

## تحلیل منطقه‌ای خشکسالی در حوضه آبریز کارون با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI

مهدی سعیدی پور<sup>۱</sup>، فریدون رادمنش<sup>۱\*</sup>، سید سعید اسلامیان<sup>۲</sup> و محمدرضا شریفی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱)

### چکیده

با توجه به اهمیت خشکسالی در مدیریت منابع آبی، پژوهش حاضر با هدف برآورد شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI به‌علاوه ماهیت چند مقیاسی و قابلیت تحلیل در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های منتخب هواشناسی حوضه آبریز کارون صورت پذیرفته است. از دیگر اهداف این تحقیق، منطقه‌ای کردن شاخص‌های SPI و SPEI با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای به‌منظور همگن‌سازی ایستگاه‌های حوضه است. در این راستا، بر اساس آزمون همگنی داده‌ها و تعیین طول دوره آماری مشترک، ۱۸ ایستگاه انتخاب شدند. مقادیر شاخص‌های خشکسالی 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 پیرسون و سطح معنی‌داری ۰/۰۱ مقایسه شدند. نتایج نشان داد که برای تمامی ایستگاه‌ها، همبستگی دو شاخص به‌صورت مثبت و معنی‌دار (۰/۵ تا ۰/۹۵) است و با افزایش دوره زمانی، میزان ضریب همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی افزایش یافته است. همچنین با افزایش مقیاس‌های زمانی، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش یافته اما تداوم آنها افزایش می‌یابد. با منطقه‌ای کردن ایستگاه‌های حوضه به روش تحلیل خوشه‌ای، ایستگاه‌ها در هفت کلاس طبقه‌بندی شدند. نتایج حاصل از منطقه‌ای کردن شاخص SPEI نیز نشان داد که درصد فراوانی طبقه نرمال بیشتر از طبقه مرطوب و خشک است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، دوره خشک و مرطوب، شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI، منطقه‌ای کردن حوضه

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Feridon.radmanesh@yahoo.com

## مقدمه

خشکسالی به عنوان بلای طبیعی و پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر، از دیرباز در پهنه وسیع کشورهای مختلف به خصوص کشورهای مستقر در مناطق گرم و خشک دنیا به کرات رخ داده است. مطالعات نشان می‌دهد که ۸۰ درصد کشور ایران در بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ دچار خشکسالی بی‌سابقه بوده است و بخش‌های مرکزی، شمالی و شمال غربی ایران تا بیش از ۹۵ درصد خشکی را دریافت کرده‌اند (۵). وضعیت بارندگی، محدودیت منابع آبی و شرایط اقلیمی کشور این واقعیت را نشان می‌دهد که باید برای خشکسالی برنامه داشت و به صورت انفعالی در زمان وقوع با آثار و پیامدهای آن مقابله نکرد. قدر مسلم آنکه، در صورت اعمال مدیریت‌های ناکارآمد فنی و استفاده از راهکارهای نامناسب، علاوه بر هدررفت منابع موجود و تشدید اثرات مخرب خشکسالی، زمینه برای بروز خشکسالی‌های بعدی به طرز فزاینده‌ای فراهم می‌شود.

نیکلاس (۱۳) با تحلیل خشکسالی‌های سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ در استرالیا بر نقش روزهای با درجه حرارت بالا در شدت این پدیده تأکید کرد. ربتز و همکاران (۱۵) اظهار داشتند اگرچه خشکسالی‌های تابستان ۲۰۰۳ در نواحی مرکزی اروپا ناشی از وقوع بارش‌ها به میزان کمتر از حد نرمال بود اما افزایش شدید دما (چهار درجه سانتی‌گراد نسبت به میانگین درازمدت طی ماه‌های جون و جولای) سبب افزایش خسارت‌ها در بخش‌های کشاورزی، منابع طبیعی و به طور چشمگیرتری سبب افزایش مقدار تبخیر و تعرق و تنش‌های آبی شد.

بارش و تبخیر و تعرق دو پارامتر اساسی برای پایش خشکسالی هواشناسی هستند. از این رو شاخص‌هایی که علاوه بر باران مقدار تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرند، قابلیت پایش تغییرات اقلیمی دوره‌های فعلی و آتی بر مبنای سناریوهای اقلیمی را دارند. شاخص‌های مختلفی از متغیرهای بارش و تبخیر و تعرق برای پایش خشکسالی بهره می‌گیرند که شاخص‌های شدت خشکسالی پالم (Palmer Drought Severity Index I)، شاخص شناسایی

خشکسالی (Reconnaissance drought index) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) از جمله آنها هستند.

ویسته سرانو و همکاران (۲۰) بیان داشتند که شاخص پالمر ضمن داشتن مزایای مهم، به علت اینکه نمی‌تواند اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت خشکسالی را از طریق پایش در مقیاس‌های زمانی مختلف به دست دهد، دارای ضعف است. همچنین آنها در ارتباط با شاخص نسبتاً جدید RDI بیان داشتند که نسبت بارش به تبخیر و تعرق در این شاخص وقتی مقدار تبخیر و تعرق برابر صفر (در ماه‌های زمستان در مناطق مختلف دنیا) شود به صورت تعریف نشده خواهد شد و دامنه مقادیر نسبت به کار رفته به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک است که نمی‌تواند نقش دما را منعکس سازد. درحالی که شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌ها کاربرد بالاتری دارد و مهم‌ترین مزیت آن، توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما در ارتباط با گرمایش جهانی است. این موضوع با استفاده از داده‌های ۱۱ منطقه واقع در نقاط مختلف اقلیمی جهان توسط ویسته سرانو و همکاران (۲۱) نشان داده شده است. همچنین برخلاف SPI شاخص SPEI قادر است که اثرات اصلی افزایش دما بر میزان تقاضای آب را نشان دهد. مقیاس‌های زمانی این شاخص به مانند SPI تا ۴۸ ماه است. مقیاس‌های عددی چندگانه SPI و ترکیب آن با پارامتر تبخیر و تعرق، SPEI را برای مطالعات تغییر اقلیم نیز مناسب می‌کند. شاخص SPEI به دلیل دربرگیری بیلان آبی در تعیین خشکسالی و کنترل آن از شاخص‌های دیگر قدرتمندتر و کارآمدتر است (۲).

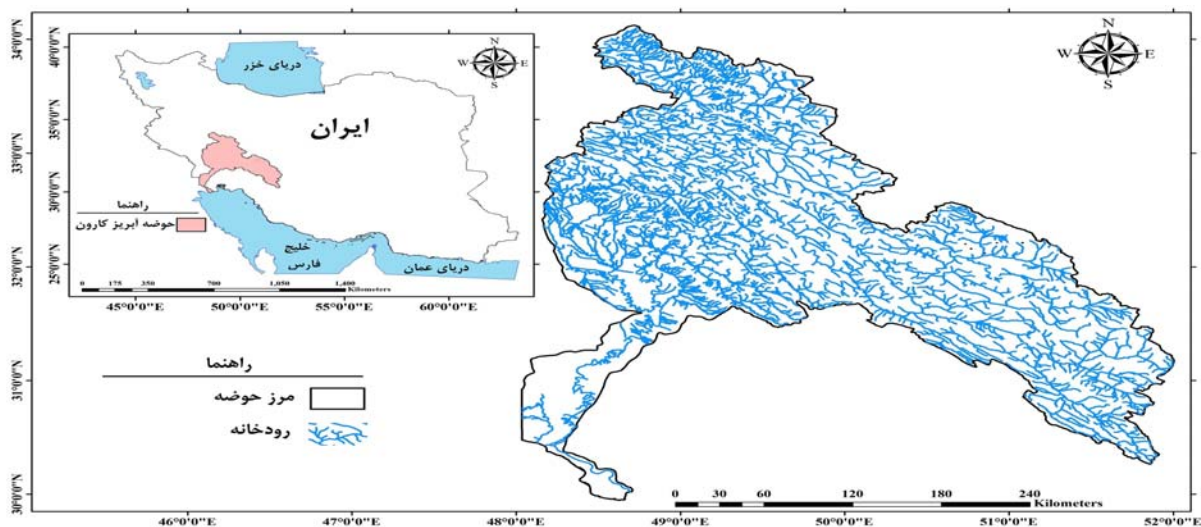
لیویا و همکاران (۸) شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPI را با استفاده از داده‌های مدل COSMO در دو حوضه آبخیز اسلواکی مقایسه کردند. نتایج حاکی از همبستگی کم بین شاخص SPEI و SPI در جنوب اسلواکی در مقیاس زمانی سه ماهه بود. همچنین آنها بر نقش مهم تبخیر و تعرق بر خشکسالی در منطقه مورد بررسی در فصل تابستان تأکید

مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه مطالعات بیشتر در مقیاس‌های زمانی و مکانی را نیاز دارد. مصباح‌زاده و سلیمانی ساردو (۴) در پژوهش خود از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص خشکسالی جریان‌ات رودخانه‌ای (SDI) برای ارزیابی و تحلیل وقوع زمانی خشکسالی‌ها بهره بردند. برای این منظور از آمار ماهانه ۱۰ ایستگاه باران سنجی و پنج ایستگاه هیدرومتری در حوضه آبخیز کرخه استفاده و شاخص‌ها در سه بازه زمانی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با یکدیگر در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود و این همبستگی در بازه ۴۸ ماهه حداکثر است. همچنین بیابانگی و همکاران (۳) با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای به تعیین مناطق همگن در حوضه آبخیز کرخه پرداختند. نتایج حاکی از تقسیم حوضه به دو گروه همگن بود که هر گروه دارای ۶ و ۳۵ زیرحوضه هستند.

با بررسی سوابق پژوهش در خصوص 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. به همین دلیل با توجه به مطالعات انجام شده، منطقه‌ای کردن شاخص‌های SPI و SPEI به منظور پایش خشکسالی و آگاهی از وضعیت بارندگی و تغییرات اقلیمی حوضه آبریز کارون دورنمای این پژوهش است. بر همین اساس و با توجه به اهمیت خشکسالی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی، اهداف این پژوهش در قالب (۱) تعیین شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI و مقایسه آنها، (۲) بررسی روند تغییرات و پهنه‌بندی خشکسالی‌ها در نقاط مختلف حوضه آبریز و (۳) تعیین ایستگاه‌های همگن از نظر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی (منطقه‌ای کردن شاخص‌های SPI و SPEI) به کمک روش تحلیل خوشه‌ای

داشتند. توژموس و منزل (۱۹) نیز به تحلیل و بررسی شرایط خشکسالی حال حاضر و آینده در اردن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص خشکسالی SPEI شش‌ماهه بالاترین ارتباط را با رطوبت خاک برآوردی دارد و بهترین شاخص برای تبیین تغییرات سالانه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) ماهانه است. استاگ و همکاران (۱۶) نیز به مقایسه توزیع‌های فراوانی شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPI در اروپا پرداختند. آنها توزیع‌های دو پارامتری گاما و مقادیر حد عمومی را به ترتیب برای شاخص‌های SPEI و SPI مناسب تشخیص دادند.

از پژوهش‌های منتخب در کشور نیز می‌توان به بنی‌مهد و خلیلی (۱) اشاره کرد که با تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای رفتار شاخص‌های خشکسالی 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. زارع ایبانه و همکاران (۲۲) از شاخص SPEI برای تحلیل خشکسالی تحت شرایط تأثیر تغییر اقلیم استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مزیت شاخص SPEI نسبت به SPI، برتری این شاخص در تشخیص اثرات تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما در پیوند با گرمایش جهانی است. مصطفی‌زاده و ذبیحی (۱۲) به مقایسه الگوی وقوع خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI در اقلیم کردستان پرداختند. نتایج این پژوهش روشن ساخت که ضمن وجود تفاوت در الگوی وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی SPI و SPEI، شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در بیشتر ایستگاه‌ها مشخص کرده است. با توجه به تأثیر دما در محاسبه SPEI، تفاوت قابل توجه بین مقادیر شاخص استاندارد مبتنی بر بارش و شاخص تبخیر و تعرق مبتنی بر دما، زمینه کارایی و صحت شاخص پیشگفته را فراهم می‌کند. 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



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز کارون در ایران

نواقص موجود و عدم اطمینان به صحت و دقت داده‌های برخی از ایستگاه‌های موجود و بر اساس آزمون همگنی داده‌ها، در نهایت ۱۸ ایستگاه با طول آماری بیش از ۳۰ سال انتخاب شدند. بعد از تعیین طول دوره آماری مشترک برای ایستگاه‌های مورد نظر، با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش پیش بینی و همبستگی بین ایستگاه‌ها اقدام به بازسازی نواقص آماری می‌شود.

#### شاخص‌های خشکسالی

طی دهه‌های گذشته پژوهشگران، شاخص‌های مختلفی را به منظور پایش وضعیت خشکسالی و بررسی اثرات کمی ناشی از آن توسعه داده‌اند. در تحقیق حاضر به منظور پایش دوره‌های رطوبتی از شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI استفاده شده است. مک‌کی و همکاران (۱۰) شاخص SPI را به منظور پایش خشکسالی اقلیمی ایالت کلرادو آمریکا پیشنهاد دادند. برای محاسبه این شاخص، ابتدا با برآزش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی یا ماهانه یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن را محاسبه کرده سپس با انتقال احتمال تجمعی به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر شاخص SPI محاسبه می‌شود. مهم‌ترین مزیت این

به‌منظور پایش و تجزیه و تحلیل دوره‌های خشکسالی منطقه تعریف شده است.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کارون بزرگ با مساحت ۶۷۲۹۷ کیلومتر مربع از نظر منابع آبی یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز کشور به‌شمار می‌آید و فراوانی ریزش‌های جوی به‌ویژه در سرشاخه‌های این حوضه پتانسیل قابل توجهی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را ایجاد کرده است. حوضه آبریز کارون بزرگ حدود ۳۴ درصد محدوده مطالعاتی و ۴/۲ درصد از مساحت کل کشور را در برمی‌گیرد (شکل ۱). حوضه آبریز کارون بزرگ متشکل از رودخانه‌های دز و کارون بوده که در داخل ارتفاعات زاگرس میانی قرار دارند و در مختصات جغرافیایی بین  $30^{\circ}$  تا  $48^{\circ}$  شرقی و  $34^{\circ}$  تا  $35^{\circ}$  عرض شمالی قرار گرفته است. حدود ۶۷ درصد مساحت حوضه را کوهپایه و ۳۳ درصد آن را دشت تشکیل داده است. داده‌های مورد نیاز در این تحقیق، شامل مقادیر روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد بوده که از شرکت مدیریت منابع آب اخذ شده است. پس از بررسی اولیه داده‌ها به‌علت

پس از محاسبه احتمال تجمعی کل  $H(x)$ ، مقدار متغیر تصادفی نرمال استاندارد، هم احتمال با احتمال مذکور که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است محاسبه می‌شود. این مقدار همان شاخص SPI است. مقادیر شاخص SPI توسط رابطه (۵) ارائه شده است. رابطه (۵) میزان SPI را از روی مقادیر  $H(x)$  ارائه می‌دهد. همچنین ثابت‌های معادلات رابطه (۵) عبارتند از:

$$c_0 = 2/535537, c_1 = 0/102853, \\ c_2 = 0/030328, d_1 = 3/432788, \\ d_2 = 0/18929, d_3 = 0/03308$$

$$SPI = - \left\{ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right\} \quad 0 < H(x) < 0/5 \\ SPI = + \left\{ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right\} \quad 0/5 < H(x) < 1 \\ t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad 0 < H(x) < 0/5 \\ t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad 0/5 < H(x) < 1 \quad (5)$$

اثرات افزایش دما در افزایش شدت خشک شدن یک منطقه به مراتب بیشتر از کاهش بارندگی است. بر همین اساس می‌توان شاخص خشکسالی استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق را در حکم شاخصی مناسب به منظور تعیین خشکسالی مورد استفاده قرار داد (۲۱). در این شاخص سه متغیر بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل لحاظ شده است. یکی از محدودیت‌های شاخص SPI، عدم لحاظ بیلان آب بر اساس میزان تبخیر و تعرق است. در حالی که شاخص SPEI بر اساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، بیلان آب را در محاسبه شاخص خشکسالی لحاظ می‌کند. همچنین برخلاف SPI شاخص SPEI قادر است که اثرات اصلی افزایش دما را بر میزان تقاضای آب نشان دهد. مقیاس‌های زمانی این شاخص به مانند SPI بوده و طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی نیز به مانند شاخص SPI با استفاده از جدول (۱) صورت می‌گیرد. مقیاس‌های عددی چندگانه SPI و ترکیب آن با پارامتر تبخیر و تعرق، SPEI را برای مطالعات تغییر اقلیم نیز مناسب می‌کند.

شاخص، مقیاس‌های زمانی مختلف است که باعث می‌شود این شاخص بتواند اثرات دوره‌های کوتاه‌مدت ذخایر آب و اثرات دوره‌های طولانی مدت منابع آب را پایش کند. از محاسن دیگر این شاخص می‌توان به شناسایی و ظاهر شدن ماه‌های خشک (از نظر هواشناسی) زودتر از سایر شاخص‌ها و همچنین محاسبه آن برای مقیاس‌های زمانی متفاوت را اشاره کرد. بسیاری از برنامه ریزان و طراحان در زمینه خشکسالی، چندمنظوره بودن شاخص SPI را بسیار کارآمد توصیف کرده‌اند (۶).

همان‌طور که بیان شده محاسبه SPI شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه معین است.  $G(x)$  احتمالات تجمعی گاما، از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$G(x) = \frac{1}{\beta^x \Gamma(\alpha)} \int_0^x X^{\alpha-1} e^{-X/\beta} dx \quad (1)$$

در این معادله،  $\alpha$  پارامتر شکل،  $\beta$  پارامتر مقیاس،  $x$  مقدار بارندگی و  $\Gamma(\alpha)$  توزیع گاما است. پارامترهای توزیع چگالی احتمال گاما از داده‌های نمونه برای درست‌نمایی حداکثر برای هر ایستگاه و برای مقیاس زمانی انتخابی در هر ماه از سال برآورد می‌شود. رابطه (۲) برای محاسبه پارامترهای تابع توزیع احتمال گاما استفاده می‌شود.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\bar{x}A} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad \hat{\beta} = \frac{x}{\bar{\alpha}} \quad A = \ln(x) = \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (2)$$

در این رابطه،  $n$  تعداد مشاهدات بارندگی و  $x$  میانگین بارندگی تجمعی برای یک ماه در طول دوره آماری است. چون تابع گاما برای  $x=0$  (بارندگی صفر میلی‌متر) تعریف نشده است و از آنجایی که توزیع بارندگی ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، احتمال تجمعی کل که در برگزیده مقادیر صفر نیز است از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$H(x) = q + PG(x) \quad (3)$$

که در آن  $q$  احتمال صفر بودن مقدار بارندگی و  $P=1+q$  است. اگر  $m$  تعداد داده‌های بارندگی صفر در سری زمانی  $n$  تایی باشد، آنگاه  $q$  از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$q = \frac{m}{n} \quad (4)$$

جدول ۱. طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI

مقادیر Index	درجه خشکسالی و ترسالی
$Index \geq 2$	ترسالی خیلی شدید
$1/5 \leq Index < 2$	ترسالی شدید
$1 \leq Index < 1/5$	ترسالی متوسط
$-0/99 \leq Index \leq 0/99$	نزدیک به نرمال
$-1/5 < Index \leq -1$	خشکسالی متوسط
$-2 < Index \leq -1/5$	خشکسالی شدید
$Index \leq -2$	خشکسالی بسیار شدید

داده‌های دارای چولگی و نیز دنباله طولانی‌تر در دامنه انتهایی توزیع، دارای کارایی بهتری در تعیین تابع تراکم احتمال یا pdf سری‌های زمانی D بر اساس توزیع لجستیک لگاریتمی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

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

که در این رابطه،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D در دامنه  $-\infty < \gamma < \infty$  هستند (۲۱). برای محاسبه پارامترهای توزیع لجستیک لگاریتمی از روش ممان وزنی احتمال به منزله روشی توانمند و ساده استفاده شده است. تابع توزیع احتمال سری‌های D نیز بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

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

شاخص SPEI در حکم مقادیر استاندارد شده  $(F(x))$  بدین طریق محاسبه می‌شود.

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

که در آن،  $w = \sqrt{-2 \ln(P)}$  برای  $P \leq 0/5$  بوده و احتمال بیشتر شدن مقادیر تعیین شده D است. مقادیر  $d_3 = 0/001308$ ،  $d_2 = 0/0103228$ ،  $d_1 = 1/432788$ ،  $d_0 = 0/189269$ ،  $c_3 = 0/802853$ ،  $c_2 = 2/515517$ ،  $c_1 = 0/802853$  مشخص هستند. شاخص SPEI یک متغیر استاندارد شده است و بنابراین می‌تواند با سایر

نحوه محاسبه شاخص SPEI همانند شاخص SPI 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. بر اساس نتایج ماورومیتس (۹) مبنی بر تشابه روش‌های ساده و پیچیده برای تبخیر و تعرق پتانسیل، ویسنه سرانو و همکاران (۲۱) از روش تورنت-وایت بدین‌منظور استفاده کرد. شاخص SPEI بر اساس روابط (۶) تا (۱۲) به دست می‌آید.

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (6)$$

$$m = 6/75 \times 10^{-7} I^3 - 7/71 \times 10^{-5} I^2 + 1/79 \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1/514} \quad K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (8)$$

که در این روابط، T دمای میانگین ماهانه به درجه سلسیوس، m ضریب وابستگی به I، I شاخص گرما یا مجموع شاخص ۱۲ ماهه، K ضریب تصحیحی برحسب ماه و عرض جغرافیایی، NDM تعداد روزهای یک ماه و N بیشینه تعداد ساعات تابش است. بدین ترتیب با داشتن مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل، اختلاف بارش (P) و (PET) برای ماه ام به دست می‌آید.

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

بر اساس نتایج تحقیقات ویسنه سرانو و همکاران (۲۱) مشخص شده است که توزیع لجستیک به دلیل تناسب بیشتر با

با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی مانند روش وارد (Ward) و به کمک نرم‌افزار SPSS تحلیل خوشه‌ای انجام می‌شود. روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی بر مبنای حداقل کردن فاصله اقلیدسی و یا مربع فاصله اقلیدسی بین حوضه‌ها استوار است. حوضه‌هایی که کمترین فاصله اقلیدسی را از هم دارند، در هم ادغام شده و یک منطقه را به وجود می‌آورند. در روش وارد نیز ابتدا میانگین‌های متغیرها در داخل هر خوشه محاسبه می‌شود. سپس برای هر مشاهده، مربع فاصله اقلیدسی میانگین خوشه‌ها محاسبه می‌شود. این فاصله برای تمامی مشاهدات جمع می‌شود. در هر مرحله دو خوشه‌ای ترکیب می‌شوند که کوچک‌ترین افزایش در مجموع مربعات فواصل داخل خوشه‌ای را داشته باشند. سرانجام، امکان تعیین مناطق همگن از لحاظ خشکسالی را به صورت مؤثر امکان‌پذیر می‌شود. تفکیک منطقه مطالعاتی به مناطق همگن سبب افزایش دقت و کاهش خطا در مدل‌های رگرسیونی در مناطق فاقد آمار می‌شود.

## نتایج و بحث

### بررسی روند تغییرات و پهنه‌بندی خشکسالی‌ها

نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های SPI و SPEI برای هر ایستگاه منجر به تولید نقشه پهنه‌بندی حوضه آبریز کارون برای نمایش خشکسالی در منطقه شده است. همچنین نمودارهای تغییرات هر شاخص در بازه زمانی خاص در هر ایستگاه قابل مشاهده است. شاخص‌های SPI و SPEI برای ایستگاه‌های منتخب به طور جداگانه و برای ماه‌های مختلف محاسبه شدند و به دلیل تشابه بررسی و اعتبارسنجی شاخص‌ها تنها نتایج برخی از ایستگاه‌ها ارائه شده است. شکل‌های (۲ تا ۷) ارزیابی شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳ (کوتاه‌مدت)، ۹ (میان‌مدت) و ۲۴ (بلندمدت) ماهه را برای ایستگاه‌های حنا و عرب‌حسن‌آباد نشان می‌دهند. دلیل انتخاب دو ایستگاه مذکور موقعیت جغرافیایی متفاوت و مقایسه دو ایستگاه در نوع پیش‌بینی وقوع خشکسالی است.

مقادیر SPEI در مکان و زمان مقایسه شود. مقدار SPEI معادل صفر به معنای مقادیر منطبق با ۵۰ درصد احتمال تجمعی D است (۱۸). از آنجایی که شاخص SPEI بر پایه مفاهیم توسعه شاخص SPI شکل گرفته است، مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب و نشانگر دوره خشکسالی است. در حقیقت خشکسالی هنگامی شروع می‌شود که مقادیر شاخص به ۱- برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد.

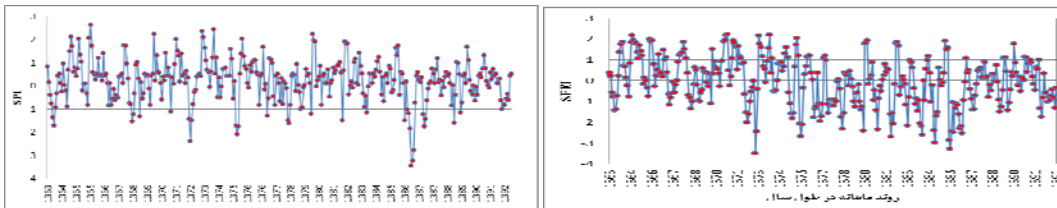
### پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی

پس از کمی‌کردن خشکسالی توسط شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مختلف حوضه، حال تغییرات خشکسالی در دوره آماری بررسی می‌شود و پهنه‌بندی خشکسالی‌ها به کمک نرم‌افزار GIS صورت می‌گیرد. بدین منظور شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه شده و سپس به کمک روش کریجینگ عام با میانگین خطای برآورد ۰/۰۰۳ و مربع میانگین ریشه خطا ۷۴/۹۷، پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی در سطح حوضه‌های مذکور صورت گرفت.

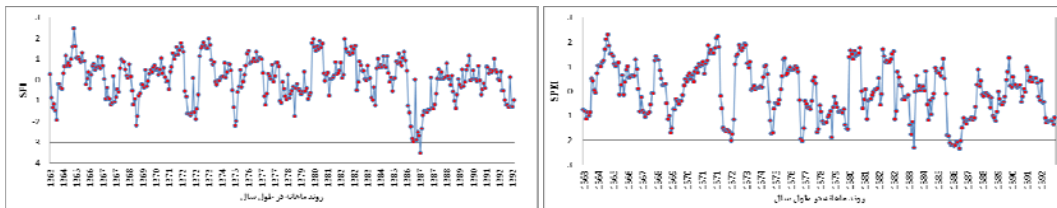
### تعیین مناطق همگن از نظر شاخص‌های خشکسالی

به منظور تعیین مناطق همگن از نظر شاخص‌های خشکسالی در این تحقیق از روش تحلیل خوشه‌ای استفاده می‌شود. بدین ترتیب که ایستگاه‌های همگن ایجاد شده توسط هر گروه از شاخص‌های کشاورزی و هواشناسی به کمک روش تحلیل خوشه‌ای تعیین و سپس بررسی می‌شوند. به طور کلی در مجموع بررسی همگنی ایستگاه‌ها بر مبنای آزمون تحلیل خوشه‌ای هستند و ایستگاه‌های بررسی شده در فاصله اقلیدسی پارامترهای اکولوژیک از یکدیگر متمایز می‌شوند.

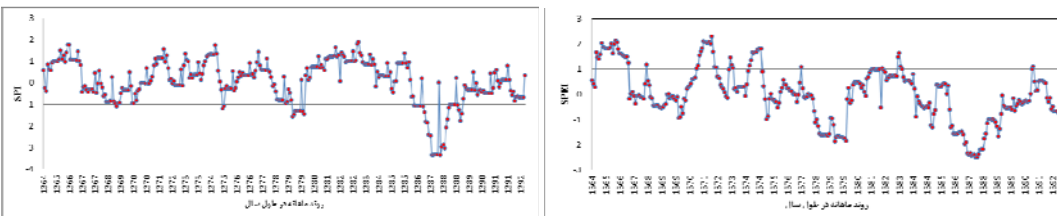
به منظور تعیین ایستگاه‌های همگن از نظر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و کشاورزی (منطقه‌ای کردن شاخص‌های SPI و SPEI) شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های مذکور در گروه‌های جداگانه قرار می‌گیرند و سپس



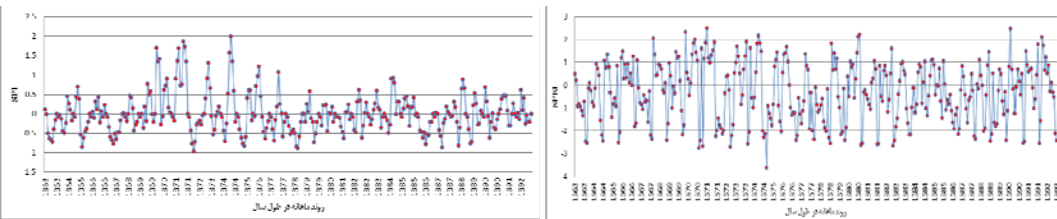
شکل ۲. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI سه ماهه در ایستگاه حنا



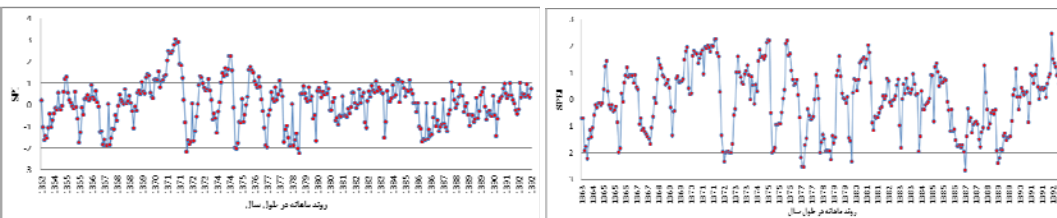
شکل ۳. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI ۹ ماهه در ایستگاه حنا



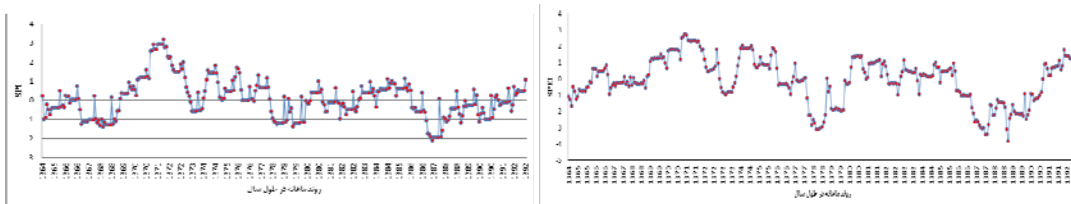
شکل ۴. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI ۲۴ ماهه در ایستگاه حنا



شکل ۵. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI سه ماهه در ایستگاه عرب‌حسن‌آباد



شکل ۶. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI ۹ ماهه در ایستگاه عرب‌حسن‌آباد



شکل ۷. نمودار تغییرات شاخص‌های SPI و SPEI ۲۴ ماهه در ایستگاه عرب‌حسن‌آباد



شدیدترین آن در آذر ۱۳۸۹ بوده است. در حالی که، در دوره ۲۴ ماهه شاخص SPI، سه دوره خشکسالی شدید وجود داشته است که طولانی‌ترین آن از آذر ۱۳۸۷ تا اسفند ۱۳۸۸ و شدیدترین آن در فروردین ۱۳۸۷ بوده است.

قابل ذکر است که نتایج محاسبات در ۱۰ ایستگاه منتخب از ۱۸ ایستگاه (ایستگاه‌هایی با بیش از ۳۰ سال آمار) نشان داد که ایستگاه‌های حنا، سولگان، سوسن، تنگ‌پنج‌بختیاری و ایستگاه سد دز دارای برآورد نزدیکی از رخدادهای شدید خشکسالی توسط هر دو شاخص SPI و SPEI هستند و روند تغییرات خشکسالی مشابهی را عرضه می‌کنند. اما در ایستگاه‌های عرب حسن‌آباد، اورگان، دشت‌روم، کاظم‌آباد و لالی‌بندسرخ هم‌مانگی بالایی در تخمین رخدادهای شدید خشکسالی توسط دو شاخص مذکور دیده نشد، اگرچه روند تقریباً مشابهی در رخدادهای خشکسالی و ترسالی توسط هر دو شاخص مشاهده شده است. نکته قابل توجه دیگر آن است که دوره ۹ ماهه شاخص‌های SPI و SPEI با دقت بالایی در هر ۱۰ ایستگاه همخوانی داشته‌اند، اما تفاوت در دوره بلندمدت ۲۴ ماهه شاخص‌های مذکور است. به این معنی که در دوره ۹ ماهه، تعداد دوره‌های خشکسالی مشاهده شده، طولانی‌ترین دوره و شدیدترین آنها توسط شاخص‌های SPI و SPEI به صورت تقریباً مشابهی دیده شده است و اکثراً مهرماه سال ۱۳۸۷ را به‌عنوان شدیدترین دوره خشکسالی نمایش می‌دهند.

در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد است. با افزایش مقیاس‌های زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آنها افزایش می‌یابد. نتایج شاخص SPEI ۲۴ ماهه در ۱۰ ایستگاه مذکور نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها در فاصله زمانی سال‌های ۹۰-۸۶ طولانی‌ترین خشکسالی‌ها ثبت شده است و این وضعیت در سال‌های ۹۲-۹۰ نیز کم‌وبیش در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی تکرار شده است. اگرچه بیشترین شدت خشکسالی بر اساس این شاخص طی سال‌های مورد بررسی در ایستگاه‌های مختلف حوضه آبریز کارون، دارای تفاوت بوده است و از الگوی

در ایستگاه حنا، با توجه به شکل‌های (۲ تا ۴) (نوسانات شاخص‌های SPI و SPEI در دوره‌های ۳، ۹ و ۲۴ ماهه) مشخص می‌شود که در دوره سه ماهه هر دو شاخص، دوره‌های خشکسالی و ترسالی به صورت متناوب مشاهده شده است. در دوره ۹ ماهه شاخص SPEI، ۱۱ دوره خشکسالی به وجود آمده است که شدیدترین دوره آن در مهر ۱۳۸۷ و طولانی‌ترین دوره آن مربوط به دی ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۸۷ است. نتایج مذکور در دوره ۹ ماهه شاخص SPI نیز قابل مشاهده است. چنانچه در دوره ۹ ماهه شاخص SPI نیز ۱۱ دوره خشکسالی شدید رخ داده است که شدیدترین دوره آن مربوط به مهر ۱۳۸۷ است و طولانی‌ترین دوره آن مربوط به دی ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۸۷ است. در دوره ۲۴ ماهه شاخص SPEI، ۳ دوره خشکسالی وجود داشته است که طولانی‌ترین آن از بهمن ۱۳۸۶ تا دی ۱۳۸۹ و شدیدترین آن در شهریور ۱۳۸۷ بوده است و نتایج تقریباً مشابهی نیز در شاخص SPI ۲۴ ماهه دیده شد، به گونه‌ای که در دوره ۲۴ ماهه، یک دوره خشکسالی وجود داشته است که طولانی‌ترین آن از فروردین ۱۳۸۶ تا دی ۱۳۸۹ و شدیدترین آن در فروردین ۱۳۸۷ بوده است.

برای مقایسه ایستگاه حنا به‌عنوان ایستگاهی که برآوردهای شاخص SPEI با SPI همخوانی بالایی دارند از نتایج محاسبات ایستگاه عرب‌حسن‌آباد استفاده شده است. در ایستگاه عرب‌حسن‌آباد، با توجه به شکل‌های (۴ تا ۶)، مشخص می‌شود که در دوره ۳ ماهه مانند ایستگاه حنا دوره‌های خشکسالی و ترسالی به صورت متناوب در این ایستگاه رخ داده است. در دوره ۹ ماهه شاخص SPEI، ۹ دوره خشکسالی دیده شده است که شدیدترین دوره آن مربوط به مهر ۱۳۸۷ و طولانی‌ترین دوره آن مربوط به آبان ۱۳۸۶ تا آبان ۱۳۸۷ است. در حالی که، در دوره ۹ ماهه شاخص SPI، هفت دوره خشکسالی در این ایستگاه رخ داده است که شدیدترین دوره آن مربوط به آبان ۱۳۷۹ بوده و طولانی‌ترین دوره آن مربوط به دی ۱۳۷۸ تا آبان ۱۳۷۹ است. در دوره ۲۴ ماهه شاخص SPEI، سه دوره خشکسالی وجود داشته است که طولانی‌ترین آن در اردیبهشت ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۹۰ و

نتایج عرضه شده در شکل‌های (۲ تا ۷) و همچنین نتایج محاسبات در ایستگاه‌های دیگر، روند کاهشی در شاخص‌های خشکسالی در کلیه ایستگاه‌ها حاکی از شرایط خشک‌تر در سال‌های آتی است.

به‌منظور مقایسه عملکرد دو شاخص SPI و SPEI از ضریب همبستگی پیرسون در تمامی ایستگاه‌ها و در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، و ۲۴ ماهه و در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ استفاده شده است. به دلیل تشابه بررسی نتایج و حجم زیاد اطلاعات، تنها نمودار همبستگی ایستگاه سوسن در مقیاس زمانی شش‌ماهه ارائه شده است. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون برای تمامی ایستگاه‌های حوضه آبریز کارون بین ۰/۵ تا ۰/۹۵ برای مقیاس‌های زمانی مختلف تغییر می‌کند که همبستگی معنی‌دار بین دو شاخص را نشان می‌دهند (جدول ۲). باتوجه به جدول (۲) بیشترین مقدار ضریب همبستگی در پنجره زمانی ۲۴ ماهه، برای ایستگاه یاسوج و بارانگرد با همبستگی ۰/۹۵ در سطح معنی‌داری یک درصد و کمترین میزان همبستگی در ایستگاه پاتاوه با همبستگی ۰/۷۳ مشاهده شد. همچنین مشاهده می‌شود در اغلب ایستگاه‌ها با افزایش دوره زمانی، میزان ضریب همبستگی بین شاخص‌ها افزایش می‌یابد. شکل (۸) نمودار پراکنش بین دو شاخص را برای مقیاس‌های زمانی مختلف، در ایستگاه سوسن را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPI و SPEI محاسباتی در ایستگاه سوسن از نوع همبستگی مثبت است.

همچنین شکل (۹) نمودارهای مربوط به مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۶ (کوتاه‌مدت)، ۱۲ (میان‌مدت) و ۲۴ (بلندمدت) را برای ایستگاه سوسن نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو شاخص در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد است. با افزایش مقیاس‌های زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آنها افزایش می‌یابد. طبق نمودارها شاخص SPEI پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی داشته است.

خاصی پیروی نمی‌کند. شدیدترین رخداد خشکسالی در ۱۰ ایستگاه مذکور به ترتیب در سال‌های عرب‌حسن‌آباد -۱۳۸۹، آورگان -۱۳۹۱، دشت‌روم -۱۳۷۹، حنا -۱۳۸۷، کاظم‌آباد -۱۳۸۹، لالی‌بندسرخ -۱۳۸۷، سد دز -۱۳۸۷، سولگان -۱۳۸۷، سوسن -۱۳۷۸ و تنگ‌پنج‌بختیاری -۱۳۹۰ مشاهده شده است. قابل ذکر است که شدت خشکسالی‌های محاسبه شده با استفاده از شاخص SPEI به ندرت از مقدار عددی ۲- کمتر است. دلیل این امر، لحاظ فاکتور دما در تعیین خشکسالی در این شاخص است. به عبارت دیگر علاوه بر بارندگی افزایش دما نیز در منطبقه مورد مطالعه تأثیرگذاری بالایی را نشان می‌دهد.

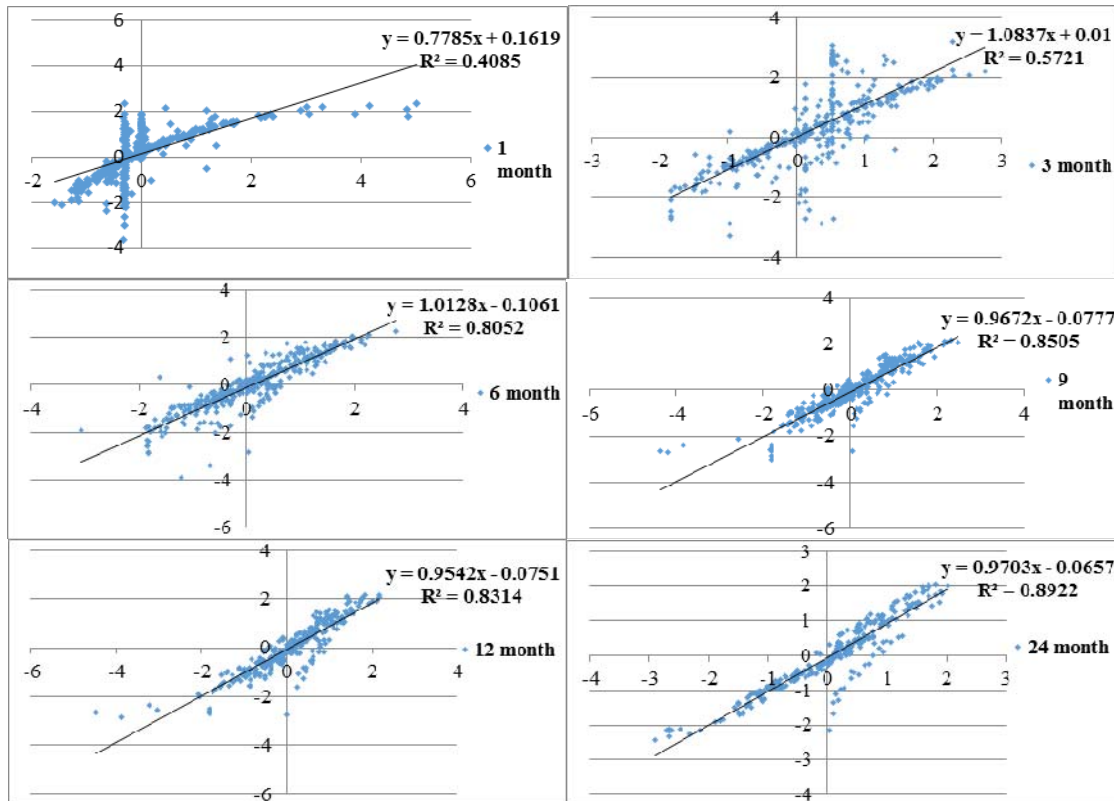
نتایج مذکور با دستاوردهای تاج‌بخش و همکاران (۱۸)، زارع‌ایبانه و همکاران (۲۲) و مصطفی‌زاده و همکاران (۱۲) مبنی بر استفاده از عوامل اقلیمی علاوه بر بارش در تعیین خشکسالی همخوانی دارد. بر اساس نتایج، شاخص SPEI قابلیت تشخیص خشکسالی و تعیین دقیق توالی دوره‌های مذکور را دارد. بیشترین تعداد کل واقعه‌های خشکسالی به‌ویژه خشکسالی‌های شدید/ خیلی شدید با شاخص SPEI مشخص شده است که بیانگر مشارکت مؤثر تبخیر و تعرق در پایش خشکسالی است. همچنین بررسی تغییرات زمانی شاخص خشکسالی SPI در ایستگاه‌های تحقیقاتی نشان داد که اکثر ایستگاه‌ها از الگوی تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند، اما در ایستگاه‌های عرب‌حسن‌آباد و لالی‌بندسرخ تغییرپذیری زیاد شاخص مشهود است؛ به نحوی که به صورت متناوب سال‌های خشک و مرطوب تکرار شده است. بر اساس نتایج، نوسان‌های شاخص SPI در دوره‌های مورد بررسی به مراتب بیشتر از شاخص SPEI است. البته در شرایط اقلیمی با نوسان کم دما، هر دو شاخص به تغییرات بارندگی واکنش مشابهی دارند. همچنین نتایج نشان دادند که میانگین تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPEI، طولانی‌مدت‌تر از تداوم خشکسالی‌ها در SPI است. این نتایج در تمامی ایستگاه‌ها و همچنین در تمامی بازه‌های زمانی صدق می‌کند. بر اساس

جدول ۲. مقدار ضریب همبستگی پیرسون برای تمامی ایستگاه‌ها

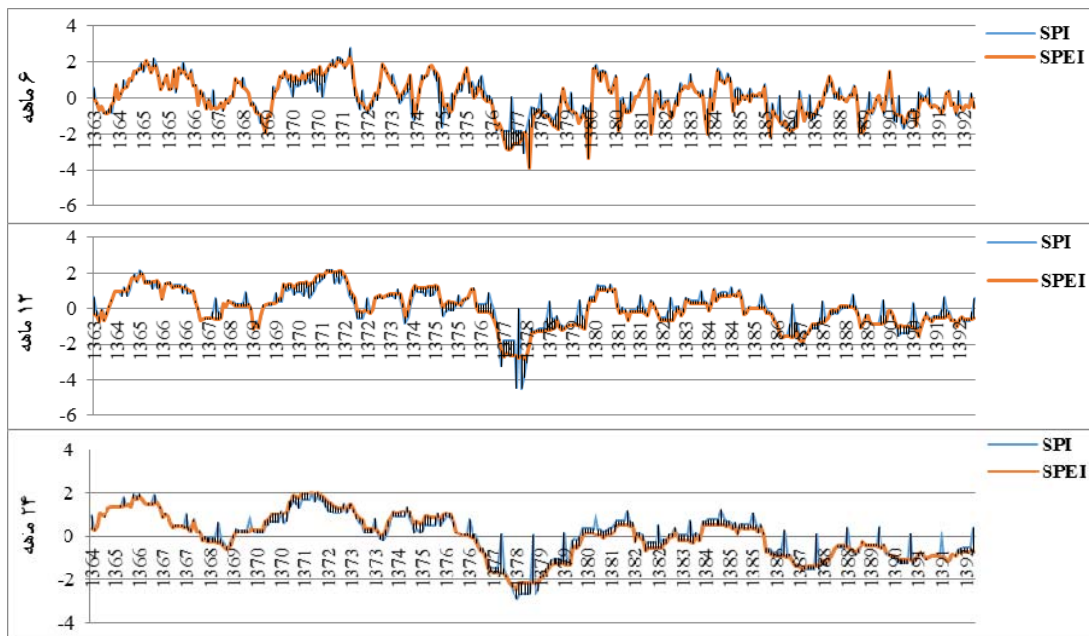
نام ایستگاه	بازه زمانی					
	۱ ماهه	۳ ماهه	۶ ماهه	۹ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
ایذه	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۳
آورگان	۰/۷۲	۰/۷۶	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴
بارانگرد	۰/۵۰	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۴
بهشت‌آباد	۰/۵۲	۰/۷۰	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۸
پاتاو	۰/۶۴	۰/۶۸	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۷۳
تنگ پنج	۰/۶۶	۰/۸۰	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۴
حنا	۰/۵۵	۰/۶۹	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۵
دشت روم	۰/۵۶	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴
سد دز	۰/۵۱	۰/۶۳	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸
سد دزفول	۰/۵۰	۰/۵۹	۰/۸۱	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۲
سوسن	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۴
سولگان	۰/۶۲	۰/۶۹	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۴
عباس‌پور	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۲
عرب‌حسن‌آباد	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۸۳	۰/۷۷
کاظم‌آباد	۰/۵۹	۰/۷۲	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳
گتوند	۰/۴۸	۰/۶۶	۰/۷۷	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۹۱
لالی‌بند	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۲
یاسوج	۰/۶۰	۰/۷۴	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۵

در نظر گرفتن متغیر درجه حرارت بر این شاخص باشد. هر چند بارش نقش ویژه‌ای در تغییرات زمانی خشکسالی ایفا می‌کند اما تأثیر درجه حرارت معنی‌دار بوده و موجب تشدید پدیده خشکسالی و درنهایت موجب کاهش شدیدتر منابع آب می‌شود و این امر ارتباط خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک را بهتر بیان می‌کند. در این راستا می‌توان بیان کرد که افزایش دما در آینده قابل چشم‌پوشی نبوده و همچنین میانگین تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPEI طولانی‌مدت‌تر از تداوم خشکسالی‌ها در SPI است. شاخص خشکسالی SPEI با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی بارش و تبخیر و تعرق توان بالایی در نمایش تغییرات منابع آب در مقایسه با دیگر شاخص‌های خشکسالی دارد.

نتایج این تحقیق در بررسی کارایی شاخص SPEI با پژوهش‌های دیگر توافق دارد. نصرتی (۱۴) در پژوهشی با بهره‌گیری از شاخص بارش استاندارد شده نشان دادند که با افزایش دوره‌های بازگشت و مقیاس زمانی، تداوم خشکسالی‌ها بیشتر می‌شود. در مطالعه اثرات فرایند گرم شدن بر خشکسالی‌ها و منابع آب در اسپانیا با به‌کارگیری 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). بر اساس نتایج این تحقیق، شاخص SPEI طبقات خشکسالی را در مقایسه با SPI بیشتر نشان می‌دهد که می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییر بارش و



شکل ۸. ارتباط بین شاخص‌های شاخص SPI و SPEI مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ در ایستگاه سوسن



شکل ۹. مقایسه بین شاخص‌های شاخص SPI و SPEI مقیاس‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۲۴ در ایستگاه سوسن

## پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی

در این پژوهش سه دوره ۳، ۹ و ۲۴ ماهه برای شاخص‌های SPEI و SPI در نظر گرفته شده است. در این راستا برای هر سال و هر سه دوره در مجموع (۳۶×۱۲) نقشه تولید شده است که با توجه به اینکه دو شاخص در این پژوهش مطرح شده است، تعداد نقشه‌های پهنه‌بندی ترسیمی ۷۲ عدد است (تنها برای یک سال). به همین دلیل نقشه‌های پهنه‌بندی دوره ۹ ماهه شاخص‌های مذکور با توجه به داده‌های موجود برای دو سال ۱۳۷۱ و ۱۳۸۶ به‌عنوان سال‌هایی با بیشترین و کمترین میزان بارش انتخاب شدند. برای مقایسه شاخص‌های SPEI و SPI در دوره ۹ ماهه و به‌منظور کاهش تعداد نقشه‌ها، ماه‌های دارای بیشترین شدت خشکسالی در فصل بهار و پاییز انتخاب شدند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های مذکور در دوره ۹ ماهه در سال ۱۳۷۱ و ۱۳۸۶ مشخص هستند.

بر اساس شاخص SPI ۹ ماهه، در فصل بهار خشکسالی در برخی از نواحی اتفاق افتاده است ولی در بعضی از ارتفاعات ترسالی وجود داشته است. درحالی که شاخص SPEI ۹ ماهه حاکی از خشکسالی‌های شدید و رطوبت‌های لکه‌ای در داخل شرایط نرمال است. بر اساس هر دو شاخص، در فصل پاییز خشکسالی مشاهده نشد و شرایط معمولی در مجاورت رطوبت متوسط به‌صورت غالب در حوضه قرار گرفته است. از آنجایی که سال ۱۳۷۱ سالی با بیشترین میزان بارش گزارش شده در حوضه است، نتایج دور از انتظار نیست. به همین روش بر اساس شکل (۱۱) با توجه به شاخص SPI می‌توان دریافت که حوضه به‌صورت کامل در شرایط خشکسالی متوسط تا شدید قرار داشته است و فقط در مناطقی از شرق حوضه شرایط مرطوب ایجاد شده است. خشکسالی تخمینی در فصل بهار با توجه به شاخص SPEI دارای شدت بالاتری بوده و تقریباً کل حوضه در شرایط سخت خشکسالی قرار گرفته است و این میزان از ناحیه شرق به غرب رو به افزایش است. اما در فصل پاییز، شرایط نرمال توسط هر دو شاخص ارائه شده است.

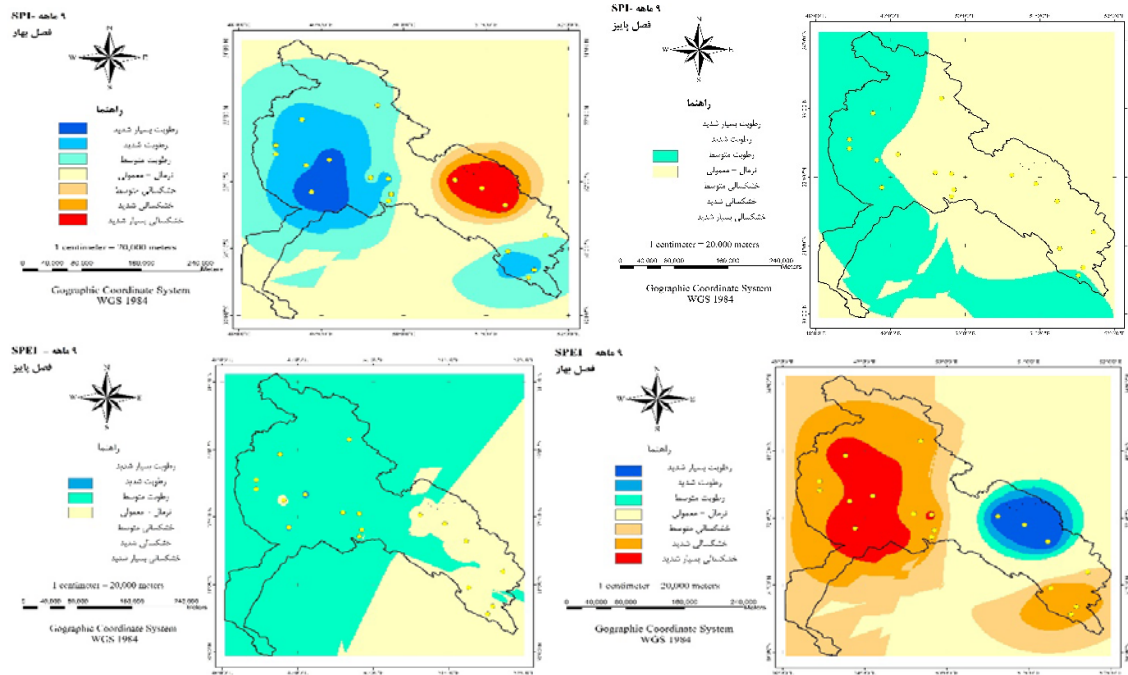
## منطقه‌ای کردن شاخص‌های SPEI و SPI و تعیین ایستگاه‌های همگن

برای تعیین ایستگاه‌های همگن از نظر شاخص‌های مختلف خشکسالی از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده شد که برای این منظور شاخص‌های SPEI و SPI به‌صورت ماهانه محاسبه و از نتایج آن برای خوشه‌بندی استفاده شد.

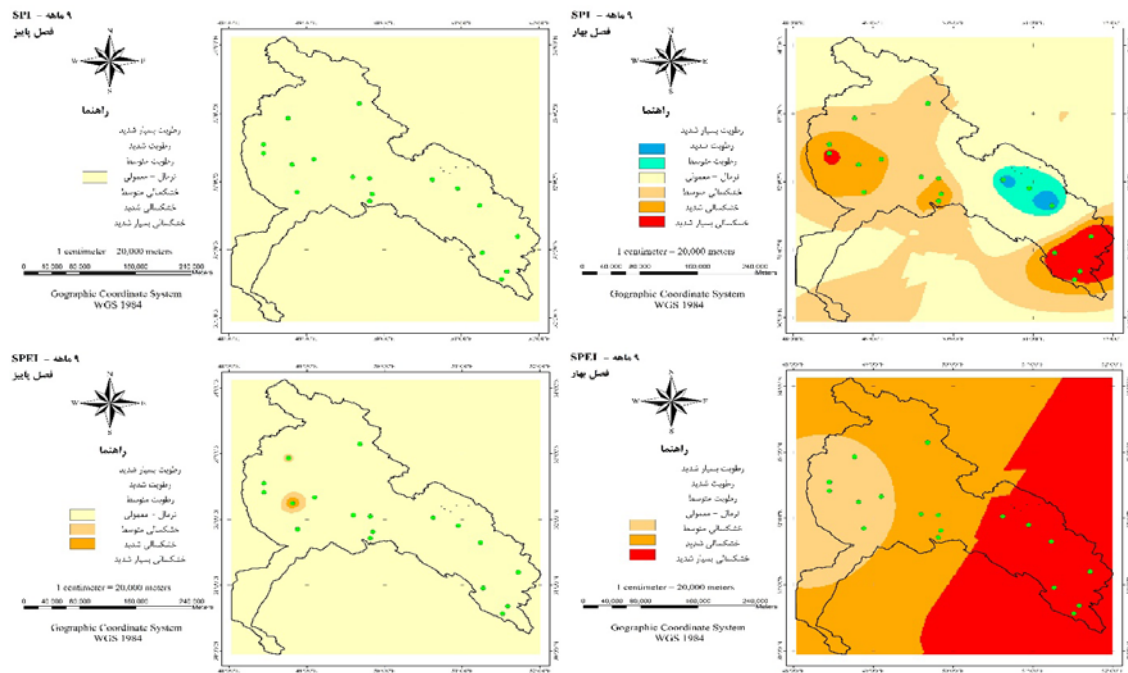
بر اساس نمودار دندروگرام شکل (۱۲)، ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک حوضه آبریز کارون، در هفت کلاس طبقه‌بندی شده است. ایستگاه‌های گتوند و کاظم‌آباد در کلاس یک، ایستگاه‌های دشت روم، یاسوج، پاتاوه، حنا، آورگان، سولگان در کلاس دو، ایستگاه‌های بارانگرد، ایزه، بهشت‌آباد، لالی بندسرخ، سد دز و تنگ پنج بختیاری در کلاس سه، ایستگاه عرب‌حسن‌اسد در کلاس چهار، ایستگاه سد دزفول در کلاس پنج، ایستگاه سد عباس‌پور در کلاس شش و ایستگاه سوسن در کلاس هفت طبقه‌بندی شده است.

نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس شاخص SPI نشان داد که شرایط خشکسالی ایستگاه سد دز، لالی بند سرخی، گتوند تقریباً مشابه یکدیگر هستند و در یک خوشه قرار می‌گیرند، اما بر اساس شاخص SPEI، با توجه به دخالت دما و تبخیر و تعرق از شدت سال‌های تر و خشک کاسته شده و روند خشکسالی‌های سه ایستگاه به هم نزدیک‌تر شده است. به همین دلیل فاصله بین این ایستگاه‌ها در نمودار دندروگرام ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک بر اساس شاخص SPEI کمتر شده است.

با توجه به برتری شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI و نیز دخالت داشتن دو فاکتور دما و بارش در محاسبه SPEI، از نمودار دندروگرام این شاخص برای بررسی فراوانی هر یک از ایستگاه‌ها استفاده شد. بر این اساس از هر کلاس یک ایستگاه به‌عنوان نماینده آن کلاس انتخاب شد که از کلاس (۱) بارانگرد، کلاس (۲) گتوند، کلاس (۳) تنگ‌پنج‌بختیاری، کلاس (۴) سد شهید عباس‌پور، کلاس (۵) دشت‌روم، کلاس (۶) سوسن و کلاس (۷) ایستگاه سد کاظم‌آباد انتخاب و فراوانی



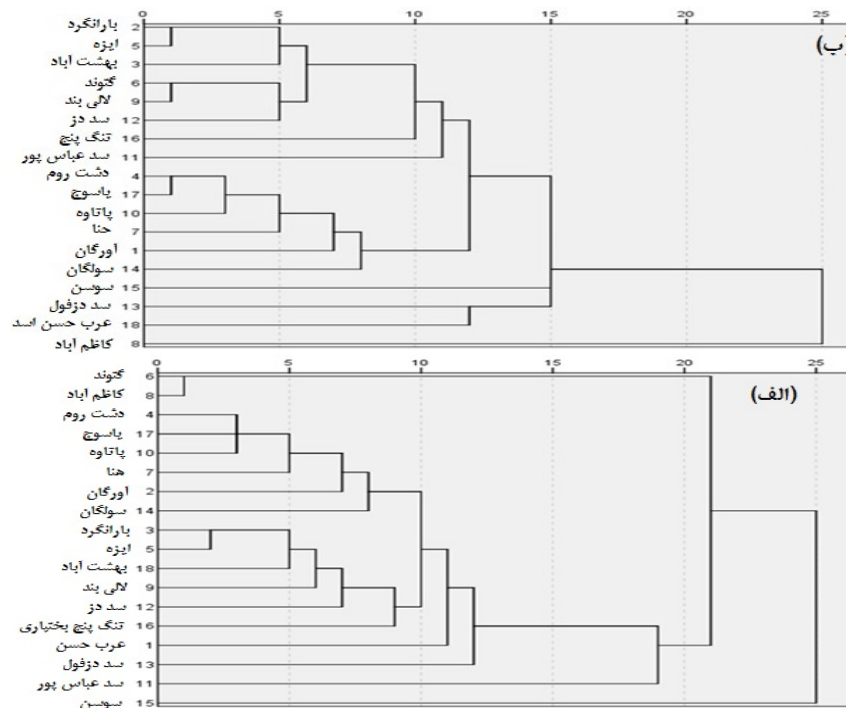
شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI و SPEI ۹ ماهه در فصل بهار (فروردین) و پاییز (آبان) (سال ۱۳۷۱)



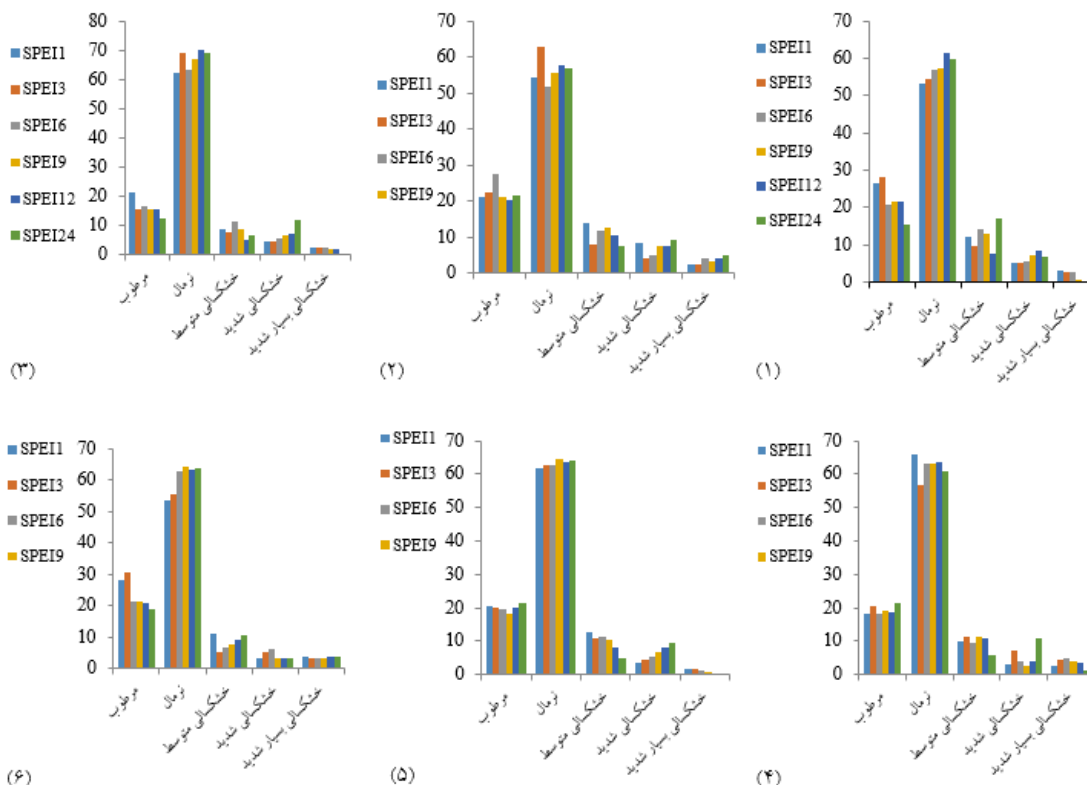
شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی شاخص SPI و SPEI ۹ ماهه در فصل بهار (فروردین) و پاییز (آبان) (سال ۱۳۸۶)

خشکسالی مربوط به طبقه نرمال است. به عبارت دیگر درصد فراوانی طبقه نرمال بیش از درصد فراوانی طبقه

مرتبه‌های مختلف خشکسالی بررسی شد. نتایج شکل (۱۳) نشان داد که در تمامی کلاس‌ها، بیشترین درصد فراوانی طبقات



شکل ۱۲. نمودار دندروگرام خوشه‌بندی شاخص‌های خشکسالی (الف) SPI و (ب) SPEI در بین ایستگاه‌ها



شکل ۱۳. فراوانی طبقات مختلف خشکسالی در کلاس‌های (۱) تا (۶)

مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آنها افزایش می‌یابد. نتایج شاخص SPEI ۲۴ ماهه نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها در فاصله زمانی سال‌های ۹۰-۸۶ طولانی‌ترین خشکسالی‌ها ثبت شده است. بر اساس نتایج، نوسان‌های شاخص SPI در دوره های مورد بررسی به مراتب بیشتر از شاخص SPEI است. البته در شرایط اقلیمی با نوسان کم دما، هر دو شاخص به تغییرات بارندگی واکنش مشابهی دارند. مقایسه نتایج حاصل از دو شاخص نشان داد که میانگین تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPEI طولانی‌مدت‌تر از تداوم خشکسالی‌ها در SPI است و این نتایج در تمامی ایستگاه‌ها و همچنین در تمامی بازه‌های زمانی صدق می‌کند. به‌طور کلی، شاخص SPEI طبقات خشکسالی را در مقایسه با SPI بیشتر نشان می‌دهد که می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییر بارش و در نظر گرفتن متغیر درجه حرارت بر این شاخص باشد. در این راستا می‌توان بیان کرد که افزایش دما در آینده قابل چشم‌پوشی نبوده و همچنین میانگین تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPEI طولانی‌مدت‌تر از تداوم خشکسالی‌ها در SPI است.

نقشه پهنه‌بندی خشکسالی در حوضه آبریز کارون نشان داد که خشکسالی تخمینی در فصل بهار با توجه به شاخص SPEI دارای شدت بالاتری بوده و تقریباً کل حوضه در شرایط سخت خشکسالی قرار گرفته است و این میزان از ناحیه شرق به غرب حوضه رو به افزایش است. اما در فصل پاییز، شرایط نرمال توسط هر دو شاخص ارائه شده است. نتایج حاصل از منطقه‌ای کردن ایستگاه‌های همگن به طبقه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک حوضه در هفت کلاس انجامید. نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس شاخص بر اساس هر دو شاخص به یکدیگر نزدیک هستند. همچنین نتایج نشان داد که در تمامی کلاس‌ها، بیشترین درصد فراوانی طبقات خشکسالی مربوط به طبقه نرمال است و به دلیل همچنین برابری مجموع درصد فراوانی طبقه خشک با مجموع درصد فراوانی طبقه مرطوب، حوضه آبریز کارون دارای تعادل در روند وقوع خشکسالی و ترسالی است.

مرطوب و خشک است. همچنین تقریباً مجموع درصد فراوانی طبقه خشک با مجموع درصد فراوانی طبقه مرطوب برابر است که به معنای آن است که در طول مدت ۳۰ سال آماری، حوضه آبریز کارون، از لحاظ روند وقوع خشکسالی و ترسالی متعادل است. در بین طبقات خشک درصد فراوانی خشکسالی متوسط بیشتر از درصد فراوانی خشکسالی شدید و بسیار شدید است. به‌عبارت دیگر تعداد ماه‌هایی که تحت تأثیر خشکسالی بسیار شدید قرار دارند کمتر از ماه‌هایی است که دچار خشکسالی شدید و متوسط شده‌اند.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به هدف ارزیابی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI و تعیین ایستگاه‌های همگن هیدرولوژیک صورت گرفته است. نتایج محاسبات در ۱۰ ایستگاه منتخب از ۱۸ ایستگاه (ایستگاه‌هایی با بیش از ۳۰ سال آمار) نشان داد که ایستگاه‌های حنا، سولگان، سوسن، تنگ پنج بختیاری و ایستگاه سد دز دارای برآورد نزدیکی از رخدادهای شدید خشکسالی توسط هر دو شاخص SPI و SPEI هستند و روند تغییرات خشکسالی مشابهی را عرضه می‌کنند. اما در ایستگاه‌های عرب‌حسن‌آباد، اورگان، دشت‌روم، کاظم‌آباد و لالی‌بندسرخ‌همانگی بالایی در تخمین رخدادهای شدید خشکسالی توسط دو شاخص مذکور دیده نشد، اگرچه روند تقریباً مشابهی در رخدادهای خشکسالی و ترسالی توسط هر دو شاخص مشاهده شده است. همچنین در اکثر ایستگاه‌ها، مهرماه سال ۱۳۸۷ به‌عنوان شدیدترین دوره خشکسالی در حوضه آبریز کارون برآورد شده است. همچنین نتایج حاکی از همبستگی معنی‌دار دو شاخص در تحلیل خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف بود و ضریب همبستگی بین شاخص‌ها در اغلب ایستگاه‌ها با افزایش دوره زمانی افزایش یافت. در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب زیاد است. با افزایش مقیاس‌های زمانی فراوانی دوره‌های خشک و



منابع مورد استفاده

1. Banimahd, S. A. and D. Khalili. 2014. Drought Class Transition Analysis by Markov Chains and Log-Linear Models: Approach for Early Drought Warning. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 8(4):39-56 (in Farsi).
2. Beguería, S., S. M. Vicente-Serrano and M. Angulo. 2010. A multi-scalar global drought data set: the SPEIbase: A new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91:1351-1354.
3. Biyabanaki, M. and S. Eslamian. 2004. Cluster analysis for determination of the Hydrologic homogeneity, assessment with discriminant analysis and Andrew curves in Karkheh basin. *Agricultural* 6(2):13-26 (In Farsi).
4. Dubrovsky M., M. Svoboda, M. J. Trnka, D. Hayes, Z. Wilhite, M. Zalud and P. Hlavinka. 2008. Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology* 96: 155–171.
5. Golian, S., O. Mazdiyasi and A. AghaKouchak. 2015. Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 119(3-4): 679-688.
6. Ji, L. and A. J. Peters. 2003. Assessing in vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment* 87:85-98.
7. Lee, S. H., S. H. Yoo, J. Y. Choi and S. Bae. 2017. Assessment of the Impact of Climate Change on Drought Characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea Using Time Series SPI and SPEI: 1981–2100. *Water* 57(9): 2-19.
8. Livia, L., S. Lukas and H. Gunther. 2014, The Comparison of the SPI and the SPEI Using COSMO Model Data in Two Selected Slovakian River Basins, EGU General Assembly, Vienna, Austria.
9. Mavromatis, T. 2007. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology* 27: 911-924.
10. McKee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology* 5(10):179-184.
11. MesbahZadeh, T. and F. SoleimaniSardoo. 2018. Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh watershed. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 12 (40): 105-114 (In Farsi).
12. Mostafazadeh, R. and M. Zabihi. 2016. Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics* 42(3): 633-643 (In Farsi).
13. Nicholls, N. 2004. The changing nature of Australian droughts. *Climate Change* 63: 323–336.
14. Nosrati, K. 2014. Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for Drought Identification in Different Climates of Iran. *Environmental Science* 12(4): 63-74 (In Farsi).
15. Rebetez, M., H. Mayer, O. Dupont, D. Schindler, K. Gartner, J. P. Kropp and A. Menzel. 2006. Heat and drought 2003 in Europe: A climate synthesis. *Annals of Forest Science* 63: 569–577.
16. Stage, J. H., L. Tallaksen, L. Gudmundsson, A. F. Van Loon and K. Stahl. 2015. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 12(6): 247-253.
17. Swart, R. J. 2008. Impacts of Europe's Changing Climate-2008 Indicator-Based Assessment (No. 4/2008). European Environment Agency (EEA).
18. Tajbakhsh, S., N. Eisakhani and A. Fazl Kazemi. 2015. Assessment of meteorological drought in Iran using standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). *Journal of the Earth and Space Physics* 41(2): 313-321. (In Farsi).
19. Tomros, T. and L. Menzel. 2014. Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region. *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 305-318.
20. Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería and J. I. López-Moreno. 2010. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate* 23(7): 1696– 1718.
21. Vicente-Serrano, S. M., G. Van der Schrier, S. Beguería, C. Azorin-Molina and J. Lopez-Moreno. 2015. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology* 526: 42-54.

22. Zare Abyaneh, H., G. Sough and M. Abolfazl. 2015. Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evaoptranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change. *Journal of Water and Soil* 29(2): 374-392 (in Farsi).

## Regionalization Analysis of SPI and SPEI Drought Indices for Karoon Basin

M. Saeidipour<sup>1</sup>, F. Radmanesh<sup>1\*</sup>, S. S. Eslamian<sup>2</sup> and M. R. Sharifi<sup>1</sup>

(Received: July 11-2018 ; Accepted: September 23-2018)

### Abstract

The current study was conducted to compute SPI and SPET drought indices due to their multi-scale concept and their ability to analyze different time-scales for selected meteorological stations in Karoon Basin. Regionalization of SPI and SPEI Drought indices based on clustering analysis was another aim of this study for hydrological homogenizing. Accordingly, to run test through data and determine similar statistical periods, 18 stations were selected. SPI and SPEI values were plotted in the sequence periods graphs and their relationships were analyzed using the correlation coefficient. The results were compared by Pearson correlation coefficient at the significance level of 0.01. The results showed that correlation coefficients (0.5-0.95) were positive and meaningful for all stations and the correlation coefficient between the two indices were increased by enhancing the time-scales. Also, time-scales enhancement decreased the frequency of dry and wet periods and increased their duration. Through regionalization of basin stations based on clustering analysis, the stations were classified into 7 classes. The results of SPEI regionalization showed that the frequency percentage of the normal class was more than those of dry and wet classes.

**Keywords:** Evapotranspiration, Dry and wet period, Regionalization of the basin, SPI and SPEI Drought Indices

1. Department of Hydrology and Water Resources Engineering, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: Feridon.radmanesh@yahoo.com