

Bivariate Analysis of the Impact of Climate Change on Drought with SPEI Index and Copula Functions (Case Study: Dugonbadan)

M.R. Goodarzi^{1*}, A. Fatehifar², and F. Avazpoor³

Abstract

Droughts affected by climate change are among the most devastating weather events, causing significant damage both in natural resources and in human life. In this study, in order to investigate the effect of climate change on drought, both precipitation and temperature future period (2030-2050) were calculated with CanESM2 model under RCP8.5 scenario in the Dugonbadan station in Gachsaran city. Then, drought was evaluated with Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) during the base (1985-2005) and future periods in different time series. Finally, severity and duration variables of drought were analyzed for the calculation of joint probability and return period with the multivariate copula function. The results show that monthly temperature under RCP8.5 scenario has increased by 2.2°C and precipitation has been reduced by 5.5%. Drought evaluation results show that the number of dry and wet periods is reduced by increasing the length of the scale, but the longest period increases. Also, the number of drought periods relative to the base period have increased under the RCP8.5 scenario. The Frank function was selected as the best fitted function with the mean values of the three fitting indicators, RMSE (0.38), NSE (0.9) and AIC (-101.9). The results of analysis of joint return period of a drought event with a severity of 10 and duration of 10 months for the base period and RCP8.5, respectively, were 5 and 4 years, that indicate a decrease in the return period of severe drought and their increase in future under RCP8.5 scenario relative to the base period.

Keywords: Climate Change, Drought, Joint Probability, Return Period, Severity-Duration.

Received: June 24, 2019

Accepted: December 5, 2019

بررسی دو متغیره تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی با شاخص SPEI و توابع مفصل (مطالعه موردی: دوگنبدان)

محمد رضا گودرزی^{۱*}، آتیه فاتحی فر^۲ و فاطمه عوض پور^۳

چکیده

خشکسالی‌های متأثر از تغییر اقلیم از جمله مخرب‌ترین رویدادهای آب و هوایی هستند که باعث خسارت‌های قابل توجهی هم در بخش منابع طبیعی و هم در زندگی انسان‌ها می‌شوند. در تحقیق حاضر بمنظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی، بارش و دمای آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۰) ایستگاه دوگنبدان شهرستان گچساران، با مدل CanESM2 تحت سناریو RCP8.5 محاسبه شد. سپس با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) و آتی در سری‌های زمانی مختلف خشکسالی ارزیابی شد. در نهایت متغیرهای شدت و مدت خشکسالی برای محاسبه احتمال و دوره بازگشت توأم، با تابع چند متغیره کاپولا تحلیل شد. نتایج نشان داد متغیرهای دمای ماهانه تحت سناریو RCP8.5 ۲/۲ درجه سانتیگراد افزایش و بارش ۵/۵ درصد کاهش یافته است. نتایج ارزیابی خشکسالی نشان می‌دهد تعداد دوره‌های خشک و مرطوب با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد. همچنین تعداد دوره‌های خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. تابع فرانک با مقادیر متوسط سه شاخص ارزیابی نیکویی برازش RMSE (۰/۳۸)، NSE (۰/۹) و AIC (-۱۰۱/۹) به عنوان بهترین تابع برازش داده شده در هر دو دوره انتخاب گردید. نتایج تحلیل توأم دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۱۰ و مدت ۱۰ ماهه برای دوره پایه و RCP8.5 برترتیب ۵ و ۴ سال می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید و افزایش آن‌ها در آینده تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه است.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، خشکسالی، احتمال وقوع توأم، دوره بازگشت، سختی - مدت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۱۴

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Iran. Email: Goodarzimr@yazd.ac.ir

2- M.Sc. Graduate of Water and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Iran.

3- Ph.D. Student of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، ایران.

۳- دانشجوی دکتری آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

توجه قرار گرفته‌اند. به طور کلی می‌توان گفت سه مشخصه شدت، مدت و فراوانی وقوع از مشخصه‌های اصلی هر پدیده خشکسالی می‌باشند. مطالعات مختلفی در مقیاس‌های جهانی، قاره‌ای یا منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی در ارتباط با تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای مقایسه شرایط اقلیم کنونی و داده‌های حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم انجام شده است که به چند مورد از آنها اشاره می‌گردد. (Burke et al. 2006) تغییرات شاخص خشکسالی PDSI را بر مبنای مدل HadCM3 و سناریوی A2 در قرن 21 شبیه‌سازی نمودند. بر اساس نتایج آنها مساحت مناطق با خشکسالی شدید از ۱۰ درصد در آغاز قرن ۲۱ به ۴۰ درصد در پایان آن افزایش خواهد یافت. همچنین فراوانی وقایع خشکسالی شدید به دو برابر در انتهای قرن افزایش می‌یابد. همچنین میانگین دوره‌ها تا ۵ برابر افزایش می‌یابد. (Blekinsop and Fowle 2007) برای ارزیابی تغییرات مشخصات خشکسالی (فراوانی، شدت و مدت) در جزایر بریتانیا از 6 مدل اقلیم منطقه‌ای (RCM) استفاده نمودند. آنها گزارش کردند که خشکسالی‌های کوتاه مدت تابستانه، افزایش و شدت خشکسالی‌های بلندمدت کاهش می‌یابد. (Vidal and Wade 2009) خشکسالی را در بریتانیا با استفاده از شاخص بارش استاندارد تحت تأثیر تغییر اقلیم و تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 بررسی کردند. آنها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که در آینده تعداد خشکسالی‌های بسیار شدید با تداوم کم، افزایش یافته و در مقابل تعداد خشکسالی‌های بلند مدت، کاهش می‌یابد. (AghaKouchak et al. 2014) با استفاده از این مفهوم ریسک رخداد خشکسالی و افزایش گرم بر لیترای زمین را به طور همزمان در کالیفرنیا محاسبه کرده‌اند. (Ekanayake and Perera 2014) برای پیدا کردن بهترین تابع مفصل، از آزمودن و مقایسه پنج تابع مفصل استفاده کردند. نتایج نشان داد که تابع مفصل فرانک به عنوان بهترین تابع مفصل از روش کرامر-ون میس و معیارهای BIC و AIC بدست آمد. (Sadegh et al. 2017) با استفاده از جعبه‌ابزار چندمتغیره کاپولا (MvCAT) و ترکیب عدم قطعیت در یک چهارچوب بیزی با ۲۶ نوع از توابع کاپولا پارامترهای چند متغیره هیدرولوژی (خشکسالی، سیل) را تحلیل و بررسی کردند. (Philip et al. 2017) اثر تغییر اقلیم را بر خشکسالی هیدرواقلمی در سراسر حوضه آبخیز ولتا در غرب آفریقا بررسی کردند و نشان دادند وسعت خشکسالی‌ها در آینده بین ۲۴ تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. (Ayantobo et al. 2018) نیز از چندین تابع پرکاربرد مفصل برای استخراج مدل‌های منطقه‌ای و مکانی ارزیابی ریسک خشکسالی در نواحی اصلی سرزمینی چین طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۳ استفاده کردند. همچنین (Sun et al. 2019) در فلات لس چین تغییرات خشکسالی در اثر تغییرات اقلیمی با ریزمقیاس‌سازی دو مدل اقلیمی منطقه‌ای تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 بررسی کردند. به این

پدیده تغییر اقلیم که یکی از دلایل وقوع آن افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد، تأثیر بسزایی بر پدیده‌های حدی همچون سیل و خشکسالی دارد (Van Pelt and Swart, 2011). لذا بررسی پدیده‌های حدی جهت مقابله، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خشکسالی به عنوان پدیده‌ای طبیعی و اجتناب‌ناپذیر، در مناطق مختلف اقلیمی، به ویژه مناطق خشک به فراوانی رخ می‌دهد. خشکسالی‌ها گرچه زیان‌های اقتصادی، خسارات محیطی و اجتماعی زیادی را باعث می‌شوند، نسبت به سایر پدیده‌های هواشناسی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ زیرا تعریف، تعیین و ارزیابی آن‌ها مشکل است. با توجه به اینکه میزان درجه حرارت در مدت ۱۰۰ سال اخیر حدود ۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته (Jones et al., 2012) و مدل‌های تغییر اقلیم گواه بر این حقیقت است، لذا تأثیر دما بر افزایش خشکسالی قابل انکار نیست. بر اساس نتایج Sheffield and Wood (2008) انتظار می‌رود در نتیجه افزایش مقدار تبخیر و تعرق، تقاضای آب نیز افزایش یابد که خود می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر وضعیت‌های خشکسالی تأثیرگذار باشد. بنابراین استفاده از شاخصی که اثر میزان بارش و تبخیر و تعرق بیلان آب را توأم در نظر بگیرد در بررسی‌های خشکسالی بسیار مفید خواهد بود. شاخص SPEI شاخص جدیدی است که توانایی محاسبه شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را دارد و همچنین می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشکسالی لحاظ نماید و برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دوره‌های فعلی و آتی بر مبنای سناریوهای اقلیمی بکار رود.

همچنین، با توجه به وقوع تصادفی خشکسالی، مطالعه رفتار آن مستلزم استفاده از روش‌های آماری می‌باشد. در اکثر این تحقیقات به تحلیل یک متغیره رفتار خشکسالی پرداخته شده که بدین ترتیب تأثیر همزمان متغیر یا متغیرهای همبسته دیگر در نظر گرفته نشده است، حال آنکه شناخت کامل رفتار پدیده‌های همچون خشکسالی تنها با در نظر گرفتن یک ویژگی آن میسر نمی‌باشد و در این حالت مطالعه چند متغیری راهکار بهتری به شمار می‌رود. توابع توزیع چند متغیره جدیدتری به نام توابع مفصل^۱ که محدودیت‌های توابع توزیع چند متغیره کلاسیک را نیز ندارند، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. مهم‌ترین ویژگی توابع مفصل این است که در استفاده از آنها الزامی در یکسان بودن توزیع حاشیه‌ای وجود ندارد (Mousavi Nadoushani et al., 2018). توابع مفصل امکان ترکیب چند توزیع یک متغیره از خانواده‌های متفاوت را برای ساخت یک توزیع چند متغیره با در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرها به وجود می‌آورد. این توابع ابتدا توسط Sklar (1959) معرفی گردیده و در سالیان اخیر در زمینه‌هایی چون اقتصاد و هیدرولوژی مورد

پژوهش‌های (Norozi et al. (2018) در بررسی تغییر اقلیم بر خشکسالی و (Saeidipour et al. (2019) در بررسی خشکسالی با شاخص SPEI نیز اشاره کرد.

افزایش خشکسالی‌های اخیر در این منطقه باعث کمبود آب و خسارت در بخش کشاورزی شده است و از آنجا که بخش عمده کشاورزی استان مربوط به این منطقه می‌باشد، بررسی اثر تغییر اقلیم و تحلیل فراوانی خشکسالی این منطقه از اهمیت زیادی برخوردار است. در راستای این هدف، در این تحقیق در ابتدا به شبیه‌سازی مقادیر بارش و دما در ایستگاه دوگنبدان با استفاده از مدل اقلیمی CanESM2 بر مبنای بدبینانه‌ترین سناریو جدید RCP8.5 برای دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۰) پرداخته شد. سپس با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و با استفاده از شاخص SPEI پایش و تجزیه و تحلیل مشخصات خشکسالی برای دهه‌های پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) و آتی صورت گرفت. در نهایت با استفاده از سه تابع مفصل از خانواده ارشمیدوسی احتمال و دوره بازگشت توام متغیرهای شدت و مدت خشکسالی در منطقه مورد نظر بررسی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهرستان گچساران در استان کهگیلویه و بویر احمد در منطقه گرمسیر قشلاقی قرار گرفته است که با توجه به شرایط آب و هوایی و میزان بارش در این منطقه و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، دارای دو نوع آب و هوای معتدل- خشک (Cs) در نیمه شرقی و گرمسیری- خشک (Bs) در نیمه غربی می‌باشد. منطقه دوگنبدان دارای مراتع، جنگل‌ها و زمین‌های وسیع کشاورزی می‌باشد و به همین دلیل توجه به مسائل مدیریتی آب در این بخش از استان بسیار حائز اهمیت است. ایستگاه دوگنبدان واقع در شهرستان گچساران دارای طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۷۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه ۳۶ دقیقه شمالی می‌باشد و ۷۵۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. میانگین حداقل دما در این منطقه ۳ الی ۴ درجه زیر صفر در ماه‌های دی و بهمن و حداکثر آن تا ۵۰ درجه سلسیوس در ماه‌های تیر و مرداد می‌باشد. متوسط میزان باران سالیانه ۴۳۲/۵ میلی متر بوده که بین ۱۷۰/۵ تا حدود ۸۰۰ میلی‌متر در سال‌های مختلف در نوسان می‌باشد. شکل ۱ موقعیت منطقه را نشان می‌دهد.

۲-۲- مدل اقلیمی و سناریوهای انتشار RCP

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی وجود دارد که یکی از معتبرترین آن‌ها، استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو یا GCM^۲ هست.

منظور از شاخص SPI و روزهای داغ (TX90p) که دما از حد آستانه تجاوز می‌کند را برای تحلیل ریسک توأمان با استفاده از توابع مفصل ارزیابی کردند. نتایج نشان داد دما و بارش در هر دو سناریو در حوضه طی دوره ۲۰۹۵-۲۰۳۶ افزایش می‌یابد. همچنین، دوره بازگشت توام در بعضی ایستگاه‌ها با شدت و مدت طولانی‌تری در هر دو سناریو دیده شده و در برخی ایستگاه‌ها در جنوب غرب و مرکزی با دوره بازگشت کمتر از ۱۰ سال خشکسالی‌های مکرر و حداکثری را تجربه می‌کنند. در داخل کشور نیز مطالعات زیادی در این زمینه و در مناطق مختلف انجام گرفته است. (Abdul Hosseini et al. (2010) در زیر حوضه قره‌سوی استان گلستان و با استفاده از داده‌های بلندمدت ایستگاه سینوپتیک گرگان، ابتدا تغییرات دما و بارش را با کاربرد مدل Hadcm3 و با استفاده از سناریوی A2 را بررسی کرده و سپس خصوصیات خشکسالی را با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI و شاخص شناسایی خشکسالی RDI برآورد و مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده افزایش متوسط بارندگی دوره آتی در همه ماه‌ها بود. (Golmohammadi and Massah Bavani (2011) مطالعه حوضه قره سو نشان دادند طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ تحت مدل Hadcm3-A2 شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) کاهش می‌یابد. (Azizabadi et al. (2016) اثرات تغییر اقلیم بر منحنی‌های SDF با رویکرد تابع مفصل در حوزه آبریز قره‌سو واقع در استان گلستان در دوره ۲۰۴۸-۲۰۱۹ با مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت سه سناریو RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM ارزیابی کردند. نتایج نشان داد دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی در سناریو RCP2.6,4.5 افزایش و RCP8.5 کاهش یافته است. (Kaboosi and Kordjazi (2017) تغییرات دمای کمینه و بیشینه، بارش و شدت خشکسالی (شاخص SPI) استان گلستان طی دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۶ نسبت به دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۶ را با خروجی مدل‌های HadCM3 و ECHO-G تحت سناریو A2 توسط مدل LARS-WG در ۱۵ ایستگاه هواشناسی بررسی کردند. مطابق پیش‌بینی مدل‌های ECHO-G و HadCM3، میانگین سالانه دمای کمینه به ترتیب ۰/۵ و ۱/۶ و دمای بیشینه به ترتیب ۰/۲ و ۰/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. بارش سالانه نیز به ترتیب افزایش و کاهش را نشان داد. هر دو مدل کاهش درصد وقوع دوره‌های خشک و مرطوب و افزایش وقوع دوره نرمال را در مقیاس ماهانه و افزایش درصد وقوع دوره‌های خشک و مرطوب و کاهش دوره نرمال را در دوره آتی پیش‌بینی کردند. (Mousavi Nadoushani et al. (2018) نیز فراوانی دومتغیره رویدادهای خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در حوضه آبریز قره‌سو- گرگانرود به وسیله توابع مفصل بر مبنای متغیر شدت و تداوم تحلیل کردند. در ادامه می‌توان به



Fig. 1- Geographical location of the case study
 شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (دریافتی از آب منطقه‌ای استان)

درون مدلی، در محاسبات و تقویت میزان تغییرات اقلیمی موجود، با در دست داشتن شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های گذشته توسط مدل‌های GCM، می‌توان با محاسبه تغییرات متغیر اقلیمی مورد نظر در دوره‌های آتی نسبت به دوره گذشته، عامل تغییر آن متغیر را به دست آورد.

در این روش برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل مقادیر اختلاف برای دما (رابطه ۱) و نسبت برای بارندگی (رابطه ۲) بین متوسط درازمدت هر ماه در دوره آتی و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل محاسبه می‌گردد (Jones and Hulme, 1996):

$$\Delta T_i = (T_{GCM, fut, i} - T_{GCM, base, i}) \quad (1)$$

$$\Delta P_i = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \right) \quad (2)$$

که در آن ΔT_i و ΔP_i به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین دراز مدت برای هر ماه ($1 \leq i \leq 12$)، T و P GCM, fut, i و $GCM, base, i$ بترتیب متوسط درازمدت دمای و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (۲۰۵۰-۲۰۳۰) و $T_{GCM, base, i}$ و $P_{GCM, base, i}$ بترتیب متوسط دراز مدت دمای و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهده‌ای (۱۹۸۵-۲۰۰۵) برای هر ماه می‌باشد. بعد از تولید سناریوهای اقلیمی دما و بارش برای سلول منطقه مورد مطالعه از روش عامل تغییر به منظور کوچک مقیاس‌نمایی تناسبی داده‌های طرح استفاده می‌شود. در این روش برای به دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی دما و بارش (رابطه ۳ و ۴) در آینده، سناریوهای تغییر

این مدل‌ها قادرند تا تمامی فرآیندهای اقلیمی را در ابعاد جهانی و یا قاره‌ای به طور نسبتاً دقیقی شبیه‌سازی نمایند (Rezaei et al., 2014). مدل CanESM2 که توسط مرکز مدل‌سازی و آنالیز اقلیم کانادا طراحی شده، دارای شبکه‌بندی سطحی (شبکه‌های با ابعاد حدود ۲/۸۱ درجه‌ی طول و عرض جغرافیایی) است (Chyleket al., 2011). از آن جایی که مهمترین ورودی مدل‌های گردش عمومی جو، مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی بوده هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در گزارش پنجم (AR5) خود در سال ۲۰۱۰ سناریوهای جدید RCP را معرفی کردند (IPCC, 2014). سناریوهای جدید انتشار RCP به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریو RCP8.5 دربرگیرنده بیشترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است، که بدون اتخاذ هیچ گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، در این سناریو پیش خواهد رفت. در این سناریو گرمای کلی بین ۳ تا ۶/۱۲ درجه‌ی سانتی‌گراد برای همان دوره توصیف شده است (Meinshausen et al., 2011).

۲-۳- روش ریزمقیاس‌نمایی تناسبی

خروجی مدل‌های گردش عمومی جو باید تحت سناریوهای مختلف برای منطقه مورد مطالعه کوچک مقیاس شوند. به دلیل بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM، شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی این متغیرها همراه با اغتشاش می‌باشد. به گونه‌ای که مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی نشان از وجود اختلاف در نوسانات متغیر مورد مطالعه دارد. به منظور حذف اغتشاشات غیر معتبر

$$F(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (7)$$

که α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل و γ پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده $0 < D < \infty$ است. فرم تابع احتمال تجمعی لوگ-لوجستیک سه پارامتری نیز مطابق رابطه (۸) است:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (8)$$

بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار ۱، مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد. SPEI یک متغیر استاندارد شده می‌باشد که می‌توان مقادیر آن را با دیگر مقادیر SPEI در زمان و مکان‌های دیگر مقایسه نمود. مقدار SPEI صفر نشان‌دهنده مقدار متناظر با مقدار ۵۰ درصد در تابع توزیع تجمعی مقادیر D بر اساس تابع توزیع احتمال لوگ-لوجستیک می‌باشد. این شاخص می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند یک ماه، ۳ ماه، ۶ ماه، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه محاسبه گردد. در توسعه شاخص SPEI از مفاهیم شاخص استاندارد شده بارش (SPI) استفاده گردیده است. بنابراین مقادیر طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی در آنها مشابه با طبقه‌های ارائه شده توسط Edwards and McKee (1997) and برای شاخص SPI می‌باشد که در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. طبقه‌بندی این شاخص در جدول زیر نشان داده شده است. در مطالعه حاضر جهت محاسبه شاخص SPEI از بسته‌های آماری spei استفاده شده است.

۲-۵- تحلیل ویژگی‌های خشکسالی با استفاده از تئوری ران

یکی از روش‌های متداول تحلیل خشکسالی، تئوری ران می‌باشد. با استفاده از این تئوری سه ویژگی مهم خشکسالی (تداوم، شدت و سختی) را می‌توان تعریف نمود که در شکل ۲ این مشخصات با در نظر گرفتن سطح آستانه X_0 برای متغیر اصلی X_t نشان داده شده‌اند.

به مقادیر مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۸۵) افزوده می‌شوند (Wilby and Harris, 2006):

$$T = Tobs + \Delta T \quad (3)$$

$$P = Pobs * \Delta P \quad (4)$$

در رابطه ۳، $Tobs$ بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (در اینجا روزانه) در دوره پایه مشاهداتی، T سری زمانی حاصل از سناریوی اقلیمی دما در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۰) و ΔT سناریو تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده است. در رابطه (۴) برای بارندگی نیز موارد مذکور برقرار است.

۲-۴- شاخص بارش-تبخیر و تعرق (SPEI)

شاخص خشکسالی بارش استاندارد تبخیر تعرق توسط Vicente-Serrano et al. (2010) ارائه شد. این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنتوایت استفاده می‌نماید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه i بصورت رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (5)$$

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (6)$$

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

محاسبه این شاخص نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر D_i از طریق برازش یک تابع چگالی احتمال می‌باشد. با توجه به آنکه مقادیر D_i از کران پائین به مقادیر منفی منتهی می‌شوند توابع احتمال دوپارامتری نمی‌توانند برای این امر انتخاب شوند. Vicente-Serrano et al. (2010) با بررسی توابع مختلف سه پارامتری، تابع چگالی احتمال لوگ-لوجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر تشخیص دادند. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

Table 1- SPI, SPEI Index classification and definition of corresponding drought classes (Edwards and McKee, 1997)

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص SPI، SPEI و تعریف کلاس‌های خشکسالی متناظر با آن (Edwards and McKee, 1997)

SPEI values		SPI values	
Extremely wet	2.0 +	Normal Drought	0 to -0.99
Very wet	1.5 to 1.99	Moderately Extremely	-1 to -1.49
Moderately wet	1 to 1.49	Very Extremely	-1.5 to -1.99
Normal wet	0 to 0.99	Extremely Extremely	-2 and less

$$F_{x,y}(x,y) = C(f_x(x), f_y(y)) \quad (9)$$

این قضیه برگشت پذیر بوده و اگر $f_x(x)$ و $f_y(y)$ پیوسته باشند، تابع c یکتاست. در صورتی که تابع چگالی احتمال متغیرهای x و y پیوسته باشد و آنها را با $f_x(x)$ و $f_y(y)$ نشان دهیم، تابع چگالی احتمال ترکیبی آنها از رابطه زیر بدست می آید:

$$F_{x,y}(x,y) = c(f_x(x), f_y(y)) f_x(x) f_y(y) \quad (10)$$

که در آن c تابع چگالی احتمال تابع مفصل C می باشد که طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$c(u,v) = \frac{\partial^2 C(u,v)}{\partial u \partial v} \quad (11)$$

که در آن u و v توابع توزیع احتمال حاشیه ای دو متغیر مورد بررسی می باشد.

تابع چگالی احتمال مربوطه به سه تابع مفصل از خانواده ارشمیدوسی کلایتون، فرانک و گامبل هوگارد استفاده شده در پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. پارامتر θ درجه همبستگی بین متغیرهای وابسته را نشان می دهد.

برای گزینش بهترین تابع مفصل از سه شاخص ریشه میانگین مربع خطا^۶ (RMSE) (رابطه ۱۲)، ضریب کارایی نش-ساتنکلیف (NSE) (رابطه ۱۳) و معیار اطلاعات آکائیک^۷ (AIC) (رابطه ۱۴) استفاده شده است. معیار اطلاعات آکائیک شامل دو بخش هستند. الف-بخشی که عدم برازش را در نظر می گیرد، ب-بخشی که عدم اطمینان ناشی شده از تعداد پارامترهای مدل را در نظر می گیرد و با استفاده از روابط زیر تعیین می گردند.

بر اساس این روش، طول دوره خشکسالی برابر فاصله زمانی است که در طی آن، مقدار متغیر اصلی از سطح بحرانی کمتر است (ناحیه های هاشور خورده). مجموع کمبودها برابر با مجموع کمبودهای متغیر اصلی از سطح بحرانی مورد نظر در دوره وقوع خشکسالی می باشد. نسبت مجموع کمبودها به طول دوره خشکسالی برابر میانگین کمبودها می باشد. در شکل ۲ ناحیه های هاشور خورده ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب دوره های خشکسالی با بیشترین کمبود، طولانی ترین مدت و بیشترین شدت متوسط را نشان می دهند (Edwards and McKee, 1997). شدت هر خشکسالی به صورت جمع مقادیر شاخص موردنظر، از زمانی که شاخص به زیر حد آغاز خشکسالی رسیده باشد تا زمانی که به حد پایان آن برسد تعریف می گردد و مدتی که این حالت ادامه دارد مدت مربوط به آن خشکسالی می باشد. حد شروع خشکسالی برای شاخص SPEI طبق جدول ۱ برابر با -۱ و حد پایان آن برابر صفر می باشد.

۲-۶- توابع مفصل

توابع مفصل توابعی هستند که امکان ترکیب توزیع های تک متغیره متفاوت را جهت ساخت یک توزیع چندمتغیره فراهم می سازند. مزیت استفاده از توزیع چندمتغیره ساخته شده از این توابع در نظر گرفتن همبستگی موجود بین متغیرهای مورد مطالعه می باشد.

طبق تئوری Sklar (1959) در حالت وجود دو متغیر x و y اگر $f_{x,y}(x,y)$ یک تابع توزیع احتمالاتی دومتغیره با توابع توزیع حاشیه ای $f_x(x)$ و $f_y(y)$ مفصل این توابع حاشیه ای به صورت زیر تعریف می شود:

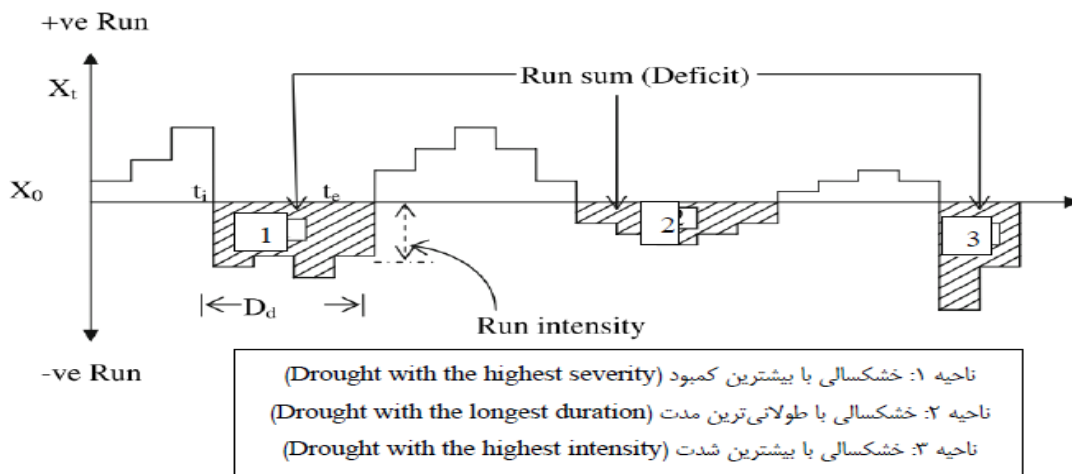


Fig. 2- Drought characteristics using Run theory (Mishra et al., 2009)
 شکل ۲- خصوصیات خشکسالی با استفاده از تئوری ران (Mishra et al., 2009)

Table 2- View mathematical relations of copula functions
جدول ۲- نمایش مشخصات ریاضی توابع مفصل (Karmakar and Simonovic, 2009)

Copula function	$C_o(u, v)$	$\epsilon\theta$
(Clayton)	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$[0, \infty]$
(Frank)	$-\frac{1}{\theta} \ln(1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1})$	$\neq 0$
(Gumbel- haggard)	$\exp(-((-\ln(u))\theta + (-\ln(v))\theta)^{1/\theta})$	$[1, \infty]$

برای $s \leq S$ و $d \leq D$ مبتنی بر توابع مفصل مطابق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - T_D(d) + T_S(s) + F_{DS}(d, s)} = \frac{E(L)}{1 - T_D(d) + T_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (15)$$

که در آن T_{DS} معرف دوره بازگشت توأم برای $s \leq S$ و $d \leq D$ است. همچنین L نماینده فاصله زمانی بین رویدادهای خشکسالی $E(L)$ امید ریاضی (مقدار متوسط) فاصله زمانی خشکسالی‌های است که می‌تواند براساس مشاهدات رویدادهای خشکسالی برآورد شود (Shiau, 2003).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش

نتایج تغییرات دما و بارش ایستگاه دوگنبدان حاصل از ریزمقیاس‌سازی تناسبی مدل CanESM2 در شکل (۳a) و (۳b) نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است دما در هر دو سناریوی آینده در هر ماه نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار افزایش دما مربوط به سناریو RCP8.5 به مقدار ۲/۷۶ درجه سانتی‌گراد در ماه جولای است. تغییرات سالانه دما افزایش ۲/۲ درجه‌ای برای RCP8.5 در طی دوره بیست ساله نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - S_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (13)$$

$$AIC = n \ln(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - S_i)^2}{n}) + 2k \quad (14)$$

که در آن x_i مقادیر تجربی و s_i شبیه‌سازی شده است. n تعداد کل داده‌ها و k تعداد پارامترهای برازش داده شده می‌باشند. $RMSE$ نشان دهنده میزان انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر مشاهده شده است، یا به عبارتی نشان دهنده پراکندگی داده‌ها است بازه تغییرات آن از صفر تا بی نهایت، و هر چه این عدد مقداری کمتری را نشان دهد و به صفر نزدیکتر باشد، کارایی خوب مدل را بیان می‌کند. هر چه ضریب AIC کوچکتر (منفی‌تر) باشد، نشان‌دهنده این است که دقت مدل بیشتر است (Akaike, 1998). NSE در بازه منفی بی نهایت تا یک $(-1, \infty)$ متغیر است. در بررسی تعیین کارایی مدل اگر مقادیر ضریب تأثیر NSE بیش از ۰/۷۵ باشد شبیه‌سازی خوب و مقادیر بین ۰/۳۶-۰/۷۵ شبیه‌سازی مقبول و کمتر از ۰/۳۶ شبیه‌سازی پذیرش‌ناپذیر است.

۲-۷- دوره بازگشت توأم

Shiau (2003) روشی را برای محاسبه دوره‌های بازگشت رویدادهای هیدرولوژیک دارای توزیع دو متغیره، به عنوان دوره‌های بازگشت توأم پیشنهاد کرد. دوره‌های بازگشت توأم تلاوم و شدت خشکسالی می‌تواند

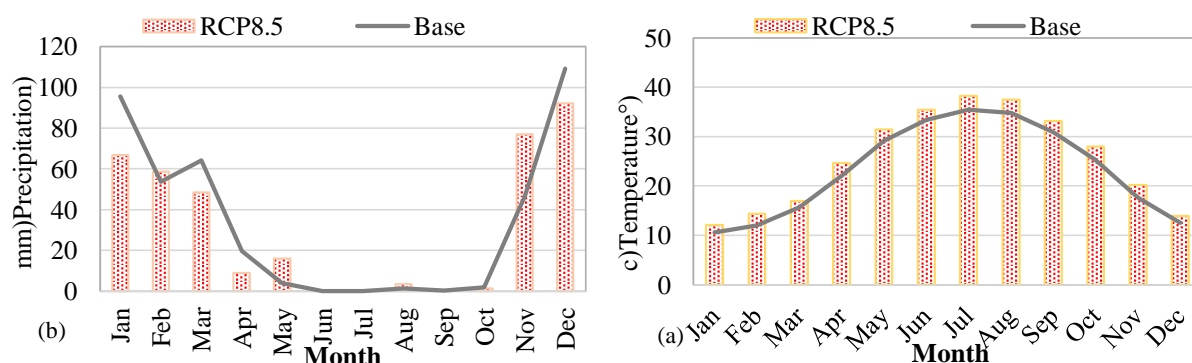


Fig. 3- Average changes in temperature and precipitation of the Douganbadan station during base (1985-2005) and future periods (2050-2050)

شکل ۳- تغییرات متوسط دما و بارش ایستگاه دوگنبدان در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) و آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۰)

با توجه به شکل به طور کلی می‌توان گفت در دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۱ بیشترین دوره خشکسالی بوده است. در مقیاس زمانی سه ماهه شدیدترین خشکسالی مربوط به سال ۱۹۹۳ و در ماه دسامبر می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در ماه اکتبر سال ۱۹۹۸، فوریه ۲۰۰۰ و ژانویه ۲۰۰۱ شدت خشکسالی بسیار شدید بوده است. بررسی شاخص خشکسالی نشان داد در دوره‌های ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۸ وضعیت از نظر بارندگی و دما در شرایط مرطوب بوده و همچنین بیشترین میزان رطوبت و ترسالی مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ می‌باشد. در مقیاس شش ماهه شدیدترین رخداد‌های خشکسالی طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۱ رخ داده است و با توجه به مقیاس ۱۲ و ۲۴ ماهه می‌توان گفت طول دوره خشکسالی معادل تقریباً ۵ سال و مربوط به سال‌های ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۱ می‌باشد.

همانطور که گفته شد با داده‌های بدست آمده از مدل اقلیمی CanESM2 به بررسی شاخص خشکسالی مربوط به دهه‌های آتی با استفاده از سناریوی RCP8.5 پرداخته شد. نتایج بدست آمده که در شکل ۵ نشان می‌دهد در دوره‌های کوتاه مدت وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی همانند دوره پایه به تناوب تکرار می‌گردند. وضعیت‌های رطوبتی بلند مدت در هر دو سناریو نشان می‌دهد میزان خشکسالی در دهه اول پیش بینی (دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰) دارای وضعیت خشکسالی شدیدتری نسبت به دهه دوم می‌باشد.

در شکل (۳ب) با مقایسه بارش در دوره پایه و آتی، بارش در برخی از ماه‌ها کاهش و برخی افزایش دیده می‌شود، که در روند دوره‌های ترسالی و خشکسالی اثرگذار است. بیشترین کاهش در ماه آوریل تحت سناریو RCP8.5 به مقدار ۵۵ درصد نسبت به پایه می‌باشد. همچنین تغییرات سالانه بارش RCP8.5 کاهش ۵/۵ درصدی را نسبت به دوره پایه داشته است. این تغییرات نشان دهنده بحرانی‌تر بودن سناریو RCP8.5 می‌باشد.

۳-۲- نتایج محاسبه شاخص خشکسالی SPEI برای دوره پایه و آتی

برای محاسبه شاخص SPEI در دوره پایه از داده‌های بارش و دمای ماهانه مربوط به دوره ۲۰ ساله ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ استفاده شد. بدین منظور شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت (۳، ۶) ماهه و بلندمدت (۱۲ و ۲۴) مربوط به زمان پایه محاسبه گردید و در ادامه با استفاده از داده‌های دما و بارش بدست آمده از شبیه‌سازی تغییر اقلیم برای دوره آتی، شاخص بارش-تبخیر و تعرق مربوط به سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به خشکسالی دوره پایه در شکل ۴ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که در مقیاس زمانی کوتاه مدت دوره‌های خشکسالی و ترسالی به تناوب تکرار می‌شود و نوسانات موجود در شکل‌ها گواهی تعدد این دوره‌ها می‌باشد.

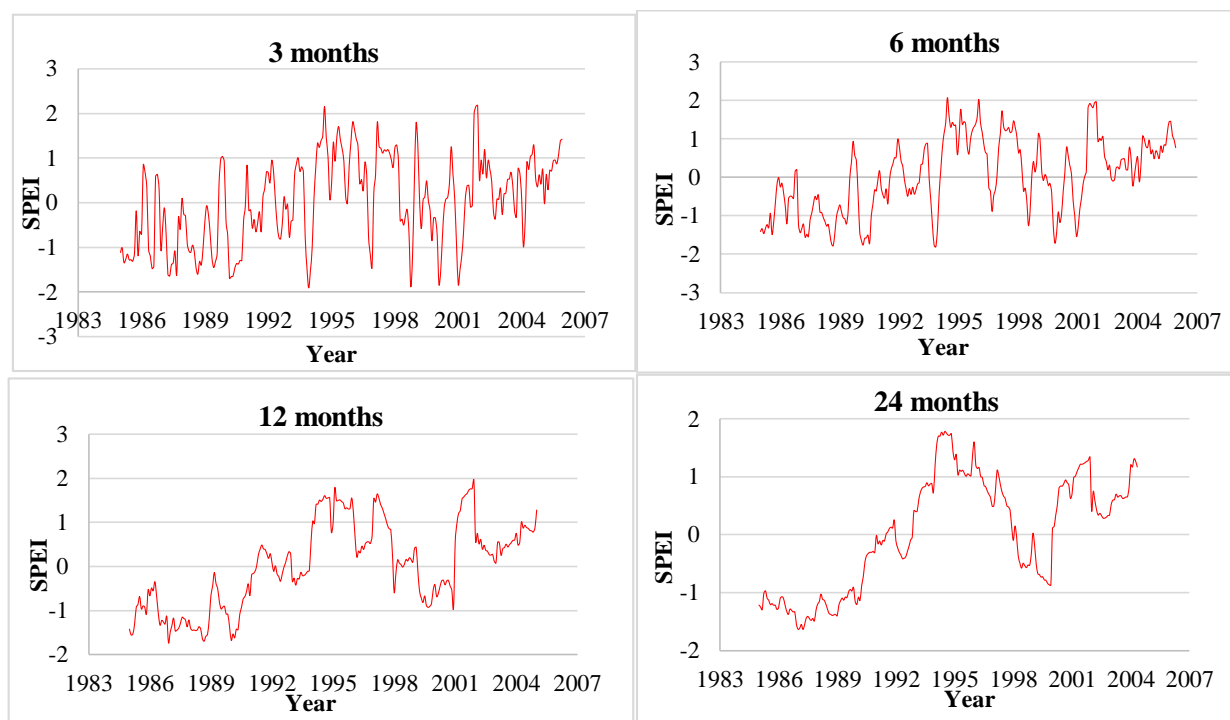


Fig. 4- SPEI drought index charts at different time scales for the base period 1985 to 2005
 شکل ۴- نمودارهای شاخص خشکسالی SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف برای دوره پایه ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵

۹ ماه در مقیاس ۳ ماهه به ۴۶ ماه در مقیاس ۲۴ ماهه تغییر می‌یابد. همین روند در وضعیت ترسالی هم رخ داده و با افزایش مقیاس دوره، تعداد دوره‌های ترسالی کاهش و مدت زمان طولانی‌ترین بازه ترسالی افزایش یافته است (از ۷ به ۲۹ ماه). با توجه به مقیاس ۲۴ ماهه مشاهده می‌شود که طولانی‌ترین دوره ترسالی معادل ۲۹ ماه و مربوط به ژانویه ۱۹۹۴ تا ژوئن ۱۹۹۶ می‌باشد که بیشترین کمبود به مقدار $14/73$ را به خود اختصاص داده است. برای دوره مرطوب تعداد دوره‌ها از ۴۴ تا ۴۰ متغیر است که بیشترین تعداد مربوط به مقیاس ۳ ماهه و کمترین آن متعلق به مقیاس ۲۴ ماهه می‌باشد. همان طور که از جدول ۳ مشخص است بیشترین مدت زمان دوره طولانی مرطوب مربوط به مقیاس ۲۴ ماهه و برابر با ۲۹ ماه می‌باشد که در مقایسه با مقادیر سایر مقیاس‌ها قابل ملاحظه می‌باشد. بیشترین مقدار مازاد در مقیاس‌های کوتاه مدت ۳ و ۶ ماهه $2/23$ و $3/08$ و در مقیاس‌های بلند مدت ۱۲ و ۲۴ ماهه برابر با $5/25$ و $10/41$ است.

نتایج مربوط به سناریوی RCP8.5 در جدول ۴ به صورت مجزا آورده شده است. مقایسه نشان می‌دهد که مدت زمان طولانی‌ترین دوره خشکسالی بر اساس سناریوی RCP8.5 کمتر به طوریکه به عنوان مثال طولانی‌ترین دوره خشکسالی در این حالت و در مقیاس ۲۴ ماهه برابر با ۳۶ ماه می‌باشد که در حالت قبل ۴۶ ماه پیش‌بینی شد.

نتایج نشان می‌دهد در نیمه‌ی انتهایی دهه اول و اوایل دهه دوم وضعیت‌های رطوبتی شدیدتری پیش‌بینی می‌شود بنابراین می‌توان گفت پربارش‌ترین دوره مربوط به بازه زمانی ۲۰۳۸ تا ۲۰۴۳ می‌باشد. همچنین شدت ترسالی در نیمه دوم با شدت کمی از نظر وقوع محتمل است.

۳-۳- نتایج استخراج ویژگی‌های رطوبتی بر اساس تئوری ران

در ادامه با استفاده از تئوری ران با در نظر گرفتن محدوده نرمال ($1/99$ تا $-1/99$) به عنوان شرایط آستانه برای تعیین دوره‌های مرطوب و خشک، ویژگی‌های وضعیت‌های رطوبتی نظیر: تعداد دوره، مدت زمان طولانی‌ترین دوره، مجموع کمبودها و مازادها و بیشترین مقدار کمبود یا مازاد برای دو دوره خشک و مرطوب استخراج شده‌اند که نتایج آن برای دوره‌ای پایه و سناریوی RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده‌اند.

بر اساس نتایج جدول ۳ برای دوره پایه، دوره‌های خشکسالی و ترسالی در مقیاس‌های مورد بررسی با شدت‌های مختلف و به صورت تناوبی به وقوع پیوستند و تعداد دوره‌های خشک و مرطوب با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد. به طوری که در بحث مربوط به دوره خشک، مدت زمان آن از

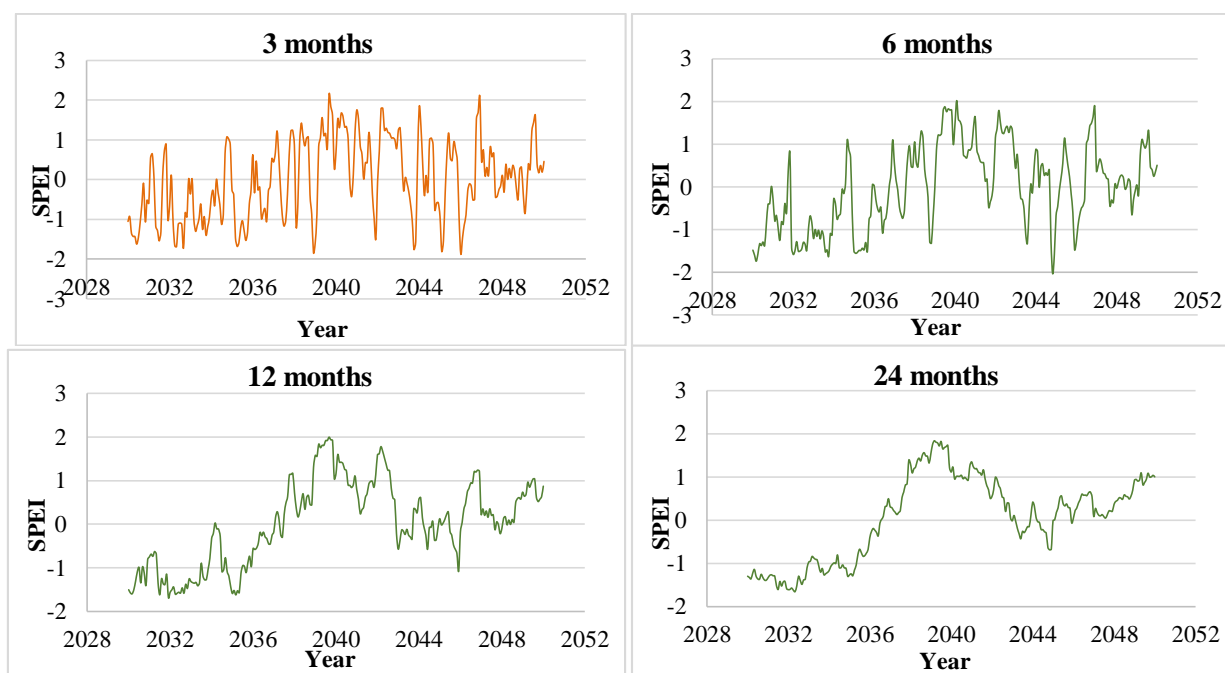


Fig. 5- SPEI drought index charts based on RCP8.5 senario at different time scales for the period 2030 to 2050

شکل ۵- نمودارهای شاخص خشکسالی SPEI بر اساس سناریوی RCP8.5 در مقیاس‌های زمانی مختلف برای دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰

Table 3- Specifications of dry and wet periods based on the SPEI index in the base period
جدول ۳- ویژگی‌های دوره‌های خشک و مرطوب بر اساس شاخص SPEI در دوره پایه

Time scale	Dry period				Wet period			
	Number of period	Longest period	Max deficit	Total deficit	Number of period	Longest period	Max surplus	Total surplus
3 months	46	Jan to Sep 1985(9 months)	1.89	18.92	44	May to Nov 1997(7 months)	2.023	16.13
6 months	48	Mar to Nov 1998(10 months)	3.16	18.53	43	Feb to Dec 1997(11 months)	3.08	18.46
12 months	45	Apr 1986 to Dec 1988(31 months)	11.53	16.69	42	Feb 1985 to Jan 1996(13 month)	5.25	19.49
24 months	46	Apr 1985 to Jul 1989(46 months)	14.73	16.07	40	Jan 1994 to Jun 1996(29 months)	10.41	13.54

Table 4- Specifications of dry and wet periods based on the SPEI index in the future period under RCP8.5
جدول ۴- ویژگی‌های دوره‌های خشک و مرطوب بر اساس شاخص SPEI در دوره آتی تحت سناریوی RCP 8.5

Time scale	Dry period				Wet period			
	Number of period	Longest period	Max deficit	Total deficit	Number of period	Longest period	Max surplus	Total surplus
3 months	47	Mar 2035 to Oct 2035 (8 months)	3.115	16.573	46	Mar 2042 to Oct 2042 (8 months)	2.581	16.151
6 months	49	Dec 2031 to Sep 2032(10 months)	4.357	18.986	38	Jan 2042 to Nov 2042 (11 months)	4.146	17.367
12 months	49	Apr 2031 to Apr 2032(24 months)	10.914	19.123	35	Dec 2038 to Jul 2040 (19 months)	11.899	17.567
24 months	48	Jan 2030 to Dec 2032(36 months)	14.42	17.59	32	Dec 2037 to Jul 2040 (31 months)	13.24	14.81

۳-۴- نتایج تحلیل تابع مفصل

انتخاب تابع مفصل مناسب با استفاده از سه شاخص ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و معیار اطلاعات آکائیک (AIC) برای متغیر شدت و مدت بدست آمده از شاخص SPEI سه ماهه طبق جدول ۵ بررسی و تجزیه و تحلیل شد. همان طور که در جدول ۵ مشهود است برای هر سه دوره پایه و آینده تابع کاپولا فرانک با ضریب نش بالاتر و ریشه میانگین خطا کمتر و ضریب منفی تر AIC به عنوان بهترین تابع کاپولا انتخاب شده است. سپس برای تحلیل احتمال و دوره بازگشت توأم متغیرهای شدت و مدت خشکسالی از این تابع کاپولا استفاده شده است.

۳-۵- احتمال توأم تابع فرانک در دوره پایه و آتی

در شکل ۶ تابع توزیع احتمال CDF دو متغیره شدت و مدت خشکسالی براساس شاخص SPEI سه ماهه با استفاده از تابع کاپولا فرانک در دوره پایه و آتی تحت سناریو RCP8.5 نشان داده شده است. خطوط هم مقدار احتمال توأم سختی و مدت خشکسالی در شکل ۶ نشان می‌دهد که در دوره آینده احتمال توأم وقوع خشکسالی‌های شدید (با سختی و مدت ماه بیشتر از ۸) افزایش می‌یابد و با کاهش سختی و مدت خشکسالی‌ها از میزان این اختلاف کاسته می‌شود.

اما تعداد دوره‌ها بیشتر شده و طولانی‌ترین دوره مرطوب بیشتر اما تعداد آن‌ها کمتر شده است. همچنین مجموع کمبودها در مقیاس‌های کوتاه مدت ۳ و ۶ ماهه در مقایسه با دوره پایه مقادیر کمتر و در مقیاس‌های بلند مدت ۱۲ و ۲۴ ماهه مقادیر بیشتری حاصل شد. در صورتی که با مقایسه مجموع مازادها مشاهده می‌گردد این میزان برای تمامی مقیاس‌ها بر اساس سناریوی RCP8.5 مقادیر کمتری دارد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تعداد دوره‌های خشکسالی بر اساس سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. همچنین طولانی‌ترین دوره خشکسالی نسبت به دوره پایه کاهش داشته به گونه‌ای که در مقیاس ۲۴ ماهه طولانی‌ترین دوره مربوط به آوریل ۱۹۸۵ تا ژولای ۱۹۸۹ (۴۶ ماه) می‌باشد که در سناریوی RCP8.5 ۳۶ به ماه کاهش یافته است. با بررسی بیشترین مجموع کمبودها و مقایسه دوره پایه و آتی مشاهده می‌گردد که این مقدار در تمامی مقیاس‌ها نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. همچنین تعداد دوره‌های ترسالی در مقایسه با حالت پایه کاهش یافته است و همچنین بررسی مقدار مجموع مازادها نیز نشان داد این مقدار در دوره‌های آتی کمتر از حالت پایه می‌باشد.

Table 5- Choosing the Best Copula Function According to Goodness of Fit severity and duration Variables (3 months SPEI index) for the Base and Future

جدول ۵- انتخاب بهترین تابع کاپولا طبق شاخص‌های نیکویی برازش متغیرهای شدت و مدت (شاخص SPEI سه ماهه) در دوره پایه و آینده

SPEI 3 months	Copula member	RMSE	NSE	AIC	Best fit
Base(1985-2005)	Clayton	0.5135	0.8351	-88.88	
	Frank	0.4329	0.8828	-96.05	✓
	Gumbel	0.7899	0.6097	-70.79	
RCP8.5(2030-2050)	Clayton	0.7724	0.6555	-72.78	
	Frank	0.3758	0.9184	-103.04	✓
	Gumbel	0.7870	0.6422	-71.99	

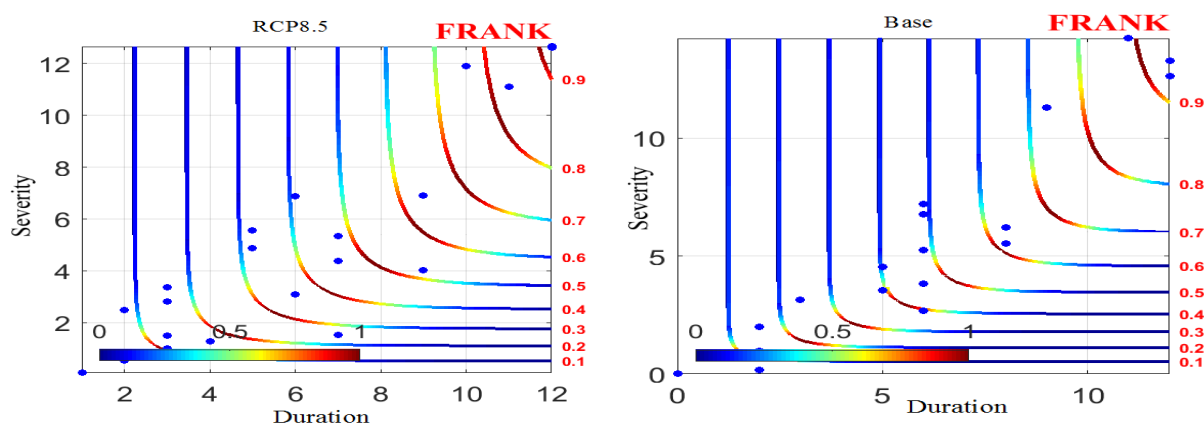


Fig. 6- Joint probability distribution function of severity and duration drought based on SPEI index for base and future periods

شکل ۶- تابع توزیع احتمال توأم شدت و مدت خشکسالی براساس شاخص SPEI سه ماهه برای دوره پایه و آتی

فراوانی خشکسالی، سناریوی RCP 8.5 بیشترین تغییرات را داشته است که این به دلیل این است که در این سناریو میزان واداشت تابشی در انتهای قرن بیست و یکم به $8/5$ وات بر مترمربع می‌رسد. همچنین نتایج با توجه به افزایش بیشتر دما و کاهش بارش در این سناریو نسبت به دوره پایه همخوانی دارد.

۴- نتیجه گیری

بررسی تغییرات خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت می‌باشد؛ زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلندمدت، لازم است که چشم‌اندازی از وضعیت آینده بارندگی و دوره‌های خشکسالی و ترسالی برای منطقه تدوین گردد. در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی اقلیم دهه‌ی آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۰) با استفاده از سناریوی RCP8.5 با استفاده از مدل گردش عمومی جو CanESM2 پرداخته شد و ویژگی‌های خشکسالی از جمله شدت و مدت آن بر اساس شاخص SPEI برای دوره پایه ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ و آتی با مقیاس زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ محاسبه گردید.

به عبارت دیگر، در یک سطح احتمال توأم ثابت میزان سختی و مدت در سناریوهای RCP8.5 افزایش داشته است. در شکل ۶ نقاط آبی مقادیر مشاهداتی جفت‌های شدت و مدت خشکسالی را نشان می‌دهند. خطوط رسم شده در نمودارها با رنگ کدبندی شده‌اند که رنگ آبی کمترین سطح احتمال (چگالی) اتصال و قرمز بیشترین آن است. محدوده چگالی احتمال مفصل در محدوده (۰-۱) نرمال شده است.

شکل ۷ نمودار دوره بازگشت توأم شدت و مدت خشکسالی براساس شاخص SPEI سه ماهه با استفاده از تابع کاپولا فرانک در دوره پایه و آتی تحت سناریو RCP8.5 در دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله را نشان می‌دهد. در شکل با افزایش دوره بازگشت مقدار سختی با شدت بیشتری مشاهده می‌شود. به عنوان مثال دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۱۰ و مدت ۱۰ ماهه برای دوره پایه ۵ سال و RCP8.5 ۴ سال می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید در سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه است. با توجه به شکل در دوره بازگشت ۲۵ ساله سختی و مدت در سناریو RCP8.5 بیشتر از دوره پایه می‌باشد. به طور کلی در تحلیل

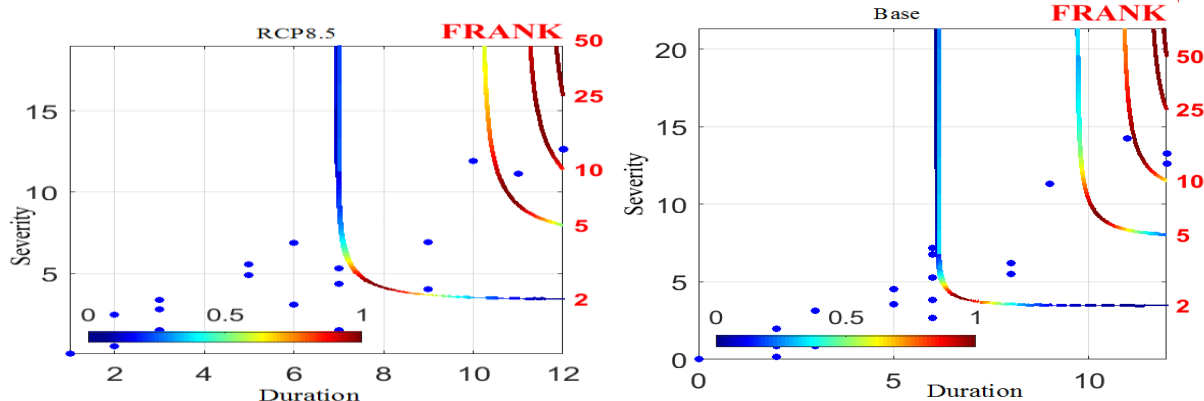


Fig. 7- Joint return period of severity and duration drought based on SPEI index for base and future periods
 شکل ۷- دوره بازگشت توأم شدت و مدت خشکسالی براساس شاخص SPEI سه ماهه برای دوره پایه و آتی

در آینده تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه است که با نتایج Golmohammadi and Massah ، Vidal and Wade (2009) و Bavani (2011) و Azizabadi et al. (2016) در یک راستا می‌باشد. اگرچه در پیش‌بینی‌های بدست آمده از ریزمقیاس‌گردانی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که این امر به علت ساختار مدل‌های گردش عمومی جو، داده‌های مشاهداتی و غیره می‌باشد اما از آنجایی که مدل‌های اقلیمی به عنوان معتبرترین ابزار تولید سناریوهای اقلیمی مطرح می‌باشند، ضروری است مدیران و تصمیم‌گیران بخش‌های مختلف منابع آب و کشاورزی نتایج حاصل از چنین پژوهش‌هایی را نیز مد نظر قرار داده تا امکان برنامه‌ریزی‌های بلندمدت میسر شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Copula
- 2- General Circulation Model
- 3- Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
- 4- Change Factor
- 5- Run Theory
- 6- Root Mean Square Error
- 7- Akaike Information Criterion
- 8- Drought Interarrival Time

۵- مراجع

- Abdul Hosseini M, Eslamian S, Musavi SF (2010) Analysis of variation of drought socio-economic characteristics and the effect of climate change. First National Conference on Meteorology and Water Management Tehran (NCAGM01), 22–23 November, Iran, 1–10 (In Persian)
- AghaKouchak A, Cheng L, Mazdiyasn O, Farahmand A (2014) Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: insights from the 2014

سپس شاخص‌های مربوط به دوره آتی با استفاده از بارندگی و دمای بدست آمده از شبیه‌سازها بدست آمد و در ادامه به مقایسه شرایط خشکسالی و وضعیت رطوبتی دوره پایه و دهه‌های آتی پرداخته شد. در نهایت ویژگی‌های خشکسالی از جمله شدت و مدت سه ماهه در بررسی خصوصیات احتمالی خشکسالی از جمله احتمال وقوع و دوره بازگشت توأم، با سه تابع چند متغیره کاپولا کلایتون، فرانک و گامبل هوگارد برای دوره پایه و آتی استفاده شد. نتایج نشان داد متغیرهای دما ماهانه در حوضه و $2/2$ درجه سانتیگراد افزایش و بارش تحت سناریو RCP8.5 $5/5$ درصد کاهش یافته است. با مقایسه ویژگی‌های استخراج شده در دوره پایه و دوره 2030 تا 2050 در اثر نواسانات اقلیمی انتظار می‌رود در دوره‌های آتی خشکسالی بیشتری نسبت به دوره پایه مشاهده شود. نتایج ارزیابی خشکسالی نشان می‌دهد تعداد دوره‌های خشک و مرطوب با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد که با نتایج Norozi et al. (2018) همخوانی دارد. همچنین تعداد دوره‌های خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره خشکسالی کمتر می‌شود. برای ترسالی طولانی‌ترین دوره مرطوب بیشتر اما تعداد آن‌ها کمتر شده است.

از میان سه تابع کاپولا تابع فرانک با مقادیر متوسط سه شاخص ارزیابی نیکویی برازش RMSE ($0/38$)، NSE ($0/9$) و AIC ($-10/1/9$) به‌عنوان بهترین تابع برازش داده شده برای هر دو دوره پایه و آتی انتخاب گردید. احتمال وقوع توأم در یک سطح احتمال توأم ثابت میزان سختی و مدت در سناریوی RCP8.5 افزایش داشته است. تحلیل توأم دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی 10 و مدت 10 ماهه برای دوره پایه و RCP8.5 بترتیب 5 و 4 سال می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید و افزایش آن‌ها

- precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16(4):361–377
- Kaboosi K, Kordjazi M (2017) The effect of climate change on meteorological parameters and drought in Golestan province. *Iran Water Resources Research* 13(3):205–213 (In Persian)
- Karmakar S, Simonovic S P (2009) Bivariate food frequency analysis. Part 2: a copula-based approach with mixed marginal distributions. *Journal of Flood Risk Management* 2(1):32–44
- Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, Daniel J S, Kainuma M L T, Lamarque J F, Matsumoto K, Montzka S A, Raper S C B, Riahi K, Thomson A, Velders G J M, Van Vuuren D P P (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109(1-2):213–241
- Mishra A k, Singh V P, Desai V R (2009) Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environ Research Risk Assess* 23(1):41–55
- Mousavi Nadoushani S, Alimohammadi S, Ahani A, Behrouz M, Mousavi M (2018) Bivariate drought frequency analysis in Gharesoo-Gorganrud basin by using copulas. *Journal of Water and Soil conservation* 24(4):71–91 (In Persian)
- Norozi E, Rostami N, Jahangir M H (2018) Prediction of drought condition during 2018-2037 period under climate change approach (Case study: Ilam and Dehloran stations). *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(3):977–991 (In Persian)
- Philip GO, Babatunde JA, Gunner L (2017) Impacts of climate change on hydro-meteorological drought over the Volta basin, west Africa. *Global and Planetary Change* 155(1):121–132
- Rezaei M, Nohtani M, Moghaddamnia A, Abkar A, Rezaei M (2014) Performance evaluation of statistical downscaling model (SDSM) in forecasting precipitation in two arid and hyper arid regions. *Journal of Water and Soil* 28(4):836–845 (In Persian)
- Sadegh M, Ragno E, AghaKouchak A (2017) Multivariate copula analysis toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework. *Water Resources Research* 53(6):5166–5183
- Saeidipour M, Radmanesh F, Eslamian S (2019) Meteorological drought monitoring using the multivariate index of SPEI (case study: Karun basin). *AUT Journal of Civil Engineering* 3(1):85–92
- Sheffield J, Wood E F (2008) Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics* 31(1):79–105
- California drought. *Geophysical Research Letters* 41(24):8847–8852
- Akaike H (1998) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *Selected Papers of Hirotugu Akaike*, Springer, New York, NY, 434p
- Ayantobo O O, Li Y, Song S, Jave T, Yao N (2018) Probabilistic modelling of drought events in China via 2-dimensional joint copula. *Journal of Hydrology* 559:373–391
- Azizabadi M, Bakhtiari B, Qaderi K, Rezapour M (2016) The survey of climate change impact on drought severity- duration- frequency curves using copulas. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47(4):743–754 (In Persian)
- Blekinsop B, Fowler H J (2007) Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *Journal of Hydrology* 342(1–2):50–71
- Burke E J, Brown S J, Christidis N (2006) Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model. *Journal of Hydrometeorology* 7(5):1113–1125
- Chylek P, Li J, Dubey M. K, Wang M, Lesins G (2011) Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 11(8):22893–22907
- Edwards D C, McKee T B (1997) Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report No. 97-2*, Colorado State University, 172p
- Ekanayake E, Perera K (2014) Analysis of drought severity and duration using copulas in anuradhapura, Sri Lanka. *International Journal of Environment and Climate Change* 4(3):312–327
- Golmohammadi M, Massah Bavani A (2011) The perusal of climate change impact on drought intensity and duration. *Journal of Water and Soil* 25(2):315–326 (In Persian)
- IPCC (2014) *Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: global and sectoral aspects*. Cambridge University Press, 1820p
- Jones P D, Lister D H, Osborn T J, Harpham C, Salmon M, Morice C P (2012) Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D5):1–29
- Jones P D, Hulme M (1996) Calculating regional climatic times series for temperature and

- Vicente Serrano S M, Beguería S, López Moreno J I (2010) A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7):1696–1718
- Vidal J P, Wade S (2009) A multi model assessment of future climatological droughts in the United Kingdom. *International Journal of Climatology* 29(14):2056–2071
- Wilby R L, Harris I (2006) A frame work for assessing uncertainties in climate change impact: low flow scenarios for the river Thames. *UK Water Resources Research* 42(2):1–10
- Shiau J.T (2003) Return period of bivariate distributed hydrological events. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 17(1–2):42–57
- Sklar A (1959) Fonctions de repartition à n dimensions et leurs marges. *Publication of the Institute of Statistics, University of Paris* 8:229–231
- Sun C X, Huang G H, Fan Y, Zhou X, Lu C, Wang X Q (2019) Drought occurring with hot extremes: changes under future climate change on Loess Plateau, China. *Earth's Future* 7(6):587–604
- Van Pelt S C, Swart R J (2011) Climate change risk management in transnational river basin: the Rhine. *Water Resource Management* 25(1):3837–3861