

تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان)

یادداشت تحقیقاتی

رنوف مصطفی‌زاده^{۱*} و محسن ذبیحی^۲

۱. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

(دریافت: ۹۴/۶/۳۱، پذیرش نهایی: ۹۵/۳/۲۵)

چکیده

شاخص SPEI خشک‌سالی بیلان آبی را با در نظر گرفتن بارش، دما و تبخیر و تعرق برآورد می‌کند. هدف از پژوهش حاضر، مقایسه الگوی وقوع خشک‌سالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI به علت ماهیت چندمقیاسی بودن و قابلیت تحلیل خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی است. در این راستا هفت ایستگاه سینوپتیک استان کردستان انتخاب و شاخص SPI براساس توزیع گامای دومتغیره محاسبه شد. تبخیر و تعرق پتانسیل به منظور استفاده در شاخص SPEI با معادله تورنویت محاسبه شد و سپس مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس زمانی سه ماهه با استفاده از برنامه‌نویسی R به دست آمد. مقادیر SPI و SPEI در قالب گراف‌های توالی دوره‌ها رسم شد و ارتباط آن‌ها با تحلیل همبستگی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی با ضریب همبستگی و سطح معنی‌داری به صورت ماتریس پراکندگی ابر نقاط عرضه شد. نتایج روشن ساخت که ضمن وجود تفاوت در الگوی وقوع دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی SPI و SPEI، شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در اکثر ایستگاه‌ها مشخص کرده است. براساس نتایج، ضریب‌های همبستگی بین ۰/۱۹ تا ۰/۵۲ در ایستگاه سنندج و معنی‌دار از نظر آماری (در سطح ۹۹ درصد)، متغیر هستند. به نظر می‌رسد که همبستگی ضعیف (۰/۱۹) میان شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه سقز ناشی از افزایش تبخیر و تعرق در فصل‌های بهار و تابستان محاسبه شده با شاخص SPEI است. با توجه به تاثیر دما در محاسبه SPEI، تفاوت قابل توجه بین مقادیر شاخص استاندارد مبتنی بر بارش و شاخص تبخیر و تعرق مبتنی بر دما، زمینه‌کارایی و صحت شاخص پیش‌گفته را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق پتانسیل، دوره‌های خشک و مرطوب، خشک‌سالی هواشناسی، شاخص بارش استاندارد، نرم‌افزار R.

۱. مقدمه

بارش در تعیین خشک‌سالی یک منطقه، از جمله انتقاداتی است که بر شاخص‌های خشک‌سالی مبتنی بر بارش خصوصاً شاخص استاندارد شده بارش (SPI) وارد است. از دسترس خارج شدن حدود ۸۰ درصد بارش از راه تبخیر و تعرق (آبراموپولوس و همکاران، ۱۹۸۸) بر اهمیت لحاظ کردن دیگر متغیرها از جمله دما و تبخیر و تعرق برای تعیین خشک‌سالی تأکید دارد. همچنین یکسان بودن پاسخ شاخص خشک‌سالی پالمر به تغییرات مشابه در بزرگی متغیرهای دما و بارش طبق یافته‌های هو و ویلسون (۲۰۰۰) بر اهمیت نقش دما در تعیین خشک‌سالی صحه می‌گذارد (هو و ویلسون، ۲۰۰۰). با این توضیحات اثر افزایش دما در تشدید خشک شدن به مراتب بیشتر از کاهش بارندگی است و این می‌تواند نقش مؤثر دما در تقویت یا تضعیف خشک‌سالی را تأیید کند. بر همین اساس می‌توان شاخص خشک‌سالی استاندارد شده

خشک‌سالی به سبب تعداد، فراوانی، گستردگی و تبعات کوتاه و بلندمدت اقتصادی اجتماعی و زیست محیطی، از جمله مهم‌ترین حوادث طبیعی به‌شمار می‌رود (باقری و محمدی، ۱۳۹۱) و بر همین اساس نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های کلان‌مدیریتی برای رسیدن به اهداف توسعه پایدار دارد. خشک‌سالی پدیده‌ای است که اساساً با کمبود بارش و یا در برخی موارد با تبخیر و تعرق در یک منطقه مرتبط 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 (چانگ و کلنو پا، ۱۹۹۸؛ هیم، ۲۰۰۲؛ سلطانی و سعادت، ۱۳۸۶؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). اما صرفاً در نظر گرفتن عامل

هواشناسی SPEI و SPI در ایستگاه‌های منتخب کشور به همبستگی معنی‌دار میان شاخص‌ها با به‌کارگیری آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری در سطح اطمینان ۹۵ درصد اشاره کردند. نصرتی (۱۳۹۳) با هدف بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در گستره اقلیم‌های گوناگون کشور و مقایسه با شاخص بارش استاندارد شده در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۷ روشن ساختند که شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده دارای همبستگی معنی‌دار است اما شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشک‌سالی دارد. تاج‌بخش و همکاران (۱۳۹۴) خشک‌سالی هواشناسی در ایران را در یک دوره یکساله (چهار فصل) با استفاده از شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که عامل تبخیر-تعرق، نقش مؤثری در تغییر شدت (افزایش یا کاهش) خشک‌سالی دارد. ایشان استفاده از شاخص تبخیر-تعرق را در کنار عامل بارش برای تحلیل خشک‌سالی توصیه کردند. زارع ابیانه و همکاران (۱۳۹۴) از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) برای تحلیل خشک‌سالی تحت شرایط تأثیر تغییر اقلیم استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مزیت شاخص SPEI نسبت به SPI این است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در پیوند با گرمایش جهانی دارد.

با بررسی سوابق پژوهش درخصوص بررسی و تحلیل خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های گوناگون مشخص می‌شود که علی‌رغم وجود سوابق متعدد در استفاده از شاخص SPI، تحقیقات محدودی در استفاده از شاخص SPEI با توجه به جدید بودن آن در دنیا صورت گرفته و در ایران نیز تاکنون این شاخص در بررسی و تحلیل خشک‌سالی هواشناسی مورد توجه کامل و جدی قرار نگرفته است. بر همین اساس و با توجه به اهمیت خشک‌سالی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی، پژوهش حاضر با هدف محاسبه شاخص خشک‌سالی استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) و تحلیل آن در ایستگاه‌های منتخب هواشناسی در استان کردستان پایه‌ریزی شده است. همچنین گدنیوسی و مقایسه شاخص خشک‌سالی استاندارد شده بارش SPI و SPEI در محیط نرم‌افزار برنامهنویسی R، از دیگر اهداف پژوهش حاضر است.

بارش و تبخیر-تعرق (SPEI) را که ویسنه سرانو در ۲۰۰۹ عرضه کرد، درحکم شاخصی مناسب در تعیین خشک‌سالی مورد استفاده قرار داد. در این شاخص سه متغیر بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) لحاظ شده است. شاخص SPEI، حساسیت شاخص خشک‌سالی پالم (PDSI) به تغییرات نیاز تبخیر را با محاسبات ساده و طبیعت چندمقیاسی شاخص استاندارد شده بارش ترکیب می‌کند. بنابراین می‌تواند هر دو ویژگی شاخص‌های SPI و PDSI را داشته باشد. به‌علت جدید بودن موضوع، تحقیقات به‌نسبت محدودی درخصوص بررسی خشک‌سالی با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق در دنیا صورت گرفته است. این درحالی است که تاکنون پژوهش‌های بسیار اندکی مبنی بر استفاده از شاخص SPEI در ایران به انجام رسیده است. در این راستا پتاپ و موزنی (۲۰۱۱) شاخص جدید خشک‌سالی SPEI را در جمهوری چک مورد بررسی قرار دادند و بر توانایی شاخص SPEI در تشخیص شدت خشک‌سالی تأکید کردند. افزایش وقوع خشک‌سالی در پنج دهه مورد بررسی نیز از دیگر یافته‌های پژوهش پیش‌گفته است. لیویا و همکاران (۲۰۱۴) شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI را با استفاده از داده‌های مدل COSMO در دو حوزه آبخیز اسلواکی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که همبستگی کمی بین شاخص SPI و SPEI در جنوب اسلواکی در مقیاس زمانی سه ماهه وجود دارد. همچنین ایشان بر نقش مهم تبخیر و تعرق بر خشک‌سالی در منطقه مورد بررسی در فصل تابستان تأکید داشتند. تامروس و منزل (۲۰۱۴) نیز 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 میان‌سالانه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) ماهانه است. استیج و همکاران (۲۰۱۵) نیز به مقایسه توزیع‌های فراوانی شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI در اروپا پرداختند. ایشان توزیع‌های دوپارامتری گاما و مقادیر حدّ عمومی را به‌ترتیب برای شاخص‌های SPI و SPEI مناسب تشخیص دادند.

از پژوهش‌های صورت گرفته در داخل کشور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. بنی‌مهد و خلیلی (۱۳۹۳) در تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای رفتار شاخص‌های خشک‌سالی

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در ۷ ایستگاه منتخب هواشناسی در استان کردستان صورت گرفته است و در این راستا داده‌های بیشینه دمای روزانه، کمینه دمای روزانه، مجموع بارندگی و میانگین دما در مقیاس ماهانه، از سازمان هواشناسی ایران اخذ شده است. پس از بررسی اولیه داده‌ها، به علت موجود بودن نواقص آماری و همچنین نبود اطمینان به صحت و دقت داده‌های برخی از ایستگاه‌های موجود، در نهایت هفت ایستگاه با طول دوره آماری ۱۹ سال (۱۹۹۵ تا ۲۰۱۳) در این استان مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب ایستگاه‌ها براساس رسم بارگراف دوره آماری بود و بیشترین دقت لازم در حداکثر استفاده از آمار موجود صورت گرفته است. در خصوص کوتاه بودن طول دوره آماری در تحقیق حاضر، باید اشاره شود که وو و همکاران (۲۰۰۵) و نیز کومار و همکاران (۲۰۰۹) تاثیر طول دوره‌های آماری ۲۱ تا ۳۹ ساله را بر نتایج محاسبه SPI در هندوستان مورد ارزیابی قرار دادند، و بر تفاوت جزئی میان حداقل و حداکثر مقادیر SPI محاسباتی تحت تاثیر طول دوره آماری اشاره کردند. لذا می‌توان گفت که براساس آمار موجود می‌توان دوره آماری مورد استفاده در تحقیق را قابل قبول دانست. گدنویسی لازم برای محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI در مقیاس زمانی سه ماهه با استفاده از نرم‌افزار آماری و محیط برنامه‌نویسی R صورت گرفت. برخی از خصوصیات آماری متغیرهای مورد بررسی در ایستگاه‌های تحقیقاتی در جدول ۱ داده شده است.

۲.۱. محاسبه شاخص استاندارد شده بارش SPI

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) برای هر مکانی براساس داده‌های بارش ثبت شده در طولانی مدت قابل محاسبه است. شاخص SPI را نخستین بار مک کی و همکاران (۱۹۹۳) مورد استفاده قرار دادند. داده‌های بارش ثبت شده در بلندمدت به یک توزیع احتمالاتی برازش، و سپس به یک توزیع نرمال تغییر شکل داده می‌شوند، طوری که میانگین SPI در مکان و دوره زمانی مورد نظر صفر است (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳؛ ادواردز و مک کی، ۱۹۹۷؛ بنی مهد و خلیلی، ۱۳۹۳؛ میشر و سینگ، ۲۰۱۰؛ مساعدی و همکاران، ۱۳۸۷؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI در هر یک از مقیاس‌های زمانی را می‌توان

از مزیت‌های این شاخص برشمرد. طول دوره ثبت داده‌های بارش و همچنین ماهیت توزیع‌های احتمالاتی، نقش مهمی در محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI دارد و این عوامل از جمله محدودیت‌های آن به شمار می‌روند (میشر و سینگ، ۲۰۱۰). مقادیر SPI در هر یک از ایستگاه‌ها براساس روابط عرضه شده در محیط نرم‌افزار R برنامه‌نویسی شد و به اجرا درآمد. با توجه به سوابق پژوهش‌های صورت گرفته، مشخص می‌شود که توزیع احتمال بارش یک ایستگاه معمولاً از توزیع گاما پیروی می‌کند که تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت 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 براساس رابطه (۲) به دست می‌آید:

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

استفاده از روش بیشینه درست‌نمایی 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 (ویسنه سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). براساس این روش، ضریب‌های بهینه α و β به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شود.

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

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

که در آن، $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$ و n تعداد داده‌ها است.

۲.۲. محاسبه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و

تعرق (SPEI)

شاخص SPEI را نخستین بار ویسنه سرانو و همکاران در ۲۰۰۹ به کار بردند. شاخص SPEI شاخصی چندکمی است که در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. نحوه محاسبه شاخص پیش گفته همانند شاخص SPEI است اما در شاخص SPEI مقادیر اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر در واقع معرف تعادل اقلیمی بیلان آبی است که در شاخص SPEI مدنظر قرار گرفته است. براساس نتایج ماوروماتیس (۲۰۰۷) مبنی بر تشابه روش‌های ساده و پیچیده برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل،

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (۷)$$

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (۸)$$

که در این روابط، T دمای میانگین ماهانه به درجه سلسیوس، m ضریب وابستگی به I، I شاخص گرما یا مجموع شاخص ۱۲ ماهه i K ضریب تصحیحی برحسب ماه و عرض جغرافیایی، NDM تعداد روزهای یک ماه و N بیشینه تعداد ساعت‌های تابش است.

ویسنده سرانو از روش تورنتوایت (۱۹۴۸) بدین منظور استفاده کرد (ماوروماتیس، ۲۰۰۷؛ ویسنده سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). در پژوهش حاضر برای محاسبه شاخص SPEI از راهنمای پیوست پیش گفته در محیط R (ویسنده سرانو و همکاران، ۲۰۱۰) بهره برده شد. شاخص SPEI براساس روابط (۵) تا (۱۲) به دست می‌آید.

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (۵)$$

$$m = 6.75 \times 10^{-7}I^3 - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 1.79 \times 10^{-2} \quad (۶)$$

جدول ۱. برخی از خصوصیات آماری متغیرهای مورد بررسی در ایستگاه‌های تحقیقاتی

ایستگاه	مشخصه آماری	بارش ماهانه (mm)	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)	دمای میانگین (°C)
بیشینه	بیشینه	244/60	35/00	22/70	28/80
	میانگین	56/83	18/64	8/73	13/69
	کمینه	0/00	2/60	-4/50	-0/80
	انحراف معیار	60/98	10/57	8/10	9/32
بانه	ضریب تغییرات (%)	107/30	56/68	92/78	68/07
	بیشینه	129/00	34/30	18/20	26/20
	میانگین	25/33	17/16	5/96	11/56
	کمینه	0/00	-6/80	-13/90	-10/30
بیجار	انحراف معیار	25/90	11/08	7/97	9/51
	ضریب تغییرات (%)	102/26	64/54	133/87	82/23
	بیشینه	153/20	34/30	18/60	26/50
	میانگین	27/55	17/79	5/94	11/87
قروه	کمینه	0/00	-5/40	-13/50	-9/40
	انحراف معیار	29/81	10/61	8/02	9/29
	ضریب تغییرات (%)	108/21	59/66	135/03	78/31
	بیشینه	363/20	37/30	17/60	27/30
مریوان	میانگین	74/33	21/05	5/14	13/10
	کمینه	0/00	0/80	-11/90	-5/20
	انحراف معیار	85/37	10/53	6/69	8/53
	ضریب تغییرات (%)	114/86	50/00	130/08	65/16
سقز	بیشینه	187/90	35/90	17/30	26/90
	میانگین	34/45	18/96	2/77	8/78
	کمینه	0/00	-5/70	-17/80	-15/00
	انحراف معیار	36/57	10/98	7/14	9/45
سنندج	ضریب تغییرات (%)	106/13	57/93	257/78	107/57
	بیشینه	143/70	39/00	20/50	29/30
	میانگین	32/29	22/39	6/35	14/38
	کمینه	0/00	0/70	-8/90	-3/90
زرینه	انحراف معیار	35/66	10/79	7/33	9/00
	ضریب تغییرات (%)	110/43	48/19	115/38	62/61
	بیشینه	158/90	31/10	14/30	22/40
	میانگین	31/10	14/42	1/95	8/22
ضریب تغییرات (%)	کمینه	0/00	-3/00	-13/10	-7/40
	انحراف معیار	32/71	10/78	7/79	9/25
	ضریب تغییرات (%)	105/20	74/73	399/27	112/53

تحلیل همبستگی و استفاده از نرم‌افزار R مورد آزمون قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI در ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۱ عرضه شده است و می‌توان تغییرات زمانی شاخص بارش استاندارد را در هر کدام از ایستگاه‌ها مشاهده کرد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در اکثر ایستگاه‌ها در فاصله سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ وقوع ترسالی‌ها بیشتر بوده و این وضعیت در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ نیز کم و بیش در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی تکرار شده است. در ایستگاه‌های بانه، مریوان و زرینه وقوع ترسالی‌ها بیشتر از خشک‌سالی‌ها اتفاق افتاده است. براساس نتایج، نوسان‌های شاخص محاسباتی بارش استاندارد در دوره مورد بررسی بزرگ است.

در تحلیل نتایج حاصل از محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI مشخص شد که شدت‌های متفاوت شاخص پیش‌گفته در ایستگاه‌های متفاوت به‌دست آمد. در این راستا ایستگاه‌های قروه و بیجار شدت خشک‌سالی کمتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها داشتند. همچنین بررسی تغییرات زمانی شاخص خشک‌سالی SPI در ایستگاه‌های تحقیقاتی نشان می‌دهد که اکثر ایستگاه‌ها از الگوی تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند، اما در ایستگاه زرینه تغییرپذیری زیاد شاخص SPI در سال‌های مورد بررسی مشهود است؛ به‌نحوی که به‌صورت متناوب سال‌های خشک و مرطوب تکرار شده است. براساس نتایج عرضه شده در شکل ۱، روند کاهشی در شاخص خشک‌سالی SPI در کلیه ایستگاه‌ها به‌چشم می‌رسد که این نشان‌دهنده شرایط خشک‌تر در سال‌های اخیر است. شایان ذکر است که بیشترین شدت خشک‌سالی و ترسالی براساس شاخص SPI طی سال‌های مورد بررسی در ایستگاه‌های گوناگون، متفاوت است و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. براساس نتایج، در ایستگاه بیجار در ۱۳۷۵ خشک‌سالی با بیشترین شدت اتفاق افتاده است و در ایستگاه‌های سنندج، قروه و زرینه نیز خشک‌سالی با شدت زیاد در ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶ اتفاق افتاده است. این در حالی است که ترسالی شدید در ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ تقریباً در همه ایستگاه‌ها به‌وقوع پیوسته است. نتایج محاسبه شاخص SPEI در ایستگاه‌های استان کردستان در شکل ۲ نشان داده شده است.

بدین ترتیب با داشتن مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل، اختلاف بین بارش (P) و PET برای ماه اُم به‌دست می‌آید.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (9)$$

براساس نتایج تحقیقات متعدد مشخص شده است که توزیع لجستیک به‌دلیل تناسب بیشتر با داده‌های دارای چولگی و نیز دنباله طولانی‌تر در دامنه انتهایی توزیع، دارای کارایی بهتری در تعیین تابع تراکم احتمال یا pdf سری‌های زمانی D است، لذا در محاسبه تابع تراکم احتمال در محاسبه SPEI از توزیع لجستیک استفاده می‌شود. تابع تراکم احتمال سری‌های D براساس توزیع لجستیک لگاریتمی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

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

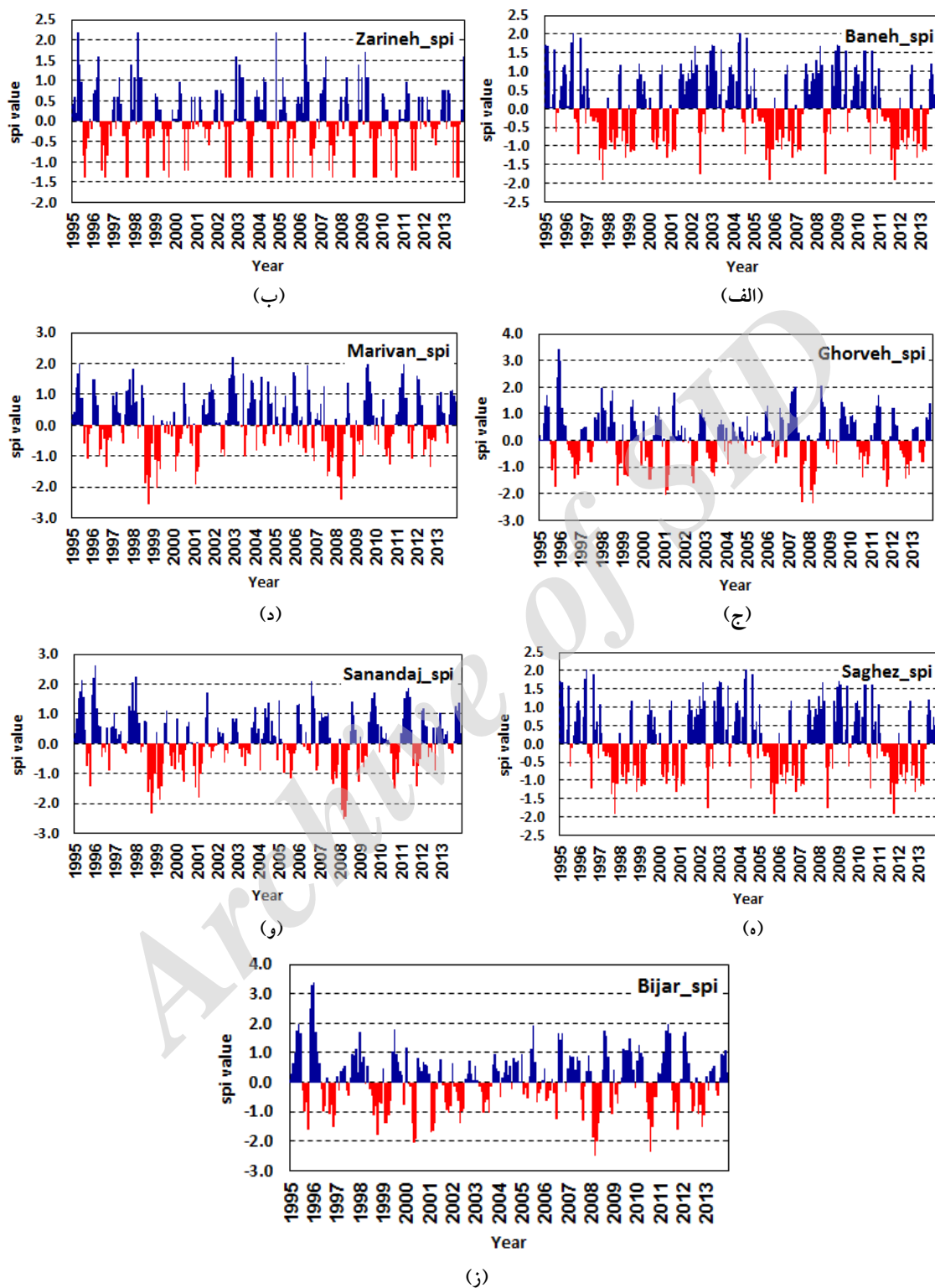
که در این رابطه، α ، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D در دامنه $-\infty < \gamma < \infty$ هستند (سینگ و همکاران، ۱۹۹۳؛ ویسنه‌سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). برای محاسبه پارامترهای توزیع لجستیک لگاریتمی از روش ممان وزنی احتمال به‌منزله روشی توان‌مند و ساده استفاده شد. تابع توزیع احتمال سری‌های D نیز براساس رابطه زیر به‌دست می‌آید.

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

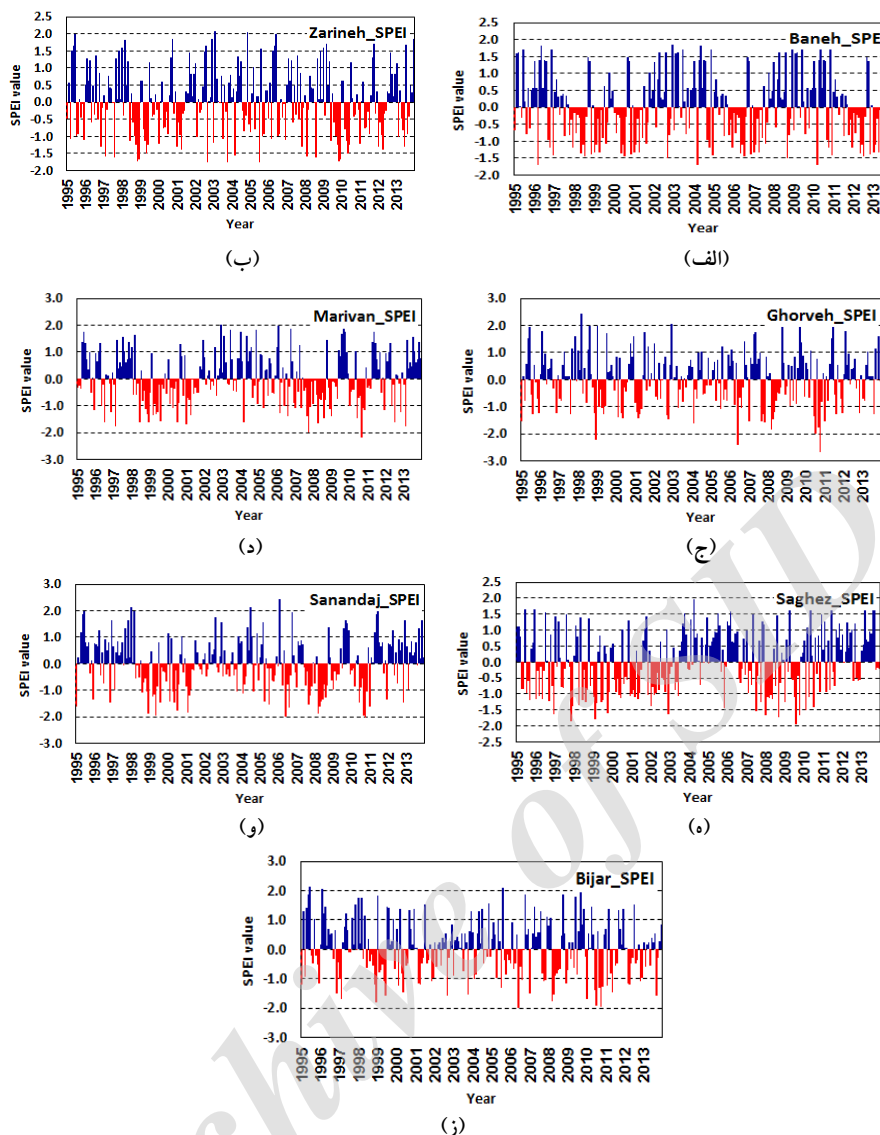
شاخص SPEI در حکم مقادیر استاندارد شده (Fx) را می‌توان به‌آسانی محاسبه کرد.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (12)$$

که در آن، $W = \sqrt{-2 \ln(P)}$ برای $P \leq 0.5$ بوده و P احتمال بیشتر شدن مقادیر تعیین شده D است. مقادیر C_0 ، C_1 و C_2 و همچنین d_1 ، d_2 ، d_3 ثابت هستند. شاخص SPEI یک متغیر استاندارد شده است و بنابراین می‌تواند با سایر مقادیر SPEI در مکان و زمان مقایسه شود. مقدار SPEI معادل صفر به معنای مقادیر منطبق با ۵۰٪ احتمال تجمعی D است (ویسنه‌سرانو و همکاران، ۲۰۱۰؛ تاج‌بخش و همکاران، ۱۳۹۴). به‌منظور محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI از برنامه‌نویسی و محاسبه شاخص‌های پیش‌گفته در محیط نرم‌افزار برنامه‌نویسی R استفاده شد. در ادامه، همبستگی میان شاخص‌های SPI و SPEI و با استفاده از



شکل ۱. نتایج محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI در ایستگاه‌های تحقیقاتی، (الف) بانه، (ب) زرینه، (ج) قروه، (د) مریوان، (ه) سقز، (و) سنندج و (ز) بیجار



شکل ۲. نتایج محاسبه شاخص خشک‌سالی SPEI در ایستگاه‌های تحقیقاتی، (الف) بانه، (ب) زرینه، (ج) قروه، (د) مریوان، (ه) سقز، (و) سنندج و (ز) بیجار

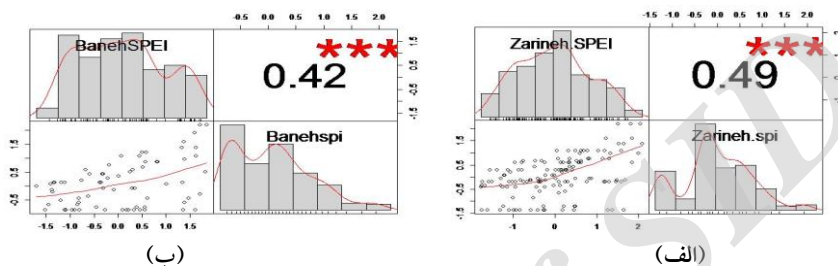
(۱۳۹۴) و مصطفی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) مبنی بر استفاده از سایر عوامل اقلیمی علاوه بر بارش در تعیین خشک‌سالی مطابقت دارد و آنها را تأیید می‌کند. براساس نتایج، شاخص SPEI قابلیت تشخیص خشک‌سالی و تعیین دقیق توالی دوره‌ها را دارد. البته در شرایط اقلیمی با نوسان‌های کم دما، هر دو شاخص SPI و SPEI به تغییرات بارندگی واکنش یکسانی نشان می‌دهند. نتایج پژوهش حاضر با نتایج آبراموپولوس و همکاران (۱۹۹۸) و ویسنه سرانو و همکاران (۲۰۱۰) مبنی بر توانایی شاخص SPEI در تعیین دقیق توالی و نوسان‌های خشک‌سالی نسبت به شاخص SPI، مطابقت دارد. تغییرپذیری بیشتر شدت خشک‌سالی و ترسالی براساس شاخص SPEI نسبت به SPI در منطقه تحقیقاتی نیز از دیگر یافته‌های پژوهش

در بررسی وضعیت خشک‌سالی استان کردستان با استفاده از شاخص SPEI مشاهده می‌شود که همانند شاخص SPI الگوی تغییرات دوره‌ای خشک‌سالی در ایستگاه‌های بانه، سقز و سنندج قابل تشخیص است. قابل ذکر است که شدت خشک‌سالی‌های محاسبه شده با استفاده از شاخص SPEI به‌ندرت از مقدار عددی ۲ بالاتر است. در این مورد می‌توان گفت که با لحاظ شدن عامل دما در تعیین خشک‌سالی و با استفاده از شاخص SPEI و طبعاً اثرات متقابل بارندگی و دما، شدت خشک‌سالی افزایش یافته است. به عبارت دیگر علاوه بر کاهش بارندگی در منطقه مطالعاتی، افزایش دما نیز برای وقوع پدیده خشک‌سالی مزید بر علت شده است. یافته پیش‌گفته، با نتایج تاج‌بخش و همکاران (۱۳۹۴)، زارع ایبانه و همکاران

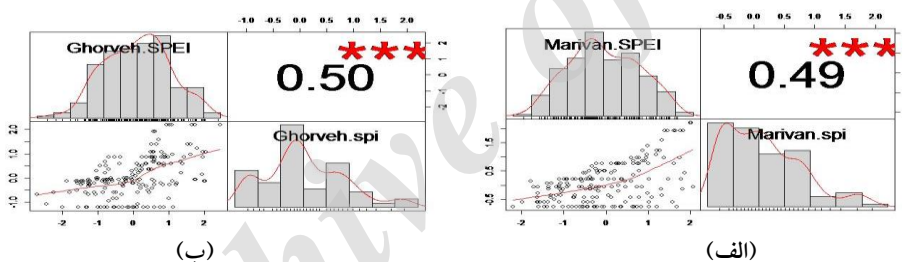
حاضر است. همچنین بیشترین تعداد کل واقعه‌های خشک‌سالی، به‌ویژه خشک‌سالی شدید/خیلی شدید با شاخص SPEI مشخص شده است که این بیانگر مشارکت مؤثر تبخیر-تعرق در پایش خشک‌سالی‌ها است. توصیه می‌شود شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق به سبب نیاز به داده‌های اندک نسبت به سایر شاخص‌های خشک‌سالی، بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. برآوردهای دقیق مدل SPEI نسبت به SPI، استفاده از آن به‌منظور نمایش، تحلیل و پایش شاخص

خشک‌سالی را توجیه می‌کند.

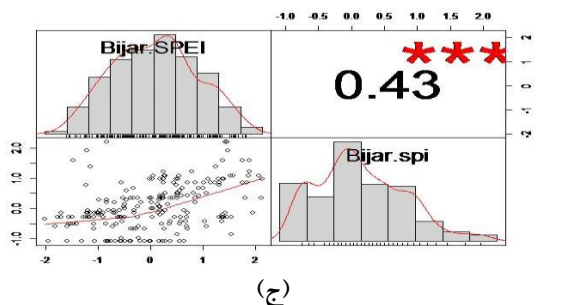
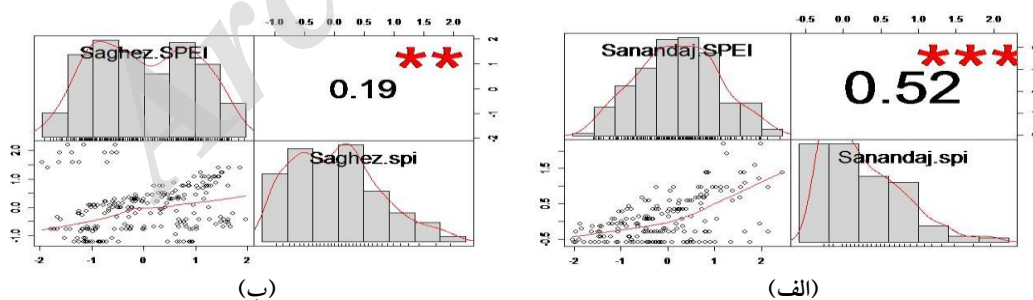
نتایج تحلیل همبستگی مقادیر محاسبه شده شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه‌های استان کردستان به همراه مقدار ضریب همبستگی و سطح معنی‌داری در شکل‌های ۳ تا ۵ به صورت ماتریس پراکندگی ابر نقاط نشان داده شده است. با استفاده از آزمون همبستگی در قالب عرضه نمودار ابر نقاط، هیستوگرام، فراوانی و ضریب معنی‌داری، می‌توان همبستگی آماری را با دقت بیشتری مورد تحلیل قرار داد.



شکل ۳. نتایج همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI در ایستگاه‌های، (الف) زرنه و (ب). بانه



شکل ۴. نتایج همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI در ایستگاه‌های، (الف) مروان و (ب) قروه



شکل ۵. نتایج همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI در ایستگاه‌های (الف) سنندج، (ب) سقز و (ج) بیجار

استاندارد شده بارش و شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر- تعرق در شرایط گوناگون داده‌های در دسترس، مورد استفاده قرار می‌گیرد که تابع‌های کمکی متعددی در اختیار تحلیل نتایج شاخص‌ها قرار داده است.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI در استان کردستان صورت پذیرفت. براساس نتایج در اکثر ایستگاه‌ها در فاصله سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ وقوع ترسالی‌ها بیشتر بوده و نیز این وضعیت در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ کم و بیش در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی تکرار شده است. در ایستگاه‌های بانه، مریوان و زرینه وقوع ترسالی‌ها بیشتر از خشک‌سالی‌ها اتفاق افتاده است. در ایستگاه زرینه در ماه‌های ابتدایی سال شرایط ترسالی حاکم است و نیز تداوم‌های تقریباً یکسانی از نظر دوره‌های خشک و مرطوب طی دوره آماری مورد بررسی مشاهده می‌شود. در ایستگاه‌های قروه، مریوان و سنندج نیز شرایط ترسالی تداوم کمتری دارد. قابل ذکر است که علی‌رغم اینکه ایستگاه‌های مورد بررسی در استان شرایط دمایی متفاوتی دارند، ولی تفاوت قابل توجهی از نظر وقوع دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی بین ایستگاه‌ها براساس شاخص SPI وجود ندارد. قابل ذکر است که ریتز و همکاران (۲۰۰۶) شاخص پیش‌گفته را برای تحلیل خشک‌سالی در شرایط افزایش دما، تغییرات اقلیمی و نیز وقوع وقایع حدی نیز مناسب تشخیص داده‌اند. 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. این امر همسو با نتایج تحقیق پائولو و همکاران (۲۰۱۲) و ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۱۲) است. نتایج ماتریس همبستگی مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI نشان می‌دهد که همبستگی معنی‌دار بین نتایج شاخص‌ها وجود دارد که با نتایج بنی‌مهد و خلیلی (۱۳۹۱) و نصرتی (۱۳۹۳) در یک راستا است. البته چون ایستگاه‌های انتخابی تا حدی در شرایط اقلیمی تقریباً مشابهی قرار گرفته‌اند انتظار می‌رود که روند وقوع خشک‌سالی‌ها مشابه باشد، که در این خصوص می‌توان به

براساس اطلاعات عرضه شده در شکل‌های ۳ تا ۵، نمودار پراکنندگی ابر نقاط به همراه هیستوگرام فراوانی مقادیر شاخص‌ها، ضریب همبستگی و سطوح معنی‌داری ($p < 0.001$)، ($p < 0.01$) و ($p < 0.05$) بین مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI در هر ایستگاه داده شده است. تعیین همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI می‌تواند امکان‌پذیری استفاده از شاخص SPI در مناطق فاقد داده‌های دمایی و به تبع آن استفاده نکردن از شاخص SPEI را با توجه به معنی‌داری و ضریب همبستگی، فراهم کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در صورت وجود همبستگی معنی‌دار بین شاخص‌های اشاره شده، می‌توان از شاخص SPI در مناطق فاقد داده دمایی و با دقت شاخص SPEI استفاده کرد. اگرچه این امر ناقص برتری شاخص SPEI نسبت به SPI به سبب لحاظ کردن عامل دما علاوه بر بارندگی در بررسی وضعیت خشک‌سالی و ترسالی نیست. براساس نتایج عرضه شده در شکل‌های ۳ تا ۵ درخصوص همبستگی بین شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI مشاهده می‌شود که در همه ایستگاه‌های مورد بررسی، بین شاخص‌های پیش‌گفته همبستگی وجود دارد. نتایج تحلیل‌های مقایسه‌ای روشن ساخت که ضریب‌های همبستگی بین 0.19 ($p < 0.01$) و 0.52 ($p < 0.0001$) و معنی‌دار از نظر آماری، متغیر هستند. همبستگی ضعیف میان شاخص‌های SPI و SPEI به دست آمده در ایستگاه سقز (0.19) نیز می‌تواند ناشی از تبخیر و تعرق در فصل‌های بهار و تابستان با افزایش دما و محاسبه شده با شاخص SPEI باشد. بیشترین همبستگی نیز در ایستگاه سنندج با مقدار 0.52 محاسبه شد. همان‌گونه که در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود، همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI محاسباتی در همه ایستگاه‌های مورد بررسی از نوع همبستگی مثبت است. در همین راستا در همه ایستگاه‌ها همبستگی بین مقادیر شاخص‌های بارش استاندارد و شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر- تعرق در سطح ($p < 0.001$) معنی‌دار است. به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از داده‌های اقلیمی، نبود نیاز به فرضیه‌هایی درباره مدل‌سازی سامانه موردنظر و تعیین بی‌هنجاری‌های اقلیمی، از مزایای شاخص‌های SPI و SPEI نسبت به سایر شاخص‌های خشک‌سالی است. در این راستا پیوست‌های تدوین شده SPI و SPEI در نرم‌افزار R درحکم نرم‌افزاری توان‌مند برای محاسبه سری‌های زمانی شاخص

خشک‌سالی با استفاده از زنجیره مارکف و روش خطی- لگاریتمی، راهکاری برای اعلام هشدار اولیه، م. علوم و مهندسی آبخیزداری، ۸(۴)، ۵۶-۳۷.

بنی‌مهد، س.ا. و خلیلی، د.، ۱۳۹۱، تجزیه و تحلیل مقایسه‌های رفتار شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPEI و SPI با به کارگیری آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری همبستگی در ایستگاه‌های منتخب ایران، اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، تهران.

تاج‌بخش، س.، عیسی‌خانی، ن. و فضل‌کاظمی، ا.، ۱۳۹۴، ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در ایران با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر و تعرق، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۱(۲)، ۳۲۱-۳۱۳.

زارع ایبانه، ح.، قبائی‌سوق، م. و مساعدی، ا.، ۱۳۹۴، پایش خشک‌سالی بر مبنای شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) تحت تأثیر تغییر اقلیم، م. آب و خاک، ۲۹(۲)، ۳۹۲-۳۷۴.

سلطانی، س. و سعادت، س. س.، ۱۳۸۶، پهنه‌بندی خشک‌سالی در استان اصفهان با استفاده از نمایه بارش استاندارد (SPI)، م. علوم مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۲)، ۶۷-۶۴.

مساعدی، ا.، خلیل‌زاده، م. و محمدی استادکلایه، ا.، ۱۳۸۷، پایش خشک‌سالی هواشناسی در سطح استان گلستان، مج. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۲)، ۱۸۳-۱۷۶.

مصطفی‌زاده، ر. شهابی، م. و ذیحی، م.، ۱۳۹۴، تحلیل خشک‌سالی هواشناسی در استان کردستان با استفاده از مدل نمودار سه‌متغیره، م. آمایش جغرافیایی فضا، ۱۷، ۱۴۰-۱۲۹.

نصرتی، ک.، ۱۳۹۳، ارزیابی شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشک‌سالی در اقلیم‌های مختلف ایران، علوم محیطی، ۱۲(۴)، ۶۳-۷۴.

Abramopoulos, F., Rosenzweig, C. and Choudhury, B., 1988, Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs), Soil water movement and evapotranspiration, J. of Climate, 1, 921-941.
Chang, T. J. and Cleopa, X. A., 1998, A proposed method for drought monitoring, Water Resources Bulletin., 27, 275-281.
Edwards, D. C. and McKee, T. B., 1997, Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales, J. of the Atmospheric Sciences., 634, 1-30.

ضعیف‌بودن ضریب همبستگی در ایستگاه سقز اشاره کرد. این درحالی است که ممکن است نتایج درخصوص ایستگاه‌هایی با شرایط اقلیمی متفاوت از نظر دمایی این‌گونه نباشد، که این نیازمند آزمون و مقایسه نتایج در شرایط اقلیمی گوناگون و دستیابی به جمع‌بندی نهایی است. در شرایط کمبود و یا محدودیت داده، تبخیر و تعرق پتانسیل را می‌توان براساس روش‌های ساده شده مانند تورنوایت محاسبه کرد، ولی در صورت وجود داده‌های جزئی و دقیق می‌توان از روش‌هایی همچون هارگریوز و پنمن برای تعیین تغییرات خشک‌سالی استفاده کرد. براساس نتایج کیانتاش و دراکاپ (۲۰۰۲) شاخص‌های ارزیابی خشک‌سالی باید به سادگی قابل محاسبه و از نظر آماری قابل اعتماد باشد. در این راستا استفاده از شاخص SPEI در شرایط گوناگون اقلیمی و مباحث تغییر اقلیم، دارای مزیت قابل توجهی است. در همین زمینه تاج‌بخش و همکاران (۱۳۹۴) و زارع ایبانه و همکاران (۱۳۹۴) نیز به کارایی استفاده از شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق در تحلیل خشک‌سالی همراه با عامل بارش اشاره کرده‌اند. البته شاخص SPEI نسبت به شاخص استاندارد شده بارش به متغیرهای اقلیمی بیشتری در محاسبات نیاز دارد، به‌روشن محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل حساسیت دارد و همچنین نیازمند دوره طولانی‌تری با تغییرات طبیعی اقلیمی است. درنهایت تحقیقات بیشتر در سایر مناطق اقلیمی و نیز مقایسه با سایر شاخص‌های ارزیابی خشک‌سالی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

باقری، ر. و محمدی، ص.، ۱۳۹۱، بررسی تغییرات مکانی خشک‌سالی با استفاده از زمین‌آمار در استان کرمان در یک دوره آماری سی‌ساله (۱۳۷۹-۱۳۴۹)، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۹(۲)، ۳۱۳-۳۲۱.
بنی‌مهد، س.ا. و خلیلی، د.، ۱۳۹۳، تحلیل انتقال گروه‌های Heim, R. R., 2002, A review of twentieth-century drought indices used in the United States, Bulletin of the American Meteorological Society, 83, 1149-1165
Hu, Q. and Willson, G. D., 2000, Effect of temperature anomalies on the Palmer drought severity index in the central United States, International J. of Climatology., 20, 1899-1911.
Keyantash, J. and Dracup, J., 2002, The quantification of drought: an evaluation of drought indices, Bulletin of the American

- Meteorological Society., 83, 1167-1180.
- Livia, L., Lukas, S. and Gunther, H., 2014, The comparison of the SPI and the SPEI using COSMO model data in two selected Slovakian river basins, EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Mavromatis, T., 2007, Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece, *International J. of Climatology*, 27, 911-924.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales, In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- Mishra, A. and Singh, V. P., 2010, A review of drought concepts, *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Kumar, N., M., Murthy, C. S., Sessa Sai, M. V. R. and Roy, P. S., 2009, On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment, *Meteorological Applications*, 16, 381-389.
- Paulo, A. A., Rosa R. D. and Pereira, L. S., 2012, Climate trends and behavior of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 481-491.
- Potop, V. and Mozny, M., 2011, The application a new drought index- standardized precipitation evapotranspiration index in the Czech Republic, ISBN 978-80-86690-87-2.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. P. and Menzel, A., 2006, Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis, *Annals of Forest Sciences*, 63, 569-577.
- Singh, V. P., Guo, H. and Yu, F. X., 1993, Parameter estimation for 3-parameter log-logistic distribution (LLD3) by Pome, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 7, 163-177.
- 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.
- Thornthwaite, C. W., 1948, An approach toward rational classification of climate, *Geographical Review.*, 38, 55-94.
- 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.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S. and Lopez-moreno, J. I., 2010, A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI, *J. of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., Lorenzo-Lacruz, J., Julio Camarero, J., Lopez-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E. and Sanchez-Lorenzo, A., 2012, Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications, *Earth Interactions.*, 16, 1-27.
- Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A. and Svoboda, M. D., 2005, The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation, *Int J of Climatology*, 25(4), 505-520.

Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province)

Mostafazadeh, R.^{1*} and Zabihi, M.²

1. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Nour, Iran

(Received: 22 Sep 2015, Accepted: 14 Jun 2016)

Research Note

Summary

Drought indices are commonly used to quantify and assess drought characteristics. The Standardized Precipitation Index (SPI), and recently introduced Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) are considered as universal meteorological drought indices which allow comparisons of drought conditions across different climate regions. The SPI captures anomalies in precipitation, whereas the SPEI estimates anomalies in climatic water balance that incorporates temperature. The main aim of this study is to compare historical drought occurrence based on SPI and SPEI indices using R programming. The SPEI index is used because of multi-scalar nature of index and the advantage of identifying the multi-temporal nature of droughts. According to data availability, seven synoptic stations were selected for a drought analysis across Kurdistan Province. The two-parameter gamma distribution was used for calculating SPI across the study period (1995-2013) and stations within the study area. The potential evapotranspiration (PET) was computed using the Thornthwaite's equation, and then the SPEI is calculated at a monthly temporal resolution using SPEI package in R software. The SPI and SPEI values are calculated and then the statistical analysis along with significant level scatter plot was performed. The graphical plot of 3-month SPI and SPEI values were prepared to visualize the capabilities of used indices in determination of wet and dry spells over studied stations. The relationships between computed SPI and SPEI values were analyzed using correlation coefficient and p-value at each station. The results indicated that some differences in the pattern and sequence of wet and dry spells exist based on calculated indices. Also, the SPEI index identified the longer wet and dry spell conditions than SPI in almost all cases. The results of the comparative analysis indicated that the SPI and SPEI were varied between 0.19 ($p < 0.01$), and 0.52 ($P < 0.01$), which were statistically significant in all stations. A very low correlation between the SPI and SPEI was identified in Saghez station (correlation coefficient = 0.19), which seems to be due to evapotranspiration and moisture loss during spring/summer with the increasing temperatures that is accounted for by SPEI. The highest correlation coefficient was calculated between SPI and SPEI in the Sanadaj station (0.52%). Since, the SPEI accounts temperature in defining drought spells, therefore, it is advisable to use SPEI instead of SPI for drought assessment. According to the graphical interpretation of the results, there was large difference between the droughts depicted by the precipitation-based SPI and the temperature influenced SPEI. Also the SPEI captured the influence of temperature and depicted severe and longer duration droughts which provide support for better performance and reliability of the SPEI index. It should be noted that in terms of lack of data, evapotranspiration can be calculated by simple methods such as Thornthwaite, but considering detailed available data, the Hargreaves and Penman methods can be used to determine drought occurrences in the SPEI calculation. The calculation of drought indices should be simple and statistically reliable, in this regard, SPEI indicators in different climatic conditions and climate change issues has a significant advantage. Also, more climate variables are needed to calculate the SPEI index than the SPI index. Also, the calculated evapotranspiration value is sensitive to the used method and requires a longer data period with natural variabilities. Further research is recommended in other climatic regions which is needed for comparison of SPEI with other common drought indices to draw comprehensive conclusions.

Keywords: Meteorological drought, Potential evapotranspiration, R software, Standardized precipitation index, Wet-dry spell analysis.

*Corresponding author:

raoofmostafazadeh@yahoo.com