

واکای خشک‌سالی هواشناسی با شاخص اصلاحی SPI در اقلیم خشک (مطالعه موردی: مرکز، جنوب، و شرق ایران)

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

حسین محمدی^۱ - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران

رضا برنا - دانشیار گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

فریده اسدیان - استادیار گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

چکیده

هدف از اجرای این پژوهش ارزیابی شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و اصلاح این شاخص در مناطق خشک مرکز، جنوب، و شرق ایران است. در این پژوهش از داده‌های آماری ۳۶ ایستگاه سینوپتیک با دوره آماری سی سال به بالا (۱۳۶۴-۱۳۹۸) استفاده شد. به منظور دخالت دادن تأثیر زمانی بارش، شاخص اصلاحی EP-SPI ارائه شده است که در آن داده‌های بارش ماهانه نخست با تابع EPI میرا شده است. به عنوان ورودی از برنامه SPI Generator در بازه زمانی دوازده ماهه استفاده شد؛ بدین ترتیب، اثر بارش‌های قدیمی تر کاهش یافته و شاخص برآورد بهتری از خشک‌سالی ارائه می‌نماید. وقوع بارش بیش از نرمال، پیش از شروع دوره خشک، می‌تواند مقدار شاخص SPI را، با وجود رخداد خشک‌سالی، نرمال یا حتی ترسال نشان دهد. مطابق بررسی انجام گرفته، بیشترین اختلاف دو روش معادل چهار سطح جابه‌جایی شاخص خشک‌سالی از ترسال بسیار شدید به خشک‌سالی خفیف بوده است. در این تحقیق مشخص شد که ۸/۹ درصد از وقایع خشک‌سالی دوازده‌ماهه از دید شاخص SPI مخفی مانده است. کارایی روش EP-SPI برای آشکارسازی خشک‌سالی در بازه دوازده‌ماهه، با تصاویر NDVI در تاریخ‌های نظیر مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داد که تطابق بهتری نسبت به SPI دارد.

واژگان کلیدی: اقلیم خشک، شاخص اصلاحی EP-SPI، شاخص بارش استاندارد، شاخص بارش مؤثر استاندارد.

مقدمه

بشر در طول تاریخ همواره با محیط اطراف خود در ارتباط بوده است. از عوامل محیطی تأثیرگذار و حائز اهمیت مخاطرات اقلیمی است. طبق گزارش گروه بلندپایه سازمان ملل و بانک جهانی^۲ 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 درصد از جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه خشک‌سالی، تا سال ۲۰۳۰، ۷۰۰ میلیون نفر در معرض خطر آواره شدن اند (پورتال سازمان بهداشت جهانی^۳ - تاریخ نقل قول: ژوئن ۲۰۲۱). در جوامع علمی جهان موضوع گرمایش جهانی و تأثیر

Email: hmmohammadi@ut.ac.ir

۱. نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۸۴۹۷۶۷

2. United Nations/World Bank High Level Panel on Water (HLPW)
3. World Health Organization, health-topics/drought (cited: Jun 2021)

آن بر خشک‌سالی مورد توجه قرار دارد. در بند ۳۳ دستور کار سند ۲۰۳۰ یونسکو، با عنوان «دگرگون‌ساختن جهان ما»، بر نظارت و مدیریت خشک‌سالی برای کاهش خطر فاجعه‌بار تأکید شده است (پیروزنیک، ۱۳۹۹: ۲۳).

خشک‌سالی پدیده‌ای اقلیمی است که به لحاظ آماری پدیده‌ای تصادفی است و توسط شاخص‌های متعددی مطالعه می‌شود (نصری، ۱۳۸۷). از روش‌هایی که تحول بزرگی در این حوزه صورت داده مطالعات مک‌کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ است که به ارائه شاخصی به نام SPI (شاخص استاندارد شده بارش) منجر شد. آن‌ها این شاخص 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. اعلامیه لینکلن^۱ در سال ۲۰۰۹ ارزش پایش خشک‌سالی را تأیید می‌کند و به طور صریح استفاده از SPI را برای توصیف خشک‌سالی‌های هواشناسی توصیه می‌کند (هیز و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۸۵). به طور خلاصه، طبق نظر جمعی از پژوهشگران مانند هایز (۲۰۰۰)، 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. ردموند (۲۰۰۲) دلایل محکمی از جمله پیشینه نظری محکم و بررسی گسترده در بیش از ۱۲۰۰ ایستگاه را برای استفاده از SPI در حوزه عملی و مطالعات بنیادی ارائه داد. با اینکه کتاب‌شناسی گسترده‌ای به کاربردهای مختلف شاخص SPI اشاره دارد، مرور جامعی از کاربری این شاخص ارائه نشده است (چوال، ۲۰۱۵: ۳۵). نظر به محدودیت‌های SPI، مانند عملکرد نامناسب در مناطق کم‌باران، بر طبق گفته ژایی و فنگ (۲۰۰۹)، تمرکز بر یک متغیر واحد برای توصیف پدیده‌های پیچیده بر اساس نظریه جبرهویت (۲۰۱۱) و بر اساس پژوهش پائولو و پیرا (۲۰۰۶) کمبود اطلاعات قبل از دوره مورد نظر، تنظیمات روش‌شناختی در محاسبه و کاربرد SPI، باید همچنان در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد (چوال، ۲۰۱۵: ۳۷).

میرعباسی نجف‌آبادی و دین‌پژوه (۱۳۸۹) با بررسی پایش بلندمدت خشک‌سالی‌های ارومیه، با استفاده از شاخص‌های مختلف، به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI اصلاح‌شده نتایج بهتری در بررسی خشک‌سالی نسبت به شاخص SPI در پی دارد. بابایی فینی و علیجانی (۱۳۹۲) برای تحلیل فضایی خشک‌سالی‌های بلندمدت ایران از نمایه SPI در بازه زمانی دوازده و بیست و چهار ماهه استفاده کردند. محمودی و میرعباسی نجف‌آبادی (۱۳۹۳) در استان کهگیلویه و بویراحمد با مقایسه دو شاخص SPI و SPI اصلاح‌شده به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI نمی‌تواند تغییرات فصلی بارش را به طور دقیق برآورد کند و SPI اصلاح‌شده جای‌گزین مناسبی برای آن است. مجیدی و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی چهار شاخص خشک‌سالی Z چینی، Z چینی اصلاح‌شده، SPI و SPI اصلاح‌شده در دشت قه‌اوند-رز (استان همدان) به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI اصلاح‌شده عملکرد بهتری در توصیف خشک‌سالی‌های شدید نسبت به دیگر شاخص‌ها دارد. رضایی و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از آمار هواشناسی سی ایستگاه همدیدی در ایران، به این نتیجه رسیدند که استفاده از توابع توزیع رایج به جای تابع توزیع برتر در تعیین هر دو شاخص SPI و RDI سالانه باعث تغییر فراوانی و در نتیجه جابه‌جایی طبقات مختلف خشک‌سالی می‌شود. مجیدی و همکاران (۱۳۹۷)، برای تحلیل روند خصوصیات خشک‌سالی‌های استان همدان، شامل شدت، مدت، و زمان بین آغاز دو خشک‌سالی متوالی، از شاخص بارش استاندارد شده اصلاحی (SPI_{mod}) استفاده کردند. حمصی و همکاران (۱۳۹۸) 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 پیش‌بینی خشک‌سالی به کار بردند. 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 بررسی کردند. نتایج نشان داد که دقت شاخص بارش استاندارد اصلاح شده (MSPI) از شاخص بارش استاندارد (SPI) و دیگر شاخص‌ها بیشتر است. برای

1. The Lincoln Declaration on Drought Indices

ارزیابی دقیق‌تر خشک‌سالی، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) با استفاده از محصول ماهانه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) سنجنده MODIS محاسبه شد. نبی‌زاده بلخکانلو و همکاران (۱۳۹۹) برای بررسی اثرهای خشک‌سالی کشاورزی بر تراکم پوشش گیاهی در حوضه آبریز سیمینه‌رود از روش‌های سنجش از دور از جمله VTCI، WDI و NDVI استفاده کردند. نادى و شیوخی سوغانلو (۱۳۹۹) در پژوهشی که روی پنج ایستگاه از نقاط مختلف ایران با شرایط متفاوت دمایی و رطوبتی در طی دوره ۵۵ ساله (۱۹۵۶-۲۰۱۰) انجام دادند، برای رفع ایرادات SPI اولاً توزیع مناسب بارش را از بین هشت توزیع مختلف انتخاب کردند و ثانیاً برای رفع مشکل تغییرات فصلی از نمایه بارش استاندارد اصلاح‌شده (SPI_{mod}) استفاده کردند. نتایج نشان داد اختلاف این دو شاخص در ایستگاه‌های خشک‌تر آشکارتر است. بنابراین، استفاده از SPI_{mod} به جای SPI به دلیل حذف اثرهای فصلی بارش نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

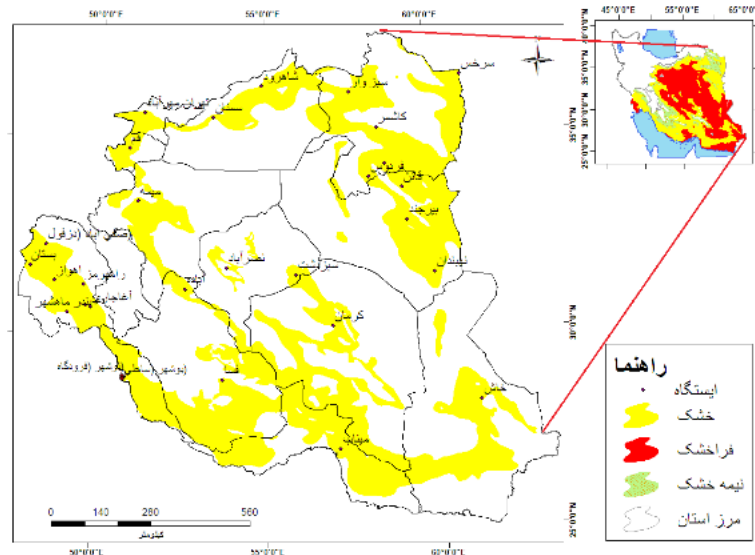
برای حل کردن محدودیت‌های شاخص SPI، کائو و گویندراجو (۲۰۱۰) شاخص SPI اصلاح‌شده را پیشنهاد کردند. همچنین، کوترولیس و همکاران (۲۰۱۰) برای ارزیابی خشک‌سالی‌های هواشناسی در جزیره کرت (یونان) از شاخص جدیدی به نام SN-SPI استفاده کردند. SN-SPI شاخص تغییر یافته SPI است که بر اساس احتمال بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف ابداع و برای ارزیابی بهتر شدت خشک‌سالی از نظر مکانی نرمال شده است. نتایج این شاخص شامل توزیع مکانی بارش است و هشدارهای خشک‌سالی را بهبود می‌بخشد. اسپینونی و همکاران (۲۰۱۳) به‌منظور تحلیلی بر رخدادهای خشک‌سالی در منطقه کارپاتیان اوکراین مابین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۰ از آمار پنجاه‌ساله روزانه بارش و دما استفاده کردند. شاخص‌های SPI، SPEI و RDI در دوره‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه تخمین زده شد؛ در حالی که شاخص PADI به‌صورت سالانه محاسبه شد. مطابق این پژوهش، شاخص SPI بهترین برآورد از خشک‌سالی را وقتی ارائه می‌دهد که خشک‌سالی عمدتاً ناشی از کمبود بارش باشد. زو و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه خود امکان محاسبه شاخص استاندارد بارش (SPI) با دنباله‌های کوتاه‌مدت بارش در چین را بر اساس داده‌های ۲۴۱۶ ایستگاه مشاهده و در بازه زمانی ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۹ بررسی کردند. نتیجه نشان داد محاسبه شاخص SPI برای ایستگاه‌های متوالی با فاصله کوتاه بر اساس درون‌یابی جزئی که از پارامترهای توزیع بارش از ایستگاه‌های متوالی با فاصله زیاد گرفته شده بود امکان‌پذیر است. ولی در بلندمدت تجزیه و تحلیل خطا نشان می‌دهد که خطای SPI در شرق چین کوچک و در غرب چین بزرگ است و زمانی که ایستگاه‌های مشاهده متراکم‌تر بودند SPI دقیق‌تر بود. یاسین و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی قابلیت نسخه‌های مختلف مدل‌های یادگیری ماشین (ML) را در پیش‌بینی شاخص بارش استاندارد (SPI) در بازه‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه بررسی کردند. مدل‌ها با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه برای دوره ۱۹۴۹-۲۰۱۳ در چهار ایستگاه هواشناسی بنگلادش اجرا شد. نتایج نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی خشک‌سالی در منطقه قابل اعتماد و قوی‌اند. مقایسه مدل‌ها، ELM را به‌عنوان بهترین مدل در پیش‌بینی خشک‌سالی با حداقل RMSE برای چهار ایستگاه در بازه‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه نشان داد. عطافی و همکاران (۲۰۲۱) برای ارزیابی تأثیر خشک‌سالی بر عملکرد محصولات زراعی در استان بصره عراق از تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای بین NDVI و SPI مبتنی بر CHIRPS استفاده کردند؛ نتایج اصلی این مطالعه بیان می‌کند که در مواردی با SPI بالا (یعنی شدت خشک‌سالی کمتر) NDVI توانایی بهتری برای نشان‌دادن نوسانات SPI داشت؛ اما در شدت‌های خشک‌سالی بالاتر NDVI نسبت به نوسانات SPI حساسیت کمتری داشت.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان‌های سمنان، تهران، قم، اصفهان، فارس، و کرمان در مرکز ایران، استان‌های

خراسان رضوی، خراسان جنوبی، و سیستان و بلوچستان در شرق ایران، و استان‌های هرمزگان، بوشهر، و خوزستان در جنوب ایران بین ۲۵ تا ۳۸ درجه عرض شمالی و ۴۸ تا ۶۴ درجه طول شرقی است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است.



تهیه کننده: نگارندگان

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

در این مطالعه شاخص خشک‌سالی SPI در مناطق شرق، مرکز، و جنوب کشور در بازه زمانی ۳۴ ساله واکاوی شد. با عنایت به اینکه برای محاسبه شاخص SPI نیاز به حداقل آمار سی ساله است، بدین منظور، آمار ماهانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۱۳۶۴-۱۳۹۸ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. در موارد نیاز به اصلاح، ترمیم، یا تکمیل آمار ماهانه، با بهره‌گیری از آمار روزانه، شبکه باران‌سنجی اصلاح صورت گرفت. همچنین، برای تعیین محدوده مناطق خشک از روش دومارتن گسترش یافته ($5 < I < 10$) استفاده شد. بر این اساس، از ۲۶ ایستگاه سینوپتیک در این ناحیه مشتمل بر ۱۲ استان برای محاسبات شاخص SPI استفاده شد.

بدین صورت که با استفاده از روش میراکردن، اثر بارش با تابع زمان کاهش یافته و شاخص اصلاحی جدید با عنوان EP-SPI معرفی و مقادیر حاصل از آن با شاخص SPI نظیر مقایسه و ارزیابی شد.

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 به‌عنوان هشدار اولیه پایش خشک‌سالی و کمک به ارزیابی شدت آن به کار گرفته شود. این روش به وسیله مکی، دوسکن، و جان کلاست^۲، اعضای مرکز اقلیمی کلرادو در سال

1. Effective Precipitation- Standardized Precipitation Index

2. Jan Kleist

۱۹۹۳، با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر آب سطحی، رطوبت خاک، و جریان آبراهه ارائه شده است. در این روش، نخست احتمال نظیر مجموع بارش در بازه زمانی مورد نظر ۳، ۶، ۹، ۱۲، یا ۲۴ ماهه طی مدت سی سال یا بیشتر محاسبه و سپس این مقدار نرمال می‌شود.

نوع استفاده از نتایج شاخص معین می‌کند که از چه بازه زمانی در محاسبه SPI استفاده شود. به طور مثال، SPI یک تا سه ماهه خشک‌سالی کوتاه‌مدت با کاربری تعیین شروع خشک‌سالی هواشناسی و SPI شش و نه ماهه خشک‌سالی میان‌مدت با کاربری کشاورزی و SPI دوازده ماهه و بالاتر خشک‌سالی بلندمدت با کاربری هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. در این پژوهش به مطالعه خشک‌سالی دوازده ماهه پرداخته شده است. برای محاسبه نمایه SPI، از توزیع گاما برای برازش داده‌های بلندمدت بارش استفاده شد.

۲. روش شاخص بارش مؤثر استاندارد EP-SPI

در این پژوهش با تلفیق دو شاخص SPI و EPI شاخص اصلاحی جدید با عنوان EP-SPI^۱ ابداع و از آن استفاده شده است. از آنجا که شاخص SPI تأثیر زمان بارش را در دوره مورد بررسی مورد توجه قرار نمی‌دهد، امکان برآورد ترسالی یا خشک‌سالی غیرواقعی وجود دارد. از این رو، در این پژوهش شاخص SPI با داده‌های بارش مؤثر محاسبه شد. بدین ترتیب، اثر بارش‌های اتفاق افتاده در ابتدای دوره دوازده ماهه در مقایسه با بارش‌های اتفاق افتاده در انتهای دوره کاهش یافته و شاخص برآورد بهتری از خشک‌سالی ارائه می‌نماید. در این روش، نخست داده‌های ماهانه بارش ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه به صورت ستونی و براساس سال و ماه وقوع برای هر ایستگاه مرتب شد و سپس با استفاده از رابطه ۱ به محاسبه بارش مؤثر دوازده ماهه به‌طور جداگانه اقدام شد.

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^n \frac{P_m}{n} \quad \text{رابطه ۱}$$

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) است. مثلاً، اگر i برابر ۱۲ ماه باشد، به‌صورت رابطه ۲ مطابق زیر برآورد خواهد شد:

$$EP_{12} = (P_1)/1 + (P_1+P_2)/2 + \dots + (P_1+P_2+\dots+P_{12})/12 \quad \text{رابطه ۲}$$

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. فقط یک بار آن هم با نسبت یک دوازدهم در محاسبه شرکت داده شده است. این رابطه به‌خوبی تأثیر بالاتر بارش‌های اخیر نسبت به بارش‌های قدیمی‌تر را نشان می‌دهد. بدین ترتیب، برای هر دوره، EP هر ماه با در نظر گرفتن تداوم مورد نظر محاسبه شد. سپس، به جای بارش ماهانه، بارش مؤثر ماهانه در محاسبات مربوط به شاخص SPI وارد شد. برای این کار از نرم‌افزار SPIGenerator (ارائه شده توسط مرکز پایش خشک‌سالی امریکا^۲ در سال ۲۰۱۸) استفاده شد.

1. Effective Precipitation- Standardized Precipitation Index
2. National Drought Mitigation Center

یافته‌های پژوهش

الف) آزمون‌های آماری

۱. آزمون همبستگی

برای آزمون همبستگی دو روش، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، آزمون همبستگی روی داده‌ها انجام گرفت و نتیجهٔ ضریب همبستگی ۰.۸۲۰ با معنی‌داری بسیار زیاد مطابق جدول ۱ به‌دست آمد.

جدول ۱. همبستگی دو روش SPI و EP-SPI دوازده‌ماهه در ایستگاه‌های ناحیهٔ خشک

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	SPI12 & EP_SPI12	۹۸۹۵	۰/۸۲۰	۰/۰۰۰

۲. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

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

با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۱ نرمال بودن توزیع داده‌ها مشخص می‌شود. جدول ۲ نتیجهٔ 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	۰/۰۰۹	۹۸۹۴	۰/۱۰۱
EP_SPI12	۰/۰۱۱	۹۸۹۴	۰/۰۱۰
Delta12	۰/۰۵۵	۹۸۹۴	۰/۰۰۰

مأخذ: نگارندگان

در اینجا فرض صفر نرمال بودن جامعهٔ 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 اجرای آزمون مقایسه‌ای بین میانگین آن دو از آزمون‌های زوجی ناپارامتری باید استفاده شود. یکی از آزمون‌های توصیه‌شده که اختلاف میانگین دو سری داده را در روش‌های ناپارامتری مشخص می‌کند «آزمون ویلکاکسون»^۲ است. در ادامه به توضیحات و نتایج این آزمون پرداخته می‌شود.

۳. آزمون ویلکاکسون رتبهٔ علامت‌دار

آزمون ویلکاکسون رتبهٔ علامت‌دار به‌منظور بررسی دو نمونهٔ وابسته یا انطباق بین دو نمونه به‌کار گرفته می‌شود. این آزمون را می‌توان مشابه آزمون t برای گروه‌های وابسته برای میانگین جامعهٔ غیرنرمال در نظر گرفت. هرچند این آزمون ناپارامتری بوده و به توزیع داده‌ها بستگی ندارد، برای اجرای این آزمون داده‌ها باید به‌صورت زوجی و از یک جامعه گرفته

1. Kolmogorov-Smirnov
2. Wilcoxon Signed Rank Test

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 به دست آورد و این تفاضل‌ها را رتبه‌بندی کرد. به این ترتیب، باید مطمئن شد که تفاضل مقدار زوج‌ها به صورت مقیاس ترتیبی باشد. جدول ۳ نتایج این آزمون را برای مقادیر SPI و EP-SPI دوازده‌ماهه نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج آزمون آماری ویلکاکسون رتبه علامت‌دار

الف) رتبه‌بندی				
EP_SPI12 - SPI12		N	Mean Rank	Sum of Ranks
a. EP_SPI12 < SPI12	Negative Ranks	^a ۴۸۴۵	۴۹۲۶٫۹۷	۲۳۸۷۱۱۹۲
b. EP_SPI12 > SPI12	Positive Ranks	^b ۴۹۷۰	۴۸۸۹٫۵	۲۴۳۰۰۸۲۸
c. EP_SPI12 = SPI12	Ties	^c ۸۰		
Total		۹۸۹۵		

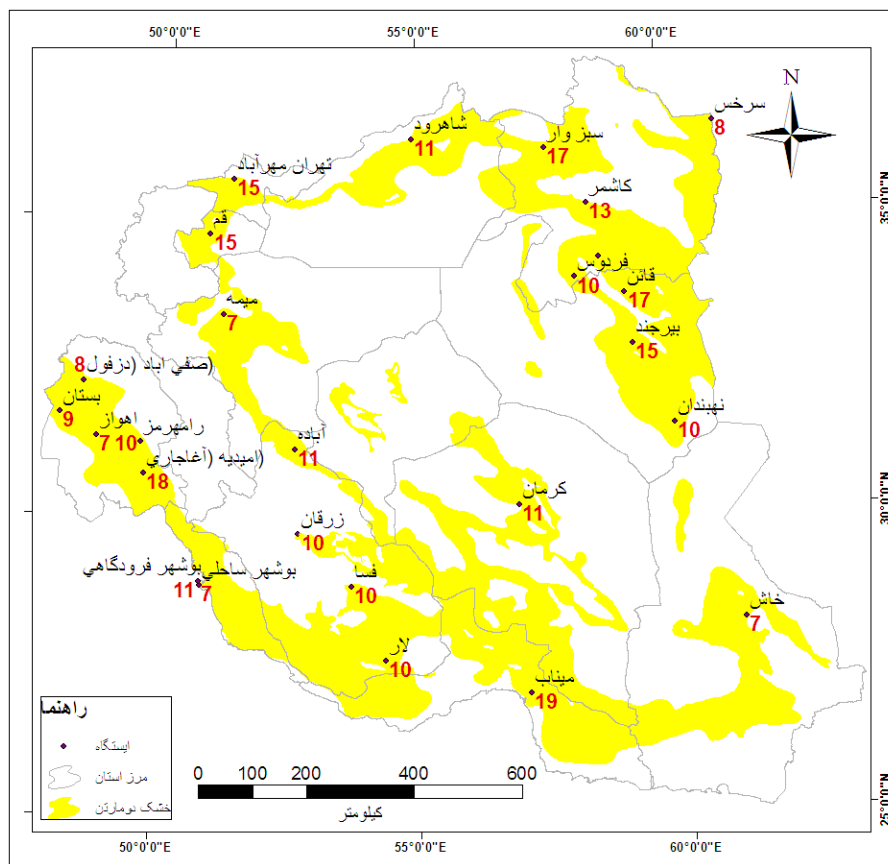
ب) آزمون آماری ^a (a. Wilcoxon Signed Ranks Test)	
EP_SPI12 - SPI12	
jb. Based on positive ranks/Z	-۰٫۷۶۵ ^b
Asymp. Sig. (2-tailed)	۰٫۴۴۴

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار احتمال محاسبه‌شده (۰/۴۴۴) بزرگ‌تر از مقدار احتمال خطای نوع اول ($\alpha=0/05$) است. از این رو، فرض صفر، که یکسان‌بودن دو روش بوده، در سطح خطای آزمون ۵ درصد رد نمی‌شود و دو روش از نظر آماری تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد با یکدیگر ندارند. در ادامه به موارد اختلاف دو روش و شرایطی که این تفاوت‌ها را ایجاد می‌کند پرداخته می‌شود.

ب) موارد تفاوت با حداقل یک سطح جابه‌جایی شاخص خشک‌سالی

در بررسی دو شاخص SPI و EP-SPI دوازده‌ماهه ایستگاه‌های مورد مطالعه، از ۹۸۹۵ واقعه ۸۸۰ مورد (۸٫۹ درصد) خشک‌سالی رخ داده؛ یعنی SPI مثبت و EP-SPI منفی بوده و تعداد ۲۷۷ مورد اختلاف مقادیر شاخص SPI و EP-SPI بیش از ۱ بوده است. مقادیر اختلاف یک و بیشتر از آن جهت مورد توجه است که مبنای حداقل یک سطح جابه‌جایی در طبقه‌بندی خشک‌سالی است. در ادامه نتایج بررسی کلی از موارد اختلاف ارائه می‌شود. ابتدا به بیان حادثترین وقایع و بیشینه موارد اختلاف در هر ایستگاه پرداخته می‌شود.

مطابق بررسی انجام‌گرفته، کمترین تعداد واقعه با اختلاف یک و بیشتر مربوط به ایستگاه صفی‌آباد (دزفول) در استان خوزستان با شش واقعه و بیشترین تعداد مربوط به ایستگاه‌های امیدیه (آغاجاری) در استان خوزستان و میناب در استان هرمزگان با هجده واقعه به‌ثبت رسیده است (شکل ۲). در جدول ۴ اطلاعات کلی به تفکیک استان ارائه شده است. همچنین، توزیع درجات خشک‌سالی به روش EP-SPI و تعداد مورد اختلاف هر درجه خشک‌سالی با اختلاف یک و بیشتر با روش SPI کاوش شد که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است.



تهیه کننده: نگارندگان

شکل ۲. تعداد وقایع دوازده‌ماههٔ اختلاف EP-SPI و SPI در ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۴. اطلاعات استانی خشک‌سالی دوازده‌ماهه به روش EP-SPI

استان	تعداد ایستگاه	تعداد اختلاف SPI و EP-SPI	تعداد نسبی	کمینهٔ اختلاف	میانگین اختلاف	بیشینهٔ اختلاف
اصفهان	۱	۷	۷	۱	۱,۴۱	۱,۸۳
سمنان	۱	۸	۸	۱	۱,۷۴	۲,۲۹
خراسان جنوبی	۴	۵۱	۱۳	۱	۱,۴۶	۳,۱۷
خراسان رضوی	۴	۴۷	۱۲	۱	۱,۴۶	۲,۵۴
تهران	۱	۱۳	۱۳	۱	۱,۶۶	۳,۴۴
قم	۱	۱۵	۱۵	۱	۱,۶۰	۳,۶۴
خوزستان	۵	۴۹	۱۰	۱	۱,۴۷	۲,۶۹
هرمزگان	۱	۱۸	۱۸	۱	۱,۴۶	۲,۲۱
کرمان	۱	۸	۸	۱	۱,۲۹	۲
بوشهر	۲	۱۸	۹	۱	۱,۷۰	۲,۹۵
فارس	۴	۳۶	۹	۱	۱,۵۰	۲,۹۶
سیستان و بلوچستان	۱	۷	۷	۱	۱,۳۹	۱,۷۷
کل محدوده	۲۶	۲۷۷	۱۱	۱	۱,۵۰	۳,۶۴

جدول ۵. توزیع درجات خشک‌سالی دوازده‌ماهه به روش EP-SPI*

محدوده EP-SPI	درجه خشک‌سالی	تعداد اختلاف EP-SPI و SPI	حداقل سطح جابه‌جایی شاخص
۰ تا ۰/۹۹-	خفیف یا ملایم	۲۱۰	یک سطح
۱/۰- تا ۱/۴۹-	متوسط	۵۳	دو سطح
۱/۵- تا ۱/۹۹-	شدید	۱۱	سه سطح
کمتر از ۲-	بسیار شدید یا حاد	۳	چهار سطح

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

مطابق جدول ۵، در ۶۷ مورد از وقایع، درجه خشک‌سالی ۲ تا ۴ سطح اختلاف با SPI داشته است. همچنین، این ۲۷۷ مورد اختلاف (جدول ۵)، طی ۹۷ تاریخ مجزا ثبت شده که جدول ۷ توزیع ماهانه این این وقایع را نشان می‌دهد.

جدول ۶. توزیع ماهانه تعداد اختلاف بین دو روش EP-SPI و SPI ۱۲ ماهه

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
تعداد	۱	۲	۰	۲	۱	۴	۱۱	۲۰	۱۷	۱۶	۱۵	۸
میانگین اختلاف	۱/۰۲	۱/۰۵	-	۱/۰۳	۱/۰۸	۱/۷۹	۱/۲۹	۱/۳۹	۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۴۹	۱/۳۴

همان‌طور که دیده می‌شود، این اختلاف‌ها در ماه‌های آبان تا بهمن بیش از دیگر ماه‌ها بروز می‌کند و به لحاظ میانگین، اختلاف در آذر و دی ماه شدیدتر است. با عنایت به اهمیت موارد بسیار شدید، سه واقعه حاد بیشتر بررسی شد. این سه واقعه در استان‌های قم، تهران، و خوزستان در تاریخ‌های دی و بهمن ۱۳۷۵ و آذر ۱۳۷۷ به وقوع پیوسته است. با نگاهی به مقادیر اختلاف، مشخص می‌شود که در این سه ایستگاه درجه خشک‌سالی حداقل چهار سطح جابه‌جا شده است. جدول ۷ تاریخ وقوع حادثه‌ترین ایستگاه‌های درگیر و جزئیات آن را نشان می‌دهد.

جدول ۷. وقایع خشک‌سالی دوازده‌ماهه بسیار شدید به روش EP-SPI

تاریخ	نام ایستگاه	استان	EP-SPI	SPI	اختلاف
دی ۷۵	قم	قم	-۲/۶۶	۰/۹۸	۳/۶۴
بهمن ۷۵	مهرآباد	تهران	-۲/۶۶	۰/۷۸	۳/۴۴
آذر ۷۷	امیدیه (آغاچاری)	خوزستان	-۲/۰۹	۰/۰۸	۲/۱۷

در ادامه به بررسی دوازده‌ماهه حادثه‌ترین وقایع ترسالی شاخص SPI از ۲۷۷ مورد اختلاف پرداخته می‌شود. جدول ۸ توزیع درجات ترسالی به روش SPI و تعداد مورد اختلاف هر سطح با اختلاف یک و بیشتر با روش EP-SPI را نشان می‌دهد. مطابق این جدول در ۹۰ واقعه شاخص خشک‌سالی حداقل دو سطح جابه‌جا شده است. با عنایت به اهمیت موارد بسیار شدید، سه واقعه که چهار سطح جابه‌جایی داشتند بیشتر بررسی شدند. جدول ۹ تاریخ وقوع و ایستگاه‌های درگیر را نشان می‌دهد.

جدول ۸. توزیع درجات ترسالی دوازده‌ماهه به روش SPI*

محدوده SPI	درجه ترسالی	تعداد مورد اختلاف	حداقل سطح جابه‌جایی شاخص
۰ تا ۰/۹۹-	خفیف	۱۸۷	یک سطح
۱/۰ تا ۱/۴۹-	متوسط	۶۵	دو سطح
۱/۵ تا ۱/۹۹-	شدید	۲۲	سه سطح
بیشتر از ۲-	بسیار شدید	۳	چهار سطح

* طبقه‌بندی شاخص SPI بر اساس لوید هیوز و ساندرز (2002)

جدول ۹. وقایع ترسالی دوازده‌ماهه بسیار شدید به روش SPI و اختلاف با EP-SPI

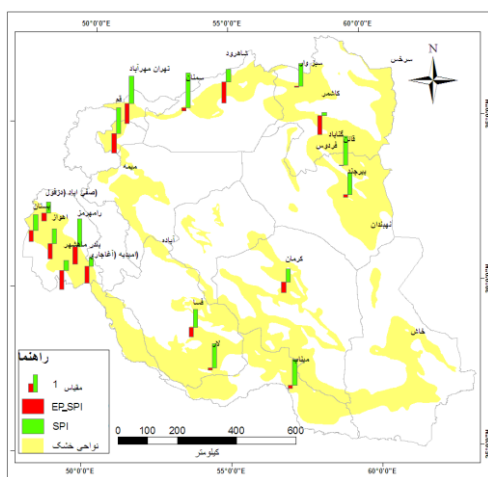
تاریخ	نام ایستگاه	SPI	EP-SPI	اختلاف
۱۳۷۵ آبان	بوشهر (ساحلی)	۲٫۲۱	-۰٫۶۵	۲٫۶
۱۳۷۵ شهریور	بوشهر (فرودگاهی)	۲٫۱۸	-۰٫۶۸	۲٫۵۷
۱۳۷۲ آذر	لار	۲٫۵۳	-۰٫۴۲	۲٫۷۳

این سه واقعه در استان‌های بوشهر و فارس طی سه تاریخ به‌وقوع پیوسته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سه واقعه در ماه‌های شهریور، آبان، و آذر دیده شده است. با نگاهی به مقادیر اختلاف، مشخص شد که در این سه واقعه شاخص خشک‌سالی حداقل چهار سطح جابه‌جا شده است. این مطلب لزوم بازنگری در استفاده از روش SPI دوازده‌ماهه را در مناطق خشک بیش از پیش مشخص می‌کند. همان‌طور که در بالا گفته شد، در بررسی وقایع دوازده‌ماهه اختلاف یک و بیشتر بین دو روش SPI و EP-SPI در ۹۷ ماه دیده شد. در برخی از این ماه‌ها، اختلاف فقط در یک ایستگاه مشاهده شده بود و در برخی اختلاف دو روش به‌طور فراگیر در چندین ایستگاه دیده شد. به‌طور نمونه، پنج رخداد با دوازده ایستگاه مشترک و بیشتر انتخاب شد که شرح آن در جدول ۱۰ آمده است.

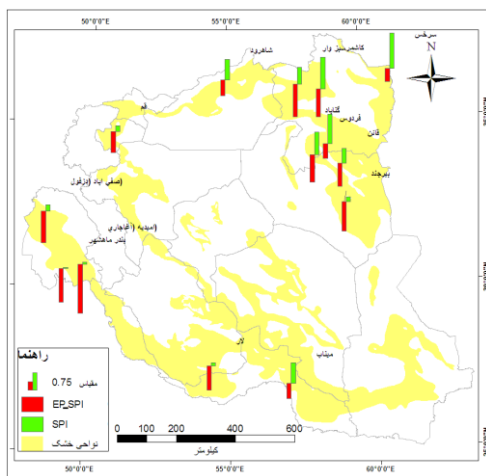
جدول ۱۰. تعداد وقایع دوازده‌ماهه فراگیر و ایستگاه‌های بیشینه

ایستگاه بیشینه	بیشینه اختلاف	تعداد ایستگاه	تاریخ
بوشهر (ساحلی)	۲٫۹۵	۱۷	آذر ۱۳۷۵
لار	۲٫۷۳	۱۴	آذر ۱۳۷۲
کاشمر	۲٫۵۴	۱۴	آذر ۱۳۷۷
کاشمر	۲٫۳۹	۱۲	دی ۱۳۷۲
بوشهر (ساحلی)	۲٫۱۹	۱۲	آبان ۱۳۷۷

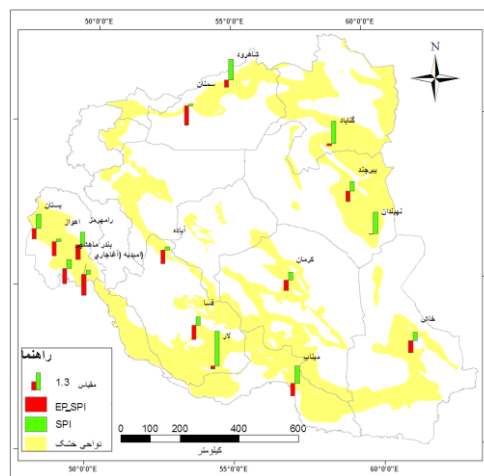
شکل ۳ موقعیت این ایستگاه‌ها و مقادیر اختلاف دو روش در وقایع فراگیر با ۱۲ ایستگاه و بیشتر در هر واقعه را نشان می‌دهد. در هر یک از نقشه‌های شکل ۳ مطابق راهنمای نقشه نمودار میله‌ای سبزرنگ نشان‌دهنده مقدار شاخص SPI دوازده‌ماهه و نمودار میله‌ای قرمز رنگ نشان‌دهنده مقدار شاخص EP-SPI دوازده‌ماهه است.



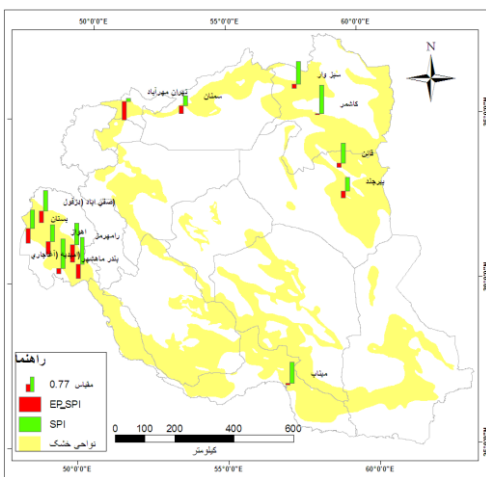
الف



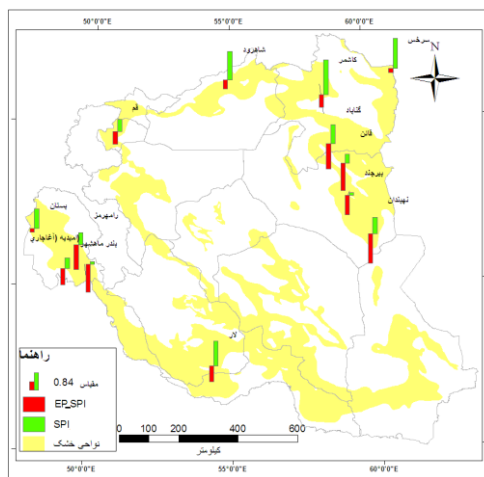
ب



ج



د



ه

شکل ۳. پراکنش ایستگاه‌های هم‌واقع با اختلاف بیش از یک بین دو شاخص SPI و EP-SPI منتهی به الف) آذر ۱۳۷۵، ب) آذر ۱۳۷۲، ج) آذر ۱۳۷۷، د) دی ۱۳۷۲، ه) آبان ۱۳۷۷ تهیه‌کننده: نگارندگان

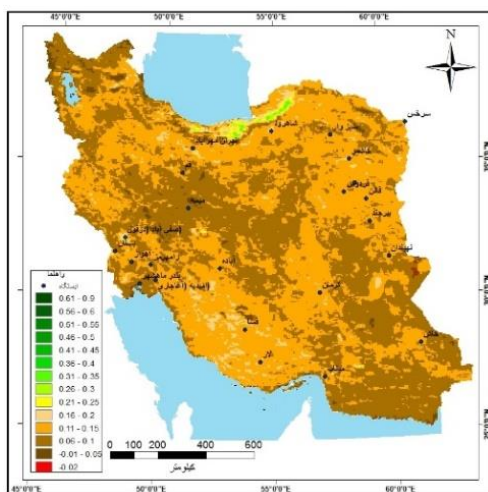
از پنج تاریخی که اختلاف SPI و EP-SPI به صورت فراگیر در ۱۲ تا ۱۷ ایستگاه مشاهده شده، یک واقعه در آبان، سه واقعه در آذر، و یک واقعه در دی‌ماه بوده است. همچنین، ایستگاه‌های میناب و قائن به ترتیب در ۱۸ و ۱۷ واقعه با اختلاف بیش از یک دیده شده‌اند. در نگاه کلی، اختلاف بارش‌ها از سالی به سال دیگر بیشتر در ابتدا 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 با مقایسه شاخص NDVI پرداخته می‌شود.

ج) شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)^۱

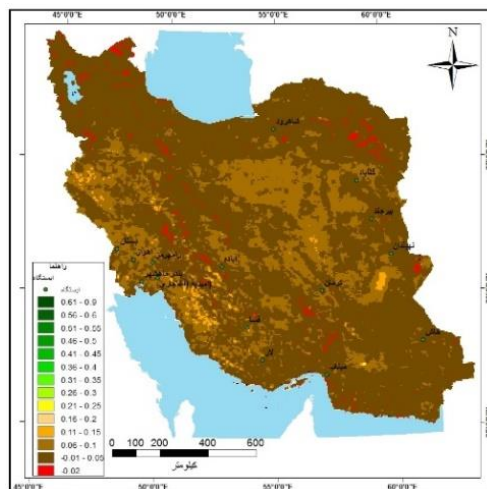
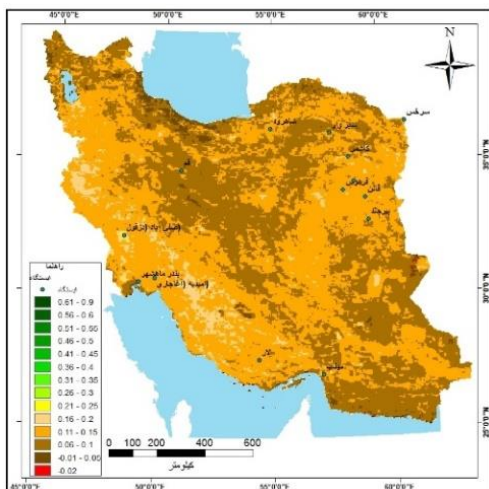
توکر (۱۹۷۹) بر اساس خصوصیات انعکاسی گیاهان در باندهای قرمز و مادون قرمز، شاخص پوشش گیاهی را برای تشخیص سلامتی، شادابی، و همچنین تراکم پوشش گیاهی معرفی کرد. دامنه تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ است. شاخص پوشش گیاهی (NDVI) برای نمایش توده حیاتی پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، تولیدات گیاهی، و تفکیک پوشش گیاهی بسیار مناسب بوده و همچنین در ارتباط با مسائل مرتبط با پوشش گیاهی از این شاخص استفاده می‌شود. در طول زمان، تغییرات مشاهده شده در NDVI بیان‌کننده تیپ پوشش گیاهی، فنولوژی، و حالات محیطی منطقه است. این شاخص بیشترین رابطه را با حجم زنده گیاهی در میان مشخصه‌های پوشش گیاهی دارد. پایش خشک‌سالی از جمله کاربردهای شاخص NDVI است.

در این بخش از تصاویر دریافتی ماهواره NOAA^۲ سنجنده AVHRR^۳ استفاده شد. داده‌های شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) از بانک ثبت اطلاعات آب و هوا (CDR)^۴ سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده گرفته شد. این داده‌ها پوشش گیاهی سطحی را با وضوح شبکه‌ای ۰/۰۵ درجه‌ای ارائه می‌نماید. شکل ۴ نقشه هم‌قدار NDVI و محل ایستگاه‌های مربوط به وقایع فراگیر با اختلاف بیش از یک بین دو شاخص SPI و EP-SPI منتهی به آذر ۱۳۷۵، آذر ۱۳۷۲، آذر ۱۳۷۷، دی ۱۳۷۲، و آبان ۱۳۷۷ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هیچ یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه، شاخص پوشش گیاهی NDVI نشان‌دهنده شرایط ترسالی نیست. ذکر این نکته لازم است که بخش‌های جنوب کشور به صورت چهار فصل محصولات زراعی کشت می‌شوند. مقادیر عددی شاخص NDVI در نقشه‌های یادشده در محل ایستگاه‌های مورد مطالعه به طور عمده از -۰/۰۱ تا ۰/۱۵ است که بیانگر شرایط خشک‌سالی است.

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. National Oceanic and Atmospheric Administration
3. Advanced very-high-resolution radiometer
4. Climate Data Record

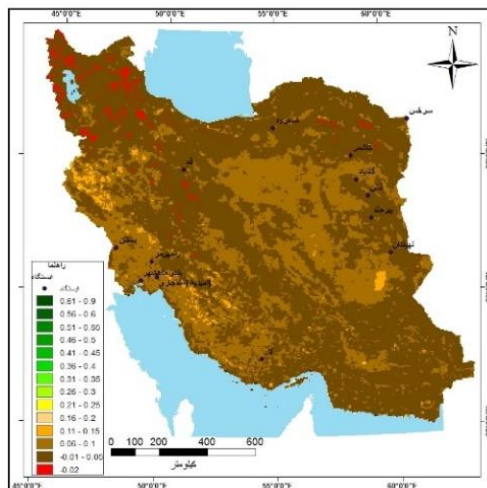
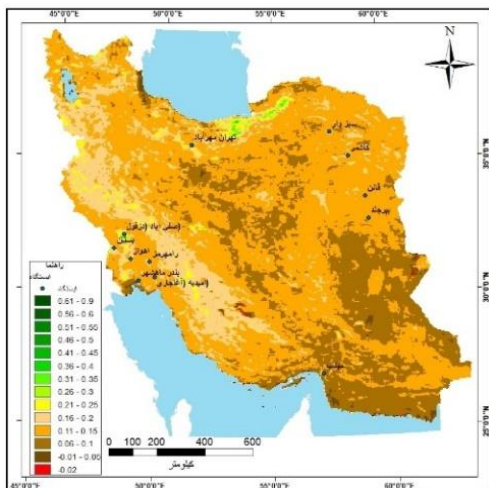


الف



ج

د



ه

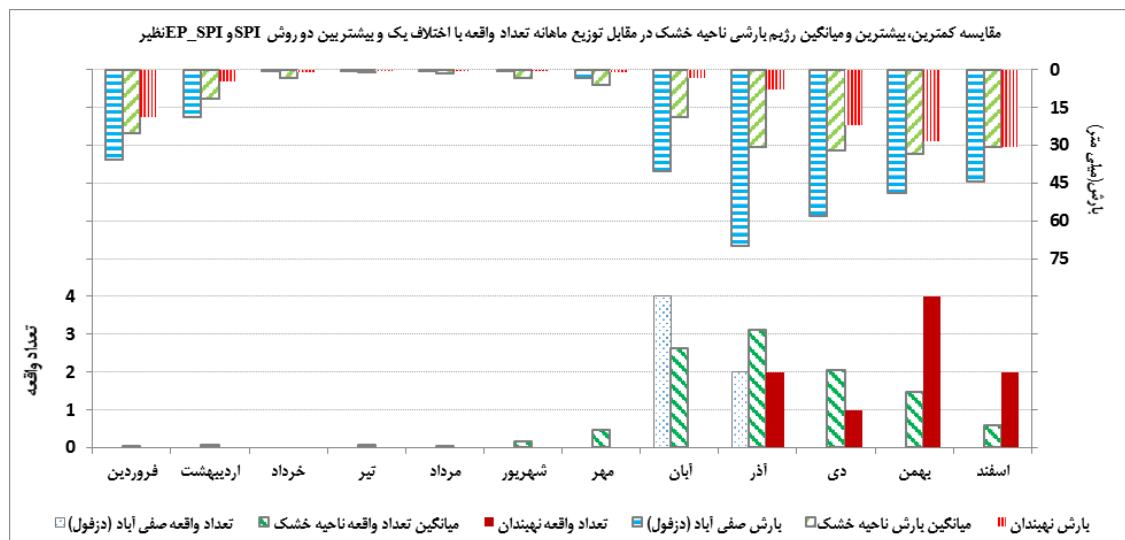
و

شکل ۴. نقشه هم‌قدار NDVI یک ماهه و ایستگاه‌های مربوط به وقایع فراگیر با اختلاف بیش از یک بین دو شاخص SPI و EP-SPI منتهی به الف) آذر ۱۳۷۵، ب) آذر ۱۳۷۲، ج) آذر ۱۳۷۷، د) دی ۱۳۷۲، ه) آبان ۱۳۷۷ تهیه‌کننده: نگارندگان

در ادامه به تحلیل نتایج از زاویه رژیم بارشی ایستگاه‌های مورد مطالعه و بررسی یک واقعه شاخص با جزئیات بیشتر پرداخته می‌شود.

د) رژیم‌های بارشی در اقلیم خشک

از آنجا که اختلاف دو روش 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 به‌وجود آمدن این اختلاف می‌شود؟ برای بررسی بیشتر موضوع، کمترین، بیشترین، و میانگین رژیم بارشی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در نمودار ۱ آمده است.



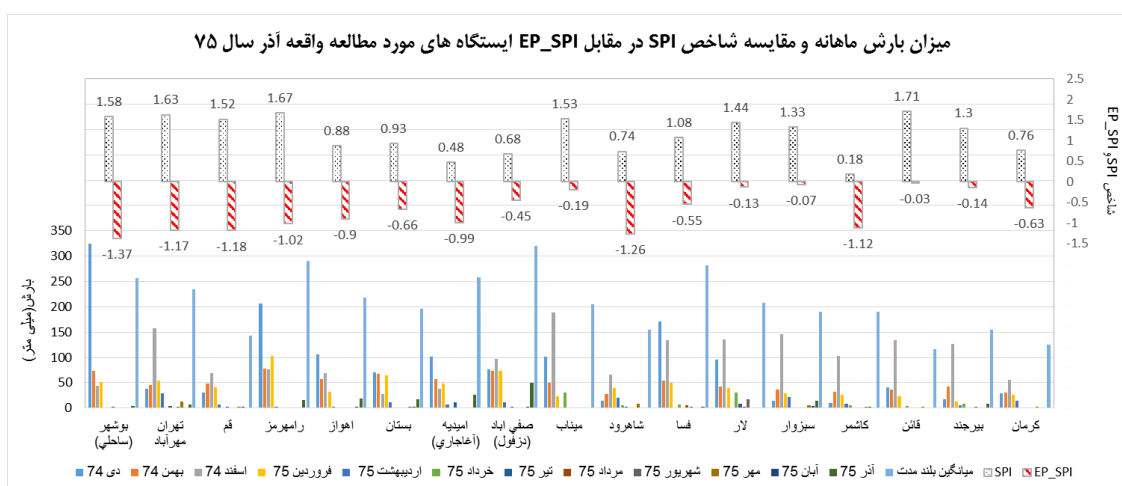
نمودار ۱. مقایسه کمترین، بیشترین، و میانگین رژیم بارشی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقابل توزیع ماهانه تعداد واقعه با اختلاف یک و بیشتر بین دو شاخص SPI و EP-SPI نظیر.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین و کمترین بارش سالانه در این ۲۶ ایستگاه، به ترتیب مربوط به ایستگاه صفی‌آباد دزفول با مقدار ۳۱۹٫۶ میلی‌متر و نهبندان با مقدار ۱۱۷٫۵ میلی‌متر (دوره مورد بررسی ۱۳۶۴-۱۳۹۸) به ثبت رسیده است. بارش‌های بیش از ۲۰ میلی‌متر به‌طور میانگین در ماه‌های آذر تا فروردین دیده می‌شود. با مقایسه رژیم بارشی مشخص شد که الگوی بارشی نسبت به توزیع ماهانه تعداد واقعه با اختلاف یک و بیشتر بین دو شاخص EP-SPI و SPI دوازده‌ماهه از هماهنگی خوبی البته با یک ماه تأخیر برخوردار بوده است. این بدان علت است که ماه بیشینه بارش (در صفی‌آباد آذرماه و در نهبندان ماه اسفند) منطبق بر ماه یازدهم قبل از ماه مورد بررسی است. از آنجا که در روش حاضر کمترین اثر بارشی به ماه یازدهم پسین داده شده، این اختلاف در یازده ماه بعد (صفی‌آباد ماه آبان و نهبندان بهمن‌ماه) بیشتر نمود پیدا می‌کند.

ه) تحلیل واقعه فراگیر آذر سال ۱۳۷۵

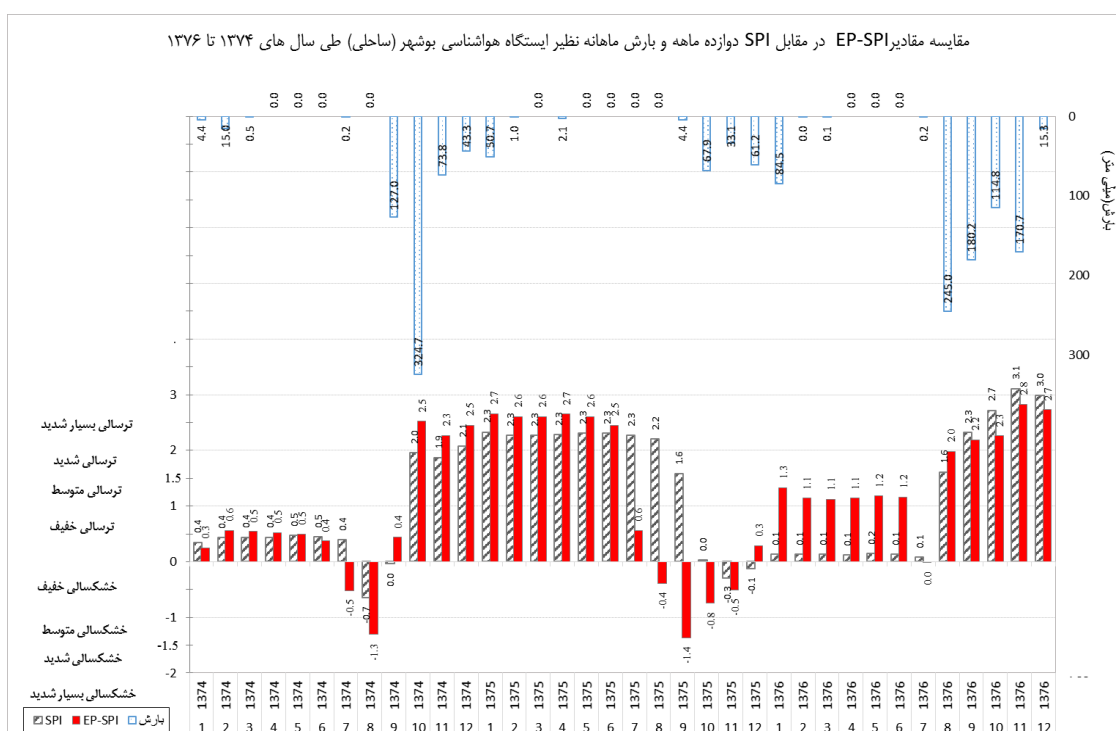
در بررسی دوازده‌ماهه به‌طور نمونه به بررسی گسترده‌ترین این وقایع، که در آذر سال ۱۳۷۵ اتفاق افتاده است، پرداخته شد. در این واقعه، ۱۷ ایستگاه با آب و هوای خشک (بر اساس روش دومارتن گسترش‌یافته) اختلاف بیش از یک بین مقادیر حاصل از دو شاخص SPI و EP-SPI دوازده‌ماهه داشتند. نمودار ۲ میزان شاخص SPI و EP-SPI دوازده‌ماهه در مقابل بارش ماهانه آذر سال ۱۳۷۵ و یازده ماه قبل از آن را در این ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. ایستگاه بوشهر (ساحلی)

با مقدار ۲/۹۵ بیشترین اختلاف دو روش SPI و EP-SPI را به خود اختصاص داده است که معادل چهار سطح جابه‌جایی شاخص خشک‌سالی از ترسال شدید به خشک‌سالی متوسط است. همچنین، کمترین اختلاف مربوط به ایستگاه صفی‌آباد (دزفول) با مقدار ۱/۱۳ است که معادل یک سطح جابه‌جایی شاخص خشک‌سالی است. نکته مشترک بین همه ایستگاه‌های نشان داده‌شده در این نمودار بارش چند برابر نرمال در ماه‌های دی تا اسفند و بارش ناچیز در خرداد تا آذرماه است. همچنین، بارش فصل زمستان سال ۱۳۷۴ در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها (به‌طور نمونه ایستگاه‌های بوشهر ساحلی، تهران، رامهرمز، اهواز، میناب، فسا، لار، سبزوار، قائن، و بیرجند) از میانگین بارش یک سال کامل بیشتر بوده است. در واقع، در روش SPI این بارش‌ها باعث بالارفتن مقدار شاخص دوازده‌ماهه شده است و با اینکه بارش در ماه‌های خرداد تا آذر ناچیز بوده، مقدار شاخص مثبت شده است. این در حالی است که در روش جدید اثرهای کمتری از بارش فصل زمستان گذشته در محاسبه خشک‌سالی دوازده‌ماهه منتهی به آذرماه سال ۱۳۷۵ دخالت داده شده است.



نمودار ۲. میزان بارش ماهانه و مقایسه شاخص SPI در مقابل EP-SPI ایستگاه‌های مورد مطالعه، واقعه آذر ۱۳۷۵

در اینجا برای روشن‌شدن مطلب، بارش ماهانه ایستگاه بوشهر ساحلی از ابتدای سال ۱۳۷۴ تا انتهای سال ۱۳۷۶ آورده شده است (نمودار ۳). در این نمودار، علاوه بر بارش، شاخص SPI دوازده‌ماهه در کنار شاخص EP-SPI ترسیم شده است. به‌وضوح می‌توان دید که بارش ۱۲۷ و ۳۲۴/۷ میلی‌متری در آذر و دی‌ماه سال ۱۳۷۴ مقدار هر دو شاخص را تا سطح ۲ و بالاتر (ترسالی شدید و بسیار شدید) بالا برده و این بالارفتن در شاخص EP-SPI سریع‌تر و شدیدتر بوده است. با گذشت زمان، به‌علت ادامه بارش‌ها تا فروردین ۱۳۷۵، هر دو شاخص تا شهریور ۱۳۷۵ در همان حدود بالاتر از ۲ مانده‌اند. اما در مهرماه به‌علت تداوم خشکی، که از اردیبهشت ۱۳۷۵ شروع شده، شاخص EP-SPI نزدیک به ۲ واحد افت می‌کند و از ۲/۵ در شهریور به ۰/۶ در مهر ماه می‌رسد. این در حالی است که شاخص SPI این افت را در دی‌ماه و با سه ماه تأخیر نسبت به EP-SPI نشان می‌دهد؛ یعنی از ۱/۶ به صفر می‌رسد. از این رو، اختلاف دو شاخص در ماه‌های مهر تا آذر بیش از یک واحد است و در آذرماه به اوج خود یعنی ۲/۹۵ می‌رسد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با وجود خشکی چهارماهه قبل از آذر ۱۳۷۵ و بارش ناچیز طی هشت ماه اردیبهشت تا آذرماه، شاخص SPI همچنان بالای ۱/۵ است؛ یعنی ترسالی شدید نشان می‌دهد! این در حالی است که این شاخص در ماه بهمن ۱۳۷۵ با وجود بارش مجموع به میزان ۱۰۰/۷ میلی‌متر طی دی و بهمن ۱۳۷۵، که ۳۳ درصد بیش از بارش نرمال این دو ماه است، شاخص همچنان پایین بوده و مقدار ۰/۳- (خشک‌سالی خفیف) را نشان می‌دهد. این حالت‌ها برای همه ایستگاه‌های نشان داده‌شده در نمودار ۲ قابل بیان است.



نمودار ۳. مقایسه مقادیر EP-SPI در مقابل SPI دوازده ماهه و بارش ماهانه نظیر ایستگاه هواشناسی بوشهر (ساحلی)

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد روش جدیدی برای بررسی خشک‌سالی در مناطق خشک ارائه شود. این تحقیق به شناخت صحیح شدت و مدت خشک‌سالی در مرکز، جنوب، و شرق ایران کمک می‌کند. مطابق این بررسی، در منطقه مورد مطالعه، الگوی بارشی تقریباً با توزیع ماهانه موارد اختلاف بیش از یک بین روش SPI و EP-SPI دوازده ماهه منطبق است. توضیح اینکه بیشترین اثر در بروز اختلاف بین دو روش در بارش یازدهمین ماه قبل و کمترین اثر در بارش یک ماه قبل ایجاد می‌شود. از این رو، الگوی اختلاف دو روش در ماه‌های پربارش آذر تا بهمن و کم‌بارش خرداد تا مهر منطبق بر رژیم بارشی منطقه بوده است.

بارش‌هایی با فاصله زمانی بیشتر نسبت به زمان موردنظر 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 تحت‌تأثیر زیاد قرار داده است؛ در حالی که در روش EP-SPI اثر آن‌ها با گذشت زمان میرا شده و برداشت بهتری از وضعیت واقعی خشک‌سالی/ ترسالی در منطقه ارائه کرده است. از این رو، می‌توان گفت کارایی روش EP-SPI برای آشکارسازی خشک‌سالی در بازه‌های زمانی طولانی بهتر است.

در این تحقیق مشخص شد که ۸/۹ درصد از وقایع خشک‌سالی دوازده ماهه در آب و هوای خشک از دید شاخص SPI مخفی مانده است. این مطلب با مقایسه نقشه‌های NDVI، که به‌طور نمونه در پنج تاریخ از سنجنده AVHRR ماهواره NOAA دریافت شده بود، مطابقت داشت. ویژگی این پنج تاریخ فراگیربودن اختلاف دو شاخص SPI و EP-SPI در بیش از ده ایستگاه بوده است.

هرچند مشابه این پژوهش تا این تاریخ یافت نشده، 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 جابه‌جایی طبقات مختلف خشک‌سالی در بیشتر ایستگاه‌ها می‌دانند. همچنین، نادى و شیوخى سوغانلو (۱۳۹۹) مشاهده کردند اختلاف دو شاخص SPI و SPI_{mod} در ایستگاه‌هایی با آب و هوای خشک‌تر آشکارتر است. بنابراین، به این نتیجه رسیدند که استفاده از SPI_{mod} به جای SPI به دلیل حذف اثرهای فصلی بارش نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. مجردی و همکاران (۱۳۹۹) برای ارزیابی شاخص اصلاحی MSPI از تصاویر ماهواره استفاده کردند و نشان دادند که شاخص اصلاحی MSPI تا حدود زیادی نتایج شاخص وضعیت پوشش گیاهی را تأیید می‌کند. نتایج مطالعه عطافی و همکاران (۲۰۲۱) بیان می‌کند که در مواردی با شدت خشک‌سالی کمتر NDVI توانایی بهتری برای نشان دادن نوسانات SPI داشت. می‌توان نتیجه گرفت نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج دو پژوهش فوق همخوانی داشته است.

لازمه برنامه‌ریزی صحیح داشتن اطلاعات دقیق از حوزه مدیریتی ذی‌ربط است. بی‌توجهی به نتایج حاصل از این تحقیق و پنهان ماندن خشک‌سالی‌های نهان، که جابه‌جایی سطوح مختلف خشک‌سالی را همراه داشته است، موجب تشدید خسارات در بخش کشاورزی، منابع آب، و مراتع می‌شود. با توجه به ارقام مرگ‌ومیر و خسارت‌های مالی ناشی از خشک‌سالی، آشکارسازی خشک‌سالی می‌تواند در برنامه‌ریزی جهانی برای حفظ زندگی و کاهش خسارت مالی مؤثر واقع شود. علاوه بر این، بی‌توجهی به خشک‌سالی‌های نهان باعث ضعف در برنامه‌ریزی برای پوشش مناسب بیمه محصولات کشاورزی به علت عدم انطباق مستندات موجود با شرایط واقعی می‌شود و سردرگمی مسئولان در تخصیص درست منابع را به دنبال خواهد داشت. در بحث مدیریت بحران، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در جایگاه مرحله پیش از بحران برای مدل‌های پیش‌بینی بلندمدت آب و هوایی مورد توجه قرار گیرد و در مرحله پس از بحران، در بخش ارزیابی و بازنگری برنامه‌ها به کار گرفته شود. پیشنهاد می‌شود دوره‌های خشکی که از دید شاخص SPI به‌ویژه در بازه‌های میان‌مدت و بلندمدت پنهان مانده و این شاخص آن دوره را به اشتباه ترسال نشان می‌دهد با عنوان خشک‌سالی نهان مطرح شود.

منابع

بابایی فینی، ا. و علیجانی، ب. (۱۳۹۲). تحلیل فضایی خشک‌سالی‌های بلندمدت ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۳، ص ۱-۱۲.

پیروزی‌نیک، مهرناز (۱۳۹۹). سند توسعه پایدار ۲۰۳۰ سازمان ملل متحد با عنوان دگرگون ساختن جهان ما، بند ۳۳.

حمصی، ملیحه‌سادات؛ یاراحمدی، داریوش؛ اونق، مجید و شمسی‌پور، علی‌اکبر (۱۳۹۸). ارزیابی تغییر اقلیم و کاربری زمین و ارائه برنامه پیشنهادی آمایش کم کربن در حوضه آبخیز دشت کاشان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۶۱۳-۶۳۲: (۴)۵۱

رضایی، حسین؛ خان‌محمدی، ندا؛ منتصری، مجید. و بهمنش، جواد (۱۳۹۷). ارزیابی انتخاب تابع توزیع احتمالی مناسب در استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی SPI و RDI، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۸، شماره ۱، ص ۲۹-۴۰.

۱. در جهان ۱۹۴۴۶۵۳ مرگ‌ومیر 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 ۲۳۹۰۷ 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 مرگ‌ومیر و تلفات اقتصادی از شرایط هواشناختی، آب‌وهوا و آب (۱۹۷۰-۲۰۱۲) سازمان هواشناسی جهانی).

- شکوهی، ع. (۱۳۹۱). مقایسه شاخص‌های RDI و SPI برای تحلیل خشک‌سالی کشاورزی (مطالعه موردی: قزوین و تاکستان)، نشریه مهندسی آبیاری و آب/ایران، دوره ۳، شماره ۹، ص ۱۱۱-۱۲۲.
- طرح جامع آب کشور، شناخت اقلیم ایران. (1370). بخش اول: بررسی‌های بنیادین بارندگی در ایران، مهندسی مشاور جاماب، وزارت نیرو، ص ۱۸۴-۱۹۳.
- فاضل دهکردی، ل.؛ آذرینوند، ح.؛ زارع چاهوکی، م.؛ محمودی کهن، ف. و خلیقی سیگارودی، ش. (۱۳۹۵). پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI (مطالعه موردی: مراتع استان ایلام)، منابع طبیعی ایران، شماره ۱، ص ۱۴۱-۱۵۴.
- مجردی، برات؛ میرمیری، جواد و علیزاده، حسین (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI با استفاده از شاخص بارش استاندارد اصلاح‌شده MSPI به‌منظور پایش و پهنه‌بندی خشک‌سالی، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۳): ۷۲۵-۷۳۶.
- مجیدی، ع. ا.؛ رادفر، م.؛ میرعباسی نجف‌آبادی، ر. و معروفی، ص. (۱۳۹۴). ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی قهاوند-دشت رزن بر اساس شاخص‌های خشک‌سالی، نهمین همایش ملی روز جهانی محیط زیست، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۹۴، تهران، ایران.
- مجیدی، ع. ا.؛ رادفر، م.؛ میرعباسی نجف‌آبادی، ر. و معروفی، ص. (۱۳۹۷). گزارش فنی تحلیل روند خصوصیات خشک‌سالی‌های هواشناسی استان همدان، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، ۹(۱۷): ۲۹۵-۳۰۵.
- محمودی، ا. و میرعباسی نجف‌آبادی، ر. (۱۳۹۳). مقایسه روش‌های SPI و SPI اصلاح‌شده در تشخیص خشک‌سالی (مطالعه موردی: شهر دهدشت، کهکلوویه، و بویراحمد)، دومین کنفرانس ملی بحران آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ۱۳۹۳.
- میرعباسی نجف‌آبادی، ر. و دین‌پژوه، ی. (۱۳۸۹). تحلیل روند جریان جریان در شمال غربی ایران در سه دهه اخیر. مجله آب و خاک، شماره ۲۴، ص ۷۶۸-۷۵۷.
- نادی، مهدی و شیوخی سوغانلو، سعید (۱۳۹۹). مقایسه نمایه‌های SPI و SPI_{mod} در پایش خشک‌سالی چند نمونه اقلیمی ایران، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، سال یازدهم، شماره ۱۲، ص ۱۰۸-۱۱۸.
- نبی‌زاده بلخکانلو، عادل؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز، و خدمت‌زاده، علی (۱۳۹۹). بررسی اثرات خشک‌سالی کشاورزی بر تراکم پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیمینه‌رود)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۲(۳): ۳۹۵-۴۰۸.

Attafi, R.; Darvishi Bolorani, A.; M. Fadhil Al-Quraishi, A. and Amiraslani, F. (2021). Comparative analysis of NDVI and CHIRPS-based SPI to assess drought impacts on crop yield in Basrah Governorate, Iraq, *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(3): 547-557.

Babaei Fini, A. and Alijani, B. (2012). Spatial analysis of long-term droughts in Iran, *Natural Geography Research*, No. 3: 1-12.

Bonsal, B.R.; Aider, R. and Gachon, P. (2012). An assessment of Canadian prairie drought: past, present, and future, *Climate Dynamics*, No. 41: 501-516.

- 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*, 49(4): 303-319.
- Byun, H.R. and Wilhite, D.A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration, *Journal of Climate*, 12(9): 2747-2756.
- Cheval, S. (2015). The Standardized Precipitation Index – an overview, *Romanian journal of meteorology*, Vol. 12, Issues 1-2: 35-37.
- Comprehensive water plan of the country, knowledge of Iran's climate. (1991). Part 1: *Fundamental rainfall studies in Iran*, Jamab Consulting Engineers, Ministry of Energy, 184-193.
- Fazel Dehkordi, L.; Azarnivand, H.; Zare Chahooki, M.; Mahmoodi Kohan, F. and Khalighi Sigarudi, Sh. (2016). Drought monitoring using NDVI vegetation index (Case study: Rangelands of Ilam province), *Natural Resources of Iran*, No. 1: 154-141.
- Hayes, M.; Svoboda, M.; Wall, N. and Widham, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal meteorological Drought Index Recommended, *Bulletin of the American Meteorological Society*, No. 92(4): 485-488.
- Hayes, M.J. (2000). Revisiting the SPI: Clarifying the Process, *Drought Network News (Newsletter of IDIC and NDMC)*, Vol. 12, No. 1: 13-14.
- Homsy, Maliha Sadat.; Yarahmadi, Dariush.; Oneq, Majid. and Shamsipoor, Ali Akbar. (2019). Assessing climate change and land use and presenting a proposed low carbon management program in the Kashan plain watershed. *Natural Geography Research*, 51(4): 613. *Meteorological Society* 92(4): 485-488, doi: 10.1175/2010BAMS3103.1
- Kao, S.C. and Govindaraju, R.S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts, *Journal of Hydrology*, No. 380: 121-134.
- Karavitis, C.A.; Alexandris, S.; Tsesmelis, D.E. and Athanasopoulos, G. (2011). Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece, *Water*, No. 3: 787-805.
- Koutroulis, A.G.; Vrohidou, A.E.K. and Tsanis, I.K. (2010). Spatiotemporal Characteristics of Meteorological Drought for the Island of Crete, *Journal of Hydrometeorology*, No. 206 , Vol. 12.
- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M.A. (2002). Seasonal prediction of European spring precipitation from El Niño-southern oscillation and local sea-surface temperatures, *International Journal of Climatology*, No. 22: 1-14.
- Mahmoodi, A. and Mirabbasi Najafabadi, R. (2014). Comparison of the SPI, and SPI modified methods in diagnosis of drought occurred (Case Study: Dehdasht city, Kohkeloye and Bouyer Ahmad), *2th National Conference of water crisis, university of shahrekord*, September 2014, Shahrekord, Iran.
- Majidi, A.A.; Radfar, M.; Mirabbasi Najafabadi, R. and Marofi, S. (2015). Assessment meteorological drought Ghahavand- Razan plain by drought indices, *9th National Conference on World Environment Day*, University of Tehran, Mey 2015, Tehran, Iran.
- Majidi, A.A.; Radfer, M.; Mir Abbasi Najafabadi, R. and Marofi, S. (2018). Technical Report, Analysis of the trend of meteorological drought characteristics of Hamadan province, *Watershed Management Research Journal*, 9(17): 295-305.
- 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, 179-184.
- Mirabbasi Najafabadi, R. and Dinpashoh, Y. (2010). Trend analysis of stream flow across the north west of Iran in recent three decades, *Journal of Water and Soil*, No. 24: 757-768.
- Mojaradi, Bayat; Mirmiri, Javad and Alizadeh, Hossein (2020). Evaluation of VCI Vegetation Status Index Using MSPI Modified Standard Precipitation Index for Drought Monitoring and Zoning, *Watershed Engineering and Management*, 12 (3): 725-736.
- Nabizadeh Balkhanlu, Adel; Derek Ziaian Firoozabadi, Parviz and Fahm Khidmatzadeh, Ali (2020). Investigation of the effect of agricultural drought on vegetation density using remote sensing (Case study: Siminehroud catchment), *Natural Geography Research*, 52(3): 395-408.
- Nadi, Mehdi and Sheikhi Soghanloo, Saeed (2020). Comparison of SPI and SPImod indices in drought monitoring of some climatic samples of Iran, *Journal of Watershed Management*, 11th year, No. 12: 108-118.
- National Drought Mitigation Center, [cited 2019 Aug], Available from: <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>.
- Precipitation and temperature data of synoptic stations of Meteorological Organization of Iran (IRIMO).
- Redmond, K.T. (2002). The depiction of drought: A commentary, *Bulletin of the American Meteorological Society*, No. 83: 1143-1147.
- Rezaei, Hossein; Khan Mohammadi, Neda; Montaseri, Majid and Behmanesh, Javad (2018). Evaluation of selecting the appropriate probability distribution function in using SPI and RDI drought indices. *Journal of Soil and Water Knowledge*, Vol. 28, No. 1: 29-40.
- Shokouhi, A. (2012). Comparison of RDI and SPI indices for agricultural drought analysis (Case study: Qazvin and Takestan), *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, Vol. 3, No. 9: 111-122.
- Spinoni, J.; Antofie, T.; Barbosa, P.; Bihari, Z.; Lakatos, M.; Szalai, S.; Szentimrey, T. and Vogt, J.V. (2013). An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961–2010, *Adv. Sci. Res.*, No. 10(1): 21- 32.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- 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.
- United Nations/ World Bank High Level Panel on Water (2018). Outcome Document, Making every Drop Count, *An Agenda for Water Action*, 34.
- Vermote, Ric; Justice, Chris; Csaszar, Ivan; Eidenshink, Jeff; Myneni, Ranga; Baret, Frederic; Masuoka, Ed; Wolfe, Robert and Claverie, Martin (2014). NOAA CDR Program, *NOAA Climate Data Record (CDR) of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, Version 4. [indicate subset used]. NOAA National Climatic Data Center. doi:10.7289/V5PZ56R6.
- Vicente-Serrano, S.M.; Gonzalez-Hidalgo, J.C.; De Luis, M. and Raventos, J. (2004). Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain), *Climate Research*, No. 26: 5-15.
- World Health Organization, health-topics, drought, [cited 2021 Jun]. Available from: https://www.who.int/health-topics/drought#tab=tab_1.

- Yaseen, Z.M.; Ali, M. and Sharafati, A. et al. (2021). Forecasting standardized precipitation index using data intelligence models: regional investigation of Bangladesh, *Sci Rep*, 11: 34-35.
- Zhai, L. and Feng, Q. (2009). Spatial and temporal pattern of precipitation and drought in Gansu Province, Northwest China. *Natural Hazards* 49: 1-24, doi: 10.1007/s11069-008-9274-y.
- 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*, Vol. 12, No. 5: 603.