

بررسی روند خشکسالی‌های با مقیاس زمانی بلند مدت در مناطق نیمه‌خشک، خشک و فراخشک جهان

محمد رضا کوثری^{۱*}، محمدرضا اختصاصی^۲، حسین ملکی نژاد^۳

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد
 ۲. استاد و عضو هیئت علمی گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد
 ۳. دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد
- * نویسنده مسئول: mohammad_kousari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

محدودیت منابع آب شیرین، تغییر اقلیم و وقوع خشکسالی‌های بلندمدت و شدید از چالش‌های اصلی جهان امروز به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک است. در چنین شرایطی و به خصوص در رابطه با خشکسالی‌ها لازم است تا تغییرات و روند آن‌ها به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک مورد بررسی قرار گیرد تا در صورت وجود روندهای افزایشی خشکسالی، اقدامات لازم در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب صورت پذیرد. در این مطالعه، از آزمون آماری ناپارامتری Mann-Kendall جهت تعیین روند در سری‌های زمانی بلند مدت خشکسالی‌های متوسط تا شدید و بسیار شدید (سری‌های زمانی بلند مدت ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه از شاخص استاندارد شده بارش (SPI)) استفاده گردید. نتایج نشان‌دهنده وجود روندهای افزایشی و کاهش‌ی معنادار خشکسالی در این مناطق است. با افزایش مقیاس سری زمانی خشکسالی‌ها، درصد مناطق با روند افزایشی یا کاهش‌ی SPI بیشتر می‌گردد. برای مثال، در رابطه با روند کاهش‌ی SPI (افزایشی خشکسالی)، درصد این مناطق از ۱۷/۸ در SPI ۹ ماهه به ۲۱/۹، ۲۸/۴۸ و ۳۱/۷۱ درصد به ترتیب برای SPI های ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه افزایش می‌یابد. افزایش دامنه خشکسالی‌های طولانی مدت متوسط تا شدید و همچنین بسیار شدید در بخشی از مناطق دنیا خصوصاً خاورمیانه و غرب آمریکا مشاهده می‌شود. افزایش خشکسالی‌ها خصوصاً در کشورهای در حال توسعه واقع در خاورمیانه بحران‌های فعلی را نیز می‌تواند تشدید نماید و لذا در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت کاهش اثرات افزایش خشکسالی‌ها خصوصاً در سطح منطقه‌ای و بین‌المللی وجود دارد.

واژگان کلیدی: خشکسالی، خشک، روند، فراخشک، نیمه خشک

■ مقدمه

کمبود منابع آب شیرین یکی از مهمترین چالش‌ها در بسیاری از کشورهای جهان است. البته این مسئله در کشورهایی که در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارند و با محدودیت بارش‌های دریافتی و یا تبخیر و تعرق بالا درگیر هستند به مراتب بیشتر است. تقاضای بیش از حد منابع آب در مقابل بارش‌های دریافتی اندک، شرایطی را بوجود آورده است که فشار بیش از حدی بر اکوسیستم‌های این مناطق وارد آمده است. باید به این موضوع اشاره کرد که در بسیاری از کشورها خصوصاً کشورهای در حال توسعه امروزه حوزه‌های آبخیز این مناطق که منابع تولید آب به‌شمار می‌آیند در برخی قسمت‌ها، طی چند دهه گذشته تغییرات زیادی را متحمل شده‌اند. کاهش توان اکولوژیک حوزه‌ها، افت کمیت و کیفیت اکوسیستم‌های گیاهی به‌خصوص مراتع، افزایش مقدار فرسایش و تحویل رسوب از سطح حوزه‌های آبخیز و پیرو آن خسارات غیرقابل جبران وارد بر منابع آب، خاک و نیز سدها، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و کاهش سطح سفره آب‌های زیرزمینی از جمله تجربه‌های تلخی هستند که برخی از حوزه‌های آبخیز این مناطق در چند دهه گذشته تجربه نموده‌اند. اگر موارد مذکور را در یک طرف معادله قرار دهیم، طرف دوم معادله چیزی جز کاهش توان و پتانسیل اکولوژیک اکوسیستم‌ها نیست و به‌طور قطع اکوسیستم‌های پرتوان بهتر می‌توانند در مقابل بحران‌هایی نظیر بحران خشکسالی توان مقاومت داشته باشند و البته خلاف آن نیز صادق است.

در کنار مسائل فوق‌الذکر و چالش جدی محدودیت منابع آب، وقوع خشکسالی‌ها نیز از مسائل مهمی است که کشورهای واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک را به‌شدت مورد آسیب قرار می‌دهد. برای مثال در دهه ۱۹۶۰ منطقه نیمه‌خشک Sahel در آفریقا شرایط یک خشکسالی طولانی مدت را تجربه کرده که به‌شدت اکوسیستم‌های شکننده این منطقه را تحت تاثیر قرار داده است. همین موضوع انگیزه اصلی ایجاد UNCCD (United Nations Convention on Combating Desertification) شده است (۴۴). همچنین خشکسالی

۲۰۰۶ استرالیا تولید غلات زمستانه را تا ۳۶ درصد کاهش داده و بسیاری از کشاورزان را در بحران مالی شدید قرار داده است (۴۲). نمونه دیگر مربوط به خشکسالی سال ۲۰۰۰-۱۹۹۹ در مرکز و جنوب غرب آسیاست که بیش از ۶۰ میلیون نفر را در کشورهای ایران، افغانستان، پاکستان، ترکمنستان، تاجیکستان و ازبکستان به‌شدت تحت تاثیر قرار داده است (۲۱). در کنار محدودیت‌های منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک و آسیب‌های وارده از طریق خشکسالی‌ها، امروزه چالش جهانی تغییر اقلیم (۲۰) نیز می‌تواند بر وقوع و شدت خشکسالی‌ها تاثیرگذار باشد. لذا لازم و ضروری است تا روند خشکسالی‌ها به‌خصوص خشکسالی‌های طولانی مدت تاثیرگذار بر ذخایر منابع آب در این مناطق مورد بررسی قرار گیرد.

تا به حال تعاریف متعددی برای خشکسالی بیان شده است. هر چند که ارائه تعریف واحدی از خشکسالی بسیار سخت است. در واقع تنوع فاکتورهای هیدرواقليمی و همچنین اقتصادی و اجتماعی در کنار تفاوت‌های شرایط درخواست منابع آب در مناطق مختلف دنیا، ارائه تعریف واحد و دقیقی از خشکسالی را با مشکل مواجه می‌کند (۳۰). با این حال بیشتر تعاریف موجود بر اساس کمبود بارش نسبت به‌حالت میانگین در یک بازه زمانی تاکید دارند (۲۶، ۳۸، ۴۰). تاثیر این پدیده در زمان آن بسیار مهم است. برای مثال همخوانی بارش‌ها با فصل رشد گیاهی و یا ریزش بارش‌ها در فصل‌هایی که تبخیر و تعرق در آن حداقل است، از شدت خشکسالی می‌کاهد. همچنین موثر بودن بارش‌ها (مقدار و شدت کافی آن‌ها و خصوصاً نفوذ بارش به آبخوان‌ها) در کاهش اثرات خشکسالی موثر است. دیگر عوامل موثر بر وقوع خشکسالی‌ها، مقدار تبخیر و تعرق منطقه، سازندهای زمین‌شناسی، جمعیت منطقه و سرانه مصرف آب است. همان‌طور که مشخص است خشکسالی پدیده‌ای پیچیده است که تعریف عملی آن تحت تاثیر فاکتورهای بسیار متنوعی قرار می‌گیرد. برای سادگی تعریف و آنالیز بهتر، خشکسالی در چهار گروه اصلی شامل خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیک و اقتصادی و اجتماعی تقسیم‌بندی می‌گردد (۱، ۳۹).

در مطالعه مذکور بیان کننده آن است که مناطق جنوب غربی آمریکا، تگزاس و بخش‌هایی از آمازون، شاخ آفریقا و بخش‌هایی از منطقه مدیترانه دارای روند افزایشی خشکسالی بوده‌اند. همچنین مناطق مرکزی قاره آفریقا، مناطقی از جنوب شرقی آسیا، مناطق مرکزی آمریکا، شمال استرالیا و بخش‌هایی از اروپای شرقی روند افزایشی شرایط ترسالی را تجربه کرده‌اند.

نتایج مطالعه‌ای که در ایران به بررسی روند شاخص احيای بارش (Reconnaissance Drought Index, RDI) در مناطق خشک و نیمه خشک پرداخت، نشان دهنده‌ی سری‌های خشکسالی با روند معنادار و عمدتاً افزایشی هستند، البته این موضوع بیشتر در سری‌های بلندمدت خشکسالی (مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) قابل توجه است (۲۳). بررسی‌های انجام شده نشان‌دهنده روند غیرمعنادار در حجم بارش‌های دریافتی در سطح استان فارس است. البته نتایج بررسی سری‌های زمانی در این مطالعه نشان می‌دهد که از سال ۱۹۹۴ به بعد حجم بارش‌های دریافتی در این استان به شدت کاهش یافته است (۳). نتایج مطالعه‌ای در زمینه خشکسالی در ایران حاکی از وجود روندهای افزایشی و کاهش‌ی سری‌های زمانی خشکسالی و سیلاب در ایران بوده است. این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش خشکسالی‌ها و همچنین سیلاب‌ها در ایران ناشی از تغییرات کاربری اراضی، روند منفی بارش‌های دریافتی سالانه، روند افزایشی بارش‌های حداکثر و همچنین سیاست‌های نادرست مدیریت منابع آب در کشور است (۳۱).

لذا در این مطالعه سری‌های زمانی بلندمدت خشکسالی (در سری‌های زمانی ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) SPI برای اندازه‌گیری و پیرو آن بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک مورد توجه قرار گرفت. سپس با استفاده از آزمون آماری ناپارامتری من کندال، معناداری روند در این سری‌های زمانی آزمون گردید. نتایج این بررسی به‌خصوص از لحاظ افزایش شدت خشکسالی‌ها در طی سال‌های اخیر در مناطق خشک و نیمه خشک جهان و لزوم در نظر گرفتن تهدید بسیار بالای این افزایش خشکسالی‌ها بسیار حائز اهمیت است.

برای کمی‌سازی شدت خشکسالی بسته به نوع گروه خشکسالی و داده‌های در دسترس تا به حال شاخص‌های متعددی ارائه شده است. یکی از مرسوم‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌ها، شاخص استاندارد شده بارش (Standardized Precipitation Index, SPI) می‌باشد (۱۸). این شاخص دارای مقیاس زمانی است که در کنار سادگی محاسبات و البته در دسترس بودن داده‌های ورودی (SPI فقط از داده‌های بارش تولید می‌شود)، آن را به یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در سطح جهان تبدیل ساخته است. SPI در مقیاس‌های زمانی مختلفی تولید می‌شود که مرسوم‌ترین آن‌ها ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه می‌باشند. سری‌های زمانی با مقیاس کمتر یا کوتاه مدت SPI برای اندازه‌گیری خشکسالی هواشناسی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند و سری‌های زمانی با مقیاس بلند مدت را می‌توان مبنایی برای اندازه‌گیری خشکسالی‌های هیدرولوژیک و یا اقتصادی و اجتماعی قرار داد. مبنای این تقسیم‌بندی‌ها بر آن است که رطوبت هوا و خاک در بازه‌های زمانی کمتری تحت تاثیر قرار می‌گیرند. این در حالی است رواناب‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی طولانی‌تری تحت تاثیر کمبودهای بارش قرار می‌گیرند (۴۱).

تاکنون مطالعات معدودی در زمینه بررسی روند خشکسالی‌ها در سطح مناطق مختلف دنیا از جمله مناطق خشک و نیمه خشک انجام شده است. نتایج یک مطالعه در سطح جهانی نشان‌دهنده تغییرات اندک خشکسالی طی ۶۰ سال اخیر است (۳۴). مطالعه‌ای در کشور آمریکا حاکی از افزایش بزرگی و مدت خشکسالی‌ها در غرب و کاهش آن‌ها در قسمت‌های شرقی این کشور است (۷). در مطالعه‌ای دیگر و در سطح جهان، روند خشکسالی و الگوهای آن مورد بررسی قرار گرفته است (۱۱). البته مناطق خشکی که دارای بارش‌های کمتر از ۱۵ میلی‌متر در ماه می‌باشند، در این مطالعه لحاظ نشده است. در رابطه با تغییرات و روند مساحت خشکسالی، نتایج ایشان نشان‌دهنده عدم افزایش معنادار مساحت مناطق تحت تاثیر خشکسالی در نیمکره شمالی است، این در حالی است که در نیمکره جنوبی روند معنادار افزایشی مشاهده شده است. همچنین نتایج تغییرات مکانی خشکسالی‌ها

■ مواد و روش‌ها

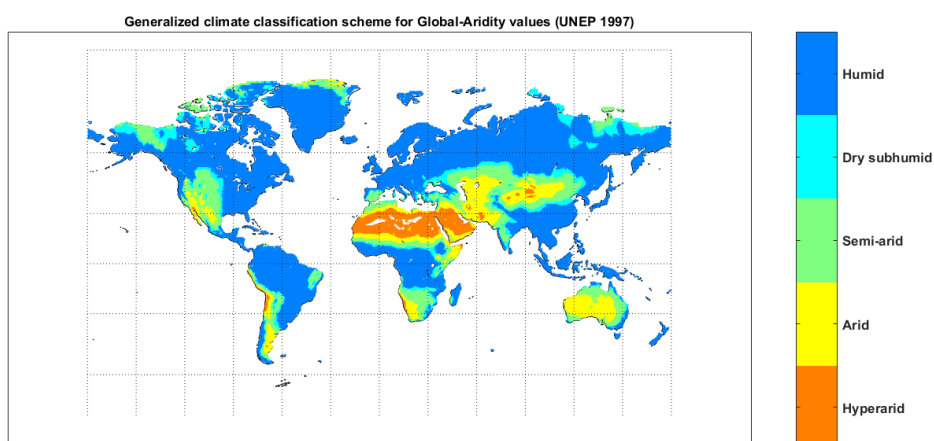
معرفی محدوده مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

محدوده مورد مطالعه مناطق فراخشک، خشک و نیمه خشک جهان است. برای تعیین محدوده این مناطق، از تقسیم‌بندی UNEP ۱۹۹۷ استفاده شد. مطابق با جدول ۱، در این تقسیم‌بندی، مناطق با ضریب خشکی^۱ کوچکتر از ۰/۰۵، بزرگتر از ۰/۰۵ و کوچکتر از ۰/۲ و همچنین بزرگتر از ۰/۲ و کوچکتر از ۰/۵ به ترتیب مناطق فراخشک، خشک و نیمه خشک را تشکیل می‌دهند. همچنین شکل ۱ نشان‌دهنده دامنه اقلیم‌های مختلف بر اساس تقسیم‌بندی UNEP ۱۹۷۷ است. این شکل با تقسیم میانگین مقادیر بارش سالانه بر تریخیر و تعرق پتانسیل سالانه و تقسیم‌بندی آن بر اساس جدول شماره ۱، در محیط نرم افزار MATLAB تهیه شده است. داده‌های مورد استفاده شامل سری‌های زمانی بارش ماهانه به صورت شبکه‌بندی شده (با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه) و در بازه زمانی

۱۹۰۱ تا ۲۰۱۳ و در سطح جهانی است که توسط CRU^۲، جمع آوری شده است (۱۸). همچنین داده‌های تریخیر و تعرق مرجع نیز توسط CRU تهیه شده است که در این مطالعه برای برآورد ضریب خشکی از آن استفاده شده است (۱۸). این داده‌ها به صورت شبکه‌بندی شده و در قابل فرمت NetCdf از سایت CRU^۳ قابل دریافت هستند. در اصل این داده‌ها به صورت ماتریس‌های سه بعدی هستند که بعدها سطر و ستون آن مربوط به طول و عرض جغرافیایی و بعد سوم آن مربوط به زمان داده‌ها می‌شود. امروزه از این داده‌ها به طور فزاینده‌ای در مطالعات جهانی استفاده می‌شود (۵، ۸، ۲۹، ۳۵-۳۷). در این مطالعه، بازه زمانی از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳ در نظر گرفته شده است. علت انتخاب این بازه آن است که بسیاری از مطالعات نشان‌دهنده آن است که گرمایش جهانی از دهه ۱۹۷۰ به بعد روند قوی‌تری داشته است (۲۰، ۳۰).

جدول ۱- تقسیم‌بندی مناطق اقلیمی جهان بر اساس تقسیم‌بندی UNEP 1997

منطقه اقلیمی	حد پایین
فرا خشک	$AI < 0.05$
خشک	$0.05 < AI < 0.2$
نیمه خشک	$0.2 < AI < 0.5$
نیمه مرطوب	$0.5 < AI < 0.65$
مرطوب	$AI > 0.65$



شکل ۱- پراکنش اقلیم‌های مختلف در سطح جهان بر اساس تقسیم‌بندی UNEP ۱۹۹۷

3. <http://www.cru.uca.ac.uk/data>

1. Aridity Index

2. Climatic Research Unit - University of East Anglia

زمانی مختلف ممکن است باعث ایجاد خطا در محاسبات نهایی گردد. در واقع از آنجایی که ممکن است، توزیع احتمال بارش در مناطق مختلف اقلیمی متفاوت باشد، صرفاً برازش یک توزیع مانند توزیع گاما، به نتایج اشتباه منجر خواهد شد. با افزایش مقیاس مکانی مطالعات و گسترده شدن منطقه مورد مطالعه، این خطا نیز افزایش می‌یابد (۱۴). برای حل مشکل فوق الذکر، یک راه حل اولیه برازش چند تابع توزیع احتمال بر داده‌های بارش و بررسی عملکرد آن‌هاست. البته در این حالت نیز دنباله توزیع‌ها (distribution tails) بسته به نوع تابع برازش یافته متفاوت است و به خاطر حساسیت مقادیر حدی SPI به وضعیت دنباله‌ها (۳۳، ۴۱)، ممکن است مقادیر SPI خصوصاً مقادیر حدی آن به صورت ناصحیح برآورد و تفسیر گردند (۱۴).

برای حل مشکلات فوق الذکر، روش ناپارامتری برازش تابع چگالی احتمال و محاسبه SPI ارائه شده است (۷). این روش در اقلیم‌های مختلف و برای پارامترهای مختلف قابلیت کاربرد دارد. در محاسبه شاخص SPI، تابع چگالی احتمال یا فراوانی به صورت زیر تعریف شده است.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

for : $x > 0$

در اینجا $\alpha > 0$ پارامتر شکل، $\beta > 0$ پارامتر مقیاس، $x > 0$ مقدار بارندگی و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که به شکل رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

محاسبه شاخص بارش استاندارد شده در رابطه با برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه معین می‌باشد. پارامترهای α و β برای هر ایستگاه و برای هر مقیاس زمانی و هر ماه از سال برآورد می‌شوند. با استفاده از روش حداکثر درست نمایی می‌توان مقادیر بهینه α و β را براساس معادلات زیر برآورد کرد.

شاخص استاندارد شده بارش (Standardized Precipitation Index or SPI)

یکی از مرسوم‌ترین شاخص‌ها در تعیین اندازه خشکسالی، شاخص استاندارد شده بارش یا SPI است (۱۸). در میان شاخص‌های هواشناسی، این شاخص از کاربرد گسترده‌تری برخوردار است و به فراوانی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای، قاره‌ای و جهانی (۲، ۶، ۱۱، ۱۴) مورد استفاده قرار گرفته است. SPI یک شاخص بسیار قوی و در عین حال ساده از لحاظ محاسبات است (۴۱). برای محاسبه این شاخص تنها احتیاج به داده‌های بارش می‌باشد. همچنین این شاخص در تشخیص دوره‌های تر و خشک بسیار موثر عمل می‌کند. به طور معمول برای محاسبه SPI نیاز به ۲۰ تا ۳۰ سال داده ماهانه بارش است. البته در صورت وجود داده، افزایش طول دوره آماری به ۵۰ تا ۶۰ سال شرایط مطلوب‌تری را فراهم می‌آورد (۱۷). یکی دیگر از مزیت اصلی بسیار مهم و اصلی SPI، قابلیت محاسبه آن در مقیاس‌های زمانی مختلف است که بر این اساس می‌توان خشکسالی‌های کوتاه مدت و همچنین بلند مدت را مورد بررسی قرار داد (۳۰، ۴۱).

SPI که بر اساس احتمال وقوع بارش محاسبه می‌شود، نشان‌دهنده شرایط بارش دریافتی نسبت به مقدار طولانی مدت آن منطقه است (۱۴، ۴۱). در تعیین احتمال وقوع بارش، معمولاً تابع گاما، پیرسون تیپ سه و گامای ناقص (در مناطقی که خصوصاً بارش‌های دریافتی در برخی از ماه‌ها بسیار کم و نزدیک به صفر است) به فراوانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته باید در نظر داشت که بر اساس تحقیقات انجام شده، در برخی از مناطق ممکن است توزیع گاما نتواند به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع بر داده‌های بارندگی برازش یابد (۳۲). همچنین برخی از توابع دیگر مانند لوگ نرمال، کاپا و ویک بای مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال در بسیاری از موارد، استفاده از تابع گاما بیشتر از سایر توابع مرسوم است. استفاده از این نوع توابع، در حیطه آمار پارامتری قرار می‌گیرد. باید در نظر داشت که استفاده از توزیع گاما بر روی تمامی سری‌های زمانی بارش و استخراج SPI در مقیاس‌های

که در آن $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$,
 $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$.
 است و t نیز از رابطه ذیل محاسبه
 می‌گردد:

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln\left(\frac{1}{P^2}\right)} \\ \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-P)^2}\right)} \end{cases} \quad (9)$$

بدین ترتیب SPI نمره Z را نشان می‌دهد و آن
 نرمالیزه شده است و مقدار انحرافات بالاتر و یا پایین‌تر از
 میانگین را نشان می‌دهد. بر اساس روش ارائه شده توسط
 (۱۴)، SPI در سری‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماهه و
 در مناطق خشک، نیمه خشک جهان محاسبه گردید.
 همان‌طور که قبلاً نیز بدان اشاره گردید، بازه زمانی
 محاسبات شاخص SPI از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳ در نظر
 گرفته شد. علت انتخاب این بازه آن است که بسیاری از
 مطالعات نشان‌دهنده آن است که گرمایش جهانی از دهه
 ۱۹۷۰ به بعد روند قوی‌تری داشته است (۲۰، ۳۰).
 همچنین رده خشکسالی مورد بررسی، کلاس متوسط تا
 شدید ($-2 < SPI < -1$) و همچنین بسیار شدید ($SPI < -2$)
 در نظر گرفته شد (۱۱). محاسبات فوق‌الذکر در محیط
 نرم افزار MATLAB صورت پذیرفت.

آزمون من - کندال (Mann-Kendall)

یکی از روش‌های متداول جهت تحلیل سری‌های
 زمانی اقلیمی، بررسی وجود یا عدم وجود روند در آن‌ها با
 استفاده از آزمون‌های آماری می‌باشد. آزمون من - کندال
 (۲۲، ۲۸) از متداول‌ترین روش‌های ناپارامتری تحلیل روند
 سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به‌شمار می‌رود.
 مطالعات مختلف انجام شده با استفاده این روش حاکی از
 اهمیت و کاربرد فراوان آن در تحلیل روند سری‌های زمانی
 می‌باشد (۳، ۴، ۱۳، ۱۵، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۲۸). از نقاط قوت
 روش من - کندال، کاربرد آن برای سری‌های زمانی این
 است که از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند (۱۹، ۴۵).
 اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (4)$$

که در معادله فوق A از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (5)$$

در رابطه فوق n تعداد مشاهدات بارندگی و x میانگین
 بارندگی تجمعی برای یک ماه مشخص در طی دوره
 آماری است. در روش ناپارامتری محاسبه SPI، به‌جای
 تابع توزیع گاما یا هر توزیع دیگر، توزیع احتمال تجربی
 استفاده می‌گردد. بر اساس مطالعه (۱۴)، مطابق با فرمول
 ذیل، از روش Gringorten (۱۶) برای این کار استفاده
 شده است.

$$P(X_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad (6)$$

در این رابطه n تعداد نمونه، i رتبه داده‌های غیر صفر
 بارش به ترتیب صعودی و $P(X_i)$ مقدار احتمال تجربی
 هر یک از داده‌های بارش در سری زمانی است.
 خروجی‌های رابطه فوق با استفاده از رابطه ذیل به شاخص
 استاندارد شده بارش تبدیل می‌شود.

$$SPI = \varphi^{-1}(p) \quad (7)$$

در رابطه فوق φ تابع توزیع نرمال استاندارد و p
 مقدار احتمالی است که از رابطه ۶ بدست آمده است. البته
 مقدار SPI را می‌توان از طریق رابطه ذیل نیز تقریب زد.

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & \text{if } 0 < P \leq 0.5 \\ \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) & \text{if } 0.5 < P \leq 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

SPI ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه به ترتیب به ۳۸/۵، ۳۲ و ۲۸/۷ کاهش می‌یابد. این در حالی است که به درصد مناطق دارای روند کاهشی یا افزایشی اضافه می‌شود. برای مثال و در رابطه با همین مناطق فراخشک، خشک و نیمه خشک با روند کاهشی SPI، درصد این مناطق از ۱۷/۸ در SPI ۹ ماهه به ۲۱/۹، ۲۸/۴۸ و ۳۱/۷۱ درصد به ترتیب برای SPI های ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه افزایش می‌یابد. البته درصد مساحت با روند افزایشی SPI، تغییرات کمتری را نسبت به روند کاهشی یا مناطق بدون روند نمایش می‌دهند. چنانچه درصد مساحت مناطق مذکور در SPI ۹ ماهه برابر ۳۹/۸۸ است و برای SPI های ۱۲، ۱۸ و ۲۴ به ترتیب برابر با ۳۹/۵۸، ۳۹/۴۶ و ۳۹/۶۲ است.

همچنین این جدول نشان می‌دهد که مناطق با اقلیم فراخشک درصد به مراتب بالاتری در رابطه با روند افزایشی SPI دارند. در واقع در بیشتر سری‌های زمانی SPI، بیش از ۷۵ درصد مساحت‌ها در این اقلیم، دارای روند افزایشی یا شرایط بدون روند هستند. برای مثال، درصد مساحت مناطق با روند افزایشی معنادار در رابطه با SPI ۹ ماهه برابر با ۵۶/۷۱ و مناطق بدون روند ۳۴/۲۷ است. این در حالی است که فقط حدود ۹ درصد این اقلیم فراخشک دارای روند کاهشی SPI است. جدول ۳ حاوی اطلاعات مربوط به درصد فراوانی روندهای معنی‌دار افزایشی، کاهشی و بدون روند (در سطح ۰/۰۵) در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس‌های زمانی SPI ۹، ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماهه در کلاس خشکسالی بسیار شدید است. همانند اطلاعات جدول ۲، این جدول نیز نشان دهنده وجود انواع روند، شامل افزایشی و کاهشی معنادار و هم سری‌های بدون روند است. همچنین درصد روندهای بدون معنا با افزایش مقیاس زمانی SPI کاهش می‌یابد. در واقع از سطح مناطق بدون روند معنادار کاسته شده و به درصد مساحت مناطق دارای روند افزایشی یا کاهشی اضافه می‌گردد. برای مثال، درصد مساحت مناطق بدون روند معنادار SPI ۹ ماهه در اقلیم‌های فراخشک، خشک، نیمه خشک برابر با ۴۲/۳ درصد است. این درصد در رابطه با

سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است (۱۹). همچنین داده‌های ناقص نیز بر این روش تاثیرگذار نیستند (۴۳). فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. البته استفاده از روش من-کندال به خوبی شناخته شده و در بسیاری از مقالات ارائه شده است. لذا در اینجا از ارائه جزئیات آن صرف نظر شده است. البته لازم به ذکر است که جهت حذف اثر احتمالی خودهمبستگی‌ها در درون سری‌های زمانی SPI، آزمون وجود خود همبستگی برای هر سری زمانی SPI نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در صورت وجود خودهمبستگی عملیات Pre-Whitening بر سری‌های زمانی اعمال شده و سپس آزمون من-کندال بکار رفته است. همچنین سطح معناداری روند برابر با ۰/۰۵ که نشان‌دهنده ۹۵ درصد اطمینان است در نظر گرفته شده است. محاسبات تعیین روند نیز در محیط نرم افزار MATLAB صورت گرفته است.

نتایج

جدول ۲ حاوی اطلاعات مربوط به درصد فراوانی روندهای معنی‌دار افزایشی، کاهشی و بدون روند در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس‌های زمانی SPI ۹، ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماهه در کلاس خشکسالی متوسط تا شدید و در سطح معناداری ۰/۰۵ است. در وهله اول این جدول نشان‌دهنده وجود انواع روند، شامل افزایشی و کاهشی معنادار و هم سری‌های بدون روند است. همچنین درصد روندهای بدون معنا با افزایش مقیاس زمانی SPI کاهش می‌یابد. در واقع از سطح مناطق بدون روند معنادار کاسته شده و به درصد مساحت مناطق دارای روند افزایشی یا کاهشی اضافه می‌گردد. برای مثال، درصد مساحت مناطق بدون روند معنادار SPI ۹ ماهه در اقلیم‌های فراخشک، خشک، نیمه خشک برابر با ۴۲/۳ درصد است. این درصد در رابطه با

جدول ۲- درصد فراوانی روندهای معنادار افزایشی، کاهش‌ی و بدون روند (در سطح ۰/۰۵) در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه

خشک جهان در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماهه SPI و کلاس خشکسالی متوسط تا شدید

		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۹	فراخشک	۹/۰۲	۳۴/۲۷	۵۶/۷۱
	خشک	۱۹/۸۲	۴۲/۹۲	۳۷/۲۶
	نیمه خشک	۱۹/۶۸	۴۴/۹۴	۳۵/۳۸
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۱۷/۸۰	۴۲/۳۲	۳۹/۸۸
		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۱۲	فراخشک	۱۳/۱۹	۳۷/۷۷	۴۹/۰۴
	خشک	۲۳/۶۲	۳۷/۷۶	۳۸/۶۲
	نیمه خشک	۲۳/۹۶	۳۹/۳۵	۳۶/۶۹
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۲۱/۹۰	۳۸/۵۲	۳۹/۵۸
		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۱۸	فراخشک	۲۱/۴۸	۳۳/۳۸	۴۵/۱۴
	خشک	۳۳/۵۸	۲۸/۶۹	۳۷/۷۳
	نیمه خشک	۲۷/۴۹	۳۳/۹۷	۳۸/۵۴
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۲۸/۴۸	۳۲/۰۶	۳۹/۴۶
		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۲۴	فراخشک	۲۶/۳۱	۲۹/۳۱	۴۴/۳۸
	خشک	۳۶/۶۸	۲۵/۱۹	۳۸/۱۳
	نیمه خشک	۳۰/۲۱	۳۰/۹۲	۳۸/۸۸
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۳۱/۷۱	۲۸/۶۷	۳۹/۶۲

جدول ۳- درصد فراوانی روندهای معنادار افزایش‌ی، کاهش‌ی و بدون روند (در سطح ۰/۰۵) در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه

خشک جهان در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماهه SPI و کلاس خشکسالی بسیار شدید

		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۹	فراخشک	۷/۷۲	۴۹/۱۵	۴۳/۱۳
	خشک	۱۷/۴۲	۴۸/۸۱	۳۳/۷۷
	نیمه خشک	۱۹/۵۰	۵۴/۲۴	۲۶/۲۷
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۱۶/۶۶	۵۱/۴۶	۳۱/۸۸
		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۱۲	فراخشک	۹/۴۶	۴۳/۳۲	۴۷/۲۲
	خشک	۲۱/۲۳	۴۲/۵۷	۳۶/۲۱
	نیمه خشک	۲۳/۷۹	۴۶/۹۸	۲۹/۲۲
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۲۰/۳۲	۴۴/۸۱	۳۴/۸۶
		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۱۸	فراخشک	۱۱/۸۱	۴۲/۰۸	۴۶/۱۱
	خشک	۲۲/۳۹	۴۱/۱۷	۳۶/۴۴
	نیمه خشک	۲۵/۵۰	۴۳/۹۸	۳۰/۵۳
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۲۱/۹۶	۴۲/۶۸	۳۵/۳۶
		معنادار کاهش‌ی	بدون روند	معنادار افزایش‌ی
SPI ماهه ۲۴	فراخشک	۲۶/۳۱	۲۹/۳۱	۴۴/۳۸
	خشک	۳۶/۶۸	۲۵/۱۹	۳۸/۱۳
	نیمه خشک	۳۰/۲۱	۳۰/۹۲	۳۸/۸۸
	فراخشک- خشک- نیمه خشک	۳۱/۷۱	۲۸/۶۷	۳۹/۶۲

مناطق دارای روند منفی SPI قابل توجه است (نقشه بالا سمت راست از شکل ۲). این روندهای منفی، بخش‌هایی از کشور ایران، پاکستان، استرالیا، غرب آمریکای شمالی و غرب آمریکای جنوبی را پوشانده است. مناطق نیمه خشک (نقشه پایین سمت چپ از شکل ۲) معمولاً به صورت نوارهایی اطراف مناطق خشک جهان را محاط کرده‌اند. در این مناطق روند کاهشی SPI در بخش‌های شمال غربی و غربی ایران، مناطق شمال چین و مغولستان، غرب آمریکا و شرق استرالیا مشاهده می‌شود.

در رابطه با خشکسالی‌های بسیار شدید و در مقیاس زمانی SPI ۹ ماهه (شکل شماره ۳)، الگوهای مشابهی از لحاظ پراکنش مکانی روندها با رده خشکسالی متوسط تا شدید (شکل شماره ۲) مشاهده می‌گردد. البته با دقت بیشتر می‌توان مشاهده کرد که تغییرات از لحاظ جغرافیایی تا حدودی تغییر کرده‌اند. برای مثال، در کلاس خشکسالی متوسط تا شدید مناطق مرکزی ایران بیشتر دارای روند کاهشی SPI هستند، در حالی که در کلاس بسیار شدید، روند کاهشی در امتداد مرزهای غربی و جنوبی کشور قرار می‌گیرد.

تقریباً الگوهای مشابهی از روندهای افزایشی، کاهشی و بدون روند معنادار را در سایر سری‌های زمانی SPI مشاهده نمود. البته با این تفاوت که متناسب با افزایش در مقیاس زمانی SPI، بر گستره روندها خصوصاً روند کاهشی SPI اضافه می‌شود. چنانچه برای مثال، در رابطه با کلاس خشکسالی شدید تا متوسط SPI ۲۴ ماهه، تقریباً مناطق فراخشک، خشک و نیمه خشک جهان بین دو کلاس روند افزایشی و کاهشی تقسیم شده است و سری‌های بدون روند به صورت پراکنده در بین رنگ‌های قرمز و آبی قرار گرفته‌اند. در نقشه پایین سمت راست از شکل شماره ۸ مشاهده می‌شود که بخش عمده‌ای از کشور ایران، ترکیه، عراق و سوریه، بخش‌های غربی کشورهای افغانستان و پاکستان، شمال چین و مغولستان، شمال قاره آفریقا (به صورت نواری در شمال این قاره)، غرب قاره آمریکای جنوبی و همچنین غرب کشور آمریکا، را روندهای کاهشی SPI پوشانده است. این در حالی است

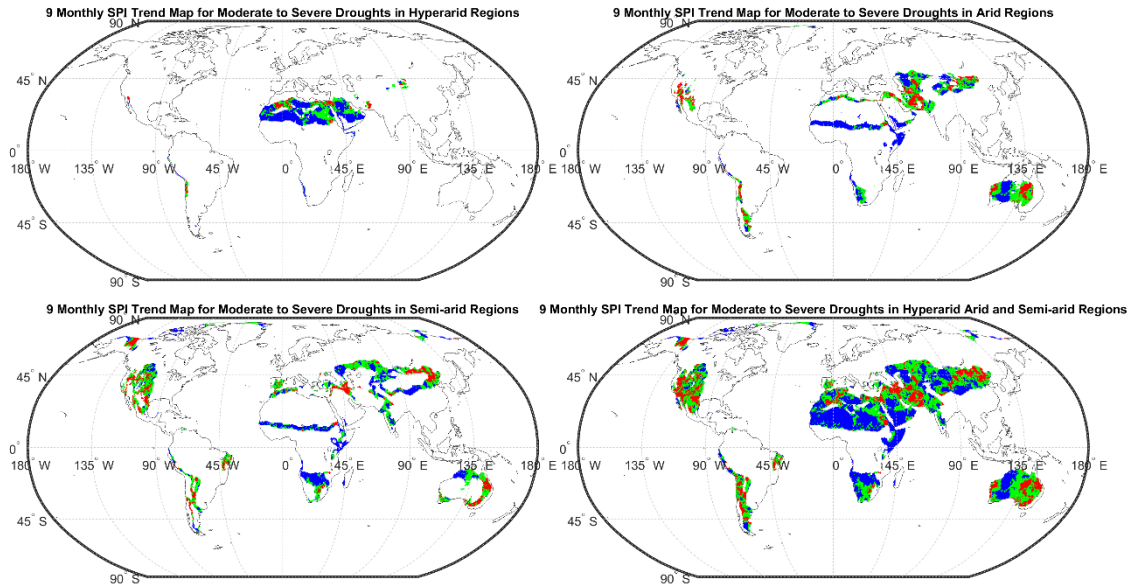
شکل‌های ۲ تا ۹ به ترتیب نشان‌دهنده پراکنش مکانی انواع روندهای معنی‌دار افزایشی، کاهشی و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماهه SPI است. البته تغییرات روند در هر سری زمانی مربوط به دو رده خشکسالی‌های متوسط تا شدید و بسیار شدید است. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهشی معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است. برای نمایش هرچه بهتر پراکنش مکانی روندها در اقلیم‌های فراخشک، خشک و نیمه خشک، هر شکل به چهار بخش تقسیم شده است و در هر یک از این بخش‌ها، پراکنش مکانی انواع روندها در هر یک از مناطق فوق‌الذکر نشان داده شده است. البته در بخش چهارم هر شکل، اطلاعات پراکنش انواع روندها در اقلیم‌های فراخشک، خشک و نیمه خشک جمع شده است.

در تطابق با اطلاعات جدول‌های ۲ و ۳، نقشه‌های ارائه شده نیز نشان‌دهنده افزایش روندهای معنادار کاهشی و افزایشی متناسب با افزایش مقیاس زمانی SPI قابل مشاهده است. چنانچه با افزایش مقیاس زمانی SPI، از سطح رنگ سبز (مناطق بدون روند معنادار) کاسته شده و به جای آن مناطق با رنگ قرمز یا آبی نمایان می‌گردد. البته روند افزایشی SPI در بیشتر مواقع مشهود است. این مناطق که با رنگ آبی نمایش داده شده‌اند، سطح قابل توجهی از نقشه‌های تولید شده را پوشش داده‌اند. به خصوص در رابطه با خشکسالی‌های متوسط تا شدید چنین حالتی بیشتر مشاهده می‌شود.

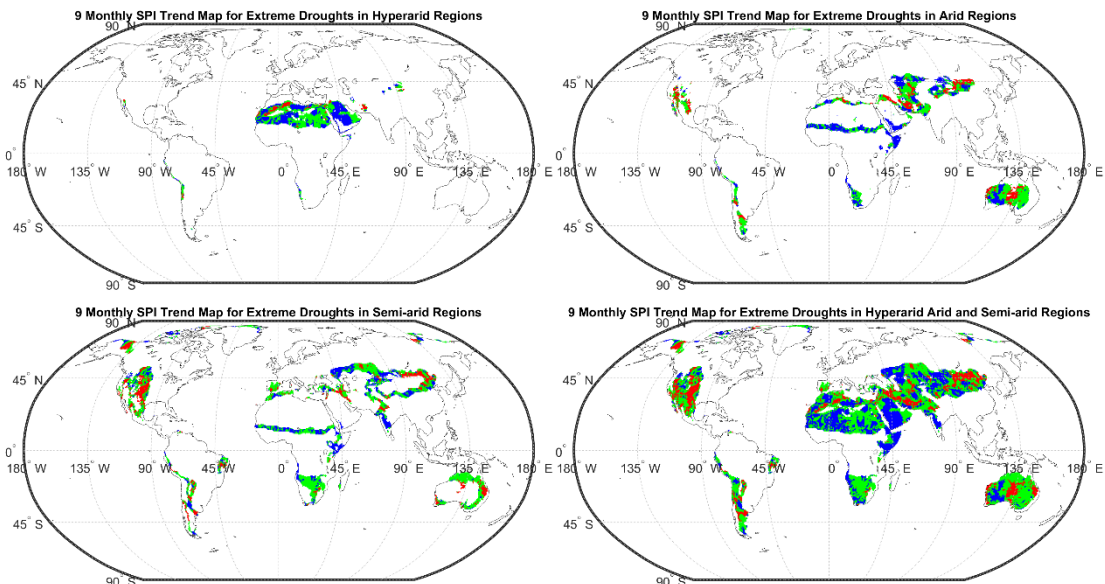
در تطابق با جدول ۲، شکل ۲ نشان می‌دهد که در مناطق فراخشک جهان، روند خشکسالی‌های متوسط تا شدید بر اساس SPI ۹ ماهه بیشتر به صورت افزایشی و یا بدون روند است. در واقع مناطق دارای روند کاهشی SPI به صورت لکه‌های کوچک قرمز رنگ در بین مناطق با روند افزایشی (با رنگ آبی) و یا بدون روند (رنگ سبز) قرار دارند. مناطق فراخشک جهان بیشتر در بخش‌های شمالی قاره آفریقا و همچنین کشورهای حاشیه خلیج فارس قرار گرفته‌اند. در رابطه با اقلیم خشک، نسبت

آسیای مرکزی دارای روند افزایشی SPI می‌باشند.

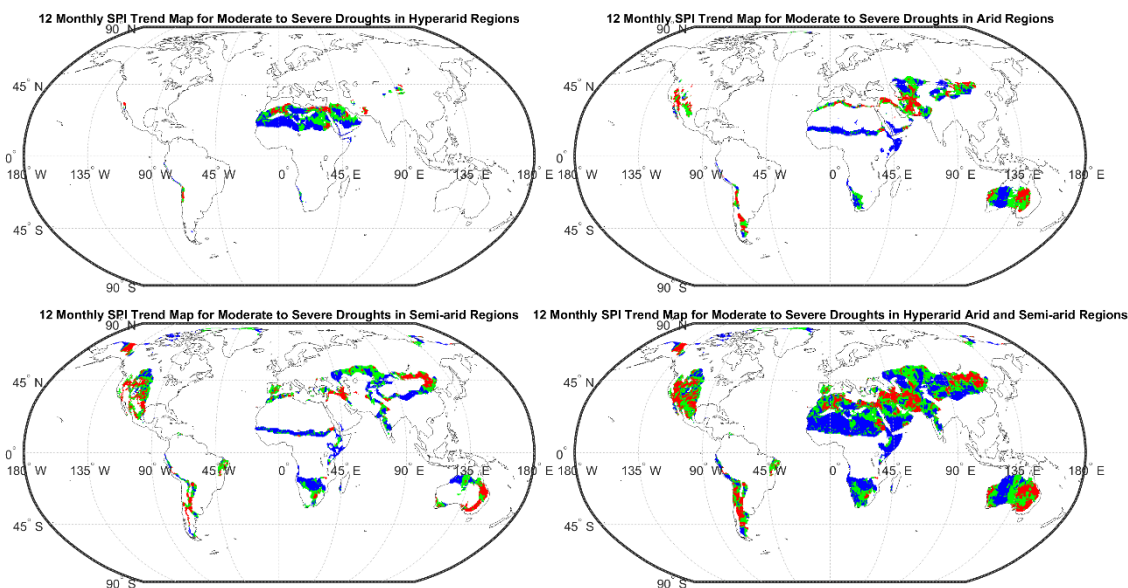
که بخش عمده‌ای از کشور عربستان، شمال و جنوب آفریقا و غرب استرالیا و بخش‌هایی از کشورهای واقع در



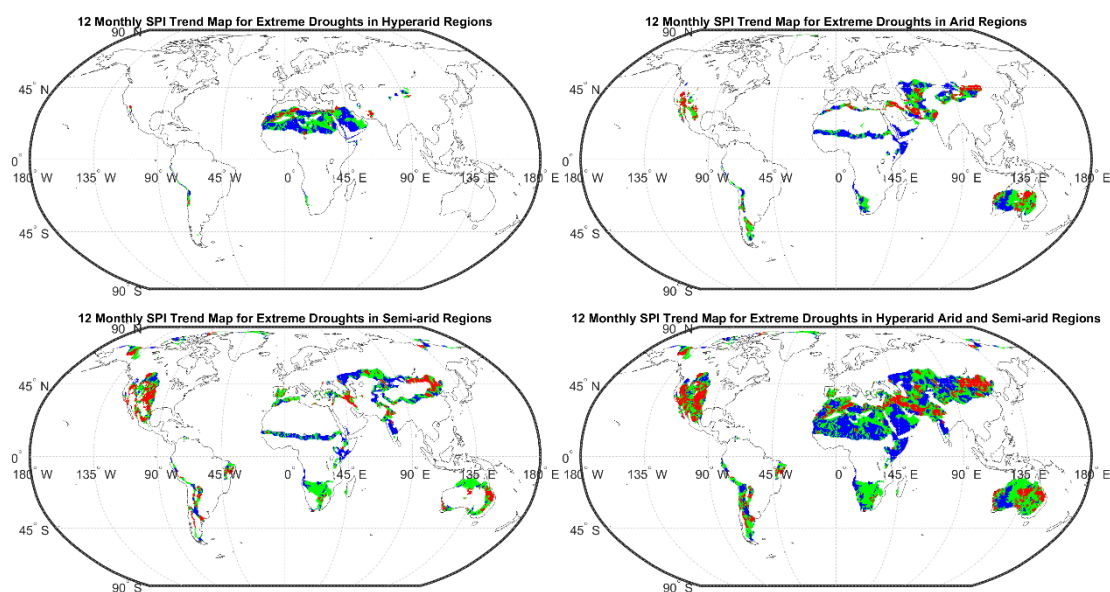
شکل ۲- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی متعادل تا شدید معنی‌دار افزایشی، کاهش و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۹ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ است.



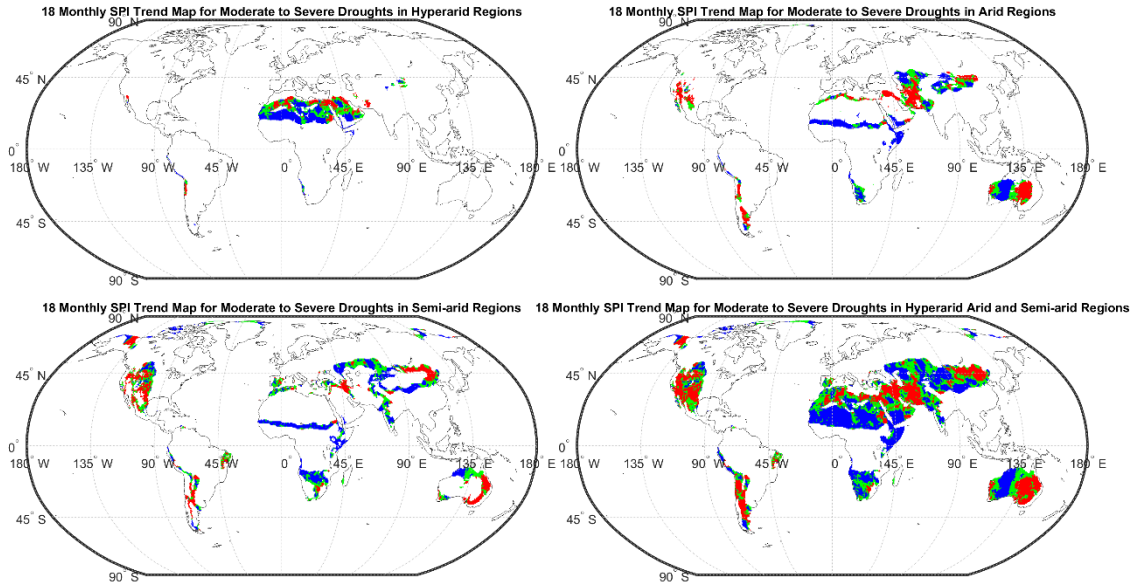
شکل ۳- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی بسیار شدید معنی‌دار افزایشی، کاهش و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۹ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ است.



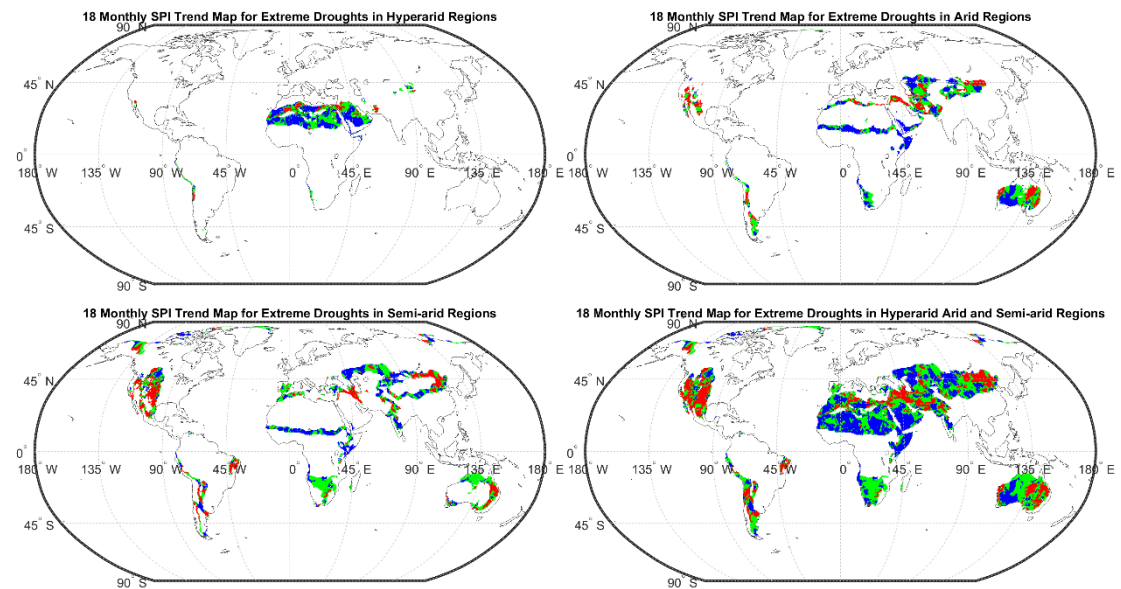
شکل ۴- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی متوسط تا شدید معنی دار افزایشی، کاهش و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است.



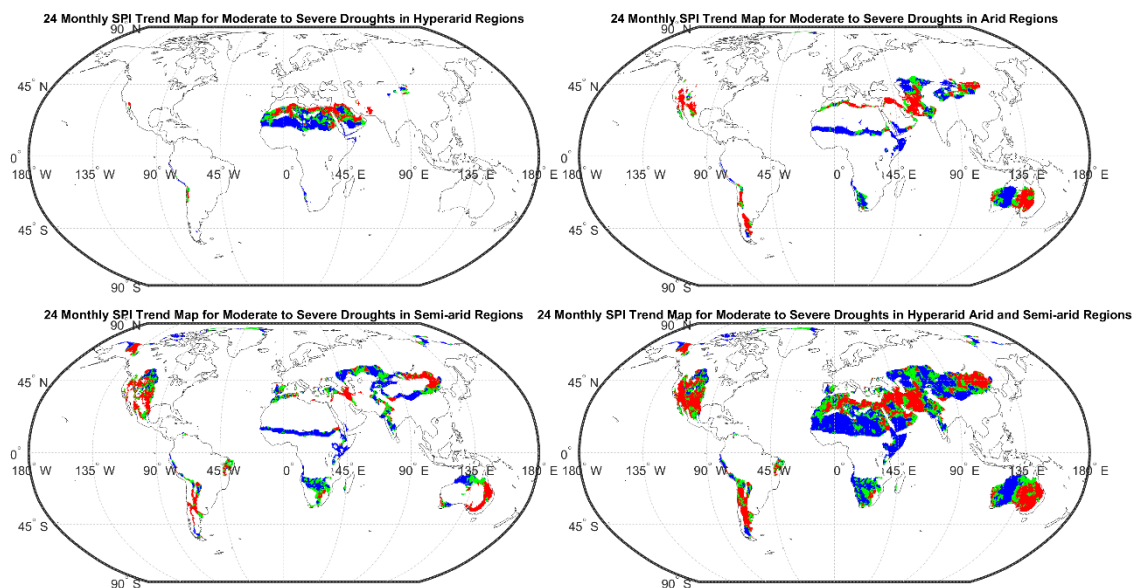
شکل ۵- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی بسیار شدید معنی دار افزایشی، کاهش و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ است.



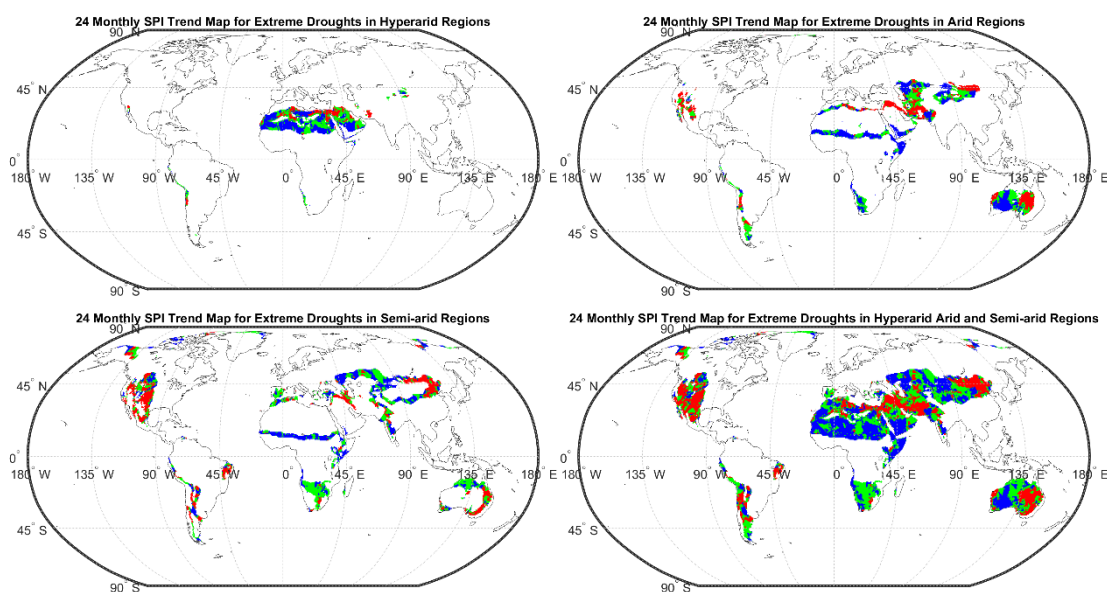
شکل ۶- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی متوسط تا شدید معنی‌دار افزایشی، کاهش‌ی و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۱۸ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش‌ی معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است.



شکل ۷- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی بسیار شدید معنی‌دار افزایشی، کاهش‌ی و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۱۸ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش‌ی معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است.



شکل ۸- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی متعادل تا شدید معنی دار افزایشی، کاهش و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ است.



شکل ۹- نقشه پراکنش مکانی انواع روندهای خشکسالی بسیار شدید معنی دار افزایشی، کاهش و بدون معنی در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه خشک جهان و در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه SPI. در این نقشه‌ها، رنگ قرمز نشان‌دهنده روندهای کاهش معنادار، رنگ آبی نشان‌دهنده روندهای افزایشی معنادار و مناطق با رنگ سبز نشان‌دهنده شرایط عدم وجود روند معنادار است. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ است.

■ بحث و نتیجه‌گیری

معنادار و بدون روند معنادار) در این مناطق می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر با مطالعه (۱۰) همخوانی دارد. مطالعه مذکور نشان می‌دهد که بارش‌های دریافتی، در مناطقی مانند خاور میانه، غرب استرالیا و غرب آمریکا کاهش معناداری داشته است. این در حالی است که مناطق مانند شرق استرالیا یا

در این تحقیق، روند سری‌های زمانی بلند مدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI و در مناطق فراخشک، خشک و نیمه خشک جهان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده وجود انواع روندها (کاهش معنادار، افزایشی

حال اگر به مرور زمان شدت این خشکسالی‌ها افزایش یابد، یا بزرگی و مدت آن‌ها بیشتر شود، می‌توانند یک روند معنادار کاهش SPI و پیرو آن افزایش خشکسالی طولانی مدت را به نمایش بگذارند. از آنجایی که خشکسالی‌های با مقیاس زمانی بالا می‌تواند ناشی از کمبود بارش در خشکسالی‌های کوتاه مدت باشد، معمولاً از تداوم بیشتری نیز برخوردار است. این موضوع می‌تواند در بزرگی خشکسالی نیز تاثیرگذار باشد. در صورتی که یک سری زمانی طولانی مدت SPI مانند سری ۱۲ ماهه در کلاس متوسط تا شدید و یا بسیار شدید دارای روند منفی باشد بدان معناست که یا خشکسالی‌های بزرگتری با فراوانی بیشتری اتفاق افتاده اند و یا مدت زمان خشکسالی‌ها بیشتر شده و یا هر دو پارامتر بزرگی خشکسالی و مدت آن افزایش یافته است (۱۲، ۲۳).

افزایش وقوع، بزرگی یا تداوم خشکسالی‌های بلند مدت از چند جنبه دارای اهمیت است. اول آنکه تداوم این خشکسالی‌ها می‌تواند به تغییر ماهیت اقلیم یک منطقه منجر گردد. در واقع با افزایش خشکسالی‌ها، مقدار بارش متوسط یک منطقه در طول یک دوره کاهش می‌یابد. بر اساس تقسیم بندی اقلیم به روش UNEP ۱۹۹۷ و با فرض ثابت بودن مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل، با کاهش مقدار بارش‌ها در اثر تداوم و بزرگی خشکسالی‌ها، نسبت بارش به تبخیر و تعرق پتانسیل کمتر و لذا، خشکی منطقه افزایش می‌یابد. داده‌های تاریخی مربوط به بارش، رواناب‌های سطحی و شاخص‌های خشکسالی نیز نشان‌دهنده افزایش خشکی در بسیاری از مناطق جهان و طی نیم قرن اخیر بوده است (۹، ۱۰). دوم آنکه خشکسالی‌های هیدرولوژیک و اقتصادی و اجتماعی معمولاً از شرایط ماندگاری بیشتری برخوردارند، در صورتی که دور تکرار آن‌ها کمتر است. این در حالی است که خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی هر چند از مدت کمتری برخوردار هستند اما از طرف دیگر دور تکرار آن‌ها بیشتر است. خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی طولانی مدت خصوصاً ۱۲ تا ۲۴ ماه معمولاً به شدت بر منابع آبی سطحی مانند رودخانه‌ها، ذخیره آب در سدها، و حتی منابع آب زیرزمینی تاثیرگذار هستند (۴۱). روند افزایشی خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید که در بسیاری از مناطق دنیا از جمله ایران و خاور میانه اتفاق افتاده است، شرایط افزایش بحران کمبود منابع آب را دامن می‌زند. با توجه به

جنوب آفریقا دارای روند افزایشی بارش است. همچنین نتایج (۱۱) حاکی از افزایش وقوع خشکسالی‌ها بر اساس شاخص SPI ۶ ماهه در غرب آمریکا و بخش‌هایی از خاور میانه است. البته در مطالعه مذکور، بخش عمده‌ای از مناطق دارای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک در بررسی روند کنار گذاشته شده‌اند. در مطالعه (۱۱) و در محاسبات SPI از تابع ناپارامتری گاما استفاده شده است. لذا مناطق دارای بارش کمتر از ۱۵ میلیمتر در ماه وارد محاسبات نشده‌اند.

باید توجه داشت که روند کاهش SPI به معنای روند افزایشی وقوع خشکسالی‌هاست. در طول یک سری زمانی SPI، کاهش نسبی مقادیر SPI به معنای کاهش نسبی شرایط مرطوب و یا افزایش نسبی شرایط خشکی است. بر خلاف آن، روند افزایشی در یک سری زمانی SPI، به معنای افزایش نسبی شرایط مرطوب و یا کاهش نسبی شرایط خشکی است. لذا آنچه به خصوص در رابطه با محدودیت منابع آب در مناطق با اقلیم‌های فراخشک، خشک و نیمه خشک مطلوب می‌باشد، روند افزایشی سری‌های زمانی خشکسالی است. برای درک و تحلیل بهتر روندهای اتفاق افتاده، در اینجا لازم است تا علت وقوع خشکسالی‌های با مقیاس زمانی طولانی مدت مورد بررسی قرار گیرد. معمولاً یک فصل یا بیشتر کمبود بارش اتفاق می‌افتد تا خشکسالی ایجاد شود (۴۱). وقتی یک خشکسالی طولانی مدت برای مثال ۱۲ ماهه رخ می‌دهد به معنی آن است که جمع بارش در ۱۲ ماه متوالی در ماه مورد نظر و در آن سال نسبت به همین دوره در سال‌های دیگر کاهش داشته است. در واقع تکرار دو یا چند خشکسالی فصلی که در یک فصل بارش اتفاق می‌افتند، می‌تواند باعث ایجاد یک خشکسالی بزرگتر و طولانی‌تر شوند. حتی گاهی این امکان وجود دارد که طی دو یا سه فصل بارش، شرایط نرمال تجربه شده باشد. از آنجا که سری‌های زمانی خشکسالی معمولاً طبقه بندی می‌گردد، ممکن است شرایط فصول بارش مذکور در کلاس نرمال قرار گیرند، اما وضعیت آن بیشتر متمایل به شرایط خشک باشد و نه شرایط تر. در چنین حالتی، تکرار دو یا چند فصل بارش در سری‌های زمانی کوتاه مدت خشکسالی چندان قابل تشخیص نیست، اما در سری‌های زمانی میان مدت یا بلندمدت خشکسالی نظیر سری‌های زمانی ۹، ۱۲ ماهه و یا بیشتر قابل تشخیص می‌باشند.

جهانی و نه در مقیاس منطقه‌ای است. به عبارتی بهتر، افزایش خشکسالی‌ها محدود به یک منطقه خاص برای مثال خاورمیانه نیست. این موضوع در سایر قاره‌ها نیز اتفاق افتاده است. برای نمونه مناطق غرب آمریکا و یا بخش قابل توجهی از استرالیا نیز با چنین مشکلاتی مواجه شده است. آنچه مهم است درجه توسعه یافتگی کشورهاست که چگونگی واکنش آن‌ها را به افزایش خشکسالی‌ها مشخص می‌کند. همچنین نتایج این مقاله نشان‌دهنده افزایش وقوع خشکسالی‌ها در مناطقی از افغانستان، پاکستان و ترکیه و سوریه است که در حال حاضر به شدت درگیر مشکلات مربوط به جنگ داخلی می‌باشند. البته بخش‌های قابل توجهی از مرکز ایران و جنوب شرقی کشور ما نیز درگیر روند کاهش SPI یا افزایش خشکسالی‌ها طی دهه‌های اخیر بوده است. ادامه این روند، خصوصاً در منطقه حساس خاور میانه که از یک طرف با خشکی اقلیم و محدودیت منابع آب درگیر می‌باشد و از طرف دیگر نیز بخش‌های قابل توجهی از آن درگیر جنگ‌های شدید است، مشکلات متعددی را در ایجاد صلح دائم در این منطقه بوجود خواهد آورد. لذا توجه به این مسئله نیز از اهمیت خاصی برخوردار است و شاید ایجاد یک سیستم مدیریت جامع منابع آب در سطح منطقه خاورمیانه بتواند از مشکلات مربوط به افزایش روند خشکسالی‌ها در این منطقه بکاهد.

بلندمدت بودن این سری‌های زمانی خشکسالی، بایستی فصل‌های پر بارش قابل توجهی اتفاق بیفتد تا روند منفی SPI یا به عبارتی دیگر روند افزایشی خشکسالی متوقف گردد.

در هر صورت، یکی از مهمترین مشکلات اساسی در اقلیم‌های فراخشک تا نیمه خشک، محدودیت منابع آب است و باید به این نکته توجه کرد که در بسیاری از مناطق با اقلیم‌های فراخشک، خشک و نیمه خشک، بخش قابل توجهی از منابع آب ذخیره شده خصوصاً منابع آب زیرزمینی برداشت و مورد استفاده واقع گردیده است. در واقع ذخیره منابع آب شیرین در این مناطق با شتاب بسیار زیادی برداشت شده است. شاید در کنار عدم مدیریت صحیح این منابع (۳۱)، افزایش وقوع خشکسالی‌ها منجر به روند صعودی برداشت از این منابع شده باشد. به هر حال یک واقعیت معین است و آن اینکه در سال‌های تر عمل تغذیه منابع آب خصوصاً منابع آب زیرزمینی صورت می‌پذیرد. البته عمل تخلیه منابع آب در سال‌های تر نیز وجود دارد. به عبارتی هم عمل شارژ و هم عمل دشارژ منابع آب در سال‌های تر صورت می‌گیرد. این در حالی است که در سال‌های خشک آنچه که صورت می‌گیرد بیشتر همان عملیات برداشت از منابع آب است و این موضوع می‌تواند به شدت بر بحران منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک تاثیر گذار باشد.

نکته قابل توجه دیگر افزایش خشکسالی‌ها در مقیاس

■ References

1. A.M.S. (2004). Statement on meteorological drought. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* (85), 771-773.
2. AghaKouchak, A. & Nakhjiri, N.A. (2012). Near real-time satellite-based global drought climate data record. *Environ Res Lett.* (7)4, 044037.
3. Ahani, H., Kherad, M., Kousari, M., Rezaeian-Zadeh, M., Karampour, M., Ejraee, F. & Kamali, S. (2012). An investigation of trends in precipitation volume for the last three decades in different regions of Fars province, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 3-4(109), 361-382.
4. Ahani, H., Kherad, M., Kousari, M., Roosmalen, L., Aryanfar, R. & Hosseini, S. (2013). Non-parametric trend analysis of the aridity index for three large arid and semi-arid basins in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 3(112), 533-564.
5. Anderson, T.R., Hawkins, E. & Jones, P.D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*. (40)3, 178-187.
6. Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F. & Lettenmaier, D.P. (2005). Twentiethcentury drought in the conterminous United States. *J Hydrometeorol.* (6)6, 985-1001.

7. Andreadis, K.M. & Lettenmaier, D.P. (2006). Trends in 20th century drought over the continental United States. *Geophysical Research Letters*. (33)10.
8. Barbarossa, V., Huijbregts, M.A.J., Hendriks, A.J., Beusen, A.H.W., Clavreul, J., King, H. & Schipper, A.M. (2017). Developing and testing a global-scale regression model to quantify mean annual streamflow. *Journal of Hydrology*. (544), 479-487.
9. Dai, A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. (116)D12.
10. Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews; Clim. Change* (2)1, 45–65.
11. Damberg, L. & AghaKouchak, A. (2014). Global trends and patterns of drought from space. *Theor Appl Climatol* (117)3, 441-448.
12. Dashtpagerdi, M., Kousari, M., Vagharfard, H., Ghonchepour, D., Hosseini, M. & Ahani, H. (2014). An investigation of drought magnitude trend during 1975–2005 in arid and semi-arid regions of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 1-14.
13. Fadnavis, S. & Beig, G. (2006). Seasonal variation of trend in temperature and ozone over the tropical stratosphere in the Northern Hemisphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. (68)17, 1952-1961.
14. Farahmand, A. & AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*. 76, 140-145.
15. Founda, D., Papadopoulos, K.H., Petrakis, M., Giannakopoulos, C. & Good, P. (2004). Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: trends, warm events, and cold events. *Global and Planetary Change*. (44), 27-38.
16. Gringorten, I.I. (1963). A plotting rule for extreme probability paper. *J Geophys Res*. (68)3, 813-814.
17. Guttman, N.B. (1994). On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climate*. 6(7), 1026–1029.
18. Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. & Lister, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*. (34)3, 623-642.
19. Hirsch, R., Helsel, D., Cohn, T. & Ilroy, E., *Statistical analysis of hydrologic data*. Handbook of hydrology. 1993: McGraw-Hill, New York.
20. IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). 2007 Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
21. IRI, *The Drought and Humanitarian Crisis in Central and Southwest Asia: A Climate Perspective*. International Research Institute for Climate and Society, 2001, IRI Special Report No. 01–11.
22. Kendall, M.G., *Rank Correlation Methods*. 1975: Griffin, London.
23. Kousari, M., Dastorani, M.T., Niazi, Y., Soheyli, E., Hayatzadeh, M. & Chezgi, J. (2014). Trend Detection of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran Based on Implementation of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Application of Non-Parametrical Statistical Method. *Water Resour Manag*. (28), 1857–1872.
24. Kousari, M.R., Ahani, H. & Hakimelahi, H. (2013). An investigation of near surface wind speed trends in arid and semiarid regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-16.

25. Kousari, M.R., Asadi Zarch, M., Ahani, H. & Hakimelahi, H. (2013). A survey of temporal and spatial reference crop evapotranspiration trends in Iran from 1960 to 2005. *Climatic Change*.
26. Linsley, R.K., Paulhus, J.L.H. & Kohler, M.A., *Applied hydrology*. McGraw-Hill civil engineering series. 1949, New York: McGraw-Hill. Xiv, p 689.
27. Ma, Z. & Fu, C. (2007). Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background. *Science in China Series D: Earth Sciences*. (50)5, 776-788.
28. Mann, H.B. (1945). Non-Parametric tests against trend. *Econometrica*. (13), 245-259.
29. Masafu, C.K., Trigg, M.A., Carter, R. & Howden, N.J.K. (2016). Water availability and agricultural demand: An assessment framework using global datasets in a data scarce catchment, Rokel-Seli River, Sierra Leone. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. (8), 222-234.
30. Mishra, A. & Singh, V. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, (391), 202-216.
31. Modarres, R., Sarhadi, A. & Burn, D.H. (2016). Changes of extreme drought and flood events in Iran. *Global and Planetary Change*. (144), 67-81.
32. Mosaedi, A. & Ghabaei Sough, M. (2011). Modification of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on Relevant Probability Distribution Function. *Journal of Water and Soil*. (25)5, 1206-1216.
33. Naresh Kumar, M., Murthy, C.S., Sessa Sai, M.V.R. & Roy, P.S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications*. (16)3, 381-389.
34. Sheffield, J., Wood, E.F. & Roderick, M.L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*. (491)7424, 435-438.
35. Sun, X., Ren, G., Xu, W., Li, Q. & Ren, Y. Global land-surface air temperature change based on the new CMA GLSAT data set. *Science Bulletin*.
36. Tapiador, F.J., Turk, F.J., Petersen, W., Hou, A.Y., García-Ortega, E., Machado, L.A.T., Angelis, C.F., Salio, P., Kidd, C., Huffman, G.J., and de Castro, M. (2012). Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*. (104-105), 70-97.
37. Tian, Q. & Yang, S. Regional climatic response to global warming: Trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s. *Quaternary International*.
38. UN Secretariat General. (1994). *United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa*. Paris.
39. Wilhite, D.A. & Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int*. 10, 111-120.
40. WMO, *Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974-1985*. 1986, World Meteorological Organization: Geneva. p. 118
41. WMO, *Standardized Precipitation Index User Guide*. 2012, World Meteorological Organization: CH-1211 Geneva 2, Switzerland.
42. Wong, G., Lambert, M.F., Leonard, M. & Metcalfe, A.V. (2010). Drought Analysis Using Trivariate Copulas Conditional on Climatic States. *Journal of Hydrologic Engineering*. (15)2, 129-141.
43. Yu, Y., Zou, S. & Whittemore, D. (1993). Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. *J Hydrol* (150), 61-80.
44. Zeng, N. (2003). Drought in the Sahel. *Science*. (302), 999-1000.
45. Zhai, L. & Feng, Q. (2008). Spatial and temporal pattern of precipitation and drought in Gansu Province, Northwest China. *Nat Hazard*. (49), 1-24.

Investigation of long term drought trend in semi-arid, arid and hyper-arid regions of the world

M. R. Kousari^{*1}, M. R. Ekhtesasi², H. Malekinezhad³

1. PhD student, College of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, *Iran*
 2. Professor, College of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, *Iran*
 3. Associate Professor, College of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, *Iran*
- * Corresponding Author: mohammad_kousari@yahoo.com

Received date: 27/08/2016

Accepted date: 12/02/2017

Abstract

The lack of sufficient fresh water resources, climate change, lengthy and severe droughts are of the major today's world challenges particularly in arid and semi-arid regions. In the current conditions, especially in the case of droughts and in order to planning for water resources, it is essential to analyze the changes and trends in drought particularly in hyper-arid, arid and semi-arid regions of the globe. In this study, the Mann-Kendall statistics were applied to determine the significant and non-significant positive or negative trends in long term drought time series (9, 12, 18 and 24 monthly time scales) in moderate to severe and extreme classes of droughts derived based on the Standardized Precipitation Index (SPI). The results indicated that both significant positive and negative trends can be found in these regions. By increasing the time scales of drought time series, the percentage of significant upward or downward trend grow. For example, in the case of decreasing trend of SPI (increasing in the drought), the percentage of 17.8 for 9 monthly SPI increased to 21.9, 28.48 and 31.71 for the 12, 18 and 24 monthly SPIs, respectively. The increasing trend in long severe and extreme classes of drought can be found in the Middle East and west of America. The upward trends of drought particularly in the Middle East region which is suffered by expensive tensions among the communities can intensify current critical situations. Therefore, more attention should be paid to this subject particularly in the regional and international scales.

Keywords: Drought; Dry; Hyper-Arid; Semi-arid; Trend