



Institute of Geography



## Forecast of Water levels in the Caspian Sea Based on the Sixth IPCC Report

Zahra Eeslami <sup>a</sup>, Abdolazim Ghanghermeh <sup>b\*</sup>.

<sup>a</sup>. M.A. of student of Climatology, Golestan University, Gorgan, Iran

<sup>b</sup>. Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Golestan University, Gorgan, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Water levels in the Caspian Sea fluctuate constantly on different time scales. In recent decades, several studies have examined the causes of fluctuations, the impact of climatic and non-climatic components, and the forecasting of water levels based on different climatic models. Considering that most of the predictions regarding hydro-climatic components and Caspian water level are based on a fixed time period. Thus, in this study, we considered the time base period for downscaling the Caspian Sea's variable level and, on the other hand, for integrating the best output of different climatic models. Accordingly, the purpose of this article is to estimate the future sea level of the Caspian Sea using the sixth IPCC report under optimistic and pessimistic scenarios.

#### Materials and methods

Data for this study includes two groups of Caspian Sea water levels from 1941 to 2019, as well as the output of three climate models; INM-CM4-8, MIROC-ES2L, and MPI-ESM1-2-LR. As part of the above three models, we selected the following components: percentage of cloud cover (clt), evaporation flux (evspsbl), specific humidity (huss), precipitation flux (pr), sea surface pressure (psl), air temperature (tas), and wind components including orbital and meridional components (vas & uas) and surface stress (tauu & tauv) for the base and future periods, 1941 to 2080. These models are part of the CMIP6 international model comparison project produced under the name Phase 6. The scenarios used in this study are SSP2-4.5 and SSP5-8.5, which are based on common paths identified in the sixth IPCC evaluation report. An analysis of the Caspian Sea water level was conducted using Stata software to model it using a multivariate regression model. In order to model the Caspian Sea water level, the selected data matrix was adjusted by including a difference in level from the previous time, which can eliminate long-term trends in the Caspian Sea water level. In this study, based on long-term statistics of the Caspian Sea water level and climatic data output, in order to model the difference in the Caspian Sea water level, we considered the base periods with five time scales, which included periods 2019-1941 in order to select the best baseline variety for modeling the Caspian Sea water level. To evaluate the efficiency of Caspian Sea water level modeling based on different models, we divided the basic modeling course into two modes, training and testing. The climate models in this study were validated using various criteria, including mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R<sup>2</sup>), Nash-Sutcliffe

\*. Corresponding author ([a.ghangherme@gu.ac.ir](mailto:a.ghangherme@gu.ac.ir))

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.342669.1007701>

Received: 26 March 2022; Received in revised form: 30 May 2022; Accepted: 28 July 2022

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

(NS) and Durbin Watson (DW) camera adaptation percentage (Ghanghermeh et al., 2019).

### **Results and Discussion**

According to MIROC-ES2L climate model NS, R2, and DW statistics, there is a good match between the training and testing periods in all time scales of the basic period. In the two climate models INM-CM4-8 and MPI-ESM1-2-LR, the base time scale of 40 and 50 years, i.e. the training period of 2001-2009 and 1971-2009, the models do not perform well during testing, while in other scales, both in testing and training modes, good performance is seen, with the exception that DW has excellent consistency in all scales. The results suggest that, using two scenarios including SSP2-4.5 and SSP5-8.5, the water level will decrease by an average of 43 cm per decade in the INM-CM4-8 climate model between 2021 and 2080, resulting in the level of -30.38 meters. However, based on the SSP5-8.5 scenario, the level is increasing from 2021 to 2050 by 20 cm, and then it is decreasing with an average intensity of 61 cm, finally reaching -29.07 cm in 2080. As shown by the MIROC-ES2L climate model, both scenarios show a decreasing trend in water level, with the average decrease in SSP2-4.5 scenario being equal to 87 cm per decade, while in SSP5-8.5 scenario, the trend is slightly different. As a result, the water level will decrease by 26 cm per decade by 2050 and by 102 cm per decade by 2080 based on the SSP2-4.5 scenario and by -31.76 meters in the SSP5-8.5 scenario. In According to the MPI-ESM1-2-LR climate model, the Caspian Sea water level behavior is different from the above two models, so that the trend of changes in the Caspian Sea water level will continue to increase from 2021 through 2060 with an average of 48 cm per decade, and then the slope of decline of the Caspian Sea water level will become smoother. However, according to the SSP5-8.5 scenario, the water level of the Caspian Sea will increase with a gentler slope, with fluctuations around 10 cm per decade. Finally, the amplitude of water levels in 2080 will be the least different between the two scenarios. Considering the combined results of the above three models, it will be determined that the Caspian Sea water level will be decreasing based on the SSP2-4.5 scenario. In this case, we see that first there will be a smoother slope trend by 2060, which will reach -29 meters, and then the slope trend will be more intense and will reach -30.4 meters. But according to the SSP5-8.5 scenario, the sea level will remain stable at the focal level until 2050, and then the downward trend will reach -29.5 meters by 2080.

### **Conclusion**

As a result of merging the three climate models, it was found that in the SSP2-4.5 scenario, despite the average greenhouse gas emissions remaining at current levels by 2050 and decreasing by 2100, and of course by increasing the temperature by 2 degrees Celsius for the period 2060-2041 and by 2.7 degrees Celsius for the period 2100-2081, the water level in the Caspian Sea will consistently decrease. In the SSP8-8.5 scenario, with intense greenhouse gas emissions and a tripling of carbon dioxide level by 2075, the water level of the Caspian Sea will remain stable from the beginning to 2050, but from this year on, its decline will begin. Additionally, this study's findings are consistent with those of Algioni et al. (2006 and 2007), Korich et al. (2021), Chen et al. (2017), and Hosseini et al. (2020) concerning the decrease of the Caspian Sea water level

**Keywords:** Water Level, Simulation, Climate Model, Scenario, Caspian Sea.



## پیش‌یابی تراز آب دریای خزر بر اساس مدل‌های اقلیمی گزارش ششم IPCC

زهرا اسلامی - دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران  
عبدالعظیم قانقرمه<sup>۱</sup> - دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

### چکیده

تراز آب دریای خزر در مقیاس‌های مختلف زمانی دائماً در حال افت و خیز و نوسان می‌باشد. بر این اساس هدف از این مقاله نیز ارزیابی وضعیت تراز آب دریای خزر برای دوره‌های آتی است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو گروه تراز آب دریای خزر و همچنین خروجی سه مدل اقلیمی از گزارش ششم IPCC شامل: INM-CM4-8، MIROC-ES2L و MPI-ESM1-2-LR می‌باشد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی تراز آب دریای خزر، دوره‌های پایه را با پنج مقیاس زمانی در نظر گرفتیم. در کل نتایج یافته‌های این تحقیق نشان داد که مطابق با سناریو SSP2-4.5 با وجود انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای در سطوح فعلی تا سال ۲۰۵۰ و کاهش آن تا سال ۲۱۰۰، تراز آب دریای خزر روند کاهشی یکنواختی را خواهد داشت. در حالی که در سناریوی SSP8-8.5 با انتشار گازهای گلخانه‌ای شدید و سه برابر شدن دی‌اکسید کربن تا ۲۰۷۵، تراز آب دریای خزر ابتدا تا سال ۲۰۵۰ ثابت خواهد ماند اما از این سال به بعد روند کاهشی آن شروع خواهد شد.

**واژگان کلیدی:** تراز آب، شبیه‌سازی، مدل اقلیمی، سناریو، دریای خزر.

## مقدمه

تراز آب دریای خزر در مقیاس‌های مختلف زمانی دائماً در حال افت و خیز و نوسان می‌باشد. در دهه‌های اول قرن نوزدهم در ارتباط با تغییرات تراز آب دریای خزر دو نظریه وجود داشت که شامل ژئوتکتونیک و تغییرات اقلیمی بود به طوری که با گذشت زمان نظریه‌های اقلیمی در ارتباط با تراز آب دریای خزر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفت. شاید از قدیمی‌ترین یافته‌های علمی می‌توان به کار اقلیم‌شناس معروف آلمانی بروکنر<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۰ اشاره نمود به طوری که وی بارش، فشار و دمای هوا در حوضه دریای خزر را به صورت دوره‌ای ۳۰ الی ۳۵ سال مشخص نمود و تغییرات تراز دریای خزر را مرتبط با این نوسانات دانست (خزر، توهمات و واقعیات: ۱۳۸۵). اما در طی سه دهه گذشته نیز بخصوص بعد از بالا آمدن سریع آن از سال ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۴ و سپس تغییر روند به مرحله کاهش سطح آب، مطالعات مختلفی در ارتباط با رفتار نوسانی خزر و ارتباط آن با شاخص‌های اقلیمی و در نتیجه امکان پیش‌بینی آن انجام شده است. به طوری که کلیگه<sup>۲</sup> و همکارش (۱۹۹۲) تغییرات رژیم آب دریای خزر را مطالعه نمودند و نتایج کار آن‌ها نشان داد که با گرم شدن ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد آبدهی رودخانه‌ها به دریای خزر بین ۵۰ تا ۶۰ کیلومتر مکعب و بارش نیز به میزان ۲۵ تا ۳۰ کیلومتر مکعب در سال رشد خواهد نمود. در حالی که هم‌زمان تبخیر از سطح دریا می‌تواند بین ۱۰۰ تا ۱۱۵ کیلومتر مکعب افزایش خواهد یافت. بنابراین بیلان آبی خزر منفی می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش بیش از ۴ متری سطح دریا شود. الگینی<sup>۳</sup> و همکارش (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) سه خروجی از شبیه‌سازی و آینده‌نگری تراز آب دریای خزر را ارائه دادند که ابتدا شبیه‌سازی با استفاده از مدل اقلیم منطقه‌ای (RegCM)<sup>۴</sup> (ICTP) در فاصله شبکه‌ای ۵۰ کیلومتری برای دوره ۱۹۴۸-۱۹۹۰ انجام شد. به طوری که در این دوره یک تغییر ناگهانی در سطح دریا پس از سال ۱۹۷۷ رخ داد و تراز دریا تا اوایل دهه ۱۹۹۰ حدود دو متر افزایش یافت. در نتیجه با استفاده از یک معادله ساده بیلان آب برای پیش‌بینی تراز آب، نشان داد که مدل قادر به بازتولید تغییرات تراز مشاهده‌شده در مقیاس بین سالانه تا چند دهه‌ای است. سپس در خروجی دیگر، به این نتیجه رسیدند که اگرچه بیشتر مدل‌ها افزایش بارندگی را بر روی حوضه رودخانه ولگا، جایی که بیشتر رواناب به دریای خزر تولید می‌شود، پیش‌بینی می‌کنند، اما کاهش مداوم تراز آب دریای خزر اتفاق خواهد افتاد. این امر به دلیل افزایش زیاد تبخیر در خشکی و سطح دریای خزر است. در پایان قرن بیست و یکم، میانگین کل تخمین‌های مبتنی بر مدل‌ها، کاهش ۹ متری تراز دریا را برای دو سناریوی A2 و A1b نشان می‌دهد. سپس در سال ۲۰۰۷ همین محققین با استفاده از دو مدل اقلیم منطقه‌ای<sup>۵</sup> RCM و<sup>۶</sup> GCM تحت سناریوی A2 در مقایسه با اقلیم کنونی به این نتیجه رسیدند که تحت سناریوی A2 در آینده شاهد افزایش هم بارندگی در فصل سرد و هم افزایش دما و تبخیر، در خشکی و بر بدنه آبی دریای خزر خواهیم بود. همچنین تراز آب دریای خزر تحت سناریوی A2 در مقایسه با وضعیت کنونی افت خواهد کرد. عامل اصلی کاهش نیز افزایش تبخیر می‌باشد. آرپه<sup>۷</sup> و همکارش (۲۰۰۷) تأثیر الگوی گردشی اتمسفر را بر تراز آب دریای خزر در دو حالت مشاهداتی و مدل شده مورد مقایسه قراردادند و مشخص نمودند که با وجود اثرات گرمایش جهانی به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای میزان بارش در حوضه رودخانه ولگا افزایش می‌یابد. با این حال با افزایش تبخیر بر روی دریای خزر میزان تأثیر آن بر روی تراز خزر تعدیل می‌شود. همچنین شبیه‌سازی‌ها نیز افزایش جزئی تراز آب خزر را در قرن ۲۱ نشان می‌دهد. اما به دلیل تنوع زیاد بارندگی در حوضه رودخانه ولگا، نمی‌توان با اطمینان بیانیه‌ای در مورد

1. Bruckner

2. Klige

3. Elguindi

4. Regional Climate Model

5. regional climate model

6. General Circulation Models

7. Arpe

توسعه آینده تراز آب خزر ارائه داد. اوزیاواس<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۰) به منظور ارزیابی سهم فرآیندهای هواشناسی و زمین‌شناسی، بیلان آبی دریای خزر از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۵ با استفاده از آخرین تکنیک‌های سنجش‌ازدور و داده‌های واقعی زمینی محاسبه نمودند و در نتیجه هماهنگی بالایی را بین باقیمانده‌های بیلان آب و تغییرات سطح دریای خزر نشان دادند و در نهایت مدعی شدند که نوسانات سطح دریای خزر در این بازه زمانی اساساً توسط عوامل مرتبط با اقلیم کنترل می‌شود. از سوی دیگر، شکاف نسبتاً بزرگ‌تر بین باقیمانده‌های بیلان آبی و تراز آب دریای خزر طی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ ممکن است نشان‌دهنده تأثیر لرزه‌خیزی بر نوسانات سطح دریای خزر در نتیجه دو زلزله بزرگ در ۲۵ نوامبر ۲۰۰۰ باشد. نادری و همکارانش (۲۰۱۳) با تلفیق اسناد تاریخی و سوابق زمین‌شناسی تغییرات سطح دریای خزر مدعی شدند که اگرچه کنترل‌کننده اصلی تغییرات طولانی‌مدت تراز آب دریای خزر توسط عوامل اقلیمی هدایت می‌شود اما لرزه‌خیزی حوضه تغییرات محلی در سطح پایه ایجاد می‌کند. بنابراین تغییرات سطح پایه محلی باید در هر سال برای تراز آب دریای خزر بازسازی شوند. پانین<sup>۲</sup> و همکارش (۲۰۱۴) وابستگی نوسانات تراز آب دریای خزر را با تغییرپذیری شدت گردش ترموهالین اقیانوس اطلس (ATHC)، شاخص نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO) و یک شاخص ترکیبی انتقال رطوبت (CIMT) مورد ارزیابی قراردادند که در نتیجه آن تأثیر شکل‌گیری تنوع اقلیمی اوراسیا و رژیم تراز آب دریای خزر را از دگرگونی‌های اقلیمی اقیانوس اطلس آشکار نمودند. سربخ<sup>۳</sup> و همکارش (۲۰۲۰) رابطه تغییر اقلیم در دریای خزر با اقیانوس اطلس و اقیانوس آرام را مطالعه کردند و نتایج تجزیه و تحلیل آن‌ها همخوانی تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی دریای خزر در بازه زمانی ۱۹۰۰-۲۰۱۵ و پیوند آن‌ها را با اقیانوس‌های اطلس و اقیانوس آرام نشان داد. به‌عنوان نمونه، کاهش چشمگیر سطح دریای خزر در دهه ۱۹۳۰ با تقویت باد شرقی در منطقه ناشی از تضعیف نفوذ اقیانوس اطلس شمالی و افزایش تأثیر اقیانوس آرام بر پارامترهای دریای خزر مشخص می‌گردد. با روند معکوس افزایش تراز دریای خزر تأثیر اقیانوس اطلس شمالی افزایش و اقیانوس آرام کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث ناهنجاری‌های مثبت باد غربی و افزایش سطح دریا شد. همچنین در نیمه دوم دهه ۱۹۹۰ میانگین دمای هوا در منطقه دریای خزر به‌سرعت افزایش یافت. با این حال، از اواخر دهه ۱۹۹۰، نفوذ اقیانوس اطلس شمالی بر منطقه خزر ضعیف شد، که منجر به کاهش سطح دریای خزر و کاهش سرعت افزایش دمای هوا شد. همچنین پانین و همکارانش (۲۰۱۴) اجزای بیلان آبی دریای خزر را برای دوره ۱۹۴۶ تا ۲۰۱۰ بر اساس دمای هوا و بارش منطقه مطالعه نمودند و نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزایش بارندگی با دوره افزایش تراز آب خزر و کاهش بارندگی با دوره کاهش تراز آب دریا هماهنگی دارد. چن<sup>۴</sup> و همکارانش (۲۰۱۷) با مطالعه تغییر بلندمدت سطح دریای خزر نشان دادند که افزایش نرخ تبخیر در دریای خزر نقش غالبی در معکوس کردن روند افزایشی تراز آب دریای خزر در طول ۳۷ سال گذشته داشته است و همچنین معتقدند که کاهش بلندمدت فعلی تراز دریای خزر در آینده تحت تأثیر سناریوهای گرمایش جهانی قابل پیش‌بینی می‌باشد. دیاکونوف<sup>۵</sup> و همکارش (۲۰۱۸) با ایجاد یک مدل هیدرودینامیکی با وضوح بالا تغییرات تراز آب دریای خزر را مورد ارزیابی قراردادند و نتایج تحقیق آن‌ها حساسیت بالای بیلان آبی خزر به پارامترهای جوی را نشان داد. به‌طور سامانمند با افزایش دمای هوا و افت نقطه شبنم معادل یک درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش به ترتیب با روند ۴٫۲ و ۳ سانتی‌متر در سال می‌شود. در عین حال مؤلفه‌های دیگری نیز همچون باد و شارش تابش خورشیدی نیز قدرت تعیین‌کننده‌ای در سیستم تعادل تراز

1. Ozyavas  
 2. Panin  
 3. Serykh  
 4. Chen  
 5. Dyakonov

دارند. کاftان<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۸) تغییرات سطح دریای خزر مرتبط با فرآیندهای کیهانی-ژئوفیزیکی مورد ارزیابی قرار دادند و برای انجام این کار از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی بهره جستند و مشخص کردند که ارتباط نزدیکی بین فرکانس پایین پارامترهای فعالیت خورشیدی و ژئو مغناطیسی زمینی و تغییرات تراز دریای خزر وجود دارد و در نتیجه مدعی شدند که در دهه‌های آینده احتمال بالایی تراز دریا با کاهش پارامترهای کیهانی-ژئوفیزیکی فراهم می‌شود. عطایی و همکارانش (۲۰۱۹) تغییرات درازمدت تراز آب دریای خزر بر اساس مدل ERA-interim و آبدی رودخانه‌ها مطالعه نمودند و با مقایسه ورودی و خروجی‌ها به این نتیجه رسیدند که دلیل اصلی کاهش سطح CS در سال‌های اخیر را می‌توان افزایش تبخیر در مقایسه با بارش و دبی رودخانه‌های ورودی دانست. حسینی و همکارش (۲۰۲۰) تراز آب دریای خزر را با استفاده از گزارش ششم IPCC مطابق با مدل اقلیمی CanESM5 با چارچوب مدل شبکه عصبی تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی نمودند. بر این اساس مشخص گردید مطابق با سناریوهای مختلف تغییر اقلیم دامنه نوسان تراز آب دریای خزر بین تراز ۲۸- تا ۲۶- متر تا سال ۲۰۵۰ ادامه خواهد یافت. کوریچ<sup>۲</sup> و همکارانش (۲۰۲۱) آینده تراز آب دریای خزر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و برداشت آب برای قرن بیست و یکم را مطالعه نمودند در این تحقیق از گزارش ششم IPCC تحت سناریوی SSP5-8.5 و SSP2-4.5 برای مدل‌های سناریوی تراز آب بهره جستند و تا سال ۲۱۰۰، تا ۸ (۱۰) متر کاهش تراز آب دریای خزر بر مبنای گزارش پنجم با استفاده از مدل‌های مختلف تحت سناریوهای RCP4.5 (RCP8.5) و تا ۲۰ (۳۰) متر مبنای گزارش پنجم با استفاده از مدل‌های مختلف تحت سناریوهای (SSP245) (SSP585) اتفاق خواهد افتاد. نرخ برداشت آب به‌اندازه اقلیم در کنترل سطح خزر در آینده مهم است، به‌طور بالقوه تا ۷ متر کاهش بیشتر سطح تراز دریا، منجر به خشک شدن بخش‌های شمالی کم‌عمق خزر می‌شود. کوریچ و همکارانش (۲۰۲۱) پیامد تغییرات مساحت آبی خزر را در مقیاس حوضه‌ای و اقلیم بزرگ مقیاس مطالعه نمودند و نشان دادند که افزایش وسعت دریای خزر منجر به تغییر مقیاس پیامدهای اقلیمی می‌شود، بنابراین بایستی تغییرات در وسعت دریای خزر را باید در شبیه‌سازی‌های اقلیمی، از جمله در سناریوهای گذشته و آینده مورد توجه قرار گیرد. بنابراین هدف از این مقاله نیز ارزیابی وضعیت تراز آب دریای خزر برای دوره‌های آتی با استفاده از گزارش ششم IPCC تحت سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه می‌باشد. البته لازم به ذکر است در این کار از تلفیق سه مدل اقلیمی برای پیش‌بینی تراز آب دریای خزر استفاده شده است.

## روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دو گروه تراز آب دریای خزر از سال ۱۹۴۱ تا ۲۰۱۹ و همچنین خروجی سه مدل اقلیمی شامل؛ INM-CM4-8، MIROC-ES2L و MPI-ESM1-2-LR است. مؤلفه‌های انتخاب شده برای این سه مدل شامل درصد پوشش ابری (clt)، شار تبخیر (evspsbl)، رطوبت ویژه (huss)، شار بارش (pr)، فشار سطح دریا (psl)، دمای هوا (tas)، مؤلفه باد شامل مؤلفه مداری و نصف‌النهاری (vas& uas) و تنش سطحی (tauu& tauv) برای دوره پایه و آتی از سال ۱۹۴۱ لغایت ۲۰۸۰ می‌باشد. داده‌های این مدل‌ها به‌عنوان بخشی از فاز ۶ پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده با هماهنگی بین‌المللی تولید شده تحت عنوان CMIP6 می‌باشد. CMIP6 پروژه‌ای است که توسط گروه کاری مدل‌سازی جفت شده (WGCM) به‌عنوان بخشی از برنامه تحقیقات جهانی آب‌وهوا (WCRP) هماهنگ شده است. مدل مورد استفاده در تحقیقات آب‌وهوایی با نام INM-CM4-8 که در سال ۲۰۱۶ توسط مؤسسه ریاضیات عددی، آکادمی علوم روسیه (ولودین و همکارانش ۲۰۱۹)، مدل MIROC-ES2L در سال ۲۰۱۸ توسط مراکز پژوهشی ژاپن

1. Kaftan

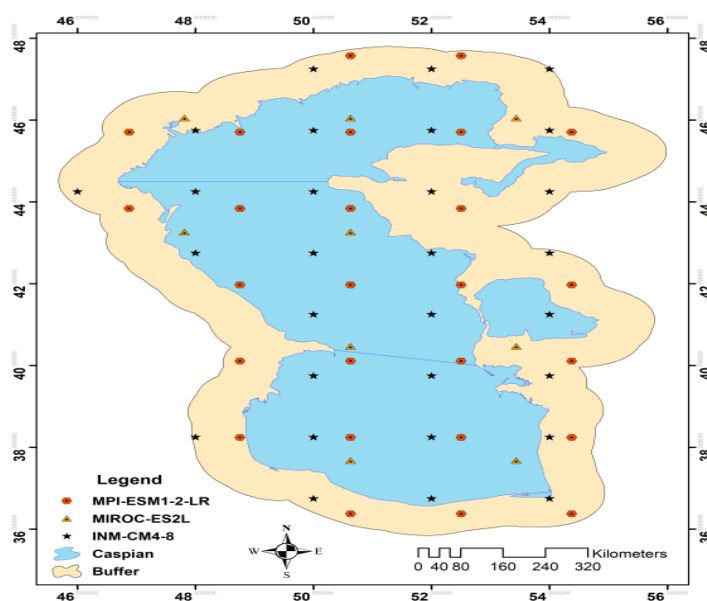
2. Koriche

تحت عناوین AORI, JAMSTEC, NIES و R-CCS هاچیمما و همکارانش (۲۰۱۹) و در نهایت مدل MPI-ESM1.2-LR نیز در سال ۲۰۱۷ توسط موسسه هواشناسی ماکس پلانک (جان کلاوس و همکارانش ۲۰۱۹) منتشر شد.

سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق شامل SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می‌باشد که بر مبنای مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک در گزارش ششم ارزیابی IPCC تعریف شده است، به طوری که در سناریوی SSP2-4.5 با انتشار متوسط (GHG احتمالاً)، انتشار CO<sub>2</sub> در حدود سطوح فعلی تا سال ۲۰۵۰، کاهش می‌یابد اما تا سال ۲۱۰۰ به صفر خالص نمی‌رسد. بر این اساس متوسط دمای کره زمین برای دوره (۲۰۴۱-۲۰۶۰) معادل ۲ درجه سانتی‌گراد و برای دوره (۲۰۸۱-۲۱۰۰) معادل ۲٫۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. در حالی که در سناریوی SSP5-8.5 با انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا (بسیار بعید)، انتشار CO<sub>2</sub> تا سال ۲۰۷۵ سه برابر می‌شود. بر این اساس متوسط دمای کره زمین برای دوره (۲۰۴۱-۲۰۶۰) معادل ۲٫۴ درجه سانتی‌گراد و برای دوره (۲۰۸۱-۲۱۰۰) معادل ۴٫۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (جدول ۱).

جدول شماره ۱. تأثیر مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک در گزارش ششم ارزیابی IPCC برای گرمایش کره زمین (IPCC: 2021)

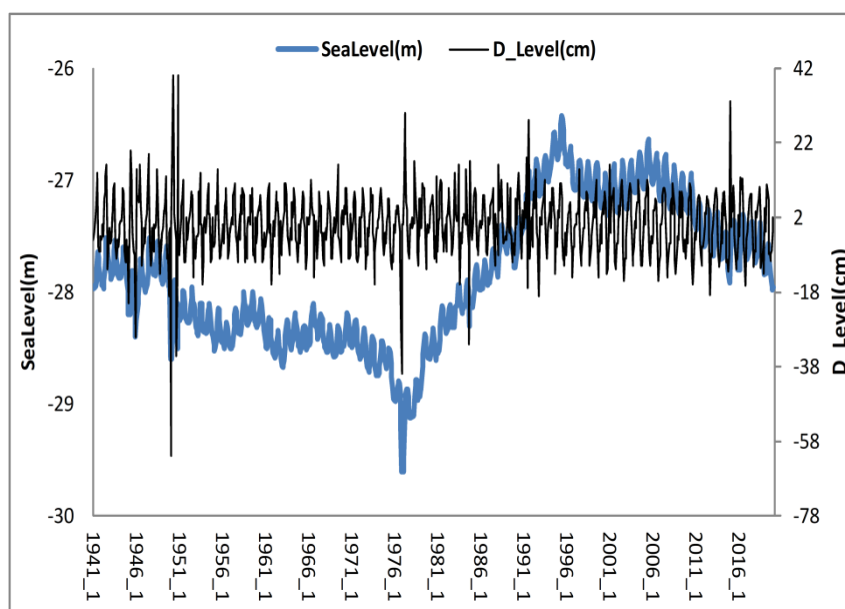
Shared Socioeconomic Pathways in the IPCC Sixth Assessment Report				
SSP	Scenario	Estimated warming (2041–2060)	Estimated warming (2081–2100)	Very likely range in °C (2081–2100)
	(Likelihood [20])			
SSP2-4.5	intermediate GHG emissions (likely): CO <sub>2</sub> emissions around current levels until 2050, then falling but not reaching net zero by 2100	2.0 °C	2.7 °C	2.1 – 3.5
SSP5-8.5	very high GHG emissions (highly unlikely): CO <sub>2</sub> emissions triple by 2075	2.4 °C	4.4 °C	3.3 – 5.7



شکل شماره ۱. نقشه گره داده‌های مورد استفاده شده برای مدل‌های اقلیمی

داده‌های منتخب مدل‌های اقلیمی با مقیاس مکانی برای مدل اقلیمی INM-CM4-8 با قدرت تفکیک  $2 \times 1.5$  درجه طول و عرض جغرافیایی با ۲۹ گره، مدل اقلیمی MIROC-ES2L با قدرت تفکیک  $2.8 \times 2.8$  درجه طول و عرض جغرافیایی با ۹ گره و برای مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR با قدرت تفکیک  $1.8 \times 1.8$  درجه طول و عرض جغرافیایی ۲۹ گره در نظر گرفته شد (شکل ۱). در این تحقیق به منظور مدل‌سازی از مدل رگرسیون چند متغیره در محیط نرم‌افزار Statistica استفاده گردید.

در ادامه به منظور مدل‌سازی تراز آب دریای خزر، ماتریس داده‌های منتخب با تفاضل تراز آب دریای خزر تنظیم گردید. از جمله دلیل انتخاب متغیر تفاضل به منظور حذف روندهای طولانی‌مدت تراز آب دریای خزر می‌باشد (شکل ۲). از طرف دیگر دوره پایه برای مدل‌سازی تراز آب در پنج مقیاس در نظر گرفته شد که شامل دوره‌های ۱۹۴۱ لغایت ۲۰۱۹، ۱۹۵۱ لغایت ۲۰۱۹، ۱۹۶۱ لغایت ۲۰۱۹، ۱۹۷۱ لغایت ۲۰۱۹ و ۱۹۸۱ لغایت ۲۰۱۹ است. از آنجایی که ماتریس تنظیم‌شده تقویمی نمی‌تواند رابطه هم‌زمان مؤلفه‌های اقلیمی را با تراز آب خزر توجیه کند، رابطه مؤلفه‌های اقلیمی را با زمان تأخیرهای متفاوتی با تفاضل تراز آب خزر مورد ارزیابی قرار دادیم.



شکل شماره ۲. نوسانات تراز آب دریای خزر و تفاضل تراز آب به مقیاس زمانی ماهانه از سال ۱۹۴۱ لغایت ۲۰۱۹

بر این اساس مشخص گردید که مطابق مدل اقلیمی INM-CM4-8 مؤلفه اقلیمی tauu بدون تأخیر زمانی، درحالی که مؤلفه‌های pr و uas با یک ماه تأخیر، مؤلفه clt، huss و tsa با سه ماه تأخیر، مؤلفه‌های evspsbl، psl، tauv و vas با چهار ماه تأخیر با تراز آب بهترین رابطه را نشان می‌دهد. در مدل اقلیمی MIROC-ES2L مؤلفه اقلیمی uas با یک ماه تأخیر، pr با دو ماه، clt، evspsbl، huss و tas با سه ماه، psl، tauv و vas با چهار ماه و درنهایت tauu با پنج ماه تأخیر بهترین رابطه را نشان می‌دهد و درنهایت مطابق مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR مؤلفه اقلیمی evspsbl بدون تأخیر زمانی درحالی که مؤلفه‌های tauu و uas با یک ماه تأخیر، مؤلفه pr با دو ماه تأخیر، مؤلفه‌های clt، huss، tas، tauv و vas با سه ماه و نهایتاً psl با چهار ماه تأخیر بهترین رابطه را نشان می‌دهد (جدول ۲).



جدول شماره ۲. همبستگی مؤلفه‌های اقلیمی با تفاضل تراز آب دریای خزر در حالت‌های تأخیر ماهانه

مدل‌های اقلیمی	زمان تأخیر به ماه	clt	evspsbl	huss	pr	psl	tauu	tauv	tss	uas	vas
INM-CM4-8	0	-0.048	-0.028	0.128	0.051	-0.311	0.267**	-0.128	0.109	0.239	-0.163
	1	0.298	-0.129	-0.208	0.209**	0.059	0.249	0.121	-0.244	0.25**	0.092
	2	0.524	-0.243	-0.502	0.156	0.352	0.109	0.344	-0.507	0.139	0.321
	3	0.593**	-0.408	-0.623**	0.021	0.514	0.117	0.47	-0.628**	0.18	0.473
	4	0.491	-0.523**	-0.58	-0.099	0.555**	0.103	0.509**	-0.589	0.185	0.536**
	5	0.303	-0.463	-0.387	-0.112	0.483	0.033	0.459	-0.403	0.123	0.493
	6	0.074	-0.175	-0.096	-0.026	0.309	-0.091	0.256	-0.122	-0.039	0.287
MIROC-ES2L	0	-0.097	-0.079	-0.001	-0.073	-0.383	0.102	0.037	-0.199	0.101	-0.237
	1	0.25	-0.342	-0.301	0.262	-0.041	-0.246	0.066	0.042	0.113**	0.063
	2	0.498	-0.527	-0.544	0.504**	0.263	-0.527	0.043	0.207	0.064	0.266
	3	0.582**	-0.559**	-0.648**	0.488	0.475	-0.651**	0	0.3	-0.004	0.371
	4	0.504	-0.448	-0.566	0.34	0.558**	-0.594	0.056	0.354**	0.037	0.408**
	5	0.338	-0.191	-0.308	0.177	0.503	-0.38	0.147**	0.308	0.113	0.357
	6	0.105	0.079	0.019	0.018	0.345	-0.074	0.127	0.264	0.085	0.286
MPI-ESM1-2-LR	0	0.029	0.405**	0.189	0.114	-0.289	0.076	0.146	-0.236	0.186	-0.246
	1	0.378	0.267	-0.163	0.386	0.006	-0.261	0.24**	0.053	0.274**	0.072
	2	0.558	-0.002	-0.492	0.461**	0.249	-0.515	0.211	0.323	0.227	0.356
	3	0.568**	-0.336	-0.648**	0.407	0.379	-0.631**	0.165	0.482**	0.159	0.513**
	4	0.457	-0.551	-0.586	0.267	0.448**	-0.586	0.145	0.46	0.142	0.491
	5	0.271	-0.558	-0.368	0.119	0.407	-0.388	0.134	0.371	0.125	0.393
	6	0.04	-0.36	-0.078	-0.031	0.272	-0.082	0.038	0.21	0.032	0.229

\*\* مناسب‌ترین همبستگی برای تعیین زمان تأخیر

## تعیین دوره زمانی پایه برای شبیه‌سازی وضعیت آبی تراز آب دریای خزر

در این مطالعه با توجه به در دسترس بودن آمار طولانی‌مدت تراز آب دریای خزر و همچنین خروجی مدل‌های اقلیمی، برای شبیه‌سازی تفاضل تراز آب دریای خزر، دوره‌های پایه را با پنج مقیاس زمانی در نظر گرفتیم که شامل ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ ساله به ترتیب ۲۰۱۹-۱۹۴۱، ۱۹۵۱-۲۰۱۹، ۱۹۶۱-۲۰۱۹، ۱۹۷۱-۲۰۱۹ و ۱۹۸۱-۲۰۱۹ می‌باشد. هدف از این کار، انتخاب تنوع دوره پایه برای بهترین حالت مدل‌سازی تراز آب دریای خزر می‌باشد. در این تحقیق برای ارزیابی کارایی مدل‌سازی تراز آب دریای خزر بر اساس مدل‌های دوره پایه، مدل‌سازی را به دو حالت آموزشی (train) و آزمایشی (test) تقسیم نمودیم. دوره آزمایشی آخرین ۱۰ سال دوره مشاهدات تراز آب خزر یعنی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ معادل ۱۲۰ ماه در نظر گرفته شد. درحالی‌که دوره آموزشی برای دوره‌های پایه از سال ۱۹۸۱، ۱۹۷۱، ۱۹۶۱، ۱۹۵۱ و ۱۹۴۱ لغایت ۲۰۰۹ تعیین شدند. در این مطالعه، به منظور صحت سنجی مدل‌های اقلیمی و همچنین برای ریزمقیاس نمایی مؤلفه‌های اقلیمی از معیارهای مختلفی از جمله میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، جذر ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R2)، درصد تطبیق مدل نش ساتکیف (NS) و دوربین واتسون (DW) استفاده شد (قانقرمه و همکارانش ۲۰۱۹).

## بحث و یافته‌ها

## ارزیابی کارایی مدل‌سازی اقلیمی تفاضل تراز آب دریای خزر

مطابق جدول شماره ۳ مقایسه کارایی مدل‌های اقلیمی بر اساس حالت آموزشی و آزمایشی برای مقیاس‌های پایه زمانی ۴۰ الی ۸۰ ساله نشان می‌دهد که بر مبنای آماره NS، R2 و DW در مدل اقلیمی MIROC-ES2L در تمامی مقیاس‌های زمانی انطباق خوبی بین این دو دوره مشاهده می‌گردد، درحالی‌که در دو مدل اقلیمی INM-CM4-8 و MPI-ESM1-2-LR در مقیاس زمانی پایه ۴۰ و ۵۰ ساله یعنی دوره آموزشی ۱۹۸۱-۲۰۰۹ و ۱۹۷۱-۲۰۰۹ با دوره آزمایشی انطباق مناسبی ندارند، درحالی‌که در سایر مقیاس‌ها در هر دو حالت آموزشی و آزمایشی کارایی مناسبی دیده

می‌شود با این تفاوت که DW در تمامی مقیاس‌ها همخوانی مناسبی را در مدل‌سازی آن نشان می‌دهد. از نظر خطای مطلق (MAE) مدل‌سازی نیز مشخص می‌گردد که بالاترین اختلاف بین دو دوره آموزشی و آزمایشی در مقیاس ۴۰ و ۵۰ ساله در مدل اقلیمی INM-CM4-8 به ترتیب ۶,۱۲ و ۳,۲۱ سانتیمتر است، در حالی که در سایر مقیاس‌ها این اختلاف بین ۱ الی ۲ سانتیمتر اختلاف دیده می‌شود. همچنین در مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR نیز در مقیاس ۴۰ و ۵۰ پایه اختلاف معادل ۳,۸۱ دهم و ۲,۳۳ سانتی‌متر است در حالی که در سایر مقیاس‌ها بین ۱ تا ۲ سانتیمتر است در حالی که در مدل اقلیمی MIROC-ES2L در تمامی مقیاس‌های خطای مطلق دوره آموزشی و آزمایشی بین ۰,۵ تا ۱,۵ سانتی‌متر است.

جدول شماره ۳. کارایی مدل‌سازی تراز آب دریای خزر برای دو حالت آموزشی و آزمایشی با دوره پایه ۴۰ تا ۸۰ ساله بر اساس

#### مدل‌های اقلیمی

مدل اقلیمی	دوره‌ها	معیارها	1981-1990 & 1996-2015	1971-2009 & 1996-2015	1961-2009 & 1996-2015	1951-2009 & 1996-2015	1941-2009 & 1996-2015	
INM-CM4-8	train	NS	0.935	0.856	0.804	0.787	0.692	
		MAE	1.492	2.251	2.524	2.550	3.132	
		RMSE	3.445	8.325	10.991	11.169	20.551	
		R2	0.285	0.855	0.804	0.915	0.692	
		DW	1.967	1.953	1.981	1.982	1.986	
	1991-1995 & 2016-2020							
	test	NS	-0.556	0.180	0.291	0.385	0.310	
		MAE	7.540	5.462	4.498	4.262	4.688	
		RMSE	98.267	59.155	45.123	44.379	47.849	
		R2	0.251	0.386	0.391	0.895	0.398	
DW		1.842	1.999	1.841	1.724	1.773		
MIROC-ES2L	train	NS	0.779	0.714	0.693	0.687	0.580	
		MAE	2.565	2.876	2.967	2.930	3.344	
		RMSE	11.646	16.562	17.243	16.390	28.035	
		R2	0.356	0.708	0.693	0.963	0.580	
		DW	1.967	1.885	1.860	1.884	1.906	
	1991-1995 & 2016-2020							
	test	NS	0.404	0.457	0.497	0.497	0.514	
		MAE	4.296	4.041	3.665	3.684	3.827	
		RMSE	40.667	39.162	31.992	36.306	36.813	
		R2	0.452	0.469	0.506	0.953	0.496	
DW		1.798	1.807	1.740	1.805	1.790		
MPI-ESM1-2-LR	train	NS	0.894	0.806	0.771	0.754	0.682	
		MAE	1.826	2.526	2.625	2.637	3.162	
		RMSE	5.567	11.240	12.871	12.859	21.184	
		R2	0.316	0.807	0.771	0.918	0.682	
		DW	1.643	1.892	1.986	1.961	1.974	
	1991-1995 & 2016-2020							
	test	NS	0.023	0.314	0.395	0.453	0.378	
		MAE	5.632	4.854	4.206	4.190	4.625	
		RMSE	62.258	49.502	38.526	39.453	45.735	
		R2	0.339	0.372	0.423	0.848	0.401	
DW		1.817	1.942	1.955	1.808	1.882		

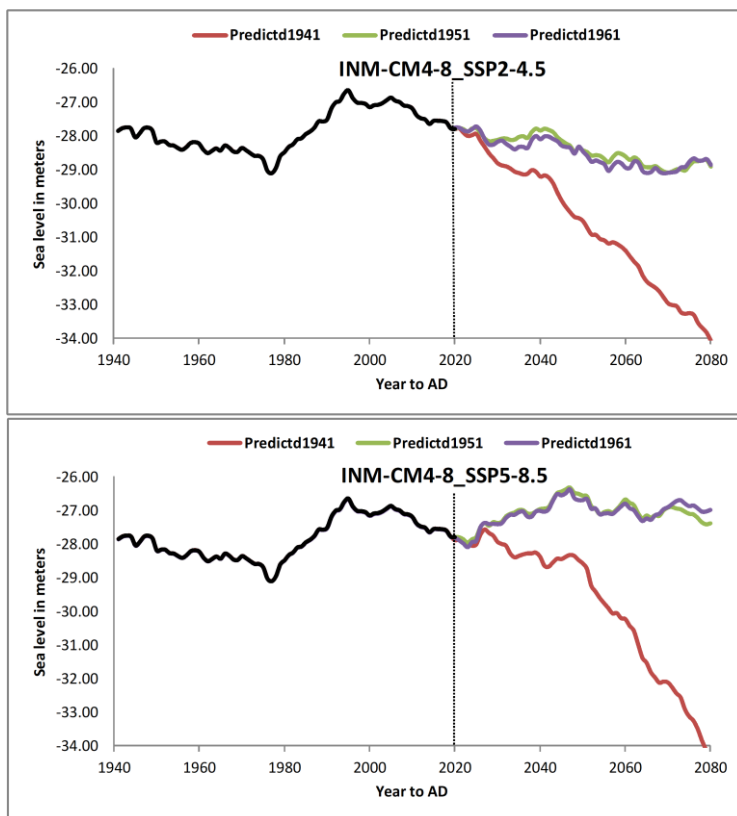
پیش‌یابی تراز آب دریای خزر بر اساس مدل‌های اقلیمی

پیش‌یابی تراز آب دریای خزر همان‌طور که قبلاً بحث شد بر مبنای دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه تحت گزارش

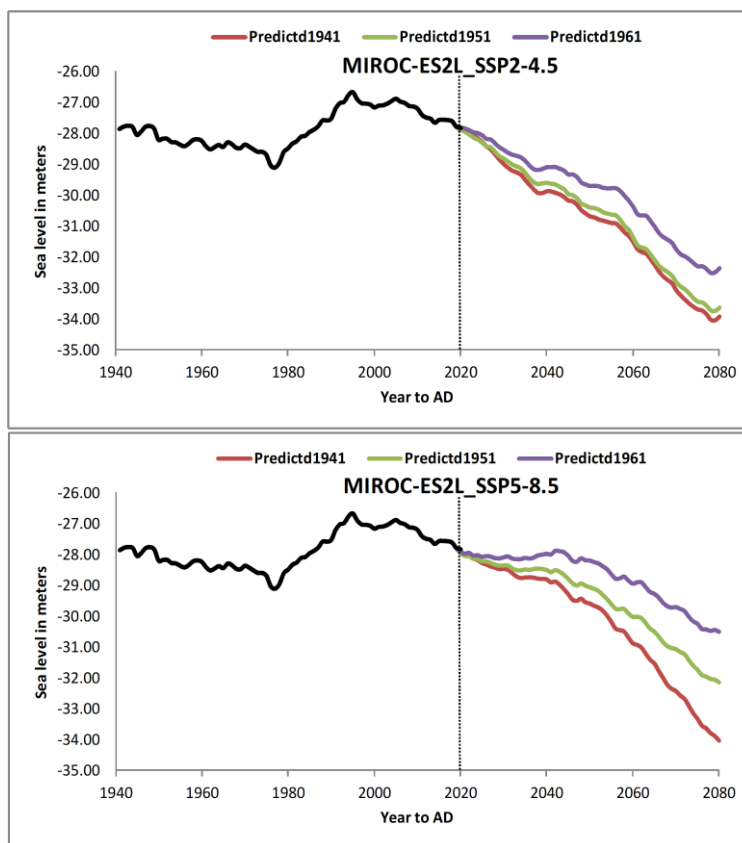
ششم ارزیابی IPCC برای گرمایش کره زمین در دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس یافته‌های این پژوهش بر اساس مدل‌های اقلیمی به شرح ذیل است. لازم به ذکر است با توجه به ارزیابی کارایی مدل‌سازی تراز آب خزر بر اساس دوره‌های ۴۰ تا ۸۰ ساله در این پژوهش صرفاً بر اساس مقیاس پایه ۶۰، ۷۰ و ۸۰ ساله نتایج مدل‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، هرچند کارایی مدل اقلیمی MIROC-ES2L در تمامی دوره‌ها مناسب بودند. مدل اقلیمی INM-CM4-8: شکل شماره ۳ خروجی مدل‌سازی تراز آب خزر را بر اساس دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و بر پایه مقیاس زمانی دوره شروع از سال ۱۹۴۱، ۱۹۵۱ و ۱۹۶۱ برای این مدل اقلیمی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در هر دو سناریو دامنه عدم قطعیت تراز آب بر پایه مقیاس زمانی از سال ۱۹۴۱ نسبت به ۱۹۶۱ و ۱۹۵۱ بسیار زیاد می‌گردد و در هر دو سناریو تا سال ۲۰۸۰ تراز آب دریای خزر به ۳۴- متر نسبت به آب‌های آزاد خواهد رسید. درحالی‌که با مقیاس پایه زمانی از سال ۱۹۵۱ و ۱۹۶۱ رفتار آبی تراز آب دریای خزر متفاوت دیده می‌شود. از یک‌طرف روند تغییرات آبی ملایم‌تر می‌شود و از طرف دیگر در سناریوی SSP2-4.5 با روند ملایم‌تری همراه با افت‌وخیزهای دوره‌ای تا سال ۲۰۸۰ به حدود ۲۸,۷- متر خواهد رسید یا به عبارت دیگر روند کاهشی تراز آب ادامه خواهد یافت. درحالی‌که در سناریوی SSP5-8.5 روند افزایش تراز آب خزر تا سال ۲۰۴۵ به ۲۶,۵- متر خواهد رسید و از آن به بعد با افت‌وخیزهای دوره‌ای در سطوح بالایی تا سال ۲۰۸۰ پایدار خواهد ماند یا به عبارتی می‌توان گفت که در این سناریو روند افزایش تراز آب دریای خزر اتفاق خواهد افتاد.

#### مدل اقلیمی MIROC-ES2L

مطابق شکل شماره ۴ روند آبی تراز آب دریای خزر بر مبنای دو سناریوی موردنظر نشان می‌دهد که در هر دو حالت تا سال ۲۰۸۰ بر مبنای مقیاس زمانی پایه، تراز آب دریای خزر حالت کاهشی خواهد بود و به تدریج دامنه‌ای عدم قطعیت پیش‌یابی‌های انجام‌شده افزایش خواهد یافت. در کل بر اساس سناریو SSP2-4.5 تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۲۰ تا سال ۲۰۸۰ با روند مداومی همراه با افت‌وخیزهای جزئی کاهشی خواهد بود. در این سناریو پیش‌یابی انجام‌شده رفتار تغییرات تراز آب دریا را با دوره زمانی پایه ۱۹۴۱ و ۱۹۵۱ با اختلاف کمی نسبت به هم نشان می‌دهد، اما بر پایه ۱۹۶۱ اختلاف تغییرات بیشتر خواهد بود. شاید یکی از دلایل این موضوع پاسخ کوتاه‌مدت دوره پایه ۱۹۶۱ نسبت به دوره‌های بلندمدت باشد. در کل دامنه پایین‌ترین تراز پیش‌بینی‌شده بر مبنای این دو سناریو تا سال ۲۰۸۰ بین ۳۴- و ۳۲,۵- متر خواهد رسید، درحالی‌که در سناریوی SSP5-8.5 رفتار تراز آب دریای خزر کمی متفاوت است، به طوری‌که تا سال ۲۰۴۰ تغییرات تراز آب در هر سه پایه مقیاس زمانی با شیب ملایم‌تری کاهشی خواهند بود و حتی در پایه زمانی ۱۹۶۱ در تراز کنونی پایدار خواهد ماند اما از سال ۲۰۴۰ به بعد روند کاهشی با شیب بیشتری ادامه خواهد یافت و به تدریج دامنه عدم قطعیت خروجی‌ها افزایش پیدا می‌کند، به طوری‌که پایین‌ترین تراز بر پایه مقیاس زمانی ۱۹۴۱ به ۳۴- متر و بر پایه ۱۹۶۱ به ۳۰,۵- متر خواهد رسید.



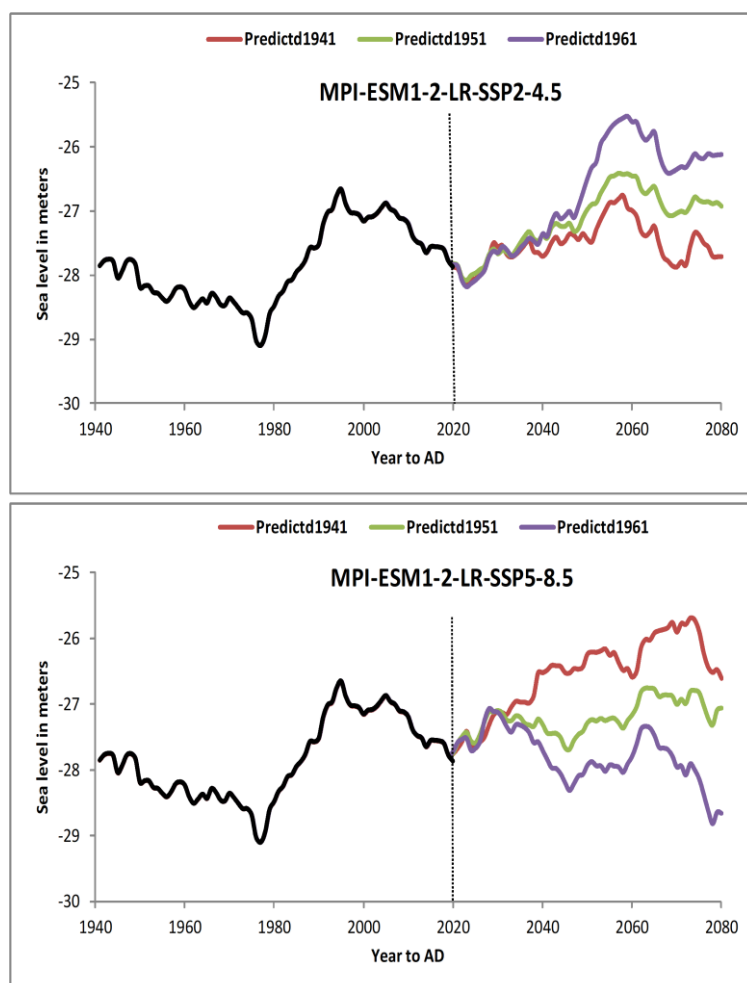
شکل شماره ۳. خروجی سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل اقلیمی INM-CM4-8 بر اساس دوره پایه ۶۰ تا ۸۰ ساله



شکل شماره ۴. خروجی سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل اقلیمی MIROC-ES2L بر اساس دوره پایه ۶۰ تا ۸۰ ساله

مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR

مطابق شکل شماره ۵ مشخص می‌گردد در این مدل اقلیمی تراز آب دریای خزر در هر دو سناریو بر مبنای مقیاس‌های پایه زمانی در اکثر حالات همراه با افت‌وخیزهای متوالی روند افزایشی اتفاق خواهد افتاد. بر این اساس در سناریوی SSP2-4.5 در هر مقیاس پایه زمانی روند افزایشی تراز آب اتفاق خواهد افتاد و به تدریج دامنه عدم قطعیت بین دوره‌ها افزایش می‌یابد به‌طور کلی دیده می‌شود که روند افزایشی از سال ۲۰۲۳ تا سال ۲۰۵۸ در هر سه حالت به بالاترین تراز خواهد رسید به‌طوری‌که دیده می‌شود در مقیاس زمانی ۱۹۴۱ به ۲۶،۷۵- متر، در مقیاس زمانی ۱۹۵۱ به ۲۶،۴- متر و در مقیاس زمانی ۱۹۶۱ به ۲۵،۵۴- متر خواهد رسید. از طرف دیگر از این سال به بعد روند کاهش تراز آب شروع می‌شود و در سال ۲۰۸۰ دامنه عدم قطعیت تراز آب دریای خزر بر مبنای این سه مقیاس زمانی بین ۲۷،۷۱- متر تا ۲۶،۱۳- متر قرار خواهد گرفت. اما بر مبنای سناریوی SSP5-8.5 تراز آب دریای خزر در هر سه مقیاس زمانی با کمترین اختلاف نسبت به هم تا سال ۲۰۲۸ افزایش می‌یابد و سپس در مقیاس زمانی ۱۹۴۱ با همان روند تا سال ۲۰۷۴ روند افزایش تراز آب اتفاق خواهد افتاد، اما در مقیاس زمانی ۱۹۵۱ و ۱۹۶۱ از سال ۲۰۲۸ تا سال ۲۰۴۷ کاهش اتفاق می‌افتد، با این تفاوت که شدت کاهش در مقیاس ۱۹۶۱ بیشتر است سپس در هر دو حالت روند افزایشی دوباره از سال ۲۰۶۳ روند کاهشی اتفاق می‌افتد در کل بر اساس سه مقیاس زمانی دامنه عدم قطعیت تراز آب دریای خزر تا سال ۲۰۸۰ بین ۲۸،۸۲- تا ۲۶،۶۰- متر قرار خواهد گرفت.



شکل شماره ۵. خروجی سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR بر اساس دوره پایه ۶۰ تا ۸۰

ساله

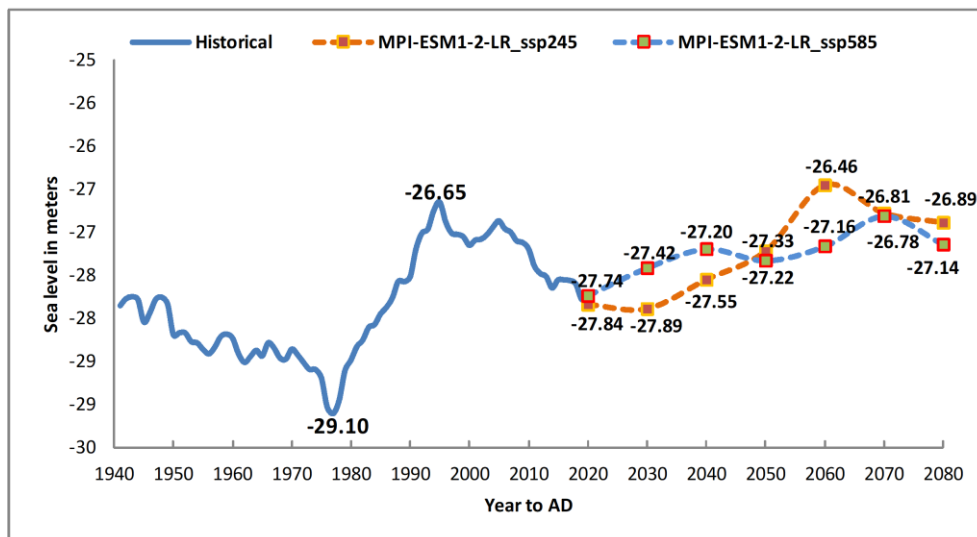
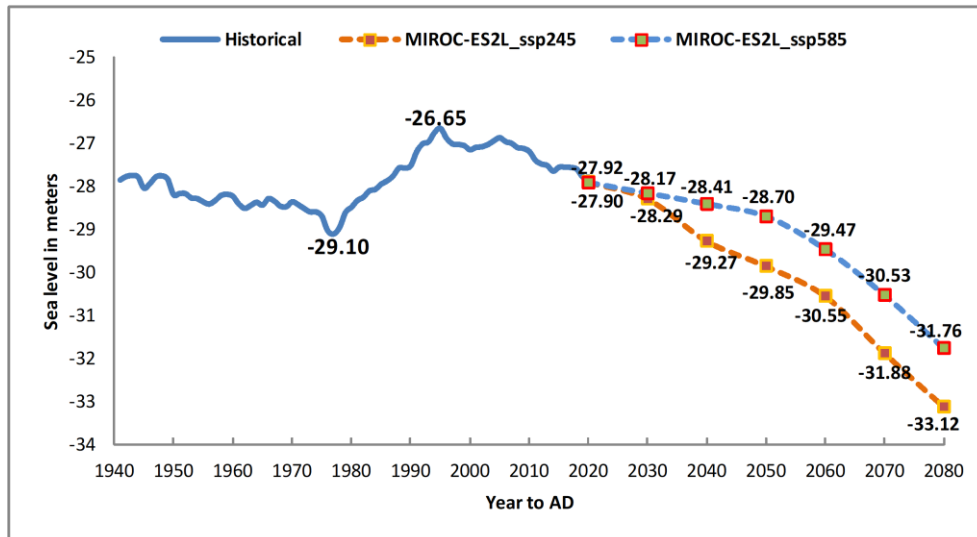
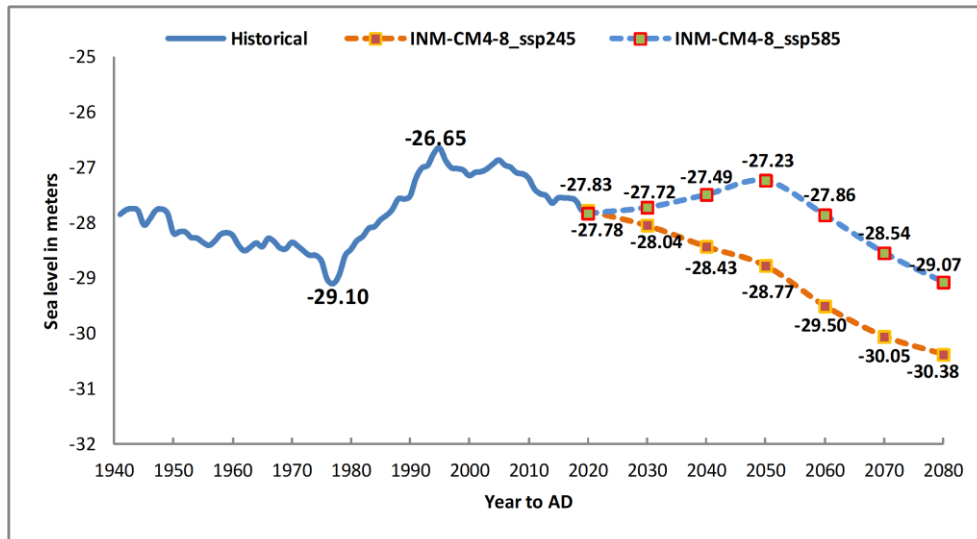
## ادغام خروجی مدل‌سازی تراز آب دریای خزر

در این بخش از تحقیق به منظور درک کلی از وضعیت آبی تراز آب دریای خزر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه شامل SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و همچنین با توجه به نتایج کارایی مدل‌سازی‌های انجام‌شده برای سه مدل اقلیمی دوره‌های آبی تراز آب ادغام گردیدند یا به عبارتی حد متوسط آن‌ها در نظر گرفته شد، شکل شماره ۶ میانگین خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده تراز آب دریای خزر را بر پایه ۱۹۶۱، ۱۹۵۱ و ۱۹۴۱ در دو سناریو برای سه مدل اقلیمی INM-CM4-8، MIROC-ES2L و MPI-ESM1-2-LR نشان می‌دهد.

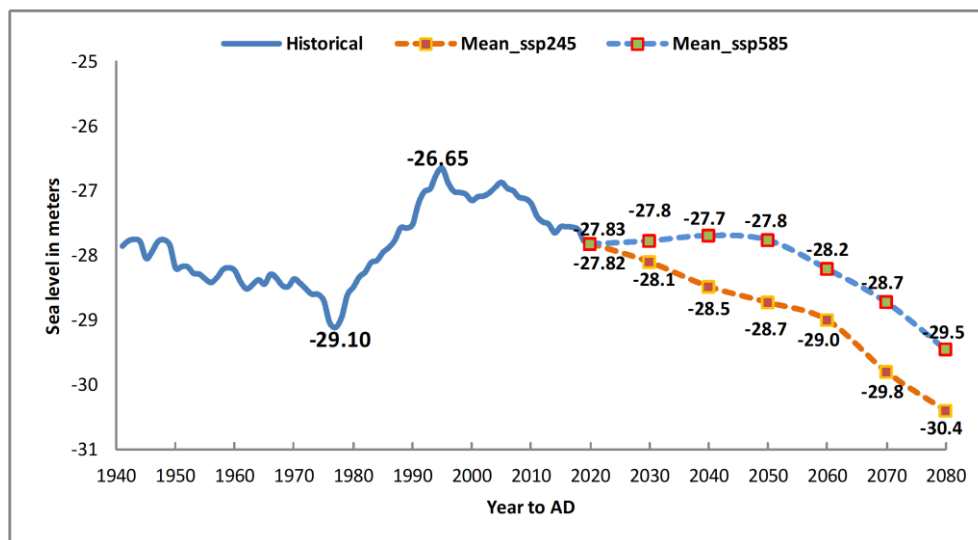
لازم به ذکر است این خروجی‌ها با میانگین ۱۰ ساله نمایش داده شده است. بر این اساس مشخص می‌گردد در مدل اقلیمی INM-CM4-8 مطابق با سناریو SSP2-4.5 از سال ۲۰۲۱ تا سال ۲۰۸۰ کاهش تراز آب با متوسط ۴۳ سانتی‌متر در هر دهه و در نهایت به تراز ۳۰،۳۸- متر خواهد رسید. اما بر مبنای سناریو SSP5-8.5 ابتدا از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ روند افزایش تراز با هر دهه ۲۰ سانتیمتر و سپس روند کاهشی شروع می‌شود که متوسط شدت آن به ۶۱ سانتی‌متر و در نهایت در سال ۲۰۸۰ به ۲۹،۰۷- خواهد رسید. در مدل اقلیمی MIROC-ES2L نیز ملاحظه می‌گردد در هر دو سناریو تراز آب روند کاهشی خواهد بود و متوسط کاهش در سناریوی SSP2-4.5 معادل ۸۷ سانتیمتر در هر دهه می‌رسد، در حالی که در سناریوی SSP5-8.5 روند تغییر کمی متفاوت است بدین شکل که ابتدا تا سال ۲۰۵۰ با شیب ملایم‌تری با متوسط هر دهه ۲۶ سانتیمتر و سپس افت تراز آب با شدت بیشتری معادل ۱۰۲ سانتیمتر در دهه اتفاق خواهد به‌طوریکه در این مدل تراز آب در سال ۲۰۸۰ بر مبنای سناریوی SSP2-4.5 تراز آب معادل ۳۳،۱۲- و در سناریوی SSP5-8.5 معادل ۳۱،۷۶- متر خواهد رسید.

در مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR رفتار تراز آب دریای خزر متفاوت از دو مدل بالا می‌باشد، بدین ترتیب که روند تغییرات تراز آب دریای خزر از سال ۲۰۲۱ روند افزایش خواهد شد، به‌طوری‌که مطابق سناریوی SSP2-4.5 ابتدا تا سال ۲۰۳۰ در سطح کنونی پایدار خواهد ماند و سپس روند افزایشی تا سال ۲۰۶۰ با متوسط افزایش هر دهه معادل ۴۸ سانتیمتر ادامه خواهد یافت و سپس با شیب ملایم‌تری کاهش تراز آب شروع خواهد شد. اما مطابق با سناریوی SSP5-8.5 تراز آب دریای خزر با شیب ملایم‌تری همراه با افت‌وخیزهایی با متوسط ۱۰ سانتی‌متر در هر دهه افزایش خواهد یافت. در نهایت ملاحظه می‌گردد دامنه تراز آب در سال ۲۰۸۰ با کمترین اختلاف خود در دو سناریو اتفاق می‌افتد.

در ادامه به منظور پیشنهاد وضعیت آبی تراز آب دریای خزر بر مبنای سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه خروجی مدل‌های اقلیمی، شکل شماره ۷ ادغام یا به عبارتی میانگین آن‌ها را نشان می‌دهد به‌طوری‌که ملاحظه می‌گردد بر مبنای سناریو SSP2-4.5 تراز آب دریای خزر روند کاهشی خواهد بود. این وضعیت نشان می‌دهد که ابتدا با روند ملایم‌تری تا سال ۲۰۶۰ به تراز ۲۹- متر و سپس با روند شیب شدیدتر شده و به ۳۰،۴- متر خواهد رسید. اما بر مبنای سناریوی SSP5-8.5 تراز دریا تا سال ۲۰۵۰ در سطح کنونی پایدار خواهد ماند و سپس روند کاهشی تا سال ۲۰۸۰ به ۲۹،۵- متر خواهد رسید. در کل تقریباً از سال ۲۰۴۰ به بعد دامنه عدم قطعیت تراز آب خزر بر مبنای این دو سناریو بافاصله یکسانی ادامه خواهد یافت.



شکل شماره ۶. میانگین پیش‌یابی تراز آب دریای خزر بر مبنای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل‌های اقلیمی سه‌گانه



شکل شماره ۷. میانگین کلی پیش‌بینی تراز آب دریای خزر بر مبنای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

### نتیجه‌گیری

تراز آب دریای خزر از کوتاه‌ترین لحظه تا طولانی‌ترین دوره زمانی دائماً در حال نوسان و افت و خیز است، به طوری که از سال ۱۹۴۱ لغایت ۲۰۱۹، علاوه بر افت و خیزهای کوتاه‌مدت، سه دوره عمده تغییر روند دیده می‌شود که از جمله آن دوره ۱۹۴۱ تا ۱۹۷۷؛ در طی این دوره ۱۰۰ سانتی‌متر تراز آب کاهش یافت، از سال ۱۹۷۸ لغایت ۱۹۹۵ در حدود ۲۲۵ سانتی‌متر افزایش و در نهایت از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹ در حدود ۹۰ سانتی‌متر کاهش یافته است. بر این اساس به منظور مدل‌سازی تراز آب برای دوره‌های آتی با مؤلفه‌های اقلیمی با تبدیل تراز ارتفاعی به تفاضل ماهانه این روندها حذف شدند. با ارزیابی کارایی مدل‌سازی تراز آب دریای خزر با دوره پایه زمانی مختلف بین ۴۰ تا ۸۰ سال مشخص گردید که در مقایسه حالات آموزشی و آزمایشی بهترین کارایی برای پایه ۱۹۴۱، ۱۹۵۱ و ۱۹۶۰ در هر سه مدل اقلیمی به دست آمد. از طرف دیگر با ادغام خروجی‌های مدل‌های اقلیمی در سناریوی SSP2-4.5 و SSP8-8.5 مشخص گردید؛ در دو مدل MIROC-ES2L و INM-CM4-8 تراز آب دریای خزر روند کاهشی خواهند داشت. در حالی که در مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR تراز آب دریای خزر در آینده در سطح بالاتری قرار خواهد گرفت. اما در نهایت با ادغام مدل‌های سه‌گانه اقلیمی مشخص گردید که در سناریو SSP2-4.5 با وجود انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای در سطوح فعلی تا سال ۲۰۵۰ و کاهش آن تا سال ۲۱۰۰ و البته با افزایش میانگین ۲ درجه سانتی‌گراد برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲٫۷ درجه سانتی‌گراد برای دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تراز آب دریای خزر روند کاهشی یکنواختی را خواهد داشت. در حالی که در سناریوی SSP8-8.5 با انتشار گازهای گلخانه‌ای شدید و سه برابر شدن دی‌اکسید کربن تا ۲۰۷۵، افزایش میانگین ۲٫۴ درجه سانتی‌گراد برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۴٫۴ درجه سانتی‌گراد برای دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تراز آب دریای خزر ابتدا تا سال ۲۰۵۰ ثابت خواهد ماند اما از این سال به بعد روند کاهش آن شروع خواهد شد. در نهایت یافته‌های این پژوهش با کارهای الگیونی و همکارش (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷)، کوریچ و همکارانش (۲۰۲۱)، چن و همکارانش (۲۰۱۷) و حسینی و همکارش (۲۰۲۰) در ارتباط با کاهش تراز آب دریای خزر در دوره‌های آتی همخوانی دارد.

### تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.



## منابع

۱) مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر. (۱۳۸۵). خزر توهامات و واقعیات، ترجمه: علی شمسی فولادی، نویسنده: ای‌گور س. زون، وزارت نیرو-موسسه تحقیقات آب.

## References

- 1) Arpe, K., & Leroy, S. (2007). The Caspian Sea Level Forced by the Atmospheric Circulation, as Observed and Modelled. *Quaternary International*, 173, 1-21.
- 2) Ataei H, S., Jabari Kh, A., Khakpour, A. M., Neshaei, S. A., & Yosefi Kebria, D. (2019). Long-term Caspian Sea level variations based on the ERA-interim model and rivers discharge. *International Journal of River Basin Management*, 17(4), 507-516.
- 3) Chen, J. L., Pekker, T., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Kostianoy, A. G., Cretaux, J. F., & Safarov, E. S. (2017). Long-term Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6993-7001.
- 4) Dyakonov, G. S., & Ibrayev, R. A. (2018). Reproduction of interannual variability of the Caspian Sea level in a high-resolution hydrodynamic model. *Oceanology*, 58(1), 8-18.
- 5) Elguindi, N., & Giorgi, F. (2006). Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geophysical Research Letters*, 33, 1-12.
- 6) Elguindi, N., & Giorgi, F. (2007). Simulating future Caspian sea level changes using regional climate model outputs. *Climate dynamics*, 28(4), 365-379.
- 7) Elguindi, N., & Giorgi, F. (2006). Simulating multi-decadal variability of Caspian Sea level changes using regional climate model outputs. *Climate dynamics*, 26(2), 167-181.
- 8) Ghanghermeh, A., Roshan, G., Orosa, J.A., & Costa, Á.M. (2019). Analysis and Comparison of Spatial-Temporal Entropy Variability of Tehran City Microclimate Based on Climate Change Scenarios. *Entropy*, 21, 1-13.
- 9) Hajima, T., Abe, M., Arakawa, O., Suzuki, T., Komuro, Yo., Ogura, T., Ogochi, K., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, Maki A., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Ito, A., Takata, K., Watanabe, S., Kawamiya, M., Tachiiri, K. (2019). MIROC MIROC-ES2L model output prepared for CMIP6 CMIP piControl. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5710>.
- 10) Hoseini, S. M., & Soltanpour, M. (2020). LONG-TERM PREDICTION OF CASPIAN SEA LEVEL UNDER CMIP6 SCENARIOS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. *Coastal Engineering Proceedings*, (36v), 5-5.
- 11) IPCC, (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 12) Jungclauss, J., Bittner, M., Wieners, K-H., Wachsmann, F., Schupfner, M., Legutke, S., Giorgetta, M., Reick, Ch., Gayler, V., Haak, H., de Vrese, P., Raddatz, T., Esch, M., Mauritzen, T., von Storch, Jin-Song., & Roeckner, Erich (2019). MPI-M MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP piControl. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6674>.
- 13) Kaftan, V., Komitov, B., & Lebedev, S. (2018). Analysis of sea level changes in the Caspian Sea related to Cosmo-geophysical processes based on satellite and terrestrial data. *Geodesy and Geodynamics*, 9(6), 449-455.
- 14) Koriche, S. A., Singaray, J. S., & Cloke, H. L. (2021). The fate of the Caspian Sea under projected climate change and water extraction during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094024.
- 15) Klige, R. K., & Myagkov, M. S. (1992). Changes in the water regime of the Caspian Sea. *Geojournal*, 27(3), 299-307.
- 16) Koriche, S. A., Nandini-Weiss, S. D., Prange, M., Singaray, J. S., Arpe, K., Cloke, H. L., ... & Coe, M. (2021). Impacts of Variations in Caspian Sea Surface Area on Catchment-Scale and Large-Scale Climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(18), e2020JD034251.
- 17) Naderi Beni, A. B. D. O. L. M. A. J. I. D., Lahijani, H., Mousavi Harami, R., Arpe, K., Leroy, S. A. G., Marriner, N., ... & Reimer, P. J. (2013). Caspian sea-level changes during the last millennium: historical and geological evidence from the south Caspian Sea. *Climate of the Past*, 9(4), 1645-1665.
- 18) Ozyavas, A., Khan, S. D., & Casey, J. F. (2010). A possible connection of Caspian Sea level fluctuations with meteorological factors and seismicity. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(1-2), 150-158.

- 19) Panin, G. N., & Diansky, N. A. (2014). On the correlation between oscillations of the Caspian Sea level and the North Atlantic climate. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 50(3), 266-277.
- 20) Panin, G. N., Solomonova, I. V., & Vyruchalkina, T. Y. (2014). Regime of water balance components of the Caspian Sea. *Water resources*, 41(5), 505-511.
- 21) Serykh, I. V., & Kostianoy, A. G. (2020). The links of climate change in the Caspian Sea to the Atlantic and Pacific Oceans. *Russian Meteorology and Hydrology*, 45(6), 430-437.
- 22) Volodin, Evgeny; Mortikov, Evgeny; Gritsun, Andrey; Lykossov, Vasily; Galin, Vener; Diansky, Nikolay; Gusev, Anatoly; Kostykin, Sergey; Iakovlev, Nikolay; Shestakova, Anna; Emelina, Svetlana (2019). INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6 CMIP piControl. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5080>.