

مقاله علمی-پژوهشی

## تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی تحت تأثیر تغییر اقلیم با رویکرد کاپولا در استان

### فارس

سیدمعین فرمان‌آراء<sup>۱</sup> - بهرام بختیاری<sup>۲\*</sup> - نسرین سیاری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱

### چکیده

کاهش بارش، رواناب و رطوبت خاک و افزایش درجه حرارت هوا و عمق سطح ایستابی نسبت به شرایط میانگین دراز مدت نشانه وقوع خشکسالی است. هدف از این پژوهش، بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در شش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استان فارس تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم با رویکرد تابع کاپولا در دوره آینده می‌باشد. به این منظور داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های مورد نظر در بازه زمانی ۱۵ (۲۰۱۸-۲۰۰۴) الی ۳۳ (۲۰۱۸-۱۹۸۶) سال از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند. این پژوهش در سه مرحله اجرا شد. مرحله اول: ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل بزرگ‌مقیاس گردش عمومی جو (CanESM2) بر مبنای دو سناریوی حد واسط (RCP4.5) و بدینانه (RCP8.5) با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM, ver. 4.2.9 در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ میلادی. مرحله دوم: محاسبه شاخص SPI و مشخصات خشکسالی در دوره پایه و دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰) در محیط برنامه‌نویسی R. مرحله سوم ترسیم منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی خشکسالی (SDF) با رویکرد کاپولا برای دوره پایه و آتی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5. نتایج نشان داد که فراوانی وقوع خشکسالی در استان فارس طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ در هر دو سناریو افزایش یافته که در سناریوی RCP8.5، با افزایش مدت خشکسالی نیز همراه می‌باشد. همچنین انتظار می‌رود که بارش در این استان در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۲/۸ درصد افزایش و ۶/۵ درصد کاهش یافته و به طبع آن شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه در سناریو RCP8.5 افزایش یابد. انتظار می‌رود که مقدار بارش در ایستگاه شیراز تحت هر دو سناریو کاهش یابد. به همین ترتیب، انتظار می‌رود مقدار بارش در ایستگاه بوانات در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب افزایش و کاهش یابد. برای ایستگاه شیراز مدت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۲ و دوره بازگشت ۵ سال، در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۵/۲۵، ۵/۵ و ۶ ماه به دست آمد. این میزان برای ایستگاه بوانات به ترتیب ۴، ۳/۵ و ۵ ماه برآورد شد که انتظار کاهش بارش در هر دو سناریو در ایستگاه شیراز و افزایش و کاهش بارش به ترتیب تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه بوانات می‌رود.

**واژه‌های کلیدی:** شاخص بارش استاندارد شده، دوره خشکی، منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی، SDSM

### مقدمه

اجتماعی تقسیم نمود، که در خشکسالی هواشناسی مقادیر بارندگی‌ها، تبخیر-تعرق و یا سایر متغیرهای اقلیمی مرتبط با گیاه نسبت به مقدار میانگین سنجیده می‌شوند. خشکسالی پدیده‌ای است که اساساً با کمبود بارش و یا در برخی موارد با تبخیرتعرق در یک منطقه مرتبط است. بر اساس 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 (۱۶). پژوهش‌های انجام شده توسط پالم (۲۸) از جمله نخستین پژوهش‌ها در زمینه خشکسالی می‌باشد. طبق تعریف وی، خشکسالی عبارت از کمبود مستمر و غیرطبیعی رطوبت هوا، که واژه غیرطبیعی به انحراف شاخص مورد نظر از شرایط طبیعی (میانگین) و واژه مستمر به

خشکسالی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مخاطره‌آمیز طبیعی است که به طور مستقیم بر زندگی بشر تأثیر می‌گذارد. تعیین دقیق زمان شروع و پایان خشکسالی دشوار است از این رو برآورد اثرات و خسارات خشکسالی تا حد زیادی مشکل می‌باشد. خشکسالی‌ها را می‌توان به چهار گروه عمده هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و اقتصادی -

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
(\*)- نویسنده مسئول: Email: drbakhtiari@uk.ac.ir  
DOI: 10.22067/jsw.v34i5.81899

حالت کمبود گفته می‌شود.

نظر به ساده بودن محاسبات تحلیل‌های تک متغیره نسبت به چند متغیره، در بسیاری از مطالعات خشکسالی از تحلیل‌های تک متغیره بهره گرفته شده است (۶ و ۳۱). اما خشکسالی یک پدیده تصادفی حدی و چند متغیره است و مشخصه‌های سختی و مدت آن به هم وابسته هستند و به صورت مستقل و جدای از هم تغییر نکرده و هرکدام بر دیگری تأثیرگذار است. از این رو استفاده از توابع کاپولا<sup>۱</sup> دومتغیره بین سختی و مدت خشکسالی می‌تواند ارتباط معنادار بین این دو ویژگی خشکسالی را نشان دهد و با استفاده از این تابع می‌توان دوره بازگشت رویدادهای خشکسالی را تعیین کرد (۴۱). توابع کاپولا ابتدا توسط اسکالر (۳۵) معرفی گردید. سپس کاربرد توابع کاپولا در هیدرولوژی توسط دی‌میچله و همکاران (۹) با مدل‌سازی همبستگی متغیرهای شدت و مدت بارش مطرح شد. بعد از آن استفاده از این توابع در هیدرولوژی توسط فاور و همکاران (۱۳) ادامه داده شد، به طوری که از کاپولا در مدل‌سازی متغیرهای هیدرولوژیک دو حوضه آبخیز در کانادا استفاده کردند. آن‌ها بیان نمودند که همبستگی بین متغیرهای موجود در مباحث هیدرولوژی را می‌توان با استفاده از این روش مدل‌سازی کرد و نتایج بهتری نسبت به روش‌های پیش‌بینی یک متغیره داشت. پس از آن توابع کاپولا در تحلیل برخی از پدیده‌ها، نظیر سیلاب (۱، ۸، ۷، ۱۴ و ۱۰)، بارش (۴۲، ۱۸ و ۴۳)، رسوب و رواناب (۴۵) مورد بررسی قرار گرفت. شیائو (۳۳) برای اولین بار از توابع کاپولا برای تحلیل خشکسالی کمک گرفت. ایشان توابع کاپولا را بر متغیرهای مدت و سختی خشکسالی برآزش داد و دوره بازگشت‌های توأم این متغیرها را به دست آورد. پس از آن پژوهش‌های متعددی بر تحلیل خشکسالی با رویکرد کاپولا انجام شد (۴۴، ۲۵، ۲۲، ۳۰، ۱۹ و ۴۰).

هر پدیده خشکسالی، با سه مشخصه سختی، مدت و فراوانی وقوع شناخته می‌شود. در ارتباط با تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای مقایسه شرایط اقلیم کنونی و داده‌های حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم مطالعات مختلفی در مقیاس‌های جهانی، قاره-ای یا منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی انجام شده است. وو و همکاران (۳۹) با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه، به ارزیابی شاخص‌های بارش استاندارد شده  $Z^2$  (SPI)،  $Z$  چینی<sup>۲</sup> (CZI) و عدد  $Z^4$  در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، برای اقلیم‌های خشک و مرطوب کشور چین پرداختند. این پژوهشگران

نتیجه گرفتند که هر سه شاخص، نتایج یکسانی را برای همه مقیاس‌های زمانی به همراه داشته، ولی محاسبات مربوط به شاخص‌های CZI و عدد Z، آسان‌تر از شاخص SPI بوده است. سرینالدی و همکاران (۳۲) از توابع کاپولا در تحلیل احتمالاتی خصوصیات خشکسالی‌های جزیره‌ای در ایتالیا بین سال‌های ۱۹۲۱ و ۲۰۰۳ استفاده کردند. آن‌ها یک مدل مبتنی بر کاپولا چهار بعدی از چندین مشخصه با نام طول خشکسالی، میانگین و حداقل مقادیر SPI و میانگین وسعت منطقه‌ای خشکسالی ارائه نمودند. لیو و همکاران (۲۱) با استفاده از داده‌های ۱۲۷ ایستگاه باران‌سنجی در چین، وضعیت خشکسالی را بررسی کردند. ابتدا در هر یک از ایستگاه‌ها متغیرهای سختی و مدت خشکسالی را استخراج کردند. سپس به ازای دوره بازگشت‌های یکسان، سختی و مدت خشکسالی ایستگاه‌ها را با هم مقایسه کردند. در نهایت مناطقی که دارای سختی و مدت خشکسالی بیش‌تری بودند را به عنوان مناطق با ریسک خشکسالی بیش‌تر معرفی کردند. وانگ و همکاران (۳۸) بررسی همبستگی عرضی بین خشکسالی هواشناختی و خشکسالی هیدرولوژیکی را مورد توجه قرار دادند. آن‌ها ابتدا متغیرهای مدت و کمبود خشکسالی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک را برای چند منطقه از اروپا با اقلیم‌های متفاوت استخراج کردند. سپس روابط احتمالاتی بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک متعاقب را به وسیله توابع کاپولا به نمایش گذاشتند. هالوتورا و همکاران (۱۵) به منظور ترسیم منحنی‌های SDF خشکسالی در شرق استرالیا، از سه شاخص SPI، RDI و SPEI با رویکرد تابع کاپولا استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد فراوانی وقوع رویدادهای شدید و طولانی مدت در مناطق خشک بیش‌تر از مناطق معتدل می‌باشد. آزام و همکاران (۳) به شبیه‌سازی تصادفی منطقه‌ای بر پایه کاپولا جهت ارزیابی ریسک خشکسالی در کره جنوبی با شاخص SPI پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مناطق ساحلی در خطر خشکسالی‌های شدید و مناطق میانی و شمالی با خشکسالی خفیف‌تر روبرو می‌باشند. در ایران نیز پژوهش‌های چندی با استفاده از توابع کاپولا انجام شده است. فرخ‌نیا و مرید (۱۲) برای تحلیل خصوصیات احتمالاتی خشکسالی در ایستگاه مهرآباد تهران، احتمال وقوع و دوره بازگشت دو متغیره خشکسالی بر مبنای شاخص‌های SPI و خشکسالی مؤثر<sup>۵</sup> (EDI) را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توزیع حاشیه‌ای مدت خشکسالی را نمایی و توزیع حاشیه‌ای شدت خشکسالی را گاما در نظر گرفتند. پس از بررسی انواع مختلف کاپولاها، مناسب‌ترین کاپولا بر اساس بیش‌ترین مقدار تابع حداکثر درست‌نمایی را انتخاب کردند. بر این اساس مناسب‌ترین تابع کاپولا برای شاخص‌های SPI و EDI به ترتیب کاپولا‌های جوئی و فرانک انتخاب شدند.

- 1- Copula
- 2- Standardized Precipitation Index
- 3- China Z Index
- 4- Z-score

SPI در شرایط تغییر اقلیم. ۳- محاسبه مقادیر سختی و مدت خشکسالی در دوره‌های پایه و آتی. ۴- برآزش تابع کاپولا بر متغیرهای سختی و مدت خشکسالی. ۵- استخراج منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی (SDF) و تحلیل آن‌ها.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان فارس با مساحت ۱۲۲۶۰۸ کیلومتر مربع در جنوب ایران و بین طول‌های جغرافیایی ۵۰°۳۶' تا ۳۵°۵۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۷°۰۳' و ۳۱°۴۰' شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). استان فارس از شمال به استان اصفهان، از جنوب به استان هرمزگان، از شرق به استان کرمان و یزد و از غرب به استان کهگیلویه و بویراحمد محدود می‌شود.

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، از بین ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در استان فارس تعداد ۶ ایستگاه که واجد آمار طولانی مدت‌تری (حداقل ۱۵ ساله) نسبت به سایر ایستگاه‌ها بودند انتخاب شدند. داده‌های بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد و اقلیم آن‌ها بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش یافته تعیین گردید (۲۰). این استان به دلیل تفاوت در ارتفاعات، دارای طبقات اقلیمی مختلفی از خشک سردسیر تا خشک گرمسیر می‌باشد (جدول ۱).

## روش‌ها

### ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها

در پژوهش حاضر به منظور برآورد داده‌های بارش آینده از مدل بزرگ‌مقیاس گردش عمومی جو CanESM2 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های خروجی استفاده شد. مدل CanESM2 یک مدل جامع و چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی جفت شده<sup>۷</sup> (CGCM4) است و جزء و گزارش پنجم<sup>۸</sup> (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۹</sup> (IPCC) می‌باشد (۲). این مدل شامل یک سناریوی کاهش‌ی سخت‌گیرانه (RCP2.6)، سناریوی حدواسط (RCP4.5) و یک سناریو بدبینانه (RCP8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند که اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۸/۵، ۴/۵ و ۲/۶ وات

میراکبری و همکاران (۲۶) برای مشاهده اثرات مکانی خشکسالی، تحلیل منطقه‌ای خشکسالی را انجام داد. آن‌ها ابتدا متغیرهای مدت و سختی را برای ۴۱ ایستگاه واقع در استان خوزستان استخراج کردند. سپس با به کارگیری این متغیرها و استفاده از روش L-moments، مناطق همگن را شناسایی کردند. در نهایت توزیع توأم متغیرهای سختی و مدت را برای هر منطقه همگن با استفاده از توابع کاپولا ارائه کردند. عزیزآبادی و همکاران (۴) به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم<sup>۱</sup> بر منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی<sup>۲</sup> (SDF) خشکسالی حوضه قره‌سو با استفاده از توابع کاپولا در دوره آتی پرداختند. براساس نتایج آن‌ها متغیرهای بارش و دمای ماهانه در حوضه، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. پیرنیا و همکاران (۲۹) به ارزیابی وضعیت خشکسالی در حوضه آبخیز تمر در استان گلستان با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI<sup>۳</sup> تحت شرایط اقلیمی حال و آینده پرداختند. با ارائه مدل‌های گزارش پنجم و معرفی سناریوهای جدید RCP کاربرد این سناریوها مورد توجه قرار گرفت. از آنجا که مدل CanESM2<sup>۴</sup> یکی از معدود مدل‌هایی است که در کشور ایران دقت مناسبی دارد و قابلیت ریزمقیاس‌نمایی با مدل SDSM<sup>۵</sup> را دارا می‌باشد، در این مطالعه از خروجی‌های این مدل بزرگ مقیاس تحت سناریوهای مختلف RCP استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد مدل SDSM برای پیش‌بینی داده‌های دما و بارش بسیار خوب و خروجی‌های آن نشان از افزایش دما و بارش نسبت به زمان حال است. همچنین نتایج دو شاخص مذکور نشان داد که در هر دو دوره پایه و آتی بیش‌تر خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به ترتیب در اواخر و نیمه ابتدایی دو دوره رخ داده است با این تفاوت که SPEI، شرایط خشکسالی شدیدتری را نسبت به SPI نشان داد. جمع‌بندی پیشینه تحقیقات نشان داد که تحلیل تک‌متغیره خشکسالی به دلیل عدم در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان متغیرهای همبسته دیگر، ناکارآمد بوده و از طرفی ضعف توزیع‌های دو متغیره متداول در استفاده از توزیع آماری یکسان برای دو متغیر مورد نظر، باعث شده است تا استفاده از توابع کاپولا برای ساخت توابع توزیع احتمالاتی چند متغیره راهکاری برای رفع این مشکلات باشد. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- شبیه‌سازی مقادیر بارش با مدل CanESM2 بر مبنای سناریوهای حدواسط (RCP4.5)<sup>۶</sup> و بدبینانه (RCP8.5). ۲- بررسی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص

1- Climate Change

2- Severity-Duration-Frequency

3- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

4- Second generation Canadian Earth System model

5- Statistical Downscaling Model

6- Representative Concentration pathway

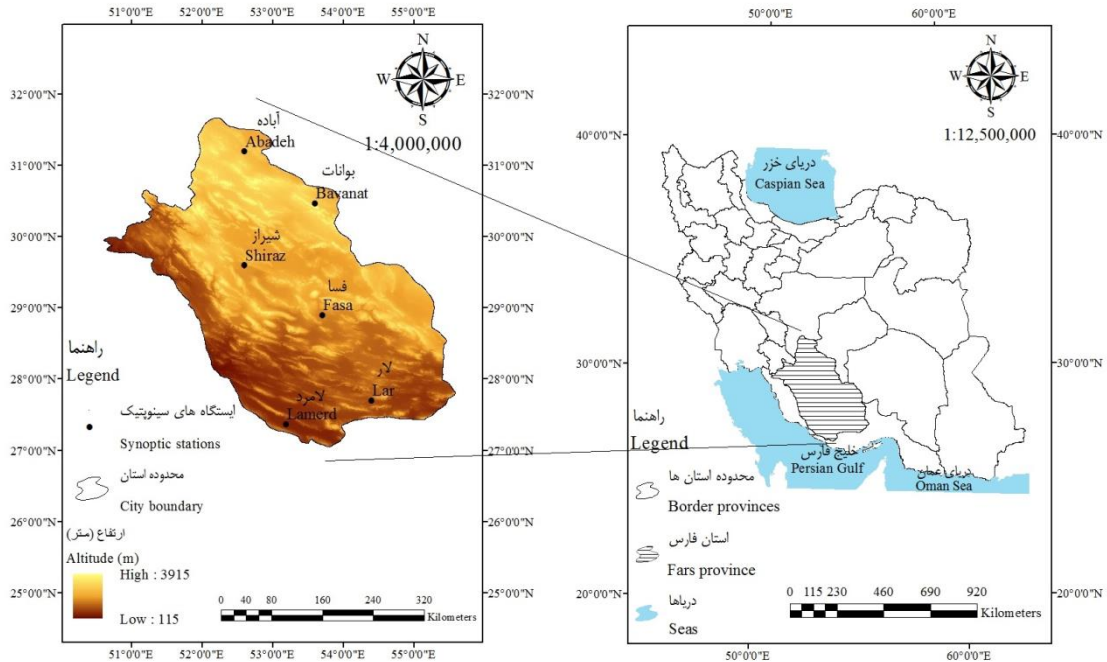
7- Fourth-generation Coupled Global Climate Model

8- Fifth Assessment Report

9- Intergovernmental Panel on Climate Change

مدل و تولید داده‌های سناریوهای آتی (۳۷). برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل SDSM در مرحله صحت‌سنجی، ۲۰ سری داده روزانه تولید شد. از بین آن‌ها سری‌ای انتخاب شد که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشت.

بر متر مربع (W.m<sup>2</sup>) تخمین زده‌اند (۱۷). مدل SDSM یکی از ابزارهای ریزمقیاس‌نمایی آماری می‌باشد که توسط ویلی و داوسون (۳۶) برای ارزیابی اثرات محلی تغییر اقلیم توسعه داده شد. عملکرد و ساختار مدل SDSM در چهار مرحله خلاصه می‌شود: انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده به نام متغیر مستقل، واسنجی مدل، ارزیابی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مطالعاتی بر گستره ایران  
Figure 1- The study area and location of the stations on Iran map

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان فارس

Table 1- The geographic characteristics and precipitation in the study synoptic stations in Fars province

ایستگاه Station	طول جغرافیایی (شرقی) Longitude (E)	عرض جغرافیایی (شمالی) Latitude (N)	ارتفاع (متر) Altitude (m)	دوره آماری (سال) Period (Year)	میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) Average annual precipitation (mm)	نوع اقلیم Climate type
آباده (Abadeh)	52°61′	31°20′	2030	1986-2018	130.4	خشک سردسیر Arid Cold
بوانات (Bavanat)	53°61′	30°48′	1365	2004-2018	168.2	خشک سردسیر Arid Cold
شیراز (Shiraz)	52°60′	29°56′	1484	1986-2018	318.8	نیمه‌خشک معتدل Semi-arid Moderate
فسا (Fasa)	53°72′	28°90′	1353	1986-2018	279.7	خشک معتدل Arid Moderate
لار (Lar)	54°37′	27°67′	792	1990-2018	201.9	خشک معتدل Arid Moderate
لامرد (Lamerd)	53°18′	27°37′	405	1995-2018	198.3	خشک گرمسیر Arid Warm

### شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

اساس این نمایه بر محاسبه احتمال وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار است که توسط مک‌کی و همکاران (۲۳) به منظور پایش و تعیین خشکسالی‌ها ارائه شد. محاسبه شاخص SPI در هریک از مقیاس‌های زمانی را می‌توان از مزیت‌های این شاخص و عدم تأثیر گرمایش جهانی بر خشکسالی، طول دوره ثبت داده‌های بارش و همچنین ماهیت توزیع‌های احتمالاتی را از جمله محدودیت‌های این شاخص به شمار آورد (۲۴). به منظور محاسبه این شاخص ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه استخراج و سری‌های زمانی آن‌ها تشکیل می‌گردد. سپس میانگین و انحراف معیار سری‌های زمانی مورد نظر محاسبه شده و مقادیر شاخص SPI تعیین می‌شوند. شدت هر خشکسالی به صورت جمع مقادیر شاخص مورد نظر، از زمانی که شاخص به زیر حد آغاز خشکسالی رسیده باشد تا زمانی که به حد پایان آن برسد تعریف می‌گردد و مدتی که این حالت ادامه دارد مدت مربوط به آن خشکسالی می‌باشد. حد شروع و پایان خشکسالی برای شاخص SPI به ترتیب مقادیر  $-0.99$  و صفر می‌باشد.

### کاربرد تابع کاپولا در تحلیل زمانی

کلمه کاپولا واژه‌ای لاتین به معنی اتصال و گره می‌باشد که برای اولین بار در ریاضیات و آمار توسط اسکالر (۳۵) به کار گرفته شد. از یک نقطه نظر، کاپولاها توابعی می‌باشند که توابع توزیع چند متغیره را به توابع توزیع حاشیه‌ایشان متصل می‌کنند و از طرف دیگر، کاپولاها نوعی از توابع توزیع چند متغیره هستند که حاشیه‌های تک‌بعدی‌شان بر بازه  $(0, 1)$  یکنواخت می‌باشد (۲۷). تابع توزیع احتمال دو متغیره به صورت معادله (۱) به دست می‌آید.

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) = C(u, v) \quad (1)$$

که در آن  $C$  یک تابع کاپولا و  $F_D(d)$  و  $F_S(s)$  توابع توزیع حاشیه‌ای هستند. برای انجام تحلیل فراوانی ابتدا باید یک تابع توزیع احتمال مناسب بر متغیرها برازش داده شود. در این پژوهش از تابع توزیع نرمال و لوگ‌نرمال به ترتیب جهت برازش بر مؤلفه‌های سختی و مدت خشکسالی و همچنین از تابع کاپولا دومتغیره اراشمیدسی گامبل جهت محاسبه دوره بازگشت‌های شرطی استفاده شد. شیائو و مدرس (۳۴) برای تعیین روابط SDF خشکسالی، دوره بازگشت شرطی  $T_{S|D}(s|d)$  را تعریف کردند که از معادله‌های (۲) و (۳) به دست می‌آید.

$$T_{S|D}(s|d) = \frac{1}{g \int_0^1 -F_{S|D}(s|d) \frac{d}{ds} ds} = \frac{1}{g \int_0^1 [1 - C_{F_S|F_D}(F_S(s)|F_D(d))] \frac{d}{ds} ds} \quad (2)$$

$$C_{F_S|F_D}(F_S(s)|F_D(d)) = \frac{\int_0^1 C_{F_S}(S) \cdot \frac{d}{ds} ds}{\int_0^1 F_D(d)} \quad (3)$$

که در آن  $\int_0^1 C_{F_S}(S) \cdot \frac{d}{ds} ds$  تابع کاپولا شرطی می‌باشد و نشان‌دهنده میزان احتمال توأم وقوع خشکسالی با مقدار سختی  $s$  به

ازای مدت خشکسالی برابر یا کم‌تر از مقدار  $d$  می‌باشد.  $T_{S|D}(s|d)$  برابر است با دوره بازگشت رویداد خشکسالی با مقدار سختی معین برای زمانی که مدت خشکسالی از حد آستانه  $d$  کم‌تر یا برابر باشد.  $\gamma$  نرخ بازگشت خشکسالی می‌باشد (۳۴). برای رسم منحنی‌های SDF ابتدا تابع کاپولا شرطی بر طبق معادله (۳) محاسبه می‌شود. در معادله (۲)، مقادیر  $1/25$ ،  $1/5$ ،  $1/10$ ،  $1/20$ ،  $1/50$ ،  $1/100$  و  $1/200$  سال برای  $T_{S|D}(s|d)$  و مقادیر معین مدت خشکسالی در بازه زمانی معینی از اعداد طبیعی در نظر گرفته می‌شود و مقادیر  $\gamma$  نیز محاسبه می‌شود. در نهایت با تعدادی معادله غیرخطی تک‌متغیره روبرو هستیم که در آن تابع توزیع سختی خشکسالی مجهول می‌باشد. پس از حل معادلات مذکور در محیط برنامه نویسی R، مقدار احتمال تجمعی مدت معین به دست می‌آید. سپس توزیع معکوس تابع توزیع حاشیه‌ای مربوط به سختی خشکسالی را بر مقادیر  $F_S(S)$  برازش می‌دهیم و مقادیر سختی به ازای دوره بازگشت و مدت معین خشکسالی به دست می‌آیند و با داشتن سختی و مدت‌های مختلف به ازای دوره بازگشت معین می‌توان منحنی‌های SDF را رسم کرد.

### نتایج و بحث

واسنجی خروجی‌های مدل بزرگ‌مقیاس جوی با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از پیشگوهای منتخب مربوطه انجام گرفت. متغیرهای پیشگوی منتخب در ایستگاه آیاده شامل سرعت نصف النهاری در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (P5-v)، واگرایی در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p5-zh) و رطوبت ویژه سطحی (shum)، در ایستگاه بوانات شامل قدرت جریان هوا در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p5-f)، قدرت جریان هوا در ارتفاع ۸۵۰ میلی‌بار (p8-f) و رطوبت ویژه سطحی (shum)، در ایستگاه فسا ژئوپتانسیل در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p500)، واگرایی در ارتفاع ۸۵۰ میلی‌بار (p8-zh)، بارش (Prec) و رطوبت ویژه سطحی (shum)، در ایستگاه لامرد شامل سرعت مداری سطحی (p-u)، واگرایی در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p5-zh) و رطوبت ویژه سطحی (shum)، در ایستگاه لار شامل قدرت جریان هوا در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p5-f)، سرعت مداری در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p5-u)، بارش (Prec) و رطوبت ویژه سطحی (shum) و در ایستگاه شیراز شامل فشار سطح صفر (mslp) و ژئوپتانسیل در ارتفاع ۵۰۰ میلی‌بار (p500) هستند. انتخاب بهترین دوره واسنجی هر ایستگاه با سعی و خطا و استفاده از معیارهای  $R^2$  و SE انجام گرفت. دوره ۲۰۰۱-۱۹۸۶ و ۲۰۰۲-۲۰۱۷ به ترتیب برای واسنجی و صحت سنجی متغیر بارش ایستگاه شیراز در مدل SDSM مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بالاترین همبستگی در مرحله واسنجی و شبیه‌سازی دوره پایه در مرحله صحت سنجی مربوط به ایستگاه شیراز می‌باشد (جدول ۲ و ۳).

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل SDSM در مرحله واسنجی

Table 2- The results of the SDSM model evaluation at the calibration period

ایستگاه Station	دوره واسنجی Calibration Period	R <sup>2</sup>	SE
آباده (Abadeh)	1986-2001	0.28	0.47
بوانات (Bavanat)	1986-2010	0.32	0.36
شیراز (Shiraz)	1986-2001	0.37	0.39
فسا (Fasa)	1986-2001	0.29	0.34
لار (Lar)	1986-2003	0.31	0.35
لامرد (Lamerd)	1986-2006	0.26	0.33

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل SDSM در مرحله صحت سنجی

Table 3- The results of the SDSM model evaluation at the validation period

ایستگاه Station	دوره صحت سنجی Validation period	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	NSE
آباده (Abadeh)	2002-2017	0.87*	0.22	0.14	0.81
بوانات (Bavanat)	2011-2017	0.71*	0.21	0.16	0.87
شیراز (Shiraz)	2002-2017	0.93*	0.31	0.17	0.95
فسا (Fasa)	2002-2017	0.44**	0.60	0.43	0.70
لار (Lar)	2004-2017	0.69*	0.27	0.22	0.80
لامرد (Lamerd)	2007-2017	0.80*	0.24	0.17	0.89

آماره‌های معنی‌دار در سطح احتمال ۹۰ و ۹۵ درصد در آزمون تجزیه واریانس به ترتیب به وسیله‌ی علائم \* و \*\* نشان داده شده‌اند.

مقایسه بارش محاسباتی و مشاهداتی نشان داد که مقادیر میانگین بارش برای ایستگاه لامرد بیش برآورد، برای ایستگاه آباده، لار، شیراز و فسا کم برآورد و برای ایستگاه بوانات بدون تغییر بوده (شکل ۳). بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بارش در منطقه مطالعاتی مربوط به ایستگاه‌های لامرد و بوانات به ترتیب به مقدار ۰/۱۹ و ۰/۰۱ میلی‌متر در مقیاس روزانه می‌باشد (شکل ۳). داده‌های بارش برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 تولید می‌شوند. نتایج نشان داد که به طور میانگین در استان فارس، افزایش و کاهش بارش تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲/۸ و ۶/۵ درصد خواهد بود (شکل ۴). به طور کلی بیش‌ترین اختلاف بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه مربوط به ماه‌های سرد سال می‌باشد. کم‌ترین و بیش

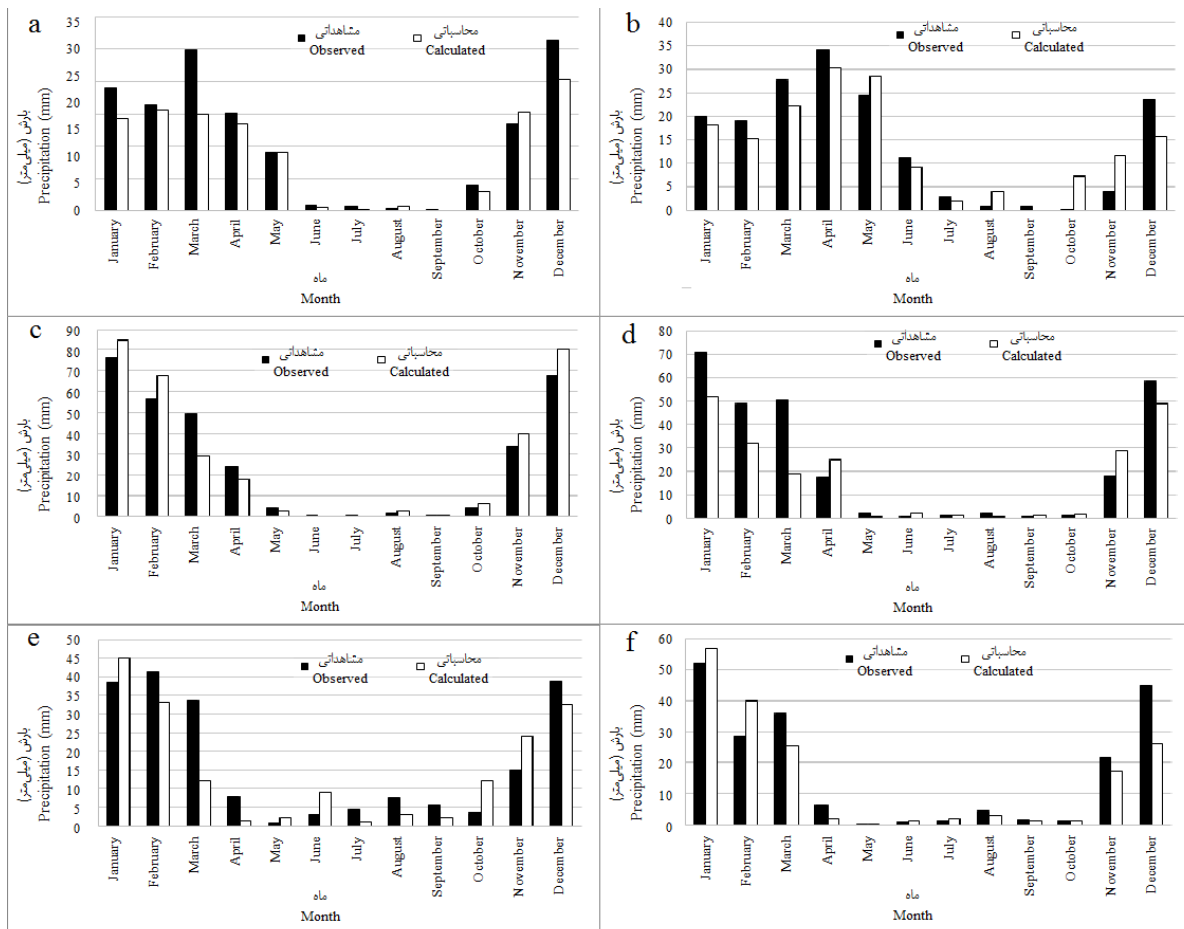
به طور کلی بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف در مقادیر محاسباتی (مقادیر پیشگویی شده بارش آتی) و مشاهداتی به ترتیب مربوط به ایستگاه لامرد و بوانات می‌باشد. مقادیر محاسباتی متغیر بارش در دوره صحت‌سنجی در ایستگاه‌های بوانات، لار و شیراز بیشتر از مقادیر مشاهداتی و در ایستگاه‌های آباده، فسا و لامرد کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد شده است (شکل ۲).

نقشه پهنه‌بندی بارش محاسباتی و مشاهداتی در دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۰ با استفاده از نرم‌افزار GIS, ver. 10.3.1<sup>۱</sup> و با روش درون‌یابی معکوس فاصله<sup>۲</sup> (IDW) برای ایستگاه‌های منتخب رسم گردید.

- 1- Geographical information system
- 2- Inverse Distance Weighted

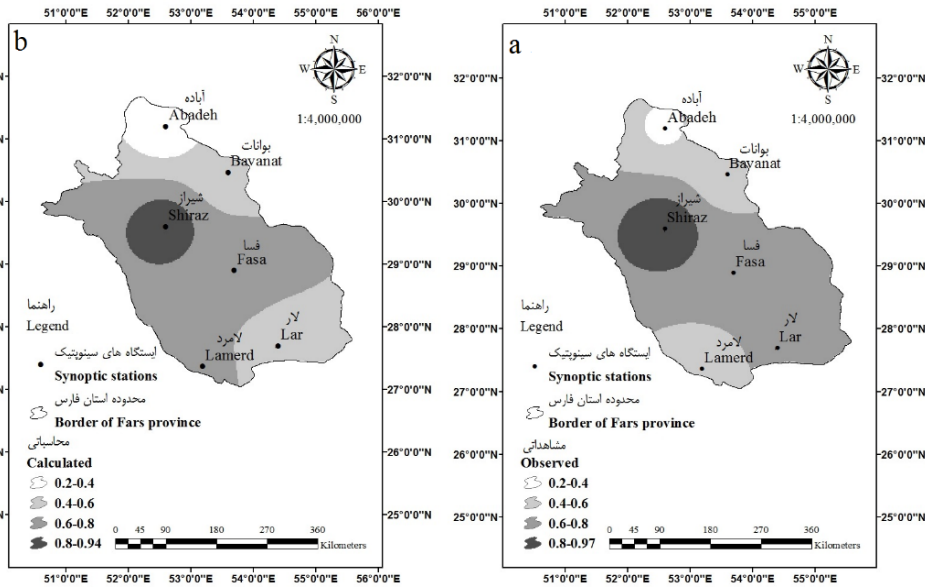
نیمه ابتدایی دوره‌های پایه و آتی رخ داده است. به طور کلی شهر شیراز در دوره تاریخی (۲۰۰۷-۲۰۱۸) و دوره آتی (۲۰۳۵-۲۰۵۰) دچار افزایش فراوانی و مدت دوره‌های خشک شده است. بیش‌ترین تداوم دوره خشک و مرطوب به ترتیب در دوره ۲۰۳۹-۲۰۴۴ مربوط به سناریو RCP4.5 و دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۷ مربوط به سناریو RCP8.5 بود. به طور میانگین برای استان فارس در دوره آتی انتظار افزایش فراوانی خشکسالی‌ها به خصوص در دوره (۲۰۳۴-۲۰۵۰) می‌رود که با افزایش مدت دوره‌های خشک همراه است. این افزایش‌ها در سناریو RCP8.5 دارای شدت به نسبت بالاتری است. البته نتایج برای بعضی از ایستگاه‌ها کمی متفاوت است به طور کلی در بازه زمانی مختلف تعداد خشکسالی‌های اتفاق افتاده بیش‌تر در دوره آتی رخ داده است که فراوانی آن در سناریو RCP8.5 بیشتر از سناریو RCP4.5 بوده (شکل‌های ۶ تا ۸).

ترین میزان متوسط بارش ماهانه در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب متعلق به ایستگاه آباده به مقدار ۱۰/۹، ۱۱ و ۹/۱ میلی‌متر و ایستگاه شیراز به مقدار ۲۶/۶، ۲۵/۹ و ۲۵/۵ میلی‌متر می‌باشد. در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5 در ایستگاه‌های بوانات، فسا و لار افزایش بارش و در ایستگاه‌های آباده، شیراز و لامرد کاهش بارش انتظار می‌رود، در حالی که در سناریو RCP8.5 در تمامی ایستگاه‌ها کاهش بارش انتظار می‌رود (شکل ۵). جهت استخراج شاخص SPI، آمار مجموع بارش ماهانه شش ایستگاه منتخب استان فارس به عنوان ورودی مدل استفاده شد. مقادیر و سری زمانی شاخص مذکور در مقیاس سه ماهه، شش ماهه، دوازده ماهه و بیست و چهار ماهه توسط برنامه نویسی R به دست آمد. بررسی مقادیر شاخص SPI به‌دست آمده برای ایستگاه شیراز نشان داد، بیش‌ترین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به ترتیب در اواخر و

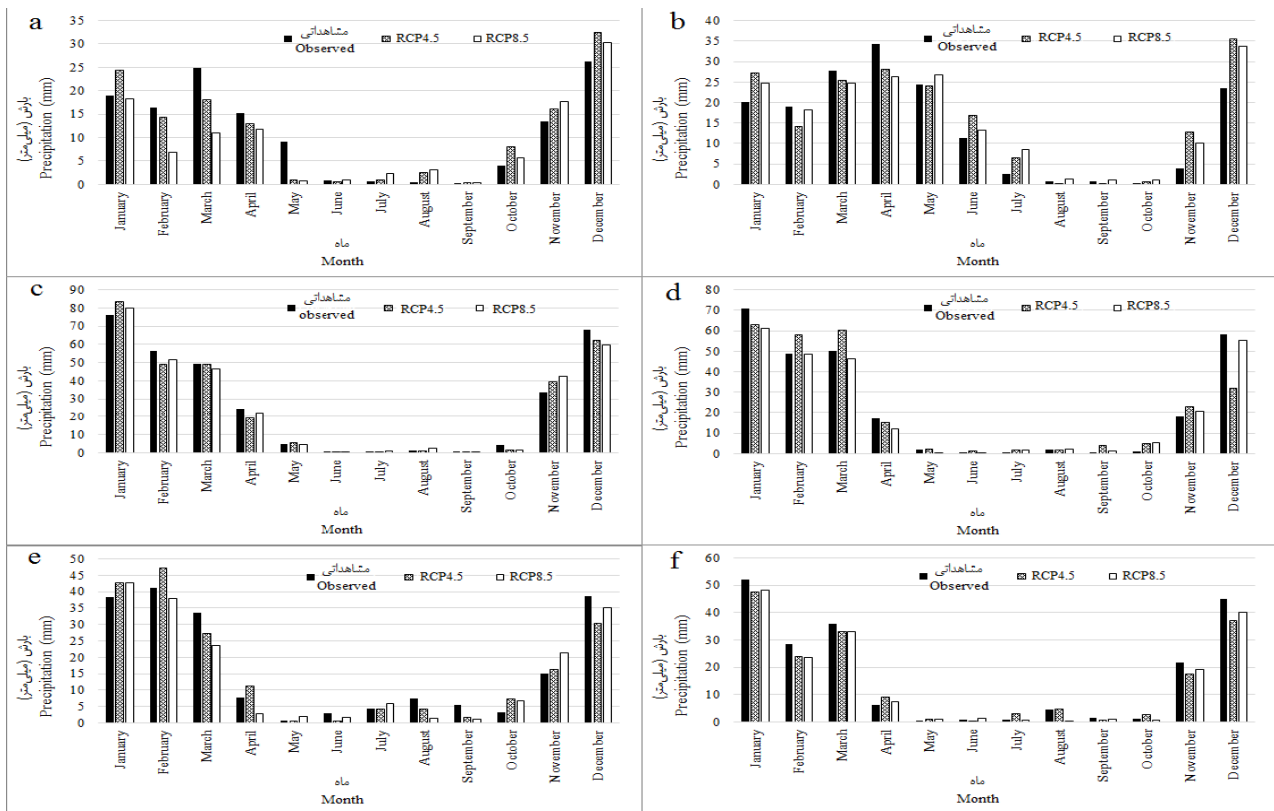


شکل ۲- مقایسه داده‌های محاسباتی و مشاهداتی میانگین بارش در دوره صحت سنجی در ایستگاه (a) آباده، (b) بوانات، (c) شیراز، (d) فسا، (e) لار و (f) لامرد

Figure 2- The comparison of observed and calculated average precipitation in the validation period at the a) Abadeh, b) Bavanat, c) Shiraz, d) Fasa, e) Lar and f) Lamerd station



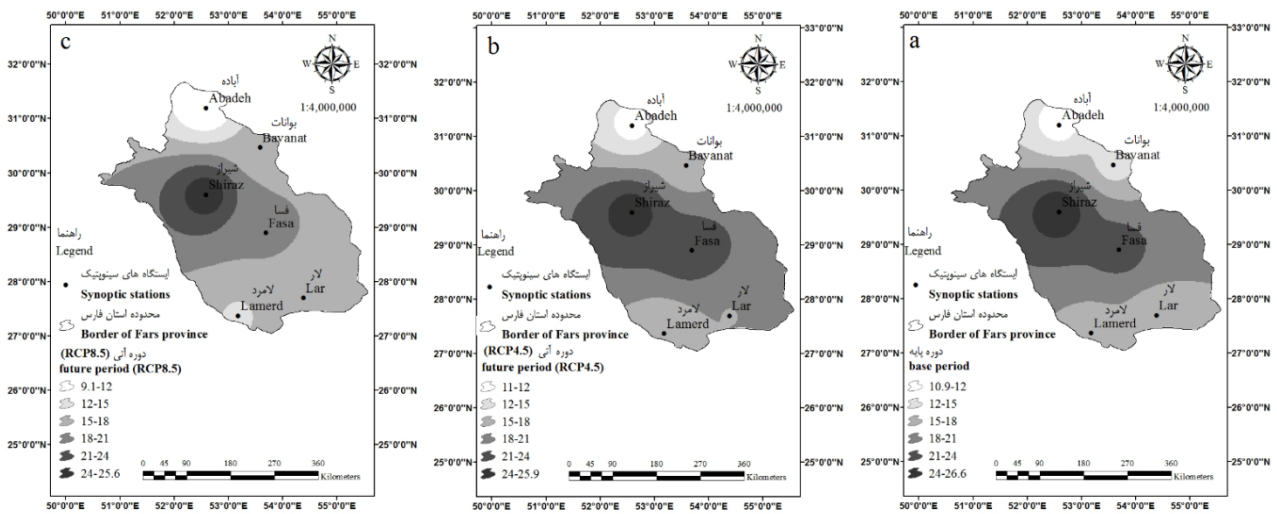
شکل ۳- پهنه‌بندی مقادیر بارش بر اساس داده‌های (a) مشاهداتی و (b) محاسباتی در استان فارس  
 Figure 3- Zoning precipitation values based on the a) observed data and b) calculated data at Fars province



شکل ۴- مقایسه میانگین ماهانه بارش در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه (a) آباده، (b) بوانات، (c) شیراز، (d) فسا، (e) لار و (f) لامرد

Figure 4- The comparison of average monthly precipitation in the base and future period under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios at the a) Abadeh, b) Bavanat, c) Shiraz, d) Fasa, e) Lar and f) Lamerd station

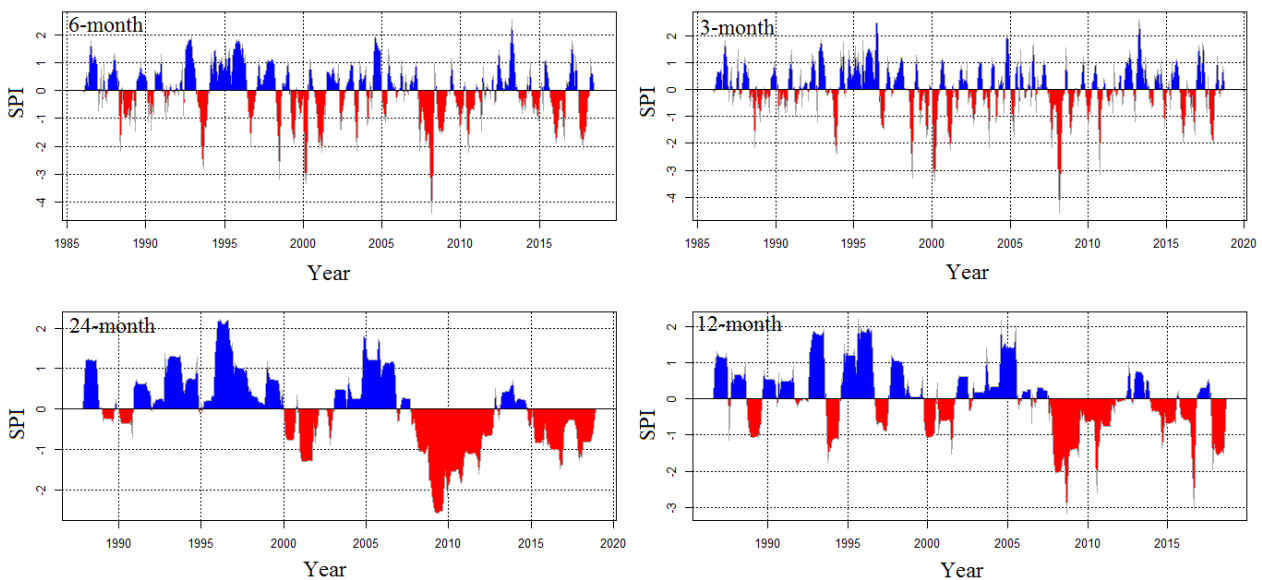




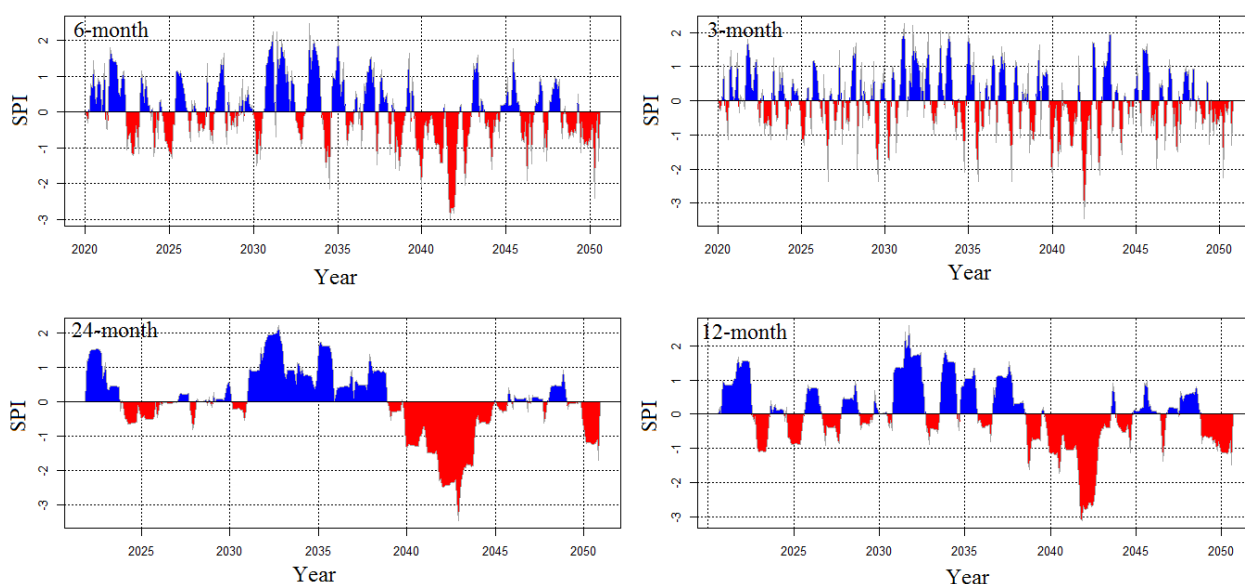
شکل ۵- پهنه‌بندی مقادیر بارش ماهانه در دوره‌های (a) پایه و آتی تحت سناریو (b) RCP4.5 و (c) RCP8.5 در ایستگاه‌های مطالعاتی  
 Figure 5- Zoning monthly precipitation in the a) base period b) future period under RCP4.5 and c) RCP8.5 scenarios at the study stations

ثابت می‌رسد (شکل ۹). به عبارت دیگر در تناووم‌های کوتاه، با تغییر مقدار سختی و مدت، دوره بازگشت تغییرات زیادی دارد و با افزایش تناووم از تغییرپذیری آن کاسته می‌شود. همچنین برای هر تناووم معین خشکسالی، به ازای طولانی‌تر شدن دوره بازگشت، مقادیر سختی افزایش می‌یابد. به طور کلی در رویدادهای کم‌تر از ۱۱ ماه دوره بازگشت‌ها برای دوره پایه و آتی ثابت است.

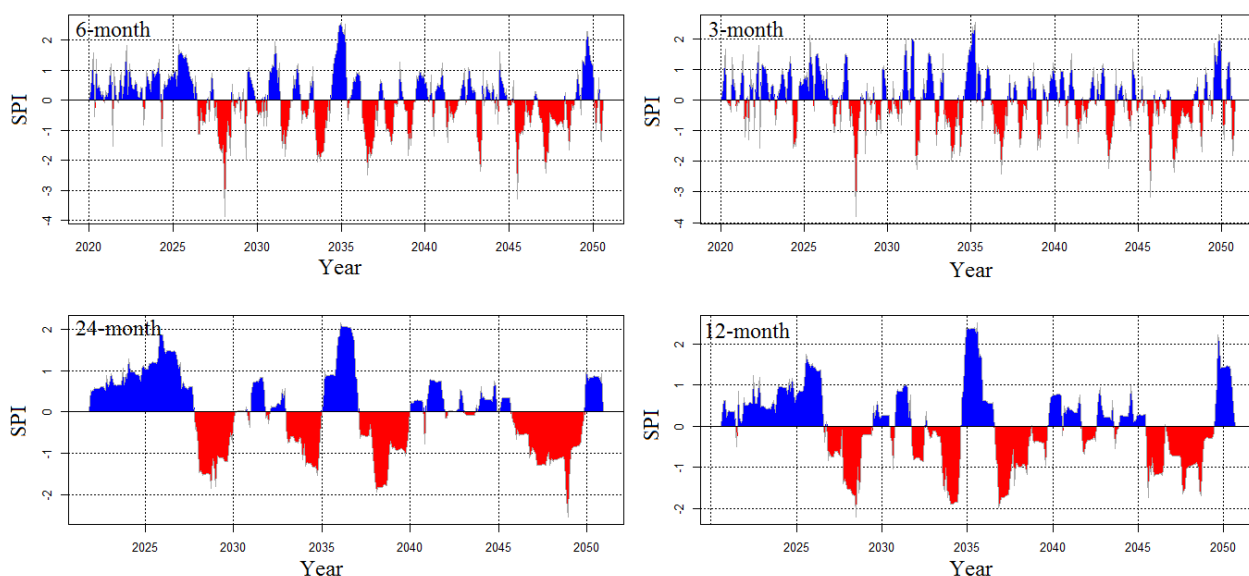
**برازش تابع کاپولا و استخراج منحنی‌های SDF**  
 منحنی‌های SDF خشکسالی بر مبنای تابع کاپولا گامبل با دوره بازگشت‌های ۱/۲۵، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از برنامه‌نویسی R رسم گردیدند. محدب بودن الگوی منحنی‌های SDF نشان‌گر افزایش سرعت سختی خشکسالی در تناووم‌های کوتاه، نسبت به تناووم‌های طولانی است، که در نهایت به یک مقدار



شکل ۶- سری زمانی SPI در دوره پایه برای ایستگاه شیراز  
 Figure 6- The SPI time series in the base period at Shiraz station



شکل ۷- سری زمانی شاخص SPI در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5 برای ایستگاه شیراز  
 Figure 7- The SPI time series in the future period under RCP4.5 scenario at Shiraz station



شکل ۸- سری زمانی شاخص SPI در دوره آتی تحت سناریو RCP8.5 برای ایستگاه شیراز  
 Figure 8- The SPI time series in the future period under RCP8.5 scenario at Shiraz station

به طور کلی انتظار می‌رود استان فارس دوره آینده در تداوم‌های کمتر از هشت ماه با افزایش سختی خشکسالی نسبت به دوره پایه مواجه شود. در تداوم‌های بالای هشت ماه در هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 میزان سختی و دوره بازگشت افزایش می‌یابد. به طور میانگین در استان فارس در یک تداوم با دوره بازگشت ۲۰ سال و مقدار سختی ۳ در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۷، ۶/۵ و ۱۲ ماه به دست آمد (شکل ۹). به طور میانگین با مقایسه نتایج حاصل برای سختی و دوره بازگشت

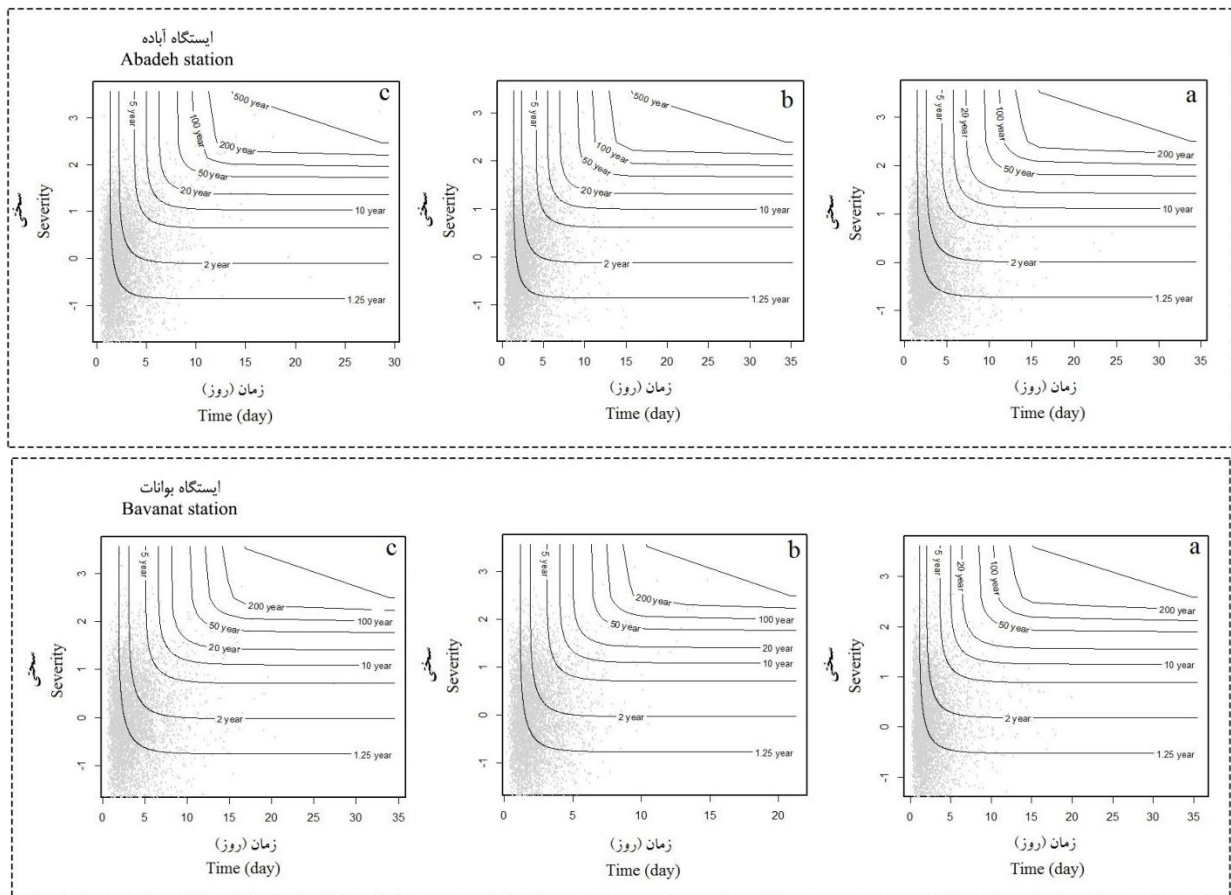
در دوره آتی برای رویدادهای کمتر از ۱۰ ماه و دوره بازگشت معین پنج سال میزان سختی خشکسالی افزایش می‌یابد که این افزایش در سناریو RCP8.5 بیش‌تر است. در حالی که در تداوم‌های بالای ۱۱ ماه سختی به مقدار ناچیزی افزایش پیدا می‌کند و در تداوم‌های بیش از ۱۵ ماه اختلاف دوره بازگشت حال و آینده تقریباً به صفر می‌رسد. در دوره بازگشت‌های ۱/۲۵ تا ۵۰ سال بالاترین میزان تغییرات سختی در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲ تا ۱۲/۵ می‌باشد (شکل ۹).

منابع آب در قرن حاضر می‌باشد. بررسی نحوه تغییر شرایط خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت می‌باشد. زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلند مدت، لازم است که چشم اندازی از وضعیت آینده بارش و دوره‌های خشکسالی و ترسالی برای منطقه ترسیم گردد. در پژوهش حاضر، کارایی توزیع آماری دو متغیره سختی و مدت خشکسالی بر مبنای توابع کاپولا مورد مطالعه قرار گرفت. مزیت استفاده از این توابع، دخالت همبستگی بین سختی و مدت و همچنین امکان استفاده از توابع توزیع حاشیه‌ای متفاوت می‌باشد. مقایسه دوره خشک استخراج شده شاخص SPI برای دوره‌های پایه و آتی نشان داد که به طور کلی در اثر نوسانات اقلیمی انتظار می‌رود که تعداد دوره‌های خشک افزایش یابد.

خشکسالی مشخص گردید که این دو ویژگی خشکسالی در سناریو RCP8.5 به ترتیب بیشترین مقدار افزایش و کاهش را نسبت به دوره پایه داشته است. در حالی که در سناریو RCP4.5 در برخی از ایستگاه‌ها کاهش سختی و افزایش دوره‌بازگشت نسبت به دوره پایه و در مابقی ایستگاه‌ها نتایج مشابه سناریو RCP8.5 به دست آمد، با این تفاوت که شدت تغییرات این دو ویژگی در اکثر ایستگاه‌ها از سناریو RCP4.5 بیشتر بوده. زیرا در سناریو RCP8.5 میزان واداشت تابشی در انتهای قرن بیست و یکم به ۸/۵ وات بر متر مربع می‌رسد و بیشترین رشد جمعیت و استفاده از انرژی در این سناریو لحاظ شده است.

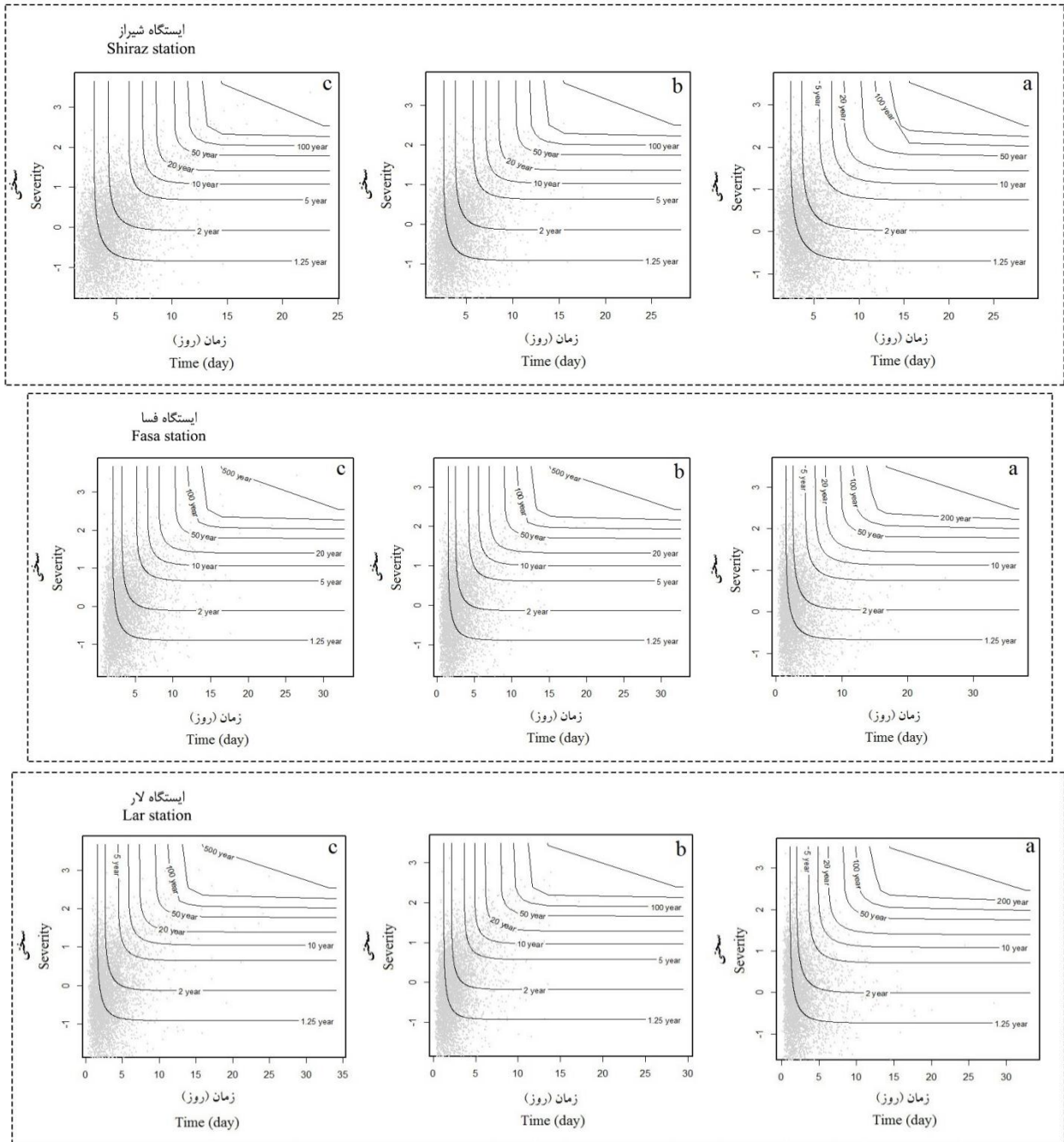
### نتیجه‌گیری

پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن، یکی از چالش‌های مهم مدیریت

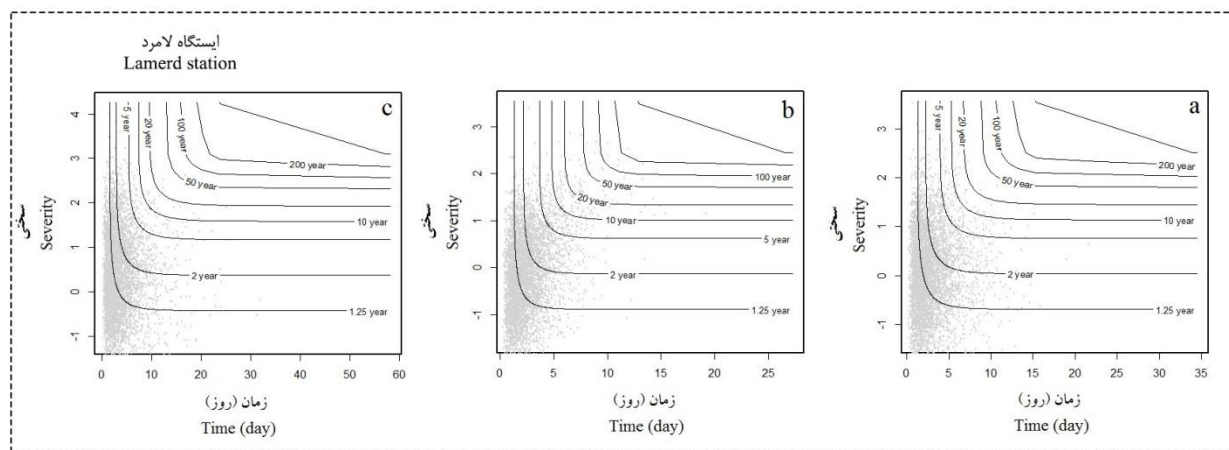


شکل ۹- منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی (SDF) خشکسالی در دوره‌های (a) پایه و آتی تحت سناریو (b) RCP4.5 و (c) RCP8.5 در ایستگاه‌های مطالعاتی

Figure 9- Severity-Duration-Frequency drought curves in the a) base period b) future period under RCP4.5 and c) RCP8.5 scenarios at the study stations



ادامه شکل ۹  
Figure 9- Continued



ادامه شکل ۹

Figure 9- Continued

مدل‌سازی این متغیر را در دوره‌های گذشته و آینده در سطح معنی دار ۹۰ و ۹۵ درصد برای استان فارس دارا می‌باشد. انتظار می‌رود که در صورت در نظر گرفتن اصلاحات موجود در گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم بتوان به دقت بیشتری در مدل‌سازی بارش دست یافت. لذا پیشنهاد می‌شود تا با در دسترس بودن نتایج حاصل از گزارش ششم استخراج منحنی‌های SDF مورد بازبینی قرار گیرد.

متغیر بارش منطقه عموماً در دوره آینده تحت سناریو سناریو RCP8.5 کاهش می‌یابد. همچنین نتایج مربوط به رسم منحنی‌های SDF نشان داد که مقادیر سختی و دوره بازگشت خشکسالی به ترتیب بیش‌ترین مقدار افزایش و کاهش را در سناریو RCP8.5 داشته است. به طور کلی معیارهای ارزیابی، مقادیر ضریب تبیین بر اساس درجه آزادی مورد استفاده بارش نشان داد که مدل SDSM توانایی

## منابع

- 1- Abbasian M.S., and Moosavi S. 2013. Joint analysis of peak discharge and runoff volume using Copula Functions. 7th National Congress on Civil Engineering Sistan and Baluchestan University, 8p. (In Persian)
- 2- Arora V.K., Scinocca J.F., Boer G.J., Christian J.R., Denman K.L., Flato G.M., Khari V.V., Lee W.G., and Merryfield W.J. 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters* 38(5): 1-6.
- 3- Azam M., Maeng S.J., Kim H.S., and Murtazaev A. 2018. Copula-Based Stochastic Simulation for Regional Drought Risk Assessment in South Korea. *Water* 10: 359-388.
- 4- Azizabadi M., Bakhtiari B., Qaderi K., and Rezapour M. 2016. The survey of climate change impact on drought severity-duration-frequency curves using Copulas 47(4): 743-754.
- 5- Castellvi F., Mormeneo I., and Perez P.J. 2004. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. *Journal of Hydrology* 289: 286-302.
- 6- Chung C.H., and Salas J.D. 2000. Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 5(3): 259-268.
- 7- Chebana F., and Ouarda T.B.M.J. 2009. Index flood-based multivariate regional frequency analysis. *Water Resources Research* 45(10): 1-15.
- 8- Chen L., Singh V.P., Guo S., Hao Z., and Li T. 2012. Flood coincidence risk analysis using multivariate Copula functions. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(6): 742-755.
- 9- De Michele C., and Salvadori G. 2003. A Generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting 2-copulas. *Journal of Geophysical Research* 108(D2): 40-67.
- 10- De Michele C., Salvadori G., Canossi M., Petaccia A., and Rosso R. 2005. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *Journal of Hydrologic Engineering* 10(1): 50-57.
- 11- Edwards D.C., and McKee T.B. 1997. 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, 155.
- 12- Farrokhnia A., and Morid S. 2008. Analysis of drought severity and duration using Copula functions. 4th National Congress on Civil Engineering, 6-8 May. (In Persian with English abstract)
- 13- Favre A.C., El Adlouni S., Perreault L., Thie'monge N., and Bobe'e B. 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using Copulas. *Water Resources Research* 40: 1-12.

- 14- Genest C., Favre A.C., Beliveau J., and Jacques C. 2007. Metaelliptical Copulas and their use in frequency analysis of multivariate hydrological data. *Water Resources Research* 43(9): 1-12.
- 15- Halwatura D, Lechner A.M., and Arnold S. 2015. Drought severity-duration-frequency curves: a foundation for risk assessment and planning tool for ecosystem establishment in post-mining landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(2): 1069-1091.
- 16- 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.
- 17- IPCC. 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team R K Pachauri and L A Meyer (eds.)] IPCC Geneva Switzerland, 151.
- 18- Kao S.C., and Govindaraju R.S. 2008. Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via the Plackett family of Copulas. *Water Resources Research* 44(2): 1-11.
- 19- Kao S.C., Govindaraju R.S., and Niyogi D. 2009. A spatio-temporal drought analysis for the midwestern US. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 World Environmental and Water Resources Congress 2009 Great Rivers* 342: 4654-4663.
- 20- Khalili A. 1997. Integrated water plan of Iran. *Meteorological studies Ministry of power Iran*.
- 21- Liu C.L., Zhang Q., Singh V.P., and Cui Y. 2011. Copula-based evaluations of drought variations in Guangdong South China. *Natural Hazards* 59(3): 1533-1546.
- 22- Ma M.W., Song S.b., Ren L.L., Jiang S.H., and Song J.L. 2012. Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t Copulas. *Hydrological Processes* 27(8): 1175-1190.
- 23- Mackee B., Nolan T., Dooesken J., and Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple timescales 9th Conference on Applied Climatology 15-20. January Boston Massachusetts:223-236 drought indices for drought assessment and monitoring in Greece 8th International Conference on Environmental Science and Technology Lemons Island, 8-10 September:484-491.
- 24- Mishra A., and Singh V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391: 202-216.
- 25- Mirabbasi R., Fakhri-Fard A., and Dinpashoh Y. 2012. Bivariate Drought Frequency Analysis Using the Copula Method. *Theoretical and Applied Climatology* 108(1-2): 191-206.
- 26- Mirakbari M., Ganji A., and Fallah S.R. 2010. Regional Bivariate Frequency Analysis of Meteorological Droughts. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(12): 985-1000.
- 27- Nelsen R.B. 2007. *An introduction to Copulas* (2thed.). New York Springer.
- 28- Palmer W.C. 1965. Meteorological drought. *USWB, Res* 45.
- 29- Pirnia A., Golshan M., Bigonah S., and Solaimani K. 2018. Investing the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan Dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. *EcoHydrology* 5(1): 215-228.
- 30- Reddy M.J., and Ganguli P. 2011. Application of Copulas for derivation of drought severity-duration- frequency curves. *Hydrological Processes* 26(11): 1672-1685.
- 31- Salas J.D., Fu C., Cancelliere A., Dustin D., Bode D., Pineda A., and Vincent E. 2005. Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE* 131(5): 383-393.
- 32- Serinaldi F., Bonaccorso B., Cancelliere A., and Grimaldi S. 2009. Probabilistic characterization of drought properties through Copulas. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth* 34: 596-605.
- 33- Shiau J.T. 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional Copulas. *Water Resources Management* 20: 795-815.
- 34- Shiau J.T., and Modarres R. 2009. Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran. *Meteorological Applications* 16(4): 481-489.
- 35- Sklar A. 1959. Distribution functions of n Dimensions and Margins. *Publications of the Institute of Statistics of the University of Paris* 8: 229-231. (In French)
- 36- Wilby R.L., Dawson C.W., and Barrow E.M. 2002. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental and Modelling Software* 17: 145-157.
- 37- Wilby R.L., Dawson C.W., Murphy C., Connor P.O., and Hawkin E.h. 2014. tati tical own calling Mo l – ci ion ntric (SDSMDC) conceptual basis and applications. *Climate Research* 61(3): 251-268.
- 38- Wong G., Van Lanen H.A.J., and Torfs P.J.J.F. 2013. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrological Sciences Journal* 58(2): 253-270.
- 39- Wu H., Hayes M.J., Weiss A., and Hu Q. 2001. An Evaluation of the standardized precipitation index the china-z index and the statistical z-score. *International Journal of Climatology* 21:745-758.
- 40- Yan B., Guo S., Xiao Y., and Fang B. 2007. Analysis on Drought Characteristics Based on Bivariate Joint Distribution. *Arid Zone Research* 24(4): 537-542. (In Chinese)
- 41- Yusof F., Hui-Mean F., Suhaila J., and Yusof Z. 2013. Characterization of Drought Properties with Bivariate Copula Analysis. *Water Resources Management* 27(12): 4183-4207.

- 42- Zhang L., and Singh V.P. 2007. Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean Copulas. *Journal of Hydrology* 332:93-109.
- 43- Zhang Q., Li J., Singh V.P., and Xu C.Y. 2012. Copula-based spatiotemporal patterns of precipitation extremes in China. *International Journal of Climatology* 35(5): 1140-1152.
- 44- Zhang Q., Xiao M., Singh V.P., and Chen X. 2013. Copula-based risk evaluation of droughts across the Pearl River basin China. *Theoretical and Applied Climatology* 111(1-2): 119-131.
- 45- Zhang J., Ding Z., and You J. 2014. The joint probability distribution of runoff and sediment and its change characteristics with multi-time scales. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62(3): 218-225.

## Meteorological Drought Characteristics Analysis under Climate Change Effect Using Copula in Fars Province

S.M. Farmanara<sup>1</sup>- B. Bakhtiari<sup>2\*</sup>- N. Sayari<sup>3</sup>

Received: 24-07-2019

Accepted: 01-07-2020

**Introduction:** Drought is an extreme climate effect and a creeping phenomenon which directly affects the human life. A drought analysis usually requires characterizing drought severity, duration and frequency (SDF). These characteristic variables are commonly not independent, so this phenomenon is a complex natural disaster and climate change makes it likely to become more frequent and immense in many areas across the world. Therefore, in drought analysis, it is needed to investigate its multivariate nature and spatial variability clearly. Copula, as a model of multivariate distribution, has been used widely in hydrological studies. As the standardized precipitation index (SPI) is more accessible than other indices, it is the most commonly used indicators for analyzing the SDF of meteorological drought. Here, the study has two major focuses: 1) Fitting drought characteristics from SPI to appropriate copulas, then using fitted copulas to estimate conditional drought severity distribution and joint return periods for both historical and future time periods in Fars province. 2) Inquiring the effects of climate change on the frequency and severity of meteorological drought.

**Materials and Methods:** Among the weather stations of Fars province, six synoptic stations were selected, which had longer historical data than others. The data used included 24-hour precipitation during 15 (2004-2018) to 33 (1986-2018) years. Three steps were carried out. Stage one: downscaling of outputs of the large scaling (CanESM2) based on two intermediate (RCP4.5) and pessimistic (RCP8.5) scenarios using SDSM, ver. 4.2.9 during the period of 2020 to 2050. Stage two: calculation of SPI and drought characteristics in the base and future periods (2050-2020). Stage three: extracting SDF curves for the base and future periods under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios using copula. The SPI was used to extract the drought duration and drought severity in the Fars province using GCM models under two selected scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) from the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) scenarios. The gamble copula function was used to construct the joint distribution function for evaluating the drought return periods in the study area. Because short-term drought prediction is more practical than long-term prediction, we used the 1-month SPI for the copulas-based analysis. Drought severity and duration were calculated based on computed SPI values by using the past available data. Drought duration is defined as successive months with SPI value less than -1 and drought severity as the accumulative SPI value during the period with successive SPI value less than -1. The normal and log-normal functions were selected as the candidate distribution function for drought duration and drought severity.

**Results and Discussion:** The results showed that the frequency of drought occurrence in the Fars province will increase during the period of 2020-2050 under the both two scenarios. In the RCP8.5 scenario, the duration of the drought will also increase. The increase and decrease of monthly rainfall in RCP 4.5 and RCP 8.5 were 2.8 and 6.5%, respectively. The duration of the drought were obtained to be 5.25, 5.5 and 6 days at Shiraz station, with a 2 and 5 years return period, in the baseline and future periods under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively. These values were estimated to be 4, 3.5 and 5 days at Bavanat Station. It is expected that the precipitation will decrease at Shiraz station under the two scenarios. Similarly, this amount is expected to increase and decrease at Bavanet station in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively.

**Conclusion:** Changing droughts based on climate change is important in many aspects. In this study, the performance of two-variable statistical distribution of severity and duration of drought was investigated based on the copula function. The comparison of the drought period calculated using the SPI showed that due to the climate change, the frequency of drought periods is expected to increase in the base and future periods. The results showed that the value of the precipitation changes in the RCP8.5 scenario is higher than the RCP4.5

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated, Associate Professor and Assistant Professor Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: drbakhtiari@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.81899



scenario. Generally, the performance criteria showed that the SDSM had a good performance for the past and the future periods in Fars province for precipitation data. It is expected that with consideration of the amendments in the sixth report of the IPCC, more precision can be obtained in precipitation modeling. Therefore, reviewing the output of the SDF curves with the availability of the results of this report is suggested.

**Keywords:** Drought period, SDSM, Severity–duration–frequency curve, Standardized Precipitation Index