



Research Article

Analysis and comparison of SPI and SPEI indices in meteorological drought assessment (Case study: West of Iran)

Afsaneh Heidari ^{a,*} and Mohammad Rahimi ^b

^a *Ph.D. Student in Agricultural Meteorology, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

^b Professor of Climatology, Department of Combat to Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 17 September 2023

Revised: 30 December 2025

Accepted: 30 December 2025

Keywords:

Meteorological drought,
Standardized Precipitation
Index (SPI),
Standardized Precipitation
Evapotranspiration Index
(SPEI),
West of Iran,
Station Data of
Temperature,
Station Data of
Precipitation

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Drought is a recurring climatic phenomenon triggered by a moisture deficit due to below-normal precipitation, with extensive economic, social, and environmental consequences, ranking it among the most significant natural hazards. Accurate drought assessment is crucial for water resource planning and management. Among various drought indices, the Standardized Precipitation Index (SPI), relying solely on precipitation data, and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), which incorporates both precipitation and temperature (evapotranspiration), are widely used. This research aims to compare the performance and patterns of drought occurrence based on these two indices across different time scales in western Iran, a relatively high-precipitation and crucial region of the country.

Materials and Methods: This study was conducted in western Iran, encompassing the provinces of Ilam, Lorestan, Kurdistan, Kermanshah, and Hamadan. Monthly minimum and maximum temperature and precipitation data from 32 synoptic stations over a 30-year period (1988-2017) were utilized. After data quality control and reconstruction, potential evapotranspiration (PET) was calculated using the Hargreaves-Samani method. The SPI and SPEI were computed for 1-, 6-, and 12-month time scales for the entire 30-year period and two 15-year sub-periods (1988-2002 and 2003-2017). SPI calculation was performed using SPI_SL_6 software, fitting a gamma distribution to the precipitation data. For SPEI calculation, the difference between precipitation and PET ($D = P - PET$) was used, and a generalized logistic distribution was fitted to the D values. The spatial distribution of the results was mapped using a Geographic Information System (GIS), and the correlation between the two indices was analyzed using SPSS software.

Results: The findings indicated that during the 30-year period, the region experienced widespread drought in seven years (1990, 1995, 1996, 1998, 2007, 2010, 2017). Based on SPI, four years (1994, 2000, 2009, 2015) had widespread wet periods, whereas SPEI identified six years (1992, 1993, 1994, 2009, 2013, 2015). The SPEI index revealed longer and more severe drought periods compared to SPI at most stations, underscoring the significant role of temperature and evapotranspiration. On a monthly scale, during the 2003-2017 period, SPEI identified five months (January, September, October, November, December) with widespread drought, while SPI detected only two months (October and December). Correlation analysis confirmed a significant relationship between the two indices. The highest correlation coefficient at the annual scale was for the 2003-2017 period (0.938), and at the monthly scale, it belonged to February (0.945) and January (0.908) during the 1988-2002 period. The lowest correlations were observed in November and October.

Conclusion: In general, the SPEI index, by concurrently considering precipitation and temperature, demonstrates greater sensitivity to drought, particularly under warming conditions, and identifies longer and more severe dry periods. However, the strong correlation between the two indices at longer time scales (6-month and 12-month) justifies the use of the simpler SPI index in regions lacking reliable temperature data. Given climate change and the increasing temperature trend, employing the SPEI index for drought monitoring and assessment in western Iran and similar regions will yield more realistic results.

Cite this article: Heidari,A.,& Rahimi,M.(2025). Analysis and comparison of SPI and SPEI indices in meteorological drought assessment (Case study: West of Iran). *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 2(2), 75-97.

©2025 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.31743.1020>

تحلیل و مقایسه شاخص های spi و spei در ارزیابی خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی غرب ایران)

افسانه حیدری^{۱*}، محمد رحیمی^۲

۱- دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد، گروه بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

*: نویسنده مسئول، Heydari4278@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹</p> <p>واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی، شاخص استاندارد شده بارش SPI، شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق SPEI، داده‌های ایستگاهی دما، داده‌های ایستگاهی بارش</p>	<p>سابقه و هدف: خشکسالی پدیده‌ای اقلیمی است که به طور دوره‌ای به دلیل کمبود رطوبت ناشی از کاهش بارندگی‌ها به وقوع می‌پیوندد و به دلیل تبعات گسترده اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، از مهم‌ترین بلایای طبیعی به شمار می‌رود. ارزیابی دقیق خشکسالی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب امری ضروری است. در میان شاخص‌های متعدد خشکسالی، شاخص استاندارد شده بارش (SPI) به دلیل سادگی و وابستگی تنها به داده‌های بارش، و شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق (SPEI) به دلیل در نظرگیری همزمان بارش و دما (تبخیر-تعرق)، از پرکاربردترین شاخص‌ها هستند. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه عملکرد و الگوی وقوع خشکسالی بر اساس این دو شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف در غرب ایران، به عنوان یکی از مناطق مهم و نسبتاً پربارش کشور، است.</p> <p>مواد و روش‌ها: این مطالعه در غرب ایران (شامل استان‌های ایلام، لرستان، کردستان، کرمانشاه و همدان) انجام شد. از داده‌های ماهانه دمای کمینه، بیشینه و بارش ۳۲ ایستگاه هواشناسی در یک دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۷-۱۹۸۸) استفاده گردید. پس از بازسازی و کنترل کیفی داده‌ها، تبخیر-تعرق پتانسیل به روش هارگریوز-سامانی محاسبه شد. شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی یک، شش و دوازده ماهه برای کل دوره ۳۰ ساله و نیز دو زیردوره ۱۵ ساله (۲۰۰۲-۱۹۸۸ و ۲۰۱۷-۲۰۰۳) محاسبه گردید. محاسبه SPI با استفاده از نرم‌افزار SPI_SL_6 و برازش توزیع گاما بر داده‌های بارش انجام شد. برای محاسبه SPEI، از تفاضل بارش و تبخیر-تعرق ($D = P - PET$) استفاده و سپس بر روی این داده‌ها توزیع لجستیک عمومی برازش داده شد. پهنه‌بندی مکانی نتایج با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل همبستگی بین دو شاخص با نرم‌افزار SPSS انجام گرفت.</p> <p>یافته‌ها: نتایج نشان داد که در دوره ۳۰ ساله، منطقه در هفت سال (۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۱۹۹۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۷) با خشکسالی فراگیر مواجه بوده است. بر اساس SPI چهار سال (۱۹۹۴، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹، ۲۰۱۵) و بر اساس SPEI شش سال (۱۹۹۲، ۱۹۹۳، ۱۹۹۴، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳، ۲۰۱۵) ترسالی فراگیر رخ داده است. شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر و شدیدتری از خشکسالی را نسبت به SPI در اکثر ایستگاه‌ها نشان داد.</p>

که حاکی از تأثیر مهم عامل دما و تبخیر-تعرق است. در مقیاس ماهانه، در دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۳، شاخص SPEI پنج ماه (ژانویه، سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر) را دارای خشکسالی فراگیر نشان داد، در حالی که SPI تنها دو ماه (اکتبر و دسامبر) را در این شرایط شناسایی کرد. تحلیل همبستگی رابطه معنی‌داری را بین دو شاخص تأیید نمود. بالاترین ضریب همبستگی در مقیاس سالانه برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۳ (۰.۹۳۸) و در مقیاس ماهانه متعلق به ماه‌های فوریه (۰.۹۴۵) و ژانویه (۰.۹۰۸) در دوره ۲۰۰۲-۱۹۸۸ بود. پایین‌ترین همبستگی نیز در ماه‌های نوامبر و اکتبر مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی، شاخص SPEI به دلیل در نظرگیری توأم بارش و دما، حساسیت بیشتری به خشکسالی به ویژه در شرایط افزایش دما نشان می‌دهد و دوره‌های خشک طولانی‌تر و شدیدتری را شناسایی می‌کند. با این وجود، وجود همبستگی قوی در مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت (شش ماهه و یکساله) بین دو شاخص، امکان استفاده از شاخص ساده‌تر SPI را در مناطق فاقد داده‌های دمایی قابل اطمینان فراهم می‌سازد. با توجه به تغییرات اقلیمی و روند افزایش دما، استفاده از شاخص SPEI برای پیش و ارزیابی خشکسالی در منطقه غرب ایران و مناطق مشابه، نتایج واقع‌بینانه‌تری ارائه خواهد داد.

استناد: حیدری، الف. و رحیمی، م. (۱۴۰۴). تحلیل و مقایسه شاخص‌های spi و spei در ارزیابی خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی غرب ایران). *اقلیم و بوم‌سازگان مناطق خشک و نیمه خشک*، ۲(۲)، ۷۵-۹۷.

ناشر دانشگاه سمنان

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.31743.1020>

۱- مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای است که اساساً با کاهش بارش‌های جوی نسبت به میانگین بلندمدت در دوره زمانی معین همراه است که در برخی موارد با افزایش تبخیر و تعرق و افزایش دما و تابش، کاهش رطوبت نسبی و وقوع بادهای شدید در یک منطقه مرتبط است. خشکسالی، کمبود رطوبت مستمر و غیرطبیعی تعریف شده و پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌رود که بیشتر نقاط جهان با آن روبه‌روست (Yousefi et al., 2017). خشکسالی به سبب تعداد، فراوانی، تداوم، گستردگی و تبعات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی، از جمله مهمترین حوادث طبیعی به شمار می‌رود (Bagheri and Mohammadi, 2012) بر همین اساس نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های کلان مدیریتی برای رسیدن به اهداف توسعه پایدار دارد. ارزیابی خشکسالی از نظر برنامه‌ریزی‌های کاربردی برای آینده و برآورد خسارت و حتی‌الامکان کاهش اثرات آن با استفاده از تصمیم‌گیری‌های درست و کاربردی ضروری است. براساس نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه خشکسالی، مشخص شده است که بارندگی، دما، تبخیر، باد و رطوبت نسبی نقش مهمی در وقوع، شدت و تداوم خشکسالی دارند. با وجود این بارش مهمترین عامل در تعیین آغاز شدت و خاتمه خشکسالی‌ها است (Soltani and Saadati, 2007, Shahabi and Zabihi, 2015, Chang and Cleopa, 1998). رویه‌ای که از آمار و اطلاعات رسمی و ثبت شده برمی‌آید بیانگر این مطلب است که تغییر اقلیم در کشور سبب افزایش دما، افزایش تبخیر، کاهش بارش و نهایتاً خشکسالی می‌شود. کاهش بارش از یک طرف و تغییر نوع بارش‌ها در گذر زمان، از ملایم به رگباری از طرف دیگر سبب

تشدید خشکسالی در مناطق مختلف شده است. برای تعیین خشکسالی هواشناسی شاخص های متعددی توسط محققین ارایه شده است از مهمترین و کارآمدترین این شاخص ها می توان به SPI^a و $SPEI^b$ اشاره کرد. کارهای تحقیقاتی بسیاری با شاخص SPI در سرتاسر جهان انجام شده است و استفاده کنندگان از این شاخص در دنیا رو به افزایش است (Hayes et al., 1999). سلیمانی ساردو و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه پهنه بندی و تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد SPI در استان کرمان به این نتیجه رسیدند که تاثیر خشکسالی بیشتر در نواحی جنوب و جنوب شرق استان مشاهده گردید. ایوضی و مساعدی (۲۰۱۱) به بررسی و تعیین مناسب ترین نمایه خشکسالی اقلیمی در سطح استان گلستان پرداختند. به همین منظور از داده های ۲۰ ایستگاه باران سنجی با دوره ی آماری مشترک سی ساله استفاده نمودند و بعد از محاسبه و کمی سازی وضعیت رطوبتی با استفاده از چهار نمایه DI ، $PNPI$ ، SPI و ZSI به منظور بررسی و تعیین مناسب ترین نمایه از کمیته بارندگی در هر ایستگاه استفاده شد و نتایج آن نشان داد که به جز دو ایستگاه، تمام ایستگاه های مورد مطالعه وقوع خشکسالی بسیار شدید با وقوع کمیته بارندگی مقارن بوده است. خلیلی (۲۰۱۱) در تجزیه و تحلیل مقایسه ای رفتار شاخص های خشکسالی هواشناسی $SPEI$ و SPI در ایستگاه های منتخب کشور به همبستگی معنی دار میان شاخص ها، با به کارگیری آزمون های پارامتری و ناپارامتری در سطح اطمینان ۹۵ درصد اشاره کرده است. نصرتی (۲۰۱۳) با هدف بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش و تبخیر - تعرق استاندارد شده در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در گستره اقلیم های گوناگون کشور و مقایسه با شاخص بارش استاندارد شده در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۷ روشن ساخت که شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش و تبخیر تعرق استاندارد شده دارای همبستگی معنی دار است اما شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده پاسخ سریع تری نسبت به خشکسالی دارد. تاجبخش و همکاران (۲۰۱۴) خشکسالی هواشناسی در ایران را در دوره یک ساله (چهار فصل) با استفاده از شاخص استاندارد شده تبخیر- تعرق ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که عامل تبخیر و تعرق نقش موثری در تغییر شدت (افزایش یا کاهش) خشکسالی دارد. ایشان استفاده از عامل تبخیر- تعرق را در کنار عامل بارش برای تحلیل خشکسالی توصیه کردند. خلیلی و بنی مهد (۲۰۱۳) در تجزیه و تحلیل مقایسه ای رفتار شاخص های خشکسالی هواشناسی $SPEI$ و SPI در ایستگاه های منتخب کشور به همبستگی معنی دار میان شاخص های به کارگیری آزمون های پارامتری و ناپارامتری در سطح اطمینان ۹۵٪ اشاره کردند. احمدی و همکاران (۲۰۱۳) با هدف بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده در ۱۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی در گستره اقلیم های گوناگون کشور و مقایسه با شاخص SPI در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۷ روشن ساختند که شاخص $SPEI$ و SPI دارای همبستگی معنی دار است اما شاخص $SPEI$ پاسخ سریع تری نسبت به خشکسالی دارد. قبایعی سوق و همکاران (۲۰۱۸) از شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده ($SPEI$) برای تحلیل خشکسالی تحت شرایط تاثیر تغییر اقلیم استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مزیت شاخص $SPEI$ نسبت به SPI توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در پیوند با گرمایش جهانی را دارد. مصطفی زاده و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تحلیل و مقایسه دو شاخص خشکسالی $SPEI$ و SPI در استان کردستان نشان دادند که ضمن وجود تفاوت در دو الگوی وقوع ترسالی و خشکسالی در دو شاخص مذکور، شاخص $SPEI$ دوره های طولانی تر خشکی را در اکثر ایستگاه ها مشخص کرد. دماوندی و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی پیش

^a Standardized Precipitation Index (SPI)

^b Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

خشکسالی استان مرکزی از طریق شاخص پوشش گیاهی VTCI و داده‌های دورسنجی MODIS، در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ به این نتیجه رسیدند که بیشترین درصد مساحت خشکسالی مربوط به طبقه‌ی متوسط و کمترین درصد مربوط به طبقه‌ی مرطوب بوده است. همچنین سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۰ دارای بیشترین درصد طبقه‌ی شدیداً مرطوب بوده‌اند. کوشکی و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی رابطه زمانی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز کرخه با محاسبه دو شاخص خشکسالی SDI و SPI در گام زمانی کوتاه‌مدت (یک‌ماهه و سه‌ماهه) میان مدت (شش‌ماهه) و بلند مدت (دوازده‌ماهه) به این نتیجه رسیدند که خشکسالی هیدرولوژیکی با تاخیر زمانی خیلی کوتاه در حوضه آبریز کرخه پس از خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد. پیشینه تحقیق علیجانی و بابایی (۲۰۰۹) پدیده خشکسالی در ایران را با استفاده از شاخص SPI مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادند نتایج این تحقیق نشان داد که در قسمت های شمال غرب، شمال و شمال شرق کشور خشکسالی‌ها بسیار شدید است در صورتی که در مناطق مرکز، جنوب و جنوب شرق خشکسالی‌ها متوسط و ملایم می‌باشد. گرم شدن آب و هوای جهانی باعث افزایش همزمان خشکسالی و امواج گرمایی می‌شود (Hao et al., 2014). افزایش درجه حرارت جهانی (Perkins et al., 2012) به طور قابل ملاحظه‌ای این احتمال را افزایش می‌دهد که پدیده خشکسالی و امواج گرما به‌طور همزمان اتفاق بیفتد. از دسترس خارج شدن مقدار زیادی از بارش بر اثر تبخیر و تعرق (حدود ۸۰٪) بر اهمیت لحاظ دیگر متغیرها از جمله دما و تبخیر و تعرق برای تعیین خشکسالی تاکید دارد (Abramopoulos et al., 1988).

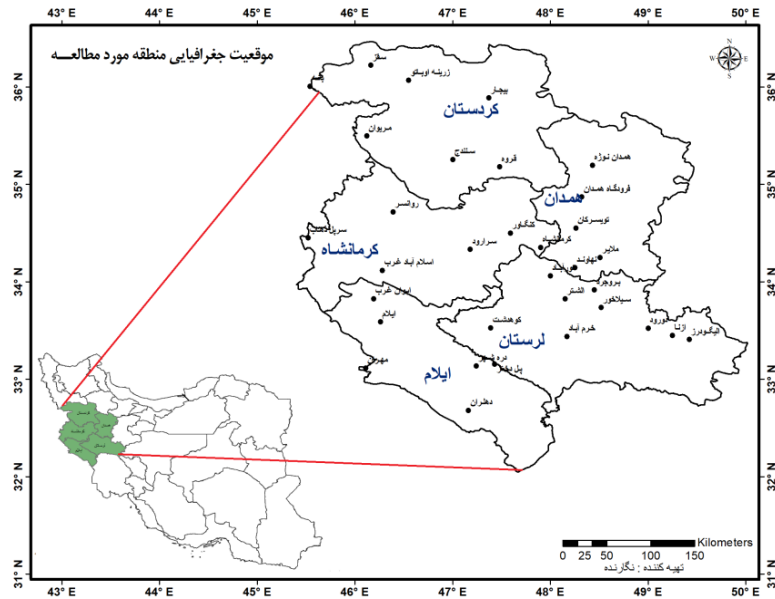
Livia و همکاران (۲۰۱۴) شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI را با استفاده از داده‌های مدل COSMO در دو حوزه آبخیز اسلوواکی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که همبستگی کمی بین این دو شاخص در جنوب اسلوواکی در مقیاس زمانی سه ماهه وجود دارد. همچنین ایشان بر نقش مهم تبخیر و تعرق بر خشکسالی در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان تاکید داشتند. Stagge و همکاران (۲۰۱۵) نیز به مقایسه توزیع‌های فراوانی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در اروپا پرداختند. ایشان توزیع‌های دوپارامتری گاما و مقادیر حد عمومی را به ترتیب برای شاخص SPI و SPEI مناسب تشخیص دادند. Bordi و همکاران (۲۰۱۱) جهت بررسی شرایط خشکسالی در ایتالیا از شاخص بارش استاندارد شده SPI استفاده نمودند. دوسو و سومالیا (۲۰۰۷) در بررسی خشکسالی‌های هواشناسی غرب آفریقا شاخص SPI را برای مقادیر بارش صفر اصلاح کردند از معایب شاخص استاندارد شده بارش عدم محاسبه در ماه‌های فاقد بارش است. که در برخی از ماه‌های موجود در ایستگاه‌ها دارای بارش نباشند شاخص بارش استاندارد شده قادر به تجزیه و تحلیل داده‌ها و تعیین وضعیت ترسالی و خشکسالی در کل دوره در همان ماه را ندارد (Bazrafshan., 2017). Mozny و Potop (۲۰۱۱) شاخص جدید خشکسالی SPEI را در جمهوری چک مورد بررسی قرار دادند و بر توانایی شاخص SPEI در تشخیص شدت خشکسالی تأکید کرده و افزایش وقوع خشکسالی در پنج دهه مورد بررسی را مورد تایید قرار دادند. Meza (۲۰۱۳) با بررسی تاثیر روند پدیده دورپیوندی النینو-نوسانات جنوبی بر روی خشکسالی‌های شیلی با استفاده از شاخص بارش تبخیر تعرق استاندارد شده SPEI دریافت که در صورت عدم مدیریت منابع آب، چالش بزرگی پیش روی حوضه نشینان خواهد بود. Tomros و Menzel (۲۰۱۴) به تحلیل و بررسی شرایط خشکسالی حال حاضر و آینده در اردن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که

شاخص خشکسالی SPEI شش ماهه بالاترین ارتباط را با رطوبت خاک برآوردی دارد و بهترین شاخص برای تبیین تغییرات میان سالانه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) ماهانه است.

کمبود بارش و نوسان های شدید آن، سبب عدم اطمینان کافی برای دریافت حداقل بارش مورد نیاز جهت مصارف کشاورزی، تغذیه آب های سطحی و مصارف انسانی می شود. از طرفی افزایش تقاضا برای آب به سبب فعالیت های کشاورزی، صنعتی و شرب، تغییرات اقلیمی (افزایش دما و کاهش بارندگی) به مرور زمان بر منابع آبی تأثیر منفی گذاشته و کشاورزی را تحت تأثیر قرار می دهد از این رو، خشکسالی به عنوان یکی از موضوعات مهم در مطالعه بلایای طبیعی و تأثیرگذار در کشاورزی مطرح می شود که در چند دهه اخیر از دیدگاه های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در سال های اخیر، به دلیل وقوع متعدد خشکسالی، مطالعات در این زمینه افزایش یافته و محققان برای پایش خشکسالی از روش ها و شاخص های متفاوتی استفاده کرده اند. نظر به اینکه بارندگی عمده منبع تامین آب شیرین برای کشاورزی، مصارف خانگی و صنعتی است و تغییرات آن می تواند از اثرات خفیف بر زندگی شخصی تا مصایب بزرگ در سطح ملی انجامد، و از آنجایی که منطقه کوهستانی پربارش غرب کشور سهم عمده ای در تامین منابع آبی کشور دارد، بررسی و کارایی شاخص های خشکسالی در برآورد میزان خشکسالی غرب کشور در مدیریت منابع آبی کشور از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین در این پژوهش به بررسی کارایی دو شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و شاخص بارش و تبخیر- تعرق (SPEI) در دوره آماری ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ در غرب ایران پرداخته می شود. نظر به اینکه بارندگی عمده منبع تامین آب شیرین برای کشاورزی، مصارف خانگی و صنعتی است و تغییرات آن می تواند از اثرات خفیف بر زندگی شخصی تا مصایب بزرگ در سطح ملی انجامد. از آنجایی که منطقه کوهستانی پربارش غرب کشور سهم عمده ای در تامین منابع آبی کشور دارد، بررسی و کارایی شاخص های خشکسالی مذکور در مدیریت منابع آبی کشور از اهمیت بسزایی برخوردار است. بررسی ویژه کارایی شاخص های خشکسالی در مدیریت منابع آبی، امکان پیش بینی وضعیت آبی، برنامه ریزی بهینه برای مصرف آب و اتخاذ تدابیر مناسب برای مقابله با بحران های آبی را فراهم می آورد و به تضمین پایداری منابع آبی کشور در درازمدت کمک می کند.

۲- مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش غرب کشور که شامل ۵ استان کرمانشاه، کردستان، همدان، ایلام و لرستان می باشد که در مجموع حدود ۷/۴۲ درصد از مساحت کشور را با وسعت ۱۲۲۱۰۷ کیلومتر مربع به خود اختصاص می دهد (شکل ۱). این منطقه با بیشترین تداوم بارش یک روزه (Nazaripour., 2014) و میانگین بارش ۴۰۰ میلیمتر، دومین منطقه پربارش کشور (Keikhosrvaï Kiany and Masoudian., 2017) با تمرکز بارش زمستانه (ژانویه) محسوب می شود. همچنین این منطقه به لحاظ دمایی در منطقه کوهستانی کشور با زمستان سرد و تابستان نسبتاً گرم با اختلاف دامنه دمایی زیاد قرار دارد که پایین ترین دماها در ژانویه و بالاترین دماها در جولای گزارش می شود.



شکل ۱. پراکنش و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی منطقه مورد مطالعه در غرب ایران

Fig. 1. The distribution and location of synoptic stations in the study area in Western Iran.

داده‌های بارندگی ماهانه و متوسط حداکثر و حداقل دمای ماهانه برای ۳۲ ایستگاه هواشناسی همدیدی منطقه مذکور طی دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۸۸ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. پس از بررسی اولیه داده‌ها به علت برخی از خلاءهای آماری، بازسازی نواقص آماری به روش همبستگی بین ایستگاه‌ها انجام شد. تبخیر و تعرق پتانسیل به منظور استفاده در شاخص SPEI با روش هارگریوز محاسبه شد (Alizadeh., 2006). مقدار شاخص SPI و SPEI در هریک از ایستگاه‌های منتخب در مقیاس‌های زمانی یک، شش و دوازده ماهه برای دوره زمانی ۳۰ ساله ۲۰۱۷ تا ۱۹۸۸ و دو دوره ۱۵ ساله (۲۰۰۲-۱۹۸۸ و ۲۰۱۷-۲۰۰۳) استخراج شد. قابل ذکر است جهت استخراج SPI از نرم افزار SPL_SL_6 استفاده شد که از سری مجموع بارش‌های ماهانه استفاده گردید. داده‌های بارش بر توزیع گامای دو متغیره برازش داده شد که خروجی آن برای هر ماه بیانگر شدت خشکسالی یا ترسالی در آن ماه می‌باشد. داده‌های بارش استفاده شده در روش شاخص بارش استاندارد شده، در روش شاخص SPEI، قبل از ورود به محاسبات اصلاح شدند. خروجی SPEI نیز شبیه خروجی SPI برای هر ماه بیانگر شدت خشکسالی یا ترسالی در آن ماه می‌باشد (جدول ۱). سپس خروجی دو شاخص با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پهنه‌بندی شدند. در نهایت با استفاده از نرم افزار SPSS همبستگی مقادیر محاسبه شده شاخص‌های SPI و SPEI بررسی شد. نمودارهای این دو شاخص نیز با استفاده از Excel کشیده شده و سپس این دو شاخص از روی نقشه‌ها و نمودارها مقایسه و ارزیابی شدند. برای دقت بیشتر در این ارزیابی آزمون‌های آماری نیز بر روی مقادیر این دو شاخص توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد. سپس توسط آزمون تی مستقل که جزو آزمون‌های پارامتری هست تحلیل و مقایسه انجام شد.

۱-۲- شاخص استاندارد شده بارش SPI

در سال ۱۹۹۳ برای اولین بار شاخص استاندارد شده بارش توسط مک کی و همکارانش معرفی گردید. (مک کی و همکاران ۱۹۹۳). در این روش داده‌های بارش برای بازه زمانی مشخص، بصورت تابع توزیع تجمعی احتمالاتی بر تابع توزیع گاما برازش داده می‌شود تا مقدار معادل آن بر توزیع نرمال شناسایی شود. شرح کامل این روش در مقاله (مک کی و همکاران ۱۹۹۳) موجود است. اساساً شاخص استاندارد شده بارش بر مبنای احتمال تجمعی بارش بدست می‌آید و لذا دوره‌های کاهش بارش را به خوبی نمایان می‌کند. بدلیل اهمیت این شاخص، روش محاسبات آن در اینجا توضیح داده می‌شود. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، مشخص شد که توزیع احتمالی بارش یک ایستگاه معمولاً از توزیع گاما پیروی می‌کند که تابع چگالی احتمال این توزیع بصورت رابطه (۱) است:

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

در این رابطه، x مقدار متغیر، α ، β به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس توزیع هستند. $\Gamma(\alpha)$ نیز تابع ضربی گاما است که بر اساس رابطه (۲) به دست می‌آید:

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

استفاده از روش بیشینه درست نمایی برای برآورد پارامترهای توزیع گاما مناسب است که البته نیاز به رایانه و الگوریتم‌های تکراری دارد. روش تام (۱۹۵۸) نیز یکی از روش‌های محاسبه پارامترها است. (ویسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). بر اساس این روش ضریب‌های بهینه α و β به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\bar{x}}{\beta} \quad (3)$$

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

$$n = \text{تعداد داده‌ها} \quad \text{و} \quad A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

نکته‌ای در محاسبات شاخص بارش استاندارد شده قابل ذکر است و آن اینکه تابع توزیع گامای دو متغیره برای مقادیر بارش صفر قابل محاسبه نیست و لذا در صورتیکه با انتخاب بازه زمانی مشخصی، مقادیر بارش صفر در داده‌ها موجود باشد، نمی‌توان از تابع توزیع گامای دو متغیره با روش فوق استفاده کرد اما می‌توان با اصلاح روش ذکر شده این مشکل را حل کرد.

۲-۲- اصلاح روش محاسبه شاخص استاندارد شده بارش SPI در حضور داده‌های صفر

داده‌های صفر باید از سایر داده‌ها جدا شده و احتمال رخداد داده صفر محاسبه شود. برای این منظور تعداد داده‌های صفر تقسیم بر تعداد کل داده‌ها، احتمال رخداد داده صفر در نظر گرفته می‌شود. سپس روش فوق برای سایر داده‌ها قابل انجام است و تابع توزیع تجمعی نهایی بصورت زیر قابل استفاده می‌باشد:

$$P(0) + (1 - P(0))G(\alpha, \beta)$$

که در آن $p(0)$ احتمال رخداد داده صفر و G تابع توزیع تجمعی داده‌های غیر صفر است. به این ترتیب تابع توزیع تجمعی بدست آمده برای یک مقدار بسیار کوچک مثبت دارای مقداری قابل توجه است و اثر حضور داده‌های صفر در آن دیده می‌شود. شاخص استاندارد شده بارش اساساً برای تعریف و آشکارسازی خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف ارایه گردیده است. بر این مبنا مقدار شاخص بارش استاندارد شده در هر بازه زمانی، گویای وضعیت خشکسالی در همان بازه زمانی می‌باشد. مک‌کی و همکارانش مقادیر مختلف شاخص بارش استاندارد شده را به شدت‌های مختلف خشکسالی و یا ترسالی نسبت دادند که در جدول ۱ دیده می‌شود. این شاخص امکان بررسی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی گوناگون را فراهم می‌کند.

۲-۳- شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق SPEI

شاخص SPEI در سال ۲۰۱۰ توسط ویسته سرانو و همکارانش برای ارزیابی خشکسالی ارایه گردید (سرانو و همکاران ۲۰۱۰). اصول کلی محاسبه این شاخص، مانند روش شاخص بارش استاندارد شده است. اما ۲ تفاوت اساسی در نحوه محاسبه این دو شاخص وجود دارد. سرانو و همکارانش تابع توزیع لوگ لجستیک را برای برازش داده‌ها مناسب دانسته‌اند در حالیکه مک‌کی و همکارانش در روش شاخص بارش استاندارد شده، تابع توزیع گاما را برای برازش داده‌ها مناسب دانسته‌اند. داده‌های بارش در روش شاخص SPEI، قبل از ورود به محاسبات اصلاح می‌شوند. این اصلاح بصورت کم کردن مقدار تبخیر و تعرق از مقدار بارش خالص است و لذا در محاسبه این شاخص، از پارامترهای دیگر مانند دما نیز استفاده می‌شود. در واقع سرانو و همکارانش تاثیر از دست رفتن آب بدلیل فرایندهای تبخیر و تعرق را در محاسبات روش شاخص بارش استاندارد شده لحاظ کردند تا از این طریق مقدار آب قابل دسترس در منابع آبی به واقعیت نزدیک‌تر شود. ماوروماتیس (۲۰۰۷) نشان داد که استفاده از روش‌های ساده یا پیچیده برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در تعیین شاخص PDSI نتایج مشابهی دارند، از این رو ویسته سرانو و همکاران (۲۰۰۹) از ساده‌ترین روش استفاده کرده‌اند که توسط تورنت وایت ۱۹۴۸ ارایه شد.

$$ETP = 16K \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (5)$$

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} \quad (6)$$

$$I = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (7)$$

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (8)$$

که در این روابط، T دمای میانگین ماهانه به درجه سلسیوس، m ضریب وابستگی به I شاخص گرما یا مجموع شاخص دوازده ماهه K، i یک ضریب تصحیحی بر حسب ماه و عرض جغرافیایی است که به صورت رابطه (8) محاسبه شده است: که در آن، NDM تعداد روزهای یک ماه و N بیشینه تعداد ساعات‌های تابش است. به این ترتیب با در دست داشتن مقدار ETP اختلاف بین بارش (P) و (ETP) برای ماه i ام به دست می‌آید.

$$Di = Pi - ETPi \quad (9)$$

$$F(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (10)$$

محاسبه SPEI به توزیع سه پارامتری نیاز دارد. تابع توزیع احتمال سری‌های D براساس رابطه (10) است:

$$\left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (11)$$

که در آن α ، β و x به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و مبدأ برای مقادیر D هستند (سینگ و همکاران، ۱۹۹۳). مقادیر $F(x)$ برای سری D در مقیاس‌های زمانی مختلف به خوبی با مقادیر تجربی دیدبانی شده $F(x)$ همخوانی دارد. به این ترتیب SPEI می‌تواند به سادگی از مقادیر استاندارد شده $F(x)$ محاسبه شود. برای مثال تقریب کلاسیک ابراموویتز و تگان (۱۹۶۵) در ادامه آمده است:

$$SPEI = W - \frac{C_0 C_1 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (12)$$

که در آن، $W = \sqrt{-2 \ln(p)}$ برای $P \leq 0.5$ و احتمال بیشتر شدن مقادیر تعیین شده D است. مقادیر C_0 ، C_1 و C_2 و همچنین d_0 ، d_1 و d_2 ثابت هستند. میانگین مقادیر SPEI صفر و انحراف استاندارد معادل ۱ است. شاخص SPEI یک متغیر استاندارد شده است، بنابراین می‌تواند با سایر مقادیر SPEI در مکان و زمان مقایسه شود. مقدار SPEI معادل صفر به معنای مقادیر منطبق با ۵۰ درصد احتمال تجمعی D است.

جدول ۱. مقدار شاخص SPI و SPEI و شدت خشکسالی و ترسالی

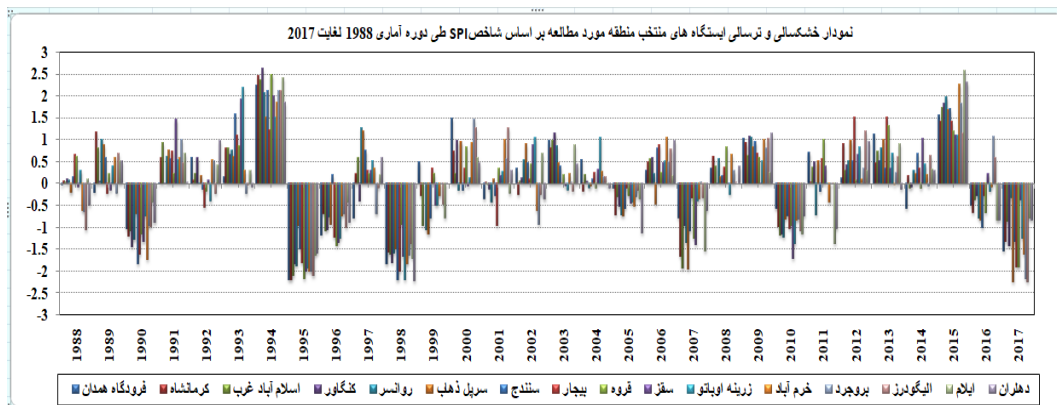
Table 1. SPI and SPEI index values and the intensity of drought and wetness.

شدت پدیده	مقدار شاخص
Severity of the phenomenon	Index value
خشکسالی بسیار شدید	< -2
Highly intense drought	
خشکسالی شدید	-2 to -1.5
Intense drought	

خشکسالی متوسط	-1.5 to -1
Moderate drought	
خشکسالی ضعیف	-1 to -0.5
Weak drought	
نرمال	-0.5 to 0.5
Normal	
ترسالی ضعیف	0.5 to 1
wetness Weak	
ترسالی متوسط	1 to 1.5
wetness Moderate	
ترسالی شدید	1.5 to 2
wetness Intense	
ترسالی بسیار شدید	> 2
Highly intense wetness	

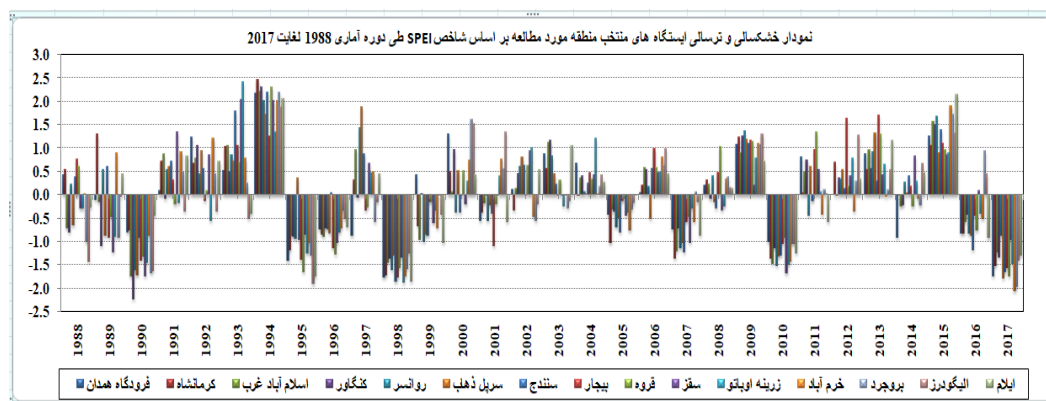
۳- نتایج و بحث

بر پایه شکل‌های ۲ و ۳، طی بازه زمانی ۳۰ ساله بر اساس دو شاخص SPI و SPEI منطقه مورد مطالعه هفت سال درگیر خشکسالی فراگیر بوده است. این خشکسالی‌ها در سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۱۹۹۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ رخ داده است. همچنین بر اساس خروجی SPI حدود چهار سال (۱۹۹۴، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵) و بر اساس خروجی SPEI حدود شش سال (۱۹۹۲، ۱۹۹۴، ۱۹۹۳، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵) از دوره زمانی مورد مطالعه همراه با ترسالی فراگیر بوده است. قابل ذکر است با توجه به شاخص SPI و SPEI منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۹ و ۱۷ سال بصورت غالب حالت نرمال را تجربه کرده است. براساس نتایج خروجی SPI و SPEI در دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه در ایستگاه‌های منتخب میزان فراوانی خشکسالی در شاخص SPEI و SPI به ترتیب ۳۱٪ و ۲۸٪، حالت نرمال به ترتیب ۳۷٪ و ۴۰٪ و ترسالی در هر دو شاخص ۳۲٪ بوده است.



شکل ۲. شدت خشکسالی و ترسالی ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPI در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۱۷

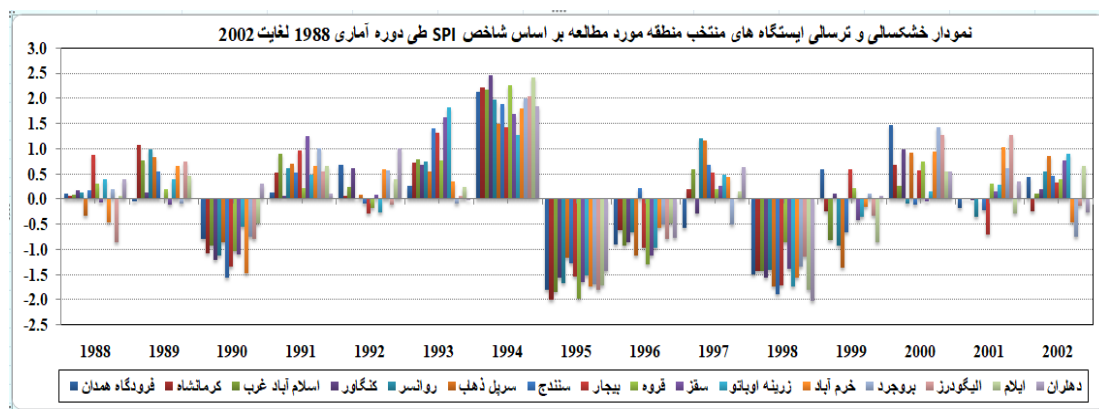
Fig. 2. The intensity of drought and wetness in the study area based on the SPI index during the statistical period 1988-2017.



شکل ۳. شدت خشکسالی و ترسالی ایستگاه های منتخب بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۱۷

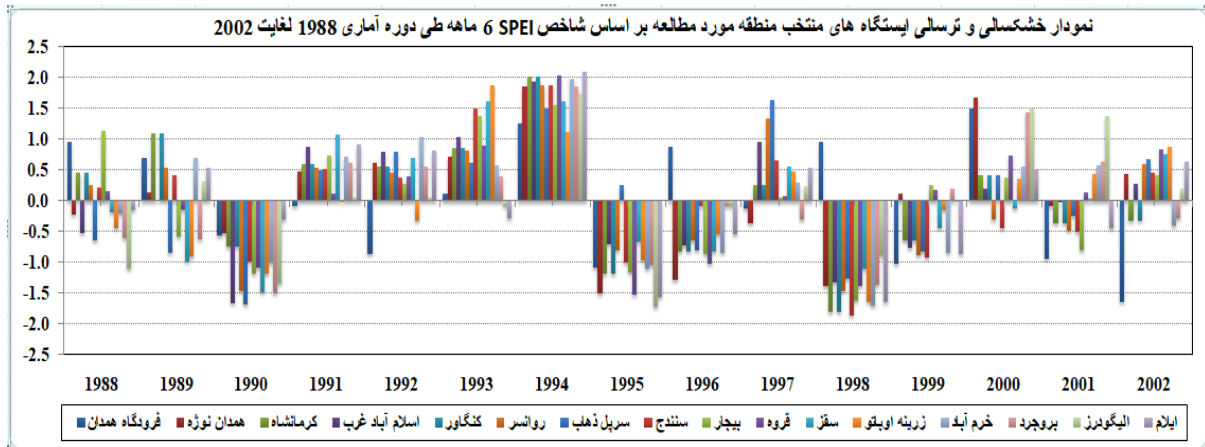
Fig. 3. The intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPEI index during the statistical period 1988-2017.

با توجه به شکل های ۴ و ۵ طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۷) بر اساس خروجی SPI، سه سال در منطقه مورد مطالعه درگیر خشکسالی فراگیر بوده است. این خشکسالی ها در سال های ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ رخ داده است. این شرایط بر اساس خروجی SPEI، دو سال (۲۰۱۰ و ۲۰۱۷) بوده است. همچنین بر اساس خروجی SPI و SPEI دو سال (۲۰۰۹ و ۲۰۱۵) از دوره زمانی مورد مطالعه همراه با ترسالی فراگیر بوده است. قابل ذکر است با توجه به شاخص SPI و SPEI منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۰ و ۱۱ سال بصورت غالب حالت نرمال را تجربه کرده است. براساس نتایج خروجی SPI و SPEI شش ماهه ایستگاه های منتخب مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۳ لغایت ۲۰۱۷ فراوانی انواع خشکسالی ها در شاخص SPEI در مقایسه با SPI بیشتر بوده به نحویکه در دوره زمانی مذکور در ایستگاه های منتخب میزان فراوانی خشکسالی در شاخص SPEI و SPI به ترتیب ۳۱٪ و ۲۷٪ درصد، حالت نرمال به ترتیب ۴۰٪ و ۴۳٪ و ترسالی به ترتیب ۲۹٪ و ۳۰٪ بوده است. همچنین براساس دو شاخص SPI و SPEI طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۱۹۸۸-۲۰۰۲) بر اساس خروجی SPI، یک ماه (اکتبر) در منطقه مورد مطالعه درگیر خشکسالی فراگیر بوده است (شکل های ۳ و ۴). بر اساس خروجی SPEI هیچ ماه از سال در بازه زمانی فوق خشکسالی فراگیر که بیش از ۵۰٪ منطقه را فرا گیرد وجود نداشته است. همچنین بر اساس خروجی SPI ماه سپتامبر دارای ترسالی فراگیر بوده ولی در شاخص SPEI چنین شرایطی رخ نداده است.



شکل ۴. شدت خشکسالی و ترسالی ایستگاه های منتخب بر اساس شاخص SPI در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۰۲

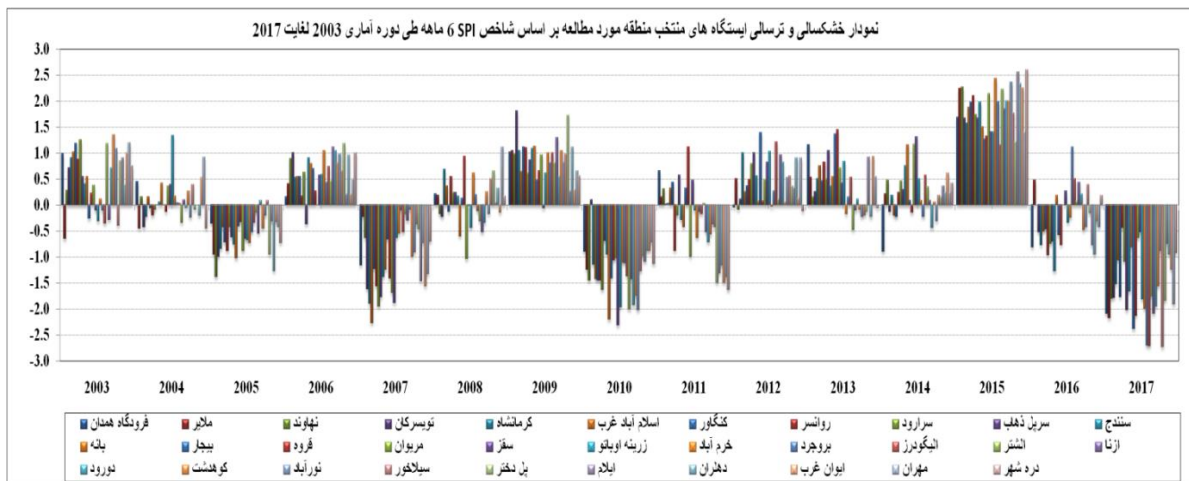
Fig. 4. The intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPI index during the statistical period 1988-2002.



شکل ۵. شدت خشکسالی و ترسالی ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۰۲

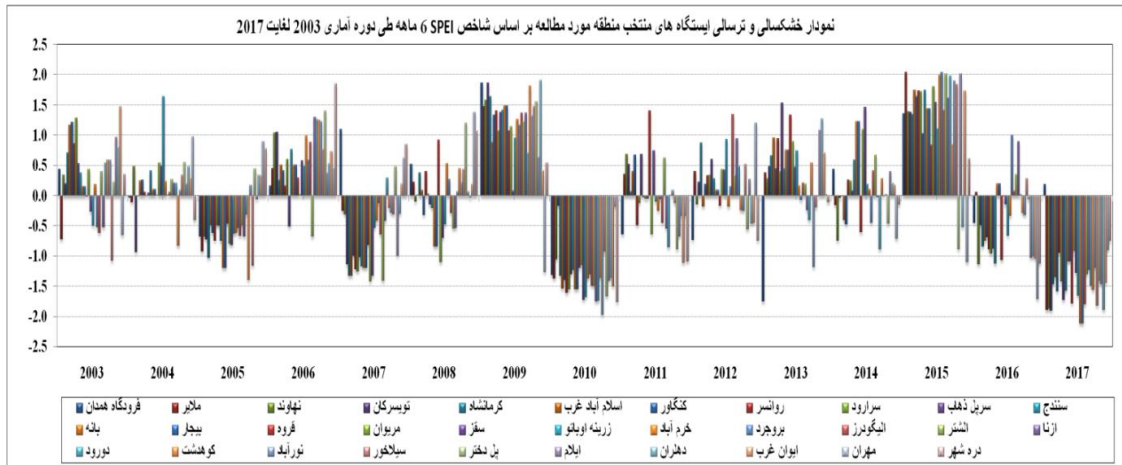
Fig. 5. The intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPEI index during the statistical period 1988-2002.

قابل ذکر است با توجه به شاخص SPI و SPEI منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۰ و ۱۲ ماه بصورت غالب حالت نرمال را تجربه کرده است. براساس نتایج خروجی SPI و SPEI ماهانه ایستگاه‌های منتخب مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۸۸ لغایت ۲۰۰۲ فراوانی انواع خشکسالی‌ها در شاخص SPI در مقایسه با SPEI بیشتر بوده به نحویکه در دوره زمانی مذکور در ایستگاه‌های منتخب منطقه مورد مطالعه میزان فراوانی خشکسالی در شاخص SPI و SPEI به ترتیب ۱۸٪ و ۱۵٪ درصد، حالت نرمال به ترتیب ۶۴٪ و ۶۵٪ و ترسالی به ترتیب ۱۹٪ و ۲۰٪ بوده است



شکل ۶. شدت خشکسالی و ترسالی ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۲۰۰۳-۲۰۱۷

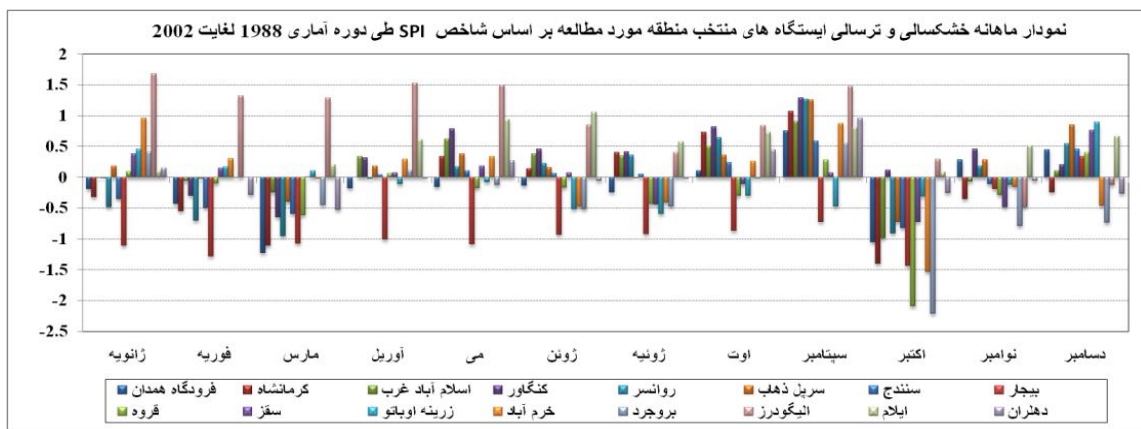
Fig. 6. The intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPI index during the statistical period 2003-2017.



شکل ۷. شدت خشکسالی و ترسالی ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۲۰۰۳-۲۰۱۷

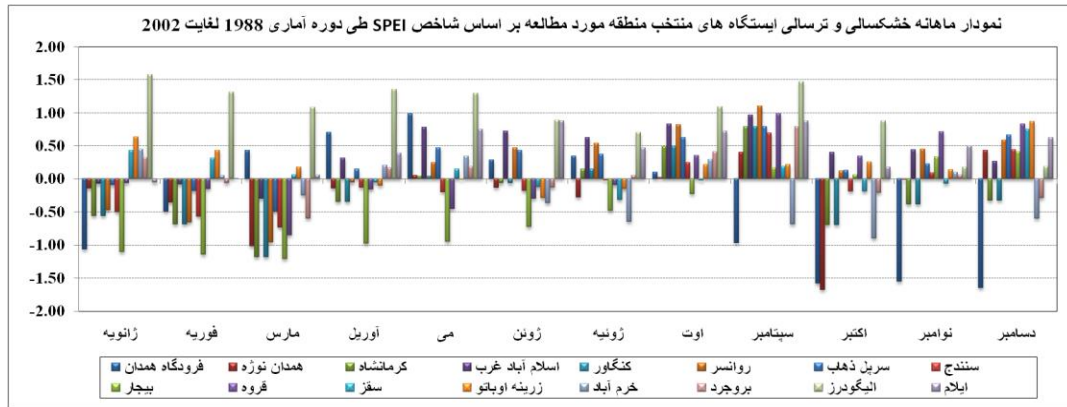
Fig. 7. The intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPEI index during the statistical period 2003-2017.

بر اساس نتایج خروجی SPI و SPEI ماهانه ایستگاه‌های منتخب مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۳ لغایت ۲۰۱۷ فراوانی انواع خشکسالی‌ها در شاخص SPEI در مقایسه با SPI بیشتر بوده به نحویکه در دوره زمانی مذکور در ایستگاه‌های منتخب میزان فراوانی خشکسالی در شاخص SPEI و SPI به ترتیب ۴۱٪ و ۳۰٪، حالت نرمال به ترتیب ۳۸٪ و ۴۰٪ و ترسالی به ترتیب ۲۱٪ و ۳۰٪ بوده است (شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱).



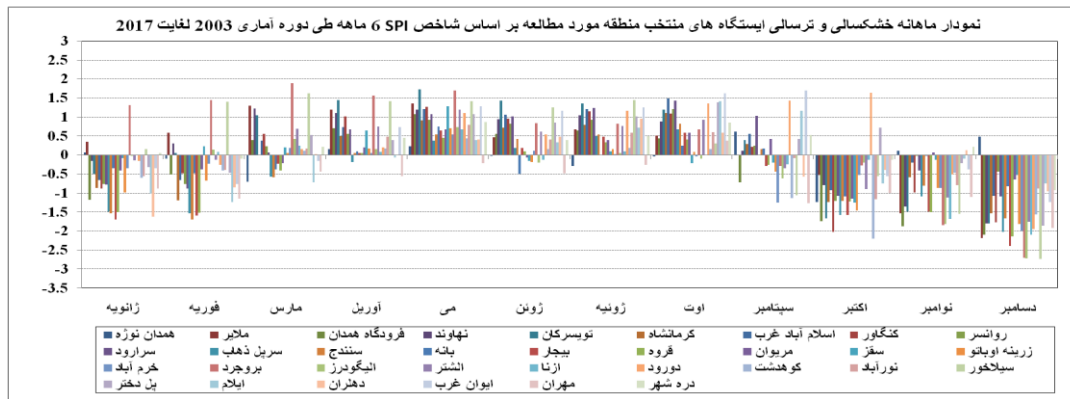
نمودار ۸. شدت خشکسالی و ترسالی ماهانه ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPI در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۰۲

Fig. 8. The monthly intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPI index during the statistical period 1988-2002.



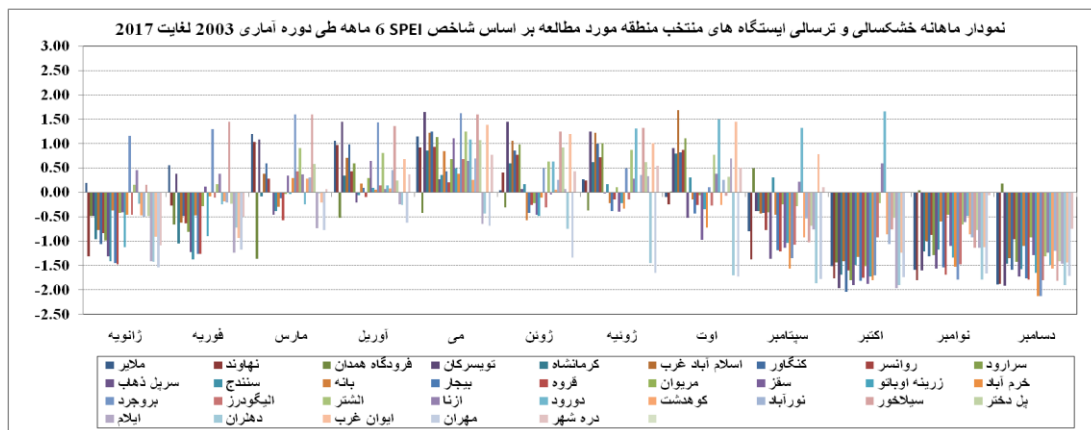
شکل ۹. شدت خشکسالی و ترسالی ماهانه ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۰۲

Fig. 9. The monthly intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPEI index during the statistical period 1988-2002.



شکل ۱۰. شدت خشکسالی و ترسالی ماهانه ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPI در دوره آماری ۲۰۰۳-۲۰۱۷

Fig. 10. The monthly intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPI index during the statistical period 2003-2017.

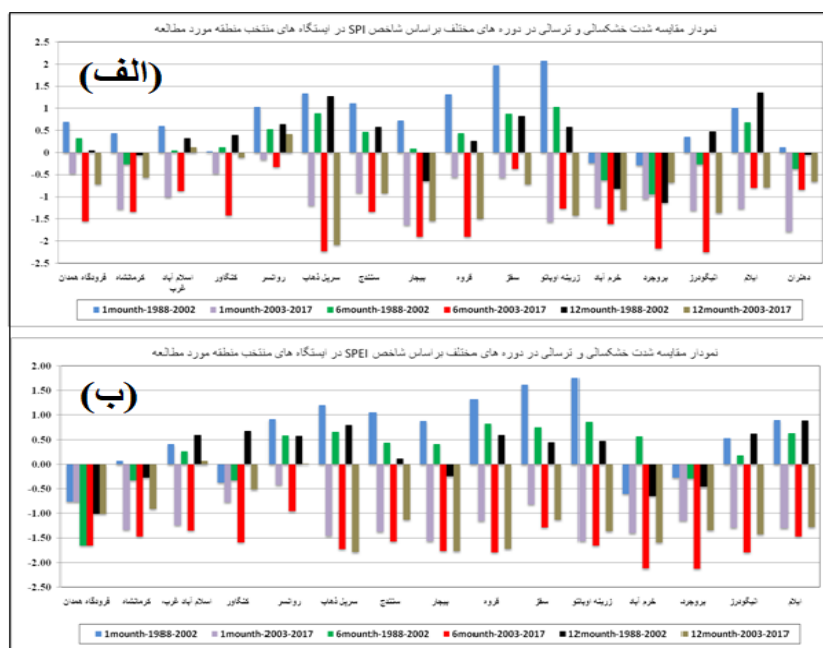


در دوره آماری ۲۰۰۳-۲۰۱۷ SPEI شکل ۱۱. شدت خشکسالی و ترسالی ماهانه ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص

Fig. 11. The monthly intensity of drought and wetness in the selected stations based on the SPEI index during the statistical period 2003-2017.

همچنین براساس دو شاخص SPI و SPEI طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۷) بر اساس خروجی SPI، دو ماه (اکتبر و دسامبر) در منطقه مورد مطالعه درگیر خشکسالی فراگیر بوده است. بر اساس خروجی SPEI، ماه های ژانویه، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر (۵ ماه از سال) دارای خشکسالی فراگیر بوده اند. همچنین بر اساس خروجی SPI، ماه های می، ژوئیه و اوت دارای ترسالی فراگیر بوده ولی در شاخص SPEI تنها در ماه می چنین شرایطی رخ داده است. قابل ذکر است با توجه به شاخص SPI و SPEI منطقه مورد مطالعه به ترتیب هفت و شش ماه بصورت غالب حالت نرمال را تجربه کرده است.

شکل ۱۲ (الف) مقایسه نتایج خروجی SPI یک، شش و دوازده ماهه دو دوره آماری ۱۵ ساله ۱۹۸۸-۲۰۰۲ و ۲۰۰۳-۲۰۱۷ ایستگاه های منتخب مورد مطالعه می باشد. براساس اطلاعات مذکور در بازه زمانی ۱۹۸۸-۲۰۰۲ به ترتیب ۰، ۱۳ و ۱۹ درصد منطقه درگیر خشکسالی های یک، شش و دوازده ماهه بوده و این شرایط برای بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ به ترتیب ۸۸، ۸۸ و ۸۱ درصد بوده است. شکل ۱۳ (الف) نیز بیانگر آن است که خشکسالی ها یک، شش و دوازده ماهه در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ یعنی در ۱۵ سال اخیر بصورت گسترده و فراگیر رخ داده است. شکل ۱۳ (ب) مقایسه نتایج خروجی SPEI یک، شش و دوازده ماهه دو دوره آماری ۱۵ ساله ۱۹۸۸-۲۰۰۲ و ۲۰۰۳-۲۰۱۷ ایستگاه های منتخب مورد مطالعه می باشد. براساس اطلاعات مذکور در بازه زمانی ۱۹۸۸-۲۰۰۲ به ترتیب ۱۳، ۷ و ۲۰ درصد منطقه درگیر خشکسالی های یک، شش و دوازده ماهه بوده و این شرایط برای بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ به ترتیب ۹۳، ۱۰۰ و ۸۷ درصد بوده است.

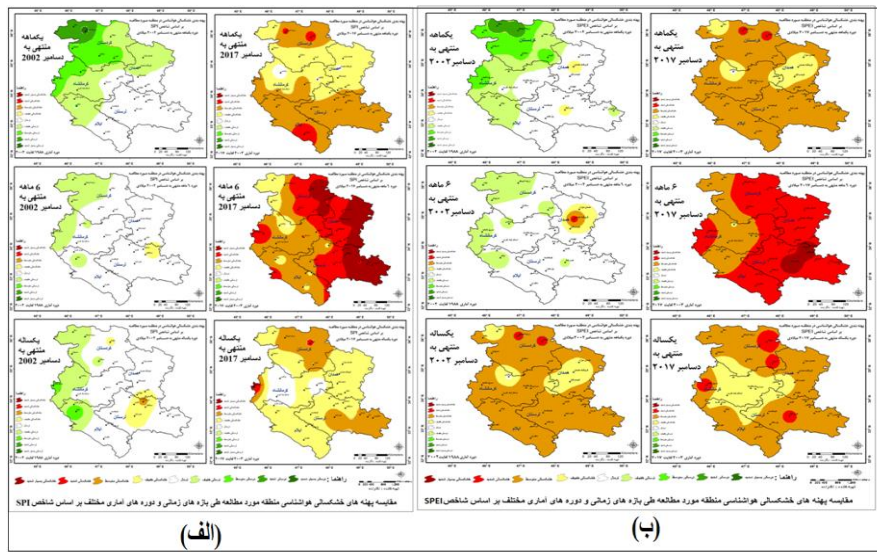


شکل ۱۲. مقایسه شدت خشکسالی و ترسالی یک، شش و دوازده ماهه دو دوره ۱۵ ساله منتهی به دسامبر ۲۰۰۲ و ۲۰۱۷

Fig. 12. Comparison of the intensity of 1, 6, and 12-month drought and wetness in two 15-year periods ending December 2002 and 2017 for the selected stations based on the (a) SPI and (b) SPEI index.

شکل ۱۳ (ب) نیز بیانگر آن است که خشکسالی های یک، شش و دوازده ماهه در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ یعنی در ۱۵ سال اخیر بصورت گسترده و فراگیر رخ داده است. قابل ذکر است در دوره ۱۵ سال اول (۱۹۸۸-۲۰۰۲) نیز با توجه به خروجی SPEI خشکسالی بطور فراگیر منطقه مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار داده است.

ایستگاه‌های منتخب منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص SPI (الف) و SPEI (ب):



شکل ۱۳. مقایسه پهنه شدت خشکسالی و ترسالی SPI یک، شش و دوازده‌ماهه دو دوره ۱۵ ساله منتهی به دسامبر ۲۰۰۲ و ۲۰۱۷

(الف) و (ب) SPEI منتهی به دسامبر ۲۰۰۲ و ۲۰۱۷

Fig. 13. Comparison of the spatial extent of 1, 6, and 12-month SPI (a) and SPEI (b) drought and wetness intensity in two 15-year periods ending December 2002 and 2017.

نتایج تحلیل همبستگی مقادیر محاسبه شده شاخص‌های SPI و SPEI سالانه و ماهانه در پهنه مورد مطالعه به همراه مقدار ضریب همبستگی و سطح معنی‌داری در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲ در خصوص همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI یک، شش و یکساله دو دوره ۱۵ ساله (۲۰۰۲ - ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷ - ۲۰۰۳) مشاهده می‌شود که در تمامی دوره‌ها و مقیاس‌های زمانی مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه، بین این دو شاخص همبستگی وجود دارد. مقایسه نتایج تحلیل‌ها مشخص کرد که ضریب همبستگی بین مقیاس‌های زمانی SPI و SPEI شش ماهه و یک‌ساله، متغیر هستند. همچنین بر اساس نتایج جدول ۳ همبستگی ضعیفی بین شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI ماهانه در ماه‌های نوامبر، اکتبر، آوریل، سپتامبر و می به ترتیب با ضرایب همبستگی در دوره آماری ۲۰۰۲-۱۹۸۸ وجود دارد. قوی‌ترین همبستگی بین این دو شاخص در بازه زمانی مذکور متعلق به ماه‌های فوریه و ژانویه می‌باشد. در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۳ به استثناء نوامبر و اکتبر در مابقی ماه‌ها ضریب همبستگی در سطح بالایی بوده است.

جدول ۲. نتیجه همبستگی SPI و SPEI سالانه

Table 2. The correlation results of annual SPI and SPEI.

مقیاس زمانی شاخص‌ها	دوره آماری ۱۹۸۸ - ۲۰۰۲		دوره آماری ۲۰۰۳ - ۲۰۱۷	
	Time period (1988-2002)		Time period (2003-2017)	
Time scale of indicators	ضریب همبستگی	سطح معنی‌داری (٪)	ضریب همبستگی	سطح معنی‌داری (٪)
	Correlation coefficient	P-value (0.01)	Correlation coefficient	P-value (0.01)

SPEI و SPI یک ماهه	0.877	0.000	0.835	0.000
SPEI و SPI شش ماهه	0.700	0.004	0.887	0.000
SPEI و SPI یک ساله	0.708	0.003	0.938	0.000

جدول ۳. نتیجه همبستگی SPI و SPEI ماهانه

Table 3. The correlation results of monthly SPI and SPEI.

ماه	دوره آماری ۱۹۸۸ - ۲۰۰۲		دوره آماری ۲۰۰۳ - ۲۰۱۷	
	Time period (۱۹۸۸-۲۰۰۲)		Time period (۲۰۱۷-۲۰۰۳)	
Month	ضریب همبستگی Correlation coefficient	سطح معنی داری (٪۱) P-value (0.01)	ضریب همبستگی Correlation coefficient	سطح معنی داری (٪۱) P-value (۰.۰۱)
ژانویه January	0.908	0.000	0.783	0.000
فوریه February	0.945	0.000	0.938	0.000
مارس March	0.652	0.008	0.877	0.000
آوریل April	0.513	0.051	0.899	0.000
می May	0.589	0.021	0.930	0.000
ژوئن June	0.877	0.000	0.864	0.000
جولای July	0.722	0.002	0.793	0.000
اوت August	0.810	0.000	0.799	0.000
سپتامبر September	0.577	0.024	0.581	0.000
اکتبر October	0.338	0.218	0.465	0.007
نوامبر November	0.148	0.602	0.389	0.028
دسامبر December	0.752	0.001	0.596	0.000

مقایسه دوره ۳۰ ساله آماری ۱۹۸۸ - ۲۰۱۷ بین دو شاخص مذکور با سطح معنی داری ۹۹٪ با ضریب ۰/۷۲۶ می باشد که همبستگی بالایی را نشان می دهد. با توجه به وجود همبستگی معنی دار بین شاخص های خشکسالی SPI و SPEI در منطقه

مورد مطالعه، می‌توان از شاخص SPI در مناطق فاقد داده‌های دمایی استفاده کرد. اگرچه این امر ناقص برتری شاخص SPEI نسبت به SPI به سبب لحاظ کردن عامل دما علاوه بر بارندگی در بررسی خشکسالی و ترسالی نیست.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی، ارزیابی و مقایسه دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI در غرب ایران انجام گرفت. براساس نتایج این تحقیق در اکثر ایستگاه‌های منتخب منطقه مورد مطالعه در فاصله زمانی ۱۹۸۸ لغایت ۲۰۰۲ در مقایسه با فاصله زمانی ۲۰۰۳ لغایت ۲۰۱۷ ترسالی‌ها بیشتر بوده است. همچنین بیشترین تعداد کل رخداد‌های خشکسالی به ویژه خشکسالی‌های شدیدتر و فراگیرتر با شاخص SPEI مشخص شده است، که این امر بیانگر تاثیر تبخیر-تعرق در پایش خشکسالی‌ها است. با توجه به نتایج بر اساس دو شاخص مورد مطالعه، طی بازه زمانی ۳۰ ساله هفت سال، منطقه درگیر خشکسالی‌های فراگیر بوده است. بر اساس خروجی شاخص‌های SPI و SPEI بترتیب چهار و شش سال از دوره زمانی مورد مطالعه همراه با ترسالی فراگیر بوده است. همچنین با توجه به خروجی شاخص‌های SPI و SPEI منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۹ و ۱۷ سال بصورت غالب حالت نرمال را تجربه کرده است. همچنین طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۰۲-۱۹۸۸) بر اساس دو شاخص مورد مطالعه چهار سال در منطقه خشکسالی فراگیر حاکم بوده است. این شرایط طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۱۷-۲۰۰۳) بر اساس خروجی SPI و SPEI بترتیب سه و دو سال بوده است. خشکسالی‌های فراگیر ماهانه که بیش از ۵۰٪ منطقه مورد مطالعه را شامل می‌گردد طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۰۲-۱۹۸۸) بر اساس خروجی SPI تنها در ماه اکتبر رخ داده است که این شرایط با لحاظ کردن دما (شاخص SPEI) تقریباً در هیچ ماهی رخ نداده است. این وضعیت طی بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۱۷-۲۰۰۳) بر اساس خروجی SPI در دو ماه (اکتبر و دسامبر) و بر اساس خروجی SPEI در پنج ماه (ژانویه، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر) رخ داده است. براساس نتایج به دست آمده در خصوص همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI مشاهده می‌شود که بین تمامی ایستگاه‌ها در مقیاس‌های زمانی یک، شش و دوازده ماهه طی دوره ۳۰ ساله همبستگی خوبی وجود دارد و در مقیاس زمانی یک‌ساله با ضریب $0/938$ بالاترین همبستگی را نشان داد. از لحاظ ماهانه در دوره آماری ۲۰۰۲-۱۹۸۸، ماه‌های نوامبر، اکتبر، آوریل، سپتامبر و می به ترتیب با ضرایب همبستگی $0/147$ ، $0/338$ ، $0/513$ ، $0/577$ و $0/589$ پائین‌ترین و ماه‌های فوریه و ژانویه به ترتیب با ضریب $0/945$ و $0/908$ بالاترین همبستگی در بین دو شاخص در منطقه مورد مطالعه وجود داشت. در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۳ در ماه‌های نوامبر و اکتبر همبستگی بین شاخص‌های فوق ضعیف و در مابقی ماه‌ها ضریب همبستگی در سطح بالایی بود. قابل توجه است علیرغم اینکه ایستگاه‌های بررسی شده دارای شرایط دمایی متفاوتی بوده‌اند ولی تفاوت قابل توجهی از نظر وقوع دوره‌های خشکسالی و ترسالی بین ایستگاه‌ها براساس شاخص SPI و SPEI وجود ندارد. در تغییرات دمایی تفاوت دما و تبخیر و تعرق ناشی از آن ممکن است به تفاوت الگوی وقوع، مدت و توالی دوره‌های ترسالی و خشکسالی منجر شود که از این نظر می‌توان شاخص SPEI را در تعیین الگوی تغییرات مکانی و مقایسه شرایط خشکسالی ایستگاه‌ها و مناطق گوناگون دارای برتری دانست. البته شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI به متغیرهای اقلیمی بیشتری در محاسبات نیاز دارد و به روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل

حساسیت دارد و همچنین نیازمند دوره طولانی تری با تغییرات طبیعی اقلیمی است. در پایان پیشنهاد می شود سایر شاخص - های خشکسالی در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرد.

۵- سپاس‌گزاری

در پایان این پژوهش، بر خود لازم می‌دانم از استاد بزرگوارم آقای دکتر محمد رحیمی که با راهنمایی، همراهی و دلگرمی صمیمانه خود مرا در طی مسیر یاری کردند، صمیمانه سپاس‌گزاری کنم. حمایت‌های علمی، عاطفی و انگیزشی ایشان نقش ارزشمندی در شکل‌گیری و تکمیل این مقاله داشته است.

۶- داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد نویسنده اول بوده و از اداره هواشناسی استان سمنان خریداری شده است.

۷- تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید نویسندگان است.

۸- مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شرح زیر است :

مشارکت افسانه حیدری (نویسنده اول): داده‌برداری، تفسیر و تحلیل داده‌ها و تهیه و ترسیم نقشه‌ها و نوشتن نسخه اولیه و نهایی متن مقاله.

مشارکت دکتر محمد رحیمی (نویسنده دوم): نظارت و راهنمایی بر روند انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج و ویرایش نهایی متن مقاله.

۹- اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنها می‌باشد.

۱۰- حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

۱۱- مراجع

1. Abramopoulos, F., Rosenzweig, C., and Choudhury, B. (1988). Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration. *Journal of Climate*, 921-941.
2. Ahmadi, M., Nosrati, K., & Selki, H. (2013). Drought and its relationship with soil moisture (case study: Isfahan Kabotar Abad). *Geography*, 11(38), 77-91 [In Persian].

3. Alijani, B., & Babaei, O. (2009). Spatial Analysis of Short Term Droughts in Iran: Iranian Journal of Geography and Local Program Generator: No. *Autumn and Winter*: pp, 121(2) [In Persian].
4. Alizadeh, A. (2006). The origins of state organizations in prehistoric highland Fars, Southern Iran. *Excavations at Tall-e Bakun. Chicago: Oriental Institute Publications* [In Persian].
5. Bagheri, R., & Mohammadi, S. (2012). Investigation on spatial variations of drought using geostatistics in Kerman province over a thirty-year period (1970-2000) [In Persian].
6. Banimahd, S. A., & Khalili, D. (2013). Factors influencing Markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. *Water resources management*, 27, 3911-3928 [In Persian].
7. Bazrafshan, J. (2017). Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. *Water resources management*, 31, 4683-4698 [In Persian].
8. Bordi, I., and Sutera, A. (2004). Drought variability and its climatic implications. *Global and Planetary Change*, 40(1-2), 115-127.
9. Chang, T. J. and Cleopa, X. A., (1998), A proposed method for drought monitoring, *Water Resources Bulletin*. 27, 275-281.
10. Damavandi, A. A., Rahimi, M., Yazdani, M. R., & Noroozi, A. A. (2016). Assessment of drought severity using vegetation temperature condition index (VTCI) and Terra/MODIS satellite data in rangelands of Markazi Province, Iran [In Persian].
11. Eivazi, M., & Mosaedi, A. (2011). Monitoring and spatial analysis of meteorological drought in Golestan Province using geostatistical methods. *Journal of Range and Watershed Management*, 64(1), 65-78 [In Persian].
12. Ghabaei Sough, M., Zare Abyaneh, H., & Mosaedi, A. (2018). Assessing a multivariate approach based on Scalogram analysis for agricultural drought monitoring. *Water Resources Management*, 32, 3423-3440 [In Persian].
13. Hao, Z., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., and Farahmand, A. (2014). Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific data*, 1(1), 1-10.
14. Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wihite, D. A., and Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429-438.
15. Keikhosrvai Kiany, M. S., & Masoudian, S. A. (2017). Identification of snow reservoirs in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(3), 395-408 [In Persian].
16. Khalili, M. (2011). A secure and robust cdma digital image watermarking algorithm based on dwt2, YIQ color space and Arnold transform. *Signal & Image Processing: An International Journal (SIPIJ) Vol, 2*, 131-147 [In Persian].
17. Koushki, R., Rahimi, M., Amiri, M., Mohammadi, M., & Dastorani, J. (2017). Investigation of relationship between meteorological and hydrological drought in Karkheh watershed. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(3), 687-698 [In Persian].
18. Livia, J., & Ortiz, M. (2014). Construcción de pruebas psicométricas: Aplicaciones a las ciencias sociales y de la salud. *Lima, Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal*.
19. Meza, F. J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate extremes*, 1, 51-58.

20. Mostafazadeh, R., Vafakhah, M., & Zabihi, M. (2015). Analysis of monthly wet and dry spell occurrence by using power laws in Golestan Province, Iran. *Iranian journal of Ecohydrology*, 2(4), 429-443 [In Persian].
21. Nazaripour, H. (2014). Regions of Iran with Persistence of Precipitation. *Geography and Development*, 12(36), 195-208 [In Persian].
22. Nosrati, K. (2013). Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 2895-2907 [In Persian].
23. Perkins, S. E., Alexander, L. V., & Nairn, J. R. (2012). Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophysical Research Letters*, 39(20).
24. Potop, V., and Možný, M. (2011). The application of a new drought index–Standardized precipitation evapotranspiration index in the Czech Republic, ISBN 978-80-86690-87-2. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí*, 2(4), 1-12.
25. Shahabi, M., & Zabihi, M. (2015). Analysis of meteorological drought using Triple Diagram Model in the Kurdistan province, Iran [In Persian].
26. Soleymani Sardo, F., Kopaei, S. S., & Sarhadi, A. (2008). Drought Zonation and Analysis Using Standard Precipitation Index (SPI) in Kerman Province. In *Third Conference on Iranian Water Resources Management. Tabriz University of Civil Engineering October* (pp. 14-16).
27. Soltani, S., & Saadati, S. (2007). Drought zoning in Isfahan province using standardized precipitation index (SPI). *Engineering and Watershed Management of Iran Quarterly*, 1(2), 64-67 [In Persian].
28. Stagge, J. H., Tallaksen, L., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F. and Stahl, K., (2015) Candidate distributions for climatological, drought indices (SPI and SPEI), *International J. of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4267.
29. Tajbakhsh, N., Gurudu, S. R., & Liang, J. (2014). Automatic polyp detection using global geometric constraints and local intensity variation patterns. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2014: 17th International Conference, Boston, MA, USA, September 14-18, 2014, Proceedings, Part II 17* (pp. 179-187). Springer International Publishing [In Persian].
30. Tomros, T. and Menzel, L., (2014), Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region, *Hydrology and Earth System Sciences.*, 18, 305-318
31. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
32. Yousefi, S., Kartoolinejad, D., & Naghdi, R. (2017). Effects of priming with multi-walled carbon nanotubes on seed physiological characteristics of Hopbush (*Dodonaea viscosa* L.) under drought stress. *International Journal of Environmental Studies*, 74(4), 528-539 [In Persian].