

ارزیابی تغییرات خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های SPEI و SC-PDSI

راضیه خیری^۱، فیروز مجرد^{۲*}، جعفر معصوم‌پور^۳، بهمن فرهادی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی
- ۲- دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی
- ۳- دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی
- ۴- استادیار آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی

دریافت: ۹۹/۷/۱۲ پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۶

چکیده

باتوجه به قرارگیری کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، مطالعه پدیده خشکسالی به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی گسترده با اثرگذاری درازمدت، در بخش‌های مختلف بسیار اهمیت دارد. در این مطالعه، ابتدا خشکسالی با استفاده از دو شاخص خودتنظیم پالمر (SC-PDSI) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در چهار دوره ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در ۱۰۱ ایستگاه کشور و در یک دوره زمانی ۲۴ ساله (۱۹۹۲-۲۰۱۵) بررسی شد. پس از محاسبه مقادیر شاخص‌ها، درصد سال‌های توأم با هر طبقه خشکسالی محاسبه و نتایج با داده‌های شبکه‌ای دو پایگاه جهانی داده خشکسالی مقایسه شد. نتایج نشان داد که براساس محاسبات، در هر دو شاخص بیشترین درصد سال‌ها تحت‌سیطره طبقه نرمال با تمرکز هسته‌های بیشینه نرمال در نیمه شرقی کشور و کمترین درصد سال‌ها در طبقه خشکسالی بسیار شدید با تمرکز هسته‌های بیشینه در نیمه غربی، مرکز و جنوب کشور بوده است. آغاز دوره خشکسالی در شاخص SC-PDSI، سال ۱۹۹۹ و در دوره‌های زمانی چهارگانه شاخص SPEI، سال-های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ بوده است. خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید در بخش‌هایی از کشور که از وضعیت بارشی نسبتاً مناسب‌تری برخوردار هستند، اتفاق افتاده است. مقایسه نتایج محاسبات با ۹۹ نقطه اخذ شده از دو پایگاه داده نشان داد که در هر دو شاخص، پایگاه داده خشکسالی را شدیدتر از آنچه که هست، نشان داده است و باوجود هماهنگی زمانی مناسب، هماهنگی مکانی در شدت‌های مختلف



خشکسالی وجود ندارد. برپایه یافته‌های این پژوهش، مناطق مستعد خشکسالی در کشور برای تنظیم برنامه‌های کلان مقابله با این مخاطره قابل‌شناسایی است.
واژگان کلیدی: خشکسالی، ایران، شاخص SPEI، شاخص SC-PDSI.

۱- مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های حدی اقلیمی است که در تمام مناطق جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با شدت‌های مختلف اتفاق می‌افتد و اثرات زیان‌باری بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، کشاورزی، شرایط اقتصادی و به‌طور کلی، تمام جنبه‌های حیات به‌جای می‌گذارد. خشکسالی هم یک مخاطره است و هم یک فاجعه؛ مخاطره است به این دلیل که به‌طور غیرقابل‌پیش‌بینی اتفاق می‌افتد و بخشی از تغییرپذیری طبیعی سیستم آب‌وهوایی است و فاجعه است چون با کاهش رژیم بارش در رابطه است و به کاهش ذخیره آب برای اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی و همچنین دیگر فعالیت‌های انسانی منجر می‌شود (Paulo & et-al, 2012: 1481). خشکسالی و پیامدهای نامطلوب آن برای منابع طبیعی، تولیدات کشاورزی، توسعه اقتصادی و اجتماعی یکی از چالش‌های اساسی ایران و سایر مناطق مستعد خشکسالی است و باتوجه به فراوانی وقوع و گستره قابل‌توجه آن، سازکارهای جهت‌دار برای مقابله با آن ضروری است (سواری و اسکندری دامنه، ۱۳۹۸: ۱۲۶). براساس گزارش سازمان ملل، در آینده نزدیک ۱۸ کشور جهان با کمبود آب مواجه خواهند شد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵، بیش از دوسوم جمعیت جهان در شرایط کمبود جدی آب قرار بگیرند (شعبانعلی فمی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۲). خشکسالی‌های اخیر در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته و اثرات همراه و مربوط به آن‌ها، به تأکید بر آسیب‌پذیری همه جوامع در برابر این خطر طبیعی منجر شده است (Wilhite & et-al, 2007: 3). خشکسالی تأثیرات درازمدت در منابع آب، تولیدات کشاورزی و فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی دارد. در منابع مختلف، تعاریف گوناگونی از خشکسالی ارائه شده است. در یک تعریف جامع، خشکسالی به‌منزله یکی از مخاطرات طبیعی، عبارت است از کاهش غیرمنتظره بارش در مدتی معین، نسبت به میانگین درازمدت (علیجانی و کاویانی، ۱۳۹۸: ۲۵۸).

مطالعه خشکسالی را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد. در دسته اول، علل خشکسالی بررسی می‌شود و هدف درک بهتر گردش جوی منجر به وقوع خشکسالی است. در دسته دوم، فراوانی و شدت خشکسالی به‌منظور تعیین احتمال وقوع خشکسالی‌ها با بزرگی‌های مختلف بررسی می‌شود. در دسته سوم تلاش می‌شود تا اثرات خشکسالی توصیف و تشریح شوند. این دسته، بر موضوع هزینه‌ها و خسارات خشکسالی متمرکز است. خسارات فوق ممکن است به انواع

اقتصادی، اجتماعی یا محیطی تقسیم شوند و همچنین، مستقیم یا غیرمستقیم باشند. دسته‌نهایی و چهارم به پاسخ‌ها، راهکارهای مناسب کاهش اثرات و نیز راهکارهای آمادگی اختصاص دارد و بر کاهش اثرات بد خشکسالی تمرکز می‌کند (Byun & Wilhite, 1999: 2747).

شاخص‌های متعددی به‌منظور بررسی خشکسالی از ابعاد گوناگون ارائه شده‌اند که در آن‌ها، از عناصر مختلفی برای تعیین خشکسالی استفاده شده است. دو عامل کلیدی در تعیین وقوع و شدت خشکسالی، بارش و تبخیر و تعرق است. مطالعات گذشته نشان داده است که استفاده از شاخص‌های فقط مبتنی بر عنصر بارش برای بررسی عمومی خشکسالی مناسب است (Blekinsop & Fowler, 2007: 54). هرچند بارندگی نقش ویژه‌ای در تغییرات زمانی خشکسالی ایفا می‌کند، تأثیر درجه حرارت معنی‌دار است و موجب تشدید پدیده خشکسالی و درنهایت، کاهش شدیدتر منابع آب می‌شود (نصرتی، ۱۳۹۳: ۷۱). پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلفی انجام می‌شود که از متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق بهره می‌گیرند. از جمله می‌توان به شاخص‌های شدت خشکسالی پالمر و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده اشاره کرد.

در حال حاضر، از شاخص شدت خشکسالی خودتنظیم پالمر^۱ (SC-PDSI) و شاخص بارندگی استاندارد شده^۲ (SPI) در پایش خشکسالی جهانی و منطقه‌ای به‌طور گسترده استفاده می‌شود و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده^۳ (SPEI) در حال تبدیل شدن به یک شاخص متداول برای ارزیابی خشکسالی است (Wang & et-al, 2015: 282). از مزایای استفاده همزمان از چند شاخص در مطالعه خشکسالی این است که می‌توان به نقاط قوت و ضعف هریک از شاخص‌ها پی برد.

باتوجه به کم بودن داده‌های مورد نیاز SPEI، تسهیل و انعطاف‌پذیری محاسبه آن و در نظر گرفتن دو عنصر اصلی که شدت خشکسالی را تعیین می‌کند (مانند بارش و میزان تقاضای تبخیر جوی)، دلایل محکمی برای توصیه استفاده از آن در مقایسه با سایر شاخص‌های خشکسالی وجود دارد (Vicente-Serrano & et-al, 2012: 22).

شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری خشکسالی است. ویژگی بارز آن اندازه‌گیری خشکسالی با مقیاس زمانی طولانی است. PDSI که در سال ۱۹۶۵ معرفی شد، به‌طور مداوم توسط محققان مختلف بهبود یافت و درنهایت، شاخص خودتنظیم پالمر توسط ولز و همکاران ارائه شد و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای مقایسه مکانی و پایش وقایع خشک و

1. Self-calibrating Palmer Drought Severity Index
2. Standardized Precipitation Index
3. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index



مرطوب را فراهم کرد. شاخص SPEI با ترکیب بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، می‌تواند بیلان آب اقلیمی را بهتر نشان دهد (1Zhao & et-al, 2015):

مطالعات مربوط به خشکسالی فراوان است و در هریک، بر جنبه‌های مختلفی از خشکسالی تأکید شده یا از شاخص‌های مختلف مطالعه خشکسالی استفاده شده است. دوستان (۱۳۹۸) با بررسی ۴۰۳ مقاله علمی- پژوهشی در زمینه مطالعه خشکسالی در ایران دریافت که عمده تحقیقات (۷۸ درصد) به رخداد دوره‌های خشکسالی با شدت‌های مختلف در نواحی مختلف ایران در چند دهه اخیر توجه کرده‌اند. ۱۱ درصد مقالات فوق به پیامدهای ناشی از این پدیده اقلیمی در بخش‌های مختلف آب، کشاورزی، آسیب‌های مختلف اجتماعی و ...، نزدیک به ۷ درصد آن‌ها به پیش‌بینی این پدیده با مدل‌های مختلف آماری و ۵/۲ و ۲ درصد به ترتیب به مدیریت و پهنه-بندی خشکسالی در مناطق مختلف ایران پرداخته‌اند.

قربانی و همکاران در تحلیل روند خشکسالی هواشناسی با استفاده از آزمون‌های من-کندال، سن و پتیت در اصفهان، به این نتایج دست یافتند که براساس آزمون پتیت در ۷۵ درصد ایستگاه‌ها، براساس آزمون سن در ۶۰ درصد ایستگاه‌ها و براساس آزمون من-کندال در ۵۹ درصد ایستگاه‌ها، یک روند معنی‌دار نزولی در سطح معنی‌داری ۵ درصد رخ داده است. همچنین تحلیل سری زمانی خشکسالی با دوره ماهانه بزرگ‌تر از ۶، روند تغییرات را بهتر از سری‌های زمانی کوتاه‌مدت نمایان می‌کند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۲۹).

حسینی و همکاران (۲۰۲۰) دوره‌های تر و خشک را در ایران با استفاده از شاخص GPCC-DI در بازه زمانی ۱۹۵۲-۲۰۱۹ بررسی کردند و نشان دادند که روند شدت و گستره خشکسالی‌ها افزایشی است. همچنین، شدیدترین خشکسالی‌ها در دوره‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه از سال ۲۰۰۰ به بعد رخ داده است. الگوی تغییرات فضایی شدت خشکسالی نشان‌دهنده دو کانون اصلی خشکسالی در جنوب شرق و مرکز ایران است و تعداد مراکز خشکسالی در ایران نیز با گذشت زمان افزایش یافته است.

اسپینونی و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه بزرگ‌ترین وقایع خشکسالی در اروپا نشان دادند که اروپای شمالی و شرقی از اوایل ۱۹۵۰ تا اواسط ۱۹۷۰ بزرگ‌ترین خشکسالی‌ها را از نظر فراوانی و شدت تجربه کرده است. در دهه ۵۰، کل اروپا تحت تأثیر خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژی طولانی، شدید و گسترده بود و به‌طور کلی، یک افزایش ناچیز و درعین حال پیوسته در وقوع خشکسالی از اوایل ۱۹۸۰ تا اوایل ۲۰۱۰ مشاهده شده است.

پایش و پهنه‌بندی خشکسالی‌های بلندمدت ایران با شاخص SPI در دوره ۱۹۷۶-۲۰۰۵ نشان می‌دهد که در دوره ۱۲ ماهه، قسمت‌های شرق، جنوب غرب، غرب و مرکز کشور خشکسالی‌های

بسیار شدید و شدید و مناطق شمال شرق، شمال غرب و شمال کشور خشکسالی های متوسط و ملایم را تجربه کرده است. در دوره ۲۴ ماهه نیز غرب، شرق، جنوب شرق، جنوب و مرکز کشور شاهد وقوع خشکسالی های بسیار شدید و شدید بوده است (بابایی و علیجانی، ۱۳۹۲: ۱).

زارع ایبانه و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم، به این نتیجه رسیدند که وضعیت رطوبت بر مبنای شاخص SPEI نشان دهنده تغییرات زیاد شرایط رطوبتی در دهه اول پیش بینی در مقایسه با دهه های دوم و سوم بوده است. انتظار می رود که در مقیاس های بلندمدت، تعداد دوره های خشک کاهش و تداوم طولانی ترین دوره خشک و متعاقب آن، حجم کمبودها نسبت به دوره پایه افزایش یابد و همچنین، مجموع حجم مازادها در دوره های مرطوب نسبت به دوره پایه کاهش یابد که می تواند بیانگر افزایش کمبود رطوبتی در دهه های آتی باشد.

فنی و همکاران در تحلیل دلایل و پیامدهای خشکسالی در استان خراسان جنوبی و شهر بیرجند، نشان دادند که در طول دوره مورد مطالعه (۱۳۶۸-۱۳۹۵)، شدیدترین خشکسالی در سال های آبی ۱۳۸۰-۱۳۷۸ رخ داده، سال آبی ۱۳۷۰-۱۳۶۹ مرطوب ترین سال بوده و از سال ۱۳۷۷ تاکنون، میزان بارندگی استان نزدیک به نرمال و یا خشکسال بوده است (فنی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۷۵).

در برخی مطالعات، اثرات خشکسالی بر عملکرد محصولات کشاورزی بررسی و نتایج کاربردی و ارزشمندی حاصل شده است. برای نمونه، ارزیابی تأثیر خشکسالی بر عملکرد گندم در استان ایلام نشان داده است که میزان عملکرد گندم، رابطه مستقیم و معناداری با مقدار بارندگی و توزیع زمانی آن دارد (عزیزی و صفرخانی، ۱۳۸۱: ۷۵). در مطالعه دیگری، کریمی و همکاران با بررسی اثر شاخص SPI بر عملکرد گندم در استان ایلام، به این نتیجه دست یافتند که خشکسالی رابطه معنی داری با عملکرد گندم در استان ایلام دارد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۹۸). باتوجه به نتایج حاصل از ضریب همبستگی بین خشکسالی و عملکرد تولید گندم می توان نتیجه گیری کرد تولید گندم در اراضی دیم مناطق کوهستانی، مثل ایلام و ایوان، بیشتر از خشکسالی متأثر است. زارع ایبانه و همکاران در یک مطالعه تطبیقی در مورد عملکرد گندم در استان همدان، چهار نمایه خشکسالی را بررسی کردند و نشان دادند که از دیدگاه کشاورزی، شاخص های RAI، Z و SPI روندی همسو با شاخص زراعی عملکرد نسبی گندم دیم دارند؛ اما شاخص SPI از نظر شدت خشکسالی های برآوردی با شاخص زراعی عملکرد نسبی گندم همخوانی مطلوب تری دارد (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۸۸: ۳۵).

در مواردی، می توان خشکسالی را در دوره زمانی کوتاه مدت و روزانه بررسی کرد که با این کار، نتایج بسیار کاربردی و دقیقی به دست خواهد آمد. با این حال، معمولاً در این موارد نمی توان



پهنه وسیعی را بررسی کرد و به دلیل حجم بالای کار، مطالعه به چند ایستگاه محدود می‌شود. به عنوان نمونه، پایش خشکسالی روزانه در استان تهران با استفاده از شاخص خشکسالی مؤثر EDI توسط مقدسی و همکاران نشان داد که در این استان از آبان ماه ۱۳۷۷، خشکسالی در حد خفیف آغاز شده و توسعه یافته است؛ به طوری که از فروردین ماه ۱۳۷۸، بخش‌های مرکزی استان با خشکسالی شدید مواجه و سپس این وضعیت در ماه‌های اردیبهشت و خرداد تشدید شد (مقدسی و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۱). در مطالعه‌ای دیگر، نصرتی خشکسالی را در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک کشور با استفاده از شاخص SPEI بررسی و نتایج را با شاخص SPI مقایسه کرد. برون داد مطالعه نشان داد که دو شاخص همبستگی معنی‌داری دارند؛ اما شاخص SPEI پاسخ سریع‌تری نسبت به شاخص خشکسالی داشته است (نصرتی، ۱۳۹۳: ۶۳، ۷۱). نکته قابل توجهی که در نتایج این مطالعه به آن اشاره شده، فراوانی نسبی بیشتر طبقات خشکسالی در شاخص SPEI در مقایسه با شاخص SPI بوده است که می‌تواند دلیلی بر حساسیت بالای شاخص SPEI به تغییرات بارندگی و منظور نمودن پارامتر درجه حرارت در این شاخص باشد.

در دهه‌های گذشته، خشکسالی عامل ایجاد خسارت‌های زیادی در بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، کشاورزی و منابع آب بوده است. هریک از مطالعات فراوان انجام شده در این زمینه (در خارج و داخل کشور) به نتایج قابل توجه و کاربردی دست یافته‌اند و در بیشتر موارد، راهکارهای سازنده‌ای را برای سازگاری با این بلای طبیعی ارائه کرده‌اند. هدف این پژوهش این است که علاوه بر پایش خشکسالی در سطح کشور با استفاده از شاخص‌های SC-PDSI و SPEI، اعتبار داده‌های دو پایگاه جهانی داده خشکسالی برای دو شاخص یاد شده را بررسی کند.

۲- مبانی نظری و چارچوب مفهومی

مطالعه خشکسالی، از شاخص‌های متعددی استفاده شده است که هریک فراخور نوع خشکسالی، عوامل و عناصر اقلیمی مختلفی را در محاسبه شاخص دخالت داده‌اند. در مطالعه حاضر از دو شاخص زیر استفاده شده است.

۲-۱- شاخص خشکسالی SC-PDSI

شاخص PDSI یکی از شاخص‌های بسیار متداول خشکسالی است که با استفاده از بارش، دما و حجم آب در دسترس و با در نظر گرفتن مقادیری که از لحاظ اقلیمی برای منطقه مناسب است، کمبود یا مازاد بارندگی را ارزیابی می‌کند. محدوده مقادیر PDSI بین ۴- تا ۴+ است. PDSI یک روش جامع برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی در خشکسالی به صورت ماهانه است؛ زیرا به

متغیرهای اقلیمی خاص به عنوان ورودی نیاز دارد (Zhang & et-al, 2019: 449). در PDSI، بیلان آب با استفاده از یک مدل دولایه محاسبه می‌شود که در آن، پر شدن خاک با آب باران و خالی شدن آن از طریق تبخیر و تعرق واقعی و رواناب در مقیاس زمانی ماهانه صورت می‌گیرد (Hobbins & et-al, 2008: 1). با این حال، به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های ورودی و اینکه شاخص ابتدا در شرایط آب‌وهوایی دو ایالت کانزاس و آیووا در ایالات متحده به کار رفته و طبیعتاً قابل تعمیم به سایر نقاط دنیا نیست، ولز و همکاران در سال ۲۰۰۴ مدل PDSI خودتنظیم (SC-PDSI) را در قالب مدل PDSI توسعه دادند. این مدل توانایی کالیبراسون خود با استفاده از مقادیر محاسبه شده در هر مکان را دارد و در پایش خشکسالی جهانی، مناسب‌تر تشخیص داده شده است.

۲-۲- شاخص خشکسالی SPEI

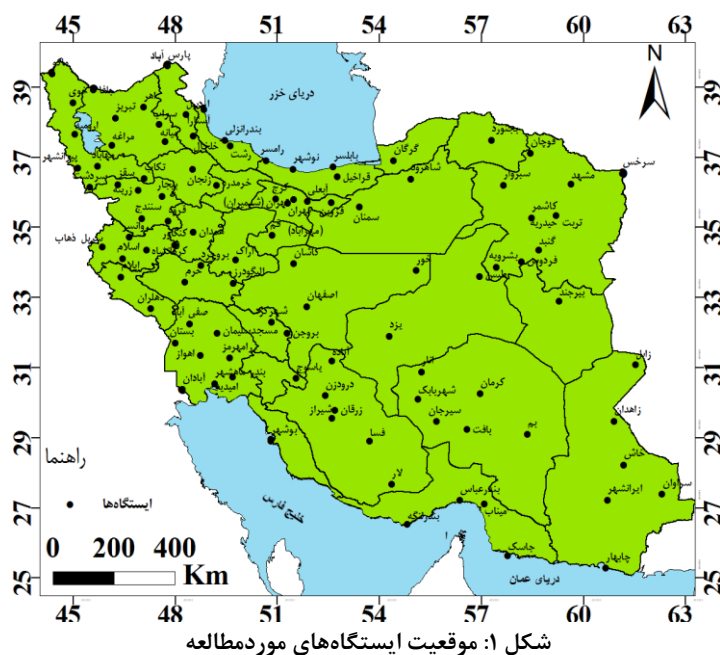
شاخص SPEI یک شاخص خشکسالی چندمقیاسی ساده است که داده‌های بارش و دما را ترکیب می‌کند. محاسبه این شاخص مانند روش محاسبه SPI است. داده‌های ورودی SPI بارش ماهانه یا هفتگی است. SPEI از اختلاف بین بارش و تبخیر و تعرق ماهانه یا (هفتگی) استفاده می‌کند. بیلان آب اقلیمی که در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شده است، برای به دست آوردن SPEI به کار می‌رود. SPEI چون براساس بیلان آب است، می‌تواند با ضریب شدت خشکسالی پالمر (SC-PDSI) مقایسه شود. در شرایط گرمایش جهانی، تنها شاخص‌های SPEI و SC-PDSI افزایش شدت خشکسالی در ارتباط با تقاضای بالای آب ناشی از تبخیر و تعرق را نشان می‌دهند (Vicente-Serrano & et-al, 2012: 1699).

۲-۳- روش تحقیق

در این مطالعه، برای محاسبه دو شاخص شدت خشکسالی خودتنظیم پالمر (SC-PDSI) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، از داده‌های بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، سرعت باد و ساعات آفتابی استفاده شده است. پس از بررسی داده‌ها، براساس کامل بودن و طولانی‌تر بودن دوره آماری، ۱۰۱ ایستگاه در یک دوره زمانی ۲۴ ساله (۱۹۹۲-۲۰۱۵) انتخاب شدند. برای رسیدن به مقادیر شاخص SPEI، ابتدا مقادیر تبخیر و تعرق با روش پنمن-مانتیت و سپس مقادیر شاخص در دوره‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه شد. برای محاسبه مقادیر شاخص SC-PDSI نیز از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. گفتنی است که این محاسبات با استفاده از پکیج‌های SC-PDSI و SPEI در محیط نرم‌افزار R

انجام شده‌اند. در مرحله آخر، درصد سال‌های توأم با هر طبقه خشکسالی محاسبه و ارزیابی و نتایج حاصل در محیط ArcGIS به صورت نقشه ترسیم شد.

در سطح جهان، چندین پایگاه داده وجود دارد که متغیرها و شاخص‌های مختلف اقلیمی را در دوره‌های گذشته یا آینده برای کل جهان ارائه می‌کنند. در این میان، پایگاه داده جهانی «واحد تحقیقات آب‌وهوایی»^۱ (CRU) دانشگاه انگلیای شرقی انگلستان به آدرس <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/> و پایگاه داده SPEI اسپانیا به آدرس <https://spei.csic.es> داده‌های خشکسالی محاسبه شده با استفاده از شاخص‌های SC-PDSI و SPEI را به ترتیب در دو دوره زمانی ۲۰۱۷-۱۹۰۱ و ۲۰۱۵-۱۹۰۱ با قدرت تفکیک ۵/۰ درجه ارائه کرده‌اند. در این پژوهش، علاوه بر بررسی تغییرات خشکسالی در دوره مورد مطالعه، به منظور بررسی میزان دقت و اعتبار این دو پایگاه داده، نتایج محاسباتی از ۱۰۱ ایستگاه مورد مطالعه با داده‌های ۹۹ نقطه اخذ شده از این دو پایگاه که نزدیک‌ترین فاصله را با ایستگاه‌های مشاهداتی داشتند، مقایسه و بررسی شده است. تعیین این نقاط با استفاده از روش فاصله اقلیدسی انجام شده است. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



در جدول ۱، مقادیر رده‌های خشکسالی دو شاخص SPEI و SC-PDSI نشان داده شده است.

جدول ۱: طبقات خشکسالی براساس SC-PDSI و SPEI (Wang & et-al, 2015: 285)

طبقه خشکسالی	محدوده شاخص‌های مختلف خشکسالی	
	SC-PDSI	SPEI
نرمال	> -1	$> -5/0$
خشکسالی خفیف	$(-2, -1)$	$(-1, -5/0)$
خشکسالی متوسط	$(-3, -2)$	$(-5/1, -1)$
خشکسالی شدید	$(-4, -3)$	$(-2, -5/1)$
خشکسالی خیلی شدید	≤ -4	≤ -2

در نهایت، به منظور اعتبارسنجی، مقادیر محاسباتی هر دو شاخص با مقادیر مستخرج از پایگاه‌های داده با استفاده از روابط ۱ تا ۳ با یکدیگر مقایسه شدند.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n A_t - F_t}{n} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{A_t - F_t}{n} \right)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

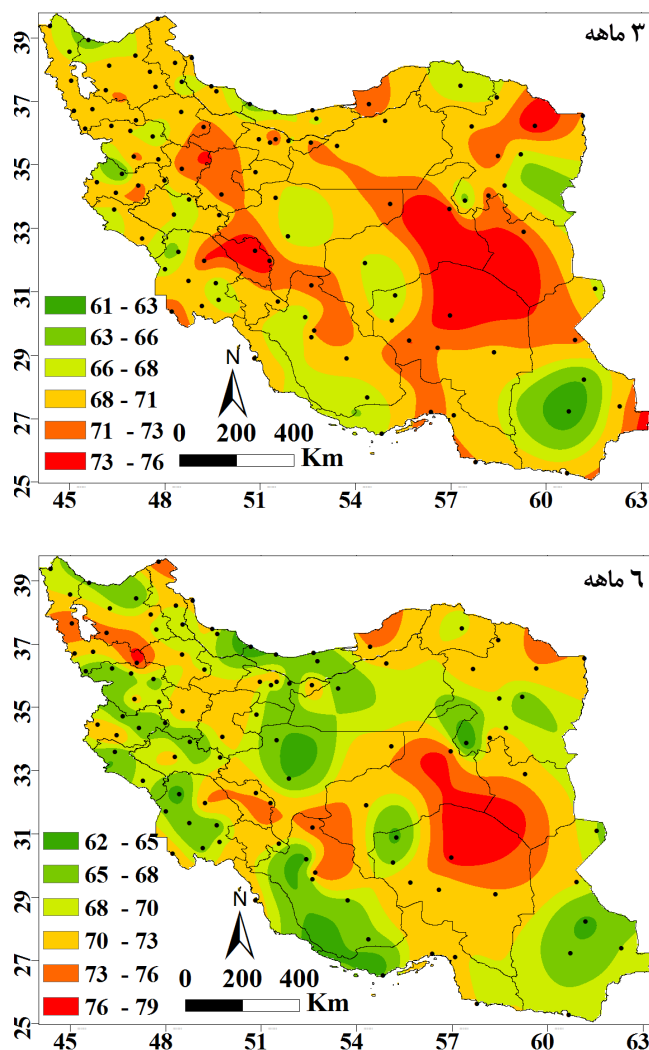
$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad \text{رابطه ۳}$$

۳- تحلیل یافته‌های تحقیق

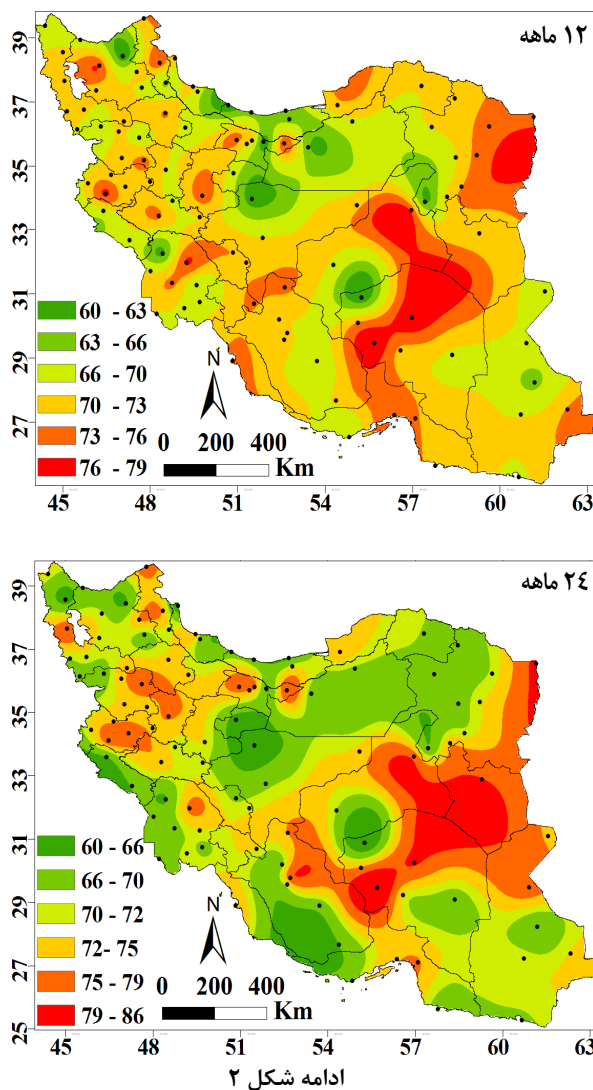
۳-۱- بررسی شاخص SPEI در دوره‌های زمانی مختلف

مقایسه مقادیر شاخص SPEI در دوره‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان داد که در هر چهار دوره زمانی، بیش از ۶۰ درصد سال‌ها در طبقه نرمال قرار گرفته‌اند. می‌توان چنین استدلال کرد که در ۶۰ درصد از دوره مورد مطالعه، تغییر قابل توجهی در شرایط بارشی و رطوبتی کشور رخ نداده است که به وقوع خشکسالی منجر شود. الگویی که در این طبقه در همه دوره‌ها حفظ شده، وجود یک هسته بیشینه نرمال در بخش شرقی کشور به سمت مناطق مرکزی است. باتوجه به موقعیت قرارگیری این هسته بیشینه که دربرگیرنده استان‌های کرمان، یزد و خراسان

جنوبی است و اینکه این استان‌ها جزو مناطق کم‌باران هستند، حتی باوجود کاهش بارش در طی سال‌های موردبررسی، خشکسالی نمود پیدا نکرده و ازاین‌رو، این مناطق در طبقه نرمال قرار گرفته‌اند (شکل ۲).

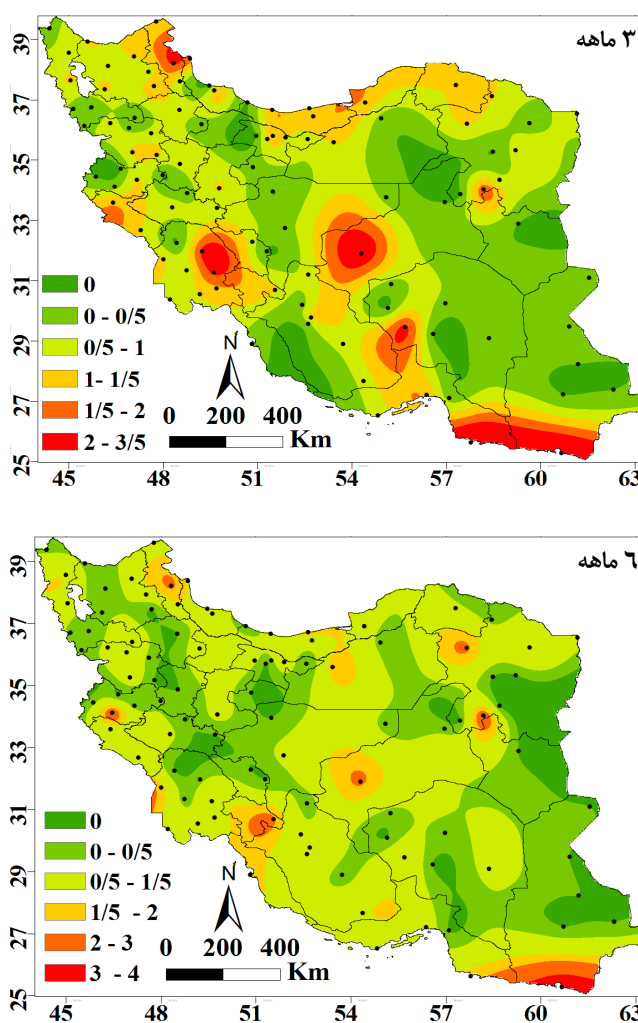


شکل ۲: درصد سال‌های نرمال شاخص SPEI

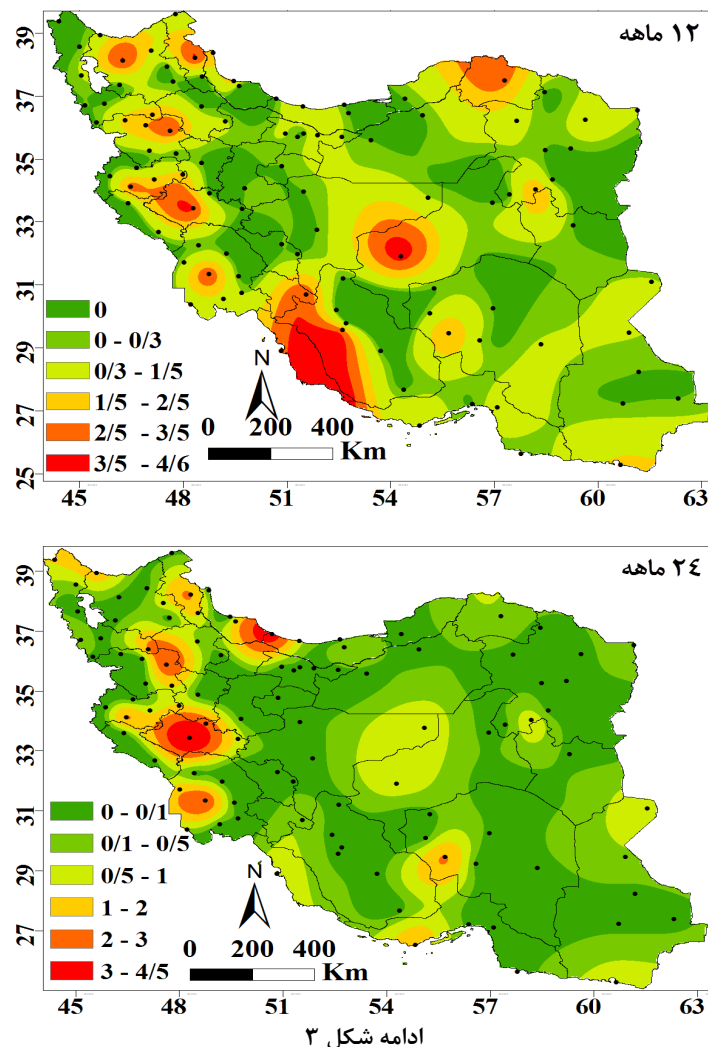


نتیجه دیگر این است که طبقه خشکسالی خیلی شدید کمتر از ۵ درصد سالها را در همه ایستگاههای مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. الگوی قابل مشاهده در این زمینه، وجود هسته های بیشینه در همه دوره های زمانی در بخش های غرب و مرکز کشور و در دوره های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه در نیمه جنوبی کشور است. مهم ترین آنها وجود هسته بیشینه روی استان یزد است که در تمام دوره های زمانی، به طور مشخص در همه نقشه ها نمایان شده و

در نهایت، در دوره ۲۴ ماهه به کمتر از ۱ درصد از سال‌ها رسیده است. الگوی مشاهده‌شده در این نقشه‌ها به این موضوع اشاره دارد که باتوجه به اینکه نیمه غربی کشور در مقایسه با مناطق دیگر بارش نسبتاً بیشتری دارد، کاهش هرچند ناچیز در مقدار بارش و تبخیر و تعرق باعث شده است تا حداقل در ۵ درصد از سال‌ها، شرایط خشکسالی بسیار شدید در این منطقه اتفاق بیفتد (شکل ۳).



شکل ۳: درصد سال‌های خشکسالی بسیار شدید شاخص SPEI در ۴ دوره زمانی

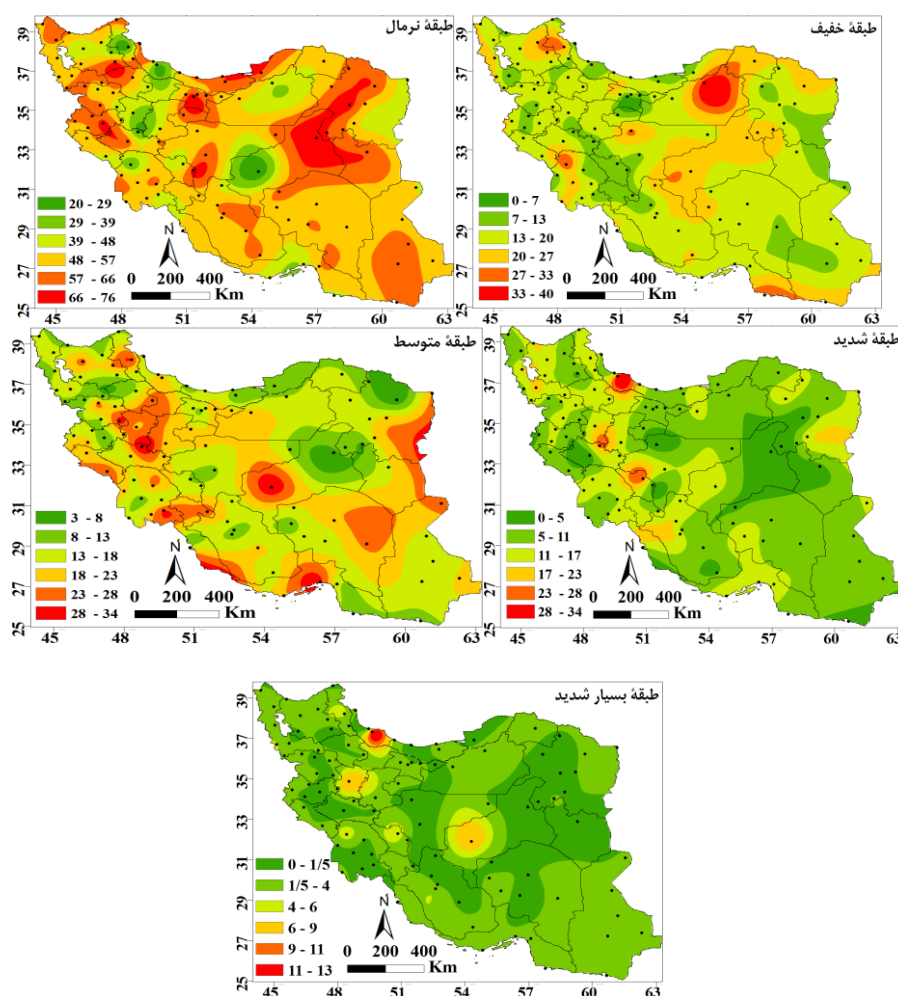


باتوجه به موارد ذکرشده می‌توان نتیجه گرفت که عامل بارش نقش تعیین‌کننده‌ای در شاخص خشکسالی SPEI دارد و این با یافته‌های وانگ و همکاران در حوضه رودخانه لوانه (Wang & et-al, 2015: 282) همخوانی دارد. مطالعه آن‌ها نشان داد که عملکرد شاخص‌های مختلف خشکسالی با مدت‌زمان خشکسالی و عوامل اصلی خشکسالی ارتباط نزدیکی دارد. هنگامی که تبخیر و بارش هر دو نقش مهمی در وقایع خشکسالی دارند، SPEI از SPI دقیق‌تر است.



۲-۳- بررسی شاخص SC-PDSI

در دوره مورد مطالعه، براساس شاخص SC-PDSI بیشترین درصد سال‌ها در طبقه نرمال و کمتر از ۴ درصد از سال‌ها، به‌استثنای چند هسته بیشینه محدود در سطح کشور، در طبقه خشکسالی بسیار شدید قرار می‌گیرند. این چند هسته بیشینه به‌طور مشخص محدود به اطراف ایستگاه‌های یزد، شهرکرد، صفی‌آباد و هسته بیشینه ۱۳ درصد در حوالی بندرانزلی است. با نگاه دقیق‌تر به دو ایستگاه یزد و بندرانزلی در نقشه‌ها، روشن می‌شود که وضعیت نرمال در این دو ایستگاه در کمتر از ۲۹ درصد از سال‌ها و وضعیت خشکسالی متوسط و شدید در ۳۴ درصد از سال‌ها حاکم بوده است. قرارگیری پرباران‌ترین ایستگاه کشور (بندرانزلی) در طبقه خشکسالی شدید، نشان‌دهنده یک ناهنجاری منفی شدید در بارش این ایستگاه است که برای بررسی علل آن، مطالعات دقیق‌تر ضروری است. همچنین، با بررسی نقشه طبقه خشکسالی خفیف (طبقه ۲)، چند هسته بیشینه مشخص می‌شود که یکی از آن‌ها به‌طور مشخص و گسترده روی استان سمنان (منطقه شاهرورد) و چند هسته دیگر به‌صورت محدود روی استان‌های یزد، اصفهان، خوزستان، اردبیل و آذربایجان غربی گسترده شده است (شکل ۴). به‌طور کلی، نقشه‌ها نشان می‌دهد که تمرکز بیشتر هسته‌های بیشینه خشکسالی به نیمه غربی، شمال غرب و تاحدودی مرکز کشور مربوط بوده است. بااین‌حال، نتایج مربوط به طبقه خشکسالی متوسط (طبقه ۳) تفاوت آشکاری با سایر طبقات خشکسالی دارد؛ به‌طوری که در این طبقه، شاهد قرارگیری بخش وسیعی از کشور (با بیش از ۱۸ درصد سال‌های موردبررسی) در رده خشکسالی متوسط هستیم که به‌طور مشخص کل استان همدان، بخش‌هایی از استان‌های اردبیل، قزوین، مرکزی، لرستان، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد، یزد، کرمان و نوار باریکی از نیمه شرقی کشور را دربرمی‌گیرد. همان‌طور که در نتایج مربوط به شاخص SPEI اشاره شد، نتایج محاسبه خشکسالی با استفاده از شاخص SC-PDSI نیز حساسیت بالایی به تغییرات بارش و به‌تبعیت از آن، تغییرات تبخیر و تعرق نشان داد.

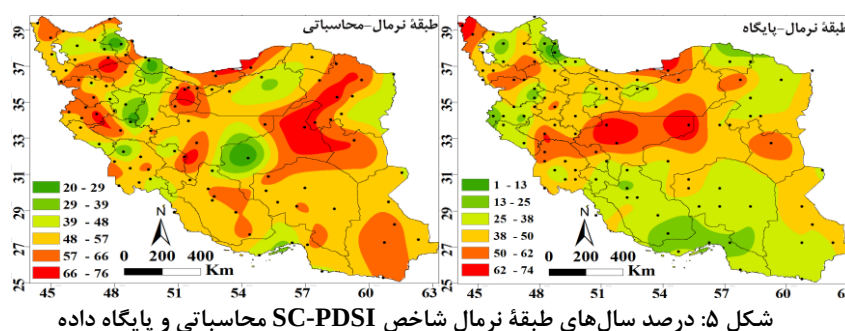


شکل ۴: شاخص خشکسالی خودتنظیم پالمر (SC-PDSI)

۳-۳- مقایسه مقادیر شاخص SC-PDSI محاسباتی با مقادیر پایگاه داده

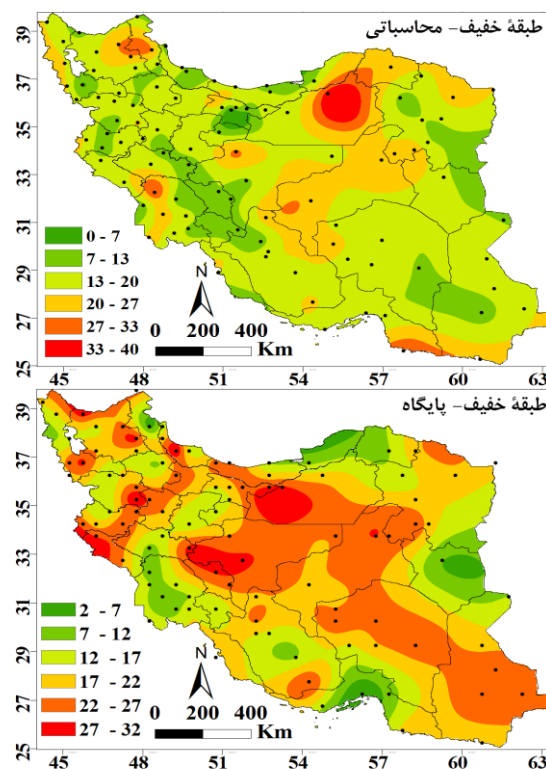
بررسی و مقایسه مقادیر محاسباتی و اخذشده از پایگاه داده نشان می‌دهد که به‌استثنای چند پهنه بسیار محدود در استان‌های گلستان، آذربایجان غربی و شرقی، زنجان، کردستان و خراسان جنوبی که در آن‌ها ۵۰ درصد از سال‌های دوره مورد مطالعه در طبقه نرمال قرار می‌گیرد، در سایر ایستگاه‌ها، هماهنگی خاصی بین نتایج محاسبات و پایگاه داده وجود ندارد. نمونه

بارز این اختلاف، استان‌های یزد و اصفهان است که طبق نتایج محاسبات، به ترتیب ۲۹ و ۴۸ درصد از سال‌ها در این دو استان در طبقه نرمال قرار دارد؛ درحالی که طبق مقادیر پایگاه داده، به ترتیب ۳۸ تا ۶۲ و ۵۰ تا ۷۴ درصد از سال‌ها در طبقه نرمال قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، طبق مقادیر به‌دست‌آمده از پایگاه داده، ۲۵ تا ۷۴ درصد از سال‌ها با دو هسته بیشینه (۷۴ درصد) در استان اصفهان در طبقه نرمال قرار می‌گیرد. باین‌حال، مقادیر محاسبه‌شده نشان می‌دهد که درصد بیشتری از سال‌ها (۴۸ تا ۷۶ درصد) در تمام ایستگاه‌های کشور، به‌استثنای چند هسته محدود، در طبقه نرمال قرار می‌گیرد؛ یعنی طبق آمار مشاهداتی، سال‌های بیشتری از دوره مورد مطالعه در طبقه نرمال قرار می‌گیرد. طبق مقادیر شاخص SC-PDSI پایگاه داده، در اکثر ایستگاه‌ها ۵۰ درصد از سال‌ها در طبقه نرمال قرار دارد و بقیه سال‌ها تحت تأثیر خشکسالی‌های خفیف تا بسیار شدید بوده است (شکل ۵).



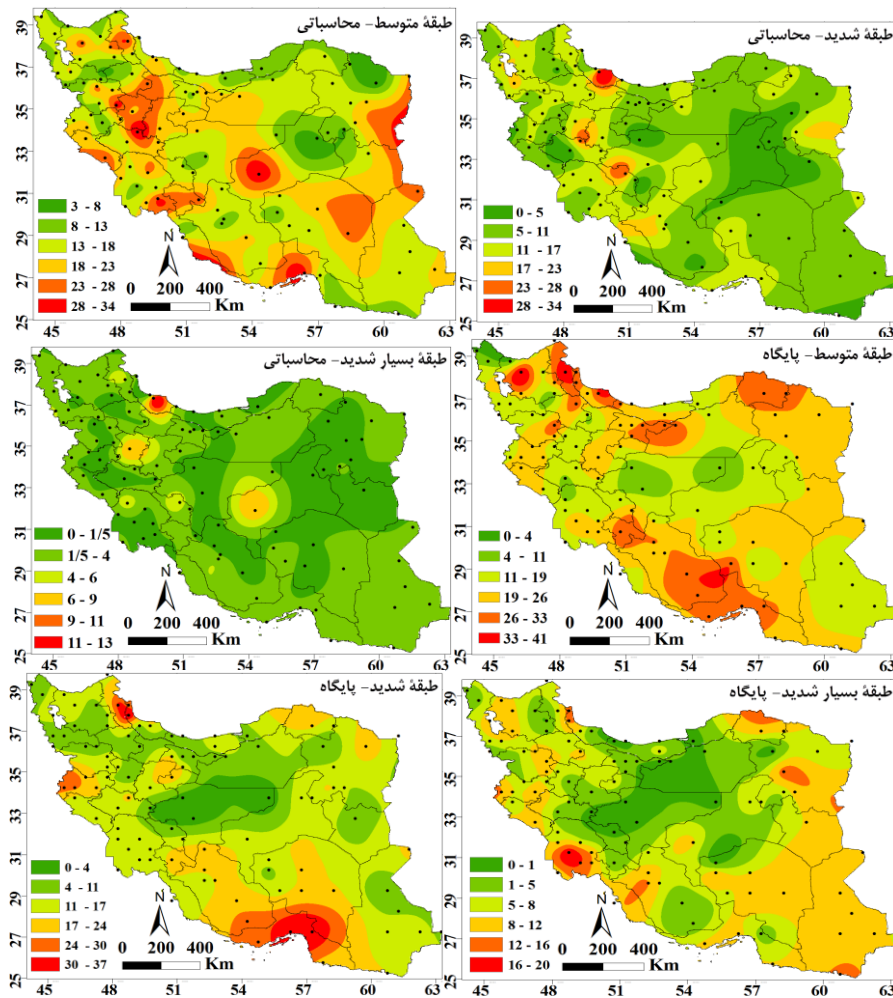
شکل ۵: درصد سال‌های طبقه نرمال شاخص SC-PDSI محاسباتی و پایگاه داده

براساس نتایج محاسبات به‌دست‌آمده با استفاده از داده‌های مشاهداتی، در نیمه شرقی استان سمنان، خشکسالی خفیف در بیش از ۳۳ درصد از سال‌ها اتفاق افتاده است؛ درحالی که براساس مقادیر پایگاه داده، این وضعیت شامل فقط ۲۲ درصد از سال‌ها بوده است. در نیمه دیگر استان، با یک کشیدگی به سمت شمال (استان‌های مازندران و تهران)، جنوب (استان اصفهان) و زبانه‌ای به سمت جنوب شرق کشور که استان‌های یزد، کرمان و سیستان و بلوچستان را دربرمی‌گیرد، ۳۳ درصد از سال‌ها در خشکسالی خفیف قرار داشته است. در یک جمع‌بندی، می‌توان گفت که طبق نتایج محاسبات، کمتر از ۲۰ درصد و طبق مقادیر پایگاه، ۲۲-۳۲ درصد از سال‌ها سراسر کشور شاهد خشکسالی خفیف بوده است (شکل ۶).



شکل ۶: درصد سال‌های خشکسالی خفیف شاخص SC-PDSI محاسباتی و پایگاه داده

مقایسه نتایج دیگر طبقات شاخص خشکسالی SC-PDSI موارد دیگری از عدم تطابق را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، طبق محاسبات، ۳ تا ۱۳ درصد از سال‌ها در گوشه شمال شرق کشور در طبقه خشکسالی متوسط قرار دارد؛ در حالی که طبق مقادیر پایگاه داده، ۲۶ تا ۳۳ درصد از سال‌ها در معرض خشکسالی متوسط بوده است. در ایستگاه یزد، طبق مقادیر محاسباتی و پایگاه داده، به ترتیب ۲۳ تا ۳۴ و ۱۱ تا ۱۹ درصد از سال‌ها در معرض خشکسالی متوسط قرار داشته است. طبق نتایج محاسبات، کمتر از ۱۷ درصد از سال‌ها در نیمه جنوبی کشور در طبقه خشکسالی شدید قرار دارد. این در حالی است که پایگاه داده بیش از ۱۷ درصد از سال‌ها را در نیمه جنوبی کشور با یک هسته بیشینه در استان هرمزگان در طبقه خشکسالی شدید قرار می‌دهد. همچنین، مقادیر شاخص پایگاه داده در مقایسه با مقادیر محاسباتی تعداد سال‌های بیشتری را در طبقه خشکسالی بسیار شدید قرار می‌دهد (شکل ۷).

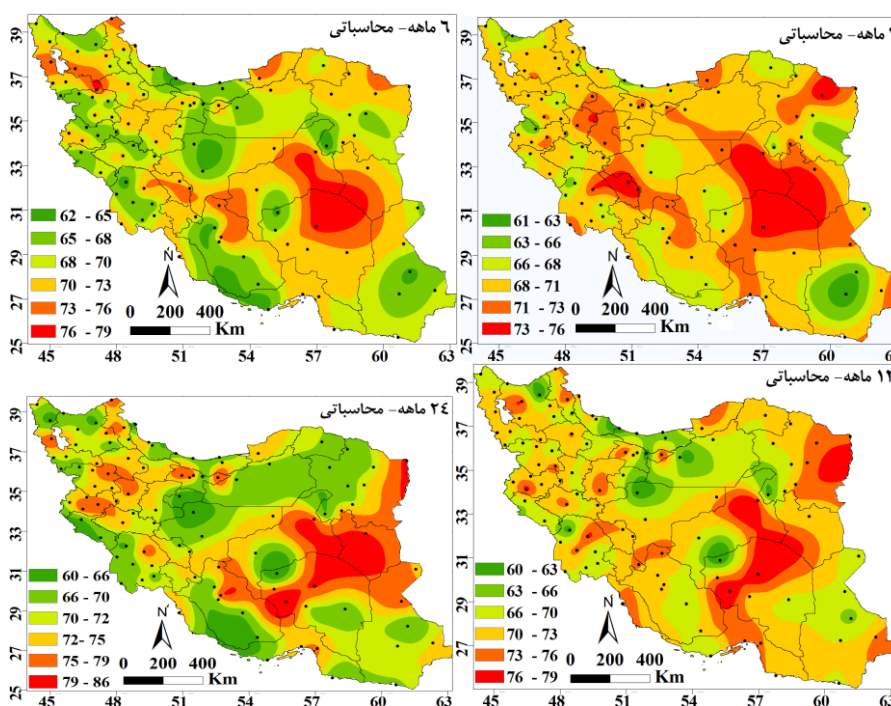


شکل ۷: درصد سال‌های خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید شاخص SC-PDSI محاسباتی و پایگاه داده

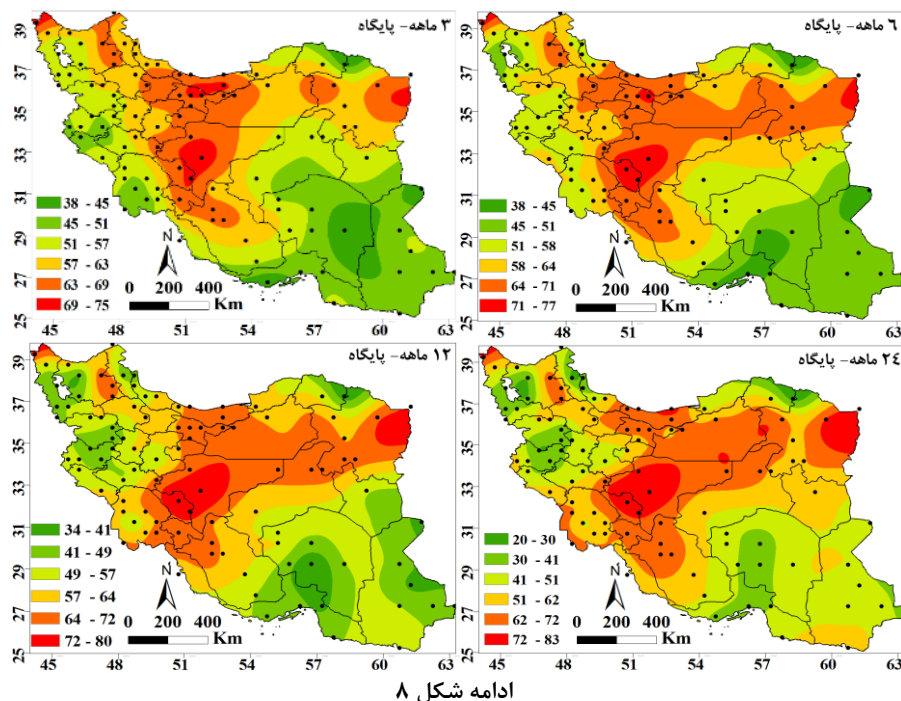
با مقایسه نتایج به دست آمده از شاخص SC-PDSI، می‌توان نتیجه گرفت که پایگاه داده شرایط خشکسالی را شدیدتر از چیزی نشان می‌دهد که اتفاق افتاده است و تاحدودی درمورد آن اغراق می‌کند.

۳-۴- مقایسه مقادیر شاخص SPEI محاسباتی با مقادیر پایگاه داده

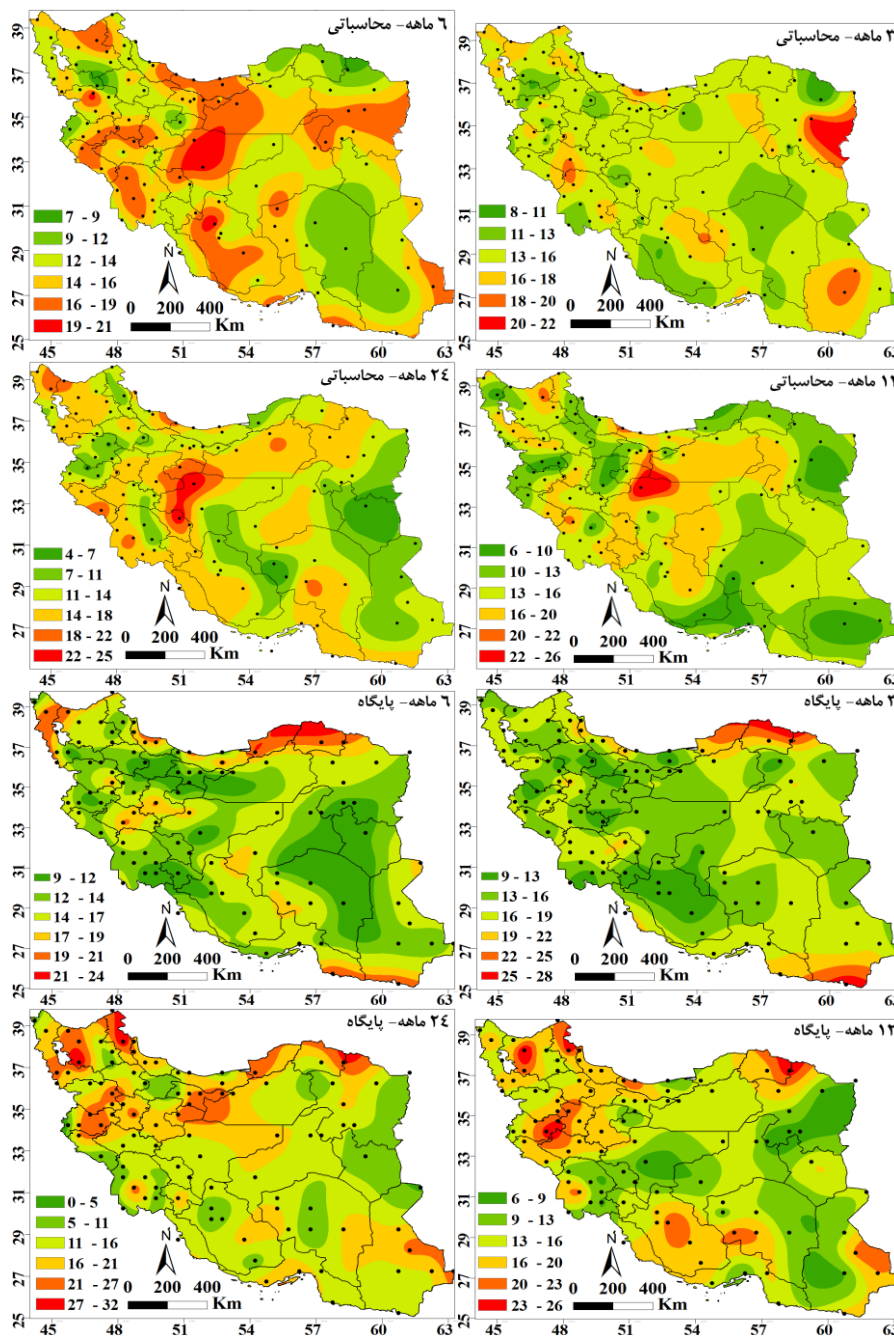
پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI در دوره‌های زمانی مختلف نشان داد که براساس نتایج محاسبات، بیش از ۶۰ درصد از سال‌ها در تمام ایستگاه‌ها در وضعیت نرمال قرار دارد. بالاترین درصد سال‌های نرمال به استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، کرمان و یزد با بیش از ۷۰ درصد از سال‌ها مربوط بوده است. با توجه به نتایج پایگاه داده، درصد سال‌های نرمال در ایستگاه‌ها نوسان زیادی دارد و دامنه آن از ۲۰ تا ۸۰ درصد در بین ایستگاه‌ها در دوره‌های مختلف (۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) متغیر است. طبق نتایج پایگاه داده، هسته‌های بیشینه نرمال در استان‌های خراسان رضوی، فارس، کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری، اصفهان، قم، مرکزی، تهران، البرز، قزوین، مازندران و سمنان قرار دارد. مناطق جنوب شرق کشور کمترین درصد سال‌های نرمال را تجربه کرده‌اند (شکل ۸).



شکل ۸: درصد سال‌های نرمال شاخص SPEI محاسباتی و پایگاه داده



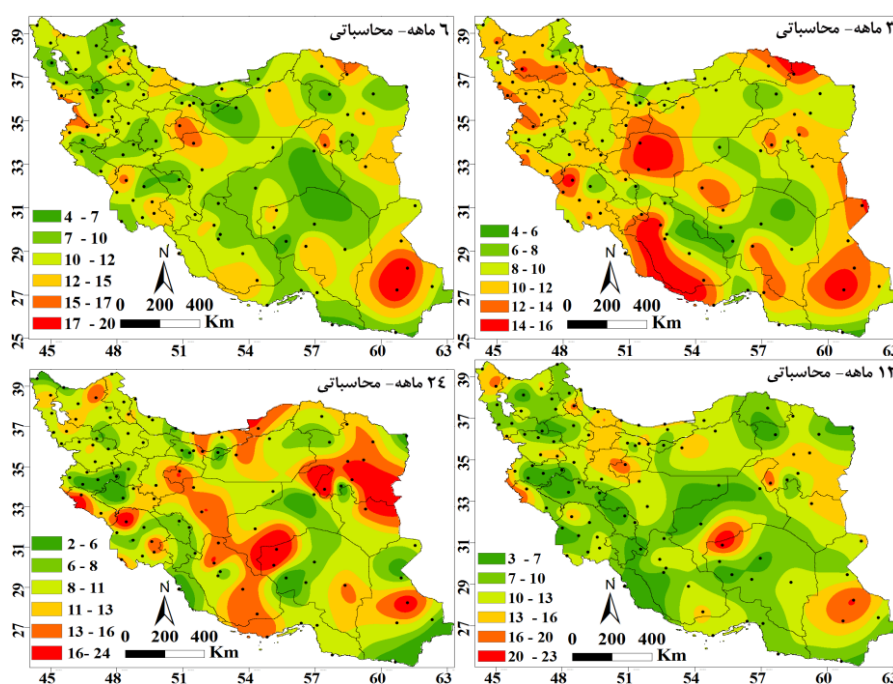
بررسی نقشه‌های خشکسالی در تمام دوره‌ها براساس نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که ۵ تا ۲۵ درصد از سال‌ها تحت تأثیر خشکسالی خفیف بوده است و هسته بیشینه به‌استثنای دوره ۳ ماهه که روی استان خراسان رضوی قرار دارد، در سایر دوره‌ها روی استان اصفهان مستقر می‌شود. براساس پایگاه داده، هسته بیشینه و درصد سال‌های توأم با خشکسالی خفیف اندکی با نتایج محاسبات متفاوت است و تمرکز هسته بیشینه بر شمال شرق کشور و حدود ۶ تا ۳۲ درصد از سال‌ها است (شکل ۹).

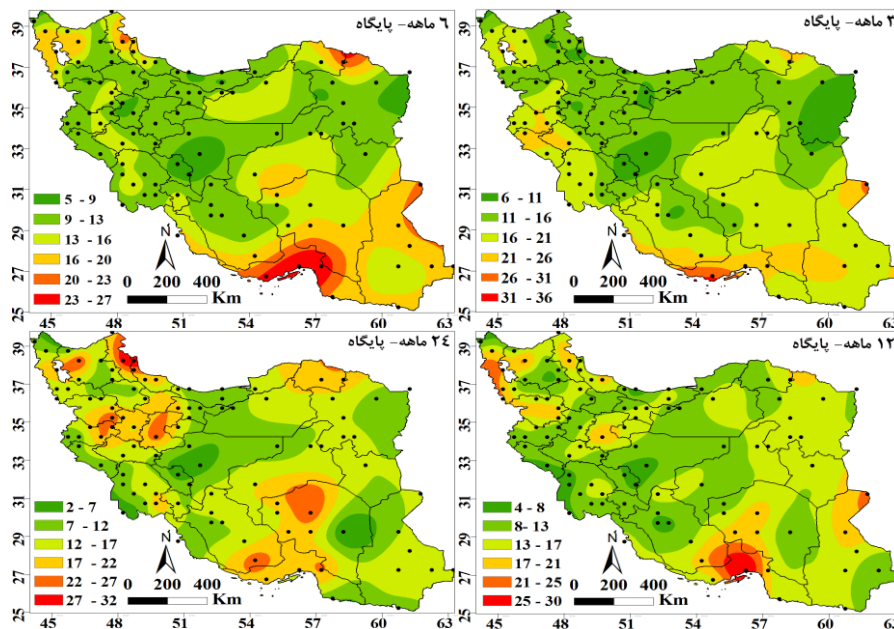


شکل ۹: درصد سال‌های خشکسالی خفیف شاخص SPEI محاسباتی و پایگاه داده

مقایسه نتایج شاخص SPEI در دوره‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان می‌دهد که در بخش‌های مختلف کشور در دوره ۳ ماهه، حداکثر تا ۱۶ درصد از سال‌ها تحت تأثیر خشکسالی متوسط است. تمرکز بیشتر به مناطق جنوب، جنوب شرق، مرکز و مناطق محدودی از شمال شرق کشور مربوط است. به عبارت دیگر، در ایستگاه‌های مورد بررسی، ۸ تا ۱۶ درصد از سال‌ها شاهد وقوع خشکسالی متوسط بوده است. با این حال، پایگاه داده ۶ تا ۲۱ درصد از سال‌های مورد بررسی را در این طبقه قرار می‌دهد و همان‌طور که در تحلیل نتایج سایر نقشه‌ها ذکر شد، پایگاه داده درصد بیشتری از سال‌ها را در طبقه متوسط قرار می‌دهد.

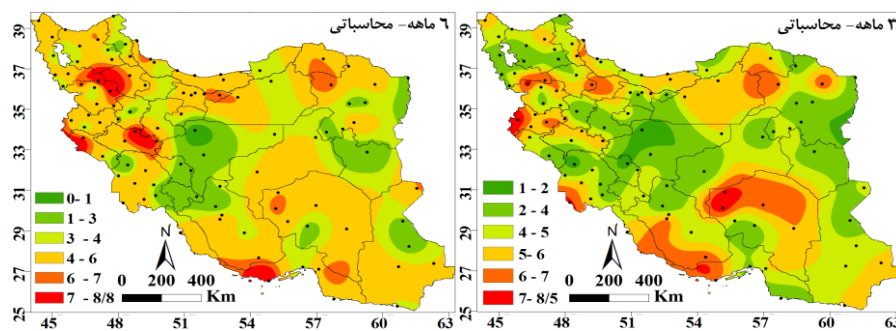
طبقه خشکسالی متوسط در سایر دوره‌های زمانی، روندی مشابه با دوره ۳ ماهه دارد. نکته مهم وجود هسته بیشینه روی استان سیستان و بلوچستان در همه دوره‌های زمانی است. هسته بیشینه واقع در مرز استان‌های یزد و کرمان در دوره ۱۲ و ۲۴ ماهه نمود یافته است. بر پایه نتایج پایگاه داده در دوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، هسته بیشینه روی استان هرمزگان گسترش یافته است (شکل ۱۰).

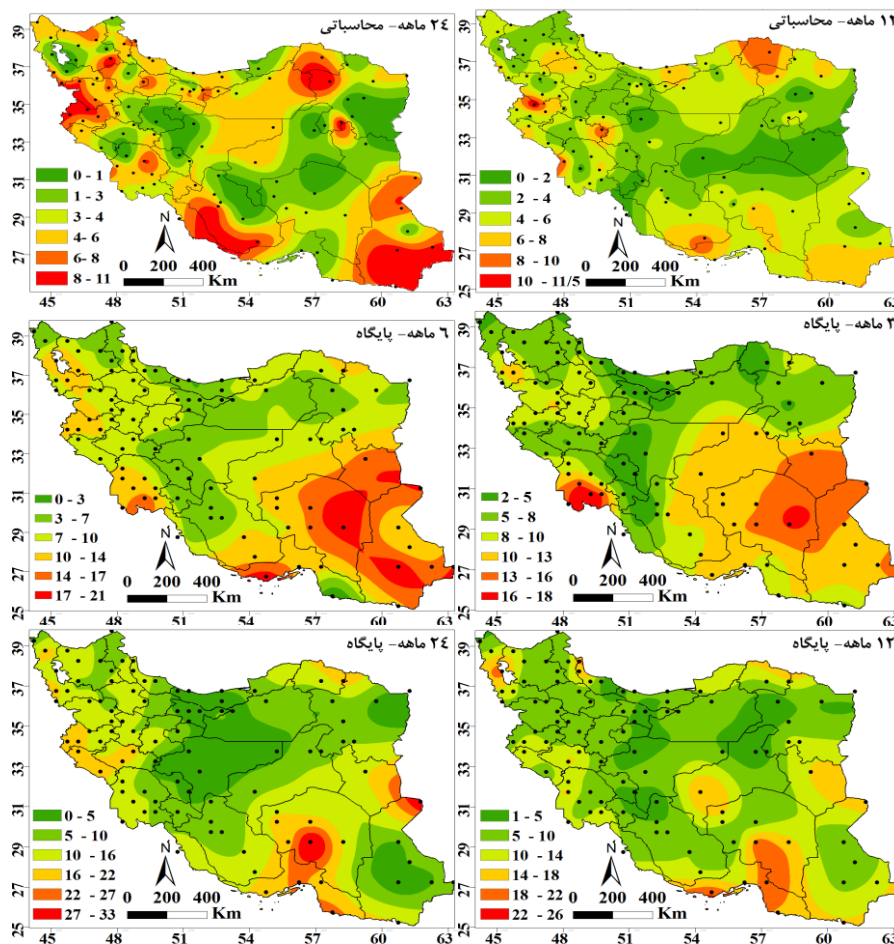




شکل ۱۰: درصد سال‌های خشکسالی متوسط شاخص SPEI محاسباتی و پایگاه داده

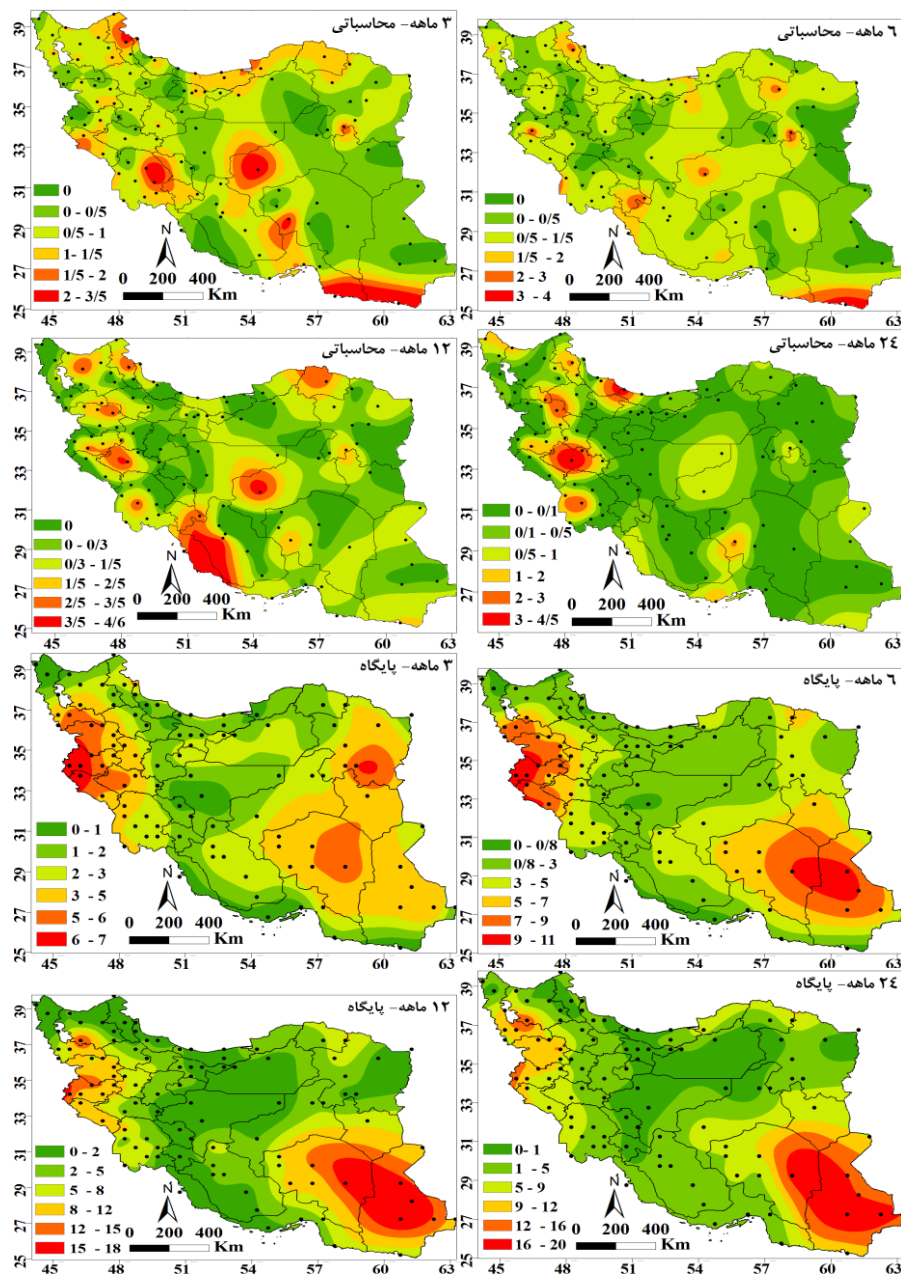
بررسی و مقایسه مقادیر شاخص SPEI در دوره‌های زمانی مختلف، به تفکیک محاسبات و پایگاه داده، این نکته را آشکار می‌کند که در تمام موارد، پایگاه داده دو برابر بیشتر از محاسبات انجام‌شده ایستگاه‌های مورد مطالعه را تحت پوشش خشکسالی شدید نشان می‌دهد. براساس نتایج محاسبات، حداکثر ۱۱ درصد از سال‌ها با تمرکز در بخش جنوب شرق و جنوب کشور در معرض خشکسالی شدید قرار دارد؛ درحالی که نتایج پایگاه تا ۳۳ درصد از سال‌ها را در این طبقه نشان می‌دهد. گفتنی است که در تمام دوره‌های زمانی، گستره خشکسالی شدید در نتایج پایگاه داده بسیار چشمگیر است (شکل ۱۱).





شکل ۱۱: درصد سال‌های خشکسالی شدید شاخص SPEI محاسباتی و پایگاه داده

در طبقه خشکسالی بسیار شدید شاخص SPEI، براساس آنچه از محاسبات به‌دست آمده است، اگرچه هسته‌های بیشینه متعددی در تمام دوره‌ها تشکیل شده است، در کمتر از ۵ درصد سال‌های موردبررسی، تمرکز این طبقه خشکسالی بر مناطق غرب، جنوب‌غرب و مرکز کشور بوده و در نیمه شرقی کشور، تعداد سال‌های توأم با خشکسالی بسیار شدید کم و حتی در مواردی، صفر بوده است. آنچه از تحلیل مقادیر پایگاه داده برمی‌آید، وجود هسته‌های بیشینه روی مناطق غرب و جنوب کشور در دوره‌های ۱۲، ۲۴ و ۳۶ ماهه است که تا ۲۰ درصد از سال‌های این مناطق را تحت‌سیطره خشکسالی بسیار شدید نشان می‌دهد. در دوره ۳ ماهه، سه هسته نسبتاً خفیف‌تر در استان‌های خراسان رضوی و کرمان و استان‌های غربی کشور با کمتر از ۷ درصد از سال‌ها دیده می‌شود (شکل ۱۲).

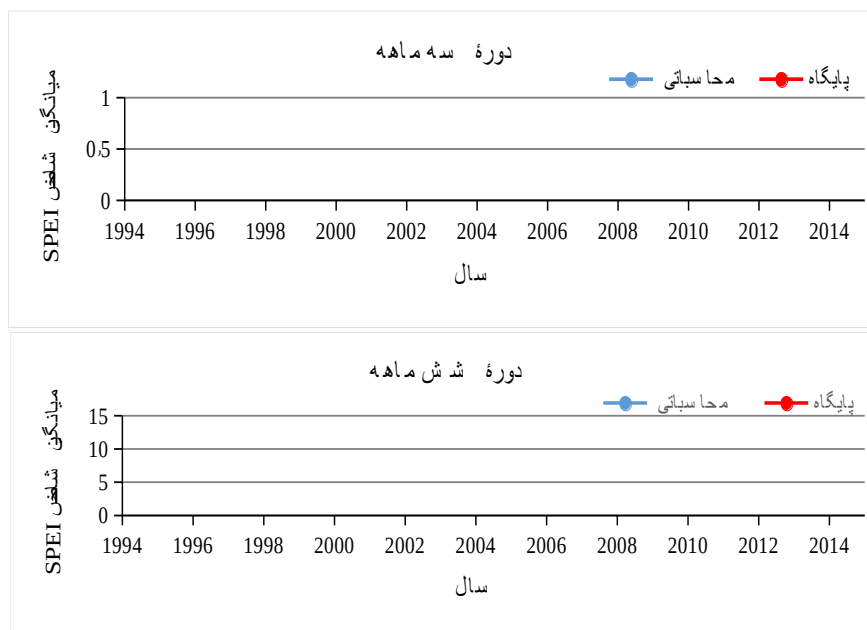


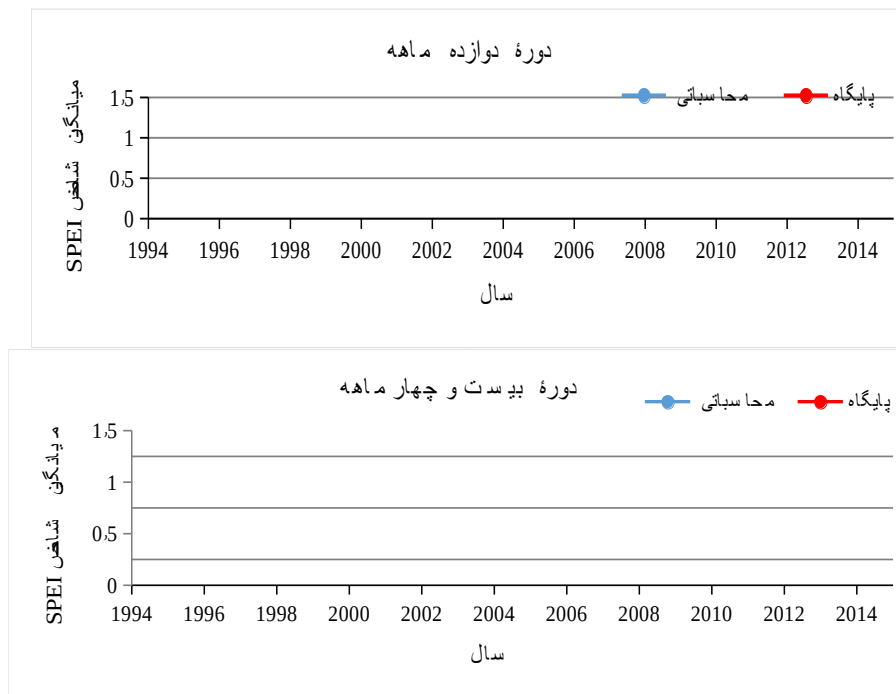
شکل ۱۲: درصد سال‌های خشکسالی بسیار شدید شاخص SPEI محاسباتی و پایگاه داده

۵-۳- نمودارها و تحلیل آماری نتایج

در شکل ۱۳، نمودارهای مقادیر میانگین سالانه شاخص SPEI در بازه زمانی ۱۹۹۴-۲۰۱۵ برای دوره‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان داده شده است. از آنجا که محاسبه شاخص SPEI در دوره‌های مختلف مانند محاسبه میانگین متحرک در برخی از ماه‌ها فاقد مقدار است، به‌منظور هماهنگی بین نمودارها، سال آغاز بازه زمانی ۱۹۹۴ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهد، هماهنگی زیادی در افت‌وخیزها در هر چهار دوره زمانی مشاهده می‌شود و حتی در برخی از سال‌ها، مقادیر کاملاً بر هم منطبق هستند. در این نمودارها، به‌طور کلی ۲ نکته مهم دیده می‌شود:

۱. مقادیر شاخص در نتایج پایگاه داده همواره بیشتر از مقادیر محاسباتی است؛ به این صورت که همانند نقشه‌ها، پایگاه داده خشکسالی را با شدت بیشتری ارائه کرده است.
۲. در دوره‌های ۳ و ۶ ماهه در سال‌های پایانی بازه زمانی مورد مطالعه، مقادیر پایگاه داده و محاسباتی بسیار به هم نزدیک هستند؛ اما در دوره‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه، این نزدیکی به سال‌های میانی دوره مورد مطالعه (۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷) مربوط است.





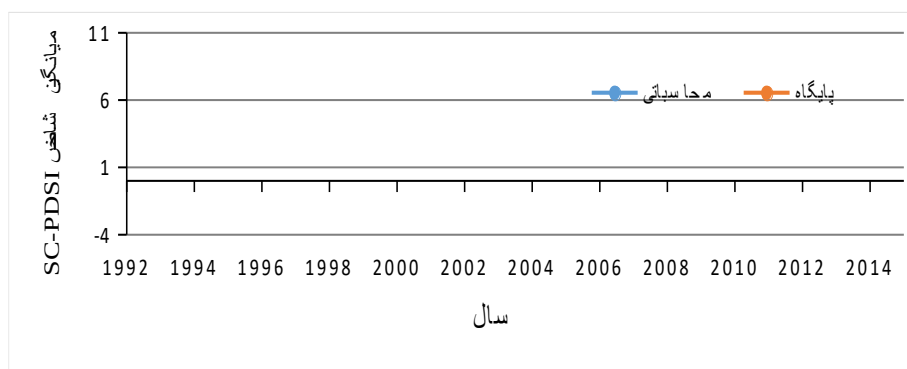
شکل ۱۳: نمودار مقادیر میانگین سالانه شاخص SPEI در دوره‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه

از سوی دیگر، با اینکه همبستگی مثبتی بین دو مجموعه داده محاسباتی و مقادیر پایگاه داده شاخص SPEI وجود دارد، مقایسه مقادیر محاسباتی با مقادیر پایگاه داده برای شاخص فوق با استفاده از روابط ۱ تا ۳ در هر چهار دوره زمانی نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر داده‌های محاسباتی با مقادیر داده‌های پایگاه نسبتاً قابل توجه است (جدول ۲).

جدول ۲: مقایسه مقادیر محاسباتی و پایگاه داده شاخص SPEI با شاخص‌های خطاسنجی در دوره‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه

دوره شاخص	۳ ماهه	۶ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
n	28884	28584	27976	26765
MAD	75313239/0	756539463/0	782066341/0	85510056/0
MSE	955338949/0	925834473/0	972768186/0	149859963/1
RMSE	97741442/0	962202927/0	986290112/0	072315235/1
R(XY)	583972651/0	600006467/0	60062995/0	556498823/0

نتایج مشابهی در مورد شاخص SC-PDSI نیز مشاهده شد. به این صورت که در تعداد زیادی از سال‌های مورد مطالعه، افت و خیزهای نمودار هماهنگی و ارتباط نزدیکی با هم دارند؛ با این تفاوت که در سال‌های آغاز دوره، اختلاف قابل توجهی بین نتایج محاسبات و نتایج پایگاه داده وجود دارد. همانند شاخص SPEI، پایگاه داده شرایط خشکسالی را در تمام دوره‌ها شدیدتر از وضعیت مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: نمودار مقادیر میانگین شاخص SC-PDSI

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از دو شاخص خودتنظیم پالمر (SC-PDSI) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) برای بررسی وضعیت خشکسالی در ۱۰۱ ایستگاه کشور استفاده شد و سپس، نتایج حاصل از داده‌های مشاهداتی با نتایج اخذ شده از دو پایگاه داده مقایسه شد. براساس مقادیر محاسباتی شاخص SPEI، در تمام دوره‌های زمانی مورد بررسی، بیش از ۶۰ درصد از سال‌ها در وضعیت نرمال قرار دارد و ۴۰ درصد باقی‌مانده در سایر طبقات خشکسالی قرار می‌گیرد. کمترین درصد مربوط به طبقه خشکسالی بسیار شدید است که ۵ درصد از سال‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. الگوی قابل مشاهده در این زمینه وجود هسته‌های بیشینه خشکسالی بسیار شدید در مناطق جنوب شرقی، مرکزی و نیمه غربی کشور است. همچنین، با بررسی نموداری شاخص مشخص می‌شود که در دوره‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه شاخص SPEI، سال ۲۰۰۰ شروع سال‌های توأم با خشکسالی است که با نتایج مطالعه حسینی و همکاران (۲۰۲۰) و بابایی و علیجانی (۱۳۹۲) مطابقت دارد. در شاخص SC-PDSI و دوره‌های ۳ و ۶ ماهه در شاخص SPEI، شروع خشکسالی سال ۱۹۹۹ است. می‌شود وضعیت شروع خشکسالی در تاریخ‌های فوق

(۲۰۰۰ و ۱۹۹۹) را در قالب مطالعه دیگری بررسی کرد که این موضوع را از لحاظ شرایط اقلیمی و سینوپتیکی حاکم بر کشور ریشه‌یابی کند.

بر اساس مقادیر محاسباتی شاخص SC-PDSI، در دوره مورد مطالعه بیشترین درصد سال‌ها در طبقه نرمال و کمترین آن‌ها در طبقه خشکسالی بسیار شدید قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج دو شاخص SPEI و SC-PDSI به دست آمده از محاسبات و اخذ شده از پایگاه داده نشان می‌دهد که از نظر شدت خشکسالی، هماهنگی و همپوشانی مکانی بین آن‌ها وجود ندارد و تفاوت‌های آشکاری در درصد سال‌های هر طبقه خشکسالی مشاهده می‌شود. این در حالی است که با وجود اختلاف بین مقادیر محاسباتی و پایگاه داده، هماهنگی زمانی خوبی بین این دو دسته از نتایج وجود دارد. همان‌گونه که نصرتی (۱۳۹۳)، مصطفی‌زاده و ذبیحی (۱۳۹۵) و وانگ و همکاران (۲۰۱۵) بیان کرده‌اند، بررسی متغیرهای تعیین‌کننده در دو شاخص SPEI و SC-PDSI (بارش و تبخیر و تعرق) نشان‌دهنده این واقعیت است که خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید در بخش‌هایی از کشور اتفاق افتاده است که از وضعیت بارشی نسبتاً مناسب‌تری برخوردار هستند و تغییر در میزان بارش به صورت خشکسالی شدیدتر نمود پیدا کرده است.

باتوجه به نتایج پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، ضمن ارزیابی مداوم کارایی دو شاخص یادشده در پایش خشکسالی مناطق محدودتر کشور، دلایل عدم تطابق مکانی نتایج دو پایگاه داده با نتایج محاسباتی بررسی شود.

۵- منابع

- Alijani, B. & Kaviani, M. R., (2019), *Fundamentals of climatology*, 21st Edition, Tehran: Samt Press
- Azizi, GH. & Safarkhani, E., (2002), “Evaluation of Drought and Its Effect on the Yield of Dryland Wheat in Ilam Province with an Emphasis on the Recent Years (1998-2000) Droughts”, *The Journal of Spatial Planning*, 6(2): 61-79.
- Babaei, O. & Alijani, B., (2013), “Spatial Analysis of Long Duration Droughts in Iran”, *Physical Geography Research Quarterly*, 45(3): 1-12.
- Blekinsop, S. & Fowler, H. J., (2007), “Changes in Drought Frequency, Severity and Duration for the British Isles Projected by the PRUDENCE Regional Climate Models”, *Journal of Hydrology*, 342: 50-71.



- Byun, H. R. & Wilhite, D. A., (1999), “Objective Quantification of Drought Severity and Duration”, *Journal of Climate*, 12(9): 2747-2756.
- Doostan, R., (2020), “Analysis of Drought Researches in Iran”, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6 (4): 53-94.
- Fanni, Z., Khalilollahi, H. A., Sajjadi, J. & Falsoleiman, M., (2016), “Analysis of the Causes and Consequences of Drought in South Khorasan Province and Birjand”, *The Journal of Spatial Planning*, 20(4): 175-200.
- Ghorbani, H., Vali, A. & Zarepour, H., (2019), “Analysis of the Climatological Drought Trend Variations using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Esfahan Province”, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6 (2): 129-146.
- Hobbins, M., Dai, A., Roderick, M. L. & Farquhar, G. D., (2008), “Revisiting the Parameterization of Potential Evaporation as a Driver of Long-Term Water Balance Trends”, *Geophysical Research Letters*, 35(12): 1-6.
- Hosseini, A., Ghavidel, Y., Khorshiddoust, A. M. & Farajzadeh, M., (2020), “Spatio-temporal Analysis of Dry and Wet Periods in Iran by Using Global Precipitation Climatology Center - Drought Index (GPCC –DI)”, *Theoretical and Applied Climatology*, Published online 24 November 2020, 1-11.
- Karimi, H., Zeidali, A. & Omidipour, R., (2018), “Technical Note: Evaluation the Effect of Standard Precipitation Index on The Rainfed Wheat Yield in Ilam Province”, *Watershed Engineering and Management*, 9(4): 493-499.
- Moghaddasi, M., Morid, S., Ghaemi, H. & Mohammadvali Samani, J., (2005), “Daily Monitoring of Drought in Tehran Province”, *Iranian Journal of Agriculture Science*, 36(1): 51-62.
- Mostafazadeh, R. & Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI Indices to Meteorological Drought Assessment Using R Programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 633-643.
- Nosrati, K., (2015), “Evaluation of Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) to Identify Drought in Different Climates of Iran”, *Environmental Sciences*, 12(4): 63-74.

- Paulo, A. A., Rosa1, R. D. & Pereira, L. S., (2012), “Climate Trends and behavior of Drought Indices Based on Precipitation and Evapotranspiration in Portugal”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 1481–1491.
- Savari, M. & Eskandari damaneh, H., (2019), “The Role of Participatory Management in Empowering Local Communities in Coping with Droughts in Southern Kerman Province”, *The Journal of Spatial Planning*, 23(2): 123-171.
- Shabanali Fami, H., Savari, M., Motaghed, M., Mohammadzadeh Nasrabadi, M., Afshari, S. & Baghaee, M., (2020), “Formulating and Analysis of Adaptation Strategies of Farmers to Drought Conditions in Isfahan Province Using TOWS Matrix”, *The Journal of Spatial Planning*, 24(1): 21-47.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V. & Barbosa, P., (2015), “The Biggest Drought Events in Europe from 1950 to 2012”, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3:509–524.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S. & Lopez-Moreno, J. I., (2010), “A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index”, *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., Lopez-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Moran-Tejeda, E. & Sanchez-Lorenzo, A., (2012), “Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications”, *Earth Interactions*, 16(10): 1-27.
- Wang, K. Y., Li, Q. F., Yang, Y., Zeng, M., Li, P. C. & Zhang, J. X., (2015), “Analysis of Spatio-Temporal Evolution of Droughts in Luanhe River Basin Using Different Drought Indices”, *Water Science and Engineering*, 8(4): 282-290.
- Wilhite, D. A., Svoboda, D. & Hayes, M. J., (2007), “Understanding the Complex Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation & Preparedness”. *Water Resour. Manag.* 21(5): 763-774.
- Zare Abianeh, H., GHobaeisoogh, M. & Mosaedi, A., (2015). “Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evaoptranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change”, *Journal of Water and Soil*, 29(2), 374-392.



- Zare Abianeh, H., Yazdany, V. & Azhdary, Kh., (2010), “Comparative Study of Four Meteorological Drought Index Based on Relative Yield of Rain Fed Wheat in Hamedan Province”, *Physical Geography Research Quarterly*, 41(69): 35-49.
- Zhang, Y., Li, G., Ge, J., Li, Y., Yu, Z. & Niu, H., (2019), “SC-PDSI Is More Sensitive to Precipitation Than to Reference Evapotranspiration in China During the Time Period 1951–2015”, *Ecological Indicators* 96: 448–457.
- Zhao, H., Gao, G., An, W., Zou, X., Li, H. & Hou, M., (2017), “Timescale Differences Between SC-PDSI And SPEI for Drought Monitoring in China”, *Physics and Chemistry of the Earth*, 102: 48-58.