



پیش‌نگری بارش ایران در دوره ۲۰۲۶-۲۰۷۵ با استفاده مقیاس کاهی دینامیکی توسط مدل منطقه‌ای RegCM4.7 طبق سناریوهای SSP

ایمان بابائیان^{۱*}، گرازیانو گیولینی^۲، راهله مدیریان^۳، مریم کریمیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸

چکیده

بارش مهم‌ترین منبع تأمین آب بخش کشاورزی کشور است که طبق میانگین بلندمدت به طور نایک‌نواختی در سطح کشور توزیع شده است. در این پژوهش داده‌های شرایط مرزی مدل سامانه زمین MPI-ESM1.2-HR برای پیش‌نگری میانگین بارش کشور برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۷۵ توسط مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4.7 مقیاس کاهی شد. مقیاس کاهی دینامیکی طبق دو سناریوی اقتصادی-اجتماعی میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) از تفکیک افقی اولیه 100×100 به 30×30 کیلومتر انجام شد. بارش پیش‌نگری شده توسط مدل اقلیمی منطقه‌ای با استفاده از روش تبدیل مقیاس خطی (LS) مورد تصحیح قرار گرفت. در تصحیح اریبی از داده‌های مشاهداتی شبکه‌ای CRU و مقادیر مقیاس کاهی شده دینامیکی بارش در دوره تاریخی (۲۰۱۴-۲۰۰۰) استفاده شد. نتایج نشان دادند که در مقیاس سالانه بارش در یک‌سوم جنوبی کشور در همه دوره-سناریوها بین ۷ تا ۱۵ درصد بیشتر از دوره مشاهداتی خواهد بود. اما در یک‌سوم شمالی و مرکزی کشور هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهش (بین ۲٪ تا ۷٪) رخ خواهد داد. در فصول بهار و تابستان بارش‌ها عمدتاً جهت افزایشی دارند که بیشترین افزایش فصل بهار در نواحی جنوبی و در تابستان در جنوب و شرق کشور متمرکز است. در مقابل در نواحی غربی کشور جهت تغییرات بارش کاهشی است. در فصل پاییز، بر اساس سناریوهای میانه و بدبینانه بارش کشور به ترتیب دارای جهت کاهشی و افزایشی است. در فصل زمستان جهت بارش در تمامی مدل-سناریوها در جنوب غرب کشور افزایشی، غرب کشور کاهشی و در سایر نواحی در بازه نوسانات نرمال یا بی‌تغییر است.

واژه‌های کلیدی: بارش، مقیاس کاهی، MPI-ESM1.2-HR، RegCM4.7، CMIP6

مقدمه

از برف در کنار چاله‌های خشک، دره‌های رسوبی پرجمعیت مجاور دشت‌های بی‌آب و غیر قابل استفاده و عاری از سکنه قرار گرفته‌اند (Alijani, 2010). علاوه بر تنوع شدید آب و هوایی، اثرات گرمایش جهانی بر عناصر مختلف آب و هوایی کشور دارای پیامدهای متنوعی هستند؛ از جمله بررسی افزایش دمای کمینه ایران در ۶ دهه گذشته (۲۰۱۸-۱۹۶۱) نشان می‌دهد که دمای کمینه ایران در دهه اخیر ۲/۸ درجه سلسیوس نسبت به ابتدای دوره افزایش یافته است، در حالیکه

ایران دارای اقلیم به نسبت پیچیده‌ای است و هیچ یک از ویژگی‌های جغرافیایی آن به اندازه پراکندگی مکانی و زمانی عناصر آب و هوایی تنوع نشان نمی‌دهد. این نایک‌نواختی عناصر آب و هوایی در پوشش گیاهی، نوع خاک و روش زندگی مردم اثر گذاشته است؛ به طوریکه جنگل‌ها و مراتع سرسبز مجاور بیابان‌های عربان و بی‌حاصل، کوه‌های پوشیده

^۳ کارشناس ارشد پژوهشی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد

^۱ دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد
*نویسنده مسئول: i.babaeian@gmail.com

^۲ گروه فیزیک سامانه زمین، مرکز بین‌المللی فیزیک نظری عبدالسلام، ایتالیا

نحوه ارجاع مقاله:

بابائیان، ا.، گیولینی، گ.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. ۱۴۰۳. پیش‌نگری بارش ایران در دوره ۲۰۲۶-۲۰۷۵ با استفاده مقیاس کاهی دینامیکی توسط مدل منطقه‌ای RegCM4.7 طبق سناریوهای SSP. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۲(۱): ۲۰-۳۴. DOI: 10.22125/agmj.2023.405388.1155
Babaeian, I., Giuliani, G., Modirian, R., Karimian, M. 2024. Projection of Iran's precipitation during 2026-2075 by dynamical downscaling by RegCM4.7 under SSP scenarios. Journal of Agricultural Meteorology, 12(1): 20-34. DOI: 10.22125/agmj.2023.405388.1155

افزایش دمای بیشینه ایران ۱/۴ درجه است. همچنین میانگین دمای ایران در دهه اخیر حدود ۲/۱ درجه سلسیوس نسبت به دهه ۱۹۷۰-۱۹۶۱ افزایش یافته است که حداقل یک درجه از میانگین جهانی بیشتر است (Javanshiri et al., 2021). بر خلاف دما، در ارتباط با تأثیر گرمایش جهانی بر بارش ایران اتفاق نظر کمتری وجود دارد. بر این اساس، Alijani et al. (2012) با بررسی داده های بارش ۴۴ ایستگاه ایران در آماری ۳۳ ساله (۲۰۰۸-۱۹۷۶) نشان دادند که روند بارش سالانه تنها در ۱۱ ایستگاه از مجموع ۴۴ ایستگاه دارای روند کاهشی معنادار در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ درصد است. Rasuli et al. (2012) با بررسی داده های ۵۰ ایستگاه همدیدی کشور در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۶ نشان دادند که در مجموع در ۳۴ ایستگاه روند بارش کاهشی، در ۱۵ ایستگاه افزایشی و یک ایستگاه بدون روند می باشد. (Torabi Poudeh et al., 2018) نشان دادند که روند بارش کشور در دوره ۲۰۱۰-۱۹۶۱ منفی بوده ولی معنی دار نیست. به دلیل وجود پیچیدگی ها در عناصر اقلیمی ایران و پاسخ متفاوت اقلیم های مختلف ایران به گرمایش جهانی، نیاز به پیش‌نگری اقلیم ایران با استفاده از روش های توانمند و با لحاظ جزئیات پیچیده متغیرهای اقلیمی است؛ روش های مدل سازی دینامیکی می توانند تا حد قابل قبولی شرایط آب و هوایی مناطق پیچیده را مدل سازی کنند (Hamidianpour et al., 2016). از بین انواع مدل های منطقه ای اقلیمی، مدل RegCM توسط طیف گسترده ای از پژوهشگران داخل کشور برای بررسی تأثیر طرحواره های مختلف در شبیه سازی متغیرهای هواشناسی در پهنه ایران (Eghbali et al., 2020; Zarrin and Dadashi, 2020; Roudbari, 2020; Alizadeh-Choobari et al., 2019; Babaeian et al., 2016; Babaeian et al., 2014; Babaeian et al., 2007; Irannejad et al., 2009) و مناطق مختلف کشور (Khayatian Yazdi et al., 2020; Sabziparvar and Ebrahimzadeh, 2019; Ghahreman et al., 2016; Babaeian et al., 2016; Mohammadi et al., 2015; Modirian et al., 2010; Modirian et al., 2007) توانمندی داده های NNRP1 در شبیه سازی بارش و دمای کشور (Taghiloo et al., 2015)، تأثیر توپوگرافی اصلاح شده و کاربری اراضی بر انواع خروجی های مدل RegCM (Basati et al., 2018; Hosseini et al., 2018; Karkhaneh et al.,

2007; Soltanzadeh et al., 2007)، پیش‌نگری شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز (Mashari et al., 2018) و پیش‌بینی های زیرفصلی تا فصلی (Babaeian et al., 2021) استفاده شده است. (Irannejad et al., 2009) تأثیر روش های متفاوت پارامتری سازی همرفت در شبیه سازی میدان های بارش و دمای هوا با نسخه سوم مدل اقلیمی منطقه ای (RegCM3) را در دوره دسامبر ۱۹۹۸ تا مارس ۱۹۹۹ بررسی کردند. آنها نشان دادند که نتایج شبیه سازی های دما و بارش با استفاده از طرحواره های مختلف همرفت بسیار شبیه یکدیگر است و توان پیش‌بینی مدل RegCM برای دما بیشتر از بارش است. آنها طرحواره کو- آنتس را برای منطقه ایران مناسب تشخیص دادند. (Alizadeh-Choobari et al., 2019) با استفاده از داده های مدل CFSv2 به عنوان شرایط اولیه و مرزی، در بازه زمانی سال ۲۰۱۰ عملکرد مدل RegCM4 را در شبیه سازی بارش و دمای ایران بررسی کردند. آنها استفاده از طرحواره لایه مرزی هلستگ در RegCM4 برای دمای هوا در فصول سرد سال و استفاده از همین طرحواره در کنار طرحواره همرفت Tiedtke برای کل سال را برای ایران پیشنهاد دادند. همچنین نتایج آنها نشان داد که در صورت استفاده از طرحواره همرفت Tiedtke، بارش شبیه سازی شده همبستگی زمانی و مکانی بیشتری با بارش مشاهداتی در منطقه ایران خواهد داشت. (Soltanzadeh et al., 2007) نقش رشته کوه های زاگرس بر سامانه های جوی واقع بر ایران را از یکم ژانویه ۱۹۹۹ تا پایان مارس ۱۹۹۹ بررسی کردند و نشان دادند که با حذف رشته کوه زاگرس میزان بارش در مناطق مرکزی و شرقی ایران افزایش می یابد، ولی میزان بارش در کل محدوده شبیه سازی تقریباً ثابت می ماند. (Hosseini et al., 2018) در بازه زمانی دسامبر ۲۰۱۳ تا دسامبر ۲۰۱۴ تأثیر استفاده داده های توپوگرافی اصلاح شده GMTED2010 به جای GTOPO بر خروجی های مدل RegCM4 را بررسی کردند. توپوگرافی GMTED نسبت به GTOPO در مناطقی از سواحل دریای خزر افزایش ارتفاع (در بیشترین حالت ۲۵۴ متر) و در بعضی از مناطق رشته کوه های البرز کاهش ارتفاع (بیشترین کاهش ارتفاع ۴۰۰ متر) دارد. آنها نشان دادند که استفاده از داده های GMTED می تواند خروجی بارش، دما و سرعت باد مدل را بهبود بخشد،

و در هر سه دوره آینده نزدیک، میانه و دور، دمای بیشینه، روزهای گرم، طول دوره های گرم و دمای کمینه افزایش می‌یابد، در حالیکه طول شب‌های سرد و دوره‌های سرد کاهش خواهند یافت. در بین مناطق مختلف کشور چین، در فلات تبت و مناطق همسایه آن، سطح معنی‌داری افزایش رخدادهای شدید دمایی از سایر مناطق بیشتر است که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر این منطقه نسبت به گرمایش جهانی است. (Zou and Zhou (2022) داده‌های شرایط مرزی مدل گردش کلی FGOALS-g3 را توسط مدل منطقه‌ای RegCM4 بر روی کشور چین در دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP1-2.4، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مقیاس‌کاهی کردند. آنها دریافتند که در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ میانگین و رخدادهای شدید بارشی در سناریوی SSP2-4.5 افزایش می‌یابد. همچنین بارش‌های مونسونی تابستانه و رطوبت در منطقه افزایش خواهد یافت. نتایج آنها نشان داد که در صورت کاهش سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای از سناریوی SSP5-8.5 به سناریوی SSP2-4.5 میزان آسیب‌های ناشی از تغییر اقلیم تا ۸۰ درصد کاهش خواهد یافت. (Sangelantoni et al., 2021) توانمندی دو مدل منطقه‌ای RegCM4.1 و WRF3.9.1.1 در پیش‌بینی بارش و دمای منطقه اروپا با بکارگیری داده‌های شرایط مرزی مدل CFSv.2 مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در مورد متغیر دما، مدل WRF ۴ درجه سلسیوس اریبی منفی را نشان می‌دهد، در حالیکه مدل RegCM نه تنها اریبی کمتری (بین -۱ تا +۱) را نشان می‌دهد بلکه الگوی فضایی بهتری از دما را ارائه می‌دهد. نتایج آنها همچنین حاکی از بهتر بودن مقدار و الگوی مکانی بارش مدل RegCM در مقایسه با مدل WRF است. مرور مطالعات انجام شده تاکنون در کشور نشان می‌دهند که مطالعه‌ای برای پیش‌نگری بارش ایران طبق سناریوهای جدید SSP با استفاده از مقیاس‌کاهی دینامیکی انجام نشده است. اگرچه اغلب مقیاس‌کاهی آماری به دلیل نیاز به منابع محاسباتی کم و محاسبات سریع توسط کاربران ترجیح داده می‌شود، با این حال مقیاس‌کاهی دینامیکی به دلیل برتری آن در لحاظ ویژگی‌های سیستماتیک مرتبط با توپوگرافی،

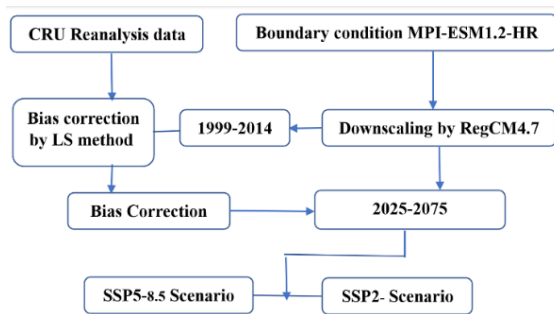
لذا پیشنهاد کردند تا در پژوهش‌های آینده جایگزین داده قدیمی GTOPO گردد. (Mashari et al., (2018 اثر گرمایش جهانی بر پهناهای سیل خیز زیر حوزه شان‌دیز در دهه ۲۰۳۰ (دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰) را طبق دو سناریوی واداشت تابشی RCP4.5 و RCP8.5 حاصل از برونداد مقیاس‌کاهی شده مدل گردش کلی CanESM2 توسط سامانه تلفیقی RegCM4.2- WetSpa-HECRAS مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شدت رگبار، دبی حداکثر و پهناهای سیلابی آینده بیشتر خواهد شد. با افزایش محدوده سیلابی، درصد بیشتری از مساحت جاده‌ها، مناطق مسکونی و باغات و پل‌ها در حوزه شان‌دیز تحت تأثیر سیل قرار می‌گیرد. علاوه بر مطالعات انجام شده در داخل کشور، مطالعات متعددی نیز در خارج از کشور جنبه‌های مختلفی از مدل‌سازی اقلیمی با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM از جمله تبیین ساختار دینامیکی و عملکرد طرحواره‌ها (Dickinson et al., 1989; Giorgi and Bates, 1989; McGregor, 1997; Wang et al., 2004; Giorgi and Gutowsk, 2015; Giorgi, 2019)، پیش‌نگری اقلیم آینده با استفاده از سناریوهای RCP (Zou and Zhou, 2020; Guo et al., 2013) و سناریوهای SSP (Zou, 2021; Reboita, et al., 2022) ، پیش‌بینی بلندمدت (Zou and Zhou 2022 al., 2013; Huang and Chan, 2014; Sangelantoni, et al., 2021) پرداخته‌اند. (Giorgi (2019) که نقش اصلی در توسعه و ارتقاء مدل منطقه‌ای RegCM داشته است، تأیید می‌کند که از میان دستاوردهای اصلی پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی منطقه‌ای، انتظار می‌رود در آینده تمرکز بر روی توسعه مدل‌های سامانه زمین منطقه‌ای^۱ با قابلیت کاربرد در طیف وسیعی از مطالعات منطقه‌ای، افزایش برد پیش‌نگری تا مقیاس صد سال و تفکیک افقی مکانی تا مقیاس همرفت (چند کیلومتر)، شناسایی بهتر سیگنال‌های منطقه‌ای تا محلی تغییر اقلیم و توسعه مدل‌های جفت شده سامانه زمینی منطقه‌ای (RESM) باشد. (Guo et al., (2021) داده‌های شرایط مرزی چهار مدل گردش کلی EC-EARTH، CSIRO-Mk3.6.0، MPI-ESM-MR و HadGEM2-ES را با مدل منطقه‌ای RegCM4.4 تحت سناریوی RCP4.5 مقیاس‌کاهی کردند. یافته‌های آنها نشان داد که در همه مناطق کشور چین

¹ Regional Earth System Model

دو دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۹ و آینده ۲۰۷۵-۲۰۲۵ برای سناریوهای دسترس SSP2-4.5 به عنوان سناریوی با سیاست‌های اقتصادی اجتماعی و انتشار میانه و SSP5-8.5 به عنوان سناریوی بدبینانه از نظر سیاست‌های اقتصادی اجتماعی، اخذ شدند. آدرس پایگاه ([https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/](https://esgf-https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/)) است. در این مطالعه، ابتدا مقیاس‌های دینامیکی توسط مدل RegCM4.7 در دوره تاریخی^۱ ۲۰۱۴-۱۹۹۹ و با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر انجام شد، سپس مقادیر بارش مقیاس‌گرفته شده با داده‌های بارش مشاهداتی از پایگاه CRU (Mashari et al., 2018; Giorgi et al., 2012) مقایسه شده و مطابق معادله (۱ و ۲) ضریب تصحیح اریبی به روش تبدیل مقیاس خطی^۲ LS برآورد گردید. در این روش که قبلاً توسط (Mendez et al., 2020; Rahman et al., 2021) مورد استفاده قرار گرفته است، مقادیر بارش پیش‌نگری شده در فرآیند مقیاس‌گرفته‌های دینامیکی با اعمال ضریب LS مورد تصحیح اریبی قرار می‌گیرند. در معادله‌های فوق P_{fut}^{BC} بارش تصحیح شده آینده، P_{fut} برون داد مستقیم بارش آینده مدل RegCM4.7 در دوره تاریخی و μP_{obs} میانگین بارش مشاهداتی است.

$$P_{fut}^{BC} = P_{fut} \times \left[\frac{\mu P_{obs}}{\mu P_{ref}} \right] \quad (1)$$

$$LS = \frac{\mu P_{obs}}{\mu P_{ref}} \quad (2)$$



شکل ۲-فلوچارت فرآیند مقیاس‌گرفته‌های دینامیکی

(RegCM4.7) و تصحیح اریبی آن به روش LS

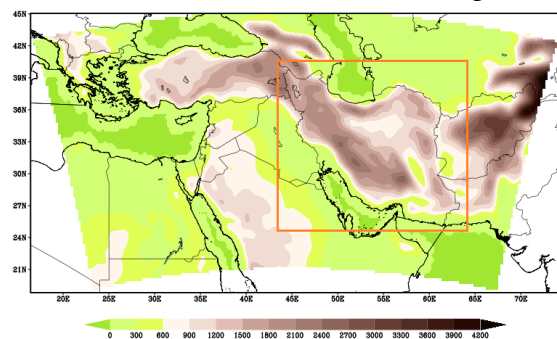
Figure 2- Flowchart of dynamical downscaling by RegCM4.7 and bias correction using LS method

فرآیندهای دینامیکی سامانه اقلیم و غیره نتایج بهتری را در شبیه‌سازی مشخصات اقلیمی ارائه می‌دهد. از آنجا که تفکیک افقی مدل‌های CMIP6 در حول و حوش ۱۰۰-۲۰۰ کیلومتر است، چنین وضوحی سیمای واقعی از اقلیم محلی را نشان نمی‌دهند و برای اهداف پیش‌نگری، کاهش اثرات و سازگاری با تغییر اقلیم مناسب نبوده و نیازمند مقیاس‌گرفته‌های می‌باشند. در این مطالعه به منظور ارائه چشم‌اندازی از بارش ایران در دهه‌های آینده، داده‌های شرایط مرزی مدل اقلیمی جهانی MPI-ESM1.2-HR توسط مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4.7 طبق دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مقیاس‌گرفته‌های دینامیکی شدند و سپس نتایج به روش تبدیل خطی تصحیح اریبی شدند. بخش دوم این مقاله به مواد و روش‌ها، بخش سوم نتایج و بحث و بخش پایانی به جمع‌بندی اختصاص دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، داده‌ها و روش کار

در این پژوهش گستره مطالعه کشور ایران واقع بین ۲۴-۴۰ شمالی و ۶۴-۴۵ شرقی در نظر گرفته شده است. محدوده دسترسی به داده‌های شرایط مرزی مدل اقلیمی جهانی MPI-ESM1.2-HR با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر کل کره زمین است. محدوده مقیاس‌گرفته‌های دینامیکی فراتر از ایران بین عرض جغرافیایی ۲۱-۴۲ شمالی و طول جغرافیایی ۶۶-۲۰ شرقی است (شکل ۱).



شکل ۱- محدوده منطقه مقیاس‌گرفته‌های دینامیکی

Figure 1- The area of the dynamical downscaling

داده‌های شرایط مرزی با تواتر شش ساعته از مدل اقلیمی جهانی MPI-ESM1.2-HR از طریق پایگاه داده ESGF برای

² Linear Scaling

¹ Historical

مدل اقلیمی منطقه‌ای (RCM)

جدول ۲- برخی از جزئیات مدل‌سازی و داده‌های ورودی

Description	Characteristics
1999-2014, 2026-2075	Modeling period
MPI-ESM1.2-HR	Initial condition
Atmosphere: 100, Ocean: 50 km	Resolution
GMTED_DEM_30s	Topography
GLCC_BATS_30s	Land cover
33°N , 45°E	Model center
30km	Spatial step
40s	Time step

مدل سامانه زمین (MPI-ESM)

در این پژوهش از داده‌های شرایط مرزی و اولیه مدل سامانه زمین MPI-ESM1.2-HR استفاده شد که در موسسه هواشناسی ماکس پلانک سازمان هواشناسی آلمان توسعه یافته است. این مدل از دو مؤلفه جوی ECHAM6.3 و اقیانوسی MPIOM1.6.2 تشکیل شده است. تفکیک افقی هسته دینامیکی مؤلفه جوی دارای یک برش طیفی در شماره موج T127 معادل ۱۰۰ کیلومتر است. فیزیک مدل در یک شبکه گوسی منظم در تراز افقی و ۹۵ تراز قائم تنظیم شده است که تا فشار ۰/۰۱ هکتوپاسکال در استراتوسفر گسترش یافته است. این تفکیک قائم امکان شناسایی دقیق امواج حاره‌ای و بهبود طیف گسترده‌ای از فرآیندهای استراتوسفری مانند نوسانات شبه دو ساله را فراهم می‌کند. طرحواره تابش در نسخه جدید مؤلفه جوی مدل در مقایسه با نسخه مورد استفاده در سری CMIP5 بهبود یافته و از تقریب مونت کارلو استفاده شده است. علاوه بر این پارامتری‌سازی استراتوکومولوس نیز فعال شده است. اصلاحات در مؤلفه جوی موجب بهبود در ساختار اریبی مدل در مقیاس جهانی و منطقه‌ای شده است. تفکیک افقی مؤلفه اقیانوسی مدل ۰/۴ درجه است و در گروه مدل‌هایی قرار داد که گزینه رشد Eddy در آن فعال است. در راستای قائم ۴۰ لایه با ضخامت ناهمگن در نظر گرفته شده است که ۲۰ لایه اول در عمق ۷۰۰ متری از سطح دریا قرار دارند (Müller et al., 2018). خلاصه‌ای از مشخصات مدل در جدول ۳ آورده شده است (Stevens et al., 2013; Jungclaus et al., 2013).

برای مقیاس‌کاهی دینامیکی از مدل اقلیمی منطقه‌ای ناحیه محدود RegCM4.7 (Giorgi et al., 2012) که در مرکز فیزیک نظری عبدالسلام در ایتالیا (ICTP) توسعه یافته، استفاده شد. برای سازگاری مدل RegCM4.7 در مقیاس‌کاهی داده‌های CMIP6 از نسخه Master مدل استفاده شد. هسته دینامیکی مدل بصورت هیدرواستاتیک و سیستم مختصات قائم آن ناهموار^۱ سیگما است. در نسخه RegCM4 فیزیک مدل نسبت به نسخه پیشین بهبود یافته است و عملکرد بهتری در بسیاری از مناطق کره زمین نشان می‌دهد. در جدول ۱، طرحواره‌های فیزیکی مورد استفاده در مطالعه حاضر مدل آورده شده است (Alizadeh-Choozari et al., 2019; Babaeian et al., 2021; Zou and Zhou, 2022).

جدول ۱- مشخصات طرحواره‌های فیزیکی مورد استفاده در مدل

RegCM4.7

Table 1- Specifications of physical schemas used in RegCM4.7 model

Parametrization's name	Physical parametrization
Community land model	Land model
Subgrid explicit moisture	Humidity
NCAR community climate model	Radiation
Tiedtke (1996)	Cumulus
Holstlag (1990)	Boundary layer
Zeng et al. (1998)	Ocean-atmosphere flux
Relaxation, exponential technique	LBC

در این پژوهش مدل اقلیمی RegCM4.7 با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر در دو دوره تاریخی ۱۹۹۹-۲۰۱۴ و دو سناریوی آینده ۲۰۲۵-۲۰۷۵ اجرا شد. سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۲۵ به عنوان Spin up مدل در نظر گرفته شدند. با مقایسه برون‌داد مدل منطقه‌ای در تاریخی با داده‌های بارش پایگاه اریبی CRU و ضریب تصحیح اریبی به روش LS محاسبه گردید و مطابق با آن داده‌های پیش‌نگری آینده تصحیح شدند. برخی جزئیات مدل‌سازی از جمله داده‌های ورودی مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

¹ Terrain-following

گازهای گلخانه‌ای وابسته به آنها، سناریوهای تلفیقی اقتصادی اجتماعی-واداشت تابشی را تشکیل می‌دهند که مهمترین آنها شامل چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 هستند. در این پژوهش به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌ها تا زمان اجرای این پژوهش، از داده‌های دو سناریوی اقتصادی اجتماعی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شده است.

نتایج و بحث

تغییرات سالانه

در شکل ۳، پیش‌نگری تغییرات بارش (بر حسب درصد) سالانه کشور در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) طبق سناریوی میانه (SSP2-4.5) نسبت به دوره مشاهداتی آورده شده است. مطابق شکل، تغییرات بارش کشور در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) در بازه ۳۰٪- تا ۶۰٪+ قرار دارد که کاهش (رنگ زرد) بارش در محدوده نوار غربی کشور و افزایش (رنگ آبی) بارش در یک‌سوم جنوبی کشور قرار دارد. بیشترین افزایش بین ۳۰ تا ۶۰ درصد در نیمه جنوبی استان سیستان و بلوچستان و نیمه شرقی استان هرمزگان قرار دارد. تغییرات بارش در اکثر مناطق کشور در بازه نوسانات نرمال (رنگ سفید) قرار دارد. مهمترین تغییر در الگوی بارش آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) جابجایی در هسته بیشینه افزایش بارش از جنوب‌شرق به جنوب‌غرب است. با این حال تغییرات بارش در سایر مناطق کشور در بازه تغییرات نرمال قرار دارد.

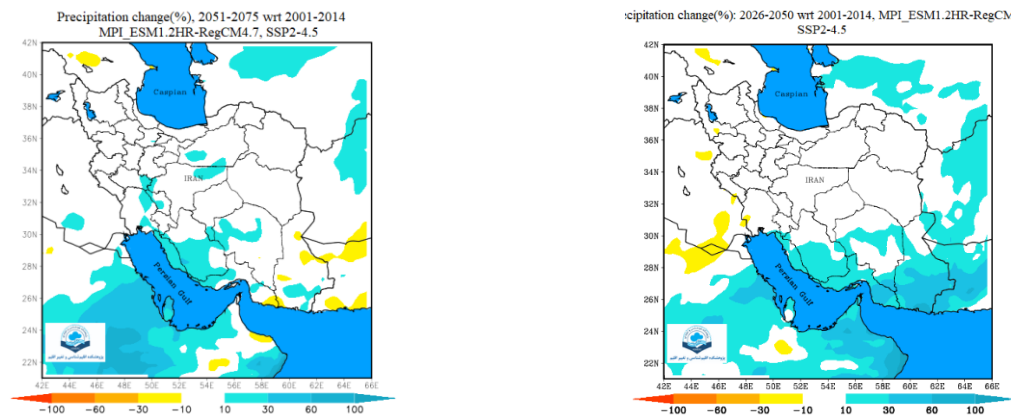
جدول ۳- مؤلفه‌های مختلف مدل MPI-ESM1.2-HR

Table 3- Components of the MPI-ESM1.2-HR model

Component	Atmospheric	Oceanic
Name	ECHAM6.3	MPIOM1.6.2
Horizontal resolution	T127 (~100 km)	0.4°
Vertical resolution	L95	L40

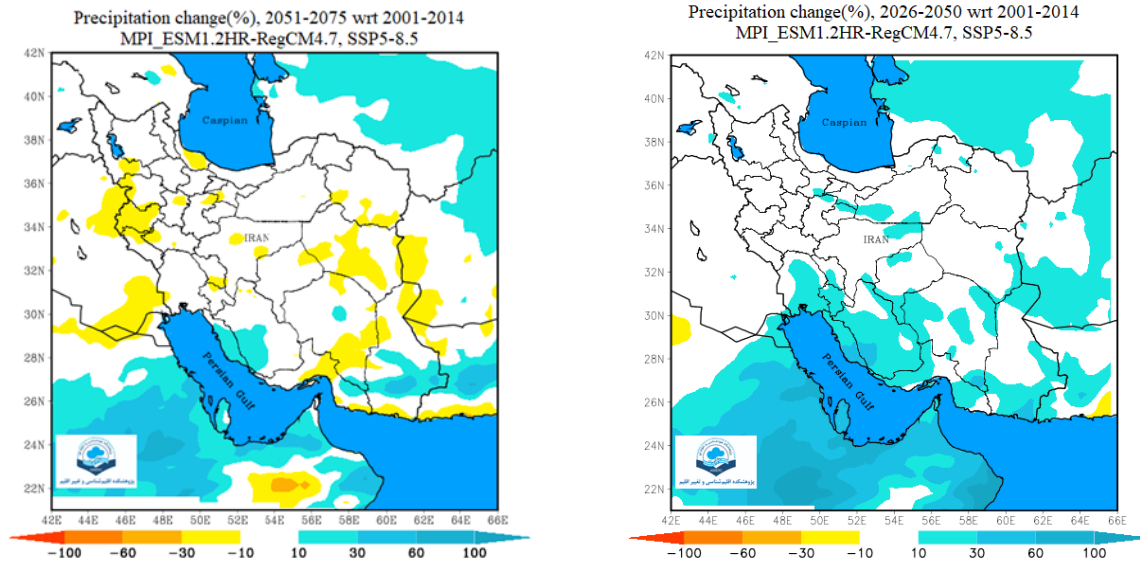
سناریوهای SSP

سناریوهای SSP، پنج مسیر محتمل تحول اقلیم جهانی را در نبود سیاست‌های اقلیمی مشخص می‌کند و اینکه با لحاظ سناریوهای مختلف واداشت تابشی (RCP)، چه سطحی از تغییر اقلیم حاصل خواهد شد. در حدود یک دهه پیش تیمی بین‌المللی متشکل از دانشمندانی در حوزه‌های تغییر اقلیم، اقتصاد و سیستم‌های انرژی، محدوده‌ای از خط سیرهای محتمل رشد اقتصادی، رشد جمعیت، آموزش، شهرنشینی و آهنگ توسعه صنعتی را برای قرن ۲۱ آزمودند که در نهایت به عنوان سناریوهای اقتصادی اجتماعی مشترک (SSP) شناخته شدند. برخلاف سناریوهای واداشت تابشی (RCP) که تنها تمرکز بر واداشت تابشی گازهای گلخانه‌ای داشتند، سناریوهای جدید SSP افزون بر آن، تأثیر خط سیرهای مختلف اقتصادی اجتماعی را هم در گرمایش جهانی در نظر گرفته‌اند. سناریوهای جدید بیان می‌کنند که چگونه انتخاب سیاست‌های اجتماعی مختلف بر انتشار و غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده تأثیر گذاشته و می‌توانند اهداف اقلیمی توافق پاریس را محقق کنند. تلفیق انتخاب‌های مختلف اقتصادی اجتماعی آینده همراه با سطوح مختلف از انتشار



شکل ۳- پیش‌نگری تغییرات بارش (٪) کشور طبق سناریوی میانه SSP2-4.5 برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۷۵-۲۰۵۱
Figure 3- Projection of precipitation anomaly (%) based on SSP2-4.5 for 2026-2050 and 2051-2075

۲۰۷۵) طبق سناریوی میانه (SSP5-8.5) نسبت به دوره مشاهداتی آورده شده است.



شکل ۴- پیش‌نگری تغییرات بارش (% کشور طبق سناریوی میانه SSP5-8.5 برای دوره ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۲۶-۲۰۵۰
Figure 4- Projection of precipitation anomaly (%) based on SSP5-8.5 for 2026-2050 and 2051-2075

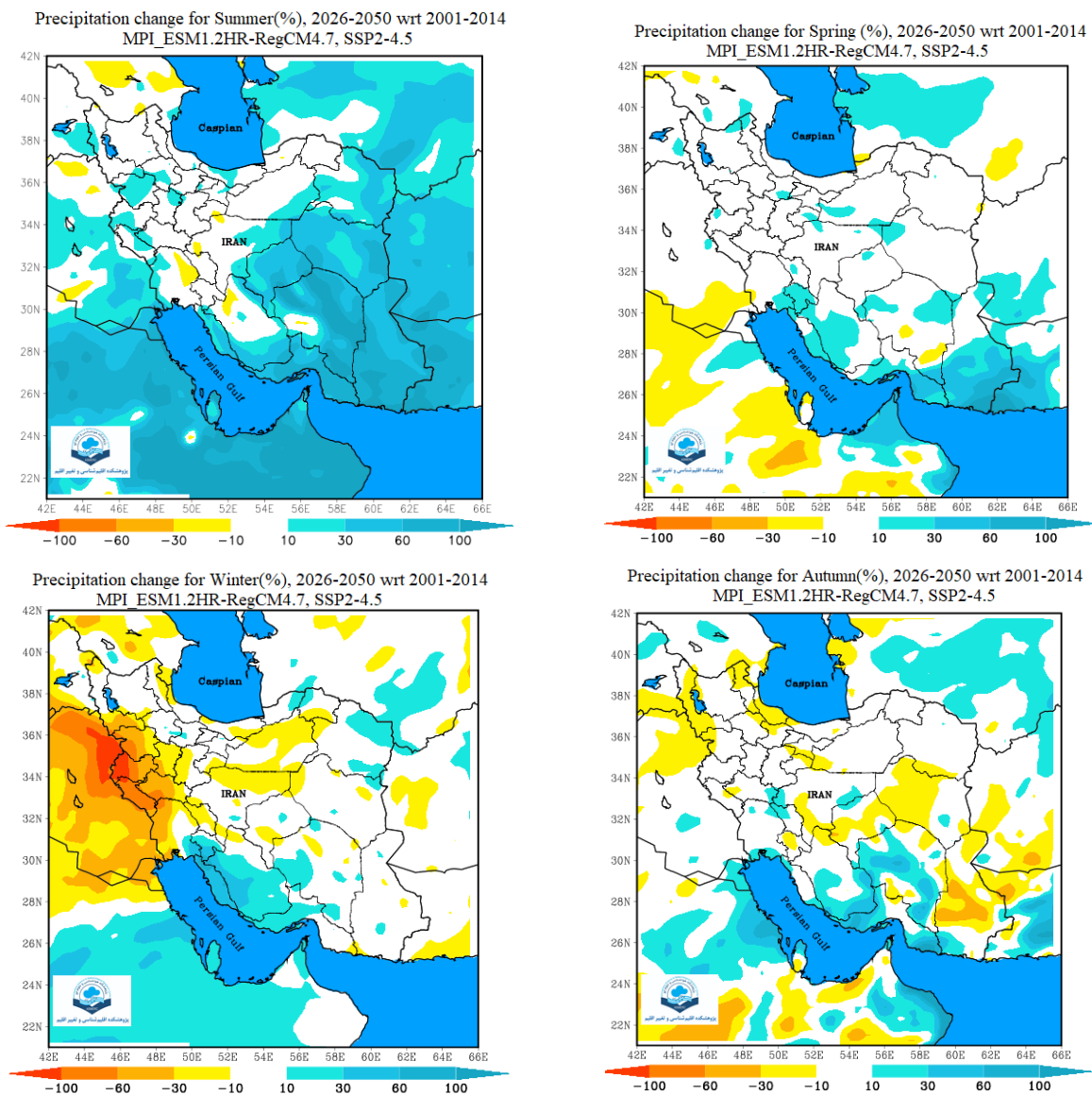
شده است. پیش‌نگری بارش کشور طبق سناریوی میانه (SSP2-4.5) در دوره آینده نزدیک برای فصول مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. در فصل بهار منطقه شاخص افزایش بارش جنوب و جنوب‌شرق کشور بین ۱۰ تا ۶۰ درصد افزایش است. در منطقه محدودی از نوار جنوب‌شرق کشور افزایش تا ۱۰۰ درصد مشاهده می‌شود. در سایر مناطق کشور تغییرات بارش عمدتاً در بازه نرمال قرار دارد. در فصل تابستان بیشترین افزایش نسبی بارش بین ۱۰ تا ۱۰۰ درصد در جنوب، جنوب‌شرق، شرق و برخی مناطق دیگر کشور بصورت محدود برآورد شده است. در بخش‌هایی از مناطق کوهستانی استان کرمان و جنوب استان سیستان و بلوچستان افزایش بارش فراتر از ۱۰۰ درصد است. در بخش‌های محدودی از مناطق همسایه رشته کوه زاگرس جنوبی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش یافته است. تغییرات بارش در سایر مناطق کشور در بازه نرمال (۱۰٪- تا ۱۰٪+) است. در فصل پاییز هر دو نوع تغییرات بارش مشاهده می‌شود. در این فصل کاهش بارش بین ۱۰ تا ۳۰ درصد برای شمال‌غرب، مرکز و شرق کشور، غرب خزر و دامنه جنوبی البرز برآورد شده است که بیشترین کاهش بین ۳۰ تا ۶۰ درصد در مرکز استان سیستان و بلوچستان پیش‌نگری شده است.

در شکل ۴، پیش‌نگری تغییرات بارش سالانه کشور در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)

تغییرات بارش در آینده نزدیک در بازه ۱۰٪- تا ۶۰٪+ قرار دارد که ناحیه با بیشترین افزایش با ۶۰٪+ نسبت به نرمال در جنوب‌غرب کشور قرار دارد. در این دوره تغییرات بارش در اکثر مناطق کشور در بازه نرمال است، با این حال در یک‌سوم جنوبی کشور و بخش‌های محدودی از مرکز کشور تا ۳۰٪ افزایش بارش پیش‌نگری شده است. الگوی تغییرات بارش در آینده میانی به مقدار به نسبت زیادی با دوره پیش از آن متفاوت است؛ به طوری‌که در این دوره در اغلب مناطق کشور حداقل به صورت محدود کاهش بارش تا ۳۰٪ برآورد شده است که ناحیه غرب و شرق کشور بارز است. با این حال در مناطقی از یک‌سوم جنوبی کشور تا ۳۰٪ افزایش بارش پیش‌نگری شده است. در مجموع نتایج با یافته‌های گزارش ششم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2021) مطابقت دارد.

تغییرات فصلی

به دلیل تعداد زیاد نقشه‌های تولید شده در مقیاس فصلی، در اینجا نقشه‌های پیش‌نگری آینده نزدیک ۲۰۲۶-۲۰۵۰ طبق دو سناریوی میانه و بدبینانه آورده می‌شود؛ اما در تحلیل‌ها پیش‌نگری آینده میانی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ در نظر گرفته



شکل ۵- بی‌هنجاری بارش دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ طبق سناریوی SSP2-4.5 برای فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان.

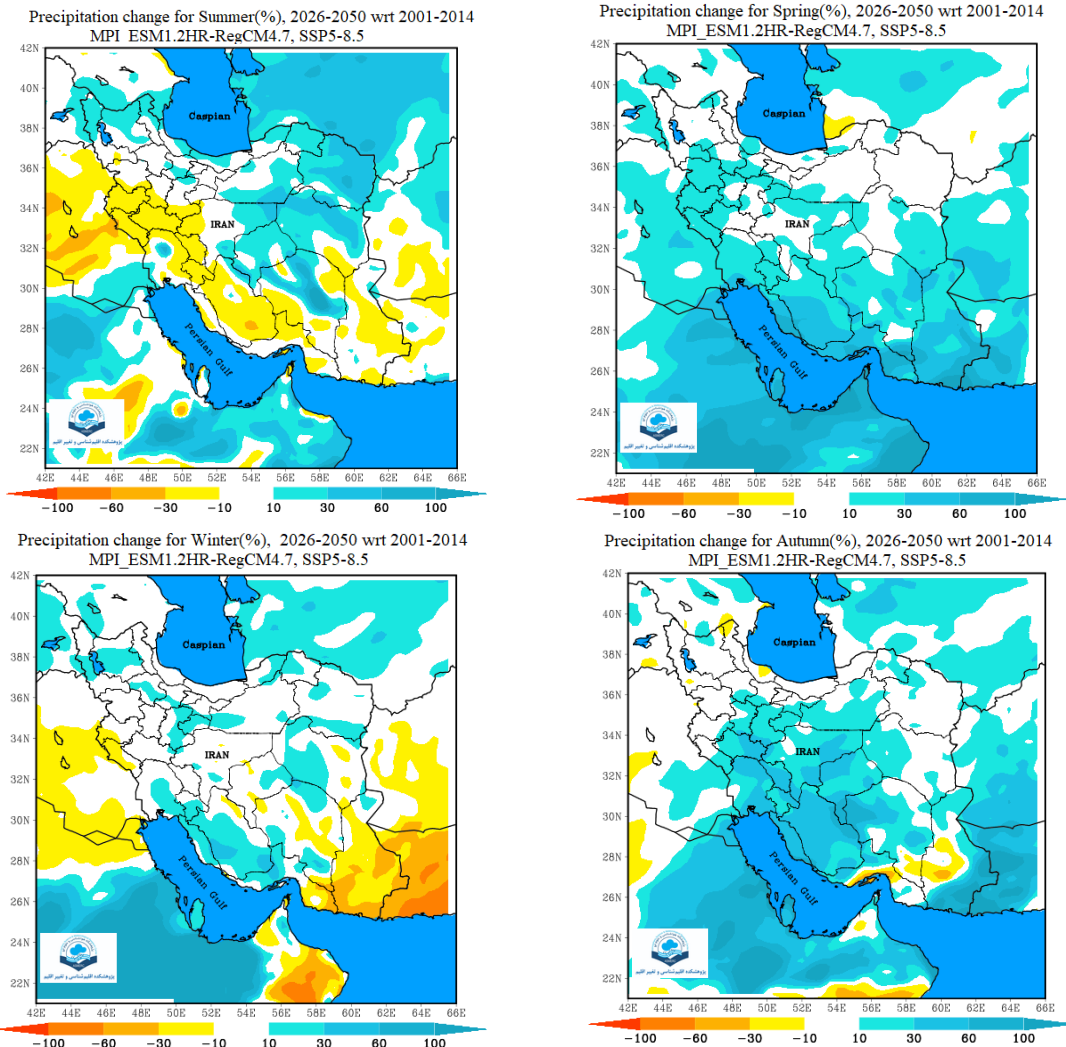
Figure 5- Seasonal precipitation anomaly for 2026-2050 based on SSP2-4.5 scenario.

غرب کشور پیش‌نگری شده است. وجه مشترک پیش‌نگری تغییرات بارش طبق سناریوی میانه (SSP2-4.5) در دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) با دوره آینده نزدیک، افزایش نسبی بارش در مناطق جنوبی کشور است؛ با این حال الگوهای فصلی دارای تفاوت‌هایی می‌باشند. الگوی بارش فصل بهار کم‌بیش مانند دوره آینده نزدیک بوده و بیشینه افزایش بین ۳۰ تا ۶۰ درصد بر یک‌سوم جنوبی کشور متمرکز است، هر چند در سطح محدود افزایش بارش تا ۱۰۰ درصد در نوار جنوبی کشور برآورد شده است. در فصل تابستان هسته

با این حال در مناطقی از استان‌های هرمزگان، کرمان و فارس افزایش بارش بین ۱۰ تا ۶۰ درصد برآورد شده است. تغییرات در سایر مناطق کشور در محدوده نرمال است. در فصل زمستان الگوی بارز کاهش بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصدی بارش در غرب کشور است؛ حتی در منطقه محدودی کاهش بارش فراتر از ۱۰۰٪ هم پیش‌نگری شده است. در برخی مناطق کشور از جمله بخش‌هایی از دامنه‌های البرز و مرکز کشور کاهش بین ۱۰ تا ۳۰ درصد برآورد شده است. در این فصل بیشترین افزایش بارش بین ۳۰ تا ۶۰ درصد در جنوب

بارش در غرب کشور و افزایش بارش در جنوب‌غرب کشور است. با این حال کاهش بارش غرب کشور در آینده میانی کمتر (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد) است. همچنین بیشترین کاهش (بین ۳۰ تا ۶۰ درصد) بر جنوب‌شرق کشور متمرکز است. پیش‌نگری تغییرات بارش کشور طبق سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) برای فصول مختلف در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) در شکل ۶ نشان داده شده است.

افزایش بارش از یک‌سوم جنوبی کشور به شمال‌شرق، نوار شمالی و مرکز کشور جابجا شده است و بیشینه کاهش بارش برای مناطق زاگرس میانی و جنوبی برآورد شده است. در فصل پاییز، برخلاف آینده نزدیک، در دوره آینده میانی میانگین بارش کشور نسبت به دوره پایه افزایش را نشان می‌دهد که هسته افزایش بارش مانند آینده نزدیک بر جنوب‌غرب کشور متمرکز است. وجه مشترک دو دوره در فصل زمستان کاهش



شکل ۶- بی‌هنجاری بارش دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ طبق سناریوی SSP5-8.5 برای بهار، تابستان، پاییز و زمستان.

Figure 6- Seasonal precipitation anomaly for 2026-2050 based on SSP5-8.5 scenario.

تا ۳۰ درصد افزایش است. در فصل تابستان برخلاف سناریوی میانه، بارش یک‌سوم جنوبی و منطقه زاگرس میانی کاهش یافته است. بارش در نوار شمالی، بخش‌هایی از شرق و مرکز کشور افزایش یافته است. بایستی به این نکته توجه کرد که

در فصل بهار میانگین بارش کشور نسبت به دوره پایه افزایش یافته است که بیشترین افزایش بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصد برای یک‌سوم جنوبی کشور پیش‌نگری شده است. تغییرات در یک‌سوم شمالی کشور در بازه نرمال و در سایر مناطق بین ۱۰

جدول ۴- تغییرات منطقه‌ای بارش (درصد) در آینده نزدیک و میانی طبق دو سناریوی میانه و بدبینانه

Table 4- Regional precipitation changes (%) in the 2026-2050 and 2051-2075 under SSPs scenarios

Region	Period	North	Center	South
SSP5-8.5	2051-2075	2.6	-1.6	15.4
	2026-2050	7.1	6.2	7.4
SSP2-4.5	2051-2075	1	3.8	15.2
	2026-250	-2.3	1.3	9.7

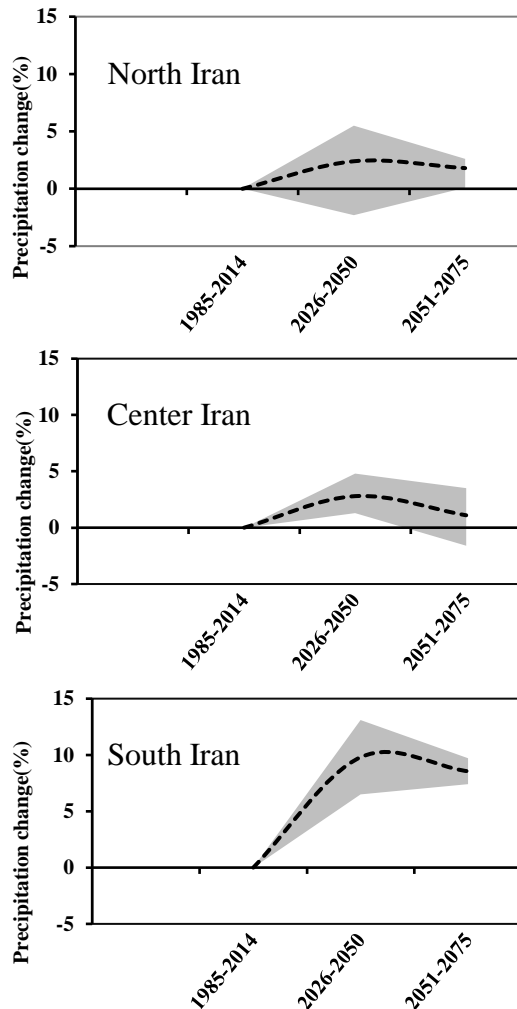
نواحی فوق با تقسیم کشور به سه ناحیه با گستره عرض جغرافیایی یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که دامنه تغییرات بارش در ناحیه شمالی، مرکزی و جنوبی کشور به ترتیب بین ۲/۳٪ تا ۷/۱٪، ۱/۶٪ تا ۶/۲٪ و ۷/۴٪ تا ۱۵/۴٪ درصد خواهد بود. افزایش بارش در یک سوم جنوبی کشور با نتایج بسیاری از پژوهش‌های محققان از جمله (IPCC, 2021) سازگار است. در دو ناحیه دیگر هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهش مشاهده می‌شود. این موضوع در شکل ۷ نیز نشان داده شده است؛ به طوریکه در یک سوم جنوبی کشور تقریباً در تمامی دوره-سناریوها بارش افزایشی است اما در دو ناحیه مرکزی و شمالی هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهشی دیده می‌شود، اما در مجموع جهت تغییرات بارش در این دو ناحیه گرایش به کاهش دارد. برای بررسی عدم قطعیت ناشی از سناریوهای انتشار، دامنه تغییرات منطقه‌ای بارش پیش‌نگری شده در هر یک از دوره‌ها با لحاظ نتایج دو سناریوی میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) در شکل ۸ آورده شده است. نتایج نشان داد که میانگین بارش سالانه در یک سوم جنوبی کشور در هیچ یک از دو دوره آینده و دو سناریوی مورد بررسی کاهشی نیست و بین ۷ تا ۱۵ درصد نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ افزایش می‌یابد. این یافته با نتایج گزارش ششم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (AR6, 2021) مبنی بر افزایش بارش در حاشیه شمالی دریای عمان و خلیج فارس و کشورهای واقع در شبه‌جزیره عربستان هماهنگی دارد. اما در دو ناحیه شمالی و جنوبی هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهش مشاهده می‌شود. برآورد کاهش بارش در دو ناحیه مرکزی و شمالی ایران با یافته‌های گزارش ششم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم هماهنگ است. علاوه بر این (Rasuli et al., 2012) نشان دادند که هسته مرکزی

مقدار نرمال بارش کشور در فصل تابستان - به استثنای استان‌های ساحلی خزر، شمال غرب و مناطقی از جنوب شرق کشور ناچیز است و مقادیر به نسبت زیاد درصد، بارش قابل توجهی بر حسب میلی‌متر نمی‌شود. در فصل پاییز، میانگین بارش کشور، به جز مناطقی از جنوب شرق و شمال غرب، نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که افزایش بارش (بین ۱۰ تا ۱۰۰ درصد) متمرکز بر استان‌های همسایه رشته‌کوه زاگرس میانی و جنوبی، جنوب غرب و بخش‌هایی از جنوب شرق کشور است. در فصل زمستان، منطقه کاهش بارش بین ۱۰ تا ۶۰ درصد بر روی جنوب شرق و نوار غربی کشور و افزایش بارش بین ۱۰ تا ۶۰ درصد در جنوب غرب قرار دارد. تغییرات بارش در سایر مناطق در بازه نرمال است. در دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) طبق سناریوی SSP5-8.5، میانگین بارش کشور در فصل بهار بین ۱۰ تا ۶۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد که بیشترین کاهش در غرب، جنوب غرب، جنوب و شرق کشور متمرکز است. در بخش‌های محدودی از کشور از جمله نوار شمالی کشور افزایش بارش بین ۱۰ تا ۳۰ درصد قرار دارد. در فصل تابستان، عمده کاهش بارش برای یک سوم غرب کشور برآورد شده است. در سایر مناطق کشور تلفیقی از کاهش و افزایش بارش پیش‌نگری شده است. در جنوب شرق کشور بارش تابستان افزایش را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً بیان شد، میانگین بارش کشور در فصل تابستان به استثنای استان‌های ساحلی خزر، شمال غرب و جنوب شرق کشور ناچیز است. در فصل پاییز عمده کاهش بارش بر جنوب شرق، شمال شرق و دامنه جنوبی البرز قرار دارد. در فصل زمستان کاهش بارش بین ۱۰ تا ۶۰ درصد در غرب، جنوب غرب و جنوب شرق و شرق کشور پیش‌نگری شده است. در جنوب و بخش‌هایی از دامنه شرقی زاگرس میانی بارش افزایش یافته است.

تغییرات منطقه‌ای

در جدول ۴، خلاصه پیش‌نگری تغییرات بارش برای سه منطقه شمالی، مرکزی و جنوبی کشور در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰-۲۰۱۴) طبق دو سناریوهای میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) آورده شده است.

پایم آن کاهش ورود سامانه‌های بارشی به نیمه شمالی کشور است.

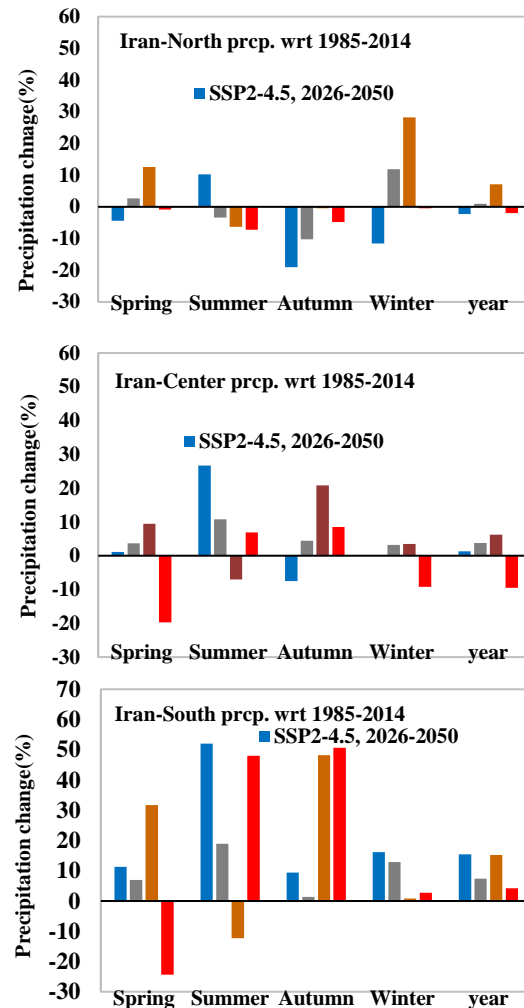


شکل ۸- دامنه تغییرات پیش‌نگری بارش منطقه‌ای کشور در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱)

Figure 8- The range of changes in regional precipitation projection in 2050-2026 and 2075-2051

گرفته است. در این مطالعه پس از مقیاس‌گامی دینامیکی، مقادیر بارش مدل اقلیمی منطقه‌ای به روش تبدیل مقیاس خطی (LS) تصحیح‌اریبی شدند. نتایج نشان دادند که در مقیاس سالانه در یک‌سوم جنوبی کشور در هیچ یک از سناریوها-دوره‌های آینده (چهار حالت) جهت کاهشی بارش مشاهده نشد و بین ۷ تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد؛ در مقابل، در دو ناحیه دیگر هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهشی (بین ۲-٪ تا ۷+٪ درصد) مشاهده می‌شود. مهمترین یافته‌ها برای بارش‌های در مقیاس فصلی به اینصورت است که در فصل بهار

کم‌فشار مدیترانه در دوره‌های اخیر روند افزایشی داشته است که نشان از تضعیف سیلکون‌زایی در این منطقه می‌باشد که



شکل ۷- پیش‌نگری تغییرات فصلی و سالانه بارش در شمال، مرکز و جنوب کشور طبق دو سناریوی مختلف

Figure 7- Seasonal and annual precipitation changes (%) in the north, center and south of the Iran

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش برآورد بارش ایران در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) در دو حالت انتشار میانه و زیاد (بدبینانه) گازهای گلخانه‌ای با استفاده از مقیاس‌گامی دینامیکی است. در مطالعات انجام شده در کشور از روش‌های مقیاس‌گامی آماری برون‌داد مدل‌های به‌روز CMIP6 استفاده شده است، لذا در این پژوهش تغییرات بارش کشور از دیدگاه مقیاس‌گامی دینامیکی مورد بررسی قرار

قرار دارد، نیاز است برنامه‌ریزی‌های لازم برای سازگاری با و کاهش پیامدهای سوء کاهش منابع آبی انجام گیرد. از طرفی افزایش نسبی بارش در نواحی جنوبی کشور نیاز به برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آبی با توجه به نوع بارش‌ها در منطقه است. نویسندگان این مقاله در نظر دارند تا با دریافت داده‌های شرایط مرزی سایر مدل‌های اقلیمی جهانی و سناریوهای انتشار، جزئیات بیشتری از الگوی بارش آینده کشور را شناسایی کنند.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب پروژه داخلی سازمان هواشناسی کشور و با استفاده از امکانات آزمایشگاه مدل‌سازی اقلیمی پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد و مشارکت علمی گروه فیزیک هوا و اقلیم مرکز بین‌المللی فیزیک نظری عبدالسلام در ایتالیا (ICTP) انجام شده است. بدینوسیله از مراجع فوق‌قدردانی می‌شود.

منابع

- Aghakhani Afshar, A., Hassanzadeh, Y., Besalatpour, A. A., Pourreza Bilondi, M. 2017. Annual assessment of Kashafrood watershed basin climate components in future periods by using fifth report of intergovernmental panel on climate change. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 217-233. (In Farsi)
- Alijani, B. 2010. *Climate of Iran*. Payam-noor University Press, Ed. 10, 221p. (In Farsi)
- Alijani, B., Mahmoudi, P., Chogan, A. J. 2012. A study of annual and seasonal precipitation trend in Iran using a non-parametric method. *Journal of climate research*, 3(9), 106-105.
- Alizadeh-Choozari, O., Marjani, S., Qadimi, M. 2019. Performance of the Regional Climate Model version 4 (RegCM4) with different physical parameterizations over Iran: A case study in 2010. *Iranian Journal of Geophysics*, 13(1), 132-151. (In Farsi)
- Babaeian, I., Karimian, M., Modirian, R. 2021. Optimum configuration of RegCM4. 7 model in prediction of weekly cumulative precipitation during three extreme precipitation events of March-April 2019. *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 48-60. (In Farsi)
- Babaeian, I., Karimian, M., Madirian, R., Habibi Nokhandan, M. 2007. Simulating the precipitation of the cold months of 2016 and 2019 using the

به استثنای آینده میانی - سناریوی بدبینانه، در سایر دوره - سناریوها جهت بارش افزایشی است که بیشترین افزایش در نواحی جنوبی کشور متمرکز بوده و در مرکز و شمال کشور تغییرات در بازه نرمال قرار دارد. در فصل تابستان، به استثنای آینده نزدیک - سناریوی بدبینانه، در سایر دوره - سناریوها بارش در جنوب و شرق کشور جهت افزایشی دارد و در مقابل در نواحی غربی کشور جهت تغییرات بارش کاهشی است. بارش کشور در فصل پاییز طبق سناریوی میانه جهت کاهشی ولی طبق سناریوی بدبینانه جهت افزایشی دارد. در فصل زمستان جهت بارش در تمامی مدل - سناریوها در جنوب غرب کشور افزایشی، غرب کاهشی و در سایر نواحی در بازه نوسانات نرمال یا بی‌تغییر است. بی‌تغییر بودن بارش در آینده در این مناطق نسبت به دوره پایه مزیتی به شمار نمی‌رود زیرا افزایش دمای پیش‌نگری شده (Zarrin and Dadashi Roudbari, 2020) می‌تواند خشکسالی‌های بارش - دما - پایه را تشدید کند. یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش‌های پنجم و ششم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2014; IPCC, 2022) تطابق به نسبت زیادی دارد. (Rahimi et. Al., و Raziei, (2017) (2012) نشان دادند که مناطق اقلیمی ایران به ویژه در شمال غرب و استان‌های ساحلی خزر در دوره‌های آینده و در سناریوهای میانه تا بدبینانه تغییر خواهند کرد، به طوریکه در انتهای قرن ۲۱ اقلیم معتدل غرب کشور جای خود را به اقلیم نیمه بیابانی خواهد داد. با این حال، نتایج این پژوهش با یافته‌های (Sadeqi and Dinpashoh, (2020) مبنی بر افزایش بارش زمستان در ایستگاه تبریز (شمال غرب) مطابق ندارد اما با کاهش آن در بهار و پاییز هماهنگی دارد. همچنین با یافته‌های (Gholampour et al., (2020) مبنی بر کاهش یا بی‌تغییر بودن آن در استان کردستان (غرب کشور) و (Aghakhani et al., (2017) در خصوص کاهش بارش در حوضه کشف‌رود (شمال شرق) هماهنگی دارد. (Tavangar et al., (2019) نشان دادند که تغییرات فصلی بارندگی طی دوره های آینده در سواحل خزر به گونه‌ای خواهد بود که در فصل زمستان افزایش و در فصل تابستان کاهش بارش رخ خواهد داد؛ در حالیکه بر اساس نتایج این تحقیق تغییرات بارش در مناطق ساحلی خزر عمدتاً بی‌تغییر برآورد شده است. با توجه به اینکه بیشترین حجم منابع آبی کشور در محور غربی کشور

- L. C., Brankovic, C. 2012. RegCM4: model description and preliminary test over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7-29
- Hamidianpour, M., Mofidi, A., Salighe, M. 2016. Analysis of the nature and structure of Sistan wind. *Iranian Journal of Geophysics*, 10(2), 83-109. (In Farsi)
- Hosseini, F., Faridhosseini, A., Hashemina, S. M., Zarrin, A. 2018. The effect of revised topography dataset on improvement of RegCM4 model results (Case study: northern of Iran). *Journal of Agricultural Meteorology*, 5(2), 24-34. (In Farsi)
- IPCC. 2014. *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, 151 pp.
- IPCC. 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* [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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Irannejad, P., Ahmadi-Givi, F., Pazouki, R. 2009. The role of convection parameterization in the simulation of the winter temperature and precipitation fields over Iran using Regional Climate Model (RegCM3). *Journal of the Earth and Space Physics*, 35(1), 101-120. (In Farsi)
- Jungclaus, J. H., Fischer, N., Haak, H., Lohmann, K., Marotzke, J., Matei, D., et al. 2013. Characteristics of the ocean simulations in MPIOM, the ocean component of the MPI-Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 422-446.
- Karkhaneh, M., Mofidi, A., Zarrin, A. 2016. Simulation the role of Caspian Sea in regional precipitation in southern Caspian Sea. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 6(18), 153-168. (In Farsi)
- Khayatian Yazdi, F., Kamali, G., MirRokni, S. M., Memarian, M. H. 2020. Sensitivity and uncertainty analysis of the different parameterization schemes in regional climate model RegCM4.5 for simulation of air temperature and precipitation over North and West of Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 2(4), 296-318. (In Farsi)
- RegCM3 climate model. *Geography and Development*, 5(10), 55-72. (In Farsi)
- Babaeian, I., Karimian, M., Medirian, R. 2014. Simulation of monsoon rains in Southeast Iran using RegCM3 regional climate model. *Numerical Weather Forecasting Conference*, 30 Azar 2014, Tehran. (In Farsi)
- Babaeian, I., Karimian, M., Modiriyan, R., Falamarzi, Y., Koochi, M. 2021. Future Precipitation and Temperature Projection over Eastern Provinces of Iran using Combined Dynamical-Statistical Downscaling Technique. *Climate Change Research*, 2(5), 41-58. (In Farsi)
- Babaeian, I., Madirian, R., Karimian, M. 2016. Investigation and simulation of seasonal rainfall in Khorasan using the numerical model RegCM3 in the period 2000-1991. *Climatology Research Institute project*, 120 pages. (In Farsi)
- Basati, S., Yarahmadi, D., Nasiri, B., Rafati, S. 2018. Interaction of Zagros heights effects on precipitation and wind vertical velocity of convective systems in the west of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(18), 69-88. (In Farsi)
- Eghbali, A., Babaeian, I., Azadi, M., Habibi Nokhandan, M., Zarrin, A. 2022. Optimal configuration of RegCM4.5 model for rainfall forecasting in Iran based on climatic zones (November-May), Case study: 2019-2014. *Journal of Climate Research*, 1401(49), 1-14. (In Farsi)
- Javanshiri, Z., Pakdaman, M., Falamarzi, Y. 2021. Homogenization and trend detection of temperature in Iran for the period 1960-2018. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1233-1250.
- Gahreman, N., Babaeian, I., Mousavi, M. 2016. Evaluation of the RegCM regional model in estimating potential evapotranspiration during the past climate and the period of 2021-2035: Case study of Mashhad. *Iranian Journal of Geophysics*, 8(4), 49-64. (In Farsi)
- Gholampour Shemami, Y., Majnoun Hosseini, N., Bazrafshan, J., Sharifzadeh, F., Kanouni, H. 2020. Assessing Precipitation and Reference Potential Evapotranspiration in the Current Climate and under CORDEX Climate Change Projections in Major Drylands Region of Kurdistan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2583-2594. (In Farsi)
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Guttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zakey, A. S., Steiner, A. L., Stordal, F., Sloan,

- century. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(2), 419-439. (In Farsi)
- Sabziparvar, A. A., Ebrahimzadeh, S. 2019. Sensitivity analysis of convective RegCM4 schemes in simulation of precipitation for west Iran by using CSIRO-MK36 dataset. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 51-69. (In Farsi)
- Sadeqi, A., Dinpashoh, Y. 2020. Projection of Precipitation and its Variability under the Climate Change Conditions in the Future Periods (Case Study: Tabriz). *Environment and Water Engineering*, 5(4), 339-350. (In Farsi)
- Soltanzadeh, I., Irannezhad, P., Ahmadi Givi, F. 2007. A three-month study of the effects of zagros mountain range on mesoscale currents in east of zagros using regional model, RegCM. *Journal of the Earth and Space Physics*, 33(1), 31-50. (In Farsi)
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., et al. 2013. Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 146– 172.
- Taghiloo M, Alijani B, Asakereh H. 2019. Investigation of the efficiency of Regional Climate Model (RegCM 4.3) in simulation of temperature and precipitation data in Iran during 2010-2015. *Journal of Geographical Space*, 19(68). (In Farsi)
- Tavangar, S., Moradi, H., Massah Bavani, A. R. 2019. Climate change effect on the rainfall amount and intensity in the southern coast of the Caspian Sea. *Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 190-204. (In Farsi)
- Torabi Poudeh, H., Izadjoo, F., Hamezade, P. 2018. The trend changing analysis of total and effective rainfall in Iran. *Iranian Water Researches Journal*, 12(4), 1-10. (In Farsi)
- Zarrin, A., Dadashi Roudbari, A. A. 2020. Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 583-602. (In Farsi)
- Zou, L., Zhou, T. 2022. Mean and extreme precipitation changes over China under SSP scenarios: results from high-resolution dynamical downscaling for CORDEX East Asia. *Climate Dynamics*, 58, 1015–1031.
- Mashari, S., Babaeian, I., Nohegar, A., Ershadi, S. 2018. Projection changes in the flood plain under the Shandiz basin of Mashhad in the 2030s by the climate-hydrological system under global warming, the second national climate conference of Iran, May 19, 2017, Ferdowsi University of Mashhad. (In Farsi)
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., Alvarado-Gamboa, L.F. 2020. Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water*, 12(2), p.482.
- Miri M, Azizi G, Mohamadi H, Pourhashemi M. 2017. Evaluation statistically of temperature and precipitation datasets with observed data in Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 10 (35), 39-50. (In Farsi)
- Modirian, R., Babaeian, I., Karimian, M. 2010. The Optimum Configuration of RegCM3 Model for Simulation of Precipitation and Temperature at Autumn Seasonal over Khorasan Region in 1991-2000. *Physical Geography Research Quarterly*, 41(70), 107-120. (In Farsi)
- Modirian, R., Babaeian, I., Karimian, M. 2007. Numerical simulation of precipitation and temperature over east of Iran using RegCM3. *Nivar*, 32(66-67), 7-25. (In Farsi)
- Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., Bunzel, F., Esch, M., Ghosh, R., Haak, H., Ilyina, T., Kleine, T., Kornblueh, L., Li, H., Modali, K., Notz, D., Pohlmann, H., Roeckner, E., Stemmler, I., Tian, F., Marotzke, J. 2018. A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 1383– 1413.
- Rahman MT., Ahasan N., Mannan A., Sigdel M., Shrestha D., Shrestha A., Aryal D., Rabbani KG. 2021. Simulation of Rainfall over Bangladesh Using Regional Climate Model (RegCM4.7), *JALAWAAYU*, Vol. 1(2).
- Rasuli, A. A., Rosjani, R., Ghasemi, A. R. 2012. Time series analysis of the pressure of the synoptic pattern centers affecting on seasonal precipitation of Iran, *Journal of Geography and Development*, 10(27), 77-88. (In Farsi)
- Raziei, T. 2017. Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th



Projection of Iran's precipitation during 2026-2075 by dynamical downscaling by RegCM4.7 under SSP scenarios

I. Babaeian^{1*}, G. Giuliani², R. Modirian³, M. Karimian³

Received: 08/07/2022

Accepted: 09/08/2023

Abstract

Precipitation is the most important source of water supply for the agricultural sector, which is unevenly distributed across the country based on the long-term average. In this research, the MPI-ESM1.2-HR Earth System Model boundary condition data has been used for dynamically downscaling by RegCM4.7 regional climate model to project the country's average precipitation in the future period of 2026-2075 based on the SSP scenarios. Dynamical downscaling was performed according to SSP2-4.5 and SSP5-8.5 Shared Socio-economic Pathway scenarios from the primary horizontal resolution of 100×100 to 30×30 km. Precipitation projected by the regional climate model was bias corrected using the Linear Scaling (LS) method. In bias correction process, CRU gridded observation data and dynamically downscaled precipitation values in the historical period of 2000-2014 were used. The results showed that the annual precipitation in the southern third of the country will be increased by 7 to 15% in all future periods and SSP scenarios, when comparing to the mean observation period. However, in the northern and central third of the country, both increasing and decreasing changes in precipitation (between -2% and +7%) were projected. In the spring and summer seasons, the precipitation is mainly increasing, with the largest increase in the spring in the southern regions and in the summer in the south and east of the country. On the other hand, in the western regions of the country, the precipitation is projected to decrease. In the autumn season, the country's precipitation is decreasing (increasing) based on SSP2-4.5 (SSP5-8.5). In the winter season, in all model-scenarios, the direction of precipitation change is increasing in the southwest of the country, decreasing in the west, and in other areas within the range of normal fluctuations.

Keywords: Precipitation, Downscaling, CMIP6, RegCM4.7, MPI-ESM1.2-HR



¹ Associate professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Climate Research Institute, Mashhad, Iran.

(*Corresponding Author Email Address: i.babaeian@gmail.com)

² Earth System Physics Section, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Italia.

³ Research Assistant, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Climate Research Institute, Mashhad, Iran.

نحوه ارجاع مقاله:

بابائیان، ا.، گیولینی، گ.، مدیریان، ر.، کریمیان، م. ۱۴۰۳. پیش‌نگری بارش ایران در دوره ۲۰۲۶-۲۰۷۵ با استفاده مقیاس‌گاهی دینامیکی توسط مدل

منطقه‌ای RegCM4.7 طبق سناریوهای SSP. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۲(۱): ۲۰-۳۴. DOI: 10.22125/agmj.2023.405388.1155

Babaeian, I., Giuliani, G., Modirian, R., Karimian, M. 2024. Projection of Iran's precipitation during 2026-2075 by dynamical downscaling by RegCM4.7 under SSP scenarios. Journal of Agricultural Meteorology, 12(1): 20-34. DOI: 10.22125/agmj.2023.405388.1155