



ارزیابی شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران

کاظم نصرتی*

دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۲۹

Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for Drought Identification in Different Climates of Iran

Kazem Nosrati*

Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of
Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

There is a need of monitoring and analysis of drought condition for water resources management. Given the large difficulties to objectively quantify drought characteristics such as duration, intensity, and magnitude several drought indices have been developed in the last decades. One of shortcomings of current drought indices including standardized precipitation index (SPI) is that it does not include water balance by means of evapotranspiration. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) includes water balance in calculating of drought index using precipitation and evapotranspiration. The objectives of current study are to investigate meteorological droughts using SPEI in ten synoptic stations in different climates of Iran and to compare the results with SPI. In view of this, temperature and precipitation data in a long term 1975 to 2007 were prepared and the drought indices were calculated. The comparison was done based on indices values and drought categories class. The results showed that both SPI and SPEI indices have significant correlation, moreover the SPEI showed the quick response to drought. The increasing the timescales of indices also increase the duration of drought. Based on the importance of evapotranspiration in arid and semi-arid regions, the SPEI can be used as a suitable index for determining of droughts. However, further researches are needed in spatial and temporal scales.

Keywords: Drought analysis, Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), SPI, Iran.

چکیده

پایش و تحلیل شرایط خشکسالی یکی از نیازهای اصلی مدیریت منابع آب است. با توجه به مشکلات کمی نمودن ویژگی‌های خشکسالی مانند تداوم، شدت و بزرگی خشکسالی، شاخص‌های متعددی در دهه‌های اخیر توسعه پیدا نموده‌اند. یکی از محدودیت‌های شاخص‌های رایج مانند شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) عدم لحاظ بیلان آب براساس میزان تبخیر و تعرق می‌باشد. شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) براساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، بیلان آب را در محاسبه شاخص خشکسالی لحاظ می‌نماید. هدف از این مطالعه بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده در ۱۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در گستره اقلیم‌های مختلف کشور و مقایسه با شاخص بارش استاندارد شده می‌باشد. به این منظور داده‌های بارش و دمای ماهانه ایستگاه‌ها در بازه زمانی ۱۹۷۵ الی ۲۰۰۷ تهیه و شاخص‌های خشکسالی محاسبه گردید. مقایسه براساس مقادیر شاخص‌ها و رده‌های خشکسالی انجام شد. نتایج نشان داد شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده دارای همبستگی معنی‌دار بوده اما شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی داشته است. هم‌چنین با افزایش مقیاس زمانی تداوم خشکسالی افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در بیلان آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب در مطالعات خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد که مطالعات بیشتر در مقیاس‌های زمانی و مکانی را نیاز دارد.

کلمات کلیدی: تحلیل خشکسالی، شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده، شاخص بارش استاندارد شده، ایران.

* Corresponding Author. E-mail Address: k_nosrati@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

با افزایش بلایای طبیعی مانند خشکسالی تحت تأثیر تغییرات جهانی بر شرایط زیست‌محیطی موجب افزایش عدم قطعیت در دسترسی به منابع آب شده است [۱]. کاهش بارش و افزایش درجه حرارت می‌تواند موجب کاهش جریان رودخانه‌ها گردد [۲] و بنابراین نیازمند توجه بیشتری در تصمیم‌گیری‌ها می‌باشد. فراوانی بالای خشکسالی در کشور ایجاب می‌نماید تا در دوره‌های خشک استراتژی‌های مدیریت بهبود یابد. به این منظور مهم است روابط بین خشکسالی‌های هیدرولوژیک و هواشناسی تعیین گردد تا بتوان پاسخ کمبود بارش و یا افزایش درجه حرارت را در جریان رودخانه تشخیص داد. برای دستیابی به این مهم لازم است شاخص‌های خشکسالی از پارامترهای بیلان آب استفاده نمایند.

با توجه به مشکلات کمی نمودن ویژگی‌های خشکسالی مانند تداوم، شدت و بزرگی خشکسالی، شاخص‌های متعددی در دهه‌های اخیر توسعه پیدا نموده‌اند. به طور مثال شاخص شدت خشکسالی پالم [۳]، شاخص ناهنجاری بارندگی [۴] شاخص درصد از نرمال بارندگی [۵]، شاخص دهک‌های بارندگی [۶]، شاخص خشکسالی بالم و مولی [۷]، شاخص بارندگی استاندارد شده [۸] و شاخص خشکسالی مؤثر [۹] با مقیاس‌های متفاوت زمانی مانند ماهانه و سالانه ارایه و یا مورد استفاده قرار گرفته است.

تاکنون شاخص روزانه خشکسالی مؤثر در اقلیم‌های مختلف کشور محاسبه و ارتباط آن با منابع آب قابل دسترس تأیید شده است [۹ و ۱۰]. همچنین هفت شاخص خشکسالی بارندگی در استان تهران مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج نشان دادند که شاخص‌های خشکسالی مؤثر و بارندگی استاندارد شده می‌تواند آغاز خشکسالی را به خوبی نشان دهند [۱۱]. با این وجود شاخص‌های رایج مانند شاخص بارندگی استاندارد شده و شاخص خشکسالی مؤثر صرفاً از میزان بارندگی روزانه و یا ماهانه استفاده می‌نمایند. زیرا این گونه شاخص‌ها بر دو فرض استوار هستند. یکی این‌که تغییرات بارندگی بیش از سایر متغیرهای اقلیمی مانند دما و تبخیر و تعرق است و دوم این‌که سایر متغیرهای اقلیمی به جزء بارندگی دارای روند زمانی نیستند. اما بسیاری از محققان بر اهمیت درجه حرارت بر شرایط خشکسالی تأکید نموده‌اند [۱۲]. همچنین میزان درجه حرارت در مدت ۱۵۰ سال اخیر حدود ۰/۵ تا ۲ درجه

سانتی‌گراد افزایش یافته و مدل‌های تغییر اقلیم این افزایش را نشان داده‌اند [۱۳]. که بدین ترتیب منجر به افزایش خشکسالی‌ها و در نتیجه افزایش تقاضای آب در اثر افزایش تبخیر و تعرق می‌گردد [۱۴].

بنابراین شاخصی جدید براساس میزان بارندگی و درجه حرارت و محاسبه تبخیر و تعرق و بیلان آب به نام شاخص بارندگی-تبخیر و تعرق استاندارد شده ارایه گردید [۱۵]. این شاخص توانایی محاسبه شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را دارد و همچنین می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشکسالی لحاظ نماید. در اقلیم‌های مختلف کشور به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بسیار زیاد است، متغیر دما و تأثیر آن بر بیلان آب دارای اهمیت ویژه‌ای است. لذا لازم است تا این شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی و کارایی آن با توجه به اقلیم گوناگون کشورمان مورد آزمایش قرار گیرد. بنابراین با توجه به عدم وجود مطالعات در مورد شاخص بارندگی-تبخیر و تعرق استاندارد شده، هدف از این مطالعه ضمن پایش خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از شاخص بارندگی-تبخیر و تعرق استاندارد شده در اقلیم‌های مختلف ایران، تعیین ارتباط این شاخص با شاخص بارندگی استاندارد شده (که به صورت رایج استفاده می‌گردد) می‌باشد.

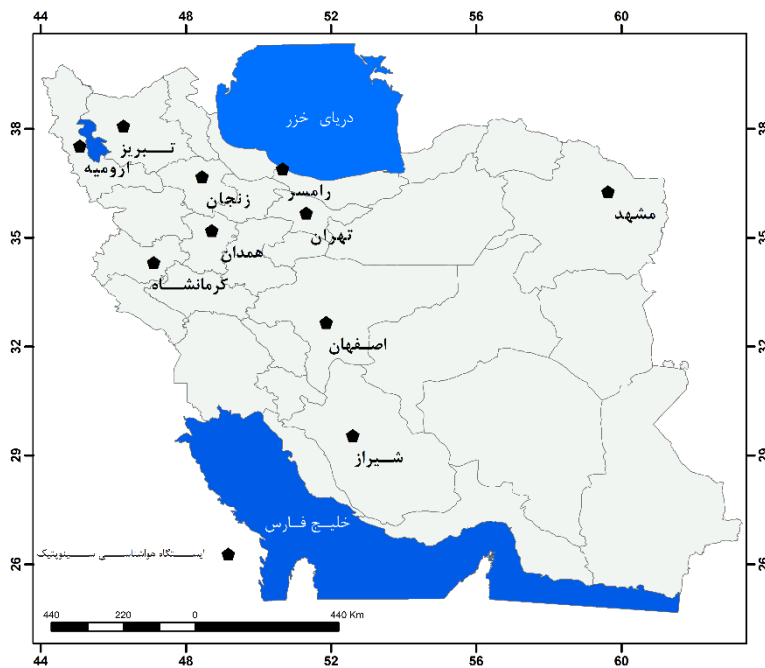
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های ایستگاه‌های مطالعاتی

در این مطالعه از آمار بارندگی ماهانه و میانگین درجه حرارت ماهانه با دوره آماری ۳۳ ساله (۱۹۷۵-۲۰۰۷) ۱۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور استفاده گردید. انتخاب ایستگاه‌ها براساس طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها و تنوع اقلیمی بوده است. اما با توجه به این‌که بخش اعظم ایران را اقلیم خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد، سعی شد تا تعداد بیش‌تری ایستگاه از این پهنه اقلیمی انتخاب گردد. جدول ۱ مشخصات اقلیمی و شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نرمال بودن داده‌ها، صحت و همگنی داده‌ها بررسی و خلاءهای آماری با استفاده از روش نسبت نرمال برای هر یک از ایستگاه‌ها بازسازی گردید.

جدول ۱- مشخصات اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	مختصات جغرافیایی		ارتفاع (متر)	نرمال بارندگی (میلیمتر)	نرمال دما (درجه سانتیگراد)	نرمال دمای سردترین ماه (سانتیگراد)	نمایه خشکی دوام‌رتن	اقلیم (دوام‌رتن گسترش یافته)	اشکوب اقلیمی
	عرض	طول							
رامسر	۳۶ ۵۴	۵۰ ۴۰	-۲۰	۱۸۷۴/۳	۱۵/۹	۴/۱	۷۲/۳۷	A ₇ m ₃	خیلی مرطوب
تهران	۳۵ ۴۱	۵۱ ۱۹	۱۱۹۰/۸	۲۳۰/۲	۱۶/۹	-۰/۹	۸/۵۶	A _{1.2} m ₂	خشک بیابانی سرد
اصفهان	۳۲ ۴۰	۵۱ ۵۲	۱۶۰۰/۷	۱۲۱/۱	۱۶/۱	-۲/۴	۴/۶۴	A _{1.1} m ₂	فرا خشک سرد
مشهد	۳۶ ۱۶	۵۹ ۳۸	۹۹۰	۲۵۹/۳	۱۳/۶	-۴/۳	۱۰/۹۹	A ₂ m ₂	نیمه خشک سرد
شیراز	۲۹ ۳۳	۵۲ ۳۶	۱۴۸۸	۳۴۴/۲	۱۷/۶	-۰/۱	۱۲/۴۷	A ₂ m ₂	نیمه خشک سرد
تبریز	۳۸ ۵	۴۶ ۱۷	۱۳۶۱	۳۰۱	۱۱/۸	-۶/۱	۱۳/۸	A ₂ m ₂	نیمه خشک سرد
کرمانشاه	۳۴ ۱۹	۴۷ ۷	۱۳۲۲	۴۵۶/۸	۱۴/۳	-۳/۹	۱۸/۸	A ₂ m ₂	نیمه خشک سرد
ارومیه	۳۷ ۳۲	۴۵ ۵	۱۳۱۲/۵	۳۶۱/۴	۱۱/۱	-۶/۵	۱۷/۱	A ₂ m ₂	نیمه خشک سرد
زنجان	۳۶ ۴۱	۴۸ ۲۷	۱۶۶۳	۳۲۴/۲	۱۱/۵	-۷/۸	۱۵/۱	A ₂ m ₁	نیمه خشک فرا سرد
همدان	۳۵ ۱۲	۴۸ ۴۳	۱۶۷۹/۷	۳۳۹	۱۰/۹	-۹/۳	۱۶/۲	A ₂ m ₁	نیمه خشک فرا سرد



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (2)$$

که k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه می‌باشد.

یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان

۲-۲- محاسبه شاخص بارندگی- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنت‌وایت استفاده می‌نماید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه i به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

جدول ۲- طبقات مختلف شاخص‌های SPI و SPEI

توصیف وضعیت	طبقات شاخص
رطوبت بسیار شدید	بیشتر از ۲
رطوبت شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
رطوبت متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۲

۳- نتایج و بحث

شاخص‌های SPI و SPEI برای ایستگاه‌های منتخب به طور جداگانه محاسبه و به دلیل تشابه بررسی و اعتبارسنجی شاخص‌ها تنها نتایج برخی از ایستگاه‌ها ارائه شده است. شکل ۲ تا ۴ ارزیابی شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه برای سه ایستگاه اصفهان، همدان و رامسر با سه اقلیم مناطق فراخشک، نیمه‌خشک و خیلی مرطوب را در بازه زمانی ۱۹۷۵ الی ۲۰۰۷ نشان می‌دهد (به دلیل حجم زیاد تنها نتایج سه ایستگاه از سه اقلیم متفاوت ارائه گردید). در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب، زیاد است. با افزایش مقیاس‌های زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آن‌ها افزایش می‌یابد. در ایستگاه اصفهان در برخی موارد هماهنگی در دوره‌های خشک و مرطوب در هر دو شاخص دیده نمی‌شود؛ به طوری که هرچند در شاخص SPI دهه ۸۰ یک دوره مرطوب شناخته شده است اما این دهه در شاخص SPEI دوره خشک می‌باشد (شکل ۲). در ایستگاه رامسر با اقلیم خیلی مرطوب هماهنگی بین دو روش بیش تر می‌باشد هرچند در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۰ در تمامی مقیاس‌های زمانی نتیجه معکوس دیده می‌شود (شکل ۳). در این ایستگاه دوره‌های مرطوب در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۵ و ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ و دوره‌های خشک در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۵ و ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ دیده می‌شود (شکل ۲). در ایستگاه همدان با اقلیم نیمه‌خشک هماهنگی بین هر دو شاخص بسیار زیاد است. دوره‌های خشک در این ایستگاه در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۵ و ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ و همچنین دوره مرطوب در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۷ رخ داده است (شکل ۴).

داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. بدین ترتیب تابع تجمعی احتمال سری داده‌های D براساس تابع لجستیک لگاریتمی به صورت رابطه ۳ می‌باشد.

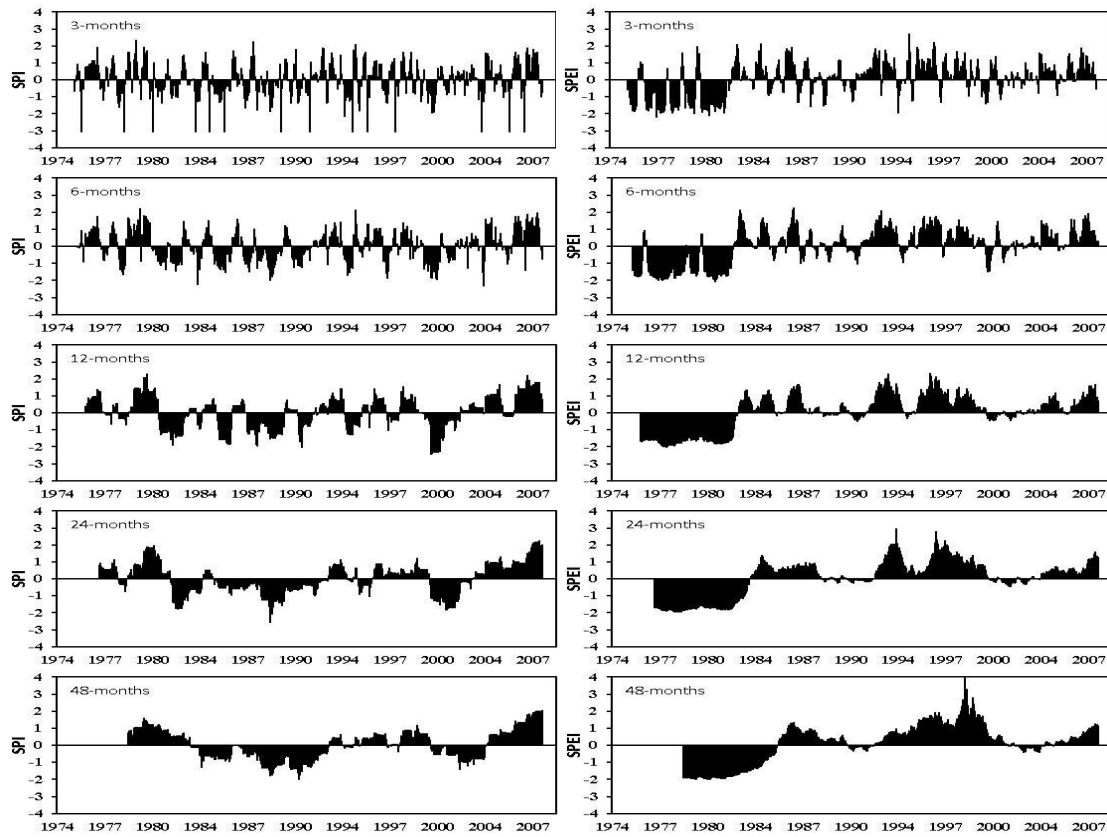
$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

که α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل و γ پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده $D < \infty$ و $\gamma > D$ است.

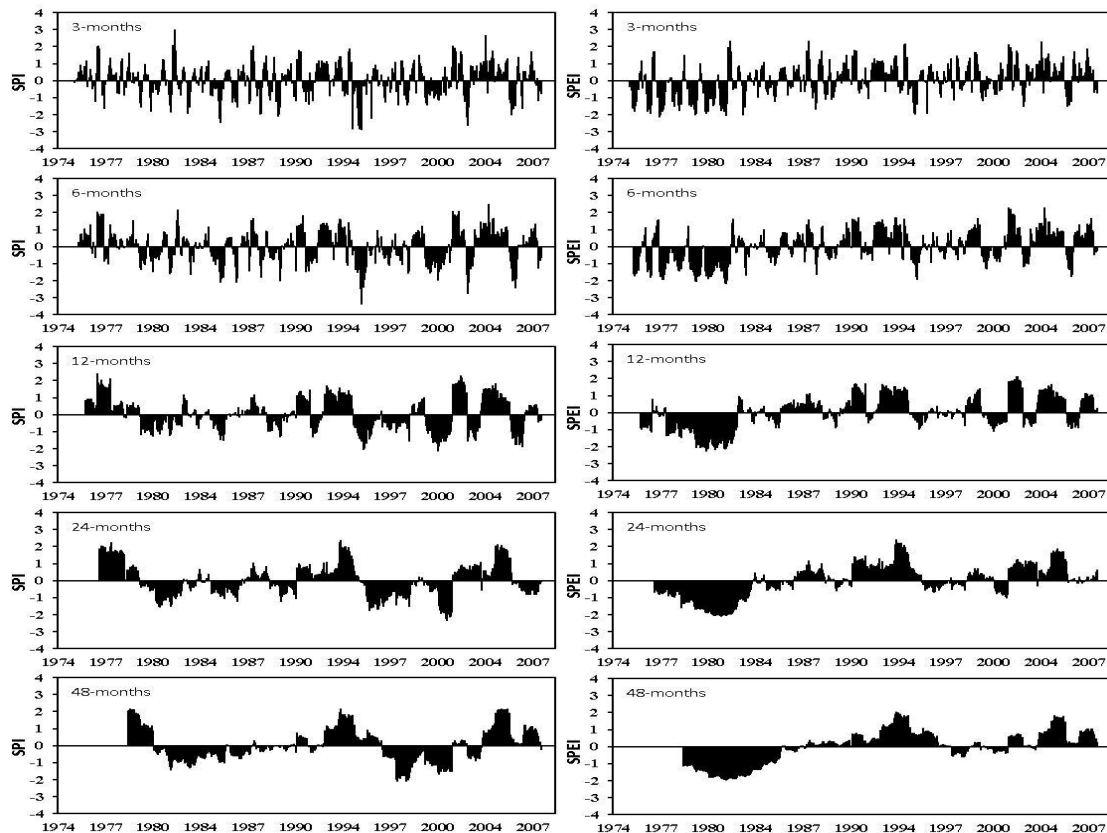
بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد [۱۵]. شاخص SPEI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند یک ماه، ۳ ماه، ۶ ماه، ۱۲ ماه، ۲۴ ماه و ۴۸ ماه محاسبه گردد. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پیش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. طبقه‌بندی این شاخص در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۲- محاسبه شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI)

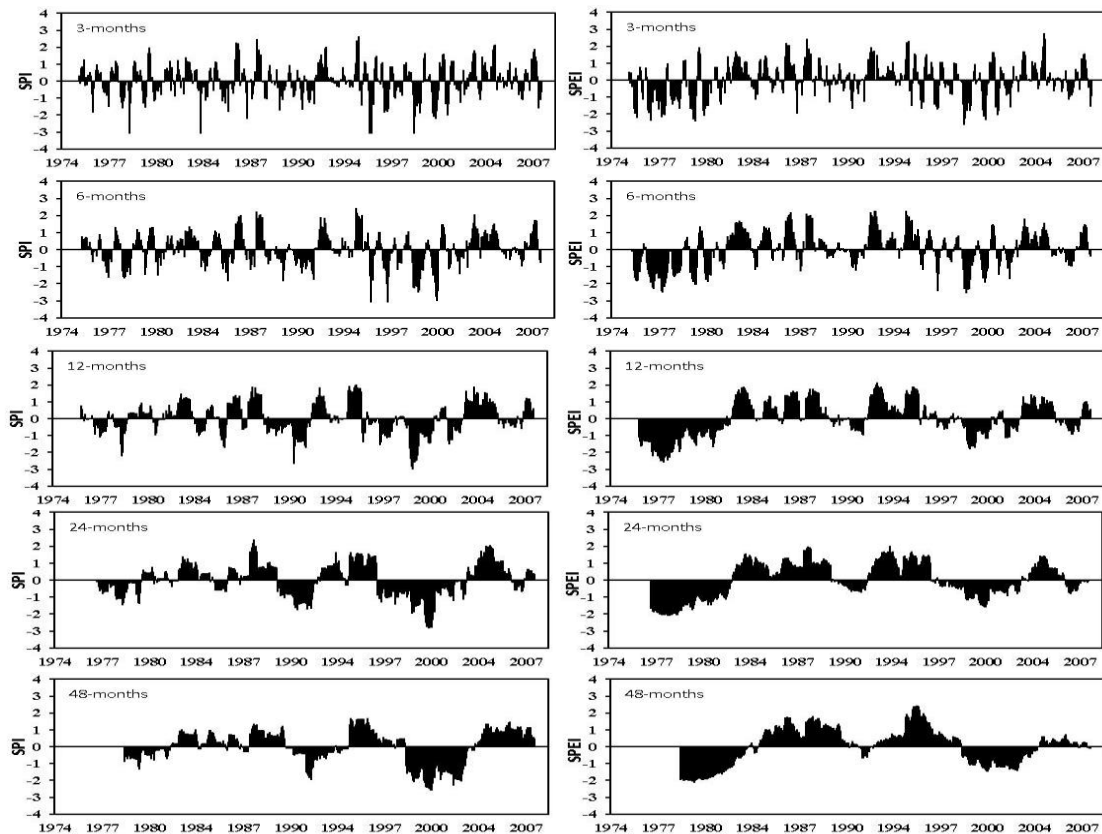
به منظور محاسبه این شاخص ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه استخراج و سری‌های زمانی تشکیل می‌گردد. سپس تابع توزیع آماری گاما بر سری داده‌های بارندگی حاصل از مرحله قبل برازش داده می‌شود و احتمالات تجمعی توزیع گاما محاسبه می‌گردد. در نهایت تابع تجمعی گاما به تابع نرمال استاندارد Z و (یا SPI) با میانگین صفر و واریانس ۱ تبدیل می‌گردد [۱۶]. در این مطالعه با توجه به برتری تابع توزیع پیرسون تیپ سه (تابع سه پارامتری) [۱۷] از این توزیع به جای تابع گاما استفاده گردید. مقادیر مثبت این شاخص بیانگر بیش تر بودن بارندگی از میانه و مقادیر منفی بیانگر کمتر بودن بارندگی از میانه است. بنابراین برای پیش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. شروع و خاتمه خشکسالی و همچنین طبقه‌بندی آن نیز همانند شاخص SPEI است (جدول ۲). این شاخص می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه گردد. این شاخص به طور رایج در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [مانند ۱۱، ۱۸ و ۱۹].



شکل ۲- ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه اصفهان



شکل ۳- ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه رامسر



شکل ۴- ارزیابی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه همدان

ارزیابی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۷ برای ایستگاه همدان در شکل ۵ نمایش داده شده است. شکل ۵ رگرسیون خطی بین دو شاخص SPI و SPEI را برای ایستگاه همدان نشان می‌دهد. نتایج بیانگر رابطه مناسب دو شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف است به طوری که ضریب همبستگی پیرسون در سطح یک درصد برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه به ترتیب برابر با ۰/۶۱، ۰/۷۵، ۰/۷۶، ۰/۷۳، ۰/۷۴ و ۰/۷ می‌باشد. (در سطح ۰/۰۱ دو طرفه $p > ۰/۰۰۱$) می‌باشد.

شکل ۶ نمودار پراکنش بین دو شاخص را برای مقیاس زمانی یک ماهه در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ضریب همبستگی (۰/۷۸)، مقدار (۰/۴۵) برای ایستگاه رامسر با اقلیم مرطوب و کمترین مقدار (۰/۰۱) برای ایستگاه اصفهان با اقلیم فراخشک مشاهده شد.

مقادیر ضریب همبستگی پیرسون برای تمامی ایستگاه‌ها بین ۰/۴۵ تا ۰/۹۱ ($p > ۰/۰۰۱$) برای مقیاس‌های زمانی مختلف تغییر می‌نماید که همبستگی

اما با این وجود نتایج نشان داد که میانگین تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPEI طولانی‌مدت تر از تداوم خشکسالی‌ها در SPI می‌باشد. این نتایج در تمامی ایستگاه‌ها و همچنین در تمامی بازه‌های زمانی صدق می‌نماید. به طوری که در مقیاس زمانی ۳ ماهه میانگین تداوم خشکسالی‌ها در ایستگاه‌ها بر طبق شاخص SPI 1/4 است اما مطابق با شاخص SPEI 3/5 ماه می‌باشد. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPI و SPEI به ترتیب برابر با مقادیر ۱۱/۲ و ۱۲/۸ و در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPI و SPEI به ترتیب برابر با مقادیر ۲۱/۸ و ۲۳/۱ می‌باشد. بیشترین تداوم خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه براساس محاسبات شاخص SPEI رخ داد. بیشترین شدت خشکسالی بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۵ و همچنین در بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ توسط شاخص SPEI مشخص شده است که مرتبط با گرم شدن هوا در این بازه‌های زمانی می‌باشد.

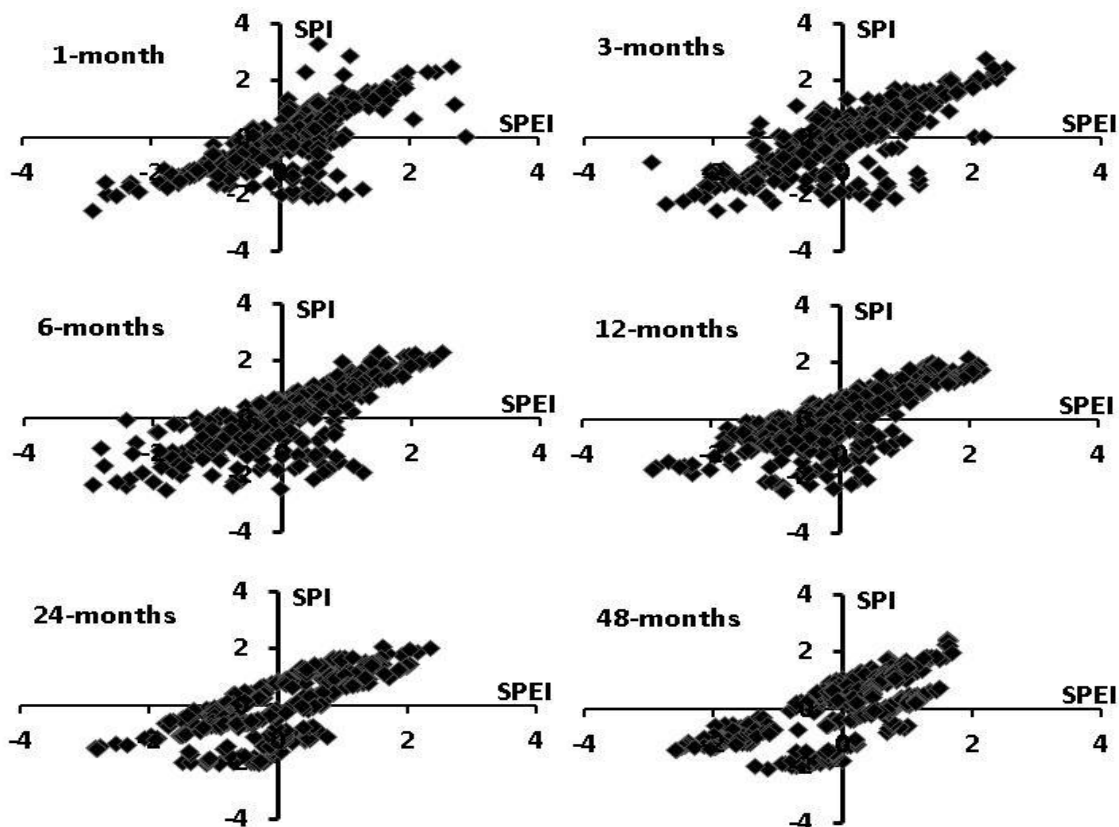
هر دو شاخص SPI و SPEI دارای محدوده یکسان می‌باشند (جدول ۲). بنابراین می‌توان آن‌ها را از طریق ضریب همبستگی پیرسون مقایسه نمود. نتایج این روش

زمانی یک ماهه در بازه زمانی ۳۳ سال مطابق با جدول ۲ تعریف و محاسبه گردید.

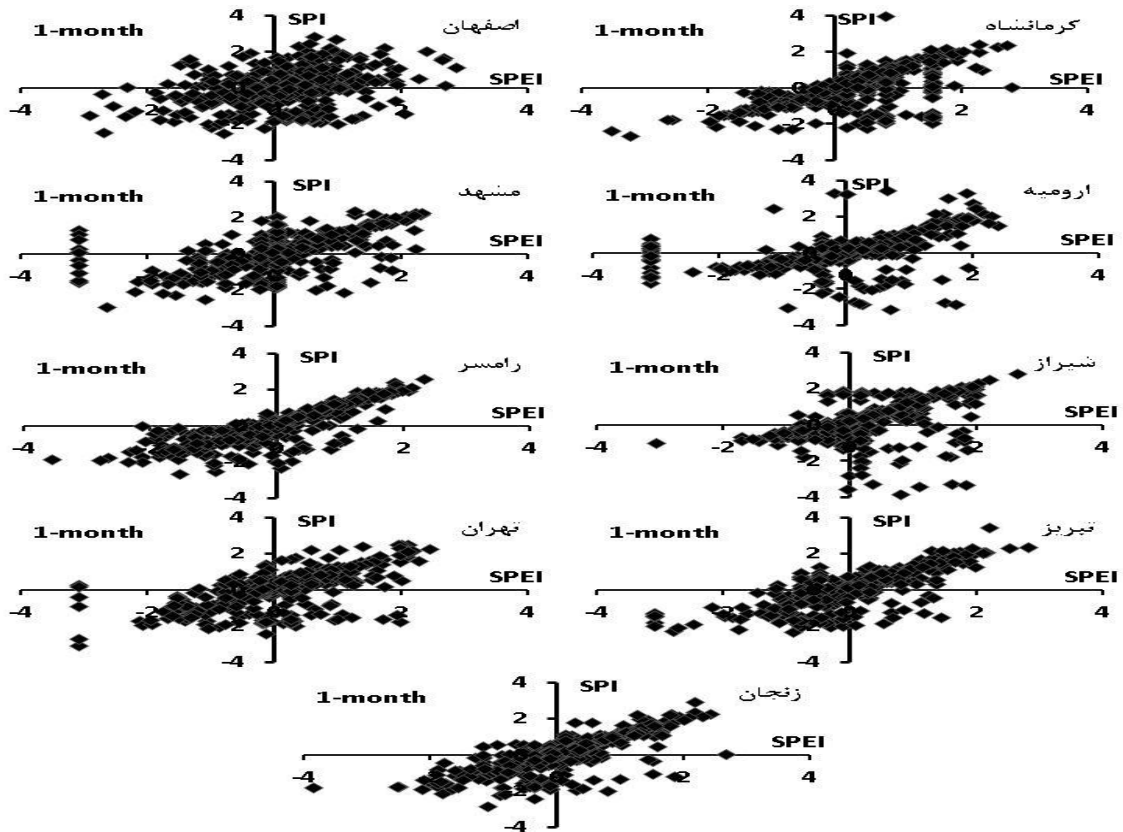
شکل ۷ هیستوگرام طبقات خشکسالی با مقیاس زمانی یک ماهه را برای ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ تفاوت معنی‌داری بین فراوانی نسبی طبقات خشکسالی حاصل از دو شاخص خشکسالی دیده نمی‌شود اما طبقه نرمال شاخص SPEI در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه اصفهان و ارومیه دارای فراوانی بیشتری در مقایسه با مقادیر محاسبه شده از شاخص SPEI می‌باشد. طبقاتی که نشانه خشکسالی است مانند خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید در شاخص SPEI دارای فراوانی نسبی بیشتر در مقایسه با مقادیر مشابه در شاخص SPI است که می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییرات بارندگی و منظور نمودن پارامتر درجه حرارت در این شاخص باشد.

معنی‌دار بین دو شاخص را نشان می‌دهند که به دلیل تشابه نتایج نمودار پراکنش آن‌ها ارایه نشده است.

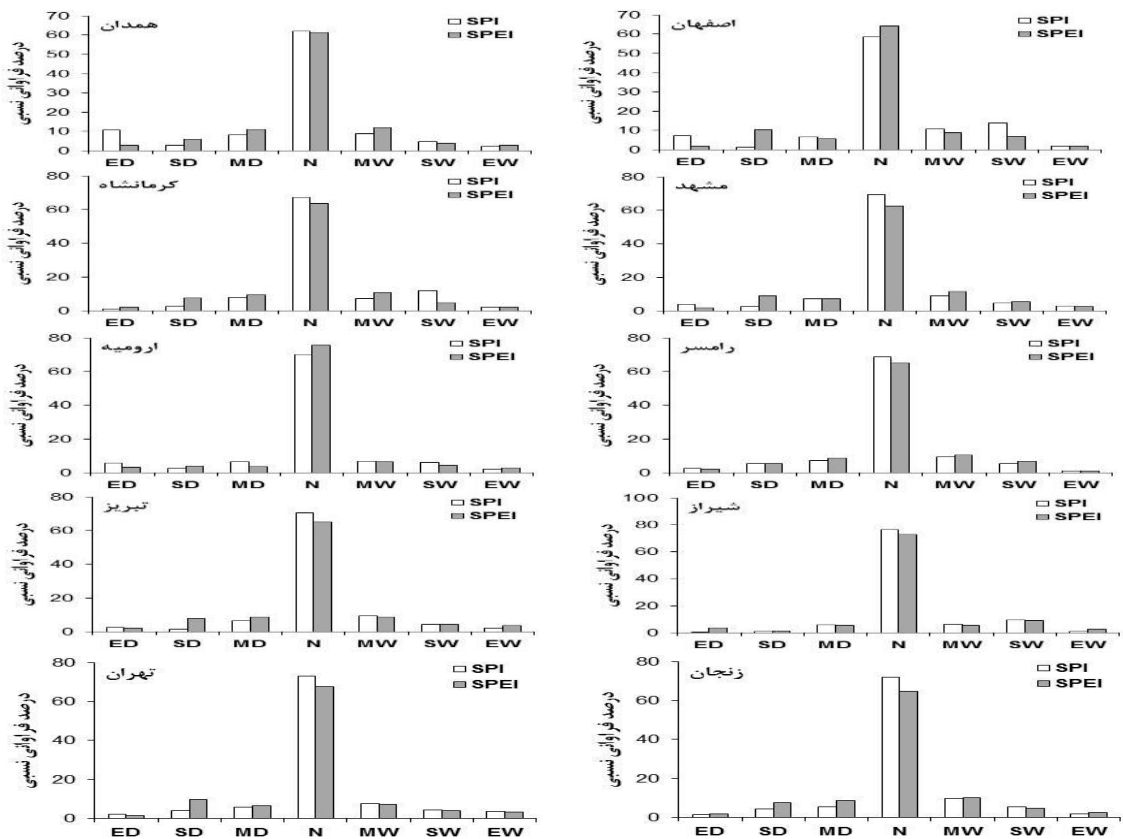
یکی از راه‌های دیگر ارزیابی شاخص‌های خشکسالی مقایسه عمق شدت خشکسالی گزارش شده توسط شاخص‌های خشکسالی در هر یک از سالهای آماری است. در واقع، این مقایسه دارای اهمیت بسیاری است زیرا در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای عمق شدت خشکسالی در مقایسه با بروز خشکسالی مهم جلوه می‌نماید. برای ارزیابی سنجه‌های خشکسالی از نقطه‌نظر کلاس شدت خشکسالی می‌بایست توصیف کیفی مقادیر عددی سنجه‌ها را کمی نمود. یعنی به هر یک از کلاس‌های شدت خشکسالی عددی ثابت که معرف آن طبقه شدت باشد منتسب نمود. با توجه به یکسان بودن طبقه‌بندی هر دو شاخص SPI و SPEI مقایسه آن دو امکان‌پذیر می‌باشد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر، فراوانی نسبی طبقه‌های مختلف هر دو شاخص با مقیاس



شکل ۵- ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه همدان



شکل ۶- ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPEI در مقیاس زمانی یک ماهه در ایستگاه‌های مطالعاتی



شکل ۷- درصد فراوانی نسبی طبقات شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPEI در مقیاس زمانی یک ماهه در ایستگاه‌های مطالعاتی در دوره آماری ۲۰۰۷-۱۹۷۵. ED: خشکسالی بسیار شدید، SD: خشکسالی شدید، MD: خشکسالی متوسط، N: نرمال، MW: رطوبت متوسط، SW: رطوبت شدید، EW: رطوبت بسیار شدید.

بارندگی و دما فاکتورهای مورد نیاز شاخص SPEI می‌باشند، لذا خصوصیات اقلیمی-آماری این پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در امکان استفاده از شاخص‌های خشکسالی در اقلیم‌های تحت مطالعه دارد. به طوری که مبنای نظری شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برآزش بر تابع چگالی احتمال گاما می‌باشد که در مطالعات اخیر با تابع توزیع پیرسون تیپ سه به دلیل برآزش مناسب‌تر جایگزین شده است. همچنین در شاخص SPEI برآزش با تابع چگالی احتمال لجستیک لگاریتمی را مبنای قرار می‌دهد. بدین ترتیب تفاوت در توابع توزیع مورد استفاده نشان می‌دهد که لازم است آزمون اولیه در انتخاب توزیع مناسب صورت گیرد. یکی از تأثیرات رخداد خشکسالی کمبود منابع آب می‌باشد. هر دو شاخص خشکسالی به طور مؤثر کمبود آب را در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهند. مستقل از مقیاس زمانی و نوع شاخص مورد استفاده، نتایج نشان می‌دهد که در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۹۰ شرایط خشکسالی در اقلیم‌های مختلف غالب بوده است. این نتایج با نتایج مطالعات دیگر [مانند ۱۱] هماهنگی دارد. این شرایط منابع آب را تحت تأثیر قرار داده، موجب افزایش تبخیر و تعرق و کمبود آب شده است.

در این مطالعه طبقات خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۷ در شاخص SPEI دارای فراوانی نسبی بیش‌تر در مقایسه با مقادیر مشابه در شاخص SPI را نشان داد که می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییرات بارندگی و منظور نمودن پارامتر درجه حرارت در این شاخص باشد. هر چند بارندگی نقش ویژه‌ای در تغییرات زمانی خشکسالی ایفا می‌نماید اما تأثیر درجه حرارت معنی‌دار بوده و موجب تشدید پدیده خشکسالی و در نهایت موجب کاهش شدیدتر منابع آب می‌گردد و افزایش دما در آینده قابل چشم‌پوشی نبوده و در برخی مطالعات اثبات شده است [۲۲]. شاخص خشکسالی SPEI با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی بارندگی و تبخیر و تعرق می‌تواند تغییرات منابع آب را در مقایسه با شاخص‌هایی که تنها از بارندگی استفاده می‌نمایند، توجیه نماید که از محاسن این شاخص محسوب می‌گردد. بنابراین این شاخص می‌تواند یک شاخص حساس به خشکسالی هیدرولوژیک و راهی برای ارتباط خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک باشد که اهمیت پایش آن توسط محققان دیگر [۱] تایید شده است. درجه حرارت نقش تجمعی در شرایط خشکسالی دارد [۱۹] و بنابراین یک شاخص

نتایج این مطالعه در بررسی کارایی شاخص SPEI با دیگر مطالعات هماهنگی دارد. به طوری که در مطالعه اثرات فرآیند گرم شدن بر خشکسالی‌ها و منابع آب در اسپانیا با بکارگیری دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI نتایج نشان داد که بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره زمانی ۱۹۳۰ تا ۲۰۰۶ افزایش یافته و نتایج دو شاخص خشکسالی مورد استفاده مشابه بوده است [۲۰]. کاربرد شاخص SPEI به‌عنوان یک شاخص جدید خشکسالی در جمهوری چک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که صرف‌نظر از مقیاس زمانی، این شاخص دارای قابلیت تشخیص شدت خشکسالی تحت تأثیر افزایش شرایط دمایی در دهه‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ می‌باشد [۲۱]. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که ارزیابی خشکسالی در این دوره‌ها در نتیجه افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشد. همچنین کارایی شاخص SPI نیز در ایران مورد تأیید برخی محققان گرفته است. به طوری که مقایسه هفت شاخص خشکسالی بارندگی در استان تهران نشان داد که شاخص SPI می‌تواند آغاز خشکسالی را به‌خوبی نشان دهد و در مقیاس زمانی و مکانی کارایی دارد [۱۱]. همچنین کارایی شاخص SPI در اقلیم‌های مختلف ایران مورد تأیید قرار گرفته است [۱۸].

شاخص‌های رایج تعیین خشکسالی مانند شاخص بارندگی استاندارد شده و شاخص خشکسالی مؤثر صرفاً از میزان بارندگی روزانه و یا ماهانه استفاده می‌نمایند. اما بسیاری از محققان بر اهمیت درجه حرارت بر شرایط خشکسالی تأکید نموده‌اند [۱۲] که منجر به افزایش تقاضای آب در اثر افزایش تبخیر و تعرق می‌گردد و بدین ترتیب اهمیت آن را دو چندان نموده است. همچنین فاکتورهایی مانند تابش خورشید، رطوبت و سرعت باد می‌توانند پاسخ فرآیند تبخیر و تعرق را در آینده تغییر دهند [۲۳]. بنابراین شاخص بارندگی - تبخیر و تعرق استاندارد شده براساس میزان بارندگی و درجه حرارت و محاسبه تبخیر و تعرق و بیلان آب می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشکسالی لحاظ نماید.

شالوده شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر فرضیاتی است که در محدوده ویژگی‌های اقلیم‌شناسی ناحیه ابداع آن و نواحی مشابه (از نظر اقلیمی) صدق می‌نمایند. با بررسی مبانی نظری این شاخص‌ها در مناطق دیگر می‌توان میزان سازگاری آنها را با خصوصیات اقلیمی آن مناطق تعیین نمود. با توجه به این‌که عنصر بارندگی تنها فاکتور مورد نیاز شاخص خشکسالی SPI را تشکیل می‌دهد و همچنین

- [3] Palmer W C. Meteorological drought. U.S. Dept. of Commerce Weather Bureau Research; 1965; Paper 45, p. 58.
- [4] Van Rooy M P. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*; 1965; 14: 43-48.
- [5] Nosrati K, Azarnivand H. Regional analysis of drought severity-duration-return period using precipitation data. *Biaban*; 2002; 7(1): 49-61. [In Persian]
- [6] Gibbs W J, Maher J V. Rainfall declines as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin*, 1967; 48, Commonwealth of Australia, Melbourne.
- [7] Bahlme H N, Mooley D A. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*; 1980; 108: 1197-1211.
- [8] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteorological Society; 1993; 179-184.
- [9] Nosrati K, Kazemi Y. Daily monitoring of drought and water resources in different climates of Iran. *Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*; 2011; 64(1): 79-94.
- [10] Nosrati K, Eslamian S, Shahbazi A, Malekian A, Saravi M. M. Application of Daily Water Resources Assessment Model for Monitoring Water Resources Indices. *International Journal of Ecological Economics and Statistics*; 2009; 13: 88-99.
- [11] Morid S, Smakhtin V, Moghaddasi M. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*; 2006; 26(7): 971-985.
- [12] Kempes C, Myers O, Breshears, D, Ebersole J. Comparing response of *Pinus edulis* tree-ring growth to five alternate moisture indices using historic meteorological data. *Journal of Arid Environments*; 2008; 72: 350-357.
- [13] Jones P D, Lister D H, Osborn T J, Harpham C, Salmon M, Morice C P. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*; 2012; 117: D05127.
- [14] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*; 2012; 491: 435-438.

خشکسالی با ترکیبی از داده‌های بارندگی و تبخیر و تعرق مانند SPEI که قادر به پایش تاثیر کوتاه‌مدت خشکسالی بر جریان رودخانه می‌باشد در مقایسه با شاخص SPI بسیار مناسب‌تر برای تحلیل پاسخ منابع آب به خشکسالی می‌باشند. با این وجود میزان تقاضای آب برای محصولات کشاورزی وابسته به میزان درجه حرارت است که با افزایش دما نیاز آبی افزایش می‌یابد. بنابراین نقش تبخیر و تعرق پتانسیل در ذخیره منابع آب بسیار چشم‌گیر می‌گردد. بنابراین رابطه بین متغیرهای هیدرولوژیک و شاخص SPEI بیش‌تر می‌باشد [۱۹].

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در اقلیم‌های مختلف کشور مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفت که شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی نشان داد. به‌طور کلی تعیین و ارزیابی عوامل و فرآیندهای مؤثر بر خشکسالی و چگونگی تأثیر آن‌ها بر شرایط خشکسالی بسیار سخت خواهد بود. همچنین تغییرات در شدت بارش می‌تواند نسبت رواناب به بارش (ضریب رواناب) را تغییر دهد که موجب تغییر بیلان آب و رژیم هیدرولوژیک می‌گردد. این پیچیدگی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات خشکسالی به‌ویژه با در نظر گرفتن فرآیند گرم شدن زمین با ابداع شاخص‌هایی که توانایی پایش خشکسالی را براساس پارامترهای مؤثر داشته باشند (مانند SPEI)، الزامی است. بدین ترتیب تحقیقات بیشتر در زمینه شاخص معرفی شده پیشنهاد می‌گردد.

پی‌نوشت

¹Standardized Precipitation Index (SPI)

²Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

منابع

- [1] Nosrati K. Regional analysis of hydrological drought in Sefidrood Drainage Basin using base flow index. *Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*; 2012; 65(2): 257-267. [In Persian]
- [2] Giorgi F, Lionello P. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*; 2008; 63: 90-104.

- [15] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*; 2010; 23: 1696-1718.
- [16] Edwards D C, McKee T B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report Number 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1997. p.155
- [17] Vicente-Serrano S M. Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management*; 2006; 20: 37-60.
- [18] Bazrafshan J. The study of some meteorological drought indices in some Iranian climate samples. MSc thesis, University of Tehran, Tehran; 2002. [In Persian]
- [19] Lorenzo-Lacruz J, Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Beguería S, García-Ruiz J M, Cuadrat J M. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*; 2010; 386: 13-26.
- [20] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Drummond A, Gimeno L, Nieto R, Morán-Tejeda E, Lorenzo-Lacruz J, Beguería S, Zabalza J. Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula (1930-2006). *Climate Research*; 2011; 48: 203-212.
- [21] Potop V, Možný M. The application a new drought index-Standardized precipitation evapotranspiration index in the Czech Republic. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí*; 2011; 2: 2-14.
- [22] Polemio M, Casarano D. Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy. *Geological Society, London, Special Publications*; 2008; 288: 39-51.
- [23] Dai A. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*; 2011; 2: 45-65.



