

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره دوازدهم، شماره چهل و ششم، زمستان ۱۴۰۰

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۱۶

صص ۷۵-۵۳

تحلیل خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

زیور بلوچی، دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
پیمان محمودی*، دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
محسن حمیدیان‌پور، دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، بررسی ویژگی‌های مختلف خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای ایران بر اساس تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است؛ بنابراین جهت رسیدن به این هدف، داده‌های بارش سالانه‌ی ۶۳ ایستگاه هم‌دید برای یک دوره‌ی ۳۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۱۵) از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. نخست بر اساس تئوری گردش‌ها و شاخص SPI ویژگی‌های خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای همچون درازای زمانی، کمبود تجمعی و شدت آن‌ها استخراج شدند. تشخیص و تفکیک خشک‌سالی‌های منطقه‌ای مبتنی بر آستانه‌ی فضای بحرانی ۳۰ و ۵۰ درصد از مجموع مساحت ایران انتخاب شدند و بر این اساس، ویژگی‌های خشک‌سالی ایران برای هر دو مقیاس با یکدیگر بررسی شدند. در مقیاس محلی پایش خشک‌سالی‌ها با استفاده از تئوری گردش‌ها مشاهده شد که این روش برای مناطقی با وسعت زیاد و دارای اقلیم‌های مختلف در مقایسه با شاخص SPI نمی‌تواند بسیار مناسب باشد. در مقیاس منطقه‌ای نیز نشان داده شد که استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضای ۳۰ درصد، ترکیب مناسبی برای پایش خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران نمی‌باشند، لذا در مقایسه بین دو آستانه‌ی فضای ۳۰ و ۵۰ درصد کاملاً آشکار شد که آستانه‌ی فضای ۵۰ درصد برای تئوری گردش‌ها و شاخص SPI آستانه‌ی مناسبی برای پایش خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران است. از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به این مهم اشاره داشت که درازای زمانی خشک‌سالی‌ها در دوره‌ی اول نسبت به دوره‌ی دوم کوتاه‌تر بوده است و در مورد شدت خشک‌سالی‌ها به نظر می‌رسد شدت خشک‌سالی‌ها در دوره‌ی دوم (۲۰۱۵-۲۰۰۱) نسبت به دوره‌ی اول (۲۰۰۰-۱۹۸۶) کاهش داشته باشند.

واژگان کلیدی: چندضلعی تیسن، درازای زمانی خشک‌سالی، شدت خشک‌سالی، کمبود تجمعی خشک‌سالی، آستانه‌ی فضای، تغییرات اقلیمی.

۱-مقدمه

خشک‌سالی به عقیده‌ی بسیاری از پژوهشگران یکی از پیچیده‌ترین و درعین‌حال یکی از ناشناخته‌ترین مخاطرات طبیعی است که انسان با آن دست به‌گریبان است (Hagman, 1981: 1). این پدیده در مقایسه با دیگر مخاطرات طبیعی بیش‌ترین تأثیر را بر روی فعالیت‌های انسانی دارد. اثرات خشک‌سالی‌ها اساساً غیر سازه‌ای، محدوده‌ی گسترش مکانی آن‌ها وسیع و میزان خسارات ناشی از آن در مقایسه با دیگر مخاطرات طبیعی بسیار بیش‌تر است. همین اثرات غیر سازه‌ای خشک‌سالی‌ها مانع و سد بزرگی در برابر توسعه‌ی برآوردهای بهنگام، موثق و دقیق از شدت خشک‌سالی‌ها شده است؛ به‌طوری‌که تنظیم و تدوین هرگونه برنامه‌ی آمادگی در مقابل خشک‌سالی‌ها را در بسیاری از کشورها دچار مشکل ساخته است (Chopra, 2006: 1).

در طول یک قرن گذشته، شاخص‌های متعددی به منظور کمی کردن خشک‌سالی‌ها توسعه داده شده‌اند. این شاخص‌ها به‌طور کلی بر اساس نوع خشک‌سالی‌های اندازه‌گیری‌شده به سه دسته تقسیم می‌شوند. شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی که برای اندازه‌گیری خشک‌سالی‌های ناشی از کمبود بارش استفاده می‌شوند، شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی که میزان خشک‌سالی ناشی از رطوبت نامناسب خاک را از نظر کمیّت مورد بررسی قرار می‌دهند و درنهایت شاخص‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی که خشک‌سالی‌های ناشی از کاهش منابع آب سطحی و زیرسطحی را اندازه‌گیری می‌کنند. برخی از شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی که به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌توان به شاخص مونگر^۱ (1916: 642)، شاخص اثربخشی بارش (Thorntwaite, 1931: 633)، شاخص بلامن استوک^۲ (1942: 1)، شاخص بارش پیشین (API) مک‌کویگ و واگنر و اوکونل (McQuigg, 1954: 64; Waggoner and O'Connell, 1956: 6)، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر^۳ (PDSI) (1965: 1)، شاخص ناپهنجاری بارش (RAI) (van Rooy, 1965: 43)، شاخص ناحیه‌ای خشک‌سالی (Bhalme and Mooley, 1908: 1197)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (McKee et al., 1993: 1) و شاخص خشک‌سالی مؤثر (Byun and Wilhite, 1999: 2747) اشاره نمود. از بین این شاخص‌ها، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مشهورترین و پرکاربردترین شاخص هاست. در محاسبه‌ی این شاخص، بارش استاندارد می‌شود تا بتوان در دو بعد زمان و مکان قابل‌مقایسه شوند. با استفاده از همان روش‌شناسی مشابه برای محاسبه‌ی SPI، شاخص رطوبت خاک محاسبه‌شده (SSMI) و شاخص جریان آب رودخانه استاندارد شده (SSFI) (Modarres, 2007: 223; Kao and Govindaraj, 2010: 121) به ترتیب می‌توانند با استفاده از رطوبت خاک و جریان آب رودخانه به‌عنوان متغیرهای کلیدی، محاسبه و به‌عنوان شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی و هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند.

از دیگر شاخص‌های خشک‌سالی کشاورزی که می‌توان به آن‌ها اشاره نمود، شاخص کفایت رطوبت (MAI) (McGuire and Palmer, 1957: 305)، شاخص ناپهنجاری رطوبت (DMAI) (Palmer, 1965: 1)، شاخص رطوبت محصول (CMI) (Palmer, 1968: 156)، شاخص ناپهنجاری رطوبت خاک (SMAI) (Bergman et al., 1988: 190)، شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) (Kogan, 1995: 655; Liu and Kogan, 1996: 2761; Kogan, 1997: 621) و رطوبت خاک محاسبه‌شده (CSM) (Huang et al., 1996: 1350) هستند که از مهم‌ترین آن‌ها نیز به شمار می‌آیند. برجسته‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی، شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی پالمر (PHDI) (Palmer, 1965: 1)، کسری مجموع آب (TWD) (Dracup et al, 1980: 297)، شاخص ذخیره‌ی آب سطحی (SWSI) (Shafer and Dezman,)

1- Munger
2- Blumenstock
3- Palmer

Keyantash and Dracup, 2002: 164) و نابهنجاری جریان آب رودخانه تجمعی (CSA) کیانتاش و دراکاپ^۴ (Keyantash and Dracup, 2002: 1167) هستند. مقایسه‌ی دقیق این شاخص‌ها را می‌توان در تحلیل‌های محمودی و همکاران (Mahmoudi et al, 2019: 3123)، کیانتاش و دراکوپ^۵ (Keyantash and Dracup, 2002: 1167) و حیم^۶ (Heim, 2002: 1149) مشاهده نمود. با توجه به این دسته‌بندی‌ها، همواره شناسایی و توصیف خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای موضوع تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان بوده است (Santos, 1983: 183; Santos et al, 1988: 323)؛ به طوری که ویلهیت و گلانتز^۷ (1987:13) و تاتی و گوستارد^۸ (2000: 1) موضوع مربوط به تنوع تعاریف خشک‌سالی‌ها را مورد توجه قرار داده و نشان دادند که تعاریف خشک‌سالی‌ها به شدت وابسته به نوع فعالیت‌های انسانی، نوع فعالیت‌های اکولوژیکی و مقیاس زمانی و فضایی تحلیل‌های مورد نظر است؛ اما شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به علت سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارش و قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی، یک انتخاب رایج در بین بسیاری از محققان حوزه‌های اقلیم‌شناسی، هواشناسی، کشاورزی و مدیریت منابع آب است. مک‌کی و همکاران (McKee et al, 1993: 179; 1995: 233) اولین محققانی بودند که با استفاده از این شاخص ایالت کلرادو را در ایالات متحده آمریکا مورد پایش قرار دادند. بعد از آن، محققین مختلفی برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی‌های کشور خود از این شاخص استفاده کردند که به عنوان مثال می‌توان به کارهای موندول و همکاران^۹ (2017: 1) در بنگلادش، یوان و همکاران^{۱۰} (2016: 1) در چین، ماه فوز و همکاران^{۱۱} (2016: 1) در لبنان، گئوگانگ و کامگا^{۱۲} (2014: 2310) در کامرون، ال مدج^{۱۳} (2014: 1) در کویت، تورکش و تاتلی^{۱۴} (2009: 2270) در ترکیه، میچائیلیداس و پاشیاردیس^{۱۵} (2008: 123) در قبرس و لیوادا و آسیماکوپولوس^{۱۶} (2007: 143) در یونان اشاره کرد. در ایران نیز محققان بسیاری از این شاخص در مطالعات خود استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال (کرد و همکاران، ۱۳۹۹: ۱؛ میر احسنی و همکاران، ۱۳۹۷: ۷۳۹؛ منتصری و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۸۹؛ مهری و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۵۱؛ عیوضی و مساعدی، ۱۳۹۰: ۶۵؛ میر احسنی و همکاران؛ نگارش و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۰۹؛ خسروی و اکبری، ۱۳۸۸: ۵۱).

تئوری گردش‌ها به عنوان یکی از روش‌های تصادفی تحلیل سری‌های زمانی به صورت بسیار موفقیت‌آمیزی در حوضه‌ی دریای مدیترانه برای توصیف خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای (Rossi et al, 1992: 249; Cancelliere et al, 1996: 1) در استان لرستان در غرب ایران (بشیرزاده و عراقی نژاد، ۱۳۸۹: ۹۱) و در استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق ایران (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۲: ۲۹۲) به کار برده شده‌اند. هرچند شاخص بارش استاندارد شده (SPI) هنوز جهت تحلیل خشک‌سالی‌های منطقه‌ای مورد استفاده زیادی قرار نگرفته است، لذا استفاده از یک شاخص مناسب برای پایش و تعیین ویژگی‌های دقیق و بهنگام خشک‌سالی‌ها یا ترسالی‌ها در یک منطقه، یکی از نیازهای اساسی برنامه‌ریزان محیطی و

4 - Keyantash and Dracup

5 - Keyantash and Dracup

6 - Heim

7- Wilhite and Glantz

8 - Tate and Gustard

9- Mondol et al

10 - Yuan et al

11- Mahfouz et al

12- Guenang and Kamga

13 - Almedej

14- Türkes and Tatli

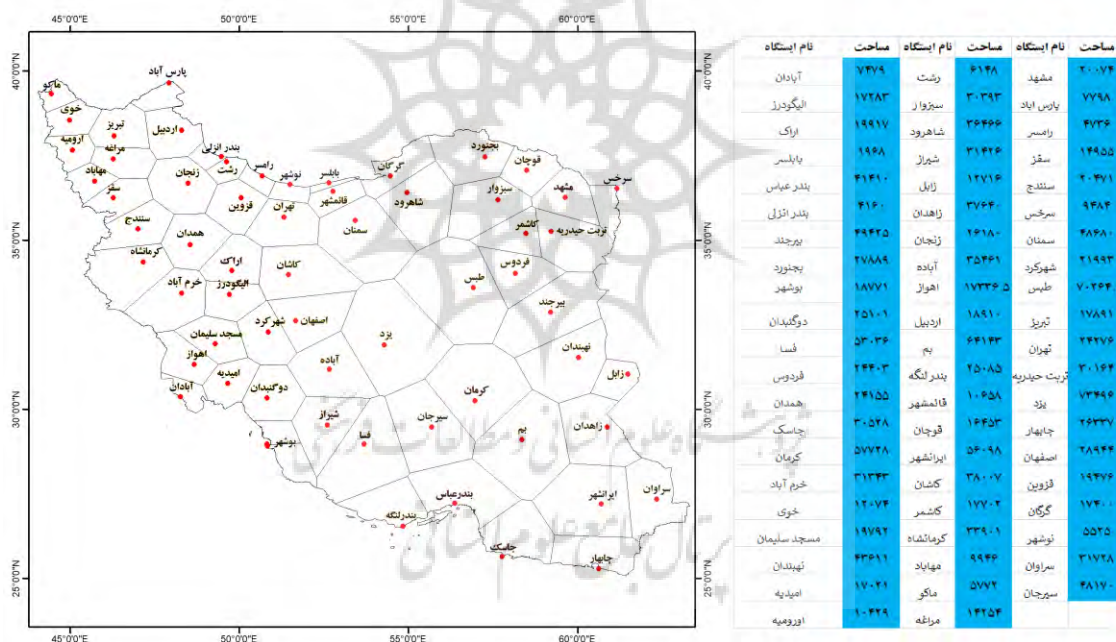
15- Michaelides and Pashiardis

16 - Livada and Assimakopoulos

اقتصادی به ویژه برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب است. لذا هدف اصلی این پژوهش، آزمون توانایی تئوری گردش‌ها در تحلیل خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای و مقایسه‌ی نتایج آن با شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در ایران است.

۲- داده و روش‌ها

خشک‌سالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات آب و هوایی به شمار می‌آید؛ بنابراین همانند سایر مخاطرات آب و هوایی دیگر، مستلزم وجود آمار درازمدت جهت تحلیل است و هر قدر آمارهای مورد استفاده سال‌های بیش‌تری را دربر بگیرد، تحلیل‌های صورت گرفته بیش‌تر با واقعیت منطبق خواهند بود. گزارش سازمان هواشناسی جهانی حداقل سال‌های آماری مورد نیاز برای این‌گونه بررسی‌ها را ۳۰ ساله عنوان می‌نماید. لذا در این پژوهش از آمار بارش ماهانه‌ی ۶۳ ایستگاه همدید که از سازمان هواشناسی کشور برای یک دوره‌ی ۳۰ ساله (۲۰۱۵-۱۹۸۶) دریافت شد، استفاده گردید. علل انتخاب این ایستگاه‌ها، طول دوره‌ی آماری کافی (حداقل ۳۰ سال) و همچنین پراکنش مناسب مکانی آن‌ها بوده است. این داده‌ها دارای آمار کامل و قابل اعتماد بودند که اندک خلأ آماری داده‌ها با استفاده از همبستگی (عساکره، ۱۳۹۰: ۱۶۰) و مدل‌های رگرسیونی (همان: ۲۱۷) بازسازی شدند. توزیع و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. با استفاده از روش چندضلعی تیسن (علیزاده، ۱۳۹۰: ۱۹۳) مساحت اختصاص داده‌شده به هر ایستگاه نیز مشخص شده است. در این مطالعه اساس محاسبات و تحلیل‌های صورت گرفته برای هر ایستگاه مبتنی بر این مساحت‌های به دست آمده است (شکل ۱).



شکل ۱: پراکنش و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه و مساحت اختصاص داده‌شده به هر ایستگاه با استفاده از روش چندضلعی تیسن

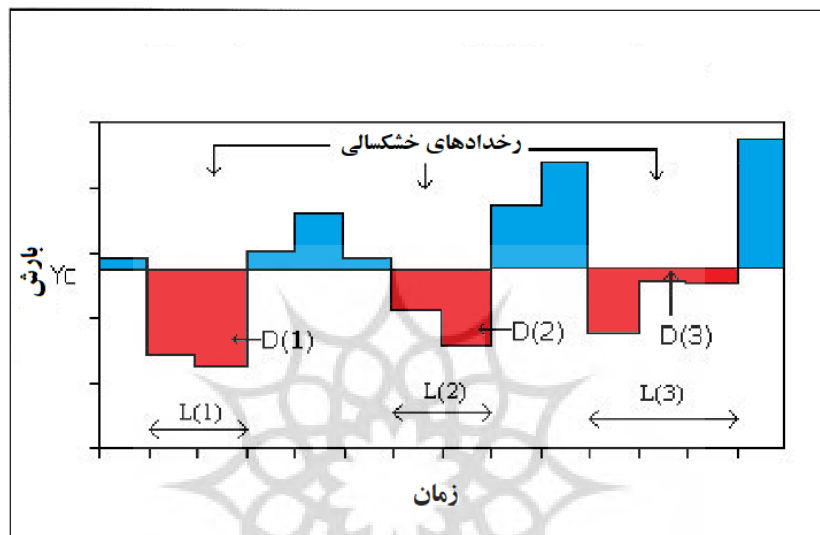
۲-۱- تعیین خشک‌سالی‌های محلی

۲-۱-۱- تئوری گردش‌ها

تئوری گردش‌ها (TOR) متکی بر انتخاب یک سطح آستانه‌ی بحرانی، y_c است (Guerrero-Salazar and Yevjevich, 1975: 1). با در نظر گرفتن یک سری زمانی گسسته، $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$ ، یک گردش منفی زمانی رخ

می‌دهد که X_i به‌طور متوالی در طول یک یا چند بازه‌ی زمانی، کم‌تر از Y_c باشد. گردش‌های منفی در سری‌های زمانی بارش، اشاره به خشک‌سالی‌ها و اختلاف بین Y_c و X_t نیز اشاره به یک کمبود دارند. یک گردش می‌تواند با ویژگی‌هایی همچون طول مدت شان (L)، کمبود تجمعی شان (D) و شدت شان (I) توصیف شوند. این ویژگی‌ها به صورت گرافیکی جهت درک بهتر آن‌ها در شکل (۲) آورده شده است؛ بنابراین هر خشک‌سالی، S می‌تواند توسط ویژگی‌هایی همچون:

- طول مدت، $L(S)$ ، تعداد بازه‌های زمانی متوالی که بارش زیر سطح آستانه باقی می‌ماند،
- کمبود تجمعی، $D(S)$ ، مجموع کمبودهای متوالی و
- شدت، $I(S)$ که با استفاده از نسبت $D(S)/L(S)$ به دست می‌آید، تعریف شوند.



شکل ۲: نمودار فرضی تعیین خشک‌سالی‌ها و ویژگی‌های آن‌ها با استفاده از تئوری گردش‌ها (Lee et al, 2017: 6)

تئوری گردش‌ها می‌توانند در مقیاس‌های زمانی مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. در این مطالعه، از مقیاس زمانی سالانه استفاده شده است. لذا برای این هدف، سری‌های زمانی بارش ماهانه در سری‌های زمانی سالانه جمع می‌شوند. تعداد خشک‌سالی‌ها و ویژگی‌های آن‌ها به مقیاس زمانی و انتخاب سطح آستانه بحرانی، Y_c ، بستگی دارد. سطح بحرانی انتخاب شده، Y_c ، معمولاً یک چندک ساده، یک میانگین ساده یا یک تابع از میانگین و انحراف از معیار است. زمانی که مقیاس زمانی کوتاه‌تر از سال باشد، سطح بحرانی به دلیل فصلی بودن داده‌ها بایستی متغیر در نظر گرفته شود. در این مطالعه، آستانه $Y_c = \hat{\mu} - \hat{\sigma}$ انتخاب شد. مناسب بودن این آستانه قبلاً توسط (Paulo et al, 2000: 161) تأیید شده است.

۲-۱-۲- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) ابزاری توسعه داده شده توسط (McKee et al, 1993: 179; 1995: 233) برای تعیین و پایش خشک‌سالی‌ها و شدت آن‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف است. برای محاسبه‌ی شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، برای هر مقیاس زمانی مورد نظر، در شکل اولیه‌ی خود، چندین مرحله بایستی پیموده شود. این مراحل عبارتند از: (۱) محاسبه‌ی مجموع بارش تجمعی برای هر سال با استفاده از مقیاس زمانی k -ماهه؛ (۲) برازش توابع توزیع گاما به هر سال تقویم آبی، (۳) برآورد مقادیر تابع توزیع برای هر مجموع بارش؛ (۴) محاسبه‌ی مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با انتقال مقادیر تابع توزیع گاما به مقادیر متغیر نرمال استاندارد. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در واقع یک نمره‌ی Z

است و انحراف یک رویداد از میانگین را نشان می‌دهد که به صورت واحدهایی از انحراف معیار بیان می‌شوند. این ویژگی امکان مقایسه‌ی بین مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مکان‌های مختلف و بین دوره‌های گوناگون را فراهم می‌سازد. هر زمان مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به صورت پیوسته منفی و شدت آن‌ها ۱ و کم‌تر باشد، یک خشک‌سالی رخ داده است. این رخداد زمانی به پایان می‌رسد که مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مثبت شوند؛ بنابراین هر رخداد خشک‌سالی یک درازای زمانی دارد که توسط زمان آغاز و پایان آن و یک شدت دارد که در هر ماه در دوره‌ی زمانی مورد مطالعه زمانی که خشک‌سالی تداوم دارد، مشخص می‌شود. شدت تجمعی یک خشک‌سالی می‌تواند به‌عنوان بزرگی خشک‌سالی در نظر گرفته شود، این بزرگی توسط مجموع شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای تمامی ماه‌هایی که در درون یک رخداد خشک‌سالی هستند، تعریف می‌شود. شدت خشک‌سالی‌ها به صورت قراردادی بر اساس مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در جدول (۱) لیست شده‌اند (McKee et al, 1993: 181).

جدول ۱: طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

وضعیت	عدد مربوط به شاخص
ترسالی حاد	$SPI \leq -2$
ترسالی شدید	$-1/99 \leq SPI \leq 1/5$
ترسالی متوسط	$1/49 \leq SPI \leq 1$
ترسالی خفیف	$0/99 \leq SPI \leq -0/50$
نرمال	$0/49 \leq SPI \leq -0/49$
خشک‌سالی ضعیف	$-0/50 \leq SPI \leq -0/99$
خشک‌سالی متوسط	$-1 \leq SPI \leq -1/49$
خشک‌سالی شدید	$-1/5 \leq SPI \leq -1/99$
خشک‌سالی بسیار شدید	$-2 \leq SPI$

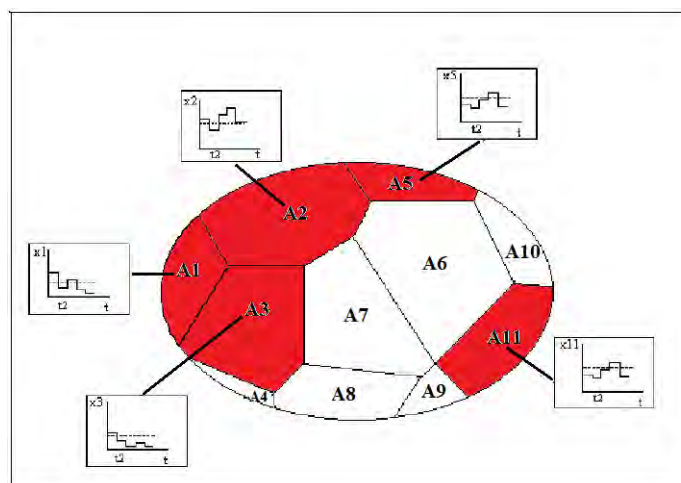
منبع: (McKee et al, 1993: 181)

۲-۲- تعیین خشک‌سالی‌های منطقه‌ای

۲-۲-۱- تئوری گردش‌ها

خشک‌سالی‌های منطقه‌ای با استفاده از دو روش توصیف‌شده برای تشخیص خشک‌سالی‌های محلی شناسایی و تعیین می‌شوند. یک خشک‌سالی منطقه‌ای زمانی تعیین می‌شود که بخش قابل‌توجهی از مساحت یک منطقه تحت شرایط خشک‌سالی باشد، یا به‌عبارت‌دیگر زمانی که مجموع مساحت یک منطقه تحت تأثیر خشک‌سالی، A_j ، به یک آستانه‌ی فضایی بحرانی انتخاب‌شده، A_c ، برسد، آنگاه خشک‌سالی منطقه‌ای تعریف می‌شود (Paulo et al, 2000: 161)؛ همان‌گونه

که در شکل (۳) توضیح داده شده است. دو آستانه‌ی فضایی در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند: ۳۰ و ۵۰ درصد از مجموع مساحت منطقه مورد مطالعه.



شکل ۳: تعیین خشک‌سالی‌های منطقه‌ای: سری‌های زمانی و آستانه‌های بحرانی برای مساحت‌های تحت تأثیر خشک‌سالی‌های محلی (Paulo and Pereira, 2006: 41)

با استفاده از تئوری گردش‌ها، یک خشک‌سالی منطقه‌ای می‌تواند با درازای زمانی، کمبود فضایی تجمعی، شدت و میانگین پوشش منطقه‌ای آن تعریف شود (Paulo et al, 2000: 161):

- درازای زمانی خشک‌سالی عبارت است از؛ طول مدت‌زمان متوالی که خشک‌سالی‌ها یک مساحت را که برابر یا بیش‌تر از آستانه‌ی فضایی از پیش تعریف شده است، تحت تأثیر قرار داده است؛
- کمبود فضایی تجمعی عبارت است از؛ مجموع کمبودهای تجمعی در هر مکان که توسط مساحت‌های متناظر تحت تأثیر به آن وزن داده شده است؛
- شدت خشک‌سالی منطقه‌ای نسبت بین کمبود فضایی تجمعی و درازای زمانی آن است؛
- میانگین پوشش منطقه‌ای، میانگین بخش از مساحت در آن منطقه است که توسط خشک‌سالی تحت تأثیر قرار گرفته است.

۲-۲-۲- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) جهت تعیین الگوهای منطقه‌ای بارش و شرایط خشکی، پوشش منطقه‌ای خشک‌سالی‌ها و شدت آن‌ها توسعه داده می‌شود. برای این منظور سالی به‌عنوان یک سال خشک طبقه‌بندی می‌شود که درصد مساحت منطقه تحت تأثیر خشک‌سالی بیش‌تر از آستانه‌ی فضایی انتخاب شده باشد، یک خشک‌سالی منطقه‌ای فرض می‌شود. زمانی که مجموع مساحت تحت تأثیر تمامی ایستگاه‌های مبتلا با "خشک‌سالی ضعیف" به‌طور پیوسته بالای آستانه‌ی فضایی باقی بماند و در آن دوره، مساحتی که $SPI \leq -1$ بیش از مساحت آستانه در یک یا بیش‌تر از یک ماه باشد، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با مقیاس زمانی از پیش انتخاب‌شده محاسبه می‌شود. در زیر مشخصات خشک‌سالی‌ها با شاخص بارش استاندارد شده (SPI) محاسبه می‌شود (Moye et al, 1988: 130):

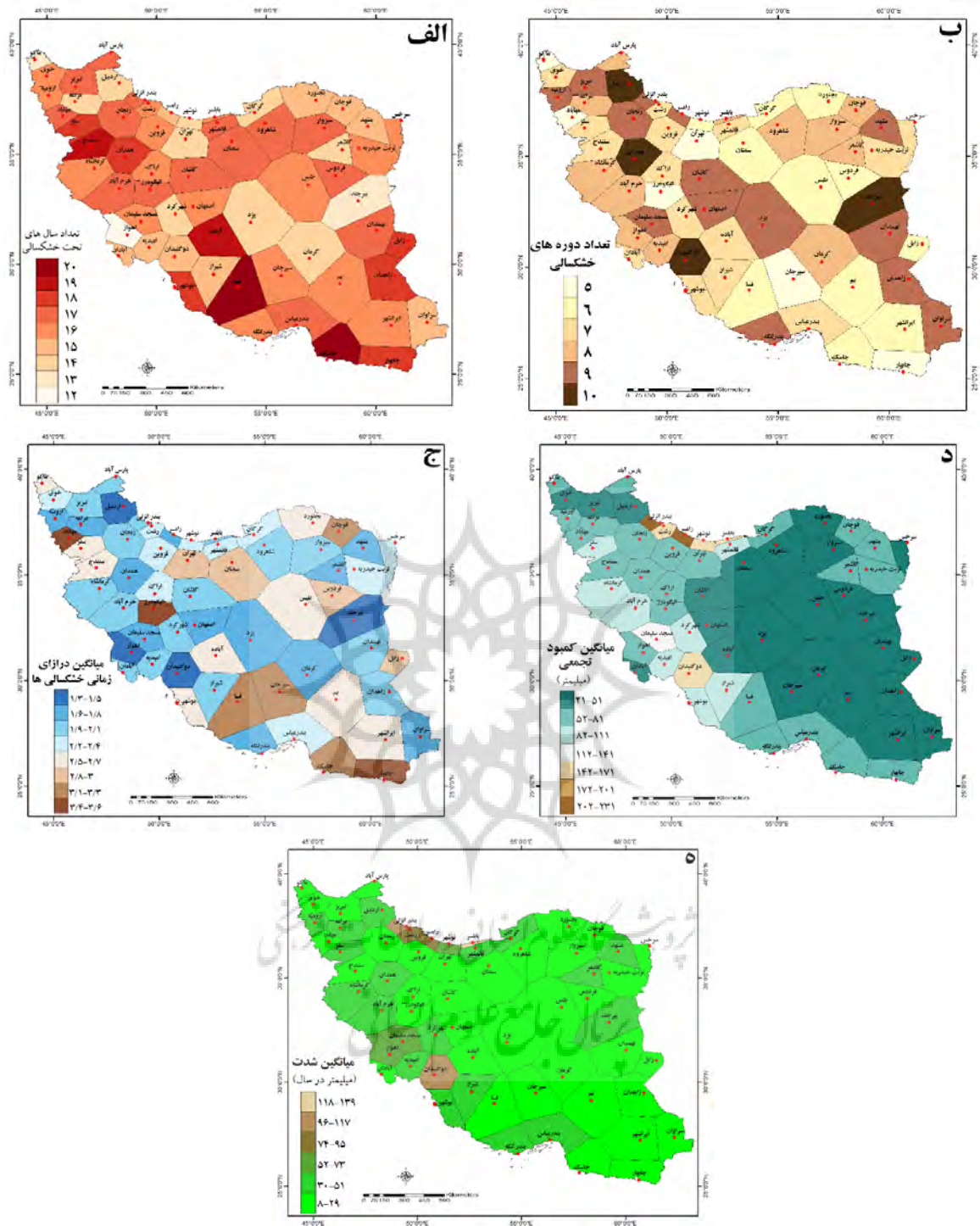
- شدت خشک‌سالی‌های منطقه‌ای برای هر ماه از طریق ترکیب آستانه‌ی فضایی و طبقه‌بندی‌های محلی SPI برای مقیاس زمانی موردنظر به دست می‌آید. برای مثال اگر مجموع مساحت دارای طبقه‌بندی SPI

- "خشک‌سالی شدید" برابر یا بیش‌تر از آستانه‌ی فضای موردنظر باشد، آنگاه آن منطقه تحت خشک‌سالی شدید در طول آن دوره طبقه‌بندی می‌شود.
- درازای زمانی خشک‌سالی‌ها عبارت است از؛ تعداد ماه‌های متوالی که یک خشک‌سالی منطقه‌ای حداقل با عنوان "خشک‌سالی متوسط" طبقه‌بندی می‌شود و آن دوره شامل یک یا چند ماه است که خشک‌سالی با عناوین متوسط، شدید و بسیار شدید طبقه‌بندی می‌شوند.
 - پوشش منطقه‌ای خشک‌سالی‌ها تحت هر طبقه از شدت خشک‌سالی‌ها عبارت از؛ درصدی از مساحت آن منطقه که تحت تأثیر آن طبقه از خشک‌سالی است. برای مثال، پوشش منطقه‌ای یک خشک‌سالی متوسط عبارت از؛ بخشی از مساحت آن منطقه است که دارای خشک‌سالی متوسط بوده‌اند که از طریق محاسبه مجموع مساحت ایستگاه‌هایی که SPI آن‌ها بین $-1.5 < SPI \leq -1$ بوده است، به دست می‌آید.
 - شاخص بارش استاندارد شده (SPI) منطقه‌ای برای هر ماه و برای هر مقیاس زمانی عبارت از؛ میانگین وزنی مقادیر SPI محلی با استفاده از مساحت تحت نفوذ هر ایستگاه هواشناسی به‌عنوان وزن مربوطه است.

۳- نتایج و بحث

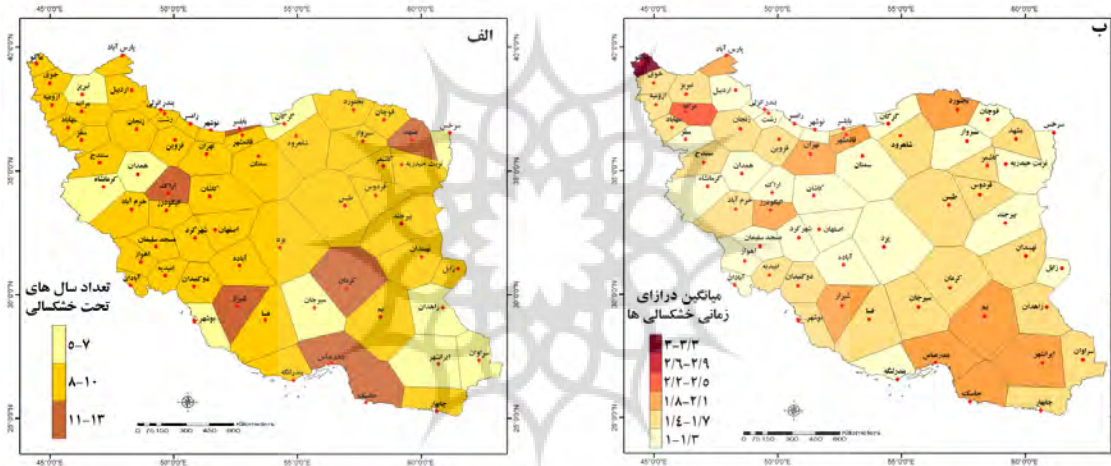
۳-۱- خشک‌سالی‌های محلی

توزیع فضایی ویژگی‌های استخراج‌شده توسط تئوری گردش‌ها شامل تعداد سال‌های تحت خشک‌سالی، تعداد دوره‌های خشک‌سالی، میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌ها، میانگین کمبود تجمعی بر حسب میلی‌متر و میانگین شدت بر حسب میلی‌متر در سال در شکل (۴) آورده شده است. آنچه در شکل (۴) بسیار مشهود است که تعداد سال‌های تحت خشک‌سالی بیش‌تر و تعداد دوره‌های خشک کم‌تر در نیمه‌ی جنوبی ایران در مقایسه با نیمه‌ی شمالی آن است. این مسئله گویای این مطلب است که نیمه‌ی جنوبی ایران، خشک‌سالی‌های طولانی مدت‌تری را به خود دیده است (شکل ۴ الف و ب). این موضوع توسط شکل (۴ ب) نیز که متعلق به میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌هاست تا حدودی مورد تأیید قرار می‌گیرد. میانگین کمبود تجمعی (بر حسب میلی‌متر) و میانگین شدت (بر حسب میلی‌متر در سال) دو ویژگی دیگری هستند که توسط تئوری گردش‌ها برای درک بیش‌تر ماهیت خشک‌سالی‌های ایران محاسبه و در قالب دو نقشه در شکل (۴ د و ه) آورده شده‌اند. در این دو نقشه تقریباً می‌توان به الگوهای فضایی یکسانی برای این دو ویژگی دست پیدا کرد. همان‌گونه که در شکل (۴ د) قابل مشاهده است، بیش‌تر مساحت ایران به استثنای نوار ساحلی جنوب دریای خزر، میانگین کمبود تجمعی برابر با ۲۱ تا ۱۱۱ میلی‌متر را تجربه نموده‌اند. در نوار ساحلی جنوب دریای خزر بیش‌ترین مقادیر میانگین کمبود تجمعی مشاهده می‌شود؛ به طوری که دو ایستگاه بندر انزلی و رامسر در این خصوص رکورددار بوده‌اند، اما نبایستی فراموش شود که این دو ایستگاه دارای بالاترین مقدار بارش سالانه در ایران نیز می‌باشند. پس بالا بودن دو مقدار میانگین کمبود تجمعی و میانگین شدت در این دو ایستگاه، در مقایسه با میانگین مجموع بارش سالانه‌ی آن‌ها، دال بر شدید بودن خشک‌سالی‌های این ایستگاه‌ها نیست؛ درحالی که ایستگاه‌های داخلی ایران مرکزی مانند یزد، بم و زابل در مقایسه با ایستگاه‌های شمالی ایران که دارای میانگین کمبود تجمعی و میانگین شدت بسیار کم‌تری هستند، گویای خشک‌سالی‌های شدیدتری می‌باشند. پس در زمان استفاده از دو ویژگی میانگین کمبود تجمعی و میانگین شدت حتماً بایستی میانگین بارش سالانه‌ی آن ایستگاه‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد، در غیر این صورت می‌توان تحلیل‌های غلطی را در اختیار قرار دهد.



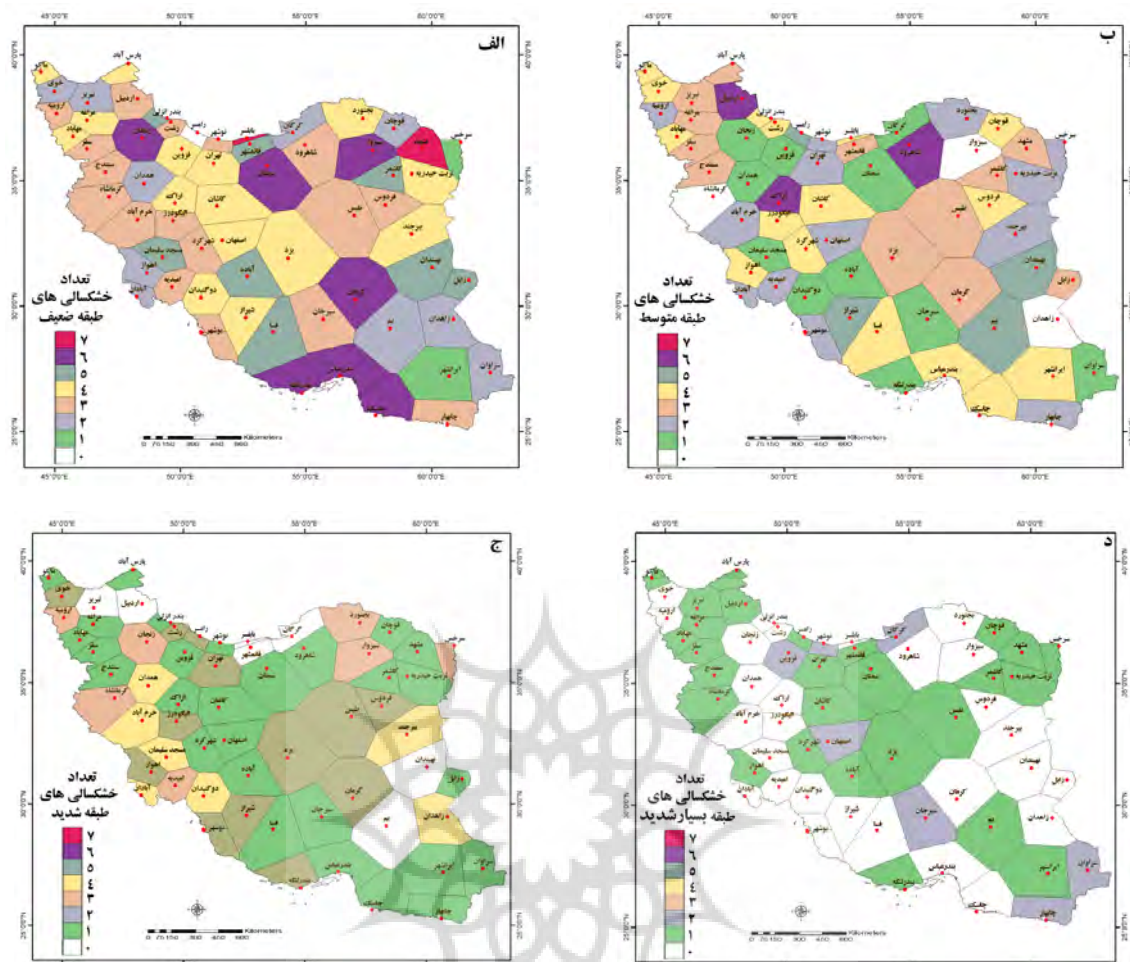
شکل ۴: توزیع فضایی ویژگی‌های خشک‌سالی‌های محلی ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها برای مقیاس زمانی سالانه (۲۰۱۵-۱۹۸۶). الف) تعداد سال‌های تحت خشک‌سالی، ب) تعداد دوره‌های خشک‌سالی، ج) میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌ها، د) میانگین کمبود تجمعی بر حسب میلی‌متر، ه) میانگین شدت بر حسب میلی‌متر در سال

تعداد سال‌های تحت خشک‌سالی و میانگین درازای زمانی آن‌ها که با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه استخراج شده بودند به نقشه تبدیل و در شکل (۵) آورده شده‌اند. بر اساس این دو نقشه مشاهده می‌شود که بیش‌تر مساحت ایران در طول ۳۰ سال مورد مطالعه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) ۸ تا ۱۰ سال را تحت تأثیر یکی از طبقات مختلف خشک‌سالی بوده‌اند. جنوب شرق ایران شرایط ویژه‌تری را نسبت به دیگر قسمت‌ها در طول این دوره ۳۰ ساله تجربه نموده است. در این قسمت از ایران، برخی از ایستگاه‌ها کم‌ترین (ایران‌شهر، سراوان و زاهدان) و برخی از ایستگاه‌ها بالاترین (کرمان، بندرعباس و جاسک) سال‌های تحت خشک‌سالی را داشته‌اند (شکل ۵ الف). لذا به خوبی آشکار می‌شود که جنوب شرق ایران همواره یکی از پیچیده‌ترین پهنه‌های اقلیمی ایران است که می‌تواند مدیریت خشک‌سالی را همواره با مشکلات جدی روبه‌رو سازد؛ اما در مورد میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌ها بایستی اشاره شود که به‌طور میانگین بیش‌تر مساحت ایران دارای میانگین درازای زمانی کم‌تر از دو سال بوده‌اند (۵ ب)؛ اما بخش‌های از ایران را همچون جنوب شرق می‌توان به‌طور مشخص نام برد که این میانگین درازای زمانی آن‌ها طولانی‌تر است. در این قسمت از ایران میانگین درازای زمانی بیش از دو سال است (شکل ۵ ب). لذا به نظر می‌رسد این قسمت از ایران نیاز به یک نگاه ویژه از لحاظ رفتارشناسی وقوع خشک‌سالی هم از لحاظ بعد زمانی و هم از لحاظ بعد فضایی دارد.



شکل ۵: نقشه‌ی توزیع فضایی الف) تعداد سال‌های تحت خشک‌سالی و ب) میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌های ایران به دست آمده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶-۲۰۱۵

توزیع فضایی طبقات مختلف خشک‌سالی‌های منتج از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) می‌تواند دانش بسیار خوبی در خصوص شدت خشک‌سالی‌ها و نحوه توزیع آن‌ها در ایران در اختیار قرار دهد (شکل ۶). همان‌گونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است، در طول این ۳۰ سال (۱۹۸۶-۲۰۱۵)، ایران به نسبت‌های مختلف، طبقات گوناگون خشک‌سالی‌ها را از طبقات ضعیف تا طبقات بسیار شدید را تجربه نموده است. با توجه به نقشه‌های ۶ الف) و ب) که نشان‌دهنده‌ی توزیع فضایی طبقات خشک‌سالی‌های ضعیف و متوسط در ایران هستند، کاشف به عمل می‌آید که بیش‌تر خشک‌سالی‌های رخ داده در طول این ۳۰ سال مربوط به این دو طبقه از خشک‌سالی‌ها بوده است؛ اما صرف‌نظر از دو طبقه‌ی خشک‌سالی ضعیف و متوسط مشاهده می‌شود که فراوانی وقوع خشک‌سالی‌های مربوط به دو طبقه‌ی شدید و بسیار شدید به نسبت افزایش شدت آن‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ به‌طوری‌که حداکثر وقوع طبقه خشک‌سالی‌های شدید به ۴ مورد و برای طبقه خشک‌سالی‌های بسیار شدید به ۲ مورد کاهش پیدا می‌کند (شکل ۶ ج و د).



شکل ۶: نقشه‌های توزیع فضایی طبقات مختلف خشک‌سالی‌های ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای بازه‌ی زمانی ۲۰۱۵-۱۹۸۶. الف) تعداد خشک‌سالی‌های طبقه ضعیف، ب) تعداد خشک‌سالی‌های طبقه متوسط، ج) تعداد خشک‌سالی‌های طبقه شدید، د) تعداد خشک‌سالی‌های طبقه خیلی شدید اتفاق افتاده در طول ۳۰ سال مورد مطالعه

۳-۲- خشک‌سالی‌های منطقه‌ای

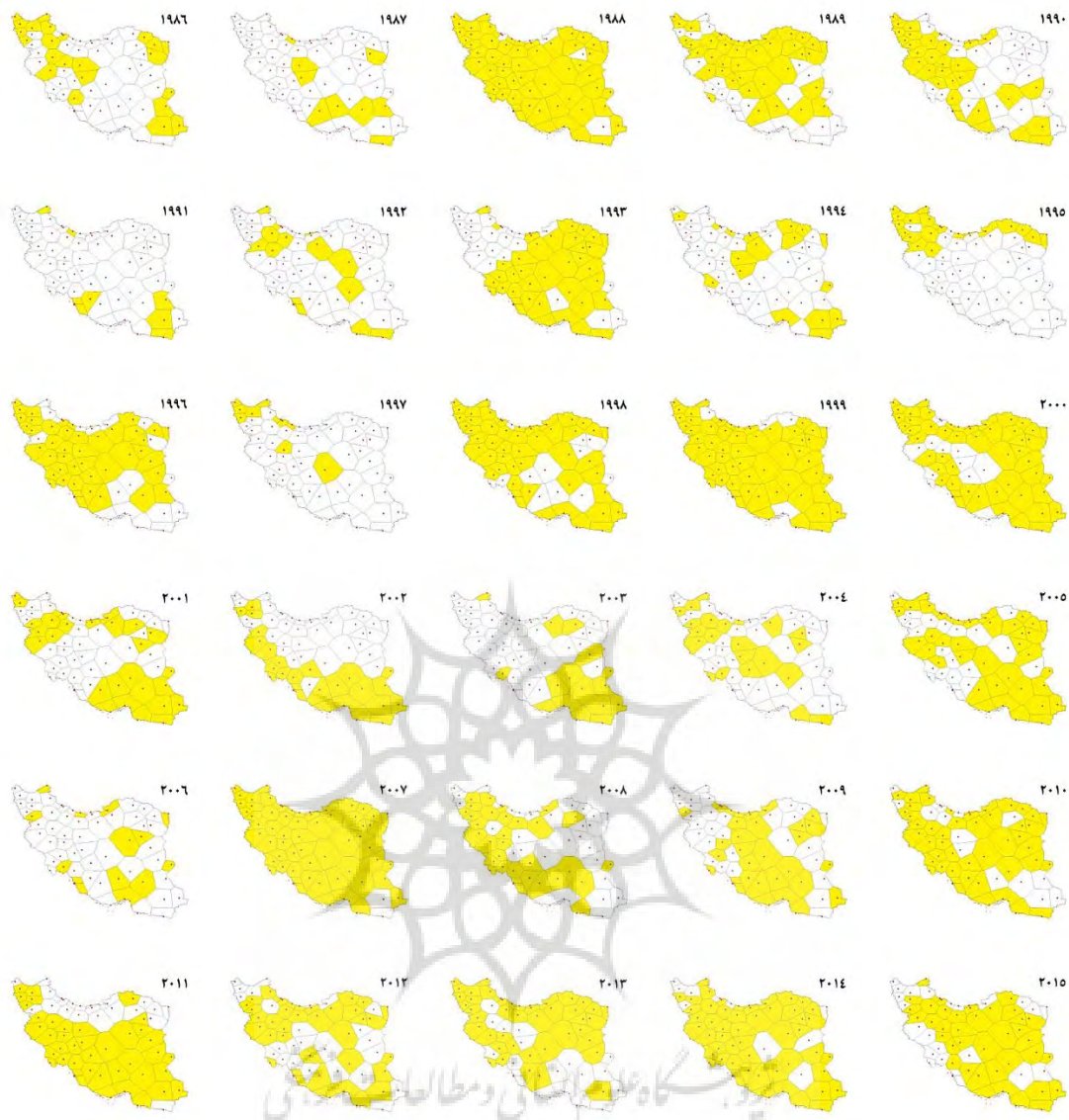
همچون خشک‌سالی‌های محلی، در یک مقیاس زمانی سالانه، خشک‌سالی‌های منطقه‌ای نیز مورد توجه قرار گرفتند. بر اساس تئوری گردش‌ها، دو آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ و ۵۰ درصد از مساحت کل کشور برای خشک‌سالی‌های منطقه‌ای برگزیده شدند. همین دو آستانه‌ی فضایی بحرانی که برای تئوری گردش‌ها انتخاب شده‌اند، برای شاخص بارش استاندارد شده (SPI) نیز مورد استفاده قرار گرفتند. برای اینکه در ابتدا چشم‌انداز فضایی مناسبی از توزیع فضایی خشک‌سالی‌ها در ۳۰ سال مورد مطالعه به دست آید، به تفکیک برای تمامی کل دوره‌ی مورد مطالعه، نقشه‌های توزیع فضایی خشک‌سالی‌های ایران ابتدا بر اساس تئوری گردش‌ها (۷) و سپس بر اساس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (۱۰) تهیه شدند. لازم به ذکر است که اساس تهیه‌ی تمامی این نقشه‌ها در شکل‌های (۷) و (۱۰) بر اساس روش تیسن بوده است. در شکل (۷) همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع فضایی خشک‌سالی‌های ایران در یک مقیاس سالانه دارای تغییرات زیادی از سالی به سال دیگر هستند و نمی‌توان یک الگوی یکسان فضایی برای آن‌ها مشخص نمود. گسترده‌ترین و فراگیرترین

خشک‌سالی‌های ایران بر اساس تئوری گردش‌ها به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۷، ۱۹۹۹ و ۱۹۸۸ به وقوع پیوسته‌اند. در این سال‌ها بیش از ۹۰ درصد مساحت ایران تحت شرایط خشک‌سالی بوده‌اند.

جهت مشخص نمودن دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های رخ داده در ایران در یک مقیاس سالانه و بر اساس تئوری گردش‌ها، سری زمانی درصدی از مساحت ایران که در هر سال تحت تأثیر خشک‌سالی‌ها قرار گرفته‌اند، محاسبه و نتایج آن در قالب نمودارهایی در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده‌اند. در شکل (۸) بر اساس آستانه‌ی فضایی ۳۰ درصد ۷ مورد دوره‌ی متوالی خشک‌سالی که ۳۰ درصد و بیش‌تر از مساحت ایران را تحت تأثیر قرار داده بودند، مشخص و با شماره‌های ۱ تا ۷ نام‌گذاری شده‌اند. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، این دوره‌های متوالی دارای درازای زمانی از ۱ تا ۹ سال بوده‌اند، اما زمانی که آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود، تعداد این دوره‌های متوالی خشک‌سالی نه‌تنها به ۶ مورد کاهش پیدا می‌کنند، بلکه تعداد سال‌های تشکیل‌دهنده‌ی این دوره‌ها نیز تقلیل می‌یابند (شکل ۹).

جدول‌های (۲) و (۳) ویژگی‌های اصلی دوره‌های خشک‌سالی‌های شناسایی‌شده با تئوری گردش‌ها را برای مقیاس زمانی سالانه که به ترتیب حداقل ۳۰ و ۵۰ درصد از مساحت منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند، نشان می‌دهند. نتایج ارائه‌شده در این جداول شامل زمان آغاز و پایان خشک‌سالی‌ها، درازای زمانی، پوشش فضایی (% مساحت) و شدت آن‌هاست.

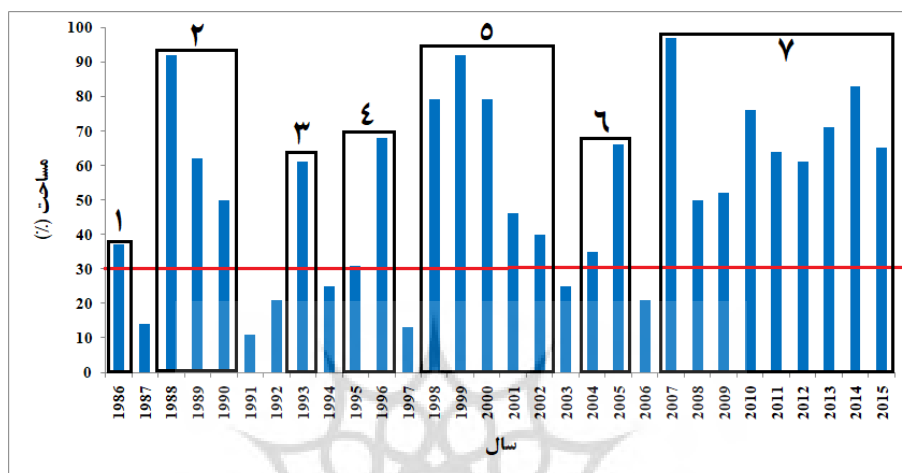




شکل ۷: توزیع فضایی خشک‌سالی‌های سالانه ایران بر اساس تئوری گردش‌ها برای بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶-۲۰۱۵ با استفاده از روش تیسین

دو نکته‌ی اساسی در نتایج آورده شده در جدول (۲) قابل‌تأمل است. نکته‌ی اول در مورد دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های شماره‌ی ۱ (با درازای زمانی ۱ سال)، شماره‌ی ۴ (با درازای زمانی ۲ سال) و شماره‌ی ۶ (با درازای زمانی ۲ سال) است که دارای شدت خشک‌سالی‌های مثبت بوده‌اند. این ویژگی که از منها کردن میانگین وزنی بارش هر دوره‌ی خشک‌سالی از میانگین بلندمدت وزنی ۳۰ سال کشور (۲۲۰ میلی‌متر) به دست می‌آید، نشان‌دهنده‌ی شدت خشک‌سالی آن دوره‌ی مورد‌نظر است. لذا با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد و با استفاده از تئوری گردش‌ها مشخص می‌شود که لزوماً وقوع هر خشک‌سالی منطقه‌ای دلیلی بر کاهش بارش به زیر میانگین بلندمدت کشور نیست. مطمئناً گستردگی مساحت، تنوع بارشی زیاد، آستانه‌ی استفاده‌شده توسط تئوری گردش‌ها جهت تفکیک خشک‌سالی‌ها از ترسالی‌ها و روش

انتخاب‌شده جهت محاسبه میانگین وزنی در این امر نقش بسیار زیادی داشته‌اند، اما نکته‌ی دومی که نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد این است که در نیمه‌ی اول دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی مورد مطالعه (۲۰۰۰-۱۹۸۶) ۵ دوره‌ی خشک‌سالی و در نیمه‌ی دوم آن (۲۰۱۵-۲۰۰۱) تنها ۲ دوره‌ی خشک‌سالی رخ داده است. در نیمه‌ی اول، دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌ها، کوتاه‌مدت‌تر و در نیمه‌ی دوم بلندمدت‌تر بوده‌اند. میانگین پوشش فضایی نیمه‌ی دوم گسترگی بیش‌تری نسبت به دوره‌ی اول نشان می‌دهد. در نهایت مقایسه‌ی شدت دو دوره‌ی نیز حاکی از افزایش شدت نیمه‌ی دوم نسبت به نیمه‌ی اول است.

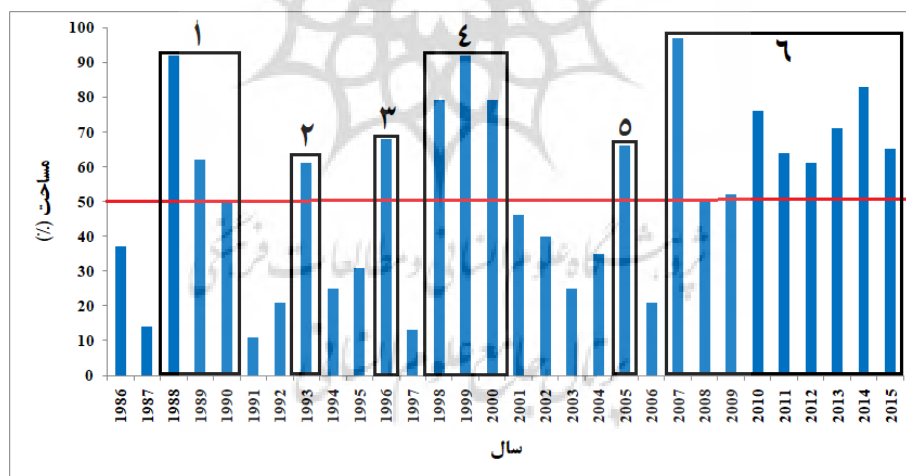


شکل ۸: شناسایی و استخراج دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد

جدول ۲: ویژگی‌های دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد

شماره‌ی خشک‌سالی	زمان آغاز	زمان پایان	درازای زمانی (سال)	میانگین پوشش فضایی (%)	شدت (میلی‌متر در سال)
۱	۱۹۸۶	۱۹۸۶	۱	۳۷	۲۷/۷
۲	۱۹۸۸	۱۹۹۰	۳	۶۸	-۱۷/۶
۳	۱۹۹۳	۱۹۹۳	۱	۶۱	-۲۱/۸
۴	۱۹۹۵	۱۹۹۶	۲	۴۹/۵	۳۱/۹
۵	۱۹۹۸	۲۰۰۲	۵	۶۷/۲	-۳۸/۵
۶	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲	۵۰/۲	۸/۱
۷	۲۰۰۷	۲۰۱۵	۹	۶۸/۸	-۳۲/۲

همان‌گونه که قبلاً نیز بدان اشاره شد، بر اساس آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد، تعداد دوره‌های خشک‌سالی از ۷ مورد به ۶ مورد کاهش پیدا می‌کنند (شکل ۹). علاوه بر کاهش در تعداد دوره‌های خشک‌سالی، درازای زمانی آن‌ها نیز تقلیل یافته است؛ به‌طوری‌که میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌ها بر اساس آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد ۳/۳ سال و بر اساس آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد ۳ سال بوده است. طولانی‌ترین دوره‌ی خشک‌سالی بر اساس این آستانه تقریباً ۹ سال، از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵، طول کشیده و به‌طور میانگین ۶۸/۸ درصد از مساحت ایران را نیز تحت سیطره‌ی خود داشته است؛ اما از لحاظ شدت بایستی گفته شود بر اساس آستانه‌ی بحرانی ۵۰ درصد، شدت خشک‌سالی‌ها برای تمامی شش دوره‌ی شناسایی‌شده منفی بوده است و شدیدترین آن نیز مربوط به دوره‌ی خشک‌سالی متوالی سه ساله از ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ بوده که به‌طور میانگین ۵۳/۴ میلی‌متر در هر سال نسبت به میانگین بلندمدت بارش ایران (۲۲۰ میلی‌متر) کمبود بارش نشان داده است. لذا در مقایسه‌ی بین این دو آستانه کاملاً کاشف به عمل می‌آید که آستانه‌ی فضایی ۵۰ درصد برای تئوری گردش‌ها آستانه‌ی مناسبی برای پایش خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران است. همچنین همان‌گونه که برای آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد نیز مطرح گردید، برای آستانه‌ی ۵۰ درصد نیز مشاهده شد که در نیمه‌ی اول دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی مورد مطالعه، درازای زمانی خشک‌سالی‌ها کوتاه مدت‌تر و در دوره‌ی دوم، این درازای زمانی خشک‌سالی‌ها طولانی مدت‌تر شده است؛ اما در مورد شدت خشک‌سالی‌ها به نظر می‌رسد شدت خشک‌سالی‌ها در دوره‌ی دوم (۲۰۱۵-۲۰۰۱) نسبت به دوره‌ی اول (۲۰۰۰-۱۹۸۶) کاهش داشته باشند. نتایج این قسمت با نتایج تحقیقات دانشمند و محمودی (۲۰۱۷: ۳۴۱۳) و محمودی و همکاران (۲۰۱۹: ۱) تقریباً منطبق هستند. محمودی و همکاران (۲۰۰۷: ۳۴۱۳) در یک مطالعه‌ی جامع نشان دادند که خشک‌سالی‌های ایران که قبلاً کوتاه‌مدت‌تر و شدیدتر بودند، اکنون بلندمدت‌تر و ملایم‌تر شده‌اند. همچنین محمودی و همکاران (۲۰۱۹: ۱) در یک مطالعه دیگر کاهش شدت خشک‌سالی‌های ایران را به اثبات رسانده بودند.

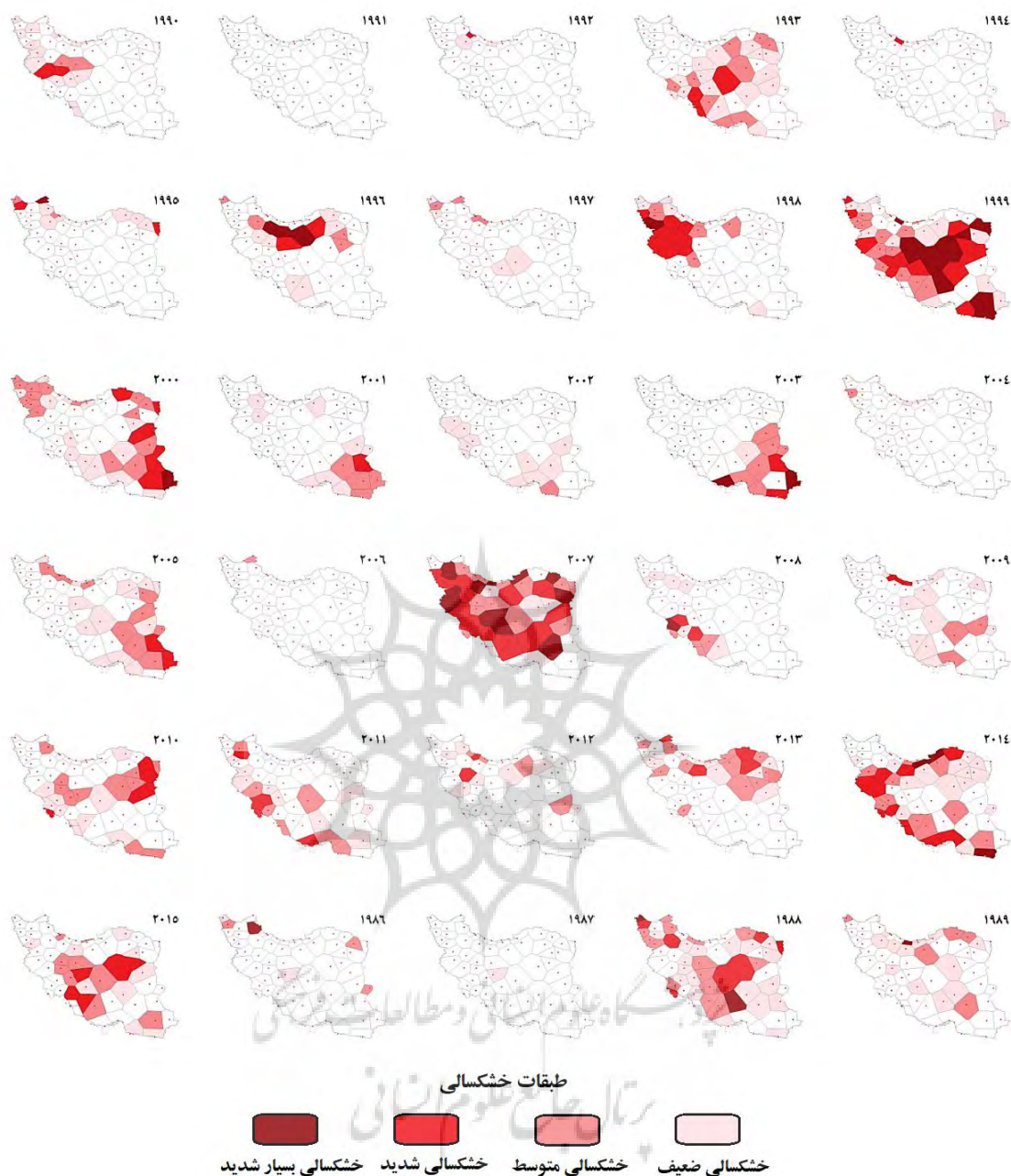


شکل ۹: شناسایی و استخراج دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد

جدول ۳: ویژگی‌های دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد

شماره‌ی خشک‌سالی	زمان آغاز	زمان پایان	درازای زمانی (سال)	میانگین پوشش فضایی (%)	شدت (میلی‌متر در سال)
۱	۱۹۸۸	۱۹۹۰	۳	۶۸	-۱۷/۶
۲	۱۹۹۳	۱۹۹۳	۱	۶۱	-۲۱/۸
۳	۱۹۹۶	۱۹۹۶	۱	۶۸	-۲۱/۱
۴	۱۹۹۸	۲۰۰۰	۳	۸۳/۳	-۵۳/۴
۵	۲۰۰۵	۲۰۰۵	۱	۶۶	-۲۴/۶
۶	۲۰۰۷	۲۰۱۵	۹	۶۸/۸	-۳۲/۲

توزیع فضایی طبقات مختلف خشک‌سالی‌های ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای کل دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی مورد مطالعه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) رسم و در شکل (۱۰) آورده شده‌اند. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که خشک‌سالی‌های ایران می‌توانند تقریباً دارای الگوهای فضایی منطقه‌ای مشخصی باشند. فراگیرترین خشک‌سالی‌های ایران با استفاده از این شاخص به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۱۹۹۹ است. در سال ۲۰۰۷ تقریباً ۸۲/۲ درصد و در سال ۱۹۹۹ نیز ۷۵/۸ درصد از مساحت ایران یکی از طبقات مختلف خشک‌سالی‌ها را تجربه نموده‌اند. تئوری گردش‌ها نیز قبلاً این دو سال را به‌عنوان فراگیرترین خشک‌سالی‌های ایران مشخص کرده بود، اما در مقابل فراگیرترین خشک‌سالی‌های ایران پنج سال تر فراگیر را نیز تجربه نموده است که به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۹۹۱ (۱۰۰ درصد)، ۱۹۸۷ (۹۸/۴ درصد)، ۲۰۰۶ (۸۴/۴ درصد)، ۱۹۹۴ (۹۶/۸ درصد) و ۲۰۰۴ (۹۶/۸) بوده است.

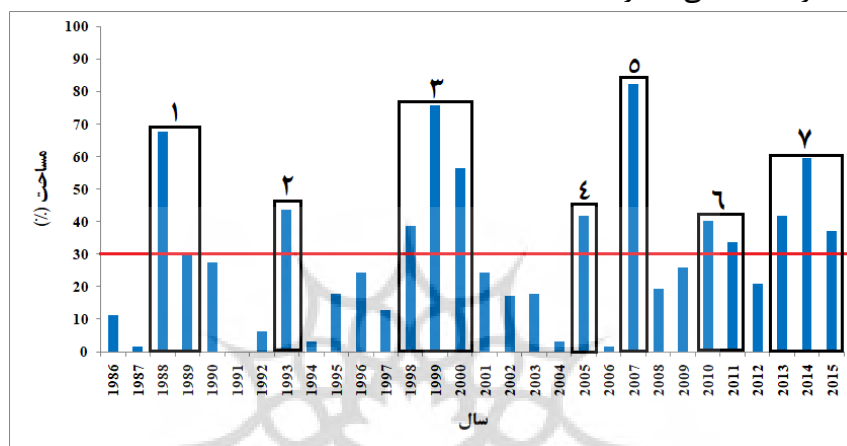


شکل ۱۰: توزیع فضایی خشک‌سالی‌های سالانه‌ی ایران بر اساس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای بازه‌ی زمانی ۲۰۱۵-

۱۹۸۶ با استفاده از روش تیسن

تفکیک خشک‌سالی‌های منطقه‌ای با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب با استفاده از نمودارهای اشکال (۱۱) و (۱۲) انجام پذیرفت. بر اساس شکل (۱۱)، ۷ دوره‌ی خشک‌سالی برای آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد و بر اساس شکل (۱۲) نیز ۴ دوره‌ی خشک‌سالی با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد شناسایی و استخراج شدند. ویژگی‌های خشک‌سالی‌های منطقه‌ای تعیین‌شده با شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای مقیاس زمانی سالانه با استفاده از آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) آورده شده‌اند.

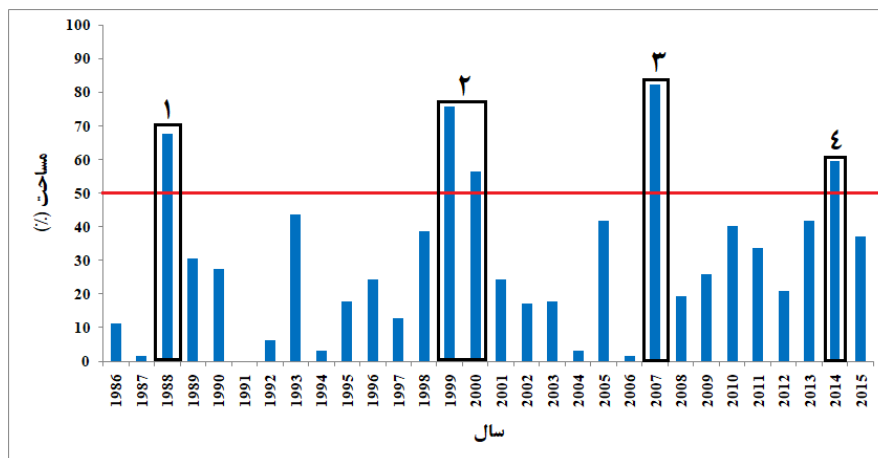
همان‌گونه که در جدول (۴) قابل مشاهده است، بر اساس آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد درازای زمانی خشک‌سالی‌های ایران بین ۱ تا ۳ سال متغیر بوده است؛ اما با انتخاب آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد، بازه‌ی تغییرات درازای زمانی خشک‌سالی‌ها به ۱ تا ۲ سال کاهش پیدا می‌کنند (جدول ۵). شدیدترین و فراگیرترین خشک‌سالی‌های رخ داده در طول ۳۰ سال مورد مطالعه با توجه به دو آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب مربوط به دو سال ۲۰۰۷ و ۱۹۹۹ بوده است. در سال ۲۰۰۷ نزدیک به ۸۲/۲ درصد از مساحت ایران به‌طور کامل تحت سیطره‌ی خشک‌سالی قرار داشته است که از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه ۱۸ ایستگاه دارای خشک‌سالی شدید و ۱۳ ایستگاه نیز خشک‌سالی بسیار شدید داشته‌اند، اما در سال ۱۹۹۹، ۷۵/۸ درصد از مساحت ایران خشک‌سالی داشته‌اند که از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه ۱۲ ایستگاه خشک‌سالی شدید و ۱۱ ایستگاه نیز خشک‌سالی بسیار شدید داشته‌اند.



شکل ۱۱: شناسایی و استخراج دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد

جدول ۴: ویژگی‌های دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد

شماره‌ی خشک‌سالی	زمان آغاز	زمان پایان	درازای زمانی (سال)	میانگین پوشش فضایی (%)	تعداد ایستگاه‌های دارای خشک‌سالی با طبقه (از مجموع ۶۲ ایستگاه)		
					ضعیف	متوسط	شدید
۱	۱۹۸۸	۱۹۸۹	۲	۴۹/۱	۱۶	۱۰	۴
۲	۱۹۹۳	۱۹۹۳	۱	۴۳/۵	۱۵	۹	۳
۳	۱۹۹۸	۲۰۰۰	۳	۵۷	۱۱	۱۱	۹
۴	۲۰۰۵	۲۰۰۵	۱	۴۱/۹	۱۳	۱۱	۲
۵	۲۰۰۷	۲۰۰۷	۱	۸۲/۲	۶	۱۴	۱۸
۶	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲	۳۷/۱	۱۰	۹	۵
۷	۲۰۱۳	۲۰۱۵	۳	۴۶/۲	۱۱	۱۱	۷



شکل ۱۲: شناسایی و استخراج دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد

جدول ۵: ویژگی‌های دوره‌های متوالی خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد

تعداد ایستگاه‌های دارای خشک‌سالی با طبقه (از مجموع ۶۲ ایستگاه)				میانگین پوشش فضایی (%)	درازای زمانی (سال)	زمان پایان	زمان آغاز	شماره‌ی خشک‌سالی
بسیار شدید	شدید	متوسط	ضعیف					
۲	۷	۱۵	۱۸	۶۷/۷	۱	۱۹۸۸	۱۹۸۸	۱
۶	۹	۱۴	۱۳	۶۶/۱	۲	۲۰۰۰	۱۹۹۹	۲
۱۳	۱۸	۱۴	۶	۸۲/۲	۱	۲۰۰۷	۲۰۰۷	۳
۳	۱۰	۱۰	۱۴	۵۹/۶	۱	۲۰۱۴	۲۰۱۴	۴

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی تعریف‌شده برای این پژوهش، بررسی و تحلیل ویژگی‌های مختلف خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای ایران بر اساس تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بود. لذا جهت رسیدن به این هدف، ابتدا بر اساس تئوری گردش‌ها، ویژگی‌های خشک‌سالی‌های محلی (ایستگاهی) ایران همچون درازای زمانی، کمبود تجمعی و شدت آن‌ها استخراج شدند. برای شاخص بارش استاندارد شده (SPI) نیز ویژگی‌هایی مانند تعداد سال‌های تحت خشک‌سالی، میانگین درازای زمانی خشک‌سالی‌ها و فراوانی تعداد طبقات مختلف شدت خشک‌سالی‌ها مستخرج شدند. تعیین و توصیف خشک‌سالی‌های محلی و منطقه‌ای در ایران با استفاده از دو روش مورد مطالعه نتایجی هماهنگ اما متفاوت از یکدیگر را در اختیار قرار دادند. در مقیاس محلی پایش خشک‌سالی‌ها با استفاده از تئوری گردش‌ها مشاهده شد که این روش برای مناطقی با وسعت زیاد و دارای اقلیم‌های مختلف در مقایسه با شاخص بارش استاندارد شده (SPI) نمی‌تواند بسیار مناسب باشد. در مقیاس منطقه‌ای نیز نشان داده شد که استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی ۳۰ درصد از مساحت تحت

خشک‌سالی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه ترکیبی مناسبی برای پایش خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران نیستند، لذا در مقایسه‌ی بین دو آستانه‌ی فضایی ۳۰ و ۵۰ درصد کاملاً مشخص شد که آستانه‌ی فضایی ۵۰ درصد برای تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) آستانه‌ی مناسبی برای پایش خشک‌سالی‌های منطقه‌ای ایران است. همچنین نتایج نشان دادند که در نیمه‌ی اول دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی مورد مطالعه، درازای زمانی خشک‌سالی‌ها کوتاه مدت‌تر و در دوره‌ی دوم، این درازای زمانی خشک‌سالی‌ها طولانی مدت‌تر شده است؛ اما در مورد شدت خشک‌سالی‌ها به نظر می‌رسد شدت خشک‌سالی‌ها در دوره‌ی دوم (۲۰۱۵-۲۰۰۱) نسبت به دوره‌ی اول (۲۰۰۰-۱۹۸۶) کاهش داشته باشند.

تفاوت‌های بین نتایج این دو روش، ناشی از روش‌شناسی‌های مربوط به آن‌ها به‌خصوص در آستانه‌های تعریف شده برای خشک‌سالی‌ها نهفته است. تعداد و درازای زمانی بیش‌تر خشک‌سالی‌ها با استفاده از تئوری گردش‌ها نشان می‌دهد که نابهنجاری‌های خشکی تعیین شده توسط تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی بحرانی، Y_c نسبت به شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بیش‌تر است؛ اما نکته‌ی مهمی که در مورد تئوری گردش‌ها بایستی بدان توجه نمود، این است که در زمان استفاده از دو ویژگی میانگین کمبود تجمعی و میانگین شدت، حتماً بایستی میانگین بارش سالانه‌ی آن ایستگاه‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد، در غیر این صورت می‌تواند تحلیل‌های غلطی را در اختیار قرار دهد؛ بنابراین می‌توان اذعان داشت که روش تئوری گردش‌ها برای پایش خشک‌سالی‌ها در مناطقی با اقلیم‌های مختلف در مقایسه با شاخص بارش استاندارد شده (SPI) نمی‌تواند بسیار قوی عمل کند.

با مقایسه‌ی نتایج دو روش تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مشاهده شد که استفاده از تئوری گردش‌ها و آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد، ترکیب مناسبی برای تعیین و تشخیص خشک‌سالی‌های منطقه‌ای در ایران نیستند، مطمئناً گستردگی مساحت، تنوع بارشی زیاد، آستانه‌ی استفاده شده توسط تئوری گردش‌ها جهت تفکیک خشک‌سالی‌ها از ترسالی‌ها و روش انتخاب شده جهت محاسبه‌ی میانگین وزنی در این امر نقش بسیار زیادی داشته‌اند. لذا استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد ارجحیت بیش‌تری بر استفاده از تئوری گردش‌ها و آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد دارد.

۵- منابع

- ۱- بشیرزاده، محمد، عراقی‌نژاد، شهاب (۱۳۸۹). پیش‌بینی شدت، تداوم و فراوانی خشک‌سالی با استفاده از تئوری RUN و زنجیره مارکوف مطالعه‌ی موردی: استان لرستان، مجله‌ی پژوهش آب ایران، دوره‌ی ۴، شماره‌ی ۶، صص ۹۴-۹۱.
- ۲- خسروی، محمود، اکبری، محمد (۱۳۸۸). بررسی ویژگی خشک‌سالی‌های استان خراسان جنوبی، فصلنامه‌ی جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۱۴، صص ۶۹-۵۱.
- ۳- رضیعی، طیب، شکوهی، علیرضا، ثقفیان، بهرام (۱۳۸۲). پیش‌بینی شدت، تداوم و فراوانی خشک‌سالی با استفاده از روش‌های احتمالاتی و سری‌های زمانی (مطالعه‌ی موردی: استان سیستان و بلوچستان)، مجله‌ی بیابان، دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۲، صص ۳۱۰-۲۹۲.
- ۴- عساکره، حسین (۱۳۹۰). مبانی اقلیم‌شناسی آماری، زنجان: انتشارات دانشگاه زنجان.
- ۵- علیزاده، امین (۱۳۹۰). اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ سی و دوم)، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- ۶- عیوضی، معصومه، مساعدی، ابوالفضل (۱۳۹۰). پایش و تحلیل مکانی خشک‌سالی هواشناسی در سطح استان گلستان با استفاده از روش‌های زمین آماری، فصلنامه‌ی مرتع و آبخیزداری، دوره‌ی ۶۴، شماره‌ی ۱، صص ۷۹-۶۵.
- ۷- کرد، باقر، راحت، امین، محمودی، پیمان، خسروی، پرویز، بیدار، حریر (۱۳۹۹). اولویت‌بندی شهرستان‌های استان سیستان و بلوچستان در زمان وقوع خشک‌سالی‌ها در راستای مدیریت بهینه‌ی بودجه‌ی خشک‌سالی، نشریه‌ی تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره‌ی ۷، شماره‌ی ۲، صص ۲۰-۱.

- ۸- منتصری، مجید، نورجو، امیر، اکبری، مهدی (۱۳۹۷). بررسی ترسالی و خشک‌سالی هواشناسی در حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز زرینه‌رود و سیمینه‌رود)، مجله‌ی اکوهیدرولوژی، دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۱، صص ۲۰۲-۱۸۹.
- ۹- مهری، سونیا، حاجی، خدیجه، علیزاده، وریا، مصطفی‌زاده، رئوف (۱۳۹۶). ارزیابی تغییرات مکانی شدت دوره‌های خشک‌سالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی متفاوت در استان کردستان، فصلنامه‌ی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، شماره‌ی ۱۰۲، صص ۱۶۲-۱۵۱.
- ۱۰- میر احسنی، مرضیه سادات، سلمان ماهینی، عبدالرسول، مدرس، رضا، سفیانیان، علیرضا، جعفری، رضا، محمدی، جهانگیر (۱۳۹۷). پایش مکانی-زمانی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس پهنه‌بندی خوشه‌های ایستگاهی در حوضه‌ی آبخیز زاینده‌رود، مجله‌ی مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره‌ی ۱۰، شماره‌ی ۴، صص ۷۶۰-۷۳۹.
- ۱۱- نگارش، حسین، خسروی، محمود، شاه‌حسینی، منصوره، محمودی، پیمان (۱۳۸۹). مطالعه خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت شهرستان زاهدان، فصلنامه‌ی جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۱۸، صص ۱۳۵-۱۰۹.
- 12- Almedeij, J. (2014). Drought analysis for Kuwait using Standardized Precipitation Index. *Sci. World J.* 2014, 1-9.
- 13- Bergman, K. H., Sabol, P., Miskus, D. (1988). Experimental indices for monitoring global drought conditions. in *Proceedings of the 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*, pp. 190–197, U.S. Dep. of Commer., Cambridge, Mass.
- 14- Bhalme, H. N., Mooley, D. A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Mon. Weather Rev.*, 108, 1197–1211.
- 15- Blumenstock, G., Jr. (1942). Drought in the United States analyzed by means of the theory of probability. *Tech. Bull.* 819, U.S. Dep. Agric., Washington, D. C.
- 16- Byun, H. R., Wilhite, D. A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *J. Clim.*, 12, 2747–2756.
- 17- Cancelliere, A, Rossi, G., Ancarani, A. (1996). Use of Palmer index as a drought indicator in Mediterranean regions. In: *Proc. IAHR Con! From Flood to Drought*, Sun City, South Africa.
- 18- Chopra, P. (2006). Drought risk assessment using remote sensing and GIS: a case study of Gujarat. M.Sc. thesis, Indian Institute of Remote Sensing, Dehradun, India.
- 19- Daneshmand, H., Mahmoudi, P. (2017). Estimation and Assessment of Temporal Stability of Periodicities of Droughts in Iran. *Water Resour. Manage.*, 31, 3413–3426.
- 20- Dracup, J. A., Lee, K. S., and Paulson Jr, E. G., (1980). On the definition of droughts. *Water Resour. Res.*, 16, 297–302.
- 21- Guenang, G. M., Kamga, F. M. (2014). Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 53 (10), 2310-2324.
- 22- Guerrero-Salazar, P., Yevjevich, V. (1975). *Analysis of Drought Characteristics by the Theory of Runs*. Hydrology Paper Nr. 80, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- 23- Hagman, G. (1984). Prevention better than cure: report on human and natural disasters in the third world. Swedish Red Cross, Stockholm, Sweden.
- 24- Heim, R. R., Jr. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 1149–1165.
- 25- Huang, J., H. Dool, V. D., Georgakakos, K. P., (1996). Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931–93) and application to long-range temperature forecasts. *J. Clim.*, 9, 1350–1362.
- 26- Kao, S.-C., Govindaraj, R. S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. *J. Hydrol.*, 380(1–2), 121–134.
- 27- Keyantash, J., Dracup, J. A., (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 1167–1180.

- 28- Kogan, F. N. (1995). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 76(5), 655–668.
- 29- Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 621–636.
- 30- Lee, S-H., Yoo, S-H., Choi, J-Y., Bae, S. (2017). Assessment of the Impact of Climate Change on Drought Characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea Using Time Series SPI and SPEI: 1981–2100. *Water*, 9(8), 507.
- 31- Livada, I., Assimakopoulos, V. (2007). Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theor. Appl. Climatol.* 89 (3-4), 143–153.
- 32- Liu, W. T., Kogan, F. N. (1996). Monitoring regional drought using the vegetation condition index, *Int. J. Remote Sens.*, 17, 2761–2782.
- 33- Mahfouz, P., Mitri, G., Jazi, M., Karam, F. (2016). Investigating the temporal variability of the Standardized Precipitation Index in Lebanon. *Clim.* 4(2): 1-14.
- 34- Mahmoudi, P., Rigi, A., Miri Kamak, M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theor Appl Climatol* 137, 3123–3138.
- 35- Mahmoudi, P., Hamidian Pour, M., Sanaei, M., Daneshmand, N. (2019). Investigating the Trends of Drought Severity Changes in Iran. In: *Proceedings of International Conference on Climate Change, Impacts, Adaptation and Mitigation*, 11 June, Kharzmi University, Tehran, Iran.
- 36- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179–184.
- 37- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. *Preprints, Ninth Conf. on Applied Climatology*, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 233–236.
- 38- McGuire, J. K., Palmer, W. C. (1957). The 1957 drought in the eastern United States. *Mon. Weather Rev.*, 85, 305–314.
- 39- McQuigg, J. (1954) A simple index of drought conditions. *Weatherwise*, 7, 64–67.
- 40- Michaelides, S., Pashiardis, S. (2008). Monitoring drought in Cyprus during the 2007-2008 hydrometeorological year by using the standardized precipitation index (SPI). *Eur. Water*, 23/24, 123-131.
- 41- Modarres, R. 2007. Streamflow drought time series forecasting, *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, 21(3), 223–233.
- 42- Mondol, M. A. H., Ara, I., Das, S. C. (2017). Meteorological drought index mapping in Bangladesh using Standardized Precipitation Index during 1981-2010. *Adv. Meteorol.* 2017, 1-17.
- 43- Moye, L. A., Kapadia, A. S., Cech, I. M., Hardy, R. J. (1988). The theory of runs with applications to drought prediction. *J. Hydrol.*, 103(1-2), 127-137.
- 44- Munger, T. T. (1916). Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Mon. Weather Rev.*, 44, 642–643.
- 45- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. Res. Paper No. 45, 768 Weather Bureau, Washington, D. C.
- 46- Palmer, W. C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index, *Weatherwise*, 21, 156–161.
- 47- Paulo, A. A., Pereira, L.S. (2006). Drought Concepts and Characterization (Comparing Drought Indices Applied at Local and Regional Scales). *Water Int.*, 31(1), 37-49.
- 48- Paulo, A. A., Pereira, L.S., Matias, P.G., Rossi, G., Cancelliere, A. (2000). Characterisation of droughts: Local indices and regional analysis. In: *Proc. 3rd Inter Regional Conference on Environment-Water: Water Resources Management in the 21st Century*, Budapest: 161 - 168.

- 49- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., Giakoumis, S. (1992). On regional drought estimation and analysis. *Water Res. Manag.*, 6, 249-277.
- 50- Santos, M. A., (1983). Regional droughts: a stochastic characterization. *J. Hydrol.*, 66,183-211.
- 51- Santos, M. A., Correia, F. N., Rodrigues, R., (1988). Risk assessment of regional droughts. In: F. Siccardi and R. L. Bras (Eds.) *Natural Disasters in European Mediterranean Countries*, U. S. Nat. Sci. Foundation and Nat. Res. Council, Italy, 333-350.
- 52- Shafer, B. A., Dezman, L. E., (1982). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In *Preprints, Western Snow Conference*, pp. 164–175, Colo. State Univ., Reno, Nev.
- 53- Tate E. L., Gustard A. (2000). Drought Definition: A Hydrological Perspective. In: Vogt J.V., Somma F. (eds) *Drought and Drought Mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 14. Springer, Dordrecht.
- 54- Thornthwaite, C. W. (1931). The climate of North America according to a new classification. *Geogr. Rev.*, 21, 633–655.
- 55- Türkeş, M., Tatli, H. (2009). Use of the Standardized Precipitation Index (SPI) and a modified SPI for shaping the drought probabilities over Turkey. *Int. J. Climatol.* 29 (15), 2270-2282.
- 56- van Rooy, M. P. (1965). A rainfall anomaly index independent of time and space, *Notos*, 14, 43.
- 57- Waggoner, M. L., O'Connell, T. J. (1956). Antecedent precipitation index. *Weekly Weather Crop Bull.*, XLIII, 6–7.
- 58- Wilhite, D. A., Glantz, M. H., (1987). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. In: D. A. Wilhite, W. E. Easterling and D. A. Wood (Eds.) *Planning for Drought, Toward a Reduction of Societal Vulnerability*. Westview Press, Boulder, 13-27.
- 59- Yuan, X., Jian, J., Jiang, G. (2016). Spatiotemporal variation of precipitation regime in China from 1961 to 2014 from the Standardized Precipitation Index. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 5(11): 1-18.