



## Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the End of the 21<sup>st</sup> Century

Azar Zarrin<sup>✉1</sup>, Abbasali Dadashi-Roudbari<sup>2</sup>, Elham Kadkhoda<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: [zarrin@um.ac.ir](mailto:zarrin@um.ac.ir)

2. Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: [a-dadashi@um.ac.ir](mailto:a-dadashi@um.ac.ir)

3. Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran, Email: [kadkhoda.e70@gmail.com](mailto:kadkhoda.e70@gmail.com)

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** May. 28, 2022

**Received:** July. 10, 2022

**Accepted:** July. 30, 2022

**Published online:** Sep. 23, 2022

**Keywords:**

Drought,  
SPEI index,  
CMIP6 models,  
Ensemble model,  
Urmia Lake basin.

The Urmia Lake basin is one of the most vulnerable areas to frequent high-intensity droughts in Iran. The aim of this study is to project meteorological drought in the Urmia Lake basin through the 21<sup>st</sup> century. For this purpose, the standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI-1) was investigated using the bias-corrected CMIP6 models under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios during the period 2026-2100. The performance of individual CMIP6 models and multi-model ensemble (MME) generated by the independent weighted mean (IWM) method with three metrics including NRMSE, MBE, and PCC were evaluated. Overall, all individual CMIP6 models showed a good performance in the Lake Urmia basin, despite some overestimations of precipitation. However, the generated CMIP6-MME has increased the PCC values in all stations to 0.99. The CMIP6 MME showed a good performance of the SPEI-1 index in autumn, winter, and spring against observation from ground stations in the historical period. The result indicates a significant increase in drought events mainly in the west and north of the Urmia Lake basin in the warm period of the year during the 21<sup>st</sup> century. The severity and the percentage of below-normal years for the basin-averaged drought in the middle 21<sup>st</sup> century (2051-2075) is more than the ones in the far future (2076-2100), especially for the SSP5-8.5 scenario. These results can provide a basis for the development of drought adaptation plans in the Urmia Lake basin.

Cite this article: Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. A., & Kadkhoda, E. (2022) Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the End of the 21<sup>st</sup> Century. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (7), 1499-1516.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278>



## پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست‌ویکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه

آذر زرین<sup>۱</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>، الهام کدخدای<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، ایمیل: [zarin@um.ac.ir](mailto:zarin@um.ac.ir)

۲. گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، ایمیل: [a-dadashi@um.ac.ir](mailto:a-dadashi@um.ac.ir)

۳. گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران، ایمیل: [kadkhoda.e70@gmail.com](mailto:kadkhoda.e70@gmail.com)

| اطلاعات مقاله  | چکیده   |
|--|---|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی  | پیش‌نگری رخدادهای خشکسالی در یک منطقه مستعد خشکسالی همانند حوضه دریاچه ارومیه که یکی از آسیب پذیرترین مناطق برای مواجهه با خشکسالی‌های مکرر و با شدت بالا در ایران است، برای کاهش ریسک مرتبط با آن بسیار مهم است. این پژوهش، با هدف پیش‌نگری خشکسالی هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است. برای این منظور مدل‌های تصحیح شده ارببی CMIP6 تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) طی دوره ۲۰۲۶-۲۱۰۰ با استفاده از شاخص خشکسالی بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده هواشناسی (SPEI-1) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. درستی برون‌داد بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده (MME) با روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل (IWM) با سه سنجه آماری NRMSE، MBE و PCC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل‌های منتخب CMIP6 به رغم کم‌برآوردی بارش در ایستگاه‌های نماینده مورد بررسی، کارایی مناسبی برای برآورد متغیر بارش در سطح حوضه دارند. مدل همادی تولید شده مقدار سنجه PCC را در تمامی ایستگاه‌ها به ۰/۹۹ رسانده است. مقایسه شاخص SPEI-1 بین برون‌داد CMIP6-MME و داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی نشان از انطباق خوب شاخص در فصول پاییز، زمستان و بهار است. پیش‌نگری خشکسالی با مدل‌های CMIP6 نشان از افزایش قابل توجه رخدادهای خشکسالی عمدتاً در غرب و شمال حوضه برای دوره گرم سال دارد. شدت خشکسالی و درصد سال‌های کمتر از نرمال در آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) بیش‌تر از آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) به خصوص برای سناریو SSP5-8.5 در متوسط پهنه‌ای حوضه است. این نتایج می‌تواند مبنایی برای توسعه اقدامات سازگاری با خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه را فراهم کند. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۷   |   |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۹   |   |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۸  |   |
| تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۷/۱   |   |
| واژه‌های کلیدی:<br>خشکسالی،<br>شاخص SPEI،<br>مدل‌های CMIP6،<br>مدل همادی،<br>حوضه دریاچه ارومیه. |   |

استناد: زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ کدخدای، الهام (۱۴۰۱). پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست‌ویکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه

ارومیه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۷)، ۱۵۱۶-۱۴۹۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

اصطلاح خشکسالی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، اما هیچ تعریف منحصر به فردی در بین رشته‌های مختلف برای خشکسالی وجود ندارد. به طور کلی، IPCC (۲۰۱۲) خشکسالی را به عنوان «دوره‌ای از اقلیم غیرعادی خشک و به اندازه کافی طولانی برای ایجاد عدم تعادل هیدرولوژیکی جدی» تعریف می‌کند. بر اساس این تعریف، خشکسالی ناشی از کمبود بارش در یک دوره زمانی معین و/یا از بیابان منفی آب به دلیل افزایش تقاضای آب به دنبال دماهای بالا یا تندی باد شدید و به تبع آن افزایش تبخیر-ترقق است. این وضعیت ممکن است به دلیل شرایط پیشین در رطوبت خاک، مخازن و سفره‌های زیرزمینی از چندین ماه تا چند سال طول بکشد. همچنین خشکسالی‌های شدید می‌تواند برای چندین دهه ادامه داشته باشد (Mo and Lettenmaier, 2016). خشکسالی یک ویژگی تکرارشونده در تمام اقلیم‌ها است و با توجه به میانگین بلندمدت اقلیمی یک منطقه معین تعریف می‌شود (Dai, 2013). باید در نظر داشت که خشکسالی (Drought) را باید از خشکی (Aridity)، شرایط فصلی بارش یا کاملاً خشک (به عنوان مثال دوره‌های فاقد بارش در مناطق بیابانی) متمایز کرد (van Lanen et al., 2017).

خشکسالی یکی از انواع عمده بلایای طبیعی و یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم برای اکوسیستم و انسان است (Vicente-Serrano et al., 2020). خسارات سالانه در مقیاس جهانی ناشی از خشکسالی بیش از ۶ میلیارد دلار برآورد شده است که یک سوم کل پیامدهای بلایای طبیعی را شامل می‌شود (AghaKouchak et al., 2015). خشکسالی و دوره‌های خشک در مناطق مختلف در حال تغییر بوده و انتظار می‌رود که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نیز تغییر کنند و تهدیداتی را برای سامانه‌های طبیعی و اجتماعی ایجاد کنند (Zeng et al., 2022). اگرچه هیچ تعریف جهانی واحدی از خشکسالی در جامعه علمی وجود ندارد، با این حال چهار نوع خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی که در سامانه‌های مختلف اما مرتبط با یکدیگر رخ می‌دهند در مطالعات پیشین تعریف شده‌اند.

خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی معمولاً به عنوان دوره‌های کمبود آب در جو (بارش)، جریان (یا سطح پایین آب در دریاچه‌ها، آب‌های زیرزمینی و مخازن) و رطوبت خاک (یا کاهش تولید محصول) تعریف می‌شوند. خشکسالی اجتماعی-اقتصادی زمانی رخ می‌دهد که سامانه‌های مرتبط با منابع آب قادر به پاسخگویی به نیازهای آبی جامعه نباشند و بر فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی تأثیر بگذارند (Wang et al., 2021).

خشکسالی هواشناسی معمولاً اولین مرحله از یک رخداد خشکسالی است که به عنوان نقطه شروع یا عامل محرک خشکسالی هیدرولوژیکی و یا کشاورزی عمل می‌کند (Zeng et al., 2022). باید در نظر داشت که انواع مختلف خشکسالی ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند، اما الگوهای زمانی-مکانی متنوعی را نشان می‌دهند. این الگوی متفاوت در نتیجه عوامل بسیاری است که در وردایی و تغییرات خشکسالی نقش دارند، بطوریکه نه تنها متغیرهای هواشناسی، بلکه فعالیت‌های انسانی و عوامل محیطی نیز می‌توانند خشکسالی را از جنبه‌های گوناگون آن همانند شدت، مدت و فراوانی تحت تأثیر قرار دهند (Xu et al., 2019). بر این اساس با توجه به رابطه پیچیده اقلیمی رخداد خشکسالی، پیش‌نگری فرآیندهای خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده همچنان چالش برانگیز است و لازم است تا این پدیده اقلیمی با در نظر گرفتن کمترین عدم قطعیت پیش‌نگری شود.

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) که با سناریوهای خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) ارائه شده است پیکربندی‌های ضروری را برای پیش‌نگری از اقلیم آینده با سناریوهای کاربری زمین، پارامترسازی بهبود یافته از مدل‌ها و فرآیندهای فیزیکی با عدم قطعیت کمتری نسبت به CMIP5 در اختیار دارد (Mishra et al., 2020). علاوه بر این، مدل‌های اقلیمی متعددی در CMIP6 مشارکت یافته‌اند که می‌توانند متغیرهای اصلی اقلیم، همانند بارش و دما را که محرک اصلی خشکسالی هستند با کمترین ارایی برآورد کنند (Dosio et al., 2021). بنابراین، در این تحقیق از رویکرد چند مدلی همادی CMIP6 برای پیش‌نگری خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه تحت دو سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) استفاده شده است.

همانطور که گفته شد خشکسالی یکی از مهم‌ترین فرین‌های اقلیمی است و می‌تواند به اکوسیستم‌ها آسیب جدی وارد کند. با آشکار شدن پیامدهای فاجعه‌بار گرمایش جهانی، مطالعات بسیاری خشکسالی‌ها را از جنبه‌های گوناگونی در سراسر جهان مورد بررسی قرار داده‌اند و نشان داده‌اند که این پدیده مخرب در مناطق وسیعی در سراسر جهان افزایش یافته است (Dai, 2013; Zhao & Dai, 2017; Swann, 2018; Xu et al., 2019 Vicente-Serrano et al., 2020).

خشکسالی از جنبه‌های مختلفی تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات را می‌توان از منظر نوع خشکسالی (خشکسالی

هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی)، روش محاسبه خشکسالی، داده‌های مورد استفاده و مقیاس زمانی آن مورد بررسی قرار داد. با در نظر گرفتن نوع خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (McKee et al., 1993) یکی از رایج‌ترین شاخص‌های خشکسالی برای توصیف خشکسالی هواشناسی است که بطور گسترده‌ای در سطح جهانی (Zarch et al., 2015)، منطقه‌ای (Meroni et al., 2017) و محلی (Dhurmea et al., 2019) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین مطالعات زیادی نیز به پیش‌نگری خشکسالی پرداخته‌اند. در یکی از این مطالعات (Cook et al., 2020) با استفاده از مدل‌های CMIP6 در سطح جهانی نشان دادند که خشکسالی‌ها تا پایان قرن حاضر در غرب آمریکای شمالی، آمریکای مرکزی، اروپا و مدیترانه، آمازون، جنوب آفریقا، چین، جنوب شرقی آسیا و استرالیا افزایش خواهند داشت. به همین ترتیب (Wang et al., 2021) با تحلیل ویژگی‌های جهانی خشکسالی بر اساس مدل‌های CMIP6 و به کارگیری شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) و رواناب استاندارد شده (SRI) دریافتند که در طول قرن بیست و یکم، فراوانی، شدت و مدت خشکسالی در بیشتر مناطق جهان افزایش می‌یابد. به همین ترتیب پیش‌نگری خشکسالی که با استفاده از مدل‌های CMIP6 در سطح منطقه‌ای همچون جنوب آسیا (Zhai et al., 2020)، چین (Su et al., 2021)، کره جنوبی (Song et al., 2021) و جنوب رشته کوه‌های آند (Aguayo et al., 2021) انجام شده است؛ ضمن تایید کارایی مدل‌های CMIP6، افزایش خشکسالی را نیز گزارش کرده‌اند.

در ایران نیز به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشکی که دارد خشکسالی‌ها از دیرباز مورد توجه بوده‌اند و در سال‌های اخیر این پدیده به‌وفور مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این مطالعات تنها به بررسی تغییرات زمانی-مکانی خشکسالی پرداختند و تغییرات آن را در طول دوره مورد بررسی گزارش کردند (Tajbakhsh et al., 2015; Bazrafshan et al., 2017; Ghamghami & Irannejad, 2019). برخی دیگر اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی دریاچه ارومیه را مورد توجه قرار دادند. در یکی از این پژوهش‌ها (Mahsifar et al., 2010) اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آب دریاچه ارومیه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که براساس مدل HadCM3 تحت سناریوی A2، تغییر اقلیم سبب افزایش میانگین سالانه دما و کاهش میانگین سالانه تراز سطح دریاچه ارومیه به ترتیب به مقدار ۲/۸۰ درجه سلسیوس و ۴/۶۰ متر می‌باشد. در تحقیق دیگر (Mirdashtvan et al., 2017) به ارزیابی تغییر اقلیم تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بارش در فصول زمستان و بهار کاهش و در فصول تابستان و پاییز افزایش خواهد یافت. همچنین آن‌ها نشان دادند که بیش‌ترین افزایش دما طی فصل زمستان تحت سناریوی A2 به مقدار ۱/۵ درجه سلسیوس بوده و تحت سناریوی B2 در فصل تابستان به مقدار ۱/۴ درجه سلسیوس خواهد بود. برخی دیگر از مطالعات همچون (Rezaei et al., 2021) به علل رخداد خشکسالی‌های هواشناسی در ایران پرداخته است. نتایج مطالعه وی نشان داده است که خشکسالی‌های تاریخی شدید در سراسر کشور معمولاً با یک لاین قوی همراه با فازهای PDO سرد و NAO مثبت در ۳۰ سال اخیر همراه بوده است. حوضه دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران نیز سابقه طولانی از خشکسالی‌های فصلی و سالانه را دارد و مطالعات زیادی (Abbasi et al., 2019; Abbasian et al., 2021; Shamloo et al., 2022) خشکسالی آینده را با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP5 بررسی کردند و نشان دادند که فراوانی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه طی سال‌های آتی روند افزایشی خواهد داشت.

بررسی منابع موجود از خشکسالی نشان می‌دهد که این پدیده از جنبه‌های بسیاری در سطح جهانی و ایران مورد بررسی قرار گرفته است. هر چند که مطالعات زیادی در این زمینه بخصوص در ایران و حوضه دریاچه ارومیه چه از منظر داده‌های تاریخی و یا پیش‌نگری انجام شده است، اما این مطالعات کماکان به دلیل کاربست مدل‌های منفرد دارای عدم قطعیت زیادی هستند. از طرف دیگر همانطور که گفته شد رخداد خشکسالی به طور کلی ناشی از عوامل بسیاری مانند بی‌هنجاری‌های اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است. شمال غربی ایران و بطور مشخص‌تر در این پژوهش-حوضه دریاچه ارومیه- طی سال‌های اخیر تحت تأثیر فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی بسیاری بوده است. لذا در بررسی مخاطرات طبیعی همچون خشکسالی عوامل اقتصادی-اجتماعی را هرگز نباید نادیده گرفت. بنابراین، پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)، با در نظر گرفتن عوامل اجتماعی-اقتصادی، می‌تواند به عنوان یک منبع قابل اطمینان برای پیش‌نگری‌های اقلیمی در نظر گرفته شود. بر این اساس این مطالعه با تولید یک مدل همادی از مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6 ضمن ارائه رویکرد جدیدتری از مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم، به پیش و پایش و پیش‌نگری خشکسالی با عدم قطعیت کمتری در حوضه دریاچه ارومیه می‌پردازد.

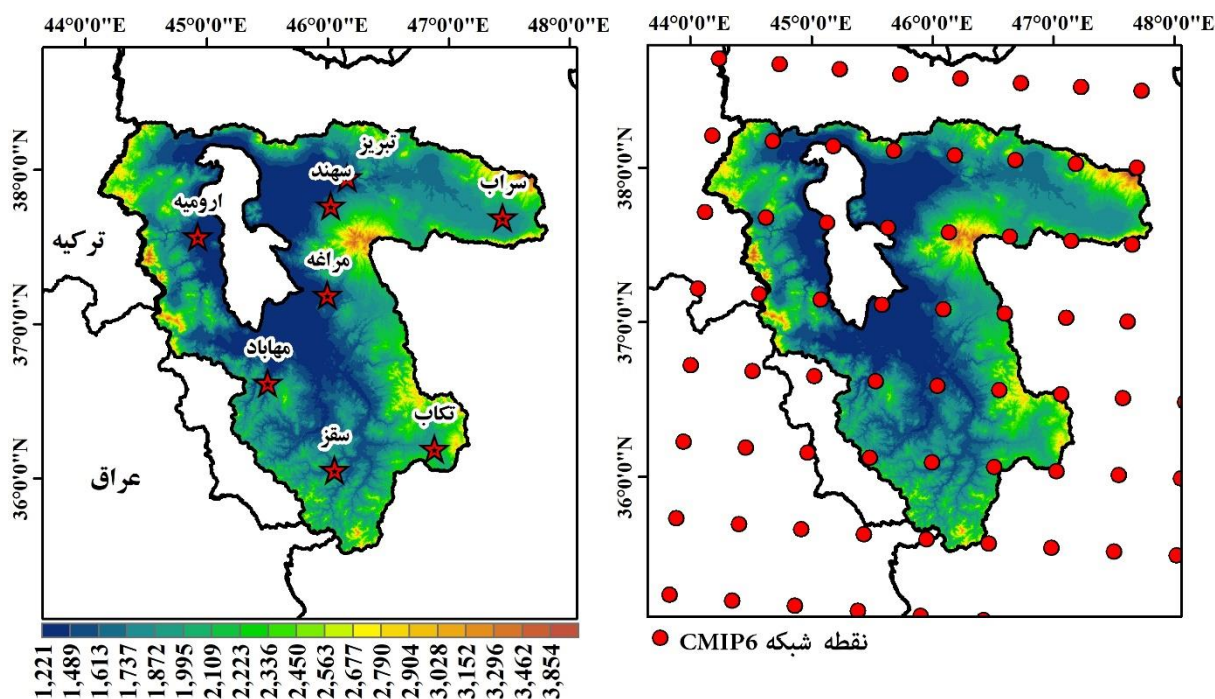
برنامه ریزی، آماده سازی، تعدیل و اقدامات سازگاری در حوضه‌های آبریز در واقعیت کنونی تغییر اقلیم ضروری است. بنابراین، ارائه اطلاعات دقیق در مورد پیامدهای تغییر اقلیم در یک حوضه برای سیاست‌گذاران و مردم امری حیاتی است. هدف از انجام این پژوهش

پاسخ‌گویی به دو سوال بوده است: (۱) آیا تولید یک مدل همادی کارایی بهتری را نسبت به مدل‌های منفرد برای برآورد بارش و در نهایت خشکسالی دارد؟ و (۲) خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه تا پایان قرن حاضر چگونه خواهد بود؟ با در نظر گرفتن عوامل اجتماعی-اقتصادی و اقلیمی این مطالعه می‌تواند ارائه راهکارهای تعدیل و سازگاری برای جبران زیان اقتصادی مرتبط با خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه را تسهیل کند. نتایج این تحقیق می‌تواند به شکل موثری برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری‌های برنامه‌های سازگاری و مقابله با پدیده خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد.

## داده و روش

### منطقه مورد مطالعه

حوضه دریاچه ارومیه به عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز جمعیتی، کشاورزی و صنعتی در شمال غربی ایران است. دریاچه ارومیه که در بخش شمالی این حوضه قرار گرفته است به عنوان بزرگترین دریاچه داخلی ایران بین استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی واقع شده است. حداکثر مساحت دریاچه ۶۱۰۰ کیلومتر مربع و حداکثر عمق آن ۱۶ متر برآورد شده است. حداقل ارتفاع حوضه ۱۲۲۱ و حداکثر ارتفاع آن ۳۸۵۴ متر است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران به همراه نقطه شبکه‌های مدل‌های تصحیح شده اریبی فاز ششم (CMIP6)؛ ایستگاه‌های نماینده برای درستی سنجی با نماد ستاره نشان داده شده‌اند.

### داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل دو دسته داده‌های ایستگاه‌های همدید سازمان هواشناسی کشور و برون‌داد بارش پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) می‌باشد که شرح هر یک از داده‌های مورد استفاده در ادامه ارائه شده است.

### داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید

داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی همدید تبریز، ارومیه، سهند، سراب، مراغه، مهاباد، تکاب و سنقر که موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است برای درستی سنجی متغیر بارش مدل‌های CMIP6 و محاسبه خشکسالی طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای انتخاب این هشت ایستگاه بکارگیری حداکثری ایستگاه‌ها بر اساس پراکنش جغرافیایی مناسب آن‌ها در تمامی مناطق حوضه و طول دوره آماری با کمترین داده مفقود می‌باشد. طول دوره آماری ایستگاه‌های هواشناسی مطابق با دوره تاریخی مورد

بررسی مدل‌های CMIP6 در این پژوهش از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ است.

### پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) با هماهنگی بین مراکز مختلف برای استانداردسازی GCMها به عنوان یک داده مبنا در مطالعات مربوط به تغییر اقلیم در سطح جهان به انجام رسیده است. مرحله جدید پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده با عنوان CMIP6 معرفی شده است (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021). در سری مدل‌های CMIP6 پنج سناریو به نام خط‌سیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSP) بکار گرفته شده است که شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 می‌باشد. این سناریوها شامل مولفه‌های مختلف اجتماعی-اقتصادی همانند رشد جمعیت، اقتصاد، شهرنشینی و سایر عوامل هستند (O'Neill et al., 2016). سناریوهای CMIP6 با بالاتر بردن حساسیت ترازمندی اقلیمی (ECS) و افزایش دامنه دما بین ۱/۵ تا ۴/۵ درجه سلسیوس نسبت به سناریوهای CMIP5 بهبود یافته‌اند. همچنین مدل‌های موجود در CMIP6 بهبود زیادی نسبت به مرحله‌های پیشین داشته و عدم قطعیت کمتری نسبت به مدل‌های CMIP5 و CMIP3 از خود نشان داده‌اند (Chen et al., 2020). مشخصات مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. علت انتخاب این پنج مدل از بین مدل‌های در دسترس CMIP6 به دلیل ساختار و حساسیت اقلیمی آن‌ها است. پنج مدل منتخب جدول (۱) مدل‌های کارا از نظر ساختار اجزای مدل اقیانوس و جو هستند. همچنین این پنج مدل از سوی پروژه تحقیقات هماهنگ در سامانه زمین و اقلیم: آزمایش‌ها، دانش، انتشار و گسترش (CRESCENDO<sup>۱</sup>) به عنوان مدلی که فرآیندهای اقلیمی را به خوبی نمایش می‌دهند، معرفی شدند. از نظر حساسیت اقلیمی، پنج مدل MPI-GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0، ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR و UKESM1-0-LL نمایندگان خوبی برای کل مجموعه CMIP6 هستند. زیرا شامل سه مدل با حساسیت اقلیمی کم (MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR، GFDL-ESM4) و دو مدل با حساسیت اقلیمی بالا (UKESM1-0-LL، IPSL-CM6A-LR) می‌شوند. تصحیح آریبی این داده‌ها با روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC) (Weedon et al., 2011) با استفاده از داده‌های واحد تحقیقات اقلیمی (CRU) انجام شده است. برای بررسی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه از دو سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) استفاده شده است. دوره آماری مورد بررسی شامل چهار دوره ۲۵ ساله است. دوره تاریخی از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و دوره‌های پیش‌نگری نیز سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) انتخاب شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های تصحیح شده آریبی CMIP6 مورد استفاده در این پژوهش

| مدل           | موسسه سازنده                              | تفکیک افقی  |
|---------------|---|-------------|
| GFDL-ESM4     | آزمایشگاه دینامیک شارهای ژئوفیزیکی آمریکا | ۱۰۰ کیلومتر |
| IPSL-CM6A-LR  | موسسه پیر سیمون لاپلاس فرانسه             | ۲۵۰ کیلومتر |
| MPI-ESM1-2-HR | مدل سامانه زمین موسسه ماکس پلانک آلمان    | ۱۰۰ کیلومتر |
| MRI-ESM2-0    | موسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن               | ۱۰۰ کیلومتر |
| UKESM1-0-LL   | مرکز هدلی، اداره هواشناسی انگلستان        | ۲۵۰ کیلومتر |

### روش تولید مدل همادی از مدل‌های تصحیح شده آریبی CMIP6

برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها، میانگین و یا ترکیبی از برونداد چندین مدل در پیش‌نگری‌های اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021a). در این پژوهش از روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل (IWM<sup>۲</sup>) برای تولید مدل همادی استفاده شده است. این روش وابستگی بین مدل‌های تعریف‌شده را با استفاده از کوواریانس خطاهای مدل نشان می‌دهد و در حقیقت ترکیب خطی یک مجموعه از شبیه‌سازی‌های مدل است که اختلاف میانگین مربعات (MSD) را با توجه به مشاهدات به حداقل می‌رساند (Bai et al., 2021). این روش همانند رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$\sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^j)^2 \text{ where } \mu_e^j = w^T x^j = \sum_{k=1}^K w_k x_k^j \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)  $(1, \dots, j, \dots, J)$  گام‌های زمانی مقادیر روزانه متغیر مدنظر مانند بارش و  $(1, \dots, k, \dots, K)$  GCM های منتخب

1 Coordinated Research in Earth Systems and Climate: Experiments, knowledge, Dissemination, and Outreach (CRESCENDO)

2 Independence Weighted Mean (IWM)

CMIP6 در این مطالعه هستند.  $\mu_e^j$  مقدار متغیر همادی شده مدل‌های چندگانه و  $j_{th}$  گام زمانی مدل و  $y^i$  نشان‌دهنده گام زمانی داده مشاهداتی است.  $W$  وزن هر مدل از مدل‌های همادی و در نهایت  $X^j$  ضریب مدل در ترکیب خطی است (Bishop & Abramowitz, 2013; Bai et al., 2021). سپس در گام بعدی برای اطمینان از اینکه  $\sum_{k=1}^K w_k = 1$  شود از ضریب لاگرانژ مطابق با رابطه (۲) استفاده شد.

$$F(w, \lambda) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^i)^2 \right] - \lambda \left( \left( \sum_{k=1}^K w_k \right) - 1 \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)  $w$  بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$w = \frac{A^{-1} \mathbf{1}}{\mathbf{1}^T A^{-1} \mathbf{1}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)،  $\mathbf{1}^T = [1, 1, \dots, 1]$ ، برآورد مبتنی بر نمونه کوواریانس خطاهای تصحیح‌شده اریبی بین همه اعضای مدل همادی است. در نهایت مقدار  $A$  از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Bai et al., 2021; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021a).

$$A = \frac{\sum_{j=1}^J (x^j - y^i)(x^j - y^i)^T}{J-1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

### درستی سنجی مدل‌های CMIP6

درستی مدل‌های CMIP6 با استفاده از سه سنجه آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون (PCC)، ریشه میانگین مربعات خطای بهنجار شده (NRSME) و میانگین اریبی خطا (MBE) برای مدل‌های منفرد و مدل همادی تولید شده در دوره تاریخی (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) سنجش شد. دو سنجه آماری NRMSE و MBE نیز به ترتیب خطای بهنجار شده و اریبی را نشان می‌دهند. طبیعتاً مقدار اریبی و خطا هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کارایی بالاتر آن مدل است. همچنین ضریب همبستگی بالاتر نشان‌دهنده ارتباط قوی‌تر بین خروجی مدل و ایستگاه است (Asadi Rahim-Begi et al., 2022).

### شاخص خشکسالی بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

در این پژوهش شاخص بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) که در زمینه گرمایش جهانی توسعه یافته است (Vicente-Serrano et al., 2010)، برای پایش و پیش‌نگری خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گرفته است. با در نظر گرفتن بارش و دما برای محاسبه خشکسالی و تغییرپذیری آن در مقیاس‌های زمانی متعدد، شاخص SPEI به طور گسترده برای پایش و پیش‌نگری خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است (Vicente-Serrano et al., 2010; Hamal et al., 2020). شاخص SPEI را نخستین بار Vicente-Serrano et al., (2010) به کار بردند. شاخص SPEI شاخصی چند کمیتی از خشکسالی است. در این شاخص مقادیر اختلاف بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر در واقع معرف ترازمندی اقلیمی بیلان آبی است که در شاخص SPEI مدنظر قرار گرفته است (Mostafazadeh & Zabihi, 2016). برای محاسبه شاخص SPEI در مقیاس زمانی یک ماهه (SPEI-1) که معرف خشکسالی هواشناسی است، از داده‌های مدل همادی تولید شده CMIP6 و برای تبخیر-تعرق نیز از رابطه پنمن-مانیتث فائو استفاده شده است. برای محاسبه‌ی شاخص SPEI مقادیر اختلاف بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر در واقع معرف تعادل اقلیمی بیلان آبی است که در شاخص SPEI مدنظر قرار گرفته است. شاخص SPEI بر اساس روابط (۵) تا (۸) به دست می‌آید.

$$PET = 16K \left( \frac{10^T}{I} \right)^m \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$K = \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{NDM}{30} \right) \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این روابط،  $T$  دمای میانگین ماهانه به درجه سلسیوس،  $m$  ضریب وابستگی به  $I$  شاخص دمایی یا مجموع شاخص ۱۲ ماهه  $i$ ،  $K$  ضریب تصحیحی بر حسب ماه و عرض جغرافیایی،  $NDM$  تعداد روزهای یک ماه و  $N$  بیشینه تعداد ساعت‌های آفتابی است. بدین ترتیب با داشتن مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل، اختلاف بین بارش ( $P$ ) و  $PET$  برای ماه  $i$  ام به دست می‌آید.

$$D_i = R_i - PET_i \quad \text{رابطه (۹)}$$

بر اساس نتایج تحقیقات متعدد مشخص شده است که توزیع لجستیک به دلیل تناسب بیشتر با داده‌های دارای چولگی و نیز دنباله طولانی‌تر در دامنه انتهایی توزیع، دارای کارایی بهتری در تعیین تابع تراکم احتمال است، لذا در محاسبه تابع تراکم احتمال در شاخص

SPEI از توزیع لجستیک استفاده می‌شود. تابع تراکم احتمال سری‌های  $D$  بر اساس توزیع لجستیک لگاریتمی طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در این رابطه،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر  $D$  در دامنه  $D < \gamma < \infty$  هستند (ویسنده سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). برای محاسبه پارامترهای توزیع لجستیک لگاریتمی از روش گشتاور وزنی احتمال به‌منزله روشی توانمند و ساده استفاده می‌شود. تابع توزیع احتمال سری‌های  $D$  نیز بر اساس رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

شاخص SPEI در حکم مقادیر استانداردشدهی (FX) را می‌توان به‌آسانی محاسبه کرد.

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن،  $W = \sqrt{-2 \ln(P)}$  برای  $P \leq 0.5$  بوده و  $P$  احتمال بیشتر شدن مقادیر تعیین‌شده  $D$  است. مقادیر  $c_0, c_1, c_2$  و همچنین  $d_1, d_2, d_3$  ثابت هستند. شاخص استانداردشده می‌تواند با سایر مقادیر SPEI در مکان و زمان مقایسه شود. مقدار SPEI معادل صفر به معنای مقادیر منطبق با ۵۰٪ احتمال تجمعی  $D$  است (ویسنده سرانو و همکاران، ۲۰۱۰).

### درون‌یابی خشکسالی فصلی در حوضه دریاچه ارومیه

روش‌های زمین‌آمار برآورد فضایی دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌های درونیابی ارائه می‌دهند. در روش‌های زمین‌آمار پراش برآورد شده که اندازه‌گیری عدم قطعیت را برای برآوردها فراهم می‌کند، به حداقل ممکن می‌رسد. همچنین روش‌های زمین‌آمار به دلیل نحوه وزن دهی برای مناطق فاقد داده پیشرفت‌های قابل توجهی نسبت به سایر روش‌های موجود دارند (Goovaerts, 2000). بر این اساس در این پژوهش برای پهنه‌بندی خشکسالی از روش زمین‌آمار کریجینگ استفاده شده است. نتایج مطالعات بسیاری نشان داده است که تکنیک‌های زمین‌آمار و بخصوص روش کریجینگ نسبت به روش‌های معمول درون‌یابی دقیق‌تر هستند (Grimes & Pardo-Igúzquiza, 2010; Chappell et al., 2013).

## نتایج و بحث

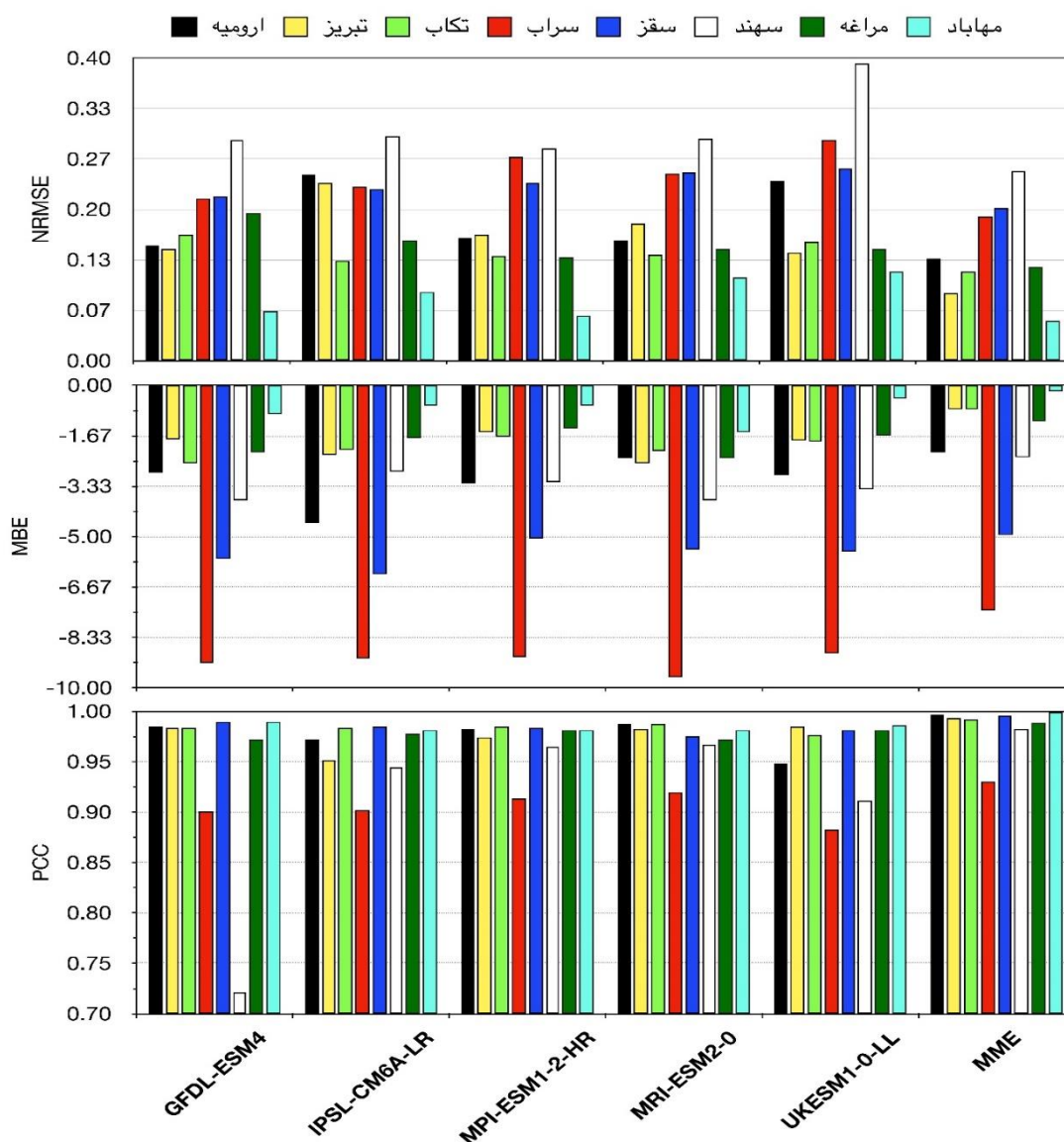
### درستی سنجی برون‌داد بارش پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)

درستی برون‌داد بارش پنج مدل CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش IWM در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ برای هشت ایستگاه هواشناسی همدید و با بکارگیری سه سنجه آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطای بهنجار شده (NRMSE)، ضریب همبستگی پیرسون (PCC) و میانگین اریبی خطا (MBE) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد برون‌داد بارش مدل‌های CMIP6 در کل حوضه برای بارش سالانه کم‌برآوردی دارند. بیشینه مقدار اریبی با ۶/۹۸ میلی‌متر در ایستگاه ارومیه و کمینه مقدار این سنجه در ایستگاه سقز با مقدار ۹/۶۵- میلی‌متر برای مدل MRI-ESM2-0 دیده شد. متوسط سنجه MBE در حوضه دریاچه ارومیه ۳/۶۴- میلی‌متر، ۳/۶۹- میلی‌متر، ۳/۲۲- میلی‌متر، ۳/۷۵- میلی‌متر و ۳/۳۱- میلی‌متر به ترتیب برای مدل‌های IPSL-CM6A-LR، GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR و MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL به‌دست آمده است. در بین مدل‌های مورد بررسی MPI-ESM1-2-HR بالاترین کارایی را بین مدل‌های منفرد مورد بررسی نشان داده است.

درستی سنجی مدل همادی تولید شده با روش IWM نشان داد که این مدل مقدار اریبی را به شکل قابل توجهی نسبت به مدل‌های منفرد در حوضه دریاچه ارومیه کاهش داده است. همانطور که در شکل (۲) هم مشاهده می‌شود مقدار اریبی مدل CMIP6-MME برای متوسط حوضه دریاچه ارومیه ۲/۴۴- میلی‌متر رسیده است. افزایش کارایی مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد پیش‌تر توسط Bai et al. (2021) در چین و Zarrin & Dadashi-Roudbari (2021b) در ایران مورد تایید قرار گرفته است. سنجه NRMSE نیز نتایج مشابهی را با MBE نشان داده است. بطوریکه در هر هشت ایستگاه نماینده مورد بررسی، سراب بالاترین مقدار NRMSE را برای پنج مدل مورد بررسی نشان داده است. مقدار سنجه NRMSE بین حداقل ۰/۰۵ در ایستگاه مه‌آباد برای مدل MPI-ESM1-2-HR تا حداکثر ۰/۳۹ در ایستگاه سهند برای مدل UKESM1-0-LL در تغییر است. مقدار NRMSE نیز برای مدل همادی تولید شده همانند سنجه



MBE کاهش داشته است که در شکل (۲) نتایج آن دیده می‌شود. نتایج بررسی سنجه PCC نشان داد بالاترین کارایی در ایستگاه تبریز دیده می‌شود. همانطور که در شکل (۲) نیز دیده می‌شود مقدار سنجه PCC پس از تولید مدل همادی کارایی مدل‌ها را به شکل قابل توجهی افزایش داده است. مقدار سنجه PCC مدل CMIP6-MME برای تمامی هشت ایستگاه مورد بررسی دریاچه ارومیه به بیش از ۰/۹۲ رسیده است. نتایج به‌دست آمده بر اهمیت بکارگیری مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد اشاره دارد که نتایج به‌دست آمده توسط Zarrin & Dadashi-Roudbari (2021a) را تایید می‌کند.



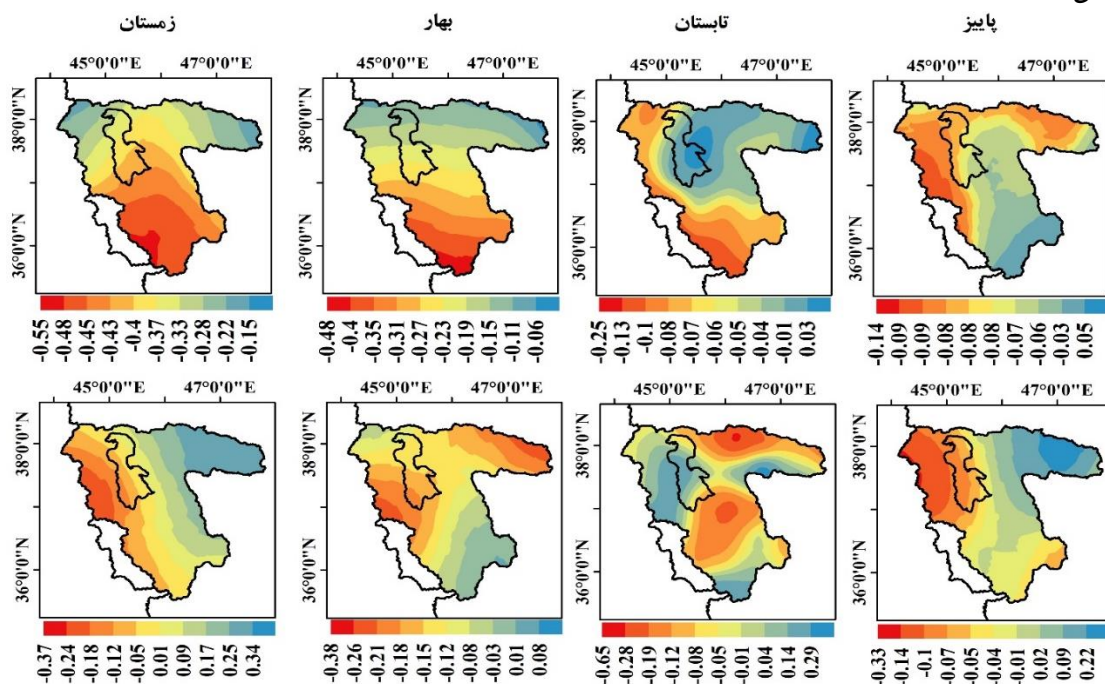
شکل ۲- درستی سنجی برون‌داد بارش هشت ایستگاه مورد بررسی با مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده (CMIP6-MME) با روش IWM در حوضه دریاچه ارومیه

پایش فصلی خشکسالی هواشناسی (SPEI-1) طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید و برون‌داد همادی مدل‌های CMIP6

خشکسالی هواشناسی با شاخص (SPEI-1) با دو سری داده ایستگاهی و داده‌های تاریخی مدل همادی (CMIP6-MME) مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی خشکسالی هواشناسی با داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی همدید که موقعیت آن‌ها در شکل (۱) آمده است، نشان داد که شدت شاخص SPEI-1 در سه فصل زمستان، بهار و تابستان در جنوب حوضه بیش‌تر از سایر مناطق است. در دو فصل تابستان و پاییز شدت خشکسالی در مناطق غربی حوضه بالاتر از مناطق شرقی است. بیشینه شدت خشکسالی در بین فصول مورد بررسی

در حوضه دریاچه ارومیه با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید در فصل زمستان با مقدار  $-0/55$  دیده می‌شود. مقایسه نتایج به دست آمده بین برون‌داد CMIP6-MME و داده‌های ایستگاهی نشان از انطباق خوب این دو سری داده دارد. در فصل پاییز داده‌های ایستگاهی و CMIP6-MME بیشینه مقدار شاخص SPEI-1 را در مناطق غربی حوضه نشان داده‌اند. در فصل زمستان نیز بین برون‌داد داده‌های ایستگاهی و برون‌داد CMIP6-MME انطباق خوبی وجود دارد. در فصل بهار متوسط بلند مدت شاخص خشکسالی بر اساس داده‌های ایستگاهی کاملاً منفی است اما داده‌های CMIP6-MME مقدار مثبت نه‌چندان قابل توجهی را در بخش‌های کوچکی از جنوب غرب حوضه نشان داده است. بر عکس سه فصل پاییز، زمستان و بهار در فصل تابستان بین مناطق شمالی برای داده‌های ایستگاهی و CMIP6-MME اختلاف دیده می‌شود. این اختلاف می‌تواند در نتیجه عوامل بسیاری همچون فقدان ایستگاه اندازه‌گیری در مناطق شمالی و همچنین خطای مدل باشد. از آنجاییکه این مناطق فاقد ایستگاه اندازه‌گیری است نمی‌توان این اختلاف را به راحتی به خطای مدل نسبت داد. مقدار متوسط پهنه‌ای شاخص SPEI-1 در سطح حوضه در فصل زمستان  $-0/12$ ، فصل بهار  $-0/27$ ، فصل تابستان  $-0/06$  و در فصل پاییز  $-0/07$  به دست آمده است.

بررسی خشکسالی طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) نشان می‌دهد که بیشینه مقدار منفی شاخص در مناطق غربی حوضه دریاچه ارومیه اتفاق افتاده است. بطوریکه کانون اصلی منفی شاخص در سه فصل زمستان، بهار و پاییز در مناطق غربی حوضه دیده می‌شود. بیشینه مقدار منفی شاخص SPEI-1 در فصل تابستان با مقدار  $-0/65$  و بیشینه مثبت آن در فصل زمستان با مقدار  $0/34$  دیده می‌شود (شکل ۳). بطور کلی خشکسالی از شمال به جنوب و از غرب به شرق در حوضه دریاچه ارومیه روند کاهشی را نشان می‌دهد. متوسط پهنه‌ای شاخص SPEI-1 در دوره ۲۵ ساله مورد بررسی در سه فصل بهار، تابستان و پاییز در دریاچه ارومیه منفی است. به رغم آنکه بیشینه شاخص در فصل تابستان دیده شده است اما بیشینه شاخص برای متوسط پهنه‌ای حوضه در فصل بهار با مقدار  $-0/15$  به دست آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که فراوانی نقطه شبکه‌ها و سال‌هایی که شاخص در آن کمتر از نرمال شده است در فصل بهار بیش‌تر از سایر فصول است. درصد سال‌هایی که شاخص SPEI-1 در آن کمتر از نرمال است طی دوره تاریخی بین ۴۸ درصد در فصل پاییز تا ۵۵/۶۱ درصد در فصل بهار در تغییر است. بر این اساس طی فصل بهار حوضه دریاچه ارومیه با رخدادهایی با فراوانی بالاتر خشکسالی نسبت به سایر فصول همراه بوده است. پس از فصل بهار، فصل تابستان با مقدار  $50/47$  درصد، سال‌هایی با مقدار کمتر از نرمال دارد (جدول ۲). بر اساس فراوانی سال‌ها و فصول کمتر از نرمال، دوره‌های خشک و رخداد خشکسالی در دوره گرم سال، در حوضه دریاچه ارومیه بیش‌تر از دوره سرد سال است.



شکل ۳- میانگین بلند مدت شاخص خشکسالی هواشناسی (SPEI-1) بر اساس برون‌داد مدل همدادی CMIP6 و هشت ایستگاه هواشناسی همدید طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) (ردیف اول ایستگاه‌های هواشناسی و ردیف دوم برون‌داد همدادی مدل‌های CMIP6)

پیش‌نگری فصلی خشکسالی هواشناسی (SPEI-1) مبتنی بر پرونداد CMIP6-MME

تغییرات زمانی شاخص SPEI-1 برای دوره پیش‌نگری (۲۰۲۶-۲۱۰۰)، تحت دو سناریو خوش بینانه (SSP1-2.6) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) در شکل‌های (۴ و ۵) نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده انتظار می‌رود که خشکسالی در تمام فصول و دسته بندی‌ها (خشکسالی متوسط تا خشکسالی شدید) رخ دهد. همانطور که برای دوره تاریخی نیز دیده شد شدیدترین و گسترده‌ترین خشکسالی‌ها در حوضه دریاچه ارومیه در مناطق غربی و شمالی آن رخ می‌دهد. بررسی وضعیت خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه بر اساس نتایج سناریو خوش بینانه (SSP1-2.6) نشان می‌دهد که در چهار دوره/سناریو شاخص بالاتر از نرمال بوده است. بیشینه مقدار شاخص خشکسالی SPEI-1 در فصل زمستان در دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) با مقدار ۰/۷۶ دیده می‌شود. شاخص با مقدار منفی و یا کمتر از نرمال در هشت دوره/سناریو مشاهده می‌شود. بیشینه مقدار منفی شاخص نیز با مقدار ۰-/۷۱ در فصل بهار در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) دیده می‌شود (جدول ۲). تداوم بالای دوره‌های خشکسالی در مناطق غربی دریاچه در دوره آینده می‌تواند یک تهدید جدی برای پوشش گیاهی و زیست بوم این منطقه از ایران باشد.

جدول ۲- میانگین پهنه‌ای شاخص خشکسالی بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده-هواشناسی (SPEI-1) به همراه درصد سال‌های کمتر از نرمال

| میانگین پهنه‌ای شاخص خشکسالی بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده-هواشناسی (SPEI-1) |       |                              |             |           |                               |             |           |
|--|-------|------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------|-------------|-----------|
| فصل  | دوره  | سناریو خوش بینانه (SSP1-2.6) |             |           | سناریو بد بدبینانه (SSP5-8.5) |             |           |
|  |       | آینده نزدیک                  | آینده میانی | آینده دور | آینده نزدیک                   | آینده میانی | آینده دور |
| زمستان   | ۰/۰۱  | ۰/۲۸                         | ۰/۴۵        | ۰/۰۹      | -۰/۱۱                         | -۰/۱۹       | -۰/۰۵     |
| بهار   | -۰/۱۵ | -۰/۰۴                        | ۰/۰۲        | ۰/۰۷      | -۰/۲۲                         | -۰/۵۳       | -۰/۶۷     |
| تابستان  | -۰/۱۱ | -۰/۰۹                        | ۰/۰۰        | -۰/۰۷     | -۰/۰۷                         | -۰/۴۸       | -۰/۴۷     |
| پاییز  | -۰/۰۴ | ۰/۵۳                         | ۰/۳۱        | ۰/۴۲      | ۰/۱۵                          | -۰/۰۵       | ۰/۲۲      |

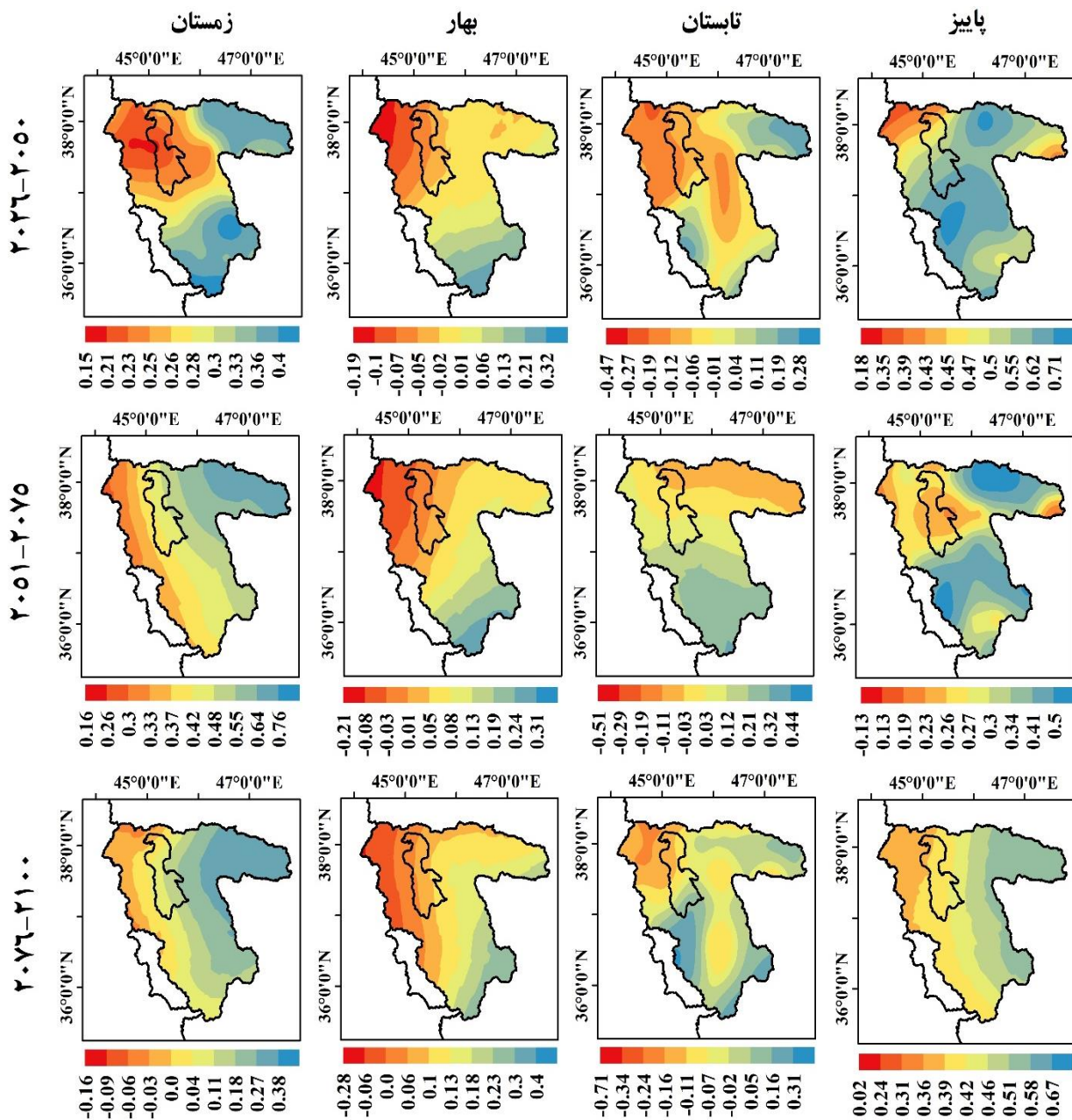
| میانگین پهنه‌ای درصد سال‌های کمتر از نرمال (مقدار منفی شاخص) |       |                              |             |           |                               |             |           |
|--|-------|------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------|-------------|-----------|
| فصل  | دوره  | سناریو خوش بینانه (SSP1-2.6) |             |           | سناریو بد بدبینانه (SSP5-8.5) |             |           |
|  |       | آینده نزدیک                  | آینده میانی | آینده دور | آینده نزدیک                   | آینده میانی | آینده دور |
| زمستان   | ۴۹/۹۰ | ۳۳/۵۲                        | ۲۵/۵۲       | ۴۳/۰۴     | ۶۲/۰۹                         | ۶۰/۵۷       | ۵۶/۳۸     |
| بهار   | ۵۵/۶۱ | ۵۰/۴۷                        | ۵۲/۱۹       | ۳۹/۰۴     | ۵۷/۵۲                         | ۷۸/۶۶       | ۸۲/۰۲     |
| تابستان  | ۵۰/۴۷ | ۵۵/۵۷                        | ۴۸/۵۷       | ۵۵/۸۰     | ۵۴/۰۹                         | ۸۰/۷۶       | ۷۱/۸۰     |
| پاییز  | ۴۸    | ۳۲/۱۹                        | ۲۸/۷۶       | ۲۹/۴۷     | ۳۶/۱۹                         | ۵۹/۰۴       | ۴۵/۷۱     |

در طول فصول بارشی در شمال غربی ایران و بطور مشخص فصول زمستان و بهار، که در طی آن کشاورزان بیشترین وابستگی را به بارش دارند، دوره‌های خشک افزایش می‌یابد. همچنین پیش‌نگری می‌شود که خشکسالی‌های طولانی‌مدت، که می‌توانند پیامدهای شدید منطقه‌ای داشته باشند، تا سال ۲۱۰۰ از نظر شدت نیز افزایش داشته باشند. در فصول گرم سال، میانگین پهنه‌ای درصد سال‌های کمتر از نرمال (مقدار منفی شاخص) به طور بالقوه بیش‌تر از دوره تاریخی است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار بارش سالانه تا پایان قرن به طور متوسط در حوزه دریاچه ارومیه کاهش می‌یابد و در مقابل خشکسالی‌ها (و پیامدهای آن) احتمالاً به طور قابل توجهی شدیدتر خواهند بود. بر این اساس مشکلات مرتبط با منابع آب بخصوص در بخش کشاورزی نیز در دوره گرم سال در حوضه دریاچه ارومیه با چالش‌های جدی همراه خواهد بود. تامین ناکافی آب، به‌ویژه در ماه‌های تابستان می‌تواند پیامدهای شدیدی بر محصولات کشاورزی در این حوضه داشته باشد. کاهش محصولات کشاورزی تحت تأثیر کاهش بارش و شدت یافتن خشکسالی نه تنها می‌تواند به کمبود نهاده‌ها برای کشاورزان معیشتی منجر شود، بلکه باعث کاهش درآمد و ناامنی غذایی بالقوه نیز می‌شود.

بازخورد اکولوژیکی و فیزیولوژیکی بین خشکسالی و پوشش گیاهی نیز پیامدهای جدی را بر محیط زیست و سامانه اقلیم خواهد داشت. باید در نظر داشت که افزایش خشک شدن خاک ممکن است رخداد امواج گرمایی تابستان را تشدید کند (Lian et al., 2020). از سوی دیگر، کاهش سریعتر رطوبت خاک، با افزایش رطوبت جوی بخصوص در فصل بهار باعث بارش‌های بیشتر از نوع همرفتی می‌شود و این امر در صورت بالا بودن شدت بارش‌ها منجر به بروز سیل‌های ناگهانی و فرسایش خاک می‌شود. افزایش خشکسالی‌ها بازخورد بیوفیزیکی دیگری را نیز به همراه خواهد داشت. در این بازخورد کمبود رطوبت خاک منجر به کاهش تبخیر-تعرق شده و ممکن است از توسعه ابر و بارش‌های بعدی جلوگیری کند. علاوه بر این، مطالعات اخیر (Meehl et al., 2020 Dai et al., 2018) نشان داده‌اند که

حساسیت ترازمندی اقلیمی (ECS) در CMIP6 بزرگتر از مدل‌های CMIP5 است. به این معنی که مدل‌های CMIP6 ممکن است به افزایش CO<sub>2</sub> حساس‌تر باشند. بنابراین، چنین پیامدی ممکن است بر پیش‌نگری خشکسالی در سطوح مختلف در حوضه دریاچه ارومیه تأثیر بگذارد.

انسان با تغییرات کاربری اراضی نقش تعیین‌کننده‌ای را در پس‌خورهای اقلیمی دارد. لذا نقش عوامل انسانی در رخداد خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه را نمی‌توان نادیده گرفت. سپیدایی سطح و رطوبت خاک دو سازوکار مهم پسخور مثبت برای خشکسالی هستند که انسان نقش تعیین‌کننده‌ای را در تغییرات این دو متغیر دارد. سپیدایی سطح به طور مستقیم و رطوبت خاک به طور غیرمستقیم از طریق تأثیر آن بر شار گرمای نهان بر تعادل تابش در سطح زمین تأثیر می‌گذارند که در نتیجه شاهد پسخورد مثبت خشکسالی خواهیم بود.



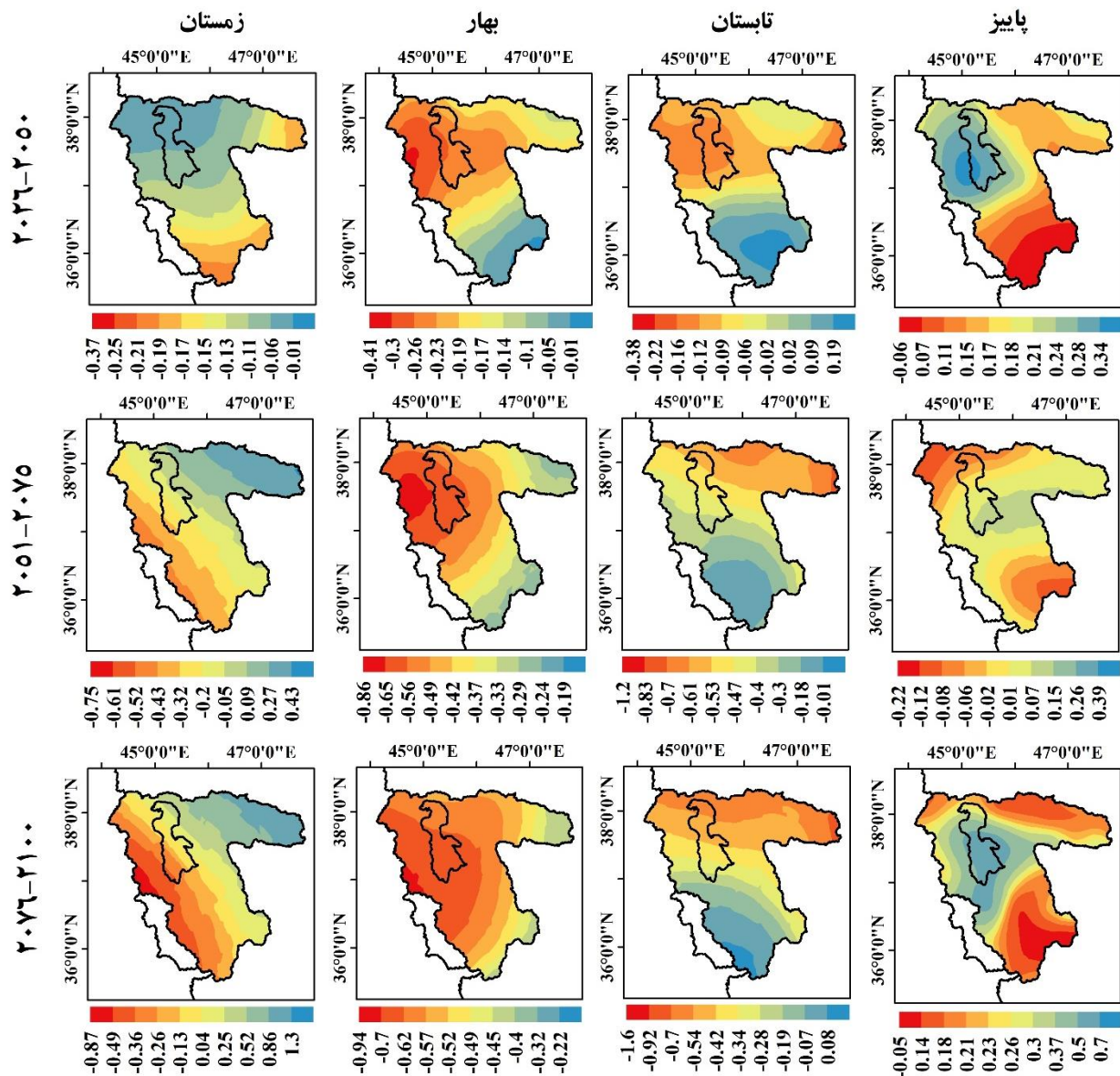
شکل ۴- پهنه‌بندی شاخص خشکسالی بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده-هواشناسی (SPEI-1) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد مدل همادی CMIP6 تحت سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6)

شاخص خشکسالی بر اساس نتایج سناریو خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) در پنج فصل/دوره کاملاً منفی است. همانند آنچه که برای دوره تاریخی در سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) دیده شد در این سناریو نیز بیشینه شدت خشکسالی در مناطق غربی و سپس شمالی

حوضه دیده می‌شود. همچنین مقدار شاخص خشکسالی در مناطق جنوبی و شرقی تحت سناریو 8.5-SSP5 منفی شده است. بیشینه شدت خشکسالی در فصل زمستان در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) و آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۲۵۱) با مقدار  $1/2$  - و  $1/6$  - مشاهده می‌شود. این دو مقدار از شاخص خشکسالی به ترتیب نشان دهنده خشکسالی متوسط و خشکسالی شدید است. این مقادیر از شدت شاخص خشکسالی زمانی بیش‌تر مورد توجه است که مقدار به دست آمده، متوسط ۲۵ ساله را نشان می‌دهد که مبین فراوانی بالای رخداد های خشکسالی با شدت بالا در حوضه دریاچه ارومیه است. این نتیجه نشان دهنده تداوم و شدت بالای خشکسالی‌ها بر اساس شاخص SPEI در دوره آینده میانی و آینده دور است. درصد سال‌هایی که شاخص SPEI در آن کمتر از نرمال است در تمامی دوره‌ها و فصول به غیر از فصل پاییز در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) بیش‌تر از دوره تاریخی است (جدول ۲). همانطور که برای مقدار شاخص نیز در شکل (۵) دیده می‌شود، فراوانی سال‌هایی که شاخص کمتر از نرمال است (یعنی مقدار شاخص SPEI منفی شده است) در دوره آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) نسبت به دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) در فصول گرم سال (فصول بهار و تابستان) افزایش قابل توجهی را نشان داده است. پس از فصول تابستان و بهار، در فصل زمستان نیز فراوانی سال‌هایی که شاخص خشکسالی در آن کمتر از نرمال بوده است در دوره‌های پیش‌نگری نسبت به دوره تاریخی افزایش زیادی را نشان می‌دهد. بررسی فراوانی سال‌های همراه با مقدار منفی شاخص نشان می‌دهد که رخداد خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه روند افزایشی معنی‌داری خواهد داشت. این مقدار از روند افزایشی از خشکسالی تهدیدی جدی برای حیات دریاچه ارومیه خواهد بود.

علاوه بر آنچه که گفته شد، تفاوت‌های فصلی در روند خشکسالی آینده در حوضه دریاچه ارومیه کاملاً مشهود است. شاخص SPEI-1 در فصول بهار و تابستان از شمال به جنوب به طور متناوب بین دوره‌های خشک و مرطوب تغییر می‌کند. در حالی که نتایج SPEI-1 در فصل پاییز نتایج متفاوتی را به جهت پراکنش فضایی خشکسالی نشان می‌دهد. بطور کلی حوضه دریاچه ارومیه در فصل تابستان خشکسالی شدیدتری را نسبت به دوره تاریخی تجربه خواهد کرد. نتایج نشان داد که تحت سناریوهای مختلف SSP، یک روند نزولی در تعداد سال‌های همراه با مقدار شاخص خشکسالی کمتر از نرمال در حوضه دریاچه ارومیه در فصل پاییز وجود خواهد داشت.

بررسی دوره‌های خشکسالی نشان می‌دهد در هر دو سناریو خوش بینانه و خیلی بدبینانه رخداد های خشکسالی تا دوره میانی قرن حاضر (۲۰۷۵-۲۰۵۱) افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد (جدول ۲ و شکل ۴). چنین تغییراتی از خشکسالی در دامنه‌های جنوبی رشته کوه هیمالیا مرکزی نیز توسط Sharma et al., (2021) با استفاده از مدل‌های CMIP6 گزارش شده است. Almazroui et al., (2020) افزایش موسمی تابستانی جنوب آسیا در قرن بیست و یکم منجر به افزایش بارش‌ها و کاهش رخداد های خشکسالی عنوان کرده‌اند. لذا تغییرات افزایشی-کاهشی خشکسالی در دوره میانی و پایانی قرن حاضر در حوضه دریاچه ارومیه نیز می‌تواند در نتیجه تغییرات سامانه‌های بارشی رسیده به شمال غرب ایران باشد که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر در این خصوص است. همانطور که گفته شد در دوره‌های آینده رخداد های خشکسالی چه از نظر فراوانی و چه از نظر شدت در دوره میانی قرن حاضر (۲۰۷۵-۲۰۵۱) نسبت به آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) به غیر از فصل بهار برای سناریو 8.5-SSP5 بیش‌تر خواهد بود. این تغییرات در شرایط خشکسالی در منطقه مورد مطالعه می‌تواند با تغییرات بارش و دما مرتبط باشد. کمبود بارش همراه با تبخیر-تعرق ناشی از افزایش دما ممکن است منجر به رخداد های خشکسالی در سناریوهای مختلف در آینده میانی شود. علاوه بر این، بارش بر اساس برون‌داد همادی مدل‌های مورد بررسی پس از دهه ۲۰۷۰ کمی افزایش خواهد داشت. بنابراین، احتمال رخداد خشکسالی کمتری وجود دارد. البته باید در نظر داشت که افزایش قابل توجه دما در شمال غربی ایران توسط Zarrin and Dadashi-Roudbari (2020) با استفاده از مدل‌های CMIP6 گزارش شده است و افزایش نسبی بارش همراه با افزایش دما نمی‌تواند دورنمای مناسبی داشته باشد. شایان ذکر است که در این تحقیق تنها خشکسالی‌های فصلی مورد توجه قرار گرفته است و خشکسالی‌هایی مکرر با مدت زمان کوتاه‌تر که ممکن است در سطح حوضه اتفاق بیافتد، مورد بررسی قرار نگرفته است. این امر زمانی دارای اهمیت بیش‌تری است که باید توجه داشت خشکسالی ناگهانی (Flash Drought) به عنوان یک خشکسالی زیر فصلی با شروع سریع در نظر گرفته می‌شود و به دلیل بی‌هنجاری جوی-اقیانوسی پیش‌بینی/نگری این دست از خشکسالی‌ها دشوار است. خشکسالی‌های ناگهانی همچنین به عنوان یک چالش برای هشدار سریع خشکسالی است. بر این اساس درک ارتباط بین خشکسالی‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف یک نیاز فوری برای تفسیر پیش‌بینی یا پیش‌نگری انواع مختلف از خشکسالی و تسهیل توسعه سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی در کشور و حوضه دریاچه ارومیه است.



شکل ۵- پهنه بندی شاخص خشکسالی بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده-هواشناسی (SPEI-1) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد مدل همدی CMIP6 تحت سناریو خیلی بدبینانه (SSP5-8.5)

## نتیجه گیری

درک چگونگی تغییرات خشکسالی، حوزه تحقیقاتی فعالی است که شامل طیف پیچیده‌ای از فرآیندها (به عنوان مثال، بارش، تبخیر-تعرق و پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه) است. بر این اساس کمی سازی تغییرات خشکسالی چه در دوره مشاهداتی و چه در دوره آینده برای مدیریت بلایای مرتبط با آب و اقلیم تحت گرمایش جهانی اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه، از برونداد فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده برای بررسی خشکسالی هواشناسی آینده حوضه دریاچه ارومیه استفاده شده است. یک مدل همدی با روش IWM از پنج مدل تصحیح شده اریبی از سری مدل‌های CMIP6 تولید شد. نتایج درستی سنجی مدل‌های مورد بررسی نشان داد که هر پنج مدل منفرد مورد بررسی CMIP6 برای هشت ایستگاه نماینده مورد بررسی کم‌برآوردی دارند. اریبی مدل‌های مورد بررسی پس از تولید مدل همدی کاهش یافت و به تبع آن کارایی مدل همدی تولید شده (CMIP6-MME) افزایش یافته است.

برای بررسی دقیق‌تر خشکسالی هواشناسی برونداد CMIP6-MME با داده‌های ایستگاهی، شاخص SPEI-1 با داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی همدید طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ نیز محاسبه و نتایج آن در مقیاس فصلی با داده‌های CMIP6-MME مقایسه شد. نتایج نشان داد بین برونداد خشکسالی هواشناسی با شاخص CMIP6-MME با داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه انطباق خوبی بخصوص در سه فصل پاییز، زمستان و بهار دیده می‌شود. اما بین نتایج به‌دست آمده از برونداد خشکسالی هواشناسی

CMIP6-MME با داده‌های ایستگاهی بخصوص در مناطق شمالی حوضه اختلافاتی دیده می‌شود. به دلیل فقدان ایستگاه اندازه‌گیری در مناطق شمالی حوضه نمی‌توان این اختلاف را با قطعیت در نتیجه خطای مدل‌های CMIP6 دانست. دلیل این اختلاف می‌تواند در نتیجه عوامل بسیاری باشد که نیازمند یک پژوهش مستقل در این حوضه با بکارگیری داده‌های مختلف ماهواره‌ای و بازتحلیل و مقایسه آن با داده‌های CMIP6 است.

در مقایسه با مطالعات قبلی (Mirgol et al., 2021; Davarpanah et al., 2021; Abbasian et al., 2021)، این مطالعه علاوه بر بکارگیری مدل همادی، عوامل اجتماعی-اقتصادی (سناریوهای SSP در مدل‌های CMIP6) را در شرایط خشکسالی پیش‌نگری در حوضه دریاچه ارومیه در نظر گرفت. این امر زمانی از اهمیت بیشتری برخوردار است که شمال غربی ایران و حوضه دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر تحت تأثیر فعالیت‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی قرار گرفته است. بطوریکه که نمی‌توان تأثیر فعالیت‌های انسانی بر رخداد خشکسالی را نادیده گرفت. علاوه بر این، در مقایسه با CMIP5، مدل‌های CMIP6 بهبود زیادی در شبیه‌سازی دما و بارش در ایران نشان داده‌اند (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2020 & 2021a)، که متغیرهای کلیدی برای نمایش بهتر خشکسالی هستند.

تغییرات خشکسالی هواشناسی در شمال غربی ایران و به طور مشخص در حوضه دریاچه ارومیه را می‌توان عمدتاً با نقش حیاتی بارش و تبخیر-تعرق توضیح داد. شایان ذکر است زمانیکه تبخیر-تعرق از بارش بیشتر شود، شمال غربی ایران شرایط خشکسالی شدیدتری را تجربه خواهد کرد. افزایش قابل توجه خشکسالی در دوره آینده می‌تواند در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق و دما و کاهش بارش باشد. این شرایط را در آینده به خصوص در دوره آینده میانی از ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۵ می‌توان دید. نتایج نشان می‌دهد که همه انواع دسته‌های خشکسالی (یعنی خشکسالی متوسط تا شدید) در دوره پیش‌نگری رخ می‌دهند. تعداد فصول همراه با مقدار کمتر از نرمال (مقدار منفی شاخص) در حوضه دریاچه ارومیه با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره آینده افزایش می‌یابد. میانگین خشکسالی و فصول همراه با مقدار کمتر از نرمال شاخص خشکسالی، تحت سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) طولانی‌تر و شدید است. بطور کلی، بزرگی پاسخ خشکسالی به گرمایش جهانی در حوضه دریاچه ارومیه به منطقه و فصل بستگی دارد. حتی با وجود تفاوت خشکسالی در سناریوهای خوش‌بینانه و خیلی بدبینانه و فصول، کانون اصلی تداوم خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه غرب حوضه است که در برونداد مدل همادی CMIP6-MME مشهود است که نیازمند توجه ویژه‌ای به این مناطق در طرح‌های سازگاری است.

علیرغم عدم قطعیت ناشی از مدل‌های CMIP6، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد رخدادهای خشکسالی مشاهده شده در این تحقیق با روندهای مشاهده شده بارش و دما در این مناطق سازگار است. از نظر تغییرات بارش و دما، بیشینه روند کاهش برای بارش و روند افزایشی برای دما در پیش‌نگری‌ها در شمال غرب ایران رخ می‌دهد (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2020 & 2021a). کاهش بارش و افزایش دما نقش تعیین‌کننده‌ای را در تغییرات تبخیر-تعرق دارد که بر این اساس خشکسالی هواشناسی در این مناطق افزایش می‌یابد.

درک بهتر از خشکسالی‌ها در دهه‌های آتی می‌تواند به سیاست‌گذاری کلان در بخش‌های مرتبط با منابع آب و کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه کمک کند. سیاست‌های انطباق‌محور می‌توانند به طور فعال انعطاف‌پذیری سامانه‌های کشاورزی و منابع آب را در طول دهه‌های آینده افزایش دهند. چنین برنامه‌هایی می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا به تدریج از یک محصول به محصول دیگر یا به گونه‌های مقاوم‌تر در برابر خشکسالی تغییر کشت دهند. با این حال، افزایش شدت خشکسالی در کوتاه‌مدت می‌تواند پیامدهای جدی بر جوامع آسیب‌پذیر کشاورزی و بخصوص کشاورزی دیم که بخش قابل توجهی از کشاورزی را در ایران و بخصوص شمال غرب دارا است، داشته باشد و ممکن است به تلاش‌های بیش‌تر و برنامه‌ریزی‌های جامع‌تر برای تاب‌آوری نیاز داشته باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abbasi, A., Khalili, K., Behmanesh, J., & Shirzad, A. (2019). Drought monitoring and prediction using SPEI index and gene expression programming model in the west of Urmia Lake. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1), 553-567.
- Abbasian, M. S., Najafi, M. R., & Abrishamchi, A. (2021). Increasing risk of meteorological drought in the Lake Urmia basin under climate change: Introducing the precipitation-temperature deciles index. *Journal of Hydrology*, 592, 125586.
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D., & Hain, C.



- R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452-480.
- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Garreaud, R., & Montecinos, A. (2021). Hydrological droughts in the southern Andes (40–45° S) from an ensemble experiment using CMIP5 and CMIP6 models. *Scientific reports*, 11(1), 1-16.
- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., & Ismail, M. (2020). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(2), 297-320.
- Asadi Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A., Dadashi-Roudbari, A. (2022). Seasonal Distribution Analysis of Extreme Precipitation in Iran using AgERA5 dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2723-2737 (In Farsi).
- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J. (2021). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain. *International Journal of Climatology*, 41, E171-E186.
- Bishop, C. H., & Abramowitz, G. (2013). Climate model dependence and the replicate Earth paradigm. *Climate dynamics*, 41(3), 885-900.
- 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 Farsi).
- Chappell, A., Renzullo, L. J., Raupach, T. H., & Haylock, M. (2013). Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia. *Journal of hydrology*, 493, 105-114.
- Chen, H., Sun, J., Lin, W., & Xu, H. (2020). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin*, 65(17), 1415-1418.
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461.
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, 3(1), 52-58.
- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 301-312.
- Davarpanah, S., Erfanian, M., & Javan, K. (2021). Assessment of climate change impacts on drought and wet spells in Lake Urmia Basin. *Pure and Applied Geophysics*, 178(2), 545-563.
- Dhurmea, K. R., Boojhawon, R., & Rughooputh, S. D. D. V. (2019). A drought climatology for Mauritius using the standardized precipitation index. *Hydrological Sciences Journal*, 64(2), 227-240.
- Dosio, A., Jury, M. W., Almazroui, M., Ashfaq, M., Diallo, I., Engelbrecht, F. A., ... & Tamoffo, A. T. (2021). Projected future daily characteristics of African precipitation based on global (CMIP5, CMIP6) and regional (CORDEX, CORDEX-CORE) climate models. *Climate Dynamics*, 57(11), 3135-3158.
- Ghamghami, M., & Irannejad, P. (2019). An analysis of droughts in Iran during 1988–2017. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1-21.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*, 228(1-2), 113-129.
- Grimes, D. I., & Pardo-Igúzquiza, E. (2010). Geostatistical Analysis of Rainfall. *Geographical analysis*, 42(2), 136-160.
- Hamal, K., Sharma, S., Khadka, N., Haile, G. G., Joshi, B. B., Xu, T., & Dawadi, B. (2020). Assessment of drought impacts on crop yields across Nepal during 1987–2017. *Meteorological Applications*, 27(5), e1950.
- IPCC, (2012). "Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)." A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, and Q. Dahe, Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Lian, X., Piao, S., Li, L. Z., Li, Y., Huntingford, C., Ciais, P., ... & McVicar, T. R. (2020). Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. *Science advances*, 6(1), eaax0255.
- Mahsifar, H., Maknoon, R., Saghafian, B. (2010). The Impact of Climate Change on Urmia Lake Water Level. *Iran-Water Resources Research*, 7(1), 47-58.
- Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J. F., Stouffer, R. J., ... & Schlund, M. (2020). Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6



- Earth system models. *Science Advances*, 6(26), eaba1981.
- Meroni, M., Rembold, F., Fasbender, D., & Vrieling, A. (2017). Evaluation of the Standardized Precipitation Index as an early predictor of seasonal vegetation production anomalies in the Sahel. *Remote sensing letters*, 8(4), 301-310.
- Mirdashtvan, M., Malekian, A., Mohseni Saravi, M. (2017). Climate change assessment under greenhouse gases emission scenarios: Urmia Lake Basin. *Desert Management*, 5(9), 15-30. doi: 10.22034/jdmal.2017.27854.
- 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), e2009.
- Mishra, V., Bhatia, U., & Tiwari, A. D. (2020). Bias-corrected climate projections for South Asia from coupled model intercomparison project-6. *Scientific data*, 7(1), 1-13.
- Mo, K. C., & Lettenmaier, D. P. (2016). Precipitation deficit flash droughts over the United States. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4), 1169-1184.
- Mostafazadeh, R., Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 633-643 (In Farsi).
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Poljansek, K., Marín Ferrer, M., De Groeve, T., & Clark, I. (2017). Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less. ETH Zurich.
- Rezaei, A. (2021). Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran. *Journal of Hydrology*, 603, 126928.
- Shamloo, N., Sattari, M. T., & Apaydin, H. (2022). Agricultural drought survey using MODIS-based image indices at the regional scale: case study of the Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04023-6>.
- Sharma, S., Hamal, K., Khadka, N., Ali, M., Subedi, M., Hussain, G., ... & Dawadi, B. (2021). Projected Drought Conditions over Southern Slope of the Central Himalaya Using CMIP6 Models. *Earth Systems and Environment*, 5(4), 849-859.
- Song, Y. H., Shahid, S., & Chung, E. S. (2022). Differences in multi-model ensembles of CMIP5 and CMIP6 projections for future droughts in South Korea. *International Journal of Climatology*, 42(5), 2688-2716.
- Su, B., Huang, J., Mondal, S. K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., ... & Li, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375.
- Swann, A. L. (2018). Plants and drought in a changing climate. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 192-201.
- Tajbakhsh, S., Eisakhani, N., & Fazl Kazemi, A. (2015). Assessment of meteorological drought in Iran using standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(2), 313-321 (In Farsi).
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Pena-Gallardo, M., Yuan, S., & Dominguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews*, 201, 102953.
- Wang, T., Tu, X., Singh, V. P., Chen, X., & Lin, K. (2021). Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. *Journal of Hydrology*, 596, 126091.
- Wang, T., Tu, X., Singh, V. P., Chen, X., & Lin, K. (2021). Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. *Journal of Hydrology*, 596, 126091.
- Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Österle, H., ... & Best, M. (2011). Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 823-848.
- Xu, L., Chen, N., & Zhang, X. (2019). Global drought trends under 1.5 and 2 C warming. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2375-2385.
- Xu, Y., Zhang, X., Wang, X., Hao, Z., Singh, V. P., & Hao, F. (2019). Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China.



*Journal of Hydrology*, 579, 124147.

- Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of hydrology*, 526, 183-195.
- Zarrin, A., Dadashi Roudbari, A. (2020). Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 583-602 (In Farsi).
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. (2021a). Projected consecutive dry and wet days in Iran based on CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(3), 561-578 (In Farsi).
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. (2021b). Projected consecutive dry and wet days in Iran based on CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(3), 561-578 (In Farsi).
- Zeng, J., Li, J., Lu, X., Wei, Z., Shangguan, W., Zhang, S., ... & Zhang, S. (2022). Assessment of global meteorological, hydrological and agricultural drought under future warming based on CMIP6. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(1), 100143.
- Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... & Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, 246, 105111.
- Zhao, T., & Dai, A. (2017). Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part II: model-simulated historical and future drought changes. *Climatic Change*, 144(3), 535-548.