

بالا آمدن سطح آب خلیج فارس و دریای عمان تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی

مریم ایرانی - دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران
علیرضا مساح بوانی* - دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
اصغر بهلولی - استادیار گروه آموزشی فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
حمید علیزاده کتک لاهیجانی - دانشیار پژوهشگاه ملی علوم اقیانوسی و جوی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۲/۷

چکیده

بررسی‌ها نشان داده است که تغییرات تراز آب دریا در مقیاس محلی نسبت به تغییرات آن در مقیاس جهانی (میانگین تراز عمومی دریاها) متفاوت است. از آنجا که کاربرد مقادیر میانگین جهانی افزایش تراز آب در اجرای تحقیقات موجب بروز خطا در برآورد میزان دقیق آب‌گرفتگی و آسیب‌پذیری خطوط ساحلی است، برآورد میزان دقیق افزایش تراز آب با بهره‌گیری از مدل‌های AOGCM برای برنامه‌ریزی و مدیریت نواحی ساحلی ضروری است. در طی این پژوهش، با استفاده از مدل SIMCLIM به محاسبه تغییرات تراز آب تا سال ۲۱۰۰ میلادی در منطقه خلیج فارس و دریای عمان تحت سناریوهای انتشار گاز گلخانه‌ای پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تراز آب در این منطقه تا سال ۲۱۰۰، تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0، و RCP8.5 به ترتیب ۸۴.۱۸، ۸۶.۶۲، ۸۹.۰۶، و ۱۸۱.۳ سانتی‌متر خواهد بود. در حالی که مقدار تغییرات تراز عمومی آب به ترتیب تحت سناریوهای RCP حدود ۶۱، ۷۱، ۷۳، و ۹۸ سانتی‌متر در سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی شده است. مقایسه این مقادیر، لزوم محاسبه مقادیر تغییرات تراز محلی آب در منطقه را برای برآوردهای دقیق‌تر از میزان آسیب‌پذیری سواحل به آب‌گرفتگی در دوره‌های آتی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تغییرات تراز آب دریا، تغییر اقلیم، تغییرات محلی تراز آب دریا، مدل‌های AOGCM، مدل SIMCLIM

مقدمه

پس از انقلاب صنعتی در نیمه قرن هجدهم، به دلیل افزایش روزافزون صنایع و به واسطه آن افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، توازن مقادیر گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین بر هم خورده و مقادیر آن، به خصوص میزان گاز دی‌اکسید کربن، افزایش یافته است. این افزایش سبب گرم‌تر شدن اتمسفر کره زمین می‌شود. گرم‌تر شدن کره زمین نیز در وضعیت اجزای دیگر سیستم اقلیم کره زمین تأثیر می‌گذارد و پدیده تغییر اقلیم را موجب می‌شود. در حال حاضر، افزایش تراز آب دریا از جنبه‌های مهم تغییر اقلیم است. از آنجا که افزایش تراز دریاها در آینده نزدیک تهدیدی جدی و موضوعی بحث‌برانگیز برای جوامع ساحلی است (نیکولز و کازینو، ۲۰۱۰؛ استمر و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۲؛ اوسار و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۲)، برآورد میزان افزایش تراز آب طی دوره‌های آتی ضروری است. تغییرات تراز دریا در مقیاس وسیعی از زمان (دوره زمانی طولانی) و مکان

توسط عوامل به‌وجودآورنده آن (انبساط گرمایی^۱، ذوب یخ‌ها^۲، ...) که حاصل از تغییر اقلیم‌اند، رخ می‌دهد (IPCC, 2013: 1142؛ مایلن و همکاران، ۲۰۰۹: ۴۷۱). تغییرات تراز دریا تحت تأثیر دو عامل مهم قرار دارد: تغییر حجم ناشی از تغییر چگالی آب‌ها و تغییر جرم ناشی از تبدلات آبی بین اتمسفر و زمین از طریق بارش، تبخیر، رواناب رودخانه‌ها، و ذوب یخ‌ها (میسیناک و همکاران، ۲۰۱۲: ۹۹ و ۹۷؛ اوسار و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۰). به گزارش IPCC AR5^۳، طی قرن بیست‌ویکم، در نتیجه انبساط حرارتی اقیانوس‌ها و ذوب ورقه‌های یخ قطبی و یخچال‌های طبیعی^۴، با افزایش جهانی میانگین سطح آب دریاها روبه‌رو خواهیم بود. براساس سناریوهای افزایش جهانی سطح آب دریاها، در طی صد سال آینده با افزایش ۲۶ تا ۸۲ سانتی‌متری در سطح آب‌ها روبه‌رو هستیم (چرچ و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۱۸۰ و ۱۱۸۲) (جدول ۱). افزایش سطح آب تهدیدی جدی برای مناطق ساحلی محافظت‌نشده است که آثار فیزیکی آن طغیان دائم و موقتی و آثار دیگر آن فرسایش سواحل، طوفان‌های مخرب، و نفوذ آب شور به آبخوان‌هایی با آب شیرین است (اوسار و همکاران، ۲۰۱۵: ۲).

جدول ۱. تغییرات میانگین تراز عمومی آب دریاها تحت سناریوهای RCP

سناریو	RCP8.5	RCP6.6	RCP4.5	RCP2.6	سال
میانگین افزایش جهانی تراز دریا	۰.۳ (-۰.۲۲ - ۰.۲۸)	۰.۲۵ (-۰.۱۸ - ۰.۲۳)	۰.۲۶ (-۰.۱۹ - ۰.۲۳)	۰.۲۴ (-۰.۱۷ - ۰.۲۳)	۲۰۶۵-۲۰۴۶
میانگین افزایش جهانی تراز دریا طی ۲۱۰۰-۲۰۸۱	۰.۶۳ (-۰.۴۵ - ۰.۸۲)	۰.۴۸ (-۰.۳۳ - ۰.۶۳)	۰.۴۷ (-۰.۳۳ - ۰.۶۳)	۰.۴ (-۰.۲۶ - ۰.۵۵)	۲۱۰۰-۲۰۸۱
میانگین افزایش جهانی تراز در سال ۲۱۰۰	۰.۷۴ (-۰.۵۲ - ۰.۹۸)	۰.۵۵ (-۰.۳۸ - ۰.۷۳)	۰.۵۳ (-۰.۲۶ - ۰.۷۱)	۰.۴۴ (-۰.۲۸ - ۰.۶۱)	۲۱۰۰
نرخ میانگین افزایش جهانی تراز دریا	۱۱.۲ (۷.۵ - ۱۵.۷)	۷.۴ (۴.۷ - ۱۰.۳)	۶.۱ (۳.۵ - ۸.۸)	۴.۴ (۲.۰ - ۶.۸)	

منبع: (IPCC, 2013)

بررسی‌ها نشان داده است که تغییرات تراز آب دریا در مقیاس محلی^۵ نسبت به تغییرات آن در مقیاس جهانی متفاوت است (IPCC, 2013: 1140, 1148, 1191). دلایل اصلی آن به پویایی گردش اقیانوسی به عنوان بخشی از تغییرپذیری حالات اقلیمی و تعادل ایزوستاتیکی پوسته زمین در برابر تغییرات گذشته و حال جرم یخ‌های قطبی و منابع و ذخایر آبی قاره‌ها برمی‌گردد. درباره خطوط ساحلی نیز تراز آب تحت تأثیر عوامل زمین‌لرزه و فرونشست زمین تغییر خواهد کرد (استمر و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۰؛ کارسون و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۷۹). هرچند فعالیت‌های بشری بر تغییرات تراز آب مؤثر است. با این حال، به علت تغییرات نیروهای اتمسفری یا تغییرات جرم در سیستم اقلیم زمین. با افزایش تغییر اقلیم، تراز آب افزایش بیشتری خواهد یافت. تا پایان قرن بیست‌ویکم الگوهای تغییرات تراز محلی سطح آب حاصل جمع تغییر در وضع اقلیم منطقه و الگوهای ثابت تراز آب هستند (استمر و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۰ و ۴۱). بسیار محتمل است که در سال ۲۱۰۰ افزایش قابل توجهی در وقوع رخداد‌های شدید سطح آب مشاهده شود که این افزایش در درجه اول ناشی از افزایش سطح تراز دریاهاست (IPCC, 2013: 1140). احتمالاً دوره بازگشت رخداد‌های شدید نیز افزایش خواهد داشت. در پیش‌بینی وقایعی مانند طوفان^۶، در طی این دوره، اطمینان زیادی وجود ندارد. به احتمال متوسط، میانگین سالانه ارتفاع مشخصه^۷ موج در اقیانوس جنوبی افزایش می‌یابد، که می‌تواند در نتیجه افزایش سرعت باد باشد. انبساط اقیانوس منجمد جنوبی با احتمال زیادی بر ارتفاع، دوره، و جهت^۸ امواج در حوضه‌های مجاور تأثیر خواهد داشت. به احتمال زیاد، در اقیانوس منجمد شمالی، به دلیل کاهش گستردگی یخ‌های موجود در دریا، ارتفاع امواج و طول فصل امواج افزایش خواهد یافت (IPCC, 2013: 1141).

1. thermal expansion
2. melting ice
3. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
4. glacier
5. regional sea level rise
6. storm surge
7. significant wave height
8. wave direction

تاکنون مطالعات گوناگونی در زمینه بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر بالآمدن سطح آب دریاها در مناطق مختلف انجام شده است؛ در این مطالعات از الگوهای متفاوتی برای شبیه‌سازی و برآورد تغییرات تراز آب استفاده شده است. یکی از معتبرترین این روش‌ها استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCM) است. با وجود این، شبیه‌سازی‌های اقلیمی با استفاده از مدل‌های مختلف گردش عمومی جو و بعضاً تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای مختلف RCP^۲ ممکن است همراه با عدم قطعیت^۳ باشد. بررسی عدم قطعیت در مدل‌های AOGCM با مقایسه نتایج مدل‌ها تحت یک سناریو تخمین زده می‌شود. تنگ و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل‌های AOGCM، در برآورد رواناب، نتایج ۱۵ مدل AOGCM را با هم مقایسه کردند و ۲۸-۳۵ درصد عدم قطعیت در برآورد حداکثر، حداقل، و میانگین رواناب سالانه را تخمین زدند. آپینینگ آدو و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل GCM CSIRO_MK2_GS تحت تأثیر سناریوهای A1F1 و B2 تأثیر بالآمدن سطح آب دریا در مقیاس محلی بر سواحل دانسومان را بررسی کردند که براساس سناریو AIF1، در بدترین حالت، میزان افزایش تراز سطح آب نسبت به یک دوره پایه ۷۹٫۷۱ سانتی‌متر و براساس سناریو B2، ۶۰٫۲۷ سانتی‌متر پیش‌بینی شده است. پاردانس و همکاران (۲۰۱۱) برای بررسی میزان تغییرات تراز آب دریا در شرایط کاهش گاز گلخانه‌ای با استفاده از مدل‌های AOGCM، HadCM3C، و AO - HadGEM2 دریاقتند که تا حدود یک‌سوم (به میزان یک‌سوم افزایش جهانی تراز آب) می‌توان افزایش جهانی تراز آب را کاهش داد و عامل اصلی کاهش میزان تغییرات تراز آب کاهش انبساط گرمایی آب‌ها است. در برآورد میزان افزایش تراز آب دریاها در مقیاس محلی با استفاده از الگوهای مختلف AOGCM مقادیر تخمینی براساس مدل‌های مختلف متفاوت‌اند؛ در صورتی که به ازای هر مدل تحت سناریوهای مختلف تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود. همان‌گونه که برای شبیه‌سازی دما و بارش، مدل‌های مختلف AOGCM مقادیر متفاوتی را ارائه می‌کنند (تنگ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۲۲ و ۱۳۷)، در برآورد میزان افزایش تراز آب نیز مدل‌های AOGCM نتایج متفاوتی را نشان می‌دهند؛ بنابراین، در این مقاله عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در برآورد بالآمدن سطح آب دریا در خلیج فارس و دریای عمان تحت سناریوهای RCP مختلف بررسی می‌شود. این در حالی است که در بیشتر تحقیقات اخیر انجام‌شده، محققان برای بررسی آثار افزایش تراز آب بر اکوسیستم ساحل از مقادیر شبیه‌سازی‌شده افزایش تراز آب در مقیاس جهانی و در مواردی نیز مقادیر تقریبی (فرضی) ۰٫۵ تا ۲ متر طی یک دوره زمانی را در نظر گرفته‌اند (دمیرکسن، ۲۰۰۸: ۱۰۳؛ سلیم‌خان، ۲۰۱۲: ۳۳۷). در بررسی تغییرات تراز خلیج فارس، ترابی آزاد و هنرمند (۱۳۹۵)، با استفاده از پارامترهای هواشناختی و مدل‌های آماری در ایستگاه‌های جزرومدی پرداختند و میانگین تراز دریا را با محاسبه میزان تأثیر نیروی باد، دما، و اثرات بارومتری بر آن محاسبه کردند. در واقع، توسط مدل‌های آماری، اثرهای مختلف جوی بر روی نوسان‌های تراز دریا بررسی و مدل‌های غالب مربوط به نوسانات تراز دریا معرفی شد. سپس، به محاسبه میانگین تراز دریا در یک دوره یازده‌ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۱) پرداخته شد و میزان روند افزایشی میانگین تراز دریا در بندرعباس و بوشهر به ترتیب ۵ سانتی‌متر و ۴ سانتی‌متر در سال برآورد شد و نوسانات تراز دریا به ترتیب ۵۵ و ۵۲ سانتی‌متر طی این دوره محاسبه شد.

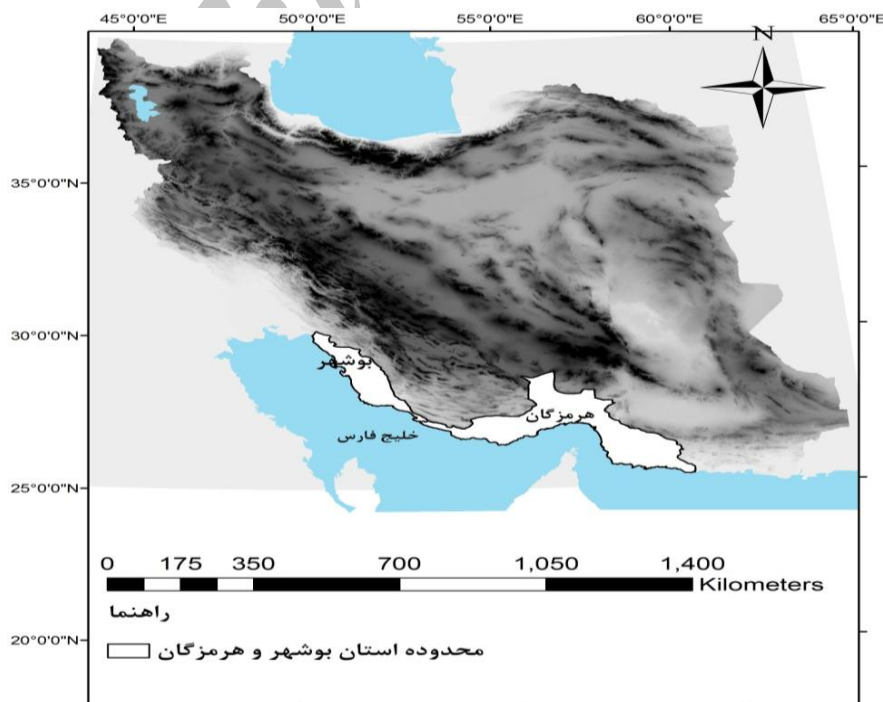
در کشور ایران در زمینه بررسی تغییرات تراز آب دریا تحت تأثیر تغییر اقلیم مطالعات محدودی انجام گرفته است. طی این تحقیقات، که بیشتر در راستای بررسی اثرهای ناشی از تغییرات تراز آب در نواحی ساحلی بوده است، مقادیر جهانی تغییرات تراز آب مقدار تراز نهایی آب در طول منطقه مطالعاتی مورد نظر لحاظ شده است (وفایی، ۲۰۱۲: ۲۱۱)؛ در صورتی که مقدار تغییرات تراز آب در مقیاس محلی با مقادیر آن در مقیاس جهانی متفاوت است. در سایر تحقیقات انجام‌شده نیز فقط به تأثیر تغییر اقلیم در تغییرات تراز آب دریا اشاره شده و عملاً به بررسی تأثیر تغییر اقلیم در تراز دریا پرداخته نشده است. همچنان که ترابی آزاد و زاهدی (۱۳۸۲) به بررسی اثر تغییر اقلیم در جریان‌های خلیج فارس با استفاده از بررسی آمار بلندمدت، تبخیر، و بارندگی و دمایی

1. General Circulation Models (GCMs)
2. representative concentration pathways
3. uncertainty

آب در سواحل شمالی خلیج فارس پرداختند. نتایج بیانگر تأثیر تغییر اقلیم توأم با تأثیر فرونشست زمین بوده است. در واقع، طی این تحقیق چنین نتیجه گرفتند که در خلیج فارس در نتیجه فرونشستی خشکی سطح تراز دریا به همان اندازه که از تغییرات اقلیم انتظار می‌رود افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان افزایش سطح تراز دریا در این منطقه دو برابر میزان جهانی است. از آنجا که خلیج فارس منطقه‌ای کم‌عمق است، ضرورتاً تحت تأثیر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم قرار می‌گیرد و انتظار می‌رود افزایش دمای خلیج فارس در اثر تغییر اقلیم، کم‌عمق بودن، اختلاط کامل، و زمان کم اقامت آب (۳-۵ سال) بالاتر از میانگین جهانی باشد. در نتیجه افزایش دمای آب در نتیجه تغییر اقلیم جهانی، در نهایت میزان میانگین تبخیر سالانه افزایش می‌یابد. افزایش در بارندگی در اثر تغییر اقلیم، بیشتر در فرسایش ساحلی و افزایش آب شیرین و سیلاب‌ها مؤثر است. از آنجا که کاربرد مقادیر میانگین جهانی افزایش تراز آب در اجرای تحقیقات و همچنین در احداث ساخت‌گاه‌های ساحلی و مراقبت و مدیریت زیستگاه‌های طبیعی و غیرطبیعی ساحلی موجب بروز خطا در برآورد میزان دقیق آب‌گرفتگی و آسیب‌پذیری خطوط ساحلی است، برآورد میزان دقیق افزایش تراز آب با بهره‌گیری از مدل‌های AOGCM برای برنامه‌ریزی و مدیریت نواحی ساحلی ضروری است. خلأ ارزیابی میزان دقیق تغییرات تراز آب تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم در سواحل کشور موجب شد تا در مطالعه حاضر مقدار تغییرات تراز آب دریا در مقیاس محلی در منطقه خلیج فارس و دریای عمان در دوره‌های آبی برآورد شود. طی این تحقیق، به برآورد مقدار افزایش تراز آب در این مناطق با استفاده از ۲۴ مدل AOGCM پیشنهادشده IPCC در گزارش پنجم تحت سناریوهای جدید انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته شده است.

منطقه مطالعاتی

محدوده‌ای که در این تحقیق ارزیابی شده است بخشی از سواحل جنوبی ایران در محدوده استان بوشهر و هرمزگان است. این منطقه از لحاظ مختصات جغرافیایی در فاصله طول شرقی ۲۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و ۵۹ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی واقع شده است. خلیج فارس یک دریای حاشیه‌ای با عمق متوسط ۳۵ متر و مساحت ۲۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع است (طرح ملی تغییر آب و هوا، ۱۳۹۴: ۴۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

روش تحقیق

در این تحقیق از مدل^۱ SIMCLIM برای بررسی میزان تغییرات تراز آب خلیج فارس و دریای عمان تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. SimCLIM یک ابزار و یک نرم‌افزار طراحی شده برای تسهیل در ارزیابی خطرهای ناشی از تغییرات اقلیم است. SimCLIM از آخرین اطلاعات اقلیمی CMIP5 استفاده می‌کند. این نرم‌افزار می‌تواند از جنبه‌های مختلف تغییر اقلیم نقشه‌ها، گراف‌ها، و نمودارهایی برای سایت‌ها، شهرها، استان‌ها، کشورها، و جهان به صورت مکانی تولید کند. انعطاف‌پذیری این نرم‌افزار بی محدودیت است (Climsystems, 2013). در مدل SIMCLIM، براساس سناریوها و مدل‌های ذکر شده در جدول‌های ۲ و ۳، مقادیر متفاوت افزایش تراز آب طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۱۰۰ شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق، مدل SIMCLIM برای دوره ۱۹۹۵ تا ۲۱۰۰ براساس مدل‌های مختلف گردش عمومی جو، تحت سناریوهای RCP اجرا شده و نتایج تغییرات تراز آب در مقیاس محلی برای منطقه مطالعاتی برآورد شده است. در واقع، برای افزایش مدیریت عدم قطعیت ناشی از سناریوهای گاز گلخانه‌ای، نتایج تغییرات تراز آب براساس هر چهار سناریو RCP ارزیابی می‌شود. نتایج ارائه شده، در سه سطح خوش‌بینانه‌ترین، بدبینانه‌ترین، و مقدار متوسط برآورد شد. علاوه بر اینکه در این مدل امکان برآورد تغییرات تراز آب تا سال ۲۱۰۰ وجود دارد، امکان محاسبه نسبت تغییرات تراز آب براساس روند موجود در داده‌های تراز آب ثبت شده در گذشته (به وسیله ایستگاه‌های اندازه‌گیری جزرومد، تصاویر ماهواره‌ای، و سایر روش‌های برآورد میزان روند در تراز آب طی دوره‌های گذشته در منطقه مورد مطالعه) یا براساس میزان تغییرات در ارتفاع و فاصله خشکی‌ها^۲ نیز وجود دارد. همچنین، در بررسی ریسک آب‌گرفتگی نیز می‌توان از این مدل استفاده کرد. در مدل SIMCLIM، میزان تغییرات تراز آب طی یک دوره آماری براساس افزایش دمای هوا، که منجر به انبساط گرمایی و افزایش ذوب یخ‌های قطبی است، برآورد می‌شود (آپنینگ آدو و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۰۳۶؛ ۲۰۱۳: ۲۸؛ Simclim Essentials, 2013؛ چانگو و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۱). در این مدل، برای افزایش تراز آب دریا، قدرت تفکیک مکانی حدود $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ در سطح جهانی و حدود 0.1° در سطح منطقه‌ای است (Climsystems, 2013). از مدل Simclim همچنین برای بررسی ریسک و مدل‌سازی‌های تأثیرات رخدادهای شدید اقلیمی بر تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی نیز می‌توان استفاده کرد (وریک، ۲۰۰۹: ۲۵۸۳).

در این تحقیق از خروجی ۲۴ مدل AOGCM تحت سناریوهای RCP_{2.6}، RCP_{4.5}، RCP_{6.0}، و RCP_{8.5} استفاده می‌شود. از ورودی‌های این مدل‌ها، مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای طبق سناریوهای تعریف شده در دوره‌های آتی است. IPCC تاکنون سناریوهای متفاوتی ارائه کرده است که مجموعه سناریوهای RCP جدیدترین آن‌هاست. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش ارزیابی پنجم از سناریوهای جدید RCP به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. هر یک از سناریوهای موجود در این مجموعه معرف وضعیت متفاوتی است که بر پایه میزان غلظت گاز کربن دی‌اکسید، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی‌های جوی (آئروسول)، گازهای فعال شیمیایی، و تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌کنند (موس و همکاران، ۲۰۰۸: ۵). سناریوهای معرفی شده بر اساس مشخصات متفاوت از سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، و خط‌مشی‌ها در آینده است که در هر شرایطی می‌تواند به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی منجر شود. خروجی‌های این سناریوها، علاوه بر میزان انتشار و تغییرات کاربری اراضی، شامل عوامل این تغییرات مانند الگوها و نرخ رشد وضعیت اقتصادی، اجتماعی، و تکنولوژی و خط‌مشی سیاسی و سایر عوامل مهم در ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم‌اند (موس و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۴۸). در هر نسخه از این سناریوها، اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس نقش آن بر سطح واداشت‌های تابشی در سال ۲۱۰۰، به چهار دسته RCP_{2.6}، RCP_{4.5}، RCP_{6.0}، و RCP_{8.5} تا پایان قرن بیست‌ویکم طبقه‌بندی شده‌اند (موس و همکاران، ۲۰۰۸: ۵). تعریف کلی واداشت تابشی تفاوت بین انرژی تابشی دریافتی از خورشید و انرژی بازگشتی به جو توسط زمین

1. SIMCLIM is available from <http://www.climsystems.com/simclim>

2. land movement

است. همچنین، نتایج این سناریوها از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن بیست‌ویکم را پوشش می‌دهد و تا سال ۲۳۰۰ نیز تعیین شده است (ون وورن، ۲۰۱۱: ۷؛ IPCC DDC, 2014a). جدول ۲ خلاصه‌ای از ویژگی‌های سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق است (موس و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۴ و ۳۷؛ RCP Database, 2009؛ موس و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۵۳؛ ون وورن، ۲۰۱۱: ۱۲ و ۱۶؛ IPCC, 2013a؛ IPCC, 2013b؛ IPCC, 2014a؛ IPCC, 2014b).

جدول ۲. سناریوهای انتشار گاز گلخانه‌ای RCP

نام سناریو	مقدار معادل CO2	توضیحات (اثر غلظت گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی)	معادل سناریوهای SRES	مدل‌سازی ارزیابی جامع (IAM)
RCP _{8.5}	۱۳۷۰ PPM	افزایش مقدار واداشت تابشی تا ۲۸.۵ N/M ² تا سال ۲۱۰۰	A1F1	MESSAGE
RCP ₆	۸۵۰ PPM	افزایش مقدار واداشت تابشی تا ۶ N/M ² تا سال ۲۱۰۰	B2	AIM
RCP _{4.5}	۶۵۰ PPM	افزایش مقدار واداشت تابشی تا ۴.۵ N/M ² تا سال ۲۱۰۰	B1	MiniCAM
RCP _{2.6}	۴۹۰ PPM	افزایش مقدار واداشت تابشی تا ۲.۶ N/M ² تا سال ۲۱۰۰	None	IMAGE

منبع: (موس و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۴ و ۳۷؛ موس و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۵۳؛ ون وورن، ۲۰۱۰: ۱۲ و ۱۶؛ کیوش و همکاران، ۲۰۱۳؛ Climsystems, 2013؛ IPCC, 2014b)

جدول ۳. مشخصات ۲۴ مدل چرخه عمومی اتمسفر - اقیانوس مربوط به گزارش ارزیابی پنجم مورد استفاده در تحقیق حاضر

نام مدل اقلیمی	نام مخفف مرکز تحقیقاتی	سناریوهای شبیه‌سازی	قدرت تفکیک اقیانوسی	قدرت تفکیک اتمسفری
BCC-CSM1-1	BCC (China)	RCP _{2.6}	3.6° × 2.32°	1.28° × 0.64°
BCC-CSM1-1-m	BCC (China)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.6° × 2.32°	3.2° × 1.6°
CanESM2	CCCma (Canada)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	2.56° × 1.92°	1.28° × 0.64°
CCSM4	NCAR(USA)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.2° × 3.84°	2.88° × 1.92°
CMCC-CM	CMCC (Italy)	RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	1.82° × 1.49°	4.8° × 2.4°
CMCC-CMS	CMCC (Italy)	RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	1.82° × 1.49°	1.92° × 0.96°
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS(France)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	3.62° × 2.92°	2.56° × 1.28°
CSIRO-Mk3-6-0	ABM(Australia)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	1.92° × 1.89°	1.92° × 0.96°
GFDL-CM3	NOAA GFDL (USA)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.6° × 2°	1.44° × 0.9°
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL (USA)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.6° × 2.1°	1.44° × 0.9°
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL (USA)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.6° × 2°	1.44° × 0.9°
GISS-E2-R	NASA/GISS (USA)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	2.88° × 1.8°	1.44° × 0.9°
GISS-E2-R-CC	NASA/GISS (USA))	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	2.88° × 1.8°	1.44° × 0.9°
HadGEM2-CC	MOHC (UK)	RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	3.6° × 2.16°	1.92° × 1.45°
HadGEM2-ES	INPE (UK)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	3.6° × 2.16°	1.92° × 1.45°
INMCM4	INM (Russia)	RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	3.6° × 3.4°	1.8° × 1.2°
MIROC5	MIROC (Japan)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	2.56° × 2.24°	2.56° × 1.28°
MIROC-ESM	MIROC (Japan)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	2.56° × 1.92°	1.28° × 0.64°
MIROC-ESM-CHEM	MIROC (Japan)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	2.56° × 1.92°	1.28° × 0.64°
MPI-ESM-LR	MPI-M (Germany)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	2.56° × 2.2°	1.92° × 0.96°
MPI-ESM-MR	MPI-M (Norway)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{8.5}	8.02° × 4.04°	1.92° × 0.96°
MRI-CGCM3	MRI (Japan)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.6° × 3.68°	3.2° × 1.6°
NorESM1-M	NCC (Norway)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.2° × 3.84°	1.44° × 0.96°
NorESM1-ME	NCC (Norway)	RCP _{2.6} , RCP _{4.5} , RCP _{6.0} , RCP _{8.5}	3.2° × 3.84°	1.44° × 0.96°

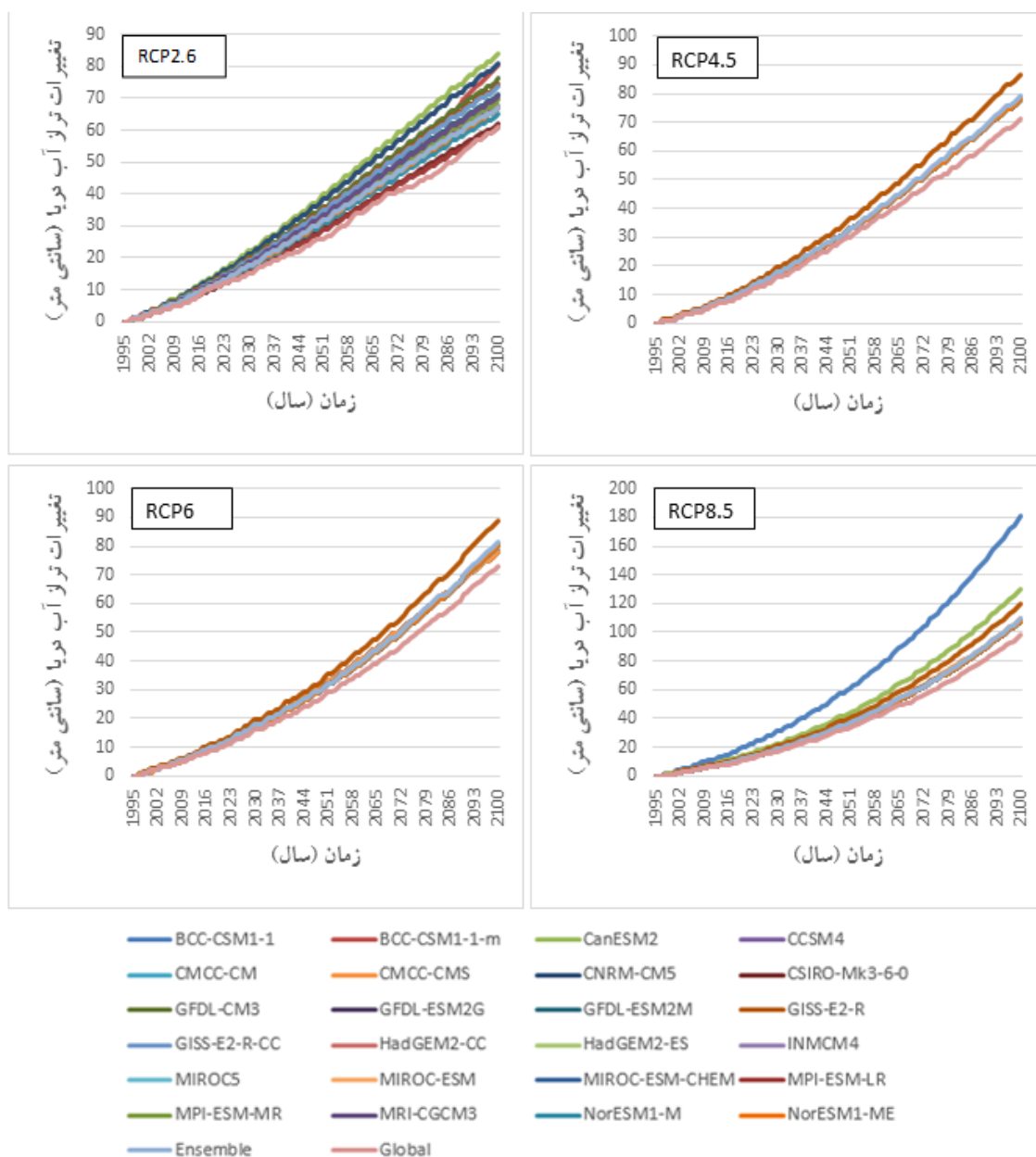
تا هنگامی که خطاهای شبیه‌سازی تحت مدل‌های مختلف AOGCM غیروابسته هستند، استفاده از میانگین گروهی از این مدل‌ها^۱ در مقیاس‌های مختلف زمانی می‌تواند به عنوان تخمین بهتری از پیش‌بینی‌ها به جای کاربرد هر یک از مدل‌ها به صورت مجزا به کار برده شود. در واقع، پیش‌بینی براساس اثر کلی مدل‌های AOGCM نتایج شبیه‌سازی طیف وسیعی از مدل‌ها را هم‌زمان فراهم می‌آورد و به کار می‌گیرد (IPCC, 2007). در واقع، اثر کلی مدل‌ها به مفهوم مجموعی از شبیه‌سازی مدل‌های توصیف‌کننده پیش‌بینی یا تصویرساز اقلیمی است. تفاوت در شرایط اولیه و فرمولاسیون مدل‌ها در تحولات مختلف سیستم‌های مدل‌شده اثرگذار است و ممکن است اطلاعاتی که همراه با عدم قطعیت مرتبط با خطای ناشی از مدل در شرایط اولیه در مورد پیش‌بینی‌های اقلیمی یا همراه با عدم قطعیت مرتبط با تنوع اقلیمی تولیدشده درونی در مورد تصویرسازی‌های اقلیمی هستند فراهم آورد (IPCC, 2013a; IPCC, 2013b; IPCC, 2014a)

یافته‌های پژوهش

برای مقایسه افزایش تراز آب در مقیاس محلی نسبت به میانگین عمومی تراز آب دریاها، به بررسی تفاوت پیش‌بینی‌های تراز سطح آب تحت اثر کلی مدل‌های AOGCM در مقیاس محلی، نسبت به میانگین عمومی تراز آب دریاها پرداخته شده است. مقادیر در سه حالت - خوش‌بینانه‌ترین حالت، بدبینانه‌ترین حالت، و حد واسطه - ارائه شده است (جدول ۴). مقادیر پیش‌بینی‌شده تراز آب در مقیاس منطقه مطالعاتی براساس همه سناریوها کاملاً متفاوت از مقدار میانگین پیش‌بینی‌شده تراز عمومی آب دریاهاست (جدول ۱) و در هر سه حالت بیشترین و کمترین مقدار و مقدار حد واسطه بیش از مقادیر پیش‌بینی‌شده عمومی تراز آب دریاهاست. تفاوت پیش‌بینی‌ها طی دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ نسبت به ۲۰۴۶-۲۰۶۵ نشان می‌دهد که تغییرات محلی تراز آب طی دوره‌های زمانی یکسان متفاوت از یکدیگر است و، در واقع، با میزان متفاوتی در حال تغییر است و با گذشت زمان تغییرات تراز آب با سرعت بیشتری رو به افزایش خواهد بود (جدول ۴). مقادیر پیش‌بینی‌شده تحت سناریوی RCP_{8.5} با اختلاف بیشتری نسبت به میانگین تراز عمومی دریاها در بین سایر سناریوهای RCP رو به افزایش است. براساس پیش‌بینی‌های محلی تراز آب در منطقه مورد مطالعه، تحت سناریوی RCP_{8.5} مقدار تغییرات تراز آب در سال ۲۱۰۰ حدود ۱۱ سانتی‌متر و تحت سناریوی RCP_{2.6} حدود ۶ سانتی‌متر بیش از مقدار میانگین تراز عمومی دریاهاست. این اختلاف، در صورت مقایسه مقدار پیش‌بینی‌شده تراز آب تحت مدل‌های مختلف AOGCM به صورت مجزا تفاوت بیشتری با مقایسه مقدار پیش‌بینی‌شده تراز آب تحت اثر کلی این مدل‌ها نسبت به مقدار میانگین تراز عمومی دریاها دارد. همچنان که در نمودارهای شکل ۲ نیز دیده می‌شود.

جدول ۴. نتایج پیش‌بینی تغییرات محلی تراز آب منطقه مورد مطالعه براساس مدل SIMCLIM تحت سناریوهای RCP

سناریو				سال
RCP _{8.5}	RCP ₆	RCP _{4.5}	RCP _{2.6}	
(۰.۴۳-۰.۲۵)۰.۳۳	(۰.۳۶-۰.۲)۰.۲۸	(۰.۳۷-۰.۲)۰.۳	(۰.۳۴-۰.۱۸)۰.۲۷	میانگین افزایش جهانی تراز دریا ۲۰۶۵-۲۰۴۶
(۰.۹۳-۰.۵۱)۰.۷	(۰.۷۱-۰.۳۷)۰.۵۴	(۰.۷-۰.۳۶)۰.۵۲	(۰.۶۱-۰.۲۹)۰.۴۲	۲۱۰۰-۲۰۸۱
(۱.۱-۰.۶)۰.۸۳	(۰.۸۱-۰.۴۲)۰.۶۱	(۰.۸-۰.۴)۰.۶	(۰.۶۷-۰.۳۱)۰.۴۹	میانگین افزایش جهانی تراز در سال ۲۱۰۰



شکل ۲. نتایج شبیه‌سازی تغییرات تراز آب دریا براساس مدل‌های مختلف AOGCM طی دوره ۱۹۹۵-۲۱۰۰

بررسی سری زمانی تغییرات تراز سطح آب خلیج فارس و دریای عمان

نتایج شبیه‌سازی براساس مدل‌های AOGCM تحت سناریوی RCP_{2.6} نشان داد تغییرات تراز آب طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۱۰۰ در منطقه خلیج فارس و دریای عمان نسبت به مقادیر میانگین افزایش تراز عمومی آب دریاها بیشتر است (جدول ۲). مدل CanESM2 نسبت به سایر مدل‌ها تغییرات تراز آب تا پایان سال ۲۱۰۰ را به مقدار بیشتری پیش‌بینی کرده و حدود پیش‌بینی براساس آن ۲۳.۱۸ سانتی‌متر بیش از حداکثر مقدار میانگین پیش‌بینی‌شده تراز عمومی آب دریاهاست. حدود پیش‌بینی‌ها براساس مدل‌های مختلف از ۶۱ سانتی‌متر براساس مدل MPI-ESM-LR برابر با مقدار پیش‌بینی‌شده تراز عمومی دریاها تا حدود ۸۴.۱۸ سانتی‌متر براساس مدل CanESM2 در سال ۲۱۰۰ متفاوت است. براساس این سناریو، تفاوت پیش‌بینی مدل‌های AOGCM از سال ۲۰۳۰ به بعد بیشتر شده است. براساس سناریوی RCP_{4.5}،

مدل‌های به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق، به استثنای مدل GISS-E2R، مقدار افزایش تراز آب دریا تا پایان سال ۲۱۰۰ را حدود ۷۸.۱ سانتی‌متر برآورد کردند. پیش‌بینی افزایش تراز آب براساس مدل GISS-E2R در سال ۲۱۰۰ بیشترین مقدار و حدود ۸۶.۶۲ سانتی‌متر است که در مقایسه با حداکثر مقدار میانگین پیش‌بینی‌شده تراز عمومی آب دریاها ۱۵.۶۲ سانتی‌متر بیشتر پیش‌بینی شده است. براساس سناریوی RCP_{4.5}، مقدار پیش‌بینی‌ها براساس مدل‌های مختلف AOGCM حدود ۸.۵۲ سانتی‌متر عدم قطعیت دارد که در مقایسه با سایر سناریوها فاصله عدم قطعیت کمتری را دربر می‌گیرد. تقریباً همه مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق تحت سناریوی RCP_{4.5}، مقداری برابر با مقدار پیش‌بینی‌شده افزایش تراز آب، تحت اثر کلی مدل‌های AOGCM را پیش‌بینی کرده‌اند. براساس سناریوی RCP₆، فاصله کمترین و بیشترین مقدار پیش‌بینی افزایش تراز آب تحت مدل‌های مختلف AOGCM حدود ۱۰.۹۶ سانتی‌متر است. مشابه نتایج پیش‌بینی تحت سناریوی RCP_{4.5}، براساس سناریوی RCP₆ نیز مدل GISS-E2R بیشترین مقدار تغییر در تراز آب حدود ۸۹.۰۶ سانتی‌متر را در سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی کرده است. بیشتر مدل‌ها تحت این سناریو مقدار ۸۰.۳ را برآورد کرده‌اند که حدود ۷.۳ سانتی‌متر با مقدار حداکثر میانگین پیش‌بینی‌شده تراز عمومی آب دریاها اختلاف دارند.

تحت سناریوی RCP_{8.5}، بیشتر مدل‌ها مقدار ۱۰۷.۸ سانتی‌متر افزایش در تراز آب دریا را پیش‌بینی کردند. براساس این سناریو، بیشترین مقدار پیش‌بینی افزایش تراز آب تا پایان سال ۲۱۰۰ حدود ۱۸۱.۳ سانتی‌متر نسبت به سال ۱۹۹۵ و در نتیجه شبیه‌سازی با مدل BCC-CSM1-1 خواهد بود که در حدود ۸۳.۳۰ سانتی‌متر از حداکثر مقدار میانگین پیش‌بینی‌شده تراز عمومی آب دریاها متفاوت است و نسبت به سایر مدل‌ها حدود ۷۹.۹ سانتی‌متر تغییرات تراز آب را بیشتر پیش‌بینی کرده است. تحت این سناریو، فاصله عدم قطعیت پیش‌بینی تراز آب بین مدل‌های AOGCM بیش از سایر سناریوها و حدود ۷۳.۵ سانتی‌متر است.

در نهایت، برای بررسی تغییرات محلی تراز آب تحت سناریوهای مختلف، مقادیر پیش‌بینی‌شده افزایش تراز آب تحت اثر کلی مدل‌ها بهترین تخمین در نظر گرفته شد. جدول ۵ بیانگر میزان روند افزایشی در تراز محلی آب دریا تحت اثر کلی مدل‌های AOGCM در دوره‌های آتی است. مقادیر ذکرشده در جدول ۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵، و ۲۱۰۰ بیانگر میزان افزایش تراز آب طی دوره‌های زمانی یکسان در آینده است. مقادیر پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد که افزایش تراز آب در ۲۵ سال دوم و سوم بعد از سال ۲۰۲۰، نسبت به دوره ۲۵ ساله اول، به میزان سریع‌تری رو به افزایش است. همچنین، میزان افزایش تراز آب طی ۲۰۷۵ تا ۲۱۰۰ نسبت به سایر دوره‌ها با سرعت بیشتری رو به رشد است.

جدول ۵. نتایج پیش‌بینی مدل SIMCLIM تحت سناریوهای RCP

سال	سناریو		
	RCP _{8.5}	RCP ₆	RCP _{4.5}
۲۰۲۰	۱۲.۲۷	۱۱.۱۵	۱۱.۱۵
۲۰۲۵	۱۴.۴۹	۱۴.۴۹	۱۴.۴۹
۲۰۵۰	۳۵.۶۸	۳۱.۲۲	۳۲.۳۳
۲۰۷۵	۶۶.۹	۵۳.۵۲	۵۴.۶۴
۲۱۰۰	۱۰۹.۲۷	۸۱.۴	۷۹.۱۷

نتیجه‌گیری

مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده تغییرات تراز آب در طول منطقه مورد مطالعه (جدول‌های ۴ و ۵)، براساس اثر کلی ۲۴ مدل AOGCM مورد بررسی، نشان می‌دهد که تراز آب پیش‌بینی‌شده نسبت به میانگین عمومی تراز آب دریاها (جدول ۲) براساس هر چهار سناریوی RCP مقدار بیشتری خواهد داشت. همچنین، طبق نتایج آپینگ‌آدو و همکاران (۲۰۱۱)، که به محاسبه مقدار افزایش تراز آب با استفاده از مدل‌های AOGCM تحت سناریوهای SRES پرداختند، افزایش تراز آب

تحت سناریوی A1F1 و با استفاده از مدل CSIRO- MK2_GS در سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵، و ۲۱۰۰ به‌ترتیب مقادیر ۱۱.۳۹، ۲۶.۴۵، ۵۰.۹، و ۷۹.۷۱ بوده است؛ که طی تحقیق حاضر این مقادیر برای سواحل جنوبی کشور ما تحت سناریوی معادل سناریوی A1F1 (RCP_{8.5}) براساس میانگین مدل‌ها به‌ترتیب ۱۴.۴۹، ۳۵.۶۸، ۶۶.۹، و ۱۰۹.۲۷ (و در مدل CSIRO-MK3-6-0 برابر ۱۴.۳، ۳۵.۲، ۶۶، و ۱۰۷.۸ است) محاسبه شده است. همچنین، تحت سناریوی B₂ نیز، افزایش تراز آب با استفاده از مدل CSIRO- MK2_GS در سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵، و ۲۱۰۰ به‌ترتیب مقادیر ۱۲.۰۵، ۲۵.۶، ۴۱.۹۹، و ۶۰.۲۷ بوده است؛ که طی تحقیق حاضر این مقادیر برای سواحل جنوبی کشور ما تحت سناریوی معادل سناریوی B₂ (RCP₆) براساس میانگین مدل‌ها به‌ترتیب ۱۴.۴۹، ۳۱.۲۲، ۴۶.۸۳، و ۸۱.۴ (و در مدل CSIRO-MK3-6-0 برابر ۱۴.۳، ۳۰.۸، ۴۶.۲، و ۸۰.۳ است) محاسبه شده است. نتایج هر دو تحقیق بیانگر بیشتربودن میزان افزایش تراز آب در مقیاس محلی نسبت به مقیاس جهانی است؛ زیرا مقدار دقیق افزایش تراز آب در مقیاس جهانی تحت سناریوی RCP_{8.5} به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵، و ۲۱۰۰ برابر با ۱۴، ۳۳، ۶۰، و ۹۸ سانتی‌متر است. همچنان که طبق نتایج استمر و همکاران (۲۰۱۳) و چرچ و همکاران (۲۰۱۳) در طی قرن بیست‌ویکم با افزایش میانگین تراز آب دریاها به میزان ۲۶ تا ۸۲ سانتی‌متر روبه‌رو هستیم؛ طبق نتایج این تحقیق نیز در طی این قرن با افزایش ۲۹ تا ۹۳ سانتی‌متری در تراز آب روبه‌رو خواهیم بود. همچنین، براساس نتایج اوسار و همکاران (۲۰۱۵) - که بیانگر افزایش مقدار سالانه تراز آب به میزان ۰.۸۱±۳.۱۹ میلی‌متر طی دوره آماری بیست‌ساله ۱۹۹۳-۲۰۱۴ است - مقایسه مقادیر نرخ افزایش تراز آب طی دوره‌های مختلف در این تحقیق نیز بیانگر افزایش بیشتر تراز آب در دوره‌های پایانی قرن بیست‌ویکم نسبت به دوره‌های پیشین است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مقادیر میانگین پیش‌بینی‌شده تراز آب دریاها برای منطقه خلیج فارس و دریای عمان در مطالعات مربوط می‌تواند نتایج غیرقابل قبولی را در محاسبات آب‌گرفتنی سواحل این ناحیه دربر داشته باشد و لازم است تا محاسبات منطقه‌ای از بالآمدن سطح آب دریا به وسیله مدل‌های AOGCM انجام گیرد.

منابع

طرح ملی تغییر آب و هوا (۱۳۹۴). *دومین گزارش ملی تغییر آب و هوا*، بخش ارزیابی آسیب‌پذیری و سازگاری، زیربخش نواحی ساحلی.

ترابی آزاد، م. و هنرمند، م. (۱۳۹۵). بررسی تغییرات تراز دریا در اثر پارامترهای هواشناسی با استفاده از مدل‌های آماری در سواحل شمالی خلیج فارس، *پژوهش‌های علوم و فنون دریایی*، ۱: ۵۳-۶۵.

ترابی آزاد، م. و زاهدی، ر. (۱۳۸۲). نقش تغییر اقلیم بر جریان‌های خلیج فارس، فصل‌نامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۴: ۴۳-۵۲.

Appeaning Addo, K.; Larbi, L.; Amisigo, B. and Ofori-Danson, P.K. (2011). Impacts of coastal inundation due to climate change in a cluster of urban coastal communities in Ghana, West Africa, *Remote Sensing*, 3(9): 2029-2050.

Avsar, N.B.; Kutoglu, S.H.; Erol, B. and Jin, S. (2015). *Coastal risk analysis of the Black Sea under the sea level rise*, FIG Working Week.

Avsar, N.B.; Jin, S.; Kutoglu, H. and Gurbuz, G. (2016). Sea level change along the Black Sea coast from satellite altimetry, tide gauge and GPS observations, *Geodesy and Geodynamics*, 7(1): 50-55.

Carson, M.; Köhl, A.; Stammer, D.; Slangen, A.; Katsman, C.; Van de Wal, R.; Church, J. and White, N. (2016). Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century, *Climatic Change*, 134(1-2): 269-281.

Chonghua, Yin; Yingpeng, Li. and Urich, P. (2013). *SimCLIM 2013 data manual*, Vol. 35, pp. 1-35.

- Church, J.A.; Clark, P.U.; Cazenave, A.; Gregory, J.M.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M.A.; Milne, G.A.; R. S. Nerem. and P. D. Nunn. (2013). Sea level change, PM Cambridge University Press.
- Climsystems (2013). <http://www.climsystems.com/simclim/>.
- Cubasch, U.; Wuebbles, D.; Chen, D.; Facchini, M.C.; Frame, D.; Mahowald, N. and Winther, J.G. (2013). *Introduction In: Climate Change: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F.; D. Qin.; G.-K. Plattner.; M. Tignor.; S.K. Allen.; J. Boschung.; A. Nauels.; Y. Xia, V. Bex. and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Demirkesen, A.; Evrendilek, F. and Berber, S. (2008). Quantifying coastal inundation vulnerability of Turkey to sea-level rise, *Environmental Monitoring and Assessment*, 138(1-3): 101-106.
- IPCC DDC (2014a). http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html.
- IPCC DDC (2014b). http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary_r.html.
- IPCC (2007). https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch10s10-5-4-1.html.
- IPCC (2013). Fifth Assessment Report (AR5): Church, J.A.; P.U. Clark.; A. Cazenave.; J.M. Gregory.; S. Jevrejeva.; A. Levermann.; M.A. Merrifield.; G.A. Milne.; R.S. Nerem.; P.D. Nunn.; A.J. Payne.; W.T. Pfeffer.; D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F.; D. Qin, G.-K. Plattner.; M. Tignor.; S.K. Allen.; J. Boschung.; A. Nauels.; Y. Xia.; V. Bex. and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013). https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch10s10-5-4-1.html.
- IPCC (2013a). Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F.; D. Qin.; G.-K. Plattner.; M. Tignor.; S. K. Allen.; J. Boschung.; A. Nauels.; Y. Xia, V. Bex. and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1447-1466, doi:10.1017/CBO9781107415324.031.
- IPCC (2013b). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F.; D. Qin.; G.-K. Plattner.; M. Tignor.; S. K. Allen.; J. Boschung.; A. Nauels.; Y. Xia.; V. Bex. and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., doi:10.1017/CBO9781107415324.
- IPCC (2014a). Annex II: Glossary [Mach, K.J.; S. Planton. and C. von Stechow (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.
- IPCC (2014b). Annex II: Glossary [Agard, J.; E. L. F. Schipper.; J. Birkmann.; M. Campos.; C. Dubeux.; Y. Nojiri.; L. Olsson.; B. Osman-Elasha.; M. Pelling.; M. J. Prather.; M. G. Rivera-Ferre.; O. C. Ruppel.; A. Sallenger.; K. R. Smith.; A. L. St. Clair.; K. J. Mach.; M. D. Mastrandrea. and T. E. Bilir (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V. R.; C. B. Field.; D. J. Dokken.; M. D. Mastrandrea.; K. J. Mach.; T. E. Bilir.; M. Chatterjee.; K. L. Ebi.; Y. O. Estrada.; R. C. Genova.; B. Girma.; E. S. Kissel.; A. N. Levy.; S. MacCracken.; P. R. Mastrandrea. and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1757-1776.

- Meysignac, B. and Cazenave, A. (2012). Sea level: a review of present-day and recent-past changes and variability, *Journal of Geodynamics*, 58: 96-109.
- Michaelreynolds, R. (1993). Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman—Results from the Mt Mitchell expedition, *Marine Pollution Bulletin*, 27: 35-59.
- Milne, G.A.; Gehrels, W.R.; Hughes, C.W. and Tamisiea, M.E. (2009). Identifying the causes of sea-level change, *Nature Geosci*, 2(7): 471-478.
- Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.A.; Mitchell, J.F.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.J.; Stouffer, R.J.; Thomson, A.M.; Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463:747-756.
- Moss, R.H.; Nakicenovic, N. and O'Neill, B. (2008). *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategie*.
- Nicholls, R.J. and Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones, *Science*, 328(5985): 1517-1520.
- Pardaens, A.K.; Lowe, J.A.; Brown, S.; Nicholls, R.J. and de Gusmão, D. (2011). Sea-level rise and impacts projections under a future scenario with large greenhouse gas emission reductions, *Geophysical Research Letters*, 38(12): n/a-n/a.
- RCP Database (2009). <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>.
- Saleem Khan, A.; Ramachandran, A.; Usha, N.; Punitha, S. and Selvam, V. (2012). Predicted impact of the sea-level rise at Vellar–Coleroon estuarine region of Tamil Nadu coast in India: Mainstreaming adaptation as a coastal zone management option, *Ocean & Coastal Management*, 69: 327-339.
- Simclim Essentials (2013). *Training Book 1*, Version 3.0.1: pp.1-126.
- Stammer, D.; Cazenave, A.; Ponte, R.M. and Tamisiea, M.E. (2013). Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes, *Annual Review of Marine Science*, 5(1): 21-46.
- Teng, J.; Vaze, J.; Chiew, F.H.; Wang, B. and Perraud, J.-M. (2012). Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff, *Journal of Hydrometeorology*, 13(1): 122-139.
- Vafae, F.; Harati, S.A.N. and Sabbaghian, H. (2012). Investigation of Coastal Inundation Due to a Rise in Sea Level (Temporary and Permanent), Original Research, *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(1): 209-217.
- Van Vuuren, D.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J.F.; Masui, T.; Meinhausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S. and Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: An overview, *Climatic Change*, 109: 5-31.
- Warric, R.A. (2009). Using SimCLIM for modelling the impacts of climate extremes in a changing climate: a preliminary case study of household water harvesting in Southeast Queensland, *18th World IMACS/ MODSIM Congress*, Cairns, Australia.