

The Effects of Climate Change on Drought Conditions Using Fuzzy Logic Under SSP3 and SSP5 Scenarios

S. Koochi¹, A. Azizian^{2*}, and H. Mazandarani Zadeh³

Abstract

Investigation of future drought trends and variations under climate change scenarios plays a key role in developing management strategies for minimizing drought's negative societal and economic impacts. Therefore, this study aimed to assess changes in drought characteristics such as the frequency of dry and wet periods, and the trend of drought index based on fuzzy drought index (at time scales of 3, 6, and 12 months) under SSP3 and SSP5 scenarios of CMIP6 during the 21st century. The data of 6 synoptic stations in Karoon River Basin during 1991-2014 have been used in this study. Assessing the reliability of climate models for drought monitoring with fuzzy drought index in the base period showed that the highest correlation coefficient ($CC > 0.90$) and the lowest root mean square error ($RMSE < 0.14$) are found at 3 and 6 month time-scales. In addition, monitoring the drought conditions of the basin under climatic scenarios in future periods revealed an increasing trend (at the 95% confidence level) and the wetness frequency in the northern, northwestern, and western of the basin is more likely to decrease. Over the periods 2046-2072 and 2073-2099 the result of the non-parametric Mann-Kendall test for the scenarios of SSP3_7.0 and SSP5_8.5 was 1.64. Therefore, due to the increasing trend of fuzzy drought index changes to dry conditions in Boroujerd, Safiabad, and Kuhrang stations, the risk of drought during the periods 2073-2099 and 2046-2072 are higher. Accordingly, water managers and farmers should adopt strategies in order to reduce the damages. The results of this research can be valuable in adopting policies and planning for sustainable management of water resources affected by climate change.

Keywords: Climate Change, Drought Monitoring, Fuzzy Drought Index, SSP Scenarios.

Received: April 21, 2022

Accepted: August 23, 2022

اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی تحت سناریوهای SSP3 و SSP5 با استفاده از منطق فازی

سکینه کوهی^۱، اصغر عزیزیان^{۲*} و حامد مازندران‌زاده^۳

چکیده

با توجه به اهمیت شناخت روند و تغییرات خشکسالی تحت سناریوهای اقلیمی در آینده، هدف از پژوهش حاضر بررسی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی همچون درصد فراوانی دوره‌های خشک و تر و روند تغییرات خشکسالی براساس شاخص خشکسالی فازی (در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه) تحت سناریوهای SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 از جدیدترین گزارش اقلیمی (CMIP6) است. لازم بذکر است که در تحقیق حاضر از داده‌های ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه آبخیز کارون طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۴ به عنوان دوره پایه استفاده شده است و پایش شرایط خشکسالی طی سه دوره آتی شامل ۲۰۲۰-۲۰۴۵، ۲۰۷۲-۲۰۹۹ و ۲۰۷۳-۲۰۹۹ انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که بهترین عملکرد داده‌های اقلیمی در تخمین شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه است، بطوریکه متوسط شاخص همبستگی در این دو مقیاس بیش از ۰/۹۰ و شاخص RMSE به ۰/۱۴ محدود شده است. علاوه بر این، پایش شرایط خشکسالی حوضه تحت سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آتی حاکی از وجود روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد، افزایش دوره‌های خشک و کاهش دوره‌های تر است. براساس نتایج، مقدار آماره آزمون ناپارامتری من‌کندال تحت سناریوهای SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 به ترتیب طی دوره ۲۰۷۲-۲۰۹۹ و ۲۰۴۶-۲۰۷۳ بیش از ۱/۶۴ برآورد شده است. بطورکلی نتایج نشان داد که مناطق شمالی، شمال‌غرب و غرب حوضه آبریز کارون بیشتر در معرض شرایط خشک قرار خواهند داشت. لذا با توجه به روند افزایش شاخص خشکسالی فازی به سمت شرایط خشک در ایستگاه‌های بروجرد، صفی‌آباد و کوهرنگ، خطر خشکسالی طی دوره‌های ۲۰۷۳-۲۰۹۹ و ۲۰۴۶-۲۰۷۳ در این ایستگاه‌ها بیشتر است و ضروری است که برای مدیریت منابع آب و کشاورزی در این مناطق برنامه‌ریزی و اقدام جدی انجام شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در راستای اعمال سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم مفید واقع شود.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، پایش خشکسالی، شاخص خشکسالی فازی،

سناریوهای SSP.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱

1- Ph.D. Student in Water Resources Engineering, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: Azizian@Eng.ikiu.ac.ir, Asghar.Azizian.IKIU@gmail.com

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.3.1.3](https://doi.org/10.17352/347.1401.18.3.1.3)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



یافت. همچنین، در مناطق شمال شرق این کشور تغییر رژیم از مرطوب به خشک رخ خواهد داد، درحالیکه در مناطق شمال غرب شرایط بالعکس بوده و رژیم از خشک به مرطوب تغییر می‌کند (Khan et al., 2020). بطور مشابه در تحقیق دیگری نشان داده شد که دوره‌های مرطوب در مناطق شمال آمریکای شمالی روند ثابتی داشته است و در مناطق جنوب غربی این قاره روند خشک شدن وجود دارد و این روند بدلیل تغییر اقلیم با افزایش همراه است (Swain and Hayhoe, 2015). با توجه به تحقیقات، وقوع خشکسالی‌های بیشتر و شدیدتر در بسیاری از مناطق برای قرن ۲۱ مورد انتظار است که نگرانی‌ها را در خصوص تأثیرات تغییرات آب و هوا بر خشکسالی افزایش داده است. بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در عمده تحقیقات از شاخص بارش استاندارد شده برای بررسی و پایش وضعیت خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم استفاده شده است. با توجه به اینکه شاخص SPI تنها مبتنی بر بارندگی است، بنابراین نمی‌تواند تغییرات مورد انتظار را به خوبی منعکس سازد و ممکن است برای دستیابی به ایده جامعی از شرایط خشکسالی کافی نباشد (Dubrovsky et al., 2009). براساس مطالعات مختلف، بمنظور پایش و تحلیل خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک (همچون کشور ایران) که نسبت بارش به تبخیر کمتر از ۰/۲ است، استفاده از شاخص‌هایی که صرفاً مبتنی بر بارش هستند، نمی‌تواند چندان مناسب باشد و لازم است تا از شاخص‌های چندعاملی در این موارد استفاده گردد (Bazrafshan et al., 2017). در همین راستا در تحقیقی با بررسی شاخص SPI مبتنی بر منبع بارش SM2RAIN-ASCAT نشان داده شد که میزان دقت در شناسایی دوره‌های خشک در اقلیم‌های خشک و خیلی خشک نسبت به مناطق مرطوب کاهش یافته است (Koochi et al., 2021). همچنین در مطالعه‌ای در حوضه رودخانه پرل طی دوره آماری ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ تحت سناریوهای انتشار ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ نشان داده شد که بزرگی ویژگی‌های خشکسالی همچون فراوانی وقوع به شدت به نوع شاخص انتخابی برای بررسی خشکسالی وابسته می‌باشد (Xu et al., 2021). این محققین عنوان داشتند که شاخص SPI با کم‌برآورد در تخمین فراوانی وقوع خشکسالی همراه است. علاوه بر این وجود مرزهای قطعی و معین بین طبقات مختلف خشکسالی در این شاخص این سؤال را مطرح می‌کند که چطور ممکن است تا با تغییرات بسیار جزئی در مقدار شاخص، شدت خشکسالی از طبقه‌ای به طبقه دیگر تغییر نماید؟ درحالیکه خشکسالی پدیده‌ای است که نمی‌توان به صورت قطعی و مشخص برای آن حد و مرزی مشخص نمود. از آنجایی که منطق فازی از جمله راهکارهای بررسی و توصیف پدیده‌های مبهم است، برخی از محققین تلاش نموده‌اند تا با استفاده از این منطق به ارائه شاخصی چندمتغیره برای بررسی خشکسالی بپردازند (Huang et

al., 2011). با افزایش تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین چالش‌ها تبدیل شده است و نگرانی‌های بسیاری نیز در رابطه با اثرات این پدیده بر بخش‌های مختلف بوجود آمده است (IPCC, 2013). آواره شدن سالانه ۲۲/۵ میلیون نفر از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ در سطح جهانی به دلیل حوادث مرتبط با تغییر اقلیم همچون سیل و خشکسالی، گویای اهمیت این پدیده و اثرات آن است (Bower et al., 2015). با توجه به اینکه بروز تغییرات زمانی و مکانی در بارش و همچنین تغییر در دما از نمودهای تغییر اقلیم هستند، رخداد خشکسالی نیز که حاصل تأثیر توأم این دو پدیده است، می‌تواند از آثار و نتایج مهم تغییر اقلیم باشد که در دهه‌های اخیر و در بسیاری از مناطق دنیا مشاهده شده است (Haile et al., 2020; Shelton, 2018). خشکسالی از جمله پدیده‌های حدی اقلیمی است که براساس تداوم و شدت وقوع آن، می‌تواند بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، شرب، صنعت، محیط‌زیست و اجتماع را تحت تأثیر قرار دهد (Aziz et al., 2018; Modarresi Rad et al., 2014; Wilhite et al., 2000; Wilhite et al., 2021). شناخت ویژگی‌های مهم خشکسالی همچون شدت، فراوانی، تداوم زمانی و وسعت آن در کنار پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند کمک بزرگی برای پیش‌بینی میزان خسارات، مدیریت و کاهش خسارات ناشی از رخداد این پدیده باشد (Montaseri et al., 2018). تاکنون مطالعاتی در زمینه بررسی آثار تغییر اقلیم بر خشکسالی در داخل کشور و سایر نقاط جهان صورت پذیرفته است. به عنوان مثال بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی در ایستگاه‌های ایلام و دهلران با استفاده از داده‌های مدل HadCM3 توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG تحت سناریوهای اقلیمی A2 و B1 نشان داد تداوم دوره‌های خشکسالی و ترسالی در آینده افزایش و شدت آن‌ها کاهش یافته است (Norozzi et al., 2018). پایش وضعیت خشکسالی در دو منطقه زابل و شیراز براساس شاخص SPI در مقیاس‌های ۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه تحت چهار سناریوی انتشار نشان داد که شدت خشکسالی در مقیاس‌های ۱۲ و ۴۸ ساعته بیشتر از ۳ ماهه می‌باشد و تعداد سال‌های خشک در این دو مقیاس نسبت به دوره پایه افزایش یافته است (Hosseinabadi et al., 2020). بررسی تغییرات شدت و فراوانی خشکسالی در بنگلادش تحت سناریوی انتشار ۸/۵ از گزارش پنجم تغییر اقلیم براساس دو شاخص SPI و SPEI نشان داد در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (کمتر از ۶ ماهه) شدت و فراوانی خشکسالی افزایش خواهد

آبخیز کارون شامل استان‌های خوزستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، اصفهان و فارس می‌باشد. در پژوهش حاضر با توجه به دوره آماری موجود از مقادیر بارش و دما مشاهداتی مربوط به ۶ ایستگاه سینوپتیک موجود در منطقه طی بازه زمانی ۲۰۱۴-۱۹۹۱ برای محاسبه شاخص خشکسالی فازی به عنوان دوره پایه استفاده شده است. لازم بذکر است که ۵ ایستگاه مورد مطالعه در حوضه آبخیز کارون واقع شده‌اند، همچنین به دلیل کفایت مناسب داده‌های مربوط به ایستگاه کوه‌رنگ (واقع در حوضه آبریز گاوخونی و نزدیک به مرز حوضه کارون) و از آنجایی که هدف محققین این پژوهش انتخاب ایستگاه‌ها به صورتی بوده است که از پراکنش مناسبی در منطقه مورد مطالعه برخوردار باشند، لذا ایستگاه مذکور نیز برای بررسی در این پژوهش انتخاب گردید. در این مطالعه تبخیر و تعرق براساس روش تورنت‌وایت محاسبه شده است (Thorntwaite, 1948). سپس مقادیر شاخص خشکسالی فازی برای ایستگاه‌ها طی سه دوره آبی که عبارتند از ۲۰۴۵-۲۰۲۰، ۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت حوضه و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه نشان داده شده است.

اما تاکنون به استفاده از این منطق برای پایش وضعیت خشکسالی تحت سناریوهای تغییر اقلیم پرداخته نشده است. با توجه به توضیحات فوق در این تحقیق پایش وضعیت خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم براساس شاخص فازی خشکسالی در حوضه آبخیز کارون مورد بررسی قرار گرفته است. شاخص خشکسالی فازی حاصل ترکیب سه متغیر بارش، دما و تبخیر و تعرق به روش فازی می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های ۳ مدل GCM تحت دو سناریوی SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 از جدیدترین گزارش IPCC¹ (CMIP6²) استفاده شده است. در ادامه و در بخش مواد و روش‌ها در خصوص تئوری روش محاسبه شاخص خشکسالی فازی توضیحات لازم ارائه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- حوضه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبخیز کارون می‌باشد. این حوضه با وسعتی در حدود ۶۷۲۶۰ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه تا ۳۴ درجه شمالی قرار گرفته است. حوضه

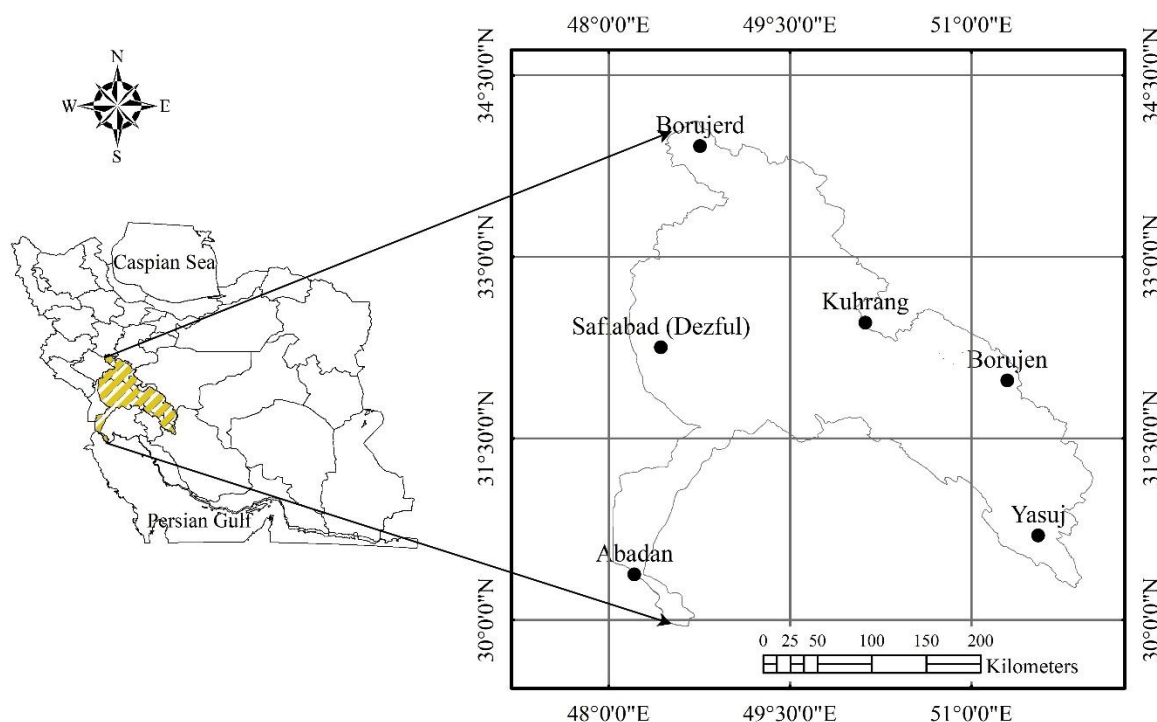


Fig. 1- Location of the Karoon basin and selected synoptic stations
 شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز کارون بزرگ و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

۲-۳- شاخص خشکسالی فازی پیشنهادی

خشکسالی از جمله پدیده‌هایی است که طبقات مختلف آن دارای محدوده‌های دقیقی نیست و گذر از یک وضعیت به وضعیت دیگر به صورت تدریجی انجام می‌شود. از آنجایی که با استفاده از منطق فازی می‌توان پدیده‌های مبهم را به صورت ریاضی درآورد و توصیف نمود و سازمان جهانی هواشناسی در سال ۱۹۸۳ متغیرهای مورد استفاده در تعریف خشکسالی را به ترتیب و برحسب اولویت بارش، میانگین دما، رطوبت خاک و متغیرهای میزان محصول، تبخیر و تعرق عنوان نمود (WMO, 1983). بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با کاربرد منطق فازی، شاخص خشکسالی فازی (۳ متغیره) محاسبه شود. با توجه به آنکه در مطالعات مختلف شاخص SPI از جمله شاخص‌های کارا برای پایش شرایط خشکسالی معرفی شده است، در این مطالعه از تئوری این شاخص برای محاسبه شاخص خشکسالی فازی استفاده شده است. در ادامه معماری و روش محاسبه شاخص خشکسالی فازی مورد استفاده ارائه شده است.

گام اول: محاسبه شاخص استاندارد شده بارش، دما و تبخیر و تعرق در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه به روش ارائه شده McKee et al. (1993):

$$\text{Standardized index} = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن مقدار پارامتر (بارش، دما و تبخیر و تعرق)، \bar{X} متوسط پارامتر و σ انحراف از معیار پارامتر مدنظر است. محاسبه شاخص استاندارد شده براساس برازش توزیع احتمالاتی مناسب به سری داده‌ها صورت می‌پذیرد که در همین رابطه در پژوهشی توزیع آماری گاما پیشنهاد شده است (McKee et al., 1993).

سناریوهای انتشار اقلیمی به سناریوهایی گفته می‌شود که دارای موضوع و زمینه مشترکی می‌باشند و از آن‌ها برای مدل‌سازی شرایط اقلیمی در دوره آینده استفاده می‌شود. سناریوهای انتشار SSP³ از جدیدترین گروه سناریوها است که در گزارش ۶ تغییر اقلیم از آن‌ها استفاده شده است. این سناریوها براساس توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، توسعه سوخت‌های فسیلی و توسعه مبتنی بر سیاست‌های بینابین هستند و در ۵ گروه (SSP 1_1.9 تا SSP 5_8.5) شناخته می‌شوند (O'Neill et al., 2017; Rogelj et al., 2018). با توجه به اینکه در سال‌های اخیر بدلیل عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در تحقیقات مختلف توصیه محققین بر استفاده از ترکیب چند مدل اقلیمی بوده است (Li et al., 2021; Ma et al., 2022; Sunyer et al., 2015)، در مطالعه حاضر از داده‌های بارش و دما مربوط به ۱ مدل گردش عمومی کلی (GCMs⁴) و ۲ مدل سیستم زمین (ESMs⁵) (جدول ۱) تحت سناریوهای SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 استفاده شده است. مدل‌های سیستم زمین به دنبال شبیه‌سازی تمام جنبه‌های مرتبط با سیستم زمین شامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند. بنابراین بسیار فراتر از مدل‌های گردش عمومی کلی هستند که فقط فرآیندهای فیزیکی جو و اقیانوسی را نمایش می‌دهند. در واقع هسته مدل‌های سیستم زمین شامل اجزای اتمسفر و اقیانوسی یک مدل گردش عمومی کلی است که به آن مواردی همچون چرخه جهانی کربن، تغییرات پوشش گیاهی، شیمی اتمسفر، زیست ژئوشیمی اقیانوس‌ها و صفحات یخی اضافه شده است (Hajima et al., 2014). علت انتخاب مدل‌های مذکور قرارگیری آن‌ها در گروه مدل‌های برتر در تحقیقات انجام شده در سطح کشور در زمینه ارزیابی عملکرد مدل‌های پروژه CMIP6 برای تخمین بارش، دما و استخراج دوره‌های خشک و مرطوب است (Ansari et al., 2022; Zarrin and Dadashi Roudbari, 2021, 2020). دریافت داده‌های اقلیمی از

Table 1- The GCM/ESM models used in this study

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش

Row	GCM Model	Center	Lon×Lat		Vertical Resolution	
			Atmosphere	Ocean	Atmosphere	Ocean
1	MRI-ESM2 ⁶	Meteorological Research Institute, Japan	160×320	360×364	80	61
2	IPSL-CM6A-LR ⁷	L'Institute Pierre-Simon Laplace, France	143×144	332×362	79	75
3	GFDL-ESM4 ⁸	NOAA/geophysical fluid dynamics laboratory, United States	180×360	576×720	49	75

به وجود ۳ متغیر (شاخص استاندارد شده بارش، دما و تبخیر و تعرق) و ۹ طبقه خشکسالی (از ترسالی خیلی شدید تا خشکسالی خیلی شدید) در این مطالعه از ۷۲۹ گزاره اگر-آنگاه استفاده شده است. در نهایت با بکارگیری سیستم استنتاج ممدانی در جعبه ابزار Fuzzy Logic شاخص‌های استاندارد شده بارش، دما و تبخیر و تعرق ترکیب و شاخص خشکسالی فازی محاسبه و فازی‌زدایی شد. پس از انجام فرآیند فازی‌زدایی به پایش طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی براساس جدول ۲ پرداخته شده است (Huang et al., 2015).

Table 2- Dry and wet classes based on the proposed fuzzy drought index (Huang et al., 2015)

جدول ۲- طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی براساس شاخص خشکسالی فازی پیشنهادی (Huang et al., 2015)

Fuzzy Drought Index	Classification
$0.95 \leq FDI \leq 1$	Extremely dry
$0.87 \leq FDI \leq 0.95$	Severely dry
$0.74 \leq FDI \leq 0.86$	Moderately dry
$0.59 \leq FDI \leq 0.73$	Abnormally dry
$0.44 \leq FDI \leq 0.58$	Normal
$0.29 \leq FDI \leq 0.43$	Abnormally wet
$0.15 \leq FDI \leq 0.28$	Moderately wet
$0.06 \leq FDI \leq 0.14$	Severely wet
$0 \leq FDI \leq 0.05$	Extremely wet

در نهایت تابع تجمعی گاما به تابع نرمال استاندارد تبدیل می‌شود. مقدار شاخص استاندارد شده بارش، دما و تبخیر و تعرق به ترتیب SPI، STI و SEI نامگذاری می‌شود. برای پارامتر بارش مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده دوره خشکسالی می‌باشد، اما درخصوص دما و تبخیر و تعرق شرایط بالعکس بوده و مقادیر مثبت شاخص نشان‌دهنده دوره خشکسالی است. به همین دلیل لازم است تا در **گام دوم** شاخص‌های محاسباتی استاندارد شوند تا روند تغییرات آن‌ها یکسان و در محدوده صفر تا ۱ شود، بطوری که شرایط با حرکت از مقدار صفر در سمت یک از ترسالی خیلی شدید به سمت خشکسالی خیلی شدید تغییر کند. برای استاندارد نمودن شاخص SPI از رابطه ۲ و شاخص‌های STI و SEI از رابطه ۳ استفاده شده است:

$$X_i' = \frac{\text{Max}(X_i) - X_i}{\text{Max}(X_i) - \text{Min}(X_i)} \quad (2)$$

$$X_i' = \frac{X_i - \text{Min}(X_i)}{\text{Max}(X_i) - \text{Min}(X_i)} \quad (3)$$

که در آن X_i مقدار شاخص پیش از استانداردسازی و X_i' مقدار شاخص پس از استانداردسازی می‌باشد. **گام سوم:** تعریف مجموعه‌های فازی و توابع عضویت آن‌ها: در پژوهش حاضر از مقادیر فازی طبقات خشکسالی جدول (Huang et al., 2015) استفاده شده است. در شکل ۲ نمودار توابع عضویت مورد استفاده نشان داده شده است. **گام چهارم:** تعیین قوانین فازی برای ترکیب شاخص‌های استاندارد شده بارش، دما و تبخیر و تعرق. با توجه به آنکه یک پایگاه فازی بر پایه مجموعه‌ای از گزاره‌های اگر-آنگاه شکل می‌گیرد لازم است تا مجموعه‌ای از قوانین برای مجموعه فازی تعیین شود، با توجه

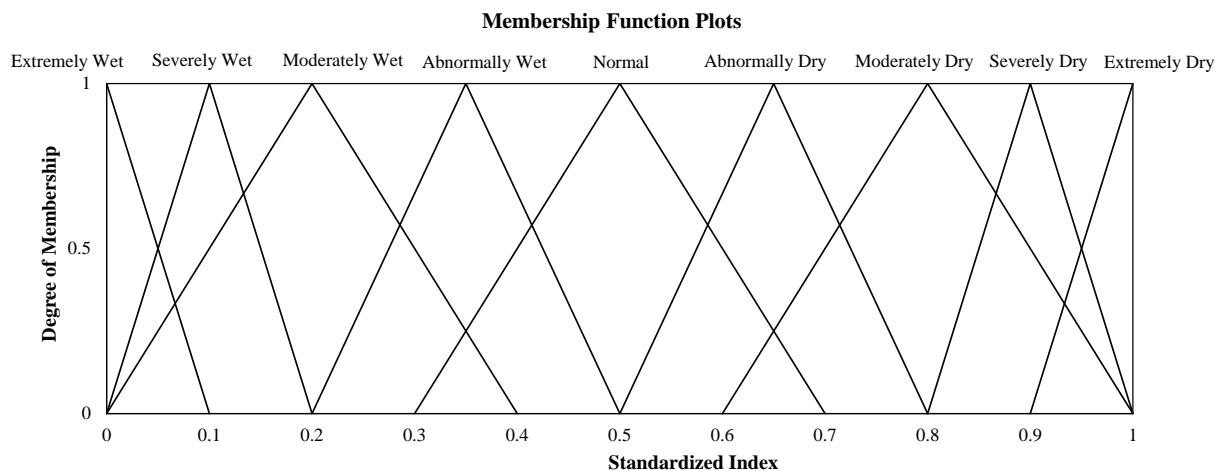


Fig. 2- Membership functions used in this study (Huang et al., 2015)

شکل ۲- توابع عضویت مورد استفاده برای فازی نمودن شاخص‌های استاندارد شده (Huang et al., 2015)

۴-۲- شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده

جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج مشخص است که داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه از همخوانی و تناسب مناسبی با یکدیگر برخوردار بوده و یکدیگر را تأیید می‌کنند. چنانکه مقادیر ضریب همبستگی بین ایستگاه‌های مختلف برای داده‌های بارش بیشتر از ۰/۸۳ و برای دما بیشتر از ۰/۹۷ است که نشان از همبستگی خوب مقادیر بارش و دمای ثبتی در ایستگاه‌های مطالعاتی دارد.

در این پژوهش از شاخص‌های آماری شامل ضریب همبستگی (CC^9)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^{10}$) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE^{11}) برای بررسی عملکرد شاخص خشکسالی در دوره پایه استفاده شده است. همانطور که پیش‌تر نیز بیان گردید محاسبه هر یک از شاخص‌های فوق با استفاده از روابط (۴) تا (۶) امکان‌پذیر می‌باشد:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - S_i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - G_i|}{N} \quad (6)$$

۳-۲- ارزیابی خروجی مدل اقلیمی در تخمین شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های زمانی مختلف

در این بخش عملکرد مدل اقلیمی به منظور تخمین شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۶ و ۱۲ ماهه) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۳ نمودار ماتریسی شاخص CC بین شاخص خشکسالی فازی بدست آمده از تلفیق مدل‌های اقلیمی نسبت به مقادیر محاسبه شده براساس داده‌های مشاهداتی در دوره پایه برای هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده مقدار متوسط شاخص CC در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی در تخمین شاخص خشکسالی فازی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه به ترتیب معادل ۰/۹۲، ۰/۹۲ و ۰/۳۱ است که نشان می‌دهد مقادیر شاخص خشکسالی فازی بدست آمده براساس داده‌های اقلیمی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه از همبستگی ضعیفی با مقادیر مشاهداتی برخوردار است. از آنجاییکه در مقیاس‌های زمانی مختلف تأثیرات ماه‌های قبل از ماه مذکور بر روی شاخص خشکسالی اعمال خواهد شد، بطوری‌که شاخص خشکسالی در مقیاس زمانی ۳ ماهه، تأثیرات ۲ ماه قبل از هر ماه، مقیاس زمانی ۶ ماهه تأثیر ۵ ماه قبل از هر ماه و مقیاس زمانی ۱۲ ماهه آثار ۱۱ ماه قبل را در خود دارد؛ بنابراین افزایش تعداد ماه‌های تأثیرگذار بر مقدار شاخص خشکسالی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه و در

که در جدول فوق، G_i : مقادیر شاخص خشکسالی براساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک، S_i : مقادیر شاخص خشکسالی براساس مدل‌های اقلیمی، N : تعداد داده‌ها، \bar{G} : متوسط شاخص خشکسالی ایستگاه‌ها، \bar{S} : متوسط شاخص خشکسالی مدل‌های اقلیمی.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی آمار ثبت شده در ایستگاه‌ها

با توجه به اهمیت بررسی کیفی آمار بارش و دمای ثبت شده در ایستگاه‌ها بمنظور اجتناب از بکارگیری آمارهای غلط، پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات بارش و دمای ایستگاه‌های منتخب، ابتدا به منظور کنترل همگنی بین اطلاعات ایستگاه اقدام به تشکیل ماتریس همبستگی بین داده‌های ایستگاه‌های مختلف شد که نتایج آن در

Table 3- Correlation matrix of precipitation and temperature values between the studied stations

جدول ۳- ماتریس همبستگی مقادیر بارش و دما بین ایستگاه‌های مورد مطالعه

	Station	Borujerd	Borujen	Abadan	Kuhrang	Yasuj
Precipitation	Borujen	0.845				
	Abadan	0.839	0.841			
	Kuhrang	0.916	0.891	0.869		
	Yasuj	0.836	0.904	0.865	0.897	
	Safiabad (Dezful)	0.883	0.840	0.891	0.898	0.866
		Station	Borujerd	Borujen	Abadan	Kuhrang
Temperature	Borujen	0.984				
	Abadan	0.982	0.975			
	Kuhrang	0.993	0.987	0.976		
	Yasuj	0.991	0.993	0.986	0.991	
	Safiabad (Dezful)	0.980	0.978	0.986	0.977	0.985

میزان میانگین قدر مطلق خطا نشان می‌دهد که شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه در هر دو گروه اقلیمی مذکور از دقت بیشتری برخوردار است (متوسط قدر مطلق خطا در ایستگاه‌های واقع در اقلیم خشک تا خیلی خشک در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه برابر است با ۰/۰۷ و ۰/۰۵؛ همچنین، میزان متوسط شاخص فوق برای ایستگاه‌های واقع در اقلیم مرطوب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۶ می‌باشد). درحالی‌که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه عملکرد در تخمین شاخص خشکسالی فازی کاهش یافته است، مقدار متوسط قدر مطلق خطا در تخمین شاخص ۱۲ ماهه خشکسالی برای اقلیم‌های خشک و مرطوب به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۱۶ است. بطور کلی با توجه به نتایج در دوره پایه می‌توان چنین عنوان نمود که داده‌های اقلیمی گزارش ششم از عملکرد قابل قبولی در تخمین شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی برخوردار بوده است. لازم به ذکر است که عملکرد شاخص ۱۲ ماهه چندان قابل توجه نبوده و لازم است تا به هنگام محاسبه و پایش وضعیت خشکسالی توسط این شاخص در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه احتیاط بیشتری به عمل آید.

نتیجه تجمیع میزان خطا در تخمین مقدار بارش و دمای ماه‌های قبل می‌تواند یکی از دلایل کاهش عملکرد شاخص خشکسالی در این مقیاس زمانی عنوان شود. براساس نتایج، میزان شاخص در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه بزرگتر از ۰/۸۴ برآورد شده است که مناسب ارزیابی می‌شود. این در حالی است که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه مقدار آن به ۰/۵۲ محدود شده است. در همین رابطه در تحقیق دیگری نشان داده شد که تخمین شاخص استاندارد شده بارش نیز در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه نسبت به مقیاس‌های زمانی کوچکتر دارای خطای بیشتری می‌باشد (Koochi et al., 2021). ارزیابی نتایج بر اساس شاخص RMSE گویای این مطلب است داده‌های اقلیمی در مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه به ترتیب دارای کمترین و بیشترین میزان RMSE می‌باشد، بطوری‌که متوسط مقدار این شاخص در سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس ۶ ماهه برابر با ۰/۱۲ برآورد شده است، درحالی‌که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه متوسط شاخص معادل ۰/۱۹ است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی انجام شده ایستگاه‌های بروجرد، کوهرنگ و یاسوج در اقلیم مدیترانه‌ای تا خیلی مرطوب و ایستگاه‌های آبادان، بروجن و صفی‌آباد در اقلیم خشک تا خیلی خشک قرار گرفته‌اند (Rahimi et al., 2013). بررسی

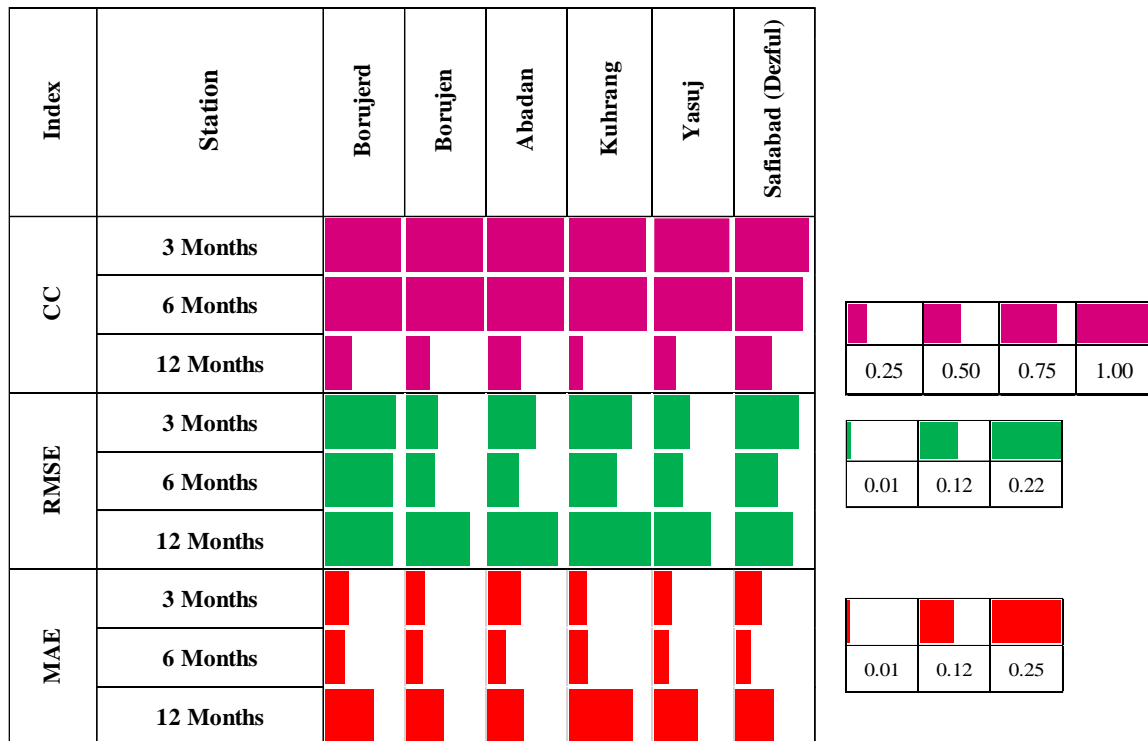


Fig. 3- Matrix plots of CC, RMSE and MAE of fuzzy drought index calculated from the climate model and observations (base period)

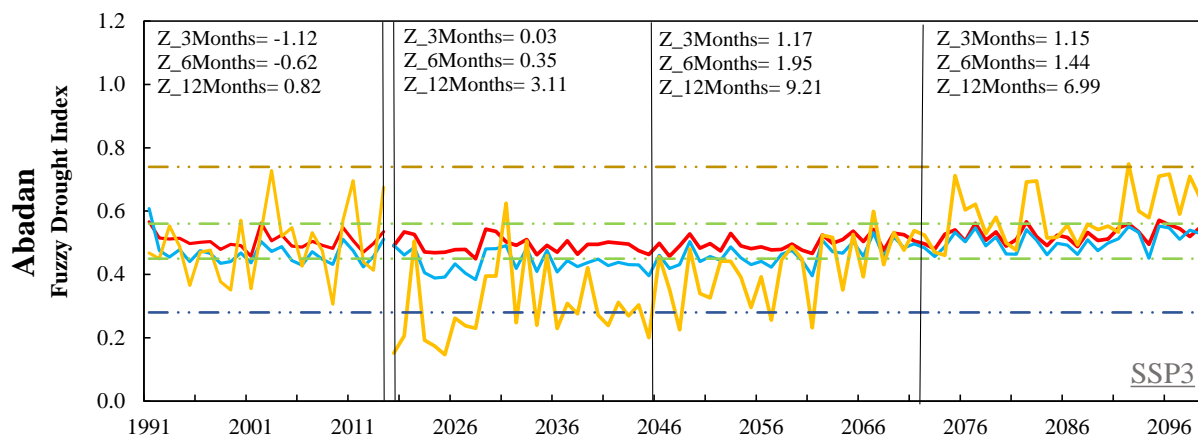
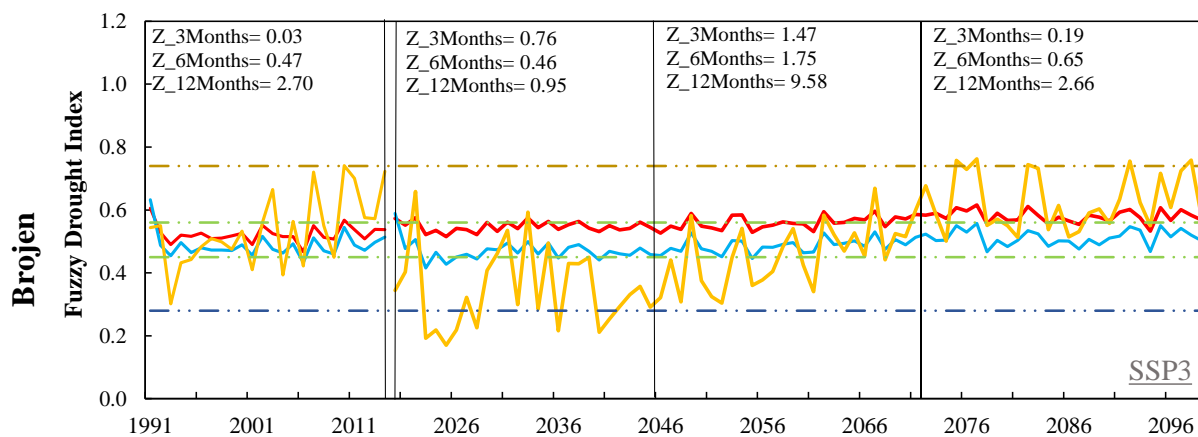
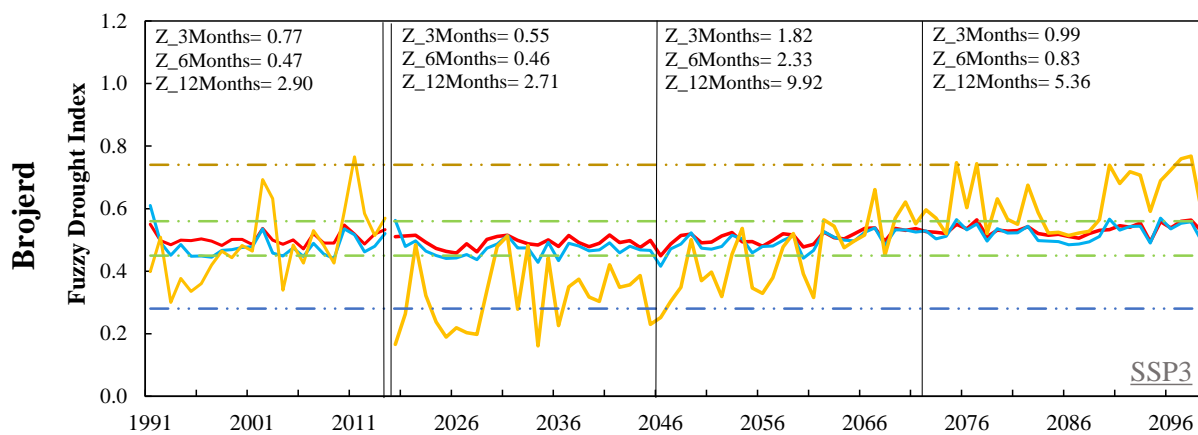
شکل ۳- نمودار ماتریسی شاخص‌های CC، RMSE و MAE برای محاسبه شاخص فازی خشکسالی توسط داده‌های اقلیمی نسبت به داده‌های مشاهداتی (دوره پایه)

۳-۳- بررسی روند تغییرات شاخص خشکسالی فازی تحت سناریوهای اقلیمی

در این بخش به بررسی روند تغییرات شاخص خشکسالی فازی در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای اقلیمی SSP 5_8.5 و 3_7.0 براساس آزمون ناپارامتری روند من‌کندال پرداخته شده است (Kendall, 1975; Mann, 1945). محاسبه آماره آزمون ناپارامتری من‌کندال (Z) بر مبنای رتبه داده‌ها و اختلاف بین هر جفت از آن‌ها است. فرض صفر در این آزمون حاکی از عدم وجود روند در داده‌ها و فرض یک بیانگر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. در سطح اطمینان ۹۵ درصد چنانچه مقدار آماره آزمون من‌کندال در محدوده $-1/64$ تا $1/64$ باشد، نشان‌دهنده عدم وجود روند در سری داده‌ها است، در حالی که با افزایش مقدار قدر مطلق آماره آزمون به بیش از $1/64$ ، فرض یک یعنی وجود روند در داده‌ها پذیرفته خواهد شد. لازم به ذکر است که مقادیر مثبت و منفی این آماره به ترتیب نشان‌دهنده وجود روند افزایشی و کاهش‌ی در داده‌ها است. سری زمانی تغییرات شاخص خشکسالی فازی و مقدار آماره آزمون ناپارامتری من‌کندال در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای ایستگاه‌های مطالعاتی تحت سناریوهای اقلیمی مورد بررسی تهیه و در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. بررسی مقدار آماره آزمون من‌کندال در سناریوی SSP 3_7.0 حاکی از آن است که در مقیاس زمانی ۳ ماهه در دوره‌های پایه، ۲۰۴۵-۲۰۷۳ و ۲۰۲۰-۲۰۴۶ در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار شاخص خشکسالی فازی دارای روند افزایشی یا کاهش قابل توجهی نمی‌باشد، درحالی‌که در دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در ایستگاه‌های بروجرد، صفی‌آباد، کوهرنگ و یاسوج مقدار آماره آزمون ناپارامتری افزایش و در سطح ۹۵ درصد نشان‌دهنده وجود روند افزایشی در سری زمانی شاخص خشکسالی فازی است. برای مقیاس زمانی ۶ ماهه نیز در دوره پایه و دوره‌های اول (۲۰۴۵-۲۰۲۰) و سوم (۲۰۹۹-۲۰۷۳) آینده روند قابل توجهی در سری زمانی شاخص خشکسالی فازی مشاهده نشده است (مقدار آماره آزمون کمتر از $1/64$ است)، اما در دوره دوم آینده (۲۰۴۶-۲۰۷۲) در تمام ایستگاه‌ها مقدار آماره آزمون حاکی از وجود روند افزایشی در تغییرات شاخص خشکسالی فازی است. با توجه به نتایج ایستگاه‌های بروجرد، صفی‌آباد و کوهرنگ دارای روند افزایشی قابل توجهی در مقدار شاخص خشکسالی می‌باشند و مقدار آماره آزمون در سطح اطمینان ۹۵ درصد بیش از $2/0$ برآورد شده است. بررسی نتایج روند تغییرات شاخص خشکسالی فازی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه حاکی از وجود روندی معنادار در مقدار آماره آزمون من‌کندال و افزایش قابل توجه در شرایط خشکسالی برای هر ۴ دوره زمانی و در تمام ایستگاه‌ها است که شیب افزایش در مقدار شاخص خشکسالی در

دوره‌های ۲۰۷۳-۲۰۹۹ و ۲۰۷۲-۲۰۴۶ بیش از دوره پایه و دوره ۲۰۴۵-۲۰۲۰ می‌باشد. به عنوان مثال مقدار آماره آزمون برای دوره پایه و دوره ۲۰۴۵-۲۰۲۰ در ایستگاه‌های آبادان و یاسوج به ترتیب برابر با $0/82$ ، $3/11$ و $1/36$ ، $3/22$ است در حالی که در دوره‌های ۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳ مقدار آماره آزمون به $9/21$ ، $6/99$ و $9/71$ ، $4/15$ افزایش یافته است که نشان‌دهنده تشدید شیب تغییرات شاخص خشکسالی به سمت مقادیر خشک می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که براساس نتایج در مقیاس ۳ و ۶ ماهه ایستگاه‌های مورد مطالعه تحت سناریوی اقلیمی SSP 3_7.0 در دوره دوم آینده یعنی بازه زمانی سال ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۲ دارای شرایط سخت‌تری از نظر تشدید شرایط خشکسالی نسبت به دوره پایه و همچنین سایر دوره‌های آتی (۲۰۴۵-۲۰۲۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳) خواهند بود. همچنین انتظار می‌رود که در این دوره ایستگاه‌های واقع در شمال، شمال‌غرب و غرب حوضه بیشتر تحت تأثیر خشکسالی و دوره‌های خشک قرار بگیرند که این اتفاق در مقیاس زمانی ۶ ماهه از شدت بیشتری برخوردار است.

بررسی نتایج تحت سناریوی اقلیمی SSP 5_8.5 نشان داد که شرایط خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس زمانی ۳ ماهه برای دوره پایه و سه دوره آینده از روند افزایشی یا کاهش قابل توجهی برخوردار نیست و مقدار آماره آزمون کمتر از $1/64$ تخمین زده شده است (به استثنای ایستگاه یاسوج که براساس نتایج مقدار آماره من‌کندال در این ایستگاه برای دوره زمانی ۲۰۷۳-۲۰۹۹ معادل $1/81$ و حاکی از وجود روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد است). نتایج نشان داد که در مقیاس زمانی ۶ ماهه تا بازه زمانی منتهی به سال ۲۰۷۲ روند تغییرات آماره من‌کندال در ایستگاه‌های مطالعاتی معنادار نیست، اما در دوره زمانی ۲۰۷۳-۲۰۹۹ در نیمی از ایستگاه‌ها (بروجرد، بروجن و یاسوج) روند افزایشی و در ۳۰ درصد (صفی‌آباد و کوهرنگ) نیز افزایش نسبتاً بیشتری در تغییرات شاخص خشکسالی فازی تحت سناریوی SSP 5_8.5 مشهود است. به عنوان مثال در مقیاس زمانی ۶ ماهه مقدار آماره Z در ایستگاه‌های بروجرد، بروجن و یاسوج طی دوره زمانی ۲۰۷۳-۲۰۹۹ به ترتیب برابر با $1/95$ ، $1/92$ و $1/94$ است. مقدار این آماره در ایستگاه‌های صفی‌آباد و کوهرنگ معادل $2/0$ تخمین زده شده است. با توجه به نتایج، شاخص خشکسالی فازی ۱۲ ماهه در این سناریو همچون سناریوی اقلیمی SSP 3_7.0، از روند افزایشی تبعیت می‌کند که این روند در دوره‌های ۲۰۴۶-۲۰۷۲ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳ نسبت به دوره پایه و همچنین دوره ۲۰۴۵-۲۰۲۰ شدت یافته است، بطوری‌که تغییرات آماره من‌کندال در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی برای مقیاس ۱۲ ماهه طی دوره‌های زمانی فوق (۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳) در محدوده $2/0$ تا $10/72$ می‌باشد.



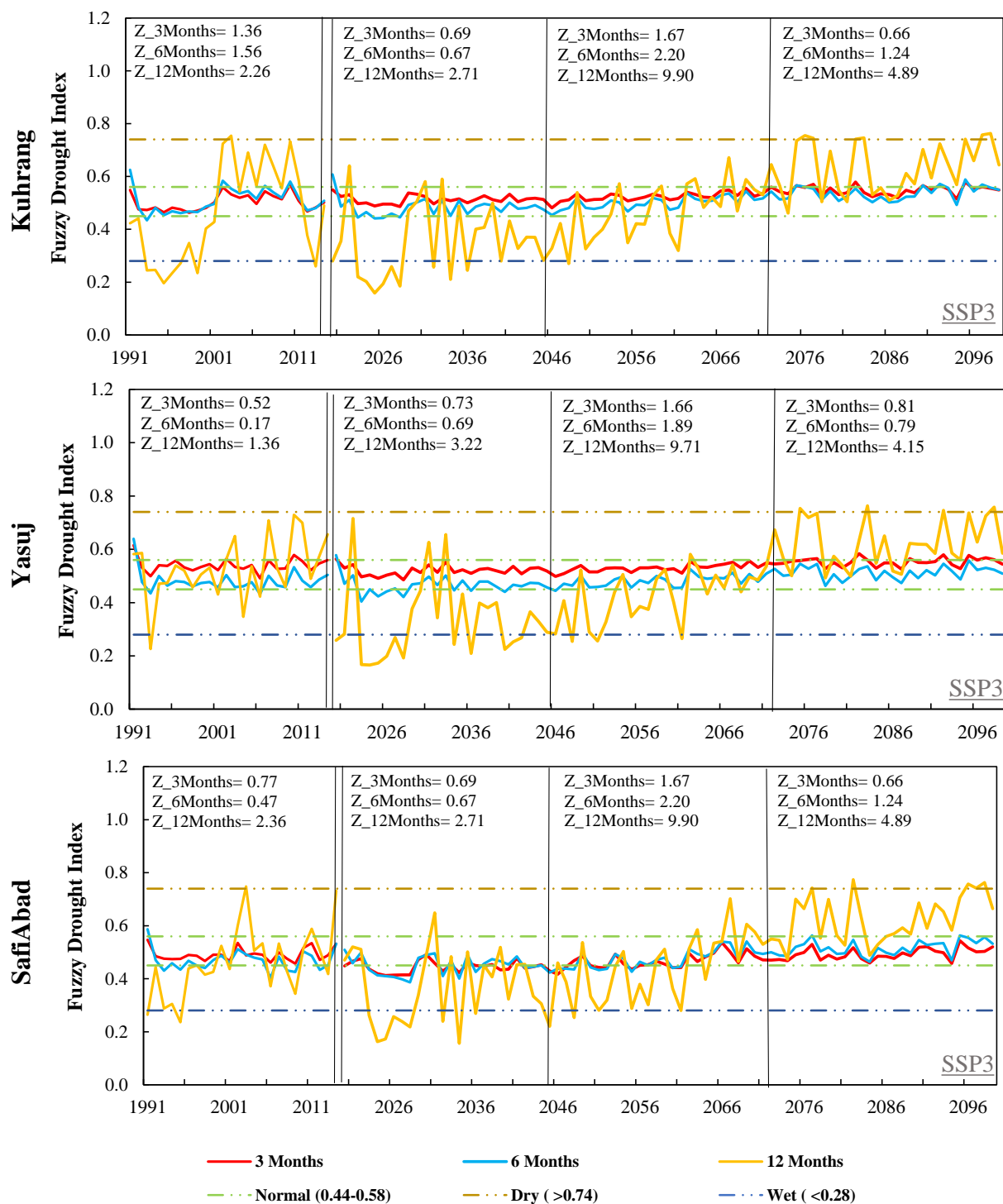
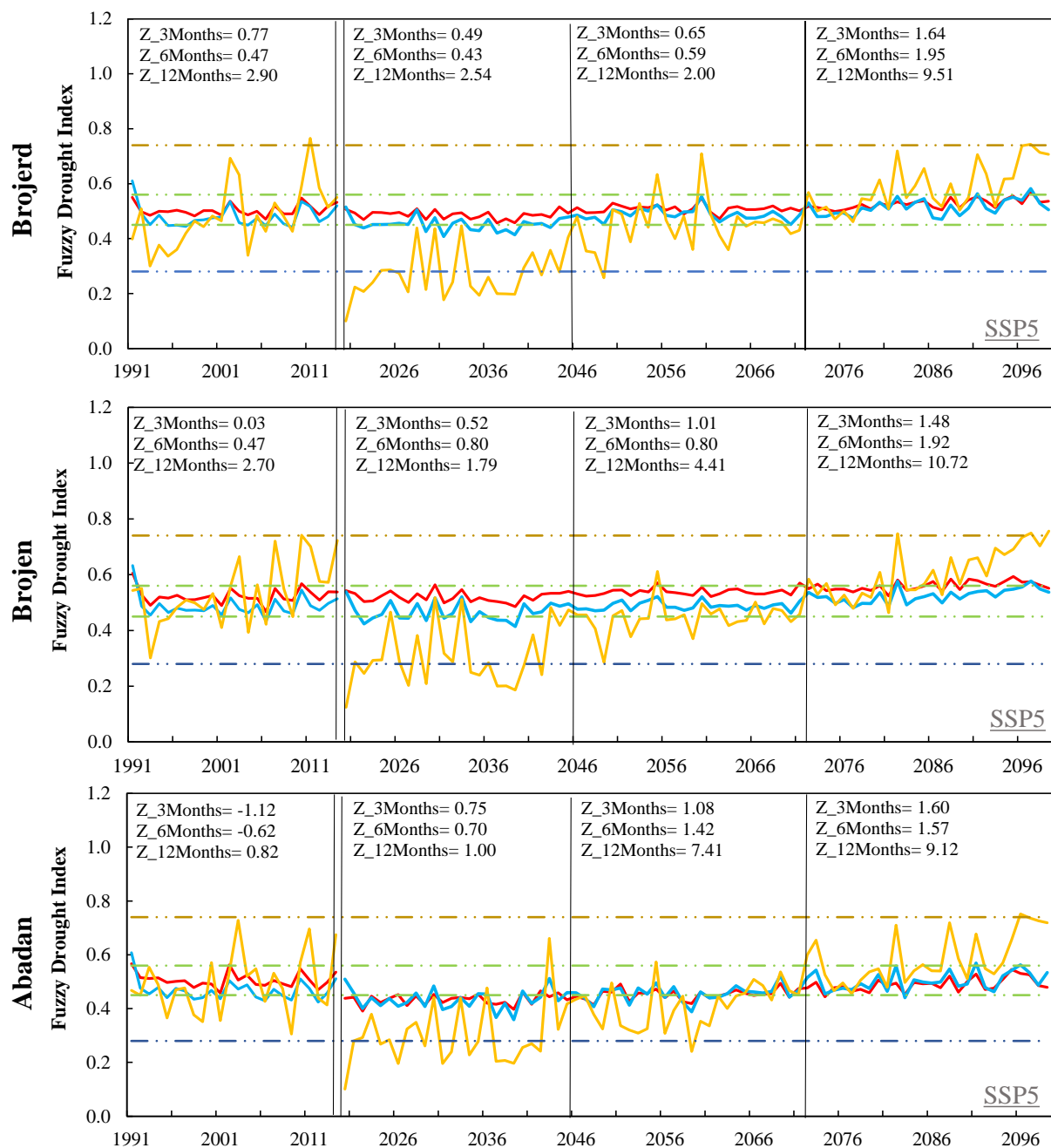


Fig. 4- Time series and the trend of the fuzzy drought index based on Mann–Kendall test in the future periods (SSP 3_7.0)

شکل ۴- سری زمانی و مقدار آماره آزمون ناپارامتری من کندال برای بررسی روند تغییرات شاخص خشکسالی فازی در آینده تحت سناریوی اقلیمی SSP 3_7.0

که هم‌راستا با نتایج این پژوهش است (NikbakhtShahbazi, 2017). با توجه به آنکه افزایش شرایط خشکسالی، وضعیت منابع آبی و در نتیجه کشاورزی منطقه را تحت تأثیر قرار خواهد داد، بنابراین تدوین برنامه‌ها و تدابیر مؤثرتر به منظور مدیریت منابع آب برای دوره‌های خشک جهت سازگاری با شرایط و حفاظت در برابر خطرات خشکسالی در زمینه کشاورزی، تامین منابع پایدار آبی از سوی مدیران و همچنین تصمیم‌گیران در سطح حوضه انتظار می‌رود تا بدین طریق بتوان در حد امکان از خسارات مربوط به وقوع خشکسالی در این مناطق کاست.

بطور کلی مشخص است که تحت سناریوهای اقلیمی SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 به ترتیب در دوره‌های ۲۰۷۳-۲۰۹۹ و ۲۰۴۶-۲۰۷۲ و امکان وقوع دوره‌های خشک در حوضه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه و همچنین بازه زمانی سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۵ با افزایش همراه خواهد بود که این اتفاق در ایستگاه‌های واقع در شمال، غرب و شمال غرب از شدت بیشتری برخوردار است. بررسی شرایط خشکسالی در حوضه کارون ۳ تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی در تحقیق دیگری نیز نشان داده است که دوره میانی و دور (۲۰۴۵-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹) شرایط بحرانی تری را از منظر فراوانی و شدت خشکسالی تجربه خواهند نمود



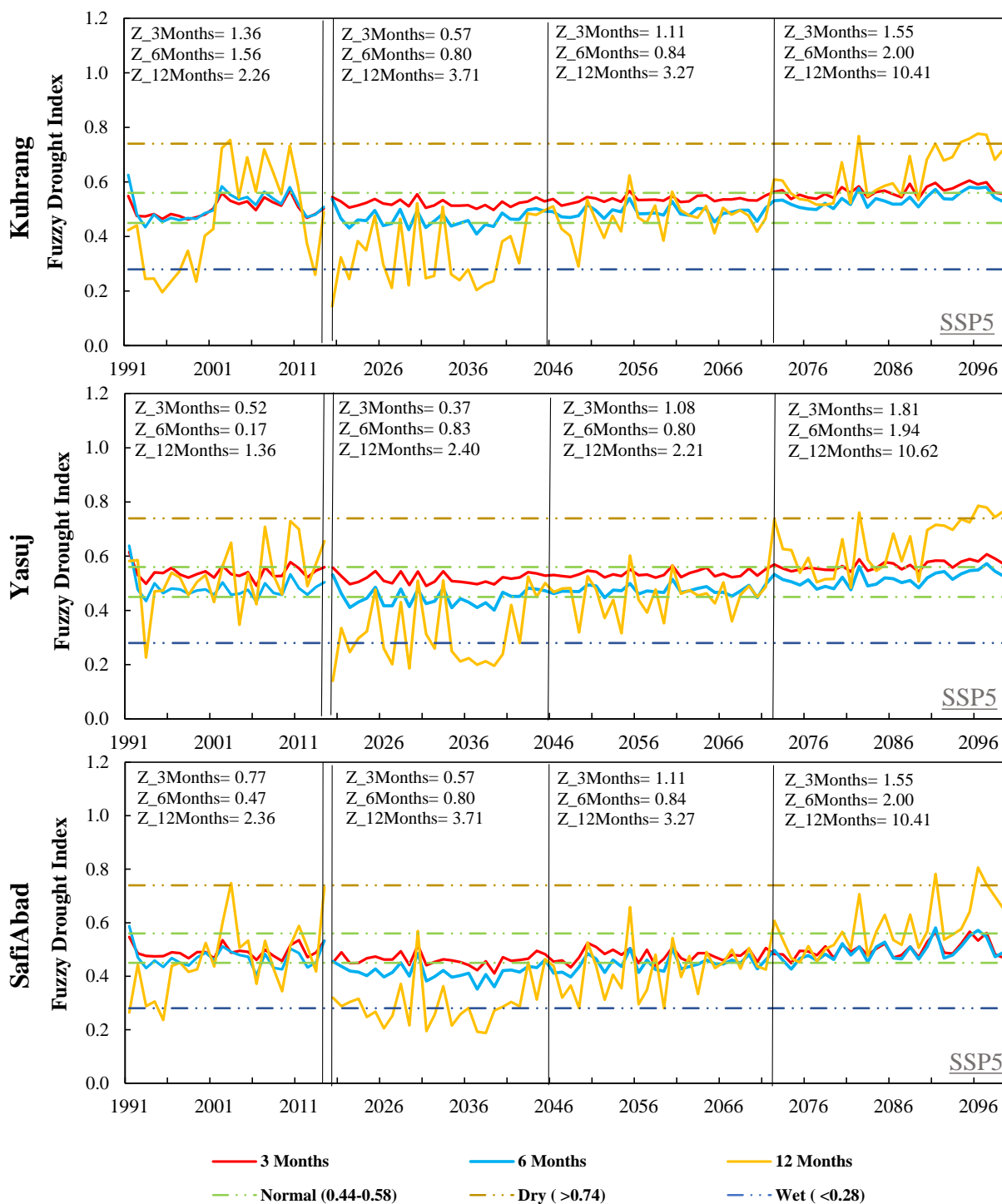


Fig. 5- Time series and the trend of the fuzzy drought index based on Mann–Kendall test in the future periods (SSP 5_8.5)

شکل ۵- سری زمانی و مقدار آماره آزمون ناپارامتری من کندال برای بررسی روند تغییرات شاخص خشکسالی فازی در آینده تحت سناریوی اقلیمی SSP 5_8.5

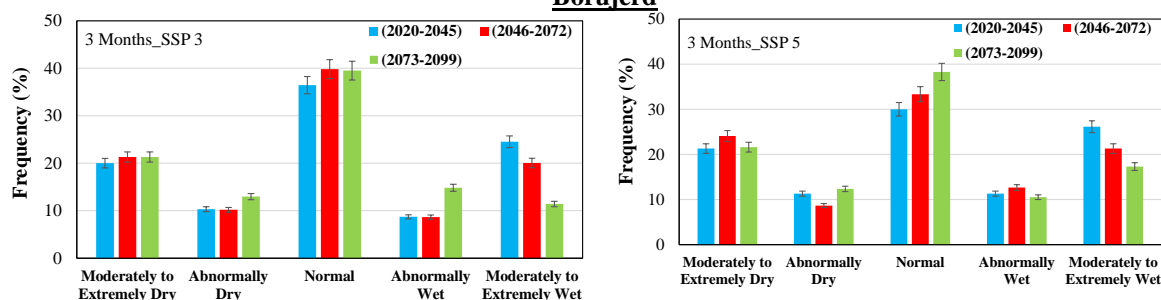
Ramezani Etedali, 2019; Hosseinabadi et al., 2020; Mirgol et al., 2021). بطوریکه در یکی از پژوهش‌های مذکور با بررسی شرایط خشکسالی در منطقه‌ای نیمه‌خشک نشان داده شده است که فراوانی دوره‌های خشک شدید در دوره‌های آبی و تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی بیش از دوره پایه خواهد بود (Mirgol et al., 2021). از سوی دیگر براساس شکل ۶ مشاهده می‌شود که فراوانی وقوع دوره‌های تر با شدت متوسط و شدید و همچنین ترسالی‌های ملایم (البته با شدت کمتری نسبت به ترسالی‌های شدید) تحت هر دو سناریوی اقلیمی دارای روند کاهشی است. در نتیجه تغییرات پیش‌بینی شده از شرایط خشکسالی برای حوضه کارون شامل کاهش رخداد‌های رطوبتی در کنار افزایش دوره‌های خشک است که می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجه منابع آبی در حوضه مطالعاتی شده و در نهایت آسیب‌های غیرقابل‌جبرانی را به جای بگذارد.

۴- نتیجه‌گیری

خشکسالی از جمله پرهزینه‌ترین مخاطرات طبیعی است که خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی زیادی را بر حوضه‌ها تحمیل می‌نماید. از طرف دیگر تغییر اقلیم ویژگی‌های این پدیده شامل بزرگی، فراوانی وقوع، تداوم و شدت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف پایش و بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر خشکسالی شامل بارش، دما و تبخیر و تعرق تحت سناریوهای اقلیمی SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 در حوضه آبخیز کارون به انجام رسیده است. برای این منظور از شاخص خشکسالی بر مبنای منطق فازی استفاده شده است. از برتری‌های روش مورد استفاده در این تحقیق نسبت به شاخص‌های دیگری همچون SPI، SPEI می‌توان به کاربرد مدل‌سازی فازی برای بررسی پدیده‌ای همچون خشکسالی که دارای مرزهای قطعی نیست، اشاره نمود.

برای بررسی دقیق‌تر تغییرات خشکسالی و ترسالی در آینده، فراوانی وقوع طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی (براساس جدول ۲) در سه دوره آبی تحت سناریوهای اقلیمی SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 محاسبه و نتایج مربوط به دو ایستگاه بروجرد و آبادان (با توجه به تعداد بالای خروجی‌های این بخش) به ترتیب به عنوان نماینده‌ای از ایستگاه‌های واقع در اقلیم مرطوب و خشک در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی‌ها در این بخش نشان داد که بطور کلی فراوانی وقوع دوره‌های خشک (با شدت متوسط تا خیلی شدید) تحت هر دو سناریوی اقلیمی دارای روند افزایشی است و این افزایش در دوره ۲۰۷۳-۲۰۹۹ بیش از دو دوره دیگر خواهد بود. با توجه به نتایج، افزایش وقایع خشک (با شدت متوسط تا خیلی شدید) در مقیاس زمانی ۳ ماهه دارای شیب تغییرات کمتری نسبت به مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ است. به عنوان مثال همانطور که در شکل ۷ مشخص است براساس سناریوی SSP 3_7.0 و شاخص خشکسالی فازی در مقیاس زمانی ۳ ماهه در ایستگاه بروجرد فراوانی طبقه متوسط تا خیلی شدید خشکسالی طی دوره‌های ۲۰۴۵-۲۰۷۲، ۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳ به ترتیب ۲۰/۰، ۲۱/۳ و ۲۱/۳ درصد است، درحالی‌که در مقیاس زمانی ۶ ماهه فراوانی وقایع مذکور برابر با ۱۴/۷، ۲۱/۰ و ۲۴/۷ درصد برآورد شده است، همچنین درصد این وقایع براساس شاخص خشکسالی ۱۲ ماهه معادل ۲/۵، ۲/۵ و ۱۴/۴ درصد است. بنابراین انتظار می‌رود که افزایش دوره‌های خشک در مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه با شیب بیشتری رخ دهد. فراوانی وقوع دوره‌های خشک تحت سناریوی اقلیمی SSP 5_8.5 در ایستگاه بروجرد برای هر سه دوره زمانی مورد مطالعه در مقیاس زمانی ۳ ماهه معادل ۲۱/۳، ۲۴/۱ و ۲۱/۶، در مقیاس زمانی ۶ ماهه برابر با ۱۳/۷، ۲۱/۶ و ۲۲/۸ و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه به ترتیب ۱/۸، ۲/۲ و ۱۴/۵ درصد است. بررسی فراوانی وقوع دوره‌های خشک (با شدت متوسط تا شدید) نیز حاکی از آن است که احتمال وقوع دوره‌های خشک طی دوره‌های زمانی ۲۰۷۲-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۷۳ بیش از ۲۰۴۵-۲۰۲۰ می‌باشد که با نتیجه این مطالعات همخوانی دارد (Ababaei and

Borujerd



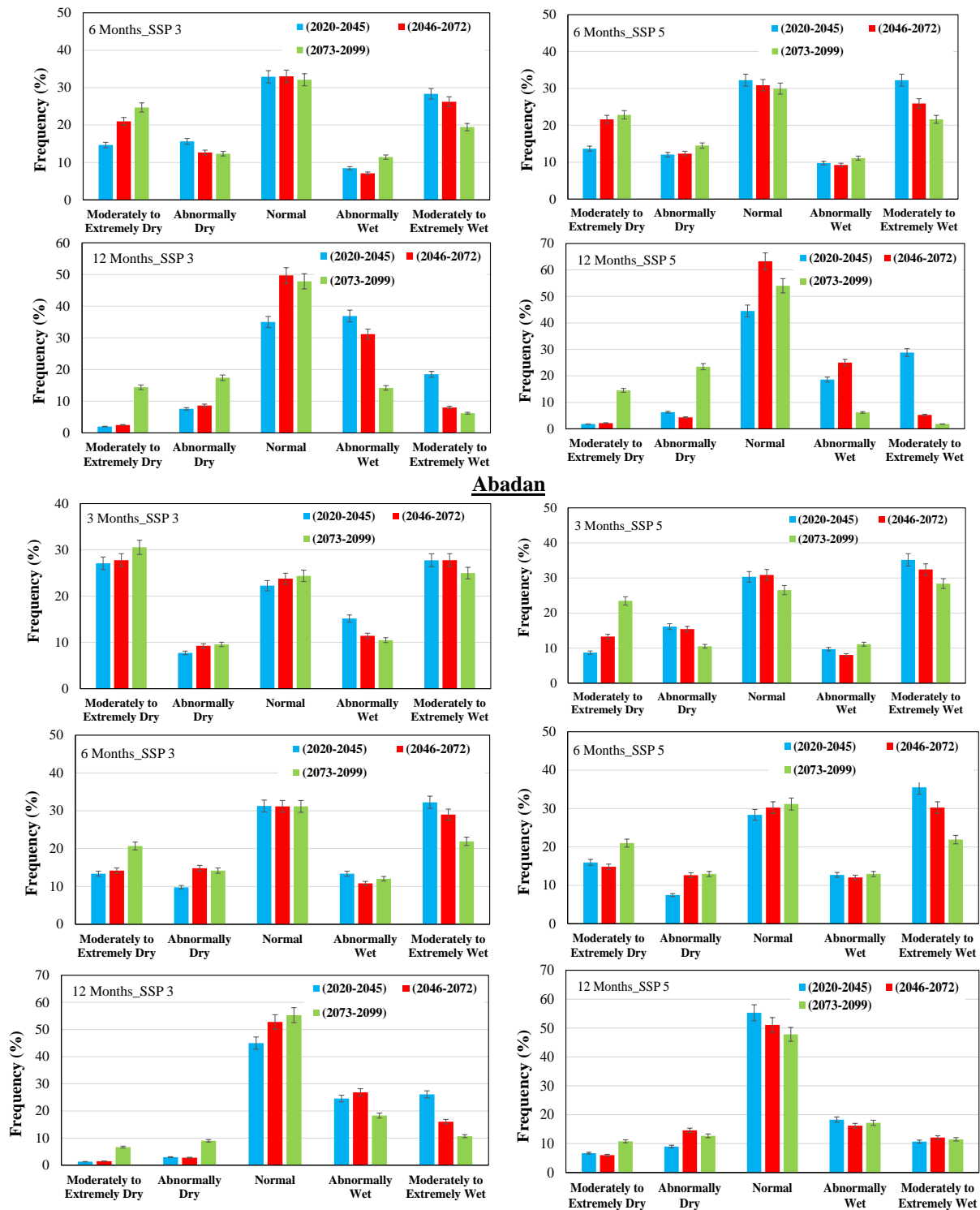


Fig. 6- The drought and wetness frequency under the SSP 3_7.0 and SSP 5_8.5 scenarios in Borujerd and Abadan stations
 شکل ۶- تغییرات فراوانی طبقات مختلف خشکسالی تحت سناریوهای SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 در آینده در ایستگاه‌های بروجرد و آبادان به عنوان نمونه

پی‌نوشت‌ها

- 1- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2- Coupled Model Intercomparison Project
- 3- Shared Socioeconomic Pathways
- 4- General Circulation Model
- 5- Earth System Model
- 6- Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0
- 7- Institute Pierre-Simon Laplace CMIP6 Low Resolution
- 8- Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model
- 9- Correlation Coefficient
- 10- Root Mean Square Error
- 11- Mean Absolute Error

بررسی شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های زمانی مختلف در دوره پایه حاکی از آن است با افزایش مقیاس زمانی شاخص خشکسالی فازی به ۱۲ ماهه، عملکرد آن نسبت به شاخص محاسبه شده براساس داده‌های مشاهداتی ضعیف ارزیابی می‌شود (برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه متوسط ضریب همبستگی در سطح حوضه = ۰/۵۲) که با نتایج سایر تحقیقات نیز همخوانی دارد (Koochi et al., 2021). بطوری‌که شاخص خشکسالی فازی در مقیاس زمانی ۶ ماهه با برخورداری از کمترین میزان RMSE (برابر با ۰/۱۲) و MAE (معادل ۰/۰۵) دارای بهترین عملکرد نسبت به سایر مقیاس‌ها است، پس از آن عملکرد شاخص خشکسالی فازی ۳ ماهه (MAE=۰/۰۸ و RMSE=۰/۱۵) نیز قابل قبول ارزیابی می‌شود. همچنین مقادیر شاخص در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه از همبستگی بالایی نسبت به مقادیر محاسبه شده براساس داده‌های مشاهداتی برخوردار است. بنابراین استفاده از شاخص خشکسالی فازی در مقیاس‌های زمانی بزرگتر همچون ۱۲ ماهه برای پایش شرایط خشکسالی چندان توصیه نمی‌شود. یافته‌های پژوهش در رابطه با پایش وضعیت خشکسالی در حوضه کارون نشان داد که داده‌های مربوط به گزارش ششم IPCC منبع ارزشمندی برای پایش خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در دهه‌های آتی و تحت سناریوهای مختلف اقلیمی به شمار می‌روند. تحت سناریوهای اقلیمی SSP 3_7.0 و SSP 5_8.5 در اغلب ایستگاه‌ها به ویژه ایستگاه‌های واقع در شمال، شمال غرب و غرب حوضه کارون فراوانی وقوع دوره‌های خشک افزایش و وقوع دوره‌های مرطوب کاهش یافته است. تلاقی این دو مورد با یکدیگر می‌تواند با کاهش شدید منابع و ذخایر آبی در این حوضه، منجر به آسیب‌های قابل توجه و بعضاً غیرقابل جبرانی در بخش‌های مختلف کشاورزی، اجتماعی، اقتصادی و افزایش مهاجرت از منطقه شود.

در پژوهشی نیز با بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش، دما و شرایط خشکسالی در غرب کشور نشان داده شد که براساس خروجی مدل‌های اقلیمی تغییر اقلیم منجر به افزایش دما، کاهش بارندگی و تغییر الگوی بارندگی در این منطقه خواهد شد که برآیند تمام این وقایع با افزایش شرایط خشک در منطقه همراه است (Heshmati and Ramezani, 2021). این موضوع توجه هرچه بیشتر برنامه‌ریزان و مسئولان برای مدیریت و بهره‌برداری پایدار از منابع آب با هدف سازگاری بیشتر در برابر وقوع خشکسالی در حوضه را طلب می‌نماید.

۵- مراجع

- Ababaei B, Ramezani Etedali H (2019) Investigating climate change over 1957–2016 in an arid environment with three drought indexes. *Theoretical and Applied Climatology* 137(3–4):2977–2992
- Ansari S, Dehban H, Zareian M, Farokhnia A (2022) Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal* 16(1):11-24 (In Persian)
- Aziz A, Umar M, Mansha M, Khan M, Javed M, Gao H, Abdullah S (2018) Assessment of drought conditions using HJ-1A/1B Data: A case study of Potohar Region, Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 9(1):1019–1036
- Bazrafshan O, Mahmudzadeh F, Bazrafshan J (2017) Evaluation of temporal trends of the drought indices SPI and SPEI in the Southern coast of Iran. *Desert Management* 4(8):54–69 (In Persian)
- Bower E, Meneghetti L, O'Connor K (2015) Global estimates 2015: People displaced by disasters. Internal Displacement Monitoring Centre, Norwegian Refugee Council
- Dubrovsky M, Svoboda M D, Trnka M, Hayes M J, Wilhite D A, Zalud Z, Hlavinka P (2009) Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology* 96(1-2):155–171
- Haile G G, Tang Q, Hosseini Moghari S M, Liu X, Gebremicael T G, Leng G, Yun X (2020) Projected impacts of climate change on drought patterns over East Africa. *Earth's Future* 8(7):1–23
- Hajima T, Kawamiya M, Watanabe M, Kato E, Tachiiri K, Sugiyama M, Watanabe S, Okajima H, Ito A (2014) Modeling in Earth system science up to and beyond IPCC AR5. *Progress in Earth and Planetary Science* 1(29)
- Hashmi M Z, Shamseldin A Y, Melville B W (2011) Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25:475–484
- Heshmati S, Ramezani Etedali H (2021) Drought forecasting for future periods using LARS-WG model: The Case Study of Kermanshah City. *Town and Country Planning* 13(2):647-669
- Hosseiniabadi S, Yaghoobzadeh M, Amirabadizadeh M, Foroozanmehr M (2020) Meteorological drought assessment in future periods by using of the data of the fifth report of climate change (Case study: Zabol and Shiraz Cities). *Journal of Arid Regions Geographics Studies* 10(40):78–87 (In Persian)
- Huang S, Huang Q, Chang J, Zhu Y, Leng G, Xing L (2015) Drought structure based on a nonparametric multivariate standardized drought index across the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology* 530(November):127–136
- IPCC (2013) Climate change 2013: The physical science basis IPCC working group I contribution to AR5. Retrieved October 18, 2018
- Kendall M G (1975) Rank Correlation Methods. (4th Edition), Charles Griffin, London, U. K., 202p
- Khan J U, Islam A K M S, Das M K, Mohammed K, Bala S K, Islam G M T (2020) Future changes in meteorological drought characteristics over Bangladesh projected by the CMIP5 multi-model ensemble. *Climatic Change* 162(2):667–685
- Koohi S, Azizian A, Brocca L (2021) Spatiotemporal drought monitoring using bottom-up precipitation dataset (SM2RAIN-ASCAT) over different regions of Iran. *Science of the Total Environment* 779(146535)
- Li J, Miao C, Wei W, Zhang G, Hua L, Chen Y, Wang X (2021) Evaluation of CMIP6 global climate models for simulating land surface energy and water fluxes during 1979–2014. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 13(6):1–32
- Ma Z, Sun P, Zhang Q, Zou Y, Lv Y, Li H, Chen D (2022) The characteristics and evaluation of future droughts across china through the CMIP6 multi-model ensemble. *Remote Sensing* 14(5):1–23
- Mann H B (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13(3):245–259
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* 179–184
- Mirgol B, Nazari M, Etedali H R, Zamanian K (2021) Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications* 28(4):1–19
- Modarresi Rad A, AghaKouchak A, Navari M, Sadegh M (2021) Progress, challenges, and opportunities in remote sensing of drought. In: *Global Drought and Flood Observation, Modeling, and Prediction*. American Geophysical Union, 352p
- Montaseri M, Nourjou A, Behmanesh J, Akbari M (2018) Investigation of heterological drought in

- southern basins of Urmia lake (Case study: Zarrineh rud and Simeneh rud). *Iranian Journal of ECO Hydrology* 5(1):189–202 (In Persian)
- NikbakhtShahbazi A (2017) Assessment of climate change impact on precipitation and temperature variation in watershed of Karoon 3 Dam. *Journal of Environment and Water Engineering* 3(2):133–143 (In Persian)
- Norozi E, Rostami N, Jahangir M (2018) Prediction of drought condition during 2018-2037 period under Climate Change Approach (Case study: Ilam and Dehloran Stations). *Iranian Journal of ECO Hydrology* 5(3):977–991 (In Persian)
- O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman D S, Solecki W (2017) The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42(January):169–180
- Rahimi J, Ebrahimpour M, Khalili A (2013) Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 112(3-4):409–418
- Rajsekhar D, Singh V P, Mishra A K (2015) Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. *Journal of Hydrology* 526(July):164–182
- Rogelj J, Popp A, Calvin K V, Luderer G, Emmerling J, Gernaat D, Tavoni M (2018) Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change* 8(4):325–332
- Shelton M (2018) *Hydroclimatology perspectives and applications*. Cambridge University Press, 438p
- Sobhani B, Gafarigilandeh A, Goldost A (2015) Drought monitoring in Ardabil province by means of SEPI fuzzy index developed based on the fuzzy logic. *Journal of Applied Researches in Geographical* 15(36):51–72 (In Persian)
- Sunyer M A, Hundecha Y, Lawrence D, Madsen H, Willems P, Martinkova M, Yücel I (2015) Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(4):1827–1847
- Swain S, Hayhoe K (2015) CMIP5 projected changes in spring and summer drought and wet conditions over North America. *Climate Dynamics* 44(9–10):2737–2750
- Thorntwaite C W (1948) An Approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38(1):55–94
- Wilhite D A (2000) Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: *Drought: A Global Assessment, Natural Hazards and Disasters Series*, Routledge Publishers, U. K., 752p
- Wilhite D A, Sivakumar M V K, Pulwarty R (2014) Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes* 3(March 2013):4–13
- WMO (1983) *Guide to climatological practices*, (2nd edition). WMO–No. 100, World Meteorological Organization, Geneva
- Xu K, Wu C, Zhang C, Hu B X (2021) Uncertainty assessment of drought characteristics projections in humid subtropical basins in China based on multiple CMIP5 models and different index definitions. *Journal of Hydrology* 600 (126502)
- Zarrin A, Dadashi Roudbari A A (2021) Projected consecutive dry and wet days in Iran based on CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Earth and Space Physics* 47(3):561–578 (In Persian)
- Zarrin A, Dadashi Roudbari A A (2020) Projection the long-term outlook Iran future temperature based on the output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Earth and Space Physics* 46(3):583–602 (In Persian)