

تغییرات آبی و دیرینه بادهای غرب وزان عرض‌های میانی و سامانه بارشی مدیترانه‌ای بر فراز جنوب استان کرمان (مطالعه موردی ایستگاه سینوپتیک کهنوج)

علیرضا واعظی*؛ استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۲

چکیده

این مطالعه به ارزیابی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو در پیش‌بینی تغییرات آبی بادهای غرب وزان عرض‌های میانی و سامانه بارشی مدیترانه‌ای بر فراز جنوب استان کرمان، با استفاده از تغییرات دیرینه هیدرولوژیکی منطقه در طول دوره های گرم از اواخر پلیستوسن در می‌پردازد. در این راستا دمای کمینه، دمای بیشینه و میزان بارش برای آینده (۲۰۶۱-۲۰۸۰) به وسیله مدل LARS-WG و داده‌های مستخرج از پنج مدل نسل پنجم مدل‌های گردش عمومی جو (CMIP5 GCM)، تحت سناریوهای انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 بر اساس مجموعه داده‌های آب و هوای سی ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) در ایستگاه سینوپتیک کهنوج پیش‌بینی گردیدند. روندها نشان می‌دهد که منطقه تحت هر دو سناریو در آینده افزایش قابل توجه دما و شرایط خشک تری را نسبت به دوره پایه تجربه خواهد کرد. مدل‌های گردش عمومی جو، کاهش قابل توجهی در بارش‌های زمستانه مدیترانه‌ای در طول دوره آینده (۲۰۶۱-۲۰۸۰) تحت هر دو سناریو در مقایسه با دوره پایه را پیش‌بینی می‌کنند. نتایج بررسی مطالعات دیرینه اقلیمی در منطقه نشان می‌دهد این، کاهش قابل توجه بارش با تغییرات واقعی شدت و مکان بادهای غرب وزان عرض‌های میانی که در شرایط مشابه گذشته در منطقه رخ داده است، همخوانی دارد.

کلید واژه‌ها: بارش، دما، دیرینه اقلیم، مدل سازی.

مقدمه

اقلیم کره‌ی زمین، از گذشته تا کنون پیوسته در حال تغییر بوده و بزرگی این تغییرات در مناطق مختلف کره‌ی زمین متفاوت است (Bytnerowicz et al., 2007; Nakicenovic et al., 2000). اما امروزه در بررسی‌های تکمیلی، مشخص شده است که فعالیت‌های انسانی سبب تسریع این تغییرات شده است و از زمان وقوع انقلاب صنعتی تا کنون در روند گرمایش جهانی قرار داریم (Millar et al., 2017). برای درک

بهبتر تغییرات به ازای هر یک درجه افزایش یا کاهش دمای کره زمین، مطالعات دیرینه اقلیم بسیار راهگشا هستند.

بیست هزار سال قبل دمای زمین ۴ درجه از عصر حاضر کم‌تر بود. در این دوره که با نام آخرین بیشینه یخچالی شناخته می‌شود، بیش‌تر مساحت کانادا، اروپای شمالی و بریتانیا از قطعات یخ پوشانیده شده بودند. افزایش ۴ درجه‌ای هوا منجر به ذوب شدن این یخ‌ها شده و مناطق زیادی قابل سکونت شده‌اند، در این بین با بالا آمدن آب دریاها مناطق زیادی هم در آب غرق شده‌اند. تغییر اقلیم یک پدیده پیچیده جوی-اقیانوسی در مقیاس جهانی و در درازمدت است (Le Treut et al., 2010; IPCC 2019). این تغییر به دلایل دگرگونی درونی در سامانه‌های اقلیمی، تغییرات در برهم‌کنش‌های مؤلفه‌های تشکیل دهنده سامانه آن، تغییرات ایجاد شده در نیروی خارجی مؤثر بر سامانه‌ها و تغییر در عوامل محیطی بوده است (IPCC 2019, 2021). در نظر داشتن این موضوع نیز دارای اهمیت است که تغییرات اقلیمی صرفاً به معنی کم و زیاد شدن باران و سایر پدیده‌های جوی نبوده و می‌تواند به صورت تغییرات الگوی رفتاری برای نمونه تبدیل بارش برف به باران شود که در نتیجه آن میزان ذخایر آب شیرین کاهش پیدا می‌کند ظاهر شود (Archer & Rahmstorf, 2011; Konapala et al., 2020) از سوی دیگر این تغییر الگو می‌تواند منجر به افزایش بارندگی با الگوی غیرمنظم شده که در پی آن مواردی چون بارش‌های مقطعی زیاد و خشکسالی‌های فصلی ظاهر می‌شوند (Donat et al., 2016). پیش‌بینی تغییرات اقلیمی برای مدل‌سازی بسیار دشوار هستند و ارزیابی تأثیرات آب و هوایی پیش‌بینی شده در اکوسیستم‌های آب شیرین به خصوص با توجه به تأثیرات انسانی و پاسخ‌ها به این تأثیرات بیش‌تر چالش‌برانگیز هستند (Mohammadi et al., 2017). مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs)^۱ یکی از بهترین ابزارها، برای بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم در مناطق مختلف جهان محسوب می‌شوند. در حال حاضر اقلیم‌شناسان با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو و ریزگردانی آن‌ها توسط مدل‌های دینامیکی و آماری توانسته‌اند تا حدودی وضعیت اقلیم آینده جهان را مدل‌سازی نمایند (Semenov et al., 2013; Semenov, 2008). دستاورد این مدل‌ها در گزارش‌های مجمع بین‌المللی تغییرات آب‌وهوایی موسوم به IPCC^۲ قابل مشاهده است (Nakicenovic et al., 2007; Bytnerowicz et al., 2000). داده‌های خروجی از GCM ها معمولاً برای برآورد پاسخ هیدرولوژیکی به تغییرات آب و هوا در مقیاس منطقه‌ای بزرگ مقیاس هستند. بنابراین، نیاز به کاهش مقیاس داده‌ها از مقیاس بزرگ در GCM ها به مقیاس منطقه‌ای وجود دارد (Busuioac et al., 2008; Wilby et al., 2002) که می‌تواند با روش‌های آماری و یا روش‌های دینامیکی به دست آید. در میان روش‌های کاهش مقیاس آماری، به طور خاص از مدل (LARS-WG)^۳ برای ریز مقیاس گردانی مدل‌های گردش عمومی به منظور پیش‌بینی تغییر اقلیم و اثرات آن استفاده زیادی صورت گرفته است (Luo & Yu, 2012; Qian et al., 2004; Semenov et al., 2002, 2013; Semenov &

1- General Circulation Models

2- Intergovernmental Panel on Climate Change

3- Long Ashton Research Station Weather Generator

(Barrow, 1997; Street et al., 2009) برخلاف دما که در خروجی مدل‌ها تقریباً در سراسر جهان افزایش نشان می‌دهد، این مدل‌ها برای پیش‌بینی بارش پاسخ‌های متغیری دارند، در برخی مناطق کاهش و در برخی دیگر افزایش نشان می‌دهند (Archer & Rahmstorf, 2011; Konapala et al., 2020). از این رو، یک بحث مداوم در مورد چگونگی تأثیر گرمایش جهانی بر بارش‌های آینده و سیستم‌های آب و هوایی اصلی روی زمین وجود دارد (Donat et al., 2016). برای مثال مدل‌های گردش عمومی (GCMs) در شبیه‌سازی تغییرات مکانی و زمانی بادهای غرب وزان عرض‌های میانی (MLW)^۱ به دلیل پیچیدگی فرآیندهای فیزیکی و فعل و انفعالاتی که بر این نوع بارش تأثیر می‌گذارند، با مشکل مواجه هستند (Turner & Annamalai, 2012). برای کاهش عدم قطعیت در مدل‌های اقلیمی مرتبط با این بارش‌ها، باید سازوکار و تاریخچه تغییرات بادهای غرب وزان عرض‌های میانی و سامانه بارشی زمستانه مدیترانه‌ای را درک کنیم (Turner & Annamalai, 2012; Wang et al., 2017; Zhisheng et al., 2015). ایستگاه سینوپتیک کهنوج در مسیر سامانه بارشی زمستانه مدیترانه‌ای قرار دارد که سبب حساسیت بالای این منطقه نسبت به تغییرات اقلیم می‌شود (Hamzeh et al., 2016; Rashki et al., 2019; Vaezi et al., 2021). علاوه بر این، مطالعات دیرینه اقلیمی نشان می‌دهد که تغییرات در شدت و مکان این سامانه بارشی از اواخر پلیستوسن تا کنون بر شرایط هیدرولوژیکی منطقه بسیار تأثیرگذار بوده است (Vaezi et al., 2019; Clift & Plumb, 2008; Stevens et al., 2001). بنابراین، ایجاد درک بهتری از الگوهای گردش جوی و بارش در گذشته‌های دور می‌تواند به بهبود ارزیابی ما از سناریوهای تغییر اقلیم آینده و تغییرات در الگوهای بارش منطقه‌ای کمک کند (Mehterian et al., 2017). هدف اصلی این مطالعه ایجاد شناخت دقیق‌تر از تغییرات آبی و دیرینه بادهای غرب وزان عرض‌های میانی و سامانه بارشی مدیترانه‌ای بر فراز جنوب شرق فلات ایران می‌باشد. در این راستا در مطالعه حاضر با لحاظ سناریوهای انتشار مطرح شده به‌وسیله هیات بین‌الدول تغییرات اقلیم، تغییرات دما و بارش برای آینده (۲۰۸۰-۲۰۶۱) به‌وسیله مدل LARS-WG و داده‌های گردش عمومی جو مستخرج از پنج مدل (EC-EARTH، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIROC5، MPI-ESM-MR) در ایستگاه سینوپتیک کهنوج واقع در جنوب استان کرمان بررسی می‌گردد. سپس عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو در پیش‌بینی تغییرات آبی سامانه بارشی مدیترانه‌ای، با استفاده از تغییرات دیرینه هیدرولوژیکی منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

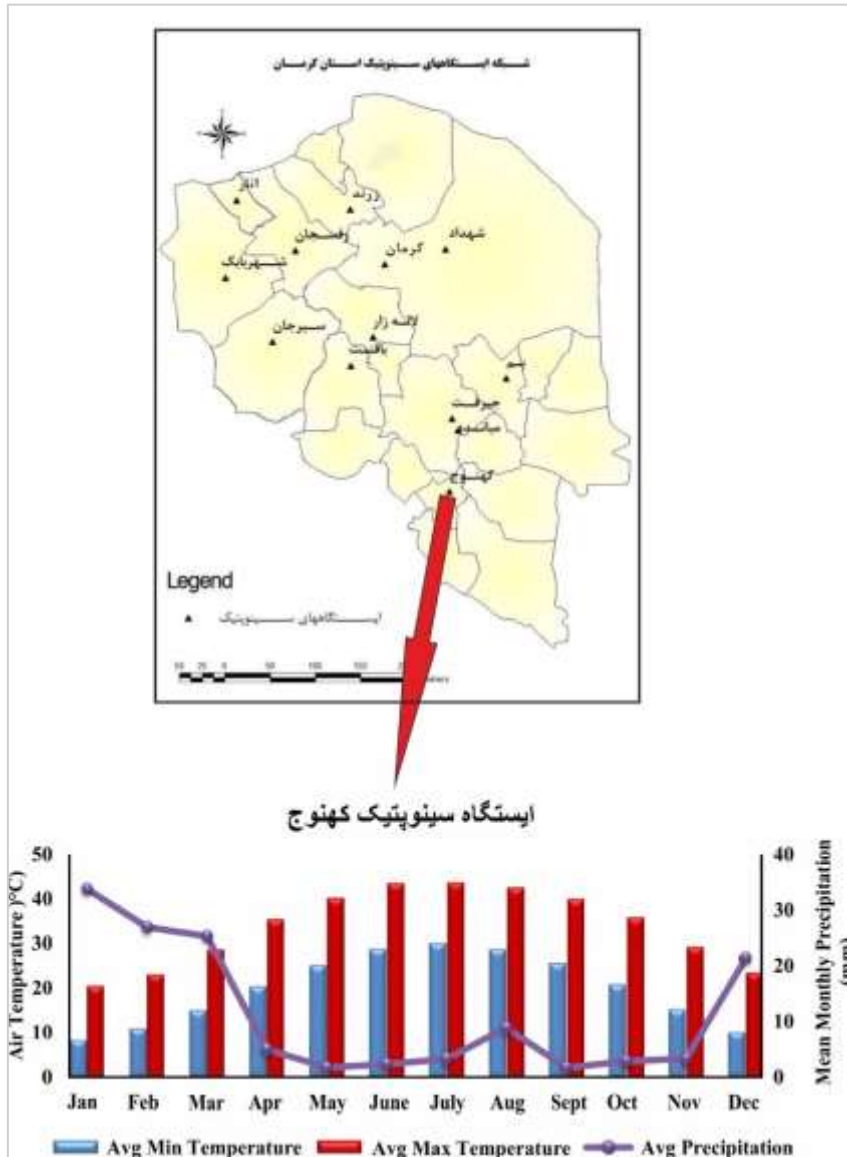
منطقه مورد مطالعه

موقعیت ایستگاه سینوپتیک کهنوج در جنوب استان کرمان به دلیل قرار گرفتن در مسیر اثرگذاری سامانه بارشی مدیترانه‌ای یکی از بهترین نقاط برای مطالعه تغییرات شدت و مکان این سامانه در مواجهه با تغییر اقلیم می‌باشد. مشخصات ایستگاه سینوپتیک کهنوج در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

1- Mid-Latitude Westerlies

جدول ۱: مشخصات ایستگاه سینوپتیک کهنوج

سال تأسیس	مشخصات جغرافیایی			کد	محل ایستگاه	نوع ایستگاه
	ارتفاع	عرض	طول			
۱۳۶۸	۴۶۹/۷	۲۷ ۵۸	۵۷ ۴۲	۴۰۸۷۷	کهنوج	سینوپتیک



شکل ۱: موقعیت ایستگاه کهنوج در جنوب استان کرمان. در پایین تصویر، میانگین ۳۰ ساله کمینه و بیشینه دمای هوا (درجه سانتی گراد) و میانگین بارندگی ماهانه (میلی متر) در ایستگاه های هواشناسی کهنوج نشان شده است.

میانگین دمای سالانه ایستگاه سینوپتیک کهنوج ۲۷/۲ درجه سانتیگراد و میانگین حداکثر و حداقل دما در گرمترین و سردترین دوره سال به ترتیب ۴۴/۵ درجه سانتیگراد (تیر) و ۸/۴ درجه سانتیگراد (دی) است. میزان بارندگی سالانه در ایستگاه کهنوج ۱۳۸ میلی متر گزارش شده است. میانگین بارندگی ماهانه ثبت شده در این ایستگاه هواشناسی کهنوج بیشترین میزان را از دی تا فروردین نشان می دهد (شکل ۱).

مواد و روش ها

در این مطالعه داده‌های مشاهداتی دوره اقلیم پایه شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش به صورت روزانه در فاصله زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ برای ایستگاه سینوپتیک کهنوج مورد بررسی قرار گرفتند. در این راستا، دمای کمینه، دمای بیشینه و میزان بارش برای آینده (۲۰۸۰-۲۰۶۱) به وسیله مدل LARS-WG و داده‌های گردش عمومی جو مستخرج از پنج مدل (EC-EARTH, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR, MIROC5)، تحت سناریوهای انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 پیش‌بینی گردید.

معرفی مدل‌ها و سناریوها

مدل‌های گردش عمومی مناسب ترین ابزار به منظور مطالعه اثرات ناشی از تغییر اقلیم شناخته شده‌اند و در حال حاضر به عنوان معتبرترین منابع اطلاعات این پدیده محسوب می‌شوند. این مدل‌ها در واقع حل معادلات حاکم بر جو بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک هستند. به عبارت دیگر قوانین نیوتن در سه محور X، Y و Z نوشته می‌شوند که نهایتاً به عنوان معادلات تکانه^۱ از آن‌ها یاد می‌شود. این سه معادله در کنار قوانین عمومی گازها و ترمودینامیک، اساس مدل‌های GCM را تشکیل می‌دهند. هدف این مدل‌ها، تصویر کردن تمامی ویژگی‌های سه بعدی و تحول زمانی جو است (Busuioc et al., 2008; Wilby et al., 2002). مدل‌های GCM می‌توانند جوی^۲ (AGCM) و یا اقیانوسی^۳ (OGCM) باشند. این دو مدل می‌توانند با یکدیگر جفت شده و یک مدل گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی^۴ (AOGCM) یا (CGCM^۵) را شکل دهند. می‌توان دیگر مؤلفه‌ها مانند مؤلفه یخ دریا^۶ یا مؤلفه‌ای برای تبخیر و تعرق روی سطح زمین^۷، را به مدل افزود. در این ساختار، تغییرات مختلفی می‌توانند وجود داشته باشد و واکنش‌های متفاوت آن‌ها به تغییر اقلیم می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد. مدل‌های GCM با وجود مشکل ذاتی در کم برآوردی شدت و فراوانی بارش‌های حدی، در حال حاضر، پیشرفته‌ترین ابزار برای شبیه‌سازی واکنش اقلیم

1 Momentum

2 Atmospheric GCM

3 Oceanic GCM

4 Atmosphere-Ocean GCM

5 Coupled GCM

6 Sea ice

7 Land-surface

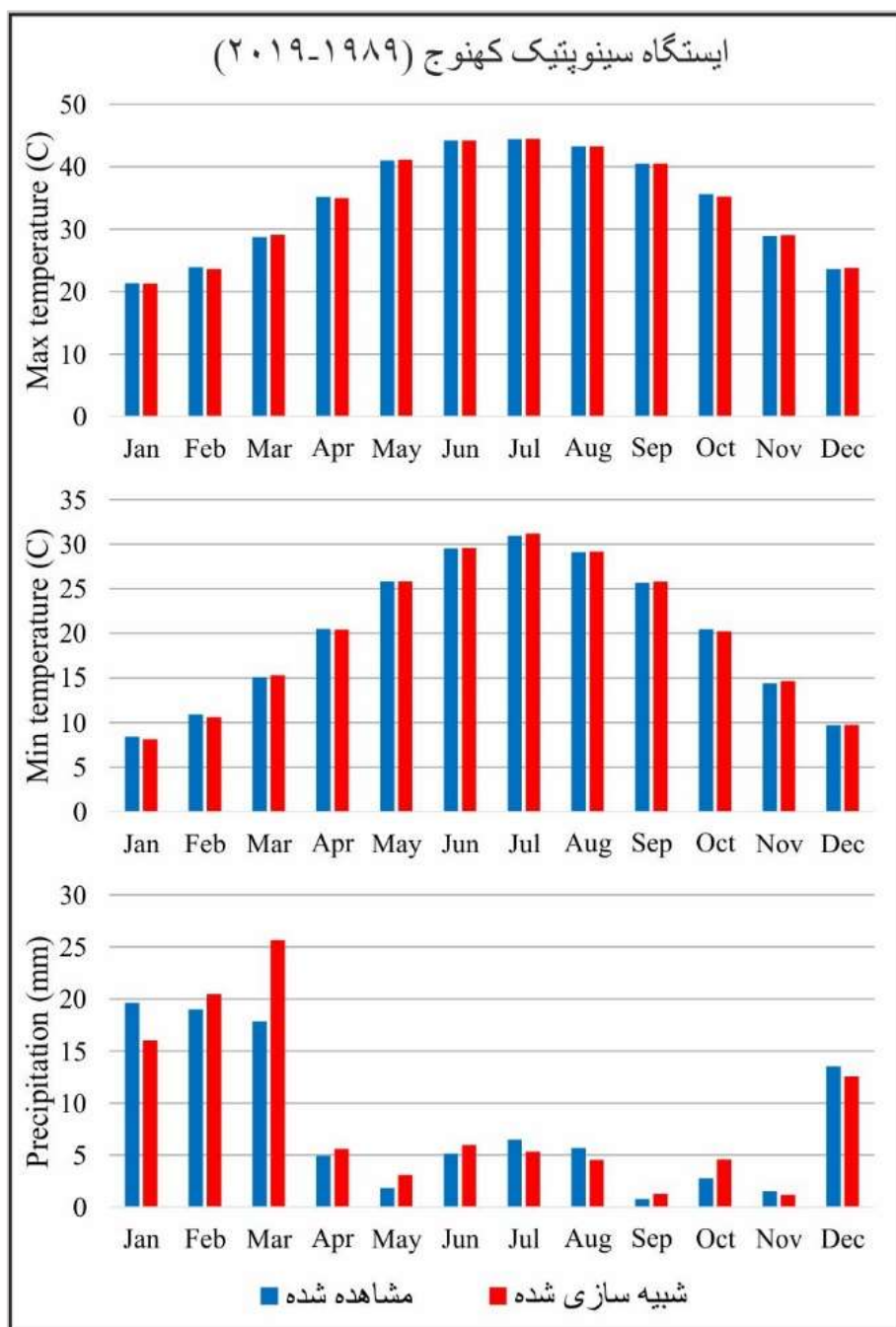
کره زمین به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای هستند. به منظور تصویر کردن تغییرات اقلیمی، مدل های GCM با استفاده از داده‌های سناریوهای انتشار اجرا می‌گردند (Busuioac et al., 2008; Wilby et al., 2002).

تولید داده های آب و هوا توسط نرم افزار LARS-WG نسخه ۶ را می توان به سه مرحله کالیبراسیون، اعتبارسنجی، و تولید داده های آب و هوای شبیه سازی شده تقسیم کرد (Semenov & Barrow, 1997; Semenov & Stratonovitch, 2010). در طول مرحله کالیبراسیون، LARS-WG پارامترهای آماری را برای توزیع احتمال متغیرهای آب و هوا و همبستگی آنها بر اساس داده های آب و هوای روزانه مشاهده شده محاسبه می کند (Semenov et al., 2002). پارامترهای آماری به دست آمده از داده های آب و هوای مشاهده شده در طول مرحله کالیبراسیون برای شبیه سازی شرایط آینده مربوط به یک سناریوی تغییر اقلیم خاص شبیه سازی شده توسط GCMs CMIP5 استفاده می شود (Semenov et al., 2002; Tayebiyani et al., 2014). در این مطالعه از دو سناریوی انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 استفاده شده است. RCPs نشان‌دهنده واداشت تابشی از سطح کره زمین هستند. RC4.5 نشان‌دهنده واداشت تابشی در خط سیر واداشتی به میزان ۴/۵ وات بر مترمربع (650 ppm CO₂)، و RC8.5 نشان‌دهنده واداشت تابشی در خط سیر واداشتی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع (1370 ppm CO₂)، تا سال ۲۱۰۰ می‌باشد (IPCC, 2014).

یافته های پژوهش

اعتبار سنجی مدل

در شکل ۲ مقایسه میانگین ماهانه حداکثر و حداقل دما و بارش بین داده های مشاهده و شبیه سازی شده نشان داده شده است. مقایسه داده‌های شبیه سازی شده با داده‌های مشاهده شده عملکرد عالی LARS-WG را به ویژه برای پیش بینی دما نشان می دهد (شکل ۲). نتایج آزمون Chi-square داده های مشاهده شده و داده های شبیه سازی شده در ایستگاه کهنوج با استفاده از LARS-WG نشان می دهد که مقادیر p فرضیه صفر را برای هر سه متغیر (بارش روزانه، دمای کینه و دمای بیشینه) برای تمام ماه ها پشتیبانی می کند. از این رو، داده های مشاهده شده و تولید شده دارای توزیع فراوانی یکسانی هستند. همچنین نتایج آزمون t سه متغیر نشان می دهد که فرضیه صفر با اطمینان ۹۵ درصد قابل قبول است. بنابراین، مقادیر میانگین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده مقادیر مشابهی هستند. بر اساس مقادیر به دست آمده در شبیه سازی، می توان نتیجه گرفت که عملکرد مدل برای پیش بینی تغییرات اقلیمی، یعنی کمینه و بیشینه دما و بارش قابل قبول است.

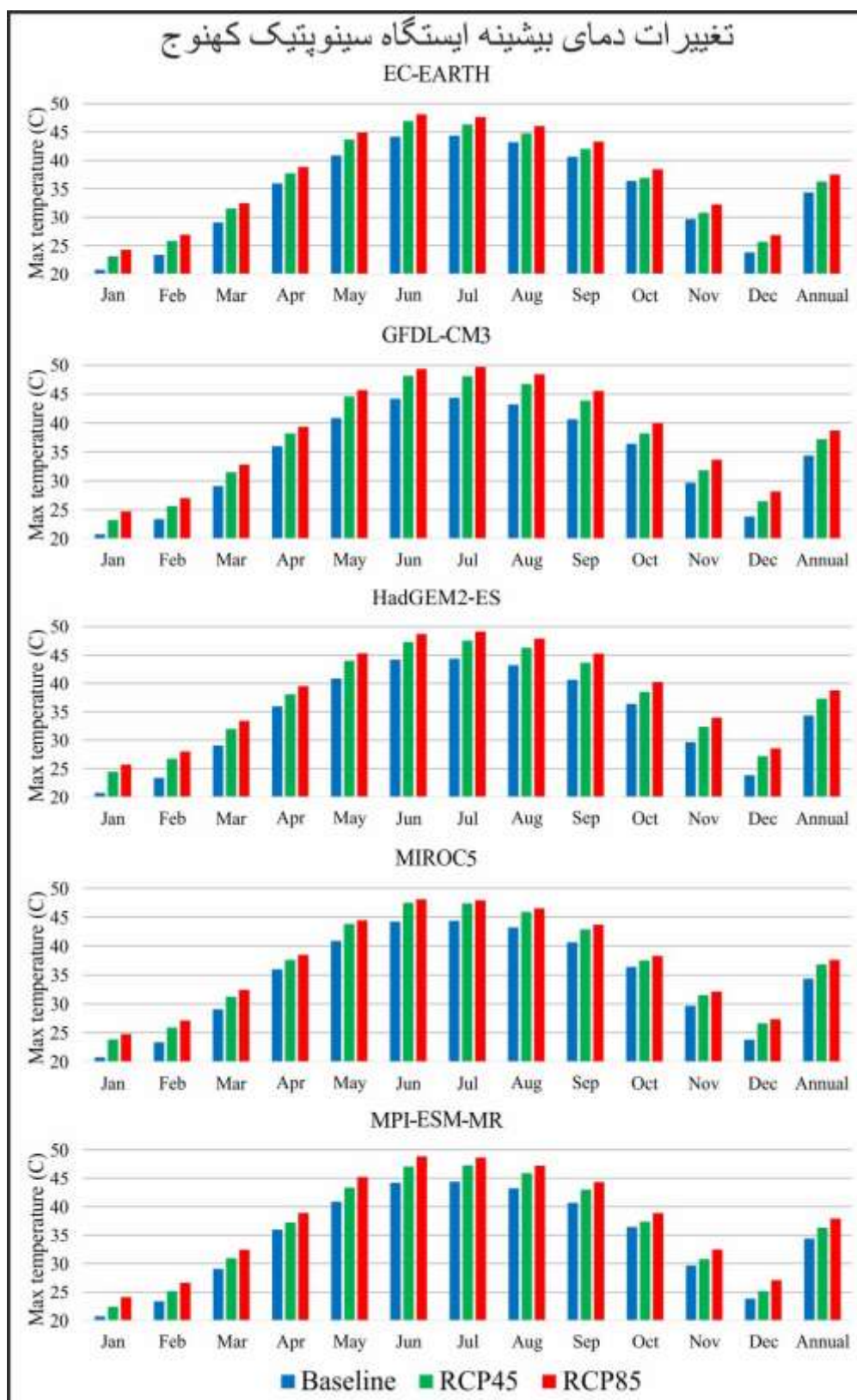


شکل ۲: مقایسه میانگین ماهانه حداکثر و حداقل دما و بارش بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده

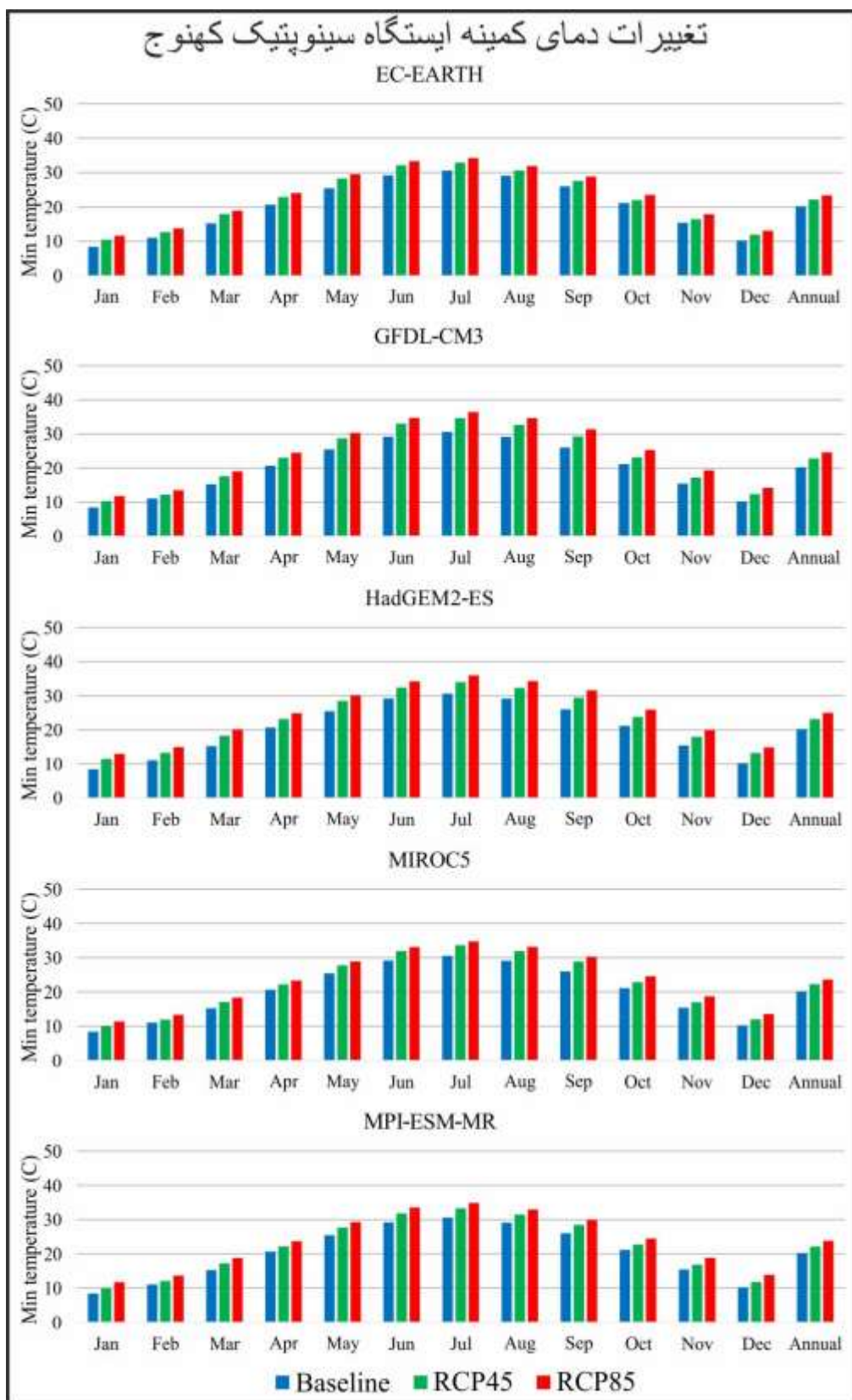
پیش بینی پارامترهای آب و هوایی در آینده (۲۰۶۱-۲۰۸۰)

هیستوگرام ها (شکل های ۳-۵) سناریوهای آینده (۲۰۶۱-۲۰۸۰) را نشان می دهند. هر نمودار دارای سه هیستوگرام با رنگ های مختلف مربوط به آب و هوای آینده برای دو سناریو و داده های مشاهدات پایه است. به طور کلی مشاهده می شود که دماهای حداقل و حداکثر در ایستگاه کهنوج نسبت به دوره پایه

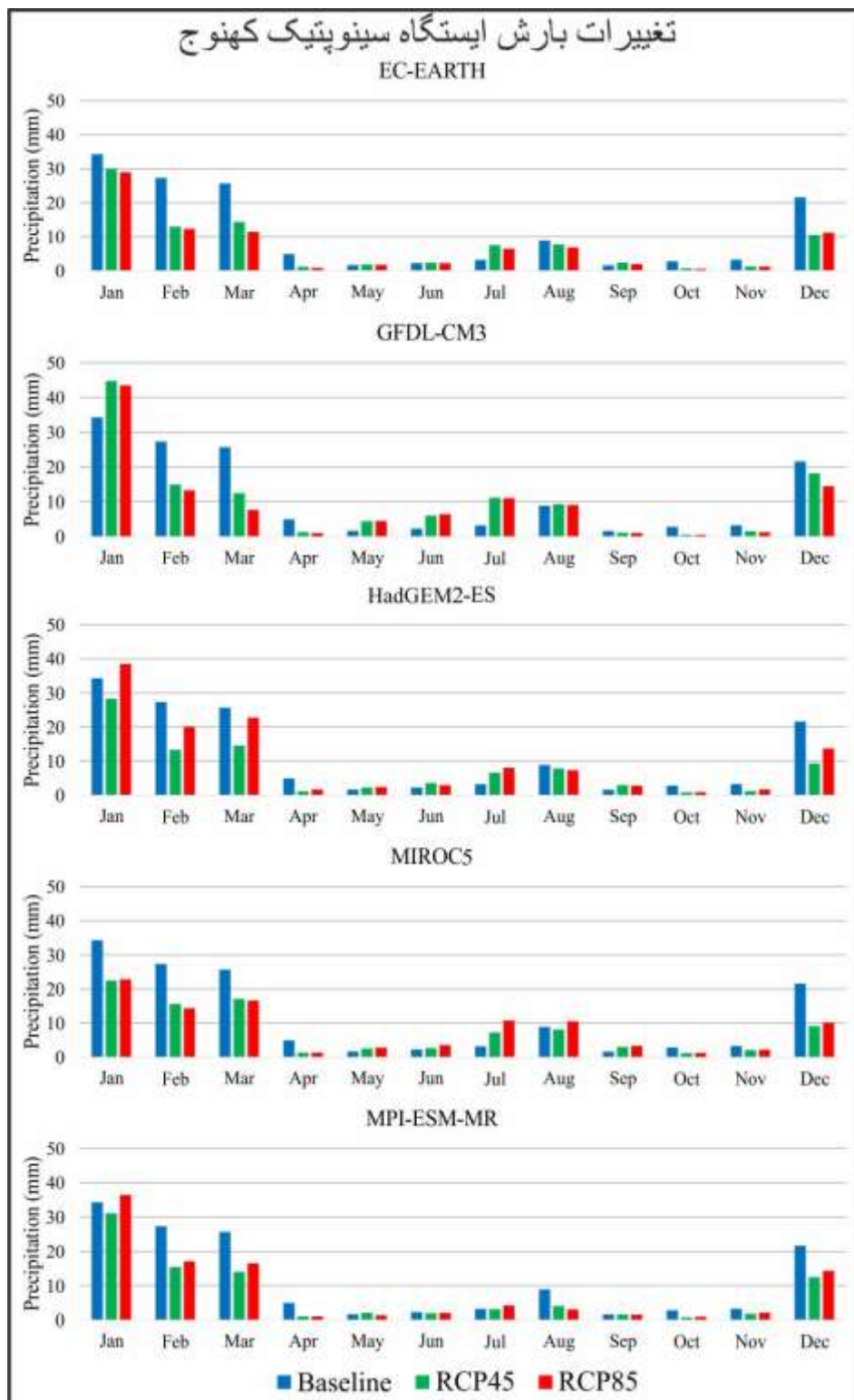
افزایش می‌یابد و این افزایش در RCP 8.5 بیشتر از RCP 4.5 است. اگرچه بارش الگوی ثابتی را در ایستگاه‌ها نشان نمی‌دهد، تغییرات از دسامبر تا مارس برای پارامتر بارش بیشتر است. بر اساس هر دو سناریو، GFDL-CM3 و HadGEM2-ES بالاترین افزایش دما را در مقایسه با مدل‌های دیگر پیش‌بینی کردند. بیشترین افزایش میانگین دما در ایستگاه کهنوج در سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۳ و ۴/۶ درجه سانتی‌گراد بر اساس پیش‌بینی HadGEM2-ES بود. میانگین دما در محدوده ۳/۲ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد تحت RCP 8.5 نسبت به دوره‌های پایه ۱۹۸۹-۲۰۱۹ افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش میانگین دمای ماهانه در ایستگاه‌ها در طی ماه‌های می تا ژوئیه تحت RCP 8.5 رخ داد. کمترین افزایش دمای حداقل ماهانه در ماه اکتبر رخ داد (شکل ۳ و ۴). نتایج نشان داد که منطقه تحت هر دو سناریو در آینده نسبت به دوره پایه با افزایش دما و کاهش بارندگی، خشکسالی بیشتری را تجربه خواهد کرد. GCMs کاهش قابل توجهی در بارش MLW در ایستگاه کهنوج در هر دو سناریو پیش‌بینی کرد. مدل‌های MPI-ESM-MR و EC-EARTH بارندگی کمتری را در منطقه در آینده در مقایسه با سایر مدل‌های گردش عمومی جو برآورد کرده‌اند بر اساس سناریوهای کهنوج در ماه‌های بهمن، اسفند و آذر با کاهش قابل توجهی در بارندگی مواجه خواهد شد (شکل ۵). کاهش عمده بارندگی سالانه در بین GCM ها، به میزان ۵۴/۸ میلی‌متر (۳۷/۶٪ کاهش) تحت سناریوی RCP 8.5 در EC-EARTH در ایستگاه سینوپتیک کهنوج بود. کاهش جزئی بارش به میزان ۱۳/۸ میلی‌متر (۱۱٪ کاهش) تحت RCP 8.5 برای HadGEM2-ES پیش‌بینی شده است. ناهنجاری‌های بارش MLW در مقایسه با دوره پایه در ایستگاه سینوپتیک کهنوج نشان می‌دهد که تغییرات بارندگی عمدتاً به دلیل بارش زمستانی مدیترانه‌ای در منطقه خواهد بود (جدول ۳).



شکل ۳: میانگین ۲۰ ساله دمای بیشینه ماهانه هوا (درجه سانتی گراد) در هر مدل GCM و سناریوی پیش بینی شده در مقایسه با داده های مشاهده شده ثبت شده در ایستگاه هواشناسی کهنوج.



شکل ۴: میانگین ۲۰ ساله دمای بیشینه ماهانه هوا (درجه سانتی گراد) در هر مدل GCM و سناریوی پیش بینی شده در مقایسه با داده های مشاهده شده ثبت شده در ایستگاه هواشناسی کهنوج.



شکل ۵: میانگین ۲۰ ساله بارندگی ماهانه (میلی متر) در هر مدل GCM و سناریوی پیش بینی شده در مقایسه با داده های مشاهده شده ثبت شده در ایستگاه هواشناسی کهنوج.

بحث

نتایج ریزمقیاس سازی بارش به‌وسیله مدل LARS-WG و داده‌های گردش عمومی جو مستخرج از پنج مدل (MPI-ESM-MR, MIROC5, HadGEM2-ES, GFDL-CM3, EC-EARTH) برای آینده (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و در ایستگاه سینوپتیک کهنوج واقع شرایط خشک تری را در مقایسه با دوره پایه تحت هر دو سناریو در جنوب استان کرمان نشان می‌دهند. نتایج حاکی از کاهش در بارش زمستانی مدیترانه‌ای است.

موقعیت بادهای غرب وزان عرض‌های میانی (MLW) در نیمکره شمالی تابعی از تغییرات در گرادیان دما بین توده‌های هوا است. هنگامی که گرادیان دما بیشتر است، موقعیت بادهای غرب وزان عرض‌های میانی با سرعت کم به سمت شمال (به سمت قطب) حرکت می‌کند (Kutzbach et al., 2014). پیش‌بینی‌های آینده در پلاهای جازموریان تضعیف MLW تحت RCP 8.5 را نشان می‌دهد. در تایید این نتیجه، مطالعات دیگری نیز با استفاده از مدل‌های گردش عمومی (GCMs) در شبیه‌سازی تغییرات مکانی و زمانی بادهای غرب وزان عرض‌های میانی (MLW) تحت سناریوهای افزایش گرمایش جهانی، بارش‌های مدیترانه‌ای ضعیف تری را در خاورمیانه و جنوب غربی آسیا در آینده پیش‌بینی نموده‌اند (Black et al., 2017; Evans, 2009, 2010; Mehterian et al., 2010). سابقه مطالعات دیرینه اقلیمی در جنوب شرق ایران نیز تأیید می‌کند که در دوره‌های گرم گذشته (دوره‌های تابش خورشیدی قوی تر)، MLW به سمت شمال جابجا می‌شود (Safaierad et al., 2020; Vaezi et al., 2019). این مطالعات برای اولین بار در جنوب شرق ایران نتایج نشانگرهای دیرینه اقلیم شناسی متنوعی را در مغزه‌های بلند رسوبی در جهت ایجاد درک عمیق‌تر از نحوه تأثیرگذاری رویدادهای بزرگ آب و هوایی شناخته شده و نحوه تأثیرگذاری دو سامانه اقلیمی مونسون تابستانه اقیانوس هند و بادهای غرب وزان عرض‌های میانی در تغییرات دیرینه اقلیمی غرب آسیا از زمان آخرین بیشینه یخچالی تا کنون به کار گرفتند. نتایج این مطالعات نشان داد که مونسون تابستانی اقیانوس هند (IOSM)^۱ موثرترین سامانه اقلیمی حاکم بر هیدرولوژی جنوب شرقی ایران در طول آخرین یخبندان و هولوسن آغازین بوده است. تغییرات شدت و موقعیت مکانی این سامانه اقلیمی در جنوب‌شرقی ایران متأثر از تغییرات مکانی مرزهای منطقه همگرای درون حاره‌ای (ITCZ) بوده است و در مقیاس بزرگتر مجموعه این تغییرات پاسخی به تغییرات میزان تابش دریافتی زمین از خورشید بوده است. همچنین نتایج نشان داد که ارتباط تنگاتنگ اتمسفری بین تغییرات آب و هوایی عمده شمال اقیانوس اطلس و تغییرات اقلیم در جنوب‌شرقی ایران از آخرین بیشینه یخچالی وجود داشته است (Safaierad et al., 2020; Vaezi et al., 2019). در طول هولوسن پایانی (از ۴ هزار سال پیش تا کنون)، میزان دریافت تابش خورشیدی توسط زمین کاهش و تقریباً به حد امروزی می‌رسد و به دنبال آن شدت IOSM در حد امروزی در جنوب شرق ایران کاهش می‌یابد و بارش‌های زمستانه مدیترانه‌ای اصلی‌ترین منبع بارشی منطقه می‌شوند.

1- Indian Ocean Summer Monsoon

با توجه به اینکه این منبع بارشی، رطوبت بسیار کمتری نسبت به مونسون تابستانه اقیانوس هند وارد حوضه آبریز منطقه می‌کند، محیط طبیعی در اواخر هولوسن بسیار شکننده و دارای نوسانهای هیدرولوژی زیاد بوده است (Fleitmann et al., 2007; Gupta et al., 2003; Safaierad et al., 2020; Vaezi et al., 2019). ایده جابه جایی به سمت شمال موقعیت بادهای غرب وزان عرض‌های میانی (MLW) در دوره های گرم با دیگر سوابق دیرینه اقلیمی در منطقه سازگار است. این سوابق نشان می‌دهد که موقعیت محور اصلی در MLW در زمان‌های تابش کمتر، مانند اواخر هولوسن، به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر جابه‌جا می‌شود (Mehterian et al., 2017). در این مطالعه در مورد تغییرات آبی و دیرینه اقلیم در جنوب استان کرمان، (۱) تغییرات دما و بارش در آینده بر اساس سناریوهای مختلف در مدل‌های گردش عمومی (GCMs) شبیه سازی شدند و (۲) ردیابی تغییرات دیرینه اقلیم واقعی در جنوب شرق ایران از اواخر پلیستوسن در جهت ایجاد درک عمیق‌تر از نحوه تاثیرگذاری بادهای غرب وزان عرض‌های میانی صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که میانگین ۲۰ ساله میانگین دما در محدوده ۳/۲ تا ۴/۶ درجه سانتی گراد تحت RCP 8.5 نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، مدل‌های گردش عمومی (GCMs) کاهش قابل توجهی در بارش MLW در ایستگاه کهنوج پیش بینی کردند. البته، مدل‌های HadGEM2-ES و GFDL-CM3 نشان دهنده کاهش کمتر بارندگی در مقایسه با مدل‌های گردش عمومی در ایستگاه کهنوج تحت سناریو انتشار RCP 8.5 هستند.

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در جنوب شرق فلات ایران، بارش‌های زمستانه مدیترانه‌ای کاهش می‌یابد و دما در شبیه سازی‌های آینده افزایش می‌یابد. در واقع، مطابق با چندین مطالعه دیگر مدل‌های گردش عمومی در منطقه و تغییرات واقعی دیرینه اقلیم که در طول دوره های گرم گذشته در منطقه رخ داده است، نتایج این مطالعه نیز تضعیف بارش‌های زمستانه مدیترانه‌ای را در منطقه با ادامه روند گرمایش جهانی پیش بینی می‌کند.

منابع

- Archer, D., & Rahmstorf, S. (2011). The climate crisis: An introductory guide to climate change. In *The Climate Crisis: An Introductory Guide to Climate Change* (Vol. 9780521407441). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817144>
- Black, E., Brayshaw, D. J., & Rambeau, C. M. C. (2010). Past, present and future precipitation in the Middle East: Insights from models and observations. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1931). <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0199>
- Busuioc, A., Tomozeiu, R., & Cacciamani, C. (2008). Statistical downscaling model based on canonical correlation analysis for winter extreme precipitation events in the Emilia-Romagna region. *International Journal of Climatology*, 28(4). <https://doi.org/10.1002/joc.1547>
- Bytnerowicz, A., Omasa, K., & Paoletti, E. (2007). Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environmental Pollution*, 147(3). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.028>
- Clift, P. D., & Plumb, R. A. (2008). *The Asian Monsoon: Causes, History and Effects*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511535833>
- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5). <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- Evans, J. P. (2009). 21st century climate change in the Middle East. *Climatic Change*, 92(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9438-5>
- Evans, J. P. (2010). Global warming impact on the dominant precipitation processes in the Middle East. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3–4). <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0151-8>
- Fleitmann, D., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Kramers, J., Villa, I., Neff, U., Al-Subhary, A. A., Buettner, A., Hippler, D., & Matter, A. (2007). Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Reviews*, 26(1–2), 170–188. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.04.012>
- Gupta, A. K., Anderson, D. M., & Overpeck, J. T. (2003). Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 421(6921n), 354–357. <http://dx.doi.org/10.1038/nature01340>
- Hamzeh, M. A., Mahmudy Gharaie, M. H., Alizadeh Ketek Lahijani, H., Djamali, M., Moussavi Harami, R., & Naderi Beni, A. (2016). Holocene hydrological changes in SE Iran, a key region between Indian Summer Monsoon and Mediterranean winter precipitation zones, as revealed from a lacustrine sequence from Lake Hamoun. *Quaternary International*, 408, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.011>
- IPCC-WGI. (2014). Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contributions of the Working Group II to the Fifth Assessment Report*.
- IPCC. (2019). *The IPCC and Scenario Development. Scenario Process For AR5*.
- IPCC, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K.,

- Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & B., Z. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Cambridge University Press.
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Kutzbach, J. E., Chen, G., Cheng, H., Edwards, R. L., & Liu, Z. (2014). Potential role of winter rainfall in explaining increased moisture in the Mediterranean and Middle East during periods of maximum orbitally-forced insolation seasonality. *Climate Dynamics*, 42(3-4). <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1692-1>
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Y. Ding, C., Mauritzen, A., Mokssit, T., Peterson, & Prather, M. (2010). *Historical Overview of Climate Change*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Soil Biology and Biochemistry*, 42(8).
- Luo, Q., & Yu, Q. (2012). Developing higher resolution climate change scenarios for agricultural risk assessment: Progress, challenges and prospects. In *International Journal of Biometeorology* (Vol. 56, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0488-4>
- Mehterian, S., Pourmand, A., Sharifi, A., Lahijani, H. A. K., Naderi, M., & Swart, P. K. (2017). Speleothem records of glacial/interglacial climate from Iran forewarn of future Water Availability in the interior of the Middle East. *Quaternary Science Reviews*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.028>
- Millar, R. J., Fuglestedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., Skeie, R. B., Forster, P. M., Frame, D. J., & Allen, M. R. (2017). Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C. *Nature Geoscience*, 10(10). <https://doi.org/10.1038/NGEO3031>
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R. A., Rogner, H.-H., & Victor, N. (2000). *Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., De Jong, R., & Bootsma, A. (2004). Comparison of LARS-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates. *Climate Research*, 26(3). <https://doi.org/10.3354/cr026175>
- Rashki, A., Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2021). Dust storms in Iran – Distribution, causes, frequencies and impacts. In *Aeolian Research* (Vol. 48). <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100655>
- Safaierad, R., Mohtadi, M., Zolitschka, B., Yokoyama, Y., Vogt, C., & Schefuã, E. (2020). Elevated dust depositions in West Asia linked to ocean-atmosphere shifts during North Atlantic cold events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(31). <https://doi.org/10.1073/pnas.2004071117>
- Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35(4). <https://doi.org/10.1023/A:1005342632279>
- Semenov, M. A., Barrow, E. M., & Lars-Wg, A. (2002). *A stochastic weather generator for use in climate impact studies*. User Man Herts UK.
- Semenov, M. A., Pilkington-Bennett, S., & Calanca, P. (2013). Validation of ELPIS 1980-2010 baseline scenarios using the observed European Climate Assessment data set. *Climate Research*, 57(1). <https://doi.org/10.3354/cr01164>
- Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from

- global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1). <https://doi.org/10.3354/cr00836>
- Stevens, L. R., Wright, H. E., & Ito, E. (2001). Proposed changes in seasonality of climate during the Lateglacial and Holocene at Lake Zeribar, Iran. *The Holocene*, 11(6), 747–755.
- Street, R. B., Steynor, A., Bowyer, P., & Humphrey, K. (2009). Delivering and using the UK climate projections 2009. *Weather*, 64(9). <https://doi.org/10.1002/wea.487>
- Turner, A. G., & Annamalai, H. (2012). Climate change and the South Asian summer monsoon. In *Nature Climate Change* (Vol. 2, Issue 8). <https://doi.org/10.1038/nclimate1495>
- Vaezi, A., Ghazban, F., Tavakoli, V., Routh, J., Beni, A. N. A. N., Bianchi, T. S. T. S. T. S., Curtis, J. H. J. H., & Kylin, H. (2019). A Late Pleistocene-Holocene multi-proxy record of climate variability in the Jazmurian playa, southeastern Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 514. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.09.026>
- Wang, P. X., Wang, B., Cheng, H., Fasullo, J., Guo, Z. T., Kiefer, T., & Liu, Z. Y. (2017). The global monsoon across time scales: Mechanisms and outstanding issues. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 174). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.006>
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling and Software*, 17(2). [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00060-3)
- Zhisheng, A., Guoxiong, W., Jianping, L., Youbin, S., Yimin, L., Weijian, Z., Yanjun, C., Anmin, D., Li, L., Jiangyu, M., Hai, C., Zhengguo, S., Liangcheng, T., Hong, Y., Hong, A., Hong, C., & Juan, F. (2015). Global monsoon dynamics and climate change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054623>