

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره دوازدهم، شماره چهل و ششم، زمستان ۱۴۰۰

درباره مقاله: ۱۳۹۹ / ۰۹ / ۱۶ تأیید نهایی: ۱۴۰۰ / ۰۹ / ۱۶

صفحه ۵۳-۷۵

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

زیور بلوچی، دانشآموخته 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 استانداردشده (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 فضایی 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 پاییش 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 فضایی ۳۰ درصد، ترکیب مناسبی برای پاییش خشکسالی‌های منطقه‌ای ایران نمی‌باشد، لذا در مقایسه بین دو آستانه‌ی فضایی ۳۰ و ۵۰ درصد کاملاً آشکار شد که آستانه‌ی فضایی ۵۰ درصد برای تئوری گردش‌ها و شاخص SPI آستانه‌ی مناسبی برای پاییش خشکسالی‌های منطقه‌ای ایران است. از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به این مهم اشاره داشت که درازی 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 (۱۹۸۶-۲۰۰۰) کاهش داشته باشند.

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

*Email: p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول

۱- مقدمه

خشکسالی به عقیده‌ی بسیاری از پژوهشگران یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال یکی از ناشناخته‌ترین مخاطرات طبیعی است که انسان با آن دست به گریبان 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؛ به طوری که 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 اندازه‌گیری شده 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 کمیت 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 گستردۀ مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌توان به شاخص مونگر^۱ (1916: 642)، شاخص اثربخشی بارش (Thorntwaite, 1931: 633)، شاخص بلمن استوک^۲ (1942: 1)، شاخص بارش پیشین (API) مک‌کویگ و واگونر و اوکونل (McQuigg, 1954: 64; Waggoner and O'Connell, 1956: 6)، شاخص شدت خشکسالی پالمر^۳ (1965: 1)، شاخص نابهنجاری بارش (van Rooy, 1965: 43) (RAI)، شاخص ناحیه‌ای خشکسالی (Bhalme and Mooley, 1908: 1197)، شاخص بارش استاندارد شده (McKee et al., 1993: 1) (SPI) و شاخص خشکسالی مؤثر (Byun and Wilhite, 1999: 2747) استاندارد شده (SPI) مشهورترین و پرکاربردترین شاخص‌هاست. در محاسبه‌ی این شاخص، بارش استاندارد می‌شود تا بتوان در دو بعد زمان و مکان قابل مقایسه 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 به عنوان متغیرهای کلیدی، محاسبه و به عنوان 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 نابهنجاری رطوبت (DMAI) (Palmer, 1965: 1) (and Palmer, 1968: 156)، شاخص رطوبت محصول (CMI) (Palmer, 1968: 190) (SMAI) (Bergman et al., 1988: 2761)، شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) (Kogan, 1995: 655; Liu and Kogan, 1996: 2761; Kogan, 1997: 621) (CSM) (Huang et al., 1996: 1350) محاسبه شده‌ی (CSM) هستند که از مهم‌ترین آن‌ها نیز به شمار می‌آینند. بر جسته‌ترین شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی پالمر (PHDI) (Palmer, 1965: 1)، کسری Shafer and Dezman, (SWSI) (Dracup et al., 1980: 297) (TWD) (Munger, 1996: 1350) مجموع آب

1- Munger
2- Blumenstock
3- Palmer

Keyantash and Dracup, 2002: 164) و نابهنجاری جریان آب رودخانه تجمعی (CSA) کیانتاش و دراکاپ^۴: 164 (1982) هستند. مقایسه‌ی دقیق این شاخص‌ها را می‌توان در تحلیل‌های محمودی و همکاران (Mahmoudi et al, 2019: 1167)، کیانتاش و دراکوپ^۵ (Keyantash and Dracup, 2002: 1167) و هیم^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 گلانتر^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 موردنظر است؛ اما شاخص بارش استانداردشده (SPI) به علت سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل‌دسترس 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: 179; 233) اولین محققانی بودند که با استفاده از این شاخص ایالت کلرادو را در ایالات متحده آمریکا مورد پایش قرار دادند. بعدازآن، 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 (1: 2017) در بنگلادش، یوان و همکاران^{۱۰} (1: 2016) در چین، ماه فوز و همکاران^{۱۱} (1: 2016) در لبنان، گئوگانگ و کامگا^{۱۲} (2014: 2310) در کامرون، ال مدرج^{۱۳} (1: 2014) 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 کردند. 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).

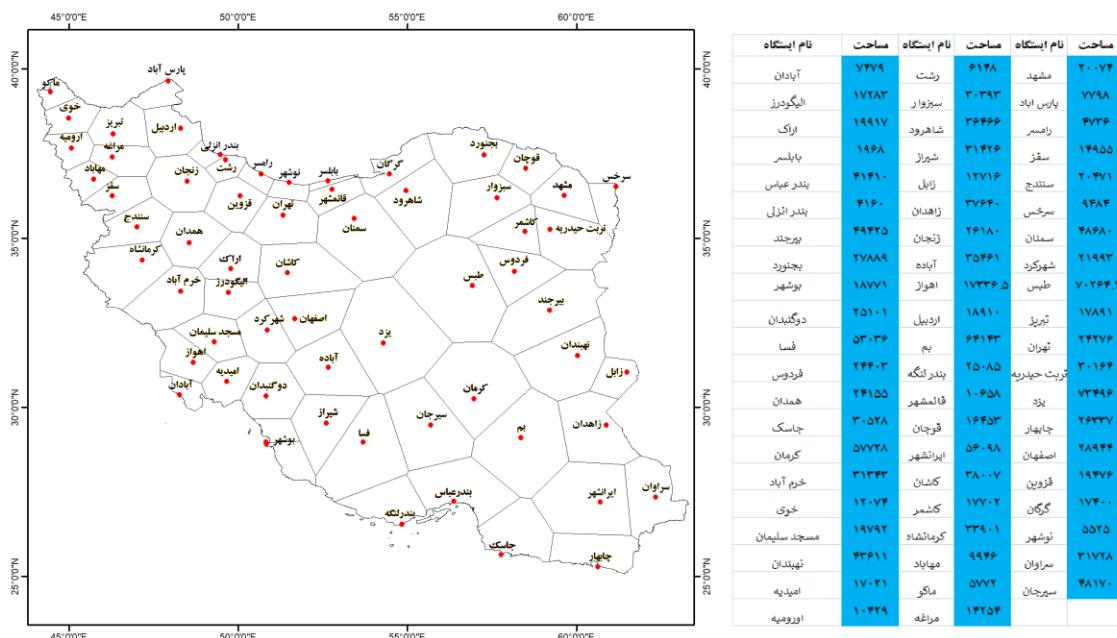
تئوری گردش‌ها به عنوان یکی از روش‌های تصادفی تحلیل سری‌های زمانی به صورت بسیار موفقیت‌آمیزی در حوزه‌ی دریای مدیترانه برای توصیف خشکسالی‌های محلی و منطقه‌ای (Rossi et al, 1992: 249; Cancelliere et al, 1996: 1) در استان لرستان در غرب ایران (بشيرزاده و عراقی نژاد، ۱۳۸۹: ۹۱) و در استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق ایران (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۲: ۲۹۲) به کار برده شده‌اند. هرچند شاخص بارش استانداردشده (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 - Almedeij
 - 14- Türkeş and Tatlı
 - 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 استانداردشده (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 مورداستفاده سال‌های بیش‌تری را دربر بگیرد، تحلیل‌های صورت گرفته بیش‌تر با واقعیت منطبق خواهند بود. گزارش سازمان هواشناسی جهانی حداقل سال‌های آماری موردنیاز برای این گونه 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 (۱۹۸۶-۲۰۱۵) 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 خلاً آماری داده‌ها با استفاده از همبستگی (عساکره، ۱۳۹۰: ۱۶۰) و مدل‌های رگرسیونی (همان: ۲۱۷) بازسازی شدند. توزیع و پراکنش ایستگاه‌های موردمطالعه در شکل (۱) آورده شده است. با استفاده از روش چندضلعی تیسن (علیزاده، ۱۳۹۰: ۱۳۹۰) مساحت اختصاص داده شده به هر ایستگاه نیز مشخص شده است. در این مطالعه اساس محاسبات و تحلیل‌های صورت‌گرفته برای هر ایستگاه مبتنی بر این مساحت‌های به دست آمده است (شکل ۱).



شکل ۱: پراکنش و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های موردمطالعه و مساحت اختصاص داده شده به هر ایستگاه با استفاده از روش چندضلعی تیسن

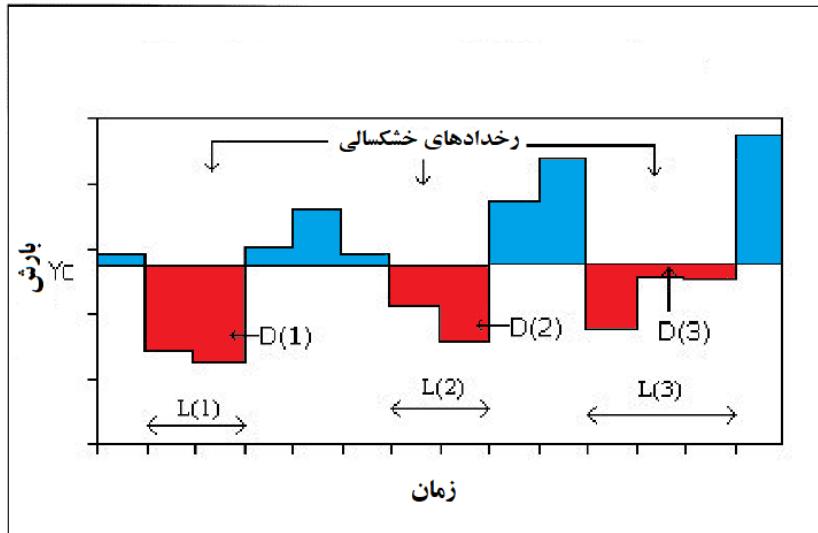
۲- تعیین خشکسالی‌های محلی

۲-۱- تئوری گردش‌ها

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

می‌دهد که X_i به طور 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_t و y_c 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 مورداستفاده 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 یکتابع 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 $\hat{\mu} - \hat{\sigma} y_c$ انتخاب شد. مناسب بودن این آستانه قبلًا توس (Paulo et al, 2000: 161) تأیید شده است.

۲-۱-۲- شاخص بارش استانداردشده (SPI)

شاخص بارش استانداردشده (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 استانداردشده (SPI)، برای هر مقیاس زمانی موردنظر، در شکل اولیه‌ی خود، چندین مرحله بایستی پیموده شود. این مراحل عبارت‌اند 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 استانداردشده (SPI) با انتقال مقادیر تابع توزیع گاما به مقادیر متغیر نرم‌ال استاندارد. شاخص بارش استانداردشده (SPI) درواقع 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 استانداردشده (SPI) در مکان‌های مختلف و بین دوره‌های گوناگون را فراهم می‌سازد. هر زمان مقادیر شاخص بارش استانداردشده (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 استانداردشده (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 موردمطالعه زمانی که خشکسالی تداوم دارد، مشخص می‌شود. شدت تجمعی یک خشکسالی می‌تواند به عنوان بزرگی خشکسالی در نظر گرفته شود، این بزرگی توسط مجموع شاخص بارش استانداردشده (SPI) برای تمامی ماههایی که در درون یک رخداد خشکسالی هستند، تعریف می‌شود. شدت خشکسالی‌ها به صورت قراردادی بر اساس مقادیر شاخص بارش استانداردشده (SPI) در جدول (۱) لیست شده‌اند(McKee et al, 1993: 181).

جدول ۱: طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص بارش استانداردشده (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	$-1/50 \leq SPI \leq -1/99$
خشکسالی بسیار شدید	$-2 \leq SPI$

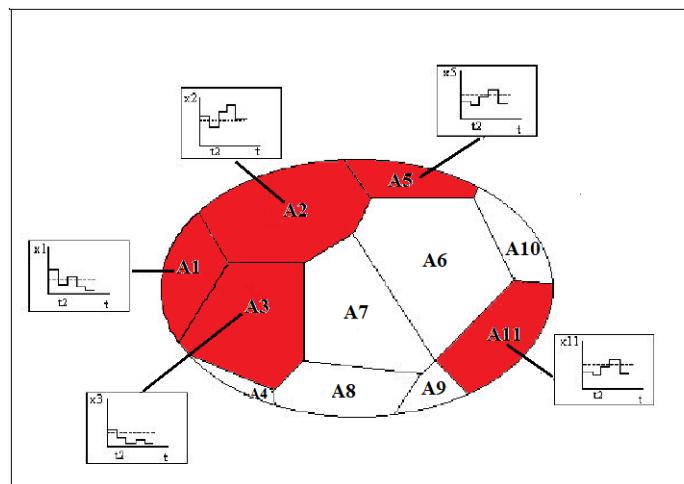
(McKee et al, 1993: 181)

۲-۲-۱- تعیین خشکسالی‌های منطقه‌ای

۲-۲-۲- تئوری گردش‌ها

خشکسالی‌های منطقه‌ای با استفاده از دو روش توصیف شده برای تشخیص خشکسالی‌های محلی شناسایی و تعیین می‌شوند. یک خشکسالی منطقه‌ای زمانی تعیین می‌شود که بخش قابل توجهی از مساحت یک منطقه تحت شرایط خشکسالی باشد، یا به عبارت دیگر زمانی که مجموع مساحت یک منطقه تحت تأثیر خشکسالی، A_j ، به یک آستانه‌ی فضایی بحرانی انتخاب شده، 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 مدت زمان 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 استانداردشده (SPI)

شاخص بارش استانداردشده (SPI) جهت تعیین الگوهای منطقه‌ای بارش و شرایط خشکی، پوشش منطقه‌ای خشکسالی‌ها و شدت آن‌ها توسعه داده می‌شود. برای این منظور سالی به عنوان 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" به طور پیوسته بالای آستانه‌ی فضایی باقی بماند و در آن دوره، مساحتی که $-1 \leq SPI < 1$ از مساحت آستانه در یک یا بیشتر از یک ماه باشد، شاخص بارش استانداردشده (SPI) با مقیاس زمانی از پیش انتخاب شده محاسبه می‌شود. در زیر مشخصات خشکسالی‌ها با شاخص بارش استانداردشده (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

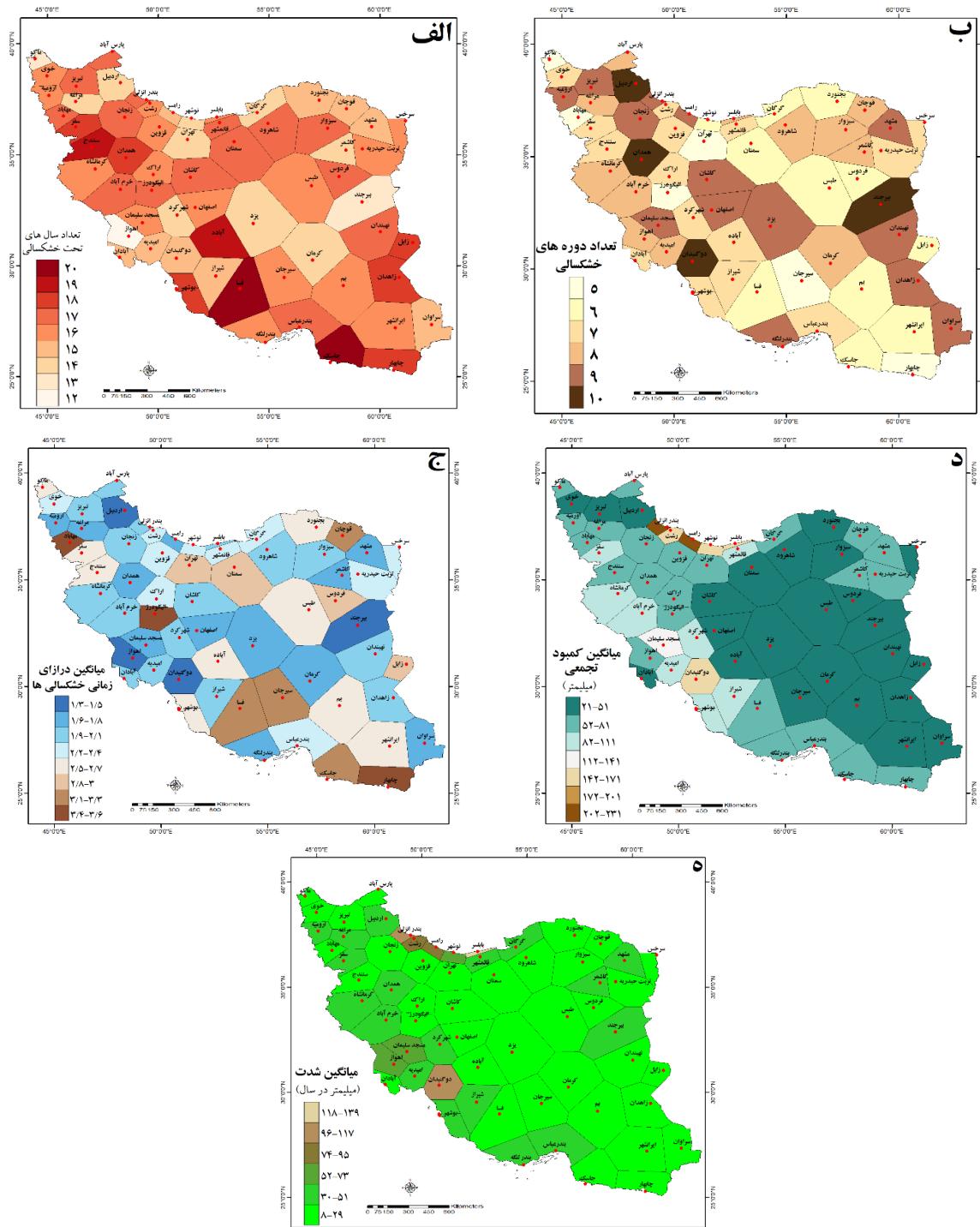
"خشکسالی شدید" برابر یا بیشتر از آستانه‌ی فضایی موردنظر باشد، آنگاه آن منطقه تحت خشکسالی شدید در طول آن دوره طبقه‌بندی می‌شود.

- درازای زمانی خشکسالی‌ها عبارت است از؛ تعداد ماههای متواالی 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 آن‌ها بین $1 - SPI < 1.5$ بوده است، به دست می‌آید.
- شاخص بارش استانداردشده (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 به عنوان وزن مربوطه است.

۳- نتایج و بحث

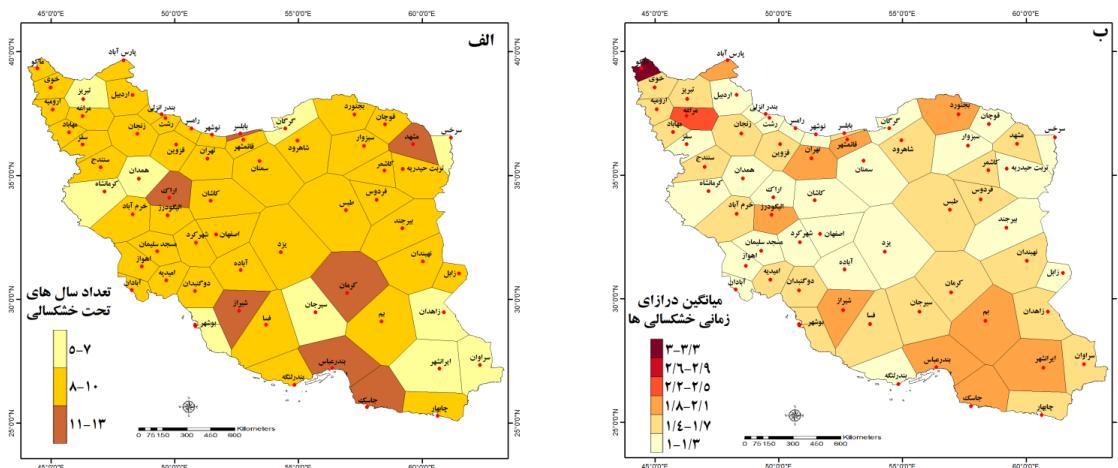
۱-۳- خشکسالی‌های محلی

توزیع فضایی ویژگی‌های استخراج شده 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 ۵) 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 دریایی 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 مقادیر 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؛ درحالی‌که ایستگاه‌های داخلی ایران مرکزی مانند یزد، به 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 مورداستفاده قرار گیرد، در غیر این صورت می‌توان تحلیل‌های غلطی را در اختیار قرار دهد.



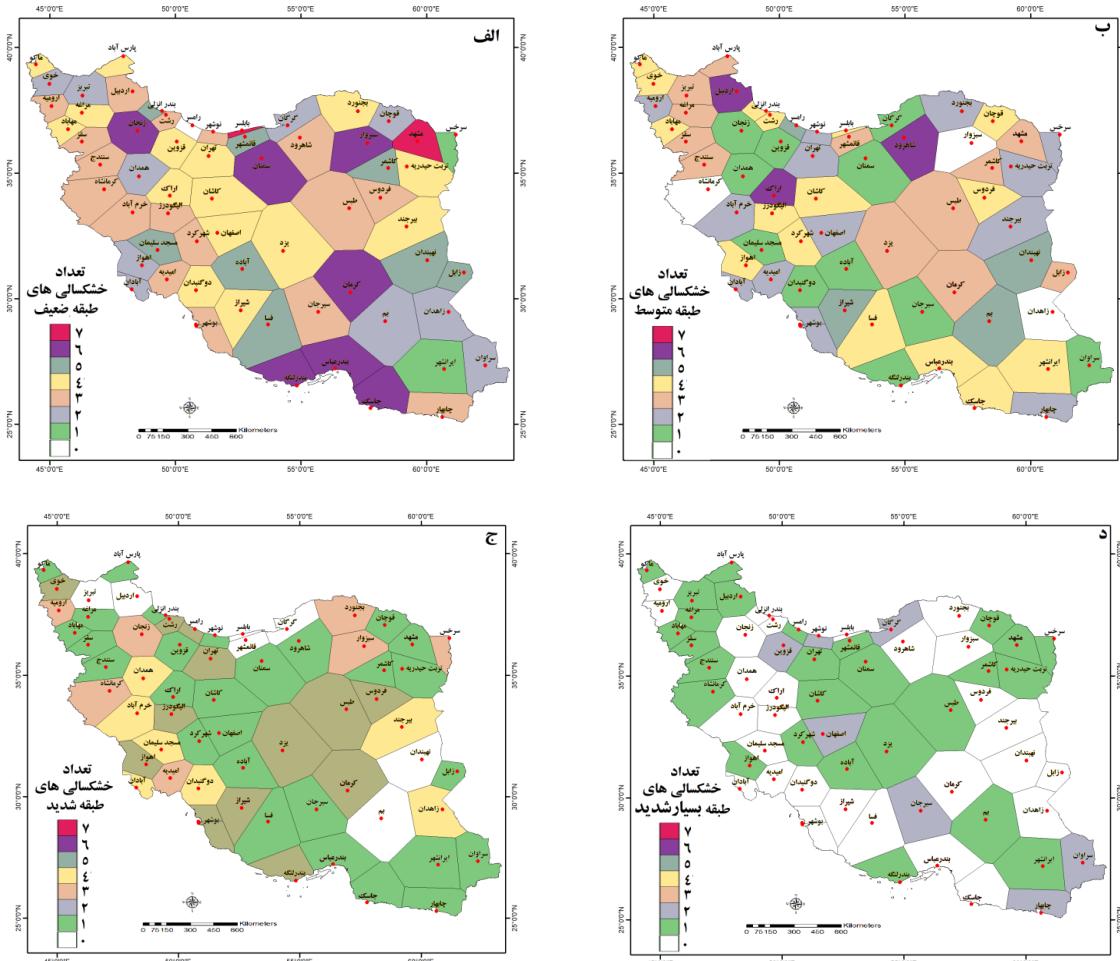
شکل ۴: توزیع فضایی ویژگی‌های خشکسالی‌های محلی ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها برای مقیاس زمانی سالانه (۱۹۸۶-۲۰۱۵). (الف) تعداد سال‌های تحت خشکسالی، (ب) تعداد دوره‌های خشکسالی، (ج) میانگین درازای زمانی خشکسالی‌ها، (د) میانگین کمبود تجمعی بر حسب میلی‌متر، (ه) میانگین شدت بر حسب میلی‌متر

تعداد سال‌های تحت خشکسالی و میانگین درازای زمانی آن‌ها که با استفاده از شاخص بارش استانداردشده (SPI) برای تمامی ایستگاه‌های موردمطالعه 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 موردمطالعه (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 دوره‌ی 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 روبرو سازد؛ اما در مورد میانگین درازای زمانی خشکسالی‌ها باقی‌ستی 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 استانداردشده (SPI) برای بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶-۲۰۱۵

توزیع فضایی طبقات مختلف خشکسالی‌های منتج از شاخص بارش استانداردشده (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 رخداده 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 استانداردشده (SPI) برای بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶-۲۰۱۵. (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 موردمطالعه

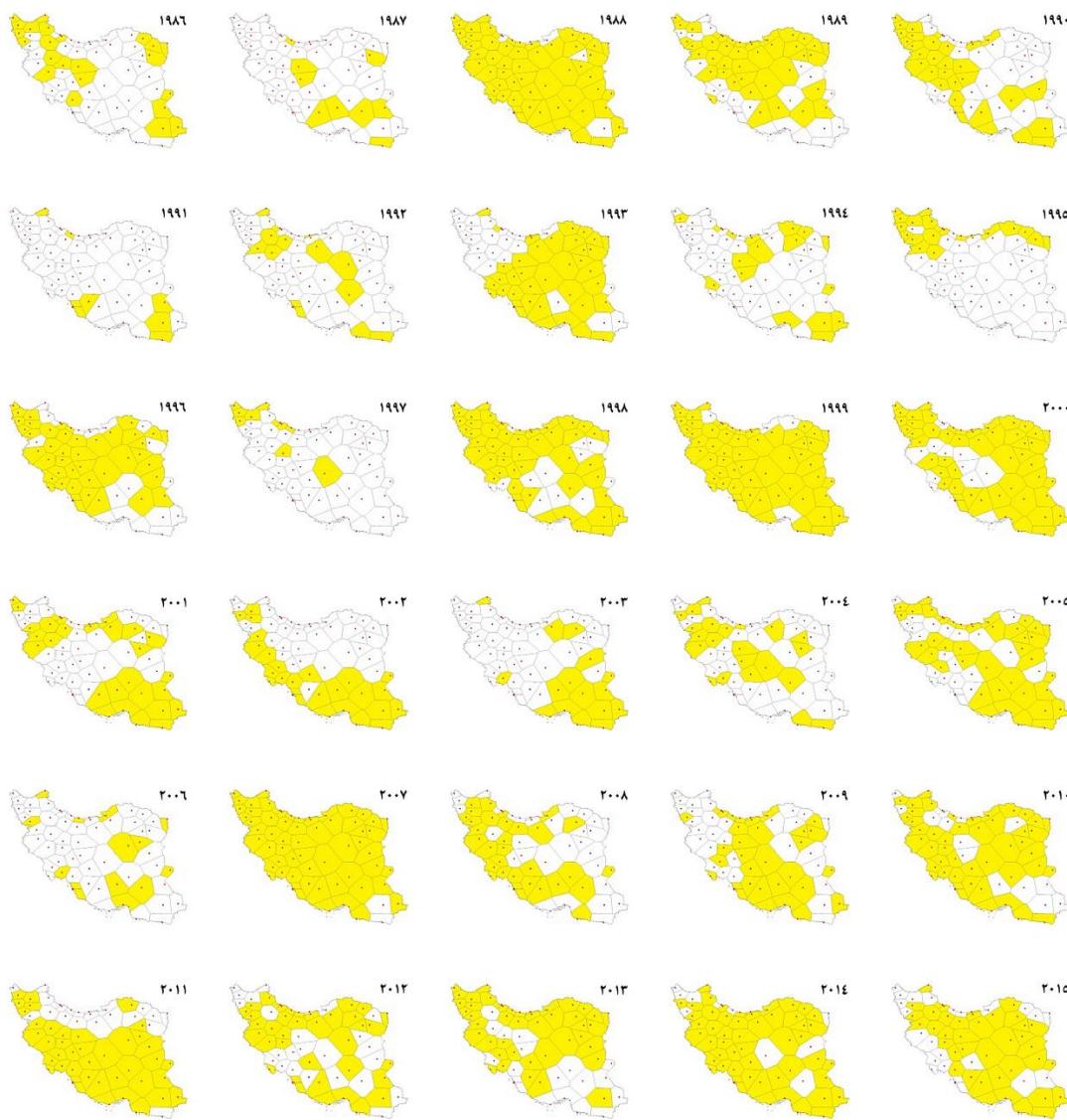
۲-۳- خشکسالی‌های منطقه‌ای

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 استانداردشده (SPI) نیز مورد استفاده قرار گرفتند. برای اینکه در ابتدا چشم‌انداز فضایی مناسبی از توزیع فضایی خشکسالی‌ها در ۳۰ سال موردمطالعه به دست آید، به تفکیک برای تمامی کل دوره‌ی موردمطالعه، نقشه‌های توزیع فضایی خشکسالی‌های ایران ابتدا بر اساس تئوری گردش‌ها (۷) و سپس بر اساس شاخص بارش استانداردشده (SPI) (۱۰) تهیی شدند. لازم به ذکر است که اساس تهیی 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. گستردگرترین و فراگیرترین

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

جهت مشخص نمودن دوره‌های متوالی خشکسالی‌های رخداده 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 نه تنها به ۶ مورد کاهش پیدا می‌کنند، بلکه تعداد سال‌های تشکیل‌دهنده‌ی این دوره‌ها نیز تقلیل می‌یابند (شکل ۹).

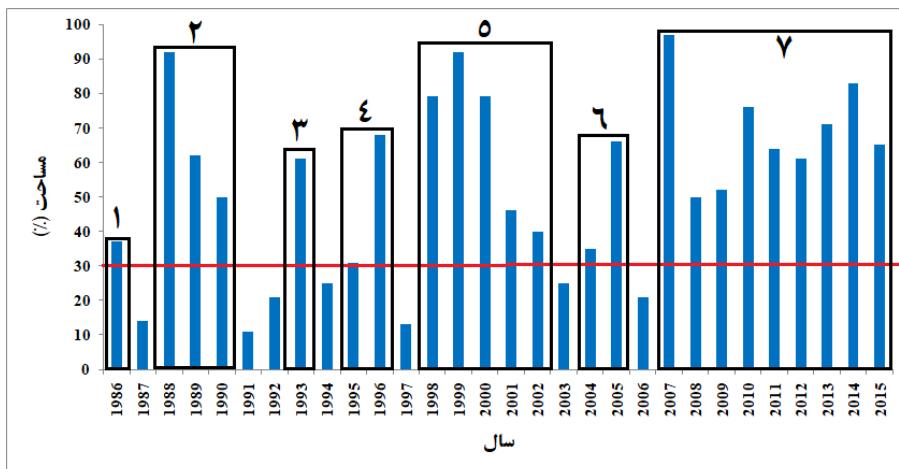
جدول‌های (۲) و (۳) ویژگی‌های اصلی دوره‌های خشکسالی‌های شناسایی شده با تئوری گردش‌ها را برای مقیاس زمانی سالانه که به ترتیب حداقل ۳۰ و ۵۰ درصد از مساحت منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند، نشان می‌دهند. نتایج ارائه‌شده در این جداول شامل زمان آغاز و پایان خشکسالی‌ها، درازای زمانی، پوشش فضایی (% مساحت) و شدت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



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

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

انتخاب شده 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 (۱۹۸۶-۲۰۰۰) ۵ دوره‌ی خشکسالی و در نیمه‌ی دوم آن (۲۰۰۱-۲۰۱۵) 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 گسترشی بیشتری نسبت به دوره‌ی اول نشان می‌دهد. درنهایت مقایسه‌ی شدت دو دوره‌ی نیز حاکی از افزایش شدت نیمه‌ی دوم نسبت به نیمه‌ی اول است.

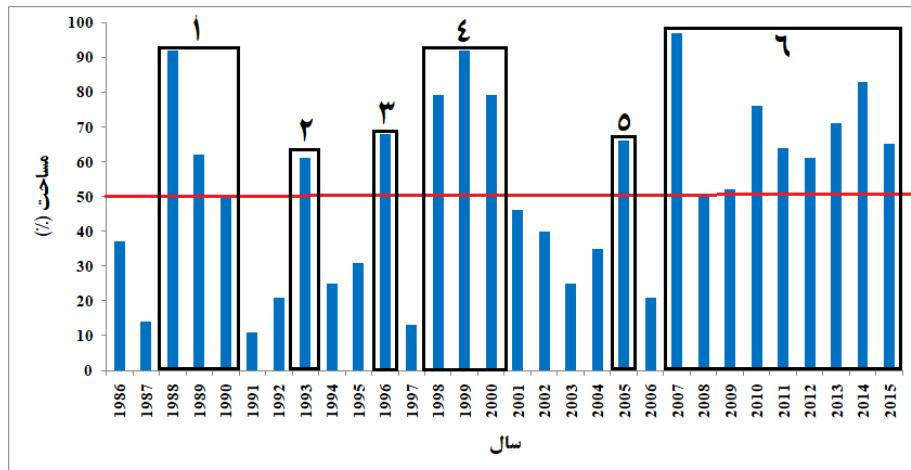


شکل ۸: شناسایی و استخراج دوره‌های متوالی خشکسالی‌ها ایران با استفاده از تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد

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

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

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؛ به طوری که میانگین درازای زمانی خشکسالی‌ها بر اساس آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد $\frac{3}{3}$ 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 به طور میانگین $68/8$ 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 متواتی سه ساله از ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ بوده که به طور میانگین $53/4$ 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 تغوری 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 سالی موردمطالعه، 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 (۲۰۰۱-۲۰۱۵) نسبت به دوره‌ی اول (۱۹۸۶-۲۰۰۰) کاهش داشته باشند. نتایج این قسمت با نتایج تحقیقات دانشمند و محمودی (۳۴۱۳: ۲۰۱۷) و همکاران (۲۰۱۹: ۱) تقریباً مطابق هستند. محمودی و همکاران (۲۰۰۷: ۲۰۰۰) 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 مطالعه‌ی دیگر کاهش شدت خشکسالی‌های ایران را به اثبات رسانده بودند.

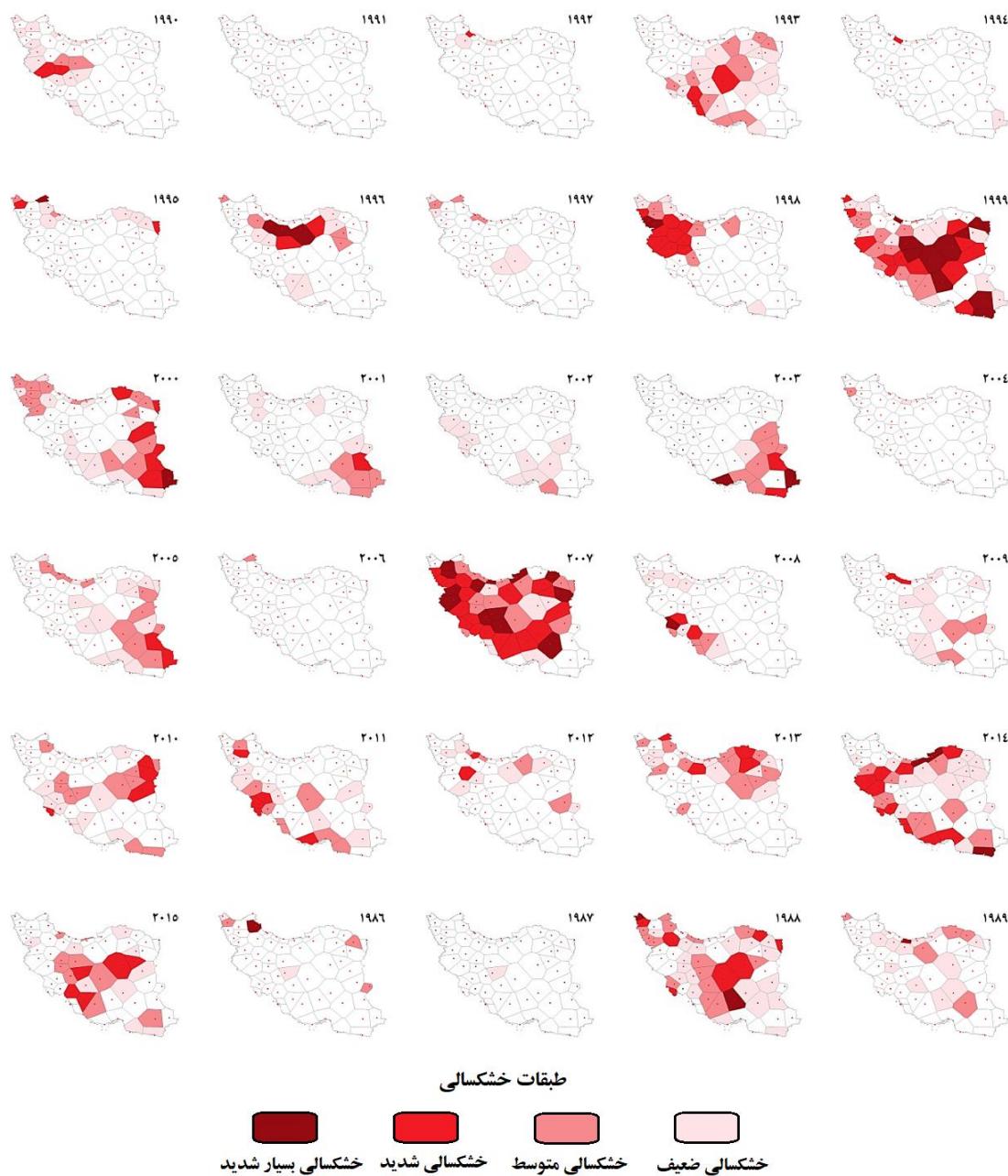


شکل ۹: شناسایی و استخراج دوره‌های متواتی خشکسالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از تغوری گردش‌ها با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد

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	درازی 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

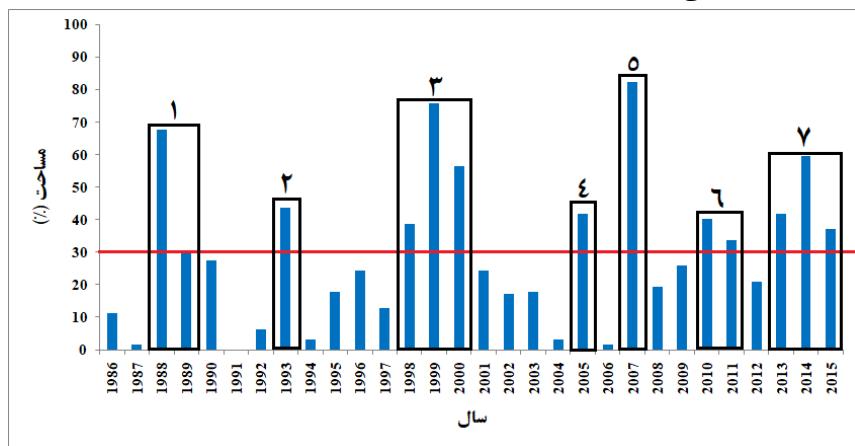
توزیع فضایی طبقات مختلف خشکسالی‌های ایران با استفاده از شاخص بارش استانداردشده (SPI) برای کل دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی مورد مطالعه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) رسم و در شکل (۱۰) آورده شده‌اند. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که خشکسالی‌های ایران می‌توانند تقریباً دارای الگوهای فضایی منطقه‌ای مشخصی باشند. فرآگیرترین خشکسالی‌های ایران با استفاده از این شاخص به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۷ و ۲۰۰۵ 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 قبل از این دو سال را به عنوان فرآگیرترین خشکسالی‌های ایران مشخص کرده بود، اما در مقابل فرآگیرترین خشکسالی‌های ایران پنج سال تر فرآگیر 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 درصد) بوده است.



شکل ۱۰: توزیع فضایی خشکسالی‌های سالانه‌ی ایران بر اساس شاخص بارش استانداردشده (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 تعیین شده با شاخص بارش استانداردشده (SPI) برای مقیاس زمانی سالانه با استفاده از آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) آورده شده‌اند.

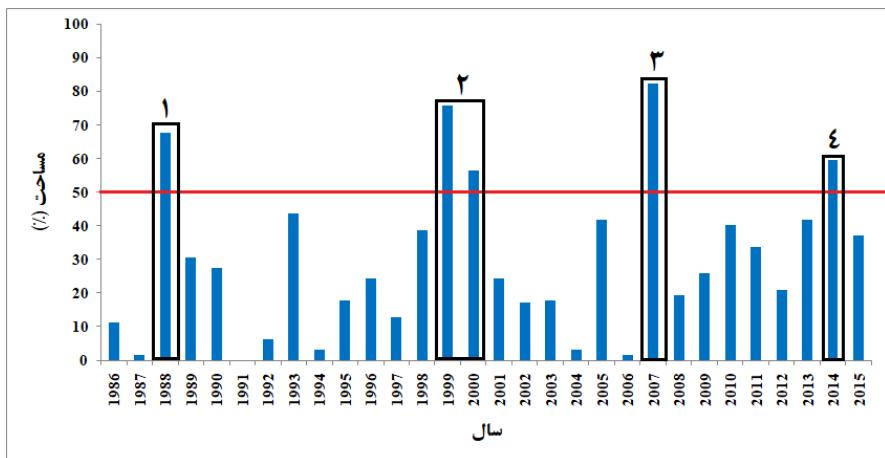
همان‌گونه که در جدول (۴) قابل مشاهده است، بر اساس آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد درازای زمانی خشکسالی‌ها ایران بین ۱ تا ۳ سال متغیر بوده است؛ اما با انتخاب آستانه‌ی فضایی بحرانی ۵۰ درصد، بازه‌ی تغییرات درازای زمانی خشکسالی‌ها به ۱ تا ۲ سال کاهش پیدا می‌کنند (جدول (۵). شدیدترین و فرآگیرترین خشکسالی‌های رخداده 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 ایران با استفاده از شاخص بارش استانداردشده (SPI) با آستانه‌ی فضایی بحرانی ۳۰ درصد

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

شماره‌ی خشکسالی	زمان آغاز	زمان پایان	درازای زمانی (سال)	میانگین پوشش فضایی (٪)	تعداد ایستگاه‌های دارای خشکسالی با طبقه (از مجموع ۶۲ ایستگاه)	بسیار شدید			
						ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
۱	۱۹۸۸	۱۹۸۹	۲	۴۹/۱	۱۶	۱۰	۴	۲	۲
۲	۱۹۹۳	۱۹۹۴	۱	۴۳/۵	۱۵	۹	۳	۳	۰
۳	۱۹۹۸	۲۰۰۰	۳	۵۷	۱۱	۱۱	۹	۹	۵
۴	۲۰۰۵	۲۰۰۷	۱	۴۱/۹	۱۳	۱۱	۲	۲	۰
۵	۲۰۰۷	۲۰۰۷	۱	۸۲/۲	۶	۱۴	۱۸	۱۸	۱۳
۶	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲	۳۷/۱	۱۰	۹	۵	۵	۰
۷	۲۰۱۳	۲۰۱۵	۳	۴۶/۲	۱۱	۷	۷	۷	۱



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

جدول ۵: ویژگی‌های دوره‌های متوالی خشکسالی‌های منطقه‌ای ایران با استفاده از شاخص بارش استانداردشده (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	شماره 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 تعریف شده برای این پژوهش، بررسی و تحلیل ویژگی‌های مختلف خشکسالی‌های محلی و منطقه‌ای ایران بر اساس تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استانداردشده (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 استانداردشده (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 موردمطالعه 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 استانداردشده (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 موردمطالعه ترکیبی مناسبی برای پایش خشکسالی‌های 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 استانداردشده (SPI) آستانه‌ی مناسبی برای پایش خشکسالی‌های منطقه‌ای ایران است. همچنین نتایج نشان دادند که در نیمه‌ی اول دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی موردمطالعه، درازای زمانی خشکسالی‌ها کوتاه‌تر و در دوره‌ی دوم، این درازای زمانی خشکسالی‌ها طولانی‌تر شده است؛ اما در مورد شدت خشکسالی‌ها به نظر می‌رسد شدت خشکسالی‌ها در دوره‌ی دوم (۱۹۸۶-۲۰۰۰) نسبت به دوره‌ی اول (۲۰۰۱-۲۰۱۵) کاهش داشته باشد.

تفاوت‌های بین نتایج این دو روش، ناشی از روش‌شناسی‌های مربوط به آن‌ها به خصوص در آستانه‌های تعریف‌شده برای خشکسالی‌ها نهفته است. تعداد و درازای زمانی بیشتر خشکسالی‌ها با استفاده از تئوری گردش‌ها نشان می‌دهد که نابهنجاری‌های خشکی تعیین‌شده توسط تئوری گردش‌ها با آستانه‌ی بحرانی، y_c ، نسبت به شاخص بارش استانداردشده (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 مورداستفاده 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 استانداردشده (SPI) نمی‌تواند بسیار قوی عمل کند.

با مقایسه‌ی نتایج دو روش تئوری گردش‌ها و شاخص بارش استانداردشده (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 استانداردشده (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 موردنی: استان لرستان، مجله‌ی پژوهش آب ایران، دوره‌ی ۴، شماره‌ی ۶، صص ۹۱-۹۴.
- ۲- خسروی، محمود، اکبری، محمد (۱۳۸۸). بررسی ویژگی خشکسالی‌های استان خراسان جنوبی، فصلنامه‌ی جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۱۴، صص ۶۹-۵۱.
- ۳- رضیئی، طیب، شکوهی، علیرضا، ثقفیان، بهرام (۱۳۸۲). پیش‌بینی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی با استفاده از روش‌های احتمالاتی و سری‌های زمانی (مطالعه‌ی موردنی: استان سیستان و بلوچستان)، مجله‌ی بیابان، دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۲، صص ۳۱۰-۲۹۲.
- ۴- عساکره، حسین (۱۳۹۰). مبانی اقليم‌شناسی 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، راحتبی، 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- منتظری، مجید، نورجو، امیر، اکبری، مهدی (۱۳۹۷). بررسی ترسالی و خشکسالی هواشناسی در حوضه‌های جنوبی دریاچه‌ی 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 مختلف 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 زاينده‌رود، مجله‌ی مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره‌ی ۱۰، شماره‌ی ۴، صص ۷۳۹-۷۶۰.
- 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., Georgakatos, 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., Tatlı, 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.