

## بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منحنی‌های سختی - مدت - فراوانی خشکسالی حوزه آبریز قره‌سو با استفاده از توابع مفصل

مسعوده عزیزآبادی فراهانی<sup>۱</sup>، بهرام بختیاری<sup>۲</sup>، \* کورش قادری<sup>۳</sup>، محسن رضایپور<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. استادیار بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. استادیار بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴. استادیار بخش آمار دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۲۱)

### چکیده

تغییر اقلیم تأثیرات متعددی بر مقدار بارش می‌گذارد و گرمایش نیز با شتاب بخشیدن به خشک شدن زمین، منجر به افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها می‌شود که این خود بر منحنی‌های سختی - مدت - فراوانی خشکسالی (SDF) مؤثر خواهد بود. هدف از این پژوهش، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منحنی‌های SDF در حوزه آبریز قره‌سو واقع در استان گلستان در دوره آتی می‌باشد. ابتدا متغیرهای بارش و دما با استفاده از سری زمانی میانگین حوزه طی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۸۳ و خروجی‌های مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت سه سناریو RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM در دوره ۲۰۴۸-۲۰۱۹ برآورد شدند. پس از آن با استفاده از شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) سه‌ماهه و رویکرد تابع مفصل و دوره بازگشت شرطی منحنی‌های SDF مربوط به حوزه در دوره پایه و آتی استخراج شدند. نتایج نشان داد که متغیرهای بارش و دمای ماهانه در حوزه، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و در دوره پایه، دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۱۰ و مدت برابر یا کمتر از ۶ ماه، ۵ سال می‌باشد. دوره بازگشت همین رویداد خشکسالی تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب برابر ۲۱، ۱۷ و ۴ سال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استان گلستان، دوره بازگشت شرطی، SDSM، سختی - مدت - فراوانی خشکسالی

### مقدمه

می‌دهد. بنابراین خشکسالی هم در مناطق خشک و هم در مناطق مرطوب به وقوع می‌پیوندد (Asadi Zarch *et al.*, 2009). از این رو اگر بتوان زمان وقوع آن را زودتر از ظاهر شدن اثرات آن مشخص کرد می‌توان گام مهمی در مدیریت منابع در شرایط بحرانی برداشت. یکی از متداول‌ترین روش‌ها جهت ارزیابی تأثیر اقلیم آینده بر منابع مختلف استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو می‌باشد. خشکسالی یک پدیده تصادفی حدی و چند متغیره است و مشخصه‌های آن (سختی و مدت) به هم وابسته هستند و به صورت مستقل و جدای از هم تغییر نکرده و هرکدام بر دیگری تأثیرگذار است. استفاده از تابع مفصل<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 (Yusof *et al.*, 2013). Shiau (2006) برای اولین بار از توابع مفصل برای تحلیل

از تشدید ناهنجاری‌های مثبت و افزایشی دمای کره زمین، با عنوان گرمایش جهانی یاد می‌شود. گرمایش جهانی و ارتباط معنی‌دار تغییرات دما و بارش نقاط مختلف دنیا، به عنوان مهم‌ترین نموده‌های تغییر اقلیم قابل توجه هستند (Ghavidel, Rahimi, 2010). همچنین تغییرات بارش دارای دو پدیده حدی سیل و خشکسالی است (Moradi *et al.*, 2009). به طور کلی، افزایش وقوع خشکسالی در عرض‌های پایین و میانه، به خصوص در فصول گرم که میزان تقاضا به بیشترین مقدار خود می‌رسد، در آینده‌ای نه چندان دور انتظار می‌رود (IPCC, 2007). بنابراین تغییر اقلیم باعث گسترش خشکسالی و تداوم آن‌ها می‌شود. خشکسالی با خشکی متفاوت است. خشکی جزء ذات منطقه بوده و فطرت اقلیمی منطقه است ولی خشکسالی جزء ذات منطقه نیست و بنا به دلایلی از جمله کاهش بارندگی رخ

حوزه قره‌سو واقع در استان گلستان، باعث کمبود آب و ایجاد خسارات در بخش کشاورزی شده است. لذا هدف از این پژوهش، استخراج منحنی‌های سختی-مدت- فراوانی خشکسالی کشاورزی، تحت تأثیر تغییر اقلیم، با استفاده از مدل اقلیمی و تابع دومتغیره مفصل برای دوره حاضر و آتی می‌باشد.

## مواد و روشها

### منطقه مطالعه شده

حوزه آبریز قره‌سو در محدوده طول شرقی  $16/8^{\circ}$  تا  $54^{\circ}$  و عرض شمالی  $36^{\circ}$  تا  $36^{\circ} 36' 36''$  و مساحت  $1762$  کیلومتر مربع در جنوب غربی استان گلستان در شمال ایران واقع شده است و  $8$  درصد مساحت این استان را تشکیل می‌دهد. متوسط بارندگی، تبخیر و دمای سالانه آن به- ترتیب  $595/94$  و  $1193$  میلی‌متر و  $17/57$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های بارش و دمای روزانه و ماهانه  $7$  ایستگاه در داخل حوزه در دوره مشترک  $1983-2012$  استفاده گردیده است. شکل  $1$  موقعیت حوزه آبریز قره‌سو بر گستره ایران را نشان می‌دهد. جدول (۱) نیز مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای آزمون همگنی و روند داده‌ها به ترتیب از آزمون توالی<sup>۷</sup> و روند من- کندال<sup>۸</sup> استفاده گردید. نتایج هر دو آزمون، وجود روند افزایشی معنادار در داده‌های ماهانه دما و تأیید تصادفی بودن داده‌های بارش را در کلیه ایستگاه‌ها نشان داد. مراحل انجام پژوهش در این مقاله در شکل  $2$  ارائه شده است.

### محاسبه سری زمانی میانگین منطقه‌ای بارش و دما

از آنجایی که اغلب محققان نیز در تحلیل‌های مربوط به تغییر اقلیم و خشکسالی، به منظور تسریع در محاسبات به‌جای بررسی بارندگی و دمای ایستگاه‌ها به‌صورت مجزا، روش میانگین منطقه-ای را به کار می‌برند (Wilby et al., 2014; Golmohammadi and Massah Bavani, 2011). بنابراین ادامه بررسی‌های این پژوهش نیز با استفاده از روش میانگین منطقه‌ای انجام می‌گیرد. بدین منظور داده‌های مربوط به دما و بارش هر روز و هر ماه با استفاده از دو روش درون‌یابی رگرسیون (چند متغیره) و  $IDW^9$  (Golmohammadi and Massah Bavani, 2011) به مرکز گرانی حوزه منتقل می‌شود و داده‌های متناظر با مرکز گرانی بدست می‌آیند. این داده‌ها به‌عنوان داده‌های میانگین منطقه‌ای محسوب می‌شوند.

خشکسالی کمک گرفت. در این میان، تهیه منحنی‌های سختی-مدت- فراوانی ( $SDF^1$ ) به تعیین زمان وقوع مجدد یک رویداد خشکسالی در آینده با سختی و تداوم معین، کمک می‌کند و از این‌رو ابزاری مفید برای مدیریت آب و طراحی در برخی پروژه‌ها می‌باشد (Rajsekhar et al., 2014). Bazrafshan et al. (2015) به مقایسه دو شاخص بارش استاندارد شده چند متغیره ( $MSPI^2$ ) و کمبود توأم ( $JDI^3$ ) با کاربرد تابع مفصل در  $42$  ایستگاه در ایران در دوره  $1966-2010$  پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که شاخص  $JDI$  نمی‌تواند طبقات خشکسالی حدی را تشخیص دهد. در کل نتایج برتری کلی شاخص  $MSPI$  را در پایش خشکسالی‌ها نشان داد. Shiau and Modarres (2009) برای ایجاد رابطه بین سختی، مدت و فراوانی خشکسالی در دو ایستگاه آبادان و انزلی در دوره  $1954-2003$  از تابع مفصل دومتغیره و شاخص بارش استاندارد شده ( $SPI^4$ ) استفاده و منحنی‌های  $SDF$  را استخراج کردند. بررسی‌ها نشان داد که مقدار سختی خشکسالی به ازای مدت و دوره بازگشت معین در انزلی نسبت به آبادان بیشتر است. Farrokhnia and Morid (2008) برای تحلیل خصوصیات احتمالاتی خشکسالی در ایستگاه مهرآباد تهران، احتمال وقوع و دوره بازگشت دومتغیره خشکسالی بر مبنای شاخص‌های  $SPI$  و خشکسالی مؤثر ( $EDI^5$ ) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده قابلیت‌های مناسب توابع مفصل نسبت به روش‌های متداول در مدل‌سازی احتمالاتی دومتغیره خشکسالی می‌باشد. Kwak et al. (2015) به منظور تحلیل اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی حوزه روخانه Namhan در کره جنوبی با استفاده از سناریوی  $A1B$  و مدل اقلیمی منطقه‌ای اداره هواشناسی کره جنوبی ( $KMA RCM6$ ) و توابع مفصل، منحنی‌های  $SDF$  خشکسالی را رسم کردند و فراوانی وقوع خشکسالی را تا سال  $2100$  پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که فراوانی وقوع خشکسالی‌های شدید کوتاه‌مدت در آینده‌ای نزدیک افزایش می‌یابد. با توجه به مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر منحنی‌های  $SDF$  با رویکرد تابع مفصل مشخص گردید که تاکنون در سطح جهانی، مطالعات اندکی در این زمینه انجام شده است و در ایران نیز تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه صورت نگرفته است. از طرفی، افزایش شدت خشکسالی‌های اخیر در

1 Severity-Duration-Frequency

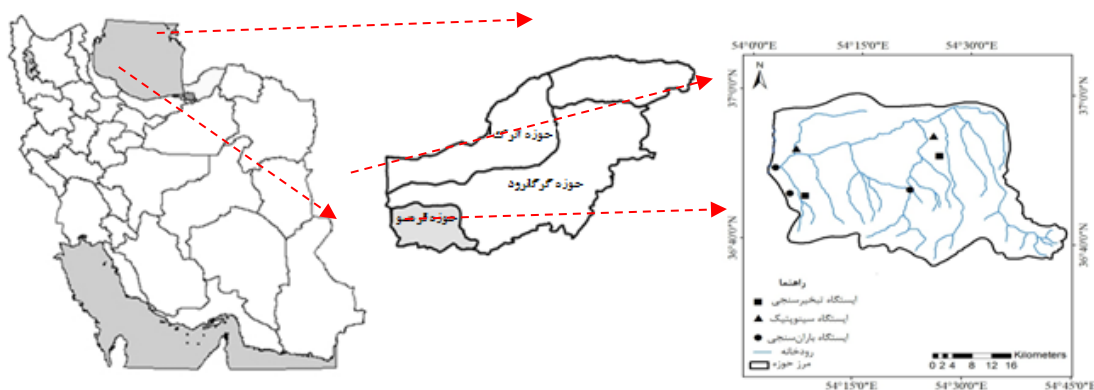
2 Multivariate Standardized Precipitation Index

3 Joint Deficit Index

4 Standardized Precipitation Index

5 Effective Drought Index

6 Korea Meteorological Administration regional climate model



شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز قره‌سو بر گستره ایران

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی در حوزه آبریز قره‌سو و اقلیم آن‌ها در سیستم دومارتن گسترش یافته (Khalili, 1997)

سال‌های مورد بررسی	نوع اقلیم (دومارتن گسترش یافته)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی (درجه - دقیقه-ثانیه)	طول جغرافیایی (درجه-دقیقه-ثانیه)	نام ایستگاه
۱۳۵۰-۱۳۹۲	نیمه مرطوب گرمسیر	۶	۳۶-۴۶-۸/۹	۵۴-۵-۲۲/۹	غاز محله
۱۳۵۲-۱۳۹۲	مرطوب معتدل	۲۶۰	۳۶-۴۷-۰/۰۸	۵۴-۲۱-۵۱/۹	شصت کلاته
۱۳۴۷-۱۳۹۲	نیمه مرطوب معتدل	-۲۶	۳۶-۴۹-۳۵/۲۹	۵۴-۳-۱۶/۰۹	سیاه آب
۱۳۶۰-۱۳۹۲	نیمه مرطوب گرمسیر	۷۵	۳۶-۵۱-۳۷/۰۷	۵۴-۲۵-۴۵/۴۹	محوطه اداره گرگان
۱۳۳۴-۱۳۹۲	نیمه مرطوب گرمسیر	۰	۳۶-۵۴-۱۸	۵۴-۲۴-۴۸/۹۹	گرگان
۱۳۷۷-۱۳۹۳	نیمه مرطوب معتدل	-۲۰	۳۶-۵۲-۱۱/۹۹	۵۴-۶-۰	بندر ترکمن
۱۳۷۰-۱۳۹۳	نیمه مرطوب معتدل	۶۱	۳۶-۴۵-۵۵/۷۶	۵۴-۷-۲۹/۱۷	کردکوی بالابوک

سیرهای تولید گازهای گلخانه‌ای (GHGs<sup>۱</sup>) نسبت به سناریوهای SRES در AR4 ارزیابی شده است. به‌طور کلی عدم قطعیت‌ها در گزارش اخیر کاهش یافته است. سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهشی سخت-گیرانه (RCP 2.6)، دو سناریوی حد واسط (RCP 4.5 و RCP 6) و یک سناریوی بدبینانه (RCP 8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند. RCP 8.5، RCP 6، RCP 4.5 و RCP 2.6 اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶ وات بر مترمربع (W/m<sup>2</sup>) تخمین زده‌اند (2014 IPCC). مدل SDSM یک ابزار رگرسیون بنیان چندگانه است و امروزه به‌عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس نمایی و بهترین مولد داده شرطی در سطح جهان شناخته شده است. عملکرد و ساختار مدل SDSM در چهار مرحله خلاصه می‌شود: انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده به نام متغیر مستقل، واسنجی مدل، ارزیابی مدل و تولید سناریوهای آتی (Wilby et al., 2014). در مرحله انتخاب بهترین متغیرهای مستقل از آنجایی که احتمال می‌رود پیش‌گویی شبکه‌های نزدیک به منطقه مطالعاتی نیز بر

#### کوچک‌مقیاس کردن مقادیر بارندگی و دما

در پژوهش حاضر به‌منظور برآورد داده‌های بارش و دمای آینده از مدل گردش عمومی جو<sup>۱</sup> CanESM2 تحت سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 و از مدل ریزمقیاس-نمایی آماری 4.2.9 SDSM<sup>۳</sup> جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های خروجی استفاده شد. مدل CanESM2 یک مدل جامع و جفت شده و چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی جفت شده (CGCM4<sup>۴</sup>) است و جزء سری مدل‌های CMIP5<sup>۵</sup> و گزارش پنجم (AR5<sup>۶</sup>) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC<sup>۷</sup>) می‌باشد (Arora et al., 2011). جدول (۲) مشخصات این مدل را نشان می‌دهد. در گزارش پنجم دقت شبیه‌سازی و وضوح مکانی مدل-ها نسبت به گزارش پیشین افزایش یافته است. همچنین در سناریوهای RCP، محدوده وسیع‌تر و مستدل‌تری از خط

1 Second generation Canadian Earth System model

2 Representative Concentration Pathway

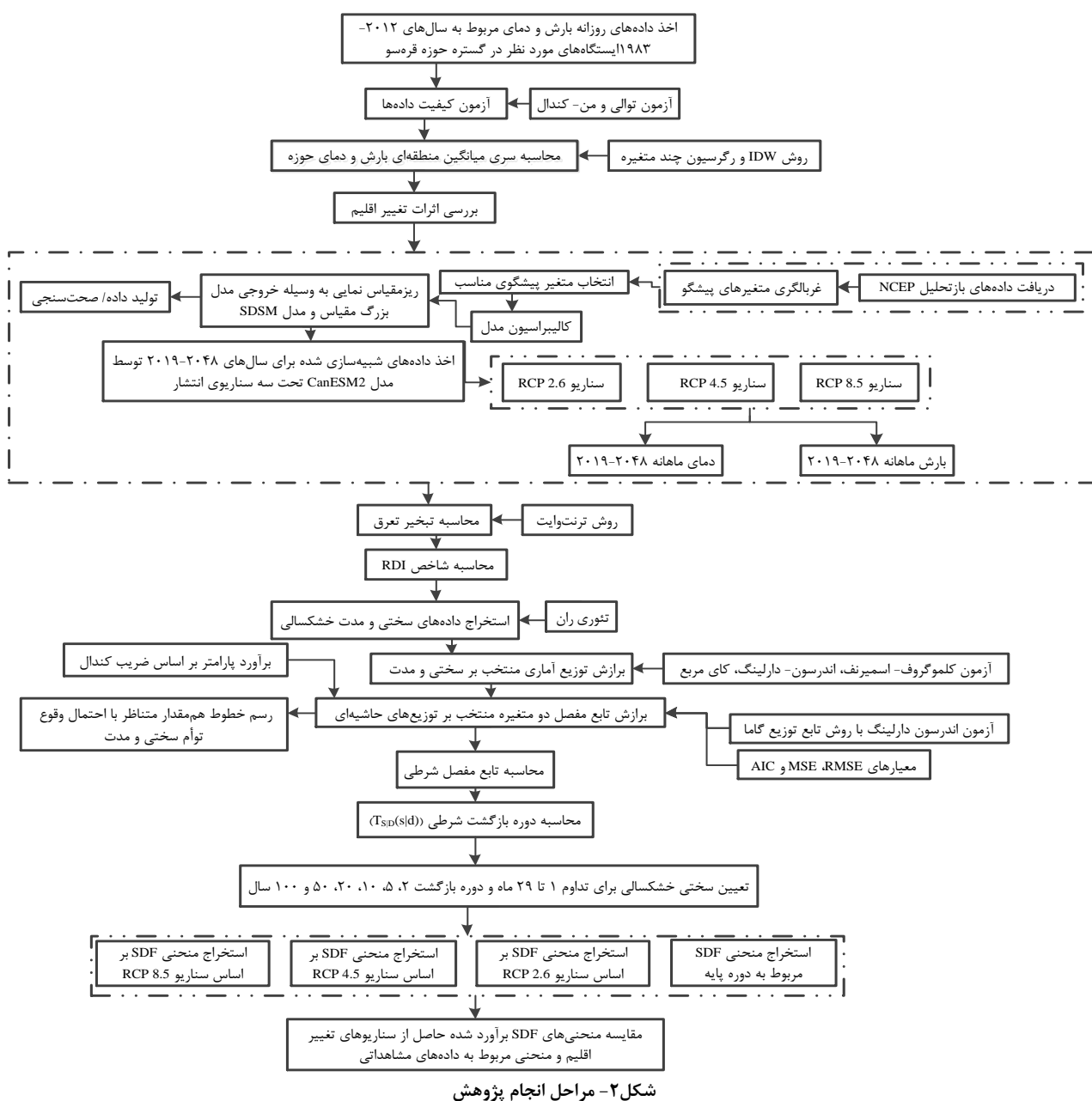
3 Statistical Downscaling Model

4 Fourth-generation Coupled Global Climate Model

5 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

6 Fifth Assessment Report

7 Intergovernmental Panel on Climate Change



جدول ۲- مشخصات مدل CanESM2 (Arora et al., ۲۰۱۱)

نام مدل	قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول × عرض)	قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه) (طول × عرض)	گروه مؤسس	دوره شبیه‌سازی تاریخی/آینده	سناریوهای شبیه‌سازی	مرجع
CanESM2 (۲۰۱۰)	۲,۸۱° × ۲,۸۱°	۱,۴۱° × ۰,۹۴°	(CCCMA) <sup>۱</sup> ، کانادا	۱۸۵۰-۲۰۰۵ / ۲۰۰۶-۲۱۰۰/	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5	آرورا و همکاران (۲۰۱۱)

1. Canadian Center for Climate Modelling and Analysis

انتخاب می‌شود که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشته باشد. برای آزمون کارایی مدل، از معیارهای  $R^2$ ،  $RMSE^1$ ،  $MAE^2$  و ضریب  $NSE^1$  استفاده می‌شود (Taei Semiromi et al., ۲۰۱۱)

بارش و دمای ایستگاه‌ها تأثیرگذار باشد، بنابراین برای افزایش دقت مدل، علاوه بر داده‌های شبکه مربوط به حوزه، از داده‌های شبکه مجاور و نزدیک به ایستگاه‌ها نیز استفاده گردید. بعد از آن، کالیبراسیون مدل انجام می‌پذیرد و با سعی و خطا و در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی، بهترین دوره از بین آن‌ها سری‌ای

1 Root Mean Square Error  
2 Mean absolutely error

ایجاد توزیع دومتغیره سختی- مدت خشکسالی استفاده خواهد شد. به‌طورکلی رویکرد مفصل شامل دو مرحله می‌باشد: ۱- برازش توابع توزیع حاشیه‌ای، ۲- تعیین ساختار وابستگی بین حاشیه‌ها. برای برازش توابع مفصل بر خصوصیات خشکسالی، احتیاج به توابع توزیع حاشیه‌ای آن‌ها می‌باشد ( Nazemi and Elshorbagy, 2012). در این مطالعه توزیع‌های حاشیه‌ای به توزیع‌های ذکرشده محدود نمی‌گردد. بدین منظور، ۳۷ تابع توزیع تک متغیره بر مقادیر داده‌های مشاهداتی سختی و مدت خشکسالی برازش داده شد. روش تخمین پارامتر توزیع‌های حاشیه‌ای، روش حداکثر درست‌نمایی<sup>۳</sup> (Lai, 2004) می‌باشد. برای انتخاب بهترین تابع توزیع حاشیه‌ای، از سه آزمون کلموگروف- اسمیرنوف<sup>۴</sup>، اندرسون- دارلینگ<sup>۵</sup>، کای اسکوئر<sup>۶</sup>، (Song and Singh, 2010) استفاده گردید.

#### برازش تابع مفصل

در این پژوهش، از توابع مفصل دومتغیره ارشمیدسی شامل کلاتون<sup>۷</sup>، فرانک<sup>۸</sup> و گامبل<sup>۹</sup> (Shiau, 2006; Nelsen, 2007) و خانواده پلاکت (Kao and Govindaraju, 2008) جهت برازش بر توزیع‌های حاشیه‌ای و ایجاد احتمال توأم سختی و مدت خشکسالی در نظر گرفته شدند. جهت برازش توابع مفصل بر داده‌های سختی و مدت خشکسالی، تخمین پارامتر مورد نیاز است. روش‌های متعددی برای تخمین پارامتر وابستگی مفصل بر جفت داده‌ها وجود دارد. در این پژوهش، از روش برآورد بر اساس ضریب کندال استفاده شده است. در این روش مقدار  $\theta$  برحسب تابعی از  $\tau$  کندال محاسبه می‌شود (Nelsen, 2007). به‌منظور تعیین تابع مفصل مناسب از آماره آزمون نکویی برازش اندرسون دارلینگ با روش تابع توزیع گاما یا AnGamma استفاده شد (Genest et al., 2009). همچنین، از معیارهای RMSE<sup>۱۰</sup> و MSE<sup>۱۱</sup> (Rajsekhar et al., 2014) برای انتخاب بهترین تابع مفصل استفاده شد.

#### دوره بازگشت شرطی

دوره بازگشت سختی و مدت خشکسالی، همچنین می‌توانند به‌صورت مشروط تعریف شوند. Modarres and Shiau (2009) برای تعیین روابط SDF خشکسالی، دوره بازگشت

(al., 2014). برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل SDSM در مرحله صحت‌سنجی، ۱۰۰ سری داده روزانه تولید شد. از بین آن‌ها سری‌ای انتخاب شد که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشت. به‌منظور بررسی میزان حساسیت مدل SDSM به خروجی مدل جهانی، شاخص‌های بارش و دما با استفاده از داده‌های تاریخی مدل CanESM2 در دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۳ شبیه‌سازی و سپس با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند و توانایی مدل بزرگ‌مقیاس در تولید سناریو برای دوره‌های آتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پس از این مراحل، با استفاده از داده‌های دوره زمانی آینده مدل بزرگ‌مقیاس موردنظر، داده‌های بارش و دما برای دوره زمانی ۲۰۴۸-۲۰۱۹ تحت سه سناریو تأیید شده IPCC برآورد می‌گردند و درنهایت به مقایسه نمودارهای داده‌های پایه مشاهداتی و محاسباتی برای دوره پایه و آینده پرداخته می‌شود.

#### شاخص RDI

ازآنجاکه پایش خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در مدیریت آب و محصولات کشاورزی اهمیت بسیاری دارد، بنابراین خشکسالی‌ها در این مطالعه توسط شاخص RDI اصلاح‌شده (Mosaedi and Ghabaei Sough, 2011a;b) با مقیاس سه‌ماهه و با هدف بررسی خشکسالی کشاورزی توصیف و در دوره پایه و آتی تحت سه سناریوی توصیف‌شده محاسبه می‌شوند که به دلیل محدودیت تعداد صفحات از شرح کامل آن اجتناب شده است. ذکر این نکته لازم است که شاخص مذکور بر مبنای نسبت بارندگی تجمعی به تبخیر-تعرق پتانسیل تجمعی در مقیاس زمانی معین تعریف می‌شود. پس از آن دو خصوصیت خشکسالی یعنی سختی و مدت با استفاده از تئوری ران<sup>۱</sup> (Yevjevich, 1967) استخراج می‌شوند و برای حد شروع و پایان خشکسالی مقدار صفر شاخص اختیار شده است.

#### تابع مفصل

کلمه مفصل برای اولین بار در ریاضیات و آمار توسط Sklar (1959) بر مبنای قضیه‌ای به نام خودش به کار گرفته شد. از یک نقطه نظر، مفصل‌ها توابعی می‌باشند که توابع توزیع چند متغیره را به توابع توزیع حاشیه‌ای‌شان متصل می‌کنند و از طرف دیگر، مفصل‌ها نوعی از توابع توزیع چند متغیره هستند که حاشیه‌های یک‌بعدی‌شان بر بازه (۰،۱) یکنواخت می‌باشد (Nelsen, 2007). در این پژوهش، از توابع مفصل دوبعدی برای

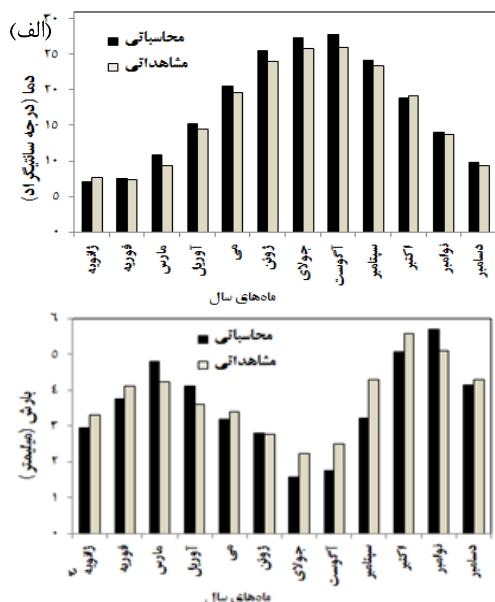
3. Maximum likelihood  
4. Kolmogorov-Smirnov  
5. Anderson-Darling  
6. Chi-Squared  
7. Clayton  
8. Frank  
9. Gumbel  
10. Akaike information criterion  
11. Mean Square Error

1. Nash-Sutcliffe efficiency  
2. Theory of Runs

بازگشت و مدت معین خشکسالی به دست می‌آیند. حال با داشتن سختی و مدت‌های مختلف به ازای دوره بازگشت معین می‌توان منحنی‌های SDF را رسم کرد.

### نتایج و بحث

هرکدام از دو دوره ۱۹۸۳-۱۹۹۷ و ۲۰۱۲-۱۹۹۸ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی متغیر بارش مورد استفاده قرار گرفته‌اند و دوره‌های ۲۰۰۶-۱۹۸۳ و ۲۰۱۲-۲۰۰۷ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی متغیر دما در مدل SDSM انتخاب شدند. در شکل (۳) و جدول ۳ نتایج چ مربوط به دوره صحت-سنجی و شبیه‌سازی دوره پای به مدل SDSM برای بارش و دما آورده شده است.



شکل ۳- مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی (الف) بارش و (ب) دمای می‌انگین در دوره صحت‌سنجی

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی و شبیه‌سازی دوره پایه

متغیر	دوره	R <sup>2</sup>	سطح معناداری آزمون F	RMSE	MAE	NSE
بارش	صحت‌سنجی	۰/۸۲	۹/۵ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۶۷
	شبیه‌سازی دوره پایه	۰/۸۷	۹/۴ × ۱۰ <sup>-۸</sup>	۰/۶۶	۰/۵۸	۰/۴۷
دما	صحت‌سنجی	۰/۹۹	۱/۷ × ۱۰ <sup>-۱۹</sup>	۱/۰۳	۰/۸۷	۰/۹۸
	شبیه‌سازی دوره پایه	۰/۹۶	۱/۶ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۱/۴۶	۱/۳	۰/۹۶

و دمای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۳ برای ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده می‌شود. مقایسه بارش و دمای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که به طور کلی مقادیر میانگین بارش و دمای سالانه در حوضه آبریز قره سو کم برآورد و بیش برآورد شده‌اند.

شرطی  $T_{SID}(s|d)$  را تعریف کردند که از معادلات ۱ و ۲ به دست می‌آید:

(رابطه ۱)

$$T_{SID}(s|d) = \frac{1}{Y[1-F_{SID}(s|d)]} = \frac{1}{Y\{1-C_{FS|FD}[F_S(s)|F_D(d)]\}}$$

(رابطه ۲)

$$C_{FS|FD}[F_S(s)|F_D(d)] = \frac{\partial C(F_S(s), F_D(d))}{\partial F_D(d)}$$

$C_{FS|FD}[F_S(s)|F_D(d)]$  تابع مفصل شرطی می‌باشد و نشان‌دهنده میزان احتمال توأم وقوع خشکسالی با مقدار سختی  $s$  به ازای مدت خشکسالی برابر یا کمتر از مقدار  $d$  می‌باشد.  $T_{SID}(s|d)$  برابر است با دوره بازگشت رویداد خشکسالی با مقدار سختی معین برای زمانی که مدت خشکسالی از حد آستانه  $d$  کمتر یا برابر باشد.  $Y$  نرخ بازگشت خشکسالی می‌باشد (Shiau and Modarres, 2009).

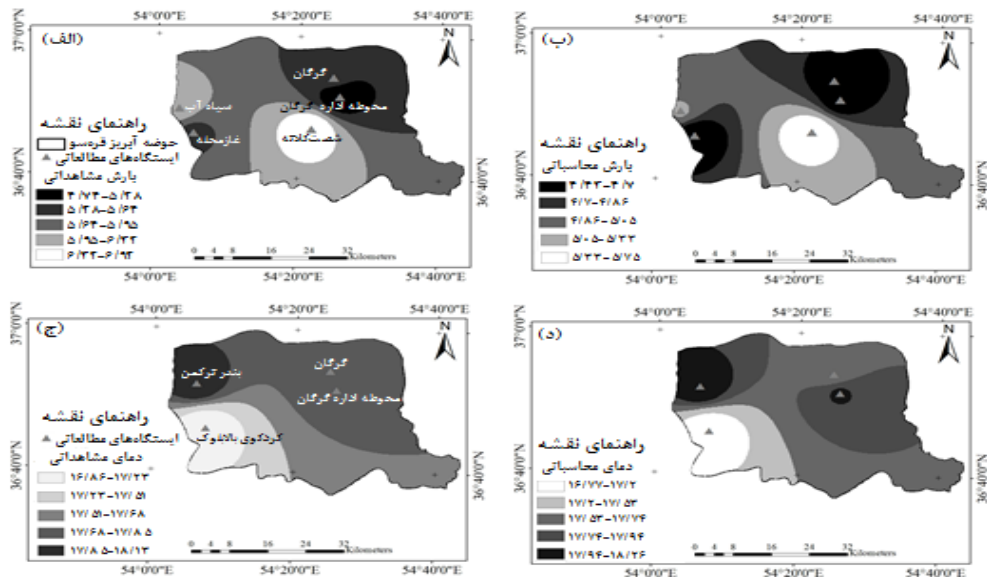
### رسم منحنی‌های SDF

به منظور جمع‌بندی کلی، پس از برازش تابع مفصل مناسب بر داده‌های سختی و مدت خشکسالی، برای توسعه منحنی‌های SDF ابتدا تابع مفصل شرطی بر طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در رابطه ۱، مقادیر منتخب ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال برای  $T_{SID}(s|d)$  و مقادیر معین مدت خشکسالی در بازه معینی از اعداد طبیعی در نظر گرفته می‌شود و مقادیر  $Y$  نیز محاسبه می‌شود. در نهایت با تعدادی معادله غیرخطی تک متغیره مواجه هستیم که در آن تابع توزیع سختی خشکسالی مجهول می‌باشد. پس از ریشه‌یابی و حل معادلات مذکور با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، مقدار احتمال تجمعی سختی مجهول به ازای دوره بازگشت و 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

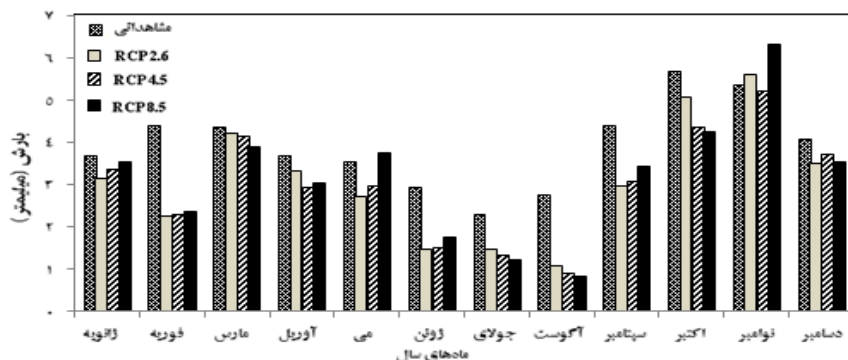
در مورد بارش و دما با توجه به شکل ۳ بیشترین اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای به ترتیب در ماه سپتامبر و آگوست با میزان ۱/۰۸ میلی‌متر و ۱/۸۵ درجه سانتی‌گراد و کمترین اختلاف در ماه ژوئن و فوریه با میزان ۰/۰۱ میلی‌متر و ۰/۲۶ درجه سانتی‌گراد، اتفاق افتاده است. پراکنش مکانی بارش

نمی‌تواند از این تحولات بی‌تأثیر باشد. چراکه شمال شرق ایران، بیشتر تحت تأثیر توده آب و هوایی است که از طرف سیبری و غرب وارد کشور شده و منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد که پدیده گرمایش جهانی تأثیر منفی بر روی سامانه پرفشار سیبری داشته و موجب تضعیف آن می‌گردد. این نتایج با یافته‌های *Taei Semiroi et al.* (2014) و *Katiraei et al.* (2007) در مورد روند نزولی بارش تطابق دارد. تقریباً در اکثر ماه‌ها به‌جز ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر در همه سناریوها دما افزایش می‌یابد. در همه سناریوها دما افزایش می‌یابد. همچنین در سناریوی RCP 8.5 میزان تغییرات افزایشی دما نسبت به سایر سناریوها بیشتر می‌باشد و در بیش از نیمی از ماه‌ها تغییرات افزایشی دما در RCP 4.5 بیشتر از RCP 2.6 می‌باشد. نتایج مذکور به دلیل آن است که میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و سایر اثرات منفی در RCP 8.5 بیشتر و در RCP 2.6 خوشبینانه‌تر می‌باشد و RCP 4.5 سناریوی میانه می‌باشد.

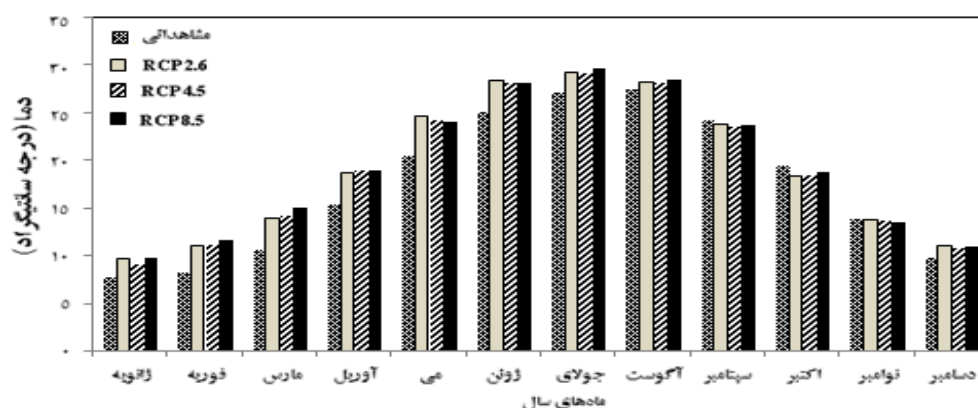
البته دمای محاسباتی دو ایستگاه کردکوی و گرگان کمتر از دمای مشاهداتی می‌باشد ولی الگوی کلی بارش و دما در دوره شبیه‌سازی به خوبی شناسایی شده است. در پایان، داده‌های بارش و دما برای دوره آینده نزدیک ۲۰۴۸-۲۰۱۹ تحت سناریوهای مختلف تولید می‌شوند. در شکل ۵ و ۶ به ترتیب، داده‌های میانگین ماهانه بارش و دمای مشاهداتی دوره پایه در مقابل داده‌های آینده تولیدشده این دو متغیر تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، و RCP 8.5 آورده شده‌اند. نتایج شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که به‌طور کلی متغیر بارش ماهانه منطقه، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف کاهش می‌یابد. دلیل کاهش بارندگی را می‌توان افزایش روند گرمایی در زمین و پاسخ متفاوت سامانه‌های بزرگ‌مقیاس جوی تأثیرگذار بر بارش منطقه دانست؛ از آن جمله اینکه اغلب مطالعات نشان می‌دهند که افزایش دمای کره زمین موجب تقویت پرفشار جنب‌حاره‌ای و تأثیر منفی آن بر بارش عرض‌های میانی می‌گردد (*Taei Semiroi et al.*, 2014). شرایط اقلیمی در ایران عموماً



شکل ۴- پهنه‌بندی (الف) بارش داده‌های دیده‌بانی شده (ب) بارش داده‌های شبیه‌سازی شده (ج) دمای داده‌های دیده‌بانی شده (د) دمای داده‌های شبیه‌سازی شده حوضه آبریز قره‌سو (۲۰۰۵-۱۹۸۳)



شکل ۵- مقایسه میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و تولیدشده سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5



شکل ۶- مقایسه میانگین ماهانه بارش مشاهدتی و تولید شده سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5

سناریوها افزایش می‌یابد. اما در مورد خشکسالی‌های با سختی بیشتر از ۸، احتمال وقوع توأم رویدادها در آینده تحت سناریوی RCP 8.5 کاهش پیدا می‌کند. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت احتمال وقوع توأم خشکسالی‌های با سختی بالا در آینده کاهش می‌یابد.

#### ترسیم منحنی SDF

برای رسم منحنی SDF ابتدا توابع مفصل شرطی محاسبه شدند که معادلات آن‌ها در جدول (۵) آورده شده است. با جایگذاری هریک از معادلات زیر در رابطه ۱، دوره بازگشت شرطی  $T_{SD}(s|d)$  برحسب  $F_S(s)$ ،  $F_D(d)$  و  $\theta$  به دست می‌آید. با انجام بقیه مراحل که در بخش قبل توضیح داده شد، مقادیر سختی خشکسالی به ازای تداوم و دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه می‌شود. در نهایت منحنی‌های SDF خشکسالی بر مبنای تابع مفصل برای دوره بازگشت‌های منتخب ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال در دوره پایه و دوره آینده تحت سناریوهای مختلف توسعه می‌یابند و در شکل ۸ نشان داده می‌شوند. همه منحنی‌های SDF نمایش داده‌شده، دارای الگوی محدب می‌باشند. به‌عبارت‌دیگر، سرعت افزایش سختی خشکسالی در تداوم‌های کوتاه‌تر بیشتر است و در تداوم‌های طولانی‌تر سرعت آن کاهش می‌یابد و در نهایت به یک مقدار ثابت می‌رسد. همچنین تغییرات شیب نمودار نشان می‌دهد که معمولاً در مدت‌های کمتر از ۱۰ ماه، دوره بازگشت به میزان سختی و تداوم حساسیت بالایی دارد. یعنی در تداوم‌های کوتاه، با تغییر مقدار سختی و مدت، دوره بازگشت تغییرات زیادی دارد و با افزایش تداوم از تغییرپذیری آن کاسته می‌شود. طبق شکل ۸، برای هر تداوم معین خشکسالی، مقادیر سختی بالاتر، دوره بازگشت طولانی‌تری دارند. به‌طور مثال، در دوره پایه، دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۱۰ و مدت ۶

#### سختی و مدت خشکسالی

مقادیر ضریب همبستگی  $\tau$  کندال ( Nazemi and Elshorbagy, 2012) نیز نشان می‌دهد که دو متغیر سختی و مدت خشکسالی از وابستگی معنادار و بالایی برخوردارند. توابع توزیع حاشیه‌ای منتخب برای سختی و مدت سری میانگین در دوره پایه به ترتیب، ویبول دومرحله‌ای<sup>۱</sup> و پارتوی تعمیم‌یافته<sup>۲</sup>، در سناریوی RCP 2.6، ویک‌بای<sup>۳</sup>، در سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5، لوگ پی‌رسون تی‌پ<sup>۴</sup> و حد نهایی تعمیم‌یافته<sup>۵</sup> می‌باشند.

#### برازش تابع مفصل

در جدول (۴) توابع مفصل برازش یافته بر توزیع‌های حاشیه‌ای سختی و مدت خشکسالی و پارامترهای مربوطه، مقادیر معیارهای ارزیابی آن‌ها و p-value مربوط به آزمون نکویی برازش در دوره پایه و آتی آورده شده است. خطوط هم‌مقدار احتمال توأم سختی و مدت خشکسالی در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به شکل ۷ مشخص می‌شود که در دوره آینده تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 احتمال توأم وقوع خشکسالی‌های شدید (با سختی بیشتر از ۷ و مدت بیشتر از ۸ ماه) به‌طور مشهود، نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد و با کاهش سختی و مدت خشکسالی‌ها از میزان این اختلاف کاسته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، در یک سطح احتمال توأم ثابت میزان سختی و مدت در سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 افزایش داشته است. در مورد سناریوی RCP 8.5 احتمال توأم وقوع خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت نسبت به دوره پایه و سایر

1. Phased Bi-Weibull
2. Generalized Pareto
3. Wakeby
4. Log-Pearson type III
5. Generalized Extreme Value

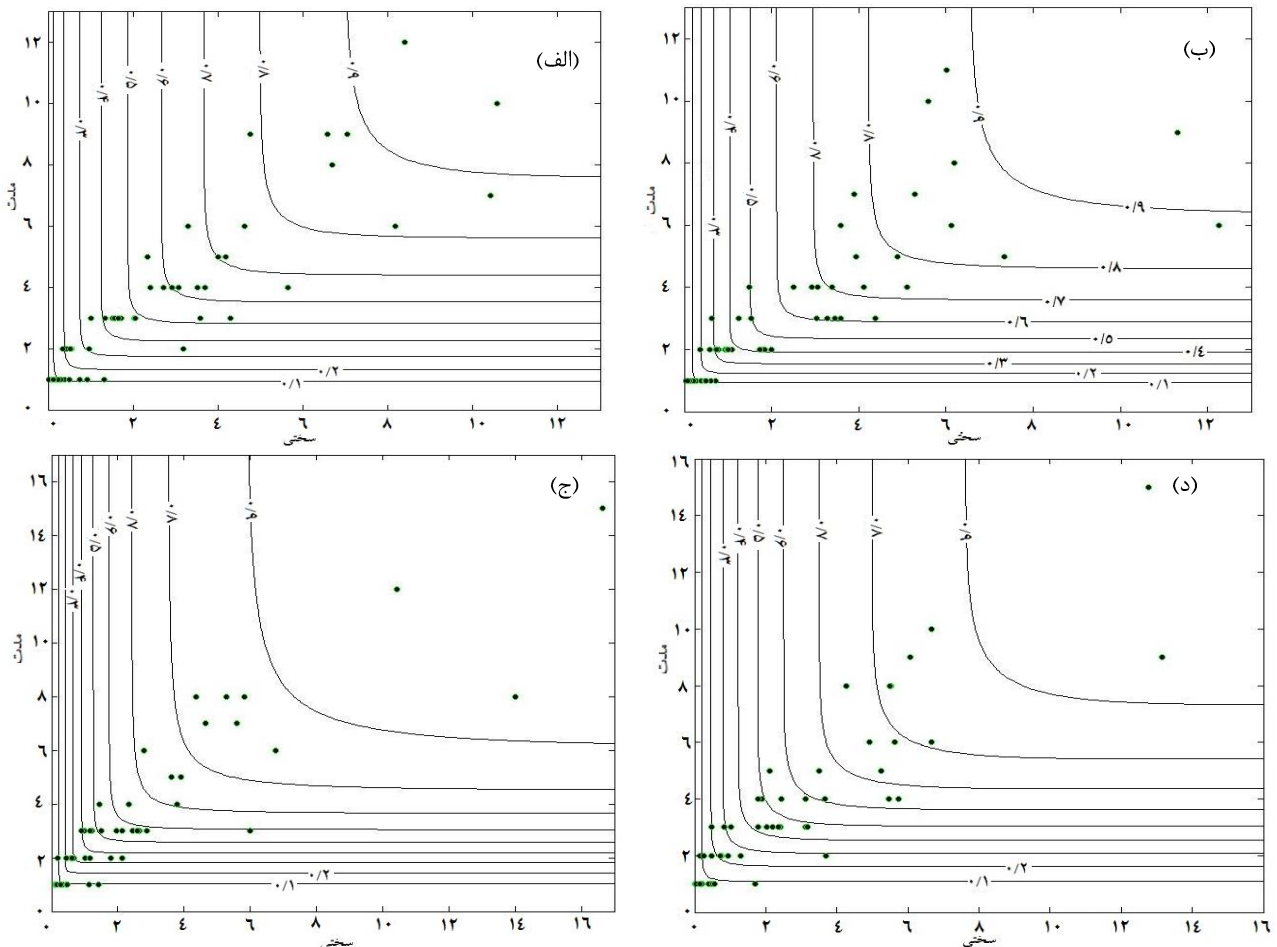


مقایسه منحنی‌های SDF نتایج زیر حاصل می‌شود: در RCP 2.6، تنها در رویدادهای کوتاه‌مدت (۲ ماه یا کمتر)، دوره بازگشت ثابت است و دوره بازگشت سایر رویدادها در آینده افزایش می‌یابد. به علاوه در آینده، میزان سختی و مدت یک رویداد با دوره بازگشت معین، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. البته در رویدادهایی که تداوم بیشتر از ۱۰ ماه دارند و همچنین با افزایش سطح دوره بازگشت، میزان کاهش سختی خشکسالی‌ها نیز افزایش می‌یابد.

ماه، ۵ سال می‌باشد. دوره بازگشت همین رویداد در سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب برابر ۲۱، ۱۷ و ۴ سال می‌باشد. در یک مثال دیگر، سختی یک رویداد با دوره بازگشت و تداوم معین به ترتیب، ۱۰۰ سال و ۱۲ ماه در دوره پایه ۲۹ و در سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب برابر ۱۵، ۲۳ و ۴۱ می‌باشد. به طور کلی، با مقایسه بازه سختی در منحنی‌ها، در آینده وقوع خشکسالی‌های شدیدتری تحت سناریوی RCP 8.5 نسبت به سایرین انتظار می‌رود. با

جدول ۴- نتایج مناسب‌ترین تابع برازش یافته بر سختی و مدت خشکسالی و پارامترهای آن‌ها در سری میانگین

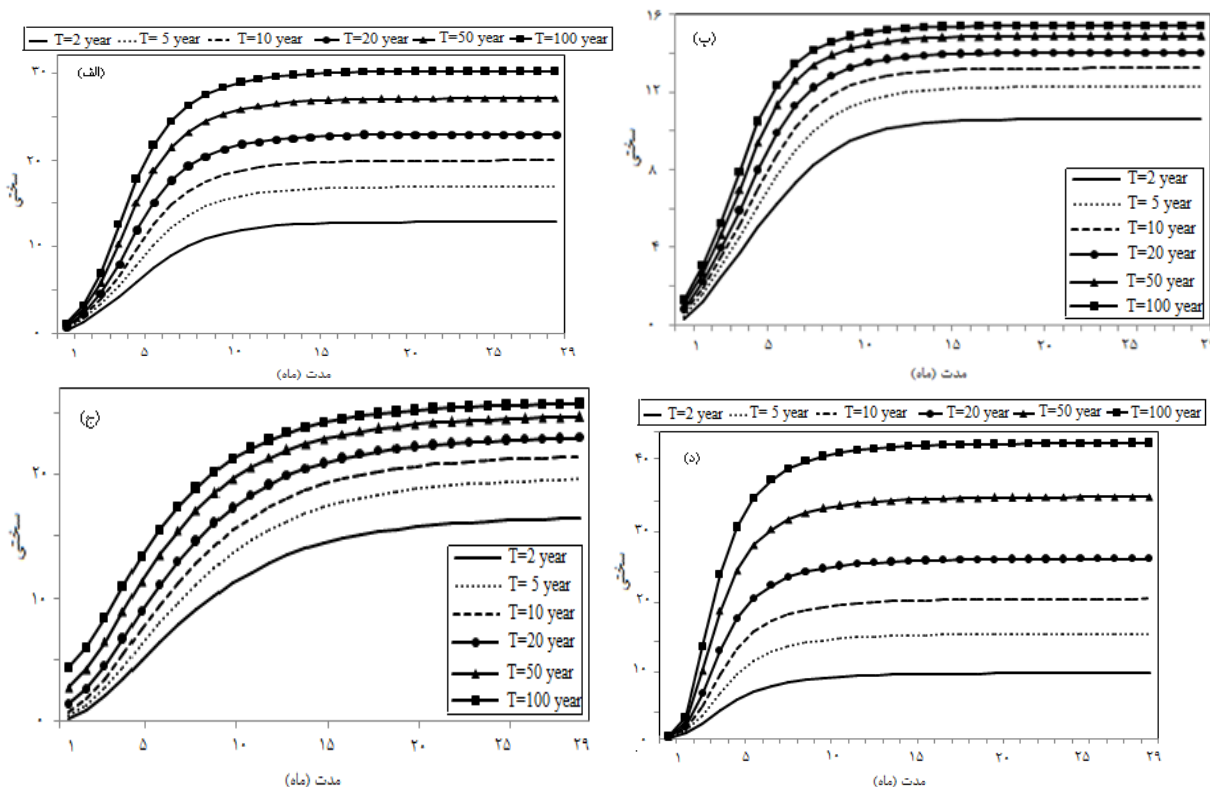
دوره	تابع مفصل	پارامتر تابع مفصل ( $\theta$ )	AIC	MSE	RMSE	مقادیر p-value در آزمون AnGamma
دوره پایه	فرانک	۱۶/۹۱۷	-۹۴/۳۱	۰/۰۰۴	۰/۰۶	۰/۸۲
RCP 2.6	فرانک	۱۷/۵۷۲	-۱۲۱/۴	۰/۰۰۴	۰/۰۶	۰/۹۱
RCP 4.5	پلاکت	۶۳/۱۲	-۱۲۲/۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۵	۰/۷۵
RCP 8.5	کلایتون	۶/۵۱۵	-۱۳۳/۳	۰/۰۰۳	۰/۰۵	۰/۹۴



شکل ۷- خطوط هم‌مقدار احتمال تجمعی توأم سختی و مدت در (الف) دوره پایه، (ب) RCP 2.6، (ج) RCP 4.5 و (د) RCP 8.5

جدول ۵- معادله توابع مفصل شرطی مربوط به سری میانگین و ایستگاهها

نام تابع مفصل	$C_{F_S F_D} [F_S(s) F_D(d)]$
فرانک	$\frac{e^{-F_D(d) \times \theta} [(e^{-\theta} - 1) + 1]}{(e^{-\theta} - 1)(e^{-F_D(d) \times \theta} - 1)}$
کلایتون	$\{1 + F_D(d)^\theta (F_S(s)^\theta - 1)\}^{-\frac{1}{\theta} - 1}$
پلاکت	$\frac{1}{2} + \frac{-1 + F_D(d) + F_S(s) - F_D(d) \times \theta + F_S(s) \times \theta}{2\sqrt{[1 + (\theta - 1)(F_S(s) + F_D(d))]^2 - 4 \times F_S(s) \times F_D(d) \times \theta(\theta - 1)}}$



شکل ۸- منحنی SDF خشکسالی در دوره (الف) پایه، (ب) سناریوی RCP 2.6، (ج) سناریوی RCP 4.5 و (د) RCP 8.5

۳ ماه در آینده افزایش و میزان سختی کاهش می‌یابد. البته میزان تغییرات در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بیشتر می‌باشد. همچنین میزان کاهش سختی در این سناریو کمتر از RCP 2.6 می‌باشد.

در RCP 8.5 مانند RCP 2.6، سختی رویدادهای با دوره بازگشت معین ۲ سال، در آینده کاهش و دوره بازگشت افزایش می‌یابد. اما میزان کاهش سختی نسبت به RCP 2.6 بیشتر می‌باشد. در مورد رویدادهای با دوره بازگشت ۵ سال و تداوم کمتر از ۸ ماه، میزان سختی خشکسالی در آینده افزایش و تداوم و دوره بازگشت‌ها کاهش می‌یابد. در تداوم‌های بالاتر برعکس می‌باشد و سختی کاهش می‌یابد. در سایر دوره بازگشت‌ها و رویدادهای با تداوم بیشتر از ۲ ماه، میزان سختی افزایش می‌یابد و تداوم و دوره بازگشت کاهش می‌یابد.

در همه موارد ذکرشده، میزان تغییرات با افزایش دوره بازگشت بیشتر می‌شود. همچنین میزان تغییرات در RCP 8.5

در RCP 4.5 تغییرات دوره بازگشت در رویدادهای مختلف، متغیر است. در رویدادهای با تداوم کمتر از ۱۰ ماه و دوره بازگشت معین ۲ سال، میزان سختی خشکسالی در آینده کاهش و تداوم و دوره بازگشت آن افزایش می‌یابد. اما در تداوم‌های بیشتر از ۱۰ ماه، میزان سختی افزایش و دوره بازگشت کاهش می‌یابد. در رویدادهای با دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال، تغییرات مانند دوره بازگشت ۲ سال می‌باشد. با این تفاوت که در این دو، آستانه تداوم به ترتیب به ۱۳ و ۱۶ ماه تغییر می‌یابد. در رویدادهای با تداوم کوتاه (۲ ماه و کمتر) و دوره بازگشت ۲۰ سال، سختی به مقدار ناچیزی در آینده افزایش و در پی آن دوره بازگشت کاهش می‌یابد. اما در رویدادهای با تداوم بیشتر، میزان سختی خشکسالی کاهش و دوره بازگشت افزایش می‌یابد. همچنین در تداوم‌های بیشتر از ۲۵ ماه، اختلاف دوره بازگشت در حال و آینده تقریباً به صفر می‌رسد. در دوره بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله، میزان دوره بازگشت در رویدادهای با تداوم بیشتر از

4.5 و 8.5 RCP تولید شدند. متغیر بارش و دمای ماهانه منطقه، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در اکثر ماه‌ها بخصوص در ماه جولای، میزان تغییرات بارش نسبت به 8.5 RCP کمتر می‌باشد. همچنین در سناریوی 8.5 RCP، میزان تغییرات افزایشی دما نسبت به سایر سناریوها بیشتر می‌باشد. به‌طور کلی معیارهای ارزیابی و همچنین روش‌های ترسیمی نشان می‌دهند که مدل SDSM توانایی مدل‌سازی دوره‌های گذشته و آینده را در حوزه قره‌سو برای داده‌های بارش و دما را دارا می‌باشد و می‌توان از آن در برآورد این متغیرها در دوره‌های آینده بهره برد.

درنهایت منحنی‌های SDF خشکسالی مربوط به سری میانگین در دو دوره استخراج شدند. نتایج مربوط به رسم منحنی‌های مذکور نشان داد در سناریوی 2.6 RCP، تنها در رویدادهای کوتاه‌مدت، دوره بازگشت ثابت است و دوره بازگشت سایر رویدادها در آینده افزایش می‌یابد. در 4.5 RCP، دوره بازگشت رویدادهای کوتاه‌مدت با دوره بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ سال در آینده افزایش می‌یابد. همچنین دوره بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله در رویدادهای با تداوم بیشتر از ۳ ماه در آینده افزایش و میزان سختی کاهش می‌یابد و در 8.5 RCP، در دوره بازگشت-های ۱۰ سال به بالا با تداوم بیشتر از ۲ ماه، میزان سختی افزایش می‌یابد و تداوم و دوره بازگشت کاهش می‌یابد. مقادیر سختی خشکسالی و دوره بازگشت خشکسالی با استفاده از سناریوی 8.5 RCP به ترتیب بیشترین مقدار افزایش و کاهش را داشته است و این در مورد سناریوی 2.6 RCP برعکس می‌باشد. سناریوی 4.5 RCP مقادیر را متعادل‌تر محاسبه نموده است.

به‌ویژه در دوره بازگشت‌های بیشتر از ۱۰ سال، بیشتر از سایر سناریوها می‌باشد. با توجه به تعریف هر کدام از سناریوها و مقایسه نتایج حاصل برای سختی و دوره بازگشت خشکسالی مشخص گردید که مقادیر سختی خشکسالی و دوره بازگشت خشکسالی با استفاده از سناریوی 8.5 RCP به ترتیب بیشترین مقدار افزایش و کاهش را داشته است و مقادیر سختی و دوره بازگشت در سناریوی 2.6 RCP به ترتیب بیشترین مقدار کاهش و افزایش را داشته است و سناریوی 4.5 RCP مقادیر را متعادل-تر محاسبه نموده است. زیرا سناریوی 8.5 RCP درواقع بیشترین رشد جمعیت، استفاده از انرژی و درنهایت تولید گازهای گلخانه‌ای را در نظر گرفته، درحالی‌که سناریوی 2.6 RCP کمترین رشد جمعیت، افزایش استفاده از انرژی‌های نو و درنهایت کمترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای را در محاسبات در نظر گرفته و سناریوی 4.5 RCP حالت متعادل رشد را لحاظ نموده است. به‌طور کلی در تحلیل فراوانی خشکسالی، سناریوی 8.5 RCP بیشترین تغییرات را نسبت به سایر سناریوها داشته است که این به دلیل این است که در این سناریو میزان واداشت تابشی در انتهای قرن بیست و یکم به ۸/۵ وات بر مترمربع می‌رسد و با نتایج تحقیق Li et al. (2015) نیز مطابقت دارد.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به‌منظور استخراج منحنی‌های SDF خشکسالی حوزه آبریز قره‌سو تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم، ابتدا پارامترهای اقلیمی بارش و دما در دوره آینده با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و داده‌های خروجی مدل بزرگ‌مقیاس CanESM2 تحت سه سناریوی 2.6 RCP، 8.5 RCP

## REFERENCES

- Arora, V. K., Scinocca, J. F., Boer, G. J., Christian, J. R., Denman, K. L., Flato, G. M., Kharin, 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.
- Asadi Zarch, M. A. Mobin, M. H., Malekinejad, H., Dastorani, M. T., Rezaei Zarchi, S. 2009. Introduce a new index to determine drought severity, duration and its extent on arid regions of Iran. In: *5th National Seminar on Watershed Management*, 22-23 Apr, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Farsi)
- Bazrafshan, J., Nadi, M. and Ghorbani, Kh. (2015). Comparison of Empirical Copula-Based Joint Deficit Index (JDI) and Multivariate Standardized Precipitation Index (MSPI) for Drought Monitoring in Iran. *Water Resources Management*, 29(6), 2027-2044.
- Farrokhnia, A. and Morid, S. (2008). Analysis of drought severity and duration using Copula functions. In: *4th National Congress on Civil Engineering*, 6-8 May, Tehran University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Genest, Ch., Rémillard, B., Beaudoin, D. (2009). Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study. *Insurance: Mathematics and Economics*, 44(2), 199-213.
- Ghavidel Rahimi, Y. (2010). Statistical reveal the effect of global warming on the Jolfa annual precipitation anomalies using artificial neural networks. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 21(2), 65-82. (In Farsi)
- Golmohammadi, M. and Massah Bavani, A. R. (2011). The Perusal of Climate Change Impact on Drought Intensity and Duration. *Journal of Water and Soil*, 25(2), 315-326.
- Khalili, A. (1997). Integrated water plan of Iran.

- Meteorological studies, Ministry of power, Iran.*
- 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 pp.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- Kao, S. C., Govindaraju, R. S. (2008). Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via the Plackett family of copulas. *Water Resources Research*, 44(2), 1-19.
- Katiraei, P. S., Hojiam, S. and Irannejad, P. (2007). Contribution of frequency and intensity variations of daily precipitation in precipitation trend in Iran in 1961-2001 period. *Journal of the Earth and Space Physics*, 33(1), 67-83. (In Farsi)
- Kwak, J., Kim, S., Singh, V. P., Kim, H. S., Kim, D., Hong, S., Lee, K. (2015). Impact of Climate Change on Hydrological Droughts in the Upper Namhan River Basin, Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(2), 376-384.
- Laio, F., (2004). Cramer-von Mises and Anderson-Darling goodness of fit tests for extreme value distributions with unknown parameters. *Water Resources Research*, 40(9), 1-10.
- Li, J., Zhang, K., Chen, Y. D., Singh, V. P. (2015). Future joint probability behaviors of precipitation extremes across China: Spatiotemporal patterns and implications for flood and drought hazards. *Global and Planetary Change*, 124, 107-122.
- Moradi, H. R., Sepahband, A. R. and Khazaei, M. (2009). Evaluating meteorological and hydrological drought by modified SPI and SDI (case study: Khorram abad Basin). In: *5th National Seminar on Watershed Management*, 22-23 Apr, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. (In Farsi)
- Mosaedi, A. and Ghabaei Sough, M. (2011a). Modification of Reconnaissance Drought Index (RDI) based on relevant probability distribution function in arid and semi-arid regions of Iran. In: *The first National Conference on Agricultural Meteorology and Water Management*, 22-23 november, Tehran University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Mosaedi, A. and Ghabaei Sough, M. (2011b). Modification of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on Relevant Probability Distribution Function. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 1206-1216. (In Farsi)
- Nazemi, A. R., Elshorbagy, A. (2012). Application of copula modelling to the performance assessment of reconstructed watersheds. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26(2), 189-205.
- Nelsen, R. B. 2007. *An introduction to copulas* (2th ed.). New York: Springer.
- Song, S., Singh, V. P. (2010). Meta-elliptical copulas for drought frequency analysis of periodic hydrologic data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(3), 425-444.
- Rajsekhar, D., Singh, V., Mishra, A. (2014). Hydrologic Drought Atlas for Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8), 1-20.
- Shiau, J. T. (2006). Fitting Drought Duration and Severity with Two-Dimensional Copulas. *Water Resources Management*, 20(5), 795-815.
- Shiau, J. T., Modarres, R. (2009). Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran. *Meteorological Applications*, 16(4), 481-489.
- Taei Semiromi, S., Moradi, H. R. and Khodaghali, M. (2014). Simulation and prediction some of climatic variables by multiple linear model SDSM and atmospheric general circulation models (case study: Neishabour). *Journal of Human & Environment*, 12(28), 1-16. (In Farsi)
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., Murphy, C., Connor, P. O., Hawkins, E. (2014). The Statistical DownScaling Model – Decision Centric (SDSM-DC): conceptual basis and applications. *Climate Research*, 61(3), 251-268.
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental Hydrological droughts. *hydrology paper*, Colorado State University, Fort Collins, CO, (No. 23). (302pp).
- Yusof, F., Hui-Mean, F., Suhaila, J. and Yusof, Z. (2013). Characterisation of Drought Properties with Bivariate Copula Analysis. *Water Resources Management*, 27(12), 4183-4207.