکبر؛ رادفر، مهدی؛ میرعباسی نجف‌آبادی، رسول؛ و معروفی، صفر (۱۳۹۷): "گزارش فنی" تحلیل روند خصوصیات خشک‌سالی‌های هواشناسی استان همدان. پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز. ۹(۱۷): ۲۹۵-۳۰۵.
- ۱۱- نادى، مهدى؛ شیوخى سوغانلو، سعید (۱۳۹۹): مقایسه نمایه‌های SPI و SPI<sub>mod</sub> در پایش خشک‌سالی چند نمونه اقلیمی ایران. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز سال یازدهم، شماره ۱۲، بهار و تابستان ۱۳۹۹: ۱۱۸ تا ۱۰۸.

- 12- Bonsal, B.R., Wheaton, E.E., Chipanshi, A.C., Lin, C., Sauchyn, D.J. And Wen, L. (2011): Drought Research In Canada: A Review. Atmosphere-Ocean, No. 49(4): 303-319.
- 13-Byun, H.R. And Wilhite, D.A. (1999): Objective Quantification Of Drought Severity And Duration. Journal Of Climate, 12(9), Pp. 2747-2756.
- 14-Cheval, Sorin. (2015): The Standardized Precipitation Index – An Overview, Romanian Journal Of Meteorology, Vol. 12, Issues 1-2, Pp. 17-64.
- 15-Farajzadeh, M., Movaheddanesh, A.A., Ghaemi, H. (1996): Drought In Iran Using Statistical Indicators. Journal Of Agricultural Knowledge Volume 5. (In Persian).
- 16-Gharib, M., Hosseini, E. (2009): A Study Of Ambrothermic Curves In The Interpretation Of Drought Phenomenon (Case Study Of Semnan Province, 2005); Fifth Iranian Conference On Watershed Management Science And Engineering. Gorgan, Available From: <https://Civilica.Com/Doc/87078>. (In Persian).
- 17-Hayes, M. J. (2000): 'Revisiting The SPI: Clarifying The Process', Drought Network News (Newsletter Of IDIC And NDMC), Vol. 12, No. 1, Pp. 13-14.
- 18-Hayes M, Svoboda M, Wall N, Widham M. (2011): The Lincoln Declaration On Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. Bulletin Of The American Meteorological Society 92(4): 485-488.
- 19-Karavitis CA, Alexandris S, Tsesmelis DE, Athanasopoulos G. (2011): Application Of The Standardized Precipitation Index (SPI) In Greece. Water 3: 787-805.
- 20-Kardavani, P. (2002): Drought And Ways To Deal With It In Iran. Institute Of Printing And Publishing, University Of Tehran. (In Persian).
- 21-Koutroulis, Aristeidis G., Aggeliki-Eleni K. Vrohidou, And Ioannis K. Tsanis. (2010): Spatiotemporal Characteristics Of Meteorological Drought For The Island Of Crete, Journal Of Hydrometeorology, 206, Vol. 12.
- 22-Kao, S.C. And R.S. Govindaraju. (2010): A Copula-Based Joint Deficit Index For Droughts. Journal Of Hydrology, 380: Pp. 121-134.
- 23-Lloyd-Hughes B, Saunders MA. (2002): Seasonal Prediction Of European Spring Precipitation From El Niño-Southern Oscillation And Local Sea-Surface Temperatures. International Journal Of Climatology 22: Pp. 1-14.
- 24-Mckee T.B., Doesken N .J., And Kleist J. (1993): The ReLationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales. Proceedings Of The 8th Conference On Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston: Pp. 179-184.
- 25-Majidi, A.A., M. Radfar, R. Mirabbasi Najafabadi And S. Marofi. (2018): "Technical Report" Analysis Of The Trend Of Meteorological Drought Characteristics In Hamadan Province. Watershed Management Research Journal. 9 (17): Pp. 295-305. (In Persian).
- 26-National Drought Mitigation Center. [Cited 2019 Aug]: Available From:

- <https://Drought.Unl.Edu/Droughtmonitoring/SPI/Spiprogram.aspx>.
- 27- Redmond, K.T. (2002): The Depiction Of Drought: A Commentary, Bulletin Of The American Meteorological Society, No. 83: Pp. 1143-1147.
- 28- United Nations. (2015): General Assembly Resolution A/RES/70/1. Transforming Our World, The 2030 Agenda For Sustainable Development. [Cited 2016 Feb 10]: Available From: [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E).
- 29- United Nations/World Bank High Level Panel On Water. (2018): Outcome Document, Making Every Drop Count, An Agenda For Water Action, Pp. 34.
- 30- Vicente-Serrano M Sergio, Gonzalez-Hidalgo Carllose Jose, Luis De Martin And Raventos Jose. (2004): Drought Patterns In The Mediterranean Area: The Valencia Region (Eastern Spain), Climate Research, 26, Pp 5-15.
- 31- World Health Organization, Health-Topics, Drought. [Cited 2021 Jun]: Available From: [https://www.who.int/health-topics/drought#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/drought#tab=tab_1).
- 32- WMO. (2014): Atlas Of Mortality And Economic Losses From Weather, Climate, And Water Extremes (1970-2012), Vol. 1123 Of WMO, 44.
- 33- Zuo, Dongdong, Wei Hou, Hao Wu, Pengcheng Yan, And Qiang Zhang. (2021): "Feasibility Of Calculating Standardized Precipitation Index With Short-Term Precipitation Data In China" Atmosphere 12, No. 5: Pp. 603.