

ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) در ایران

حسن رضایی^۱، حجت‌الله پاشاپور^۲، فرشید صادقی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

چکیده

پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در برنامه‌ریزی‌ها و مخاطرات محیطی از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در این پژوهش به پیش‌نگری آینده تغییرات دما و بارش در ایران پرداخته شد. بدین‌منظور از داده‌های دما و بارش ۶۰ ایستگاه همدیدی با پراکنش مناسب در سطح کشور و همچنین داده‌های هشت الگوی CMIP6 تحت سه سناریوی خط سیر اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP1-2.6، SSP3-7.0، SSP5-8.5) با کاربست روش اصلاح اریبی مقیاس‌بندی خطی (LSBC) بهره گرفته شد و پس از ارزیابی الگوها با استفاده از سنج‌های RMSE، MAE و R2 و انتخاب الگوی بهینه به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۳۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۲) پرداخته شد. نتایج نشان داد که روش LSBC توانایی لازم جهت شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در منطقه مورد مطالعه را دارد. براساس نتایج از بین الگوهای گوناگون CMIP6 مورد بررسی، مدل‌های MPI-ESM1-2- و MRI-ESM2-0 به ترتیب بهترین عملکرد را در زمینه شبیه‌سازی بارش و دما در کشور دارند. نتایج حاصل از پیش‌نگری تغییرات دما و بارش نیز نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، دما بین ۱/۱ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین تغییرات آن مربوط به مناطق شرقی و سپس جنوبی و مرکزی کشور است. کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی سردسیر در غرب و شمال غرب کشور است. اما براساس نتایج، میزان بارش در منطقه مورد مطالعه بین ۱۲ تا ۲۸ درصد کاهش پیدا خواهد کرد که بیشترین تغییرات آن مربوط به نواحی شرقی و مرکزی کشور و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی غربی و شمال غربی کشور است. در مجموع براساس نتایج میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه به‌طور متوسط در کشور به میزان ۱۸/۵ درصد کاهش و دما به میزان ۱/۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، اصلاح اریبی، ایران، CMIP6، SSP.

۱. استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه افسری امام علی (علیه‌السلام)، تهران، ایران (نویسنده مسئول) rezaei_hasan63@yahoo.com

۲. استادیار دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران geo.pashpour@yahoo.com

۳. دانش‌آموخته دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران sadeghi.f@gmail.com

مقدمه

با جدی شدن بحث تغییر اقلیم در دنیا، مطالعه پارامترهای اقلیمی و پیش‌نگری تغییرات آن در دوره‌های آینده به‌صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷). فرایند تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات دما و بارش مهم‌ترین بحث در قلمرو علوم محیطی است. این پدیده به‌دلیل ابعاد علمی و کاربردی آن (اثرات محیطی و اقتصادی-اجتماعی) از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است، چراکه سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌نمایند (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین بررسی تغییرات دما و بارش در سال‌های آینده می‌تواند راهگشای معضلاتی چون خشک‌سالی، سیلاب‌های ناگهانی، تبخیر زیاد و تخریب‌های زیست‌محیطی باشد (شائمی و حبیبی نوخندان، ۱۳۸۸). روش‌های مختلفی برای انجام این کار وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های الگوهای‌های گردش کلی جو (GCM) هستند که در حال حاضر قوی‌ترین ابزار به‌منظور تولید سناریوهای اقلیمی می‌باشند. همچنین این الگوها واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه‌ای و نیز سناریوهای اقلیمی آینده را برای سراسر کره زمین شبیه‌سازی می‌کنند (IPCC, 2013). الگوهای GCM متعددی توسعه یافته است و به‌دلیل تفاوت ساختار این مدل‌ها و تفاوت شرایط اولیه‌ای که تحت آن اجرا می‌شوند، نتایج آن‌ها حتی برای یک سناریوی انتشار یکسان، متفاوت است؛ لذا برای استفاده در مطالعات منطقه‌ای، لازم است خروجی این مدل‌ها با استفاده از یک روش مناسب ریزمقیاس‌گردانی شود (Kay et al, 2009). در واقع خروجی‌های این الگوها دارای دقت مکانی پایینی هستند. لذا در صورتی که به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرند، باعث افزایش عدم قطعیت می‌شود. به‌همین منظور برای افزایش دقت مکانی این داده‌ها از روش‌های ریزمقیاس‌گردانی استفاده می‌شود که به روش‌های آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند (Beecham et al, 2014). براساس بررسی‌ها به‌منظور ریزمقیاس‌گردانی داده‌های اقلیمی بیشتر از روش‌های آماری استفاده می‌کنند (Wilks and Wilby, 1999). یکی از دلایل استفاده از این الگوها، عملکرد سریع و آسان آن‌ها نسبت به سایر روش‌ها است (Dibike & Coulibaly, 2005, Kilsby et al, 2007). در دهه‌های اخیر، تحقیقات وسیعی در زمینه پیش‌بینی‌های بلندمدت و میان‌مدت دما و بارش در نقاط مختلف جهان انجام شده است. به‌طوری که، براساس نتایج حاصل از مطالعات تغییر اقلیم در حوضه دریای مدیترانه وجود رابطه بین افزایش دما و کاهش بارش و کمبود آب و

افزایش خطر آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه به اثبات رسیده است (Panol and Loret, 1998). همچنین طبق گزارش‌ها، تغییر اقلیم باعث ایجاد تغییر در رژیم هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده به گونه‌ای که بارندگی و جریان‌های سطحی در عرض‌های جغرافیایی بالا و میانی بیشتر و در عرض‌های پایینی کمتر شده و احتمال مواجهه با رخداد‌های جدی اقلیمی مانند سیلاب و خشک‌سالی افزایش یافته است (Lane et al, 1999). بنابراین بررسی تغییرات و پیش‌نگری دما و بارش می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ سیاست‌های راهبردی آینده مدیریت منابع آب و کشاورزی باشد (Hardy, 2003). در این راستا جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌نگری تغییرات بارش در آسیای مرکزی براساس ۱۵ الگوی CMIP6 تحت چهار سناریوی SSP پرداختند؛ نتایج براساس تمام سناریوها افزایش میانگین بارندگی سالانه را برآورد نمود. کین و همکاران (۲۰۲۱) به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در شمال غربی چین با استفاده از پنج الگوی CMIP6 پرداختند؛ نتایج نشان داد که الگوهای CMIP6 می‌توانند دما را بهتر از بارش شبیه‌سازی کنند. پیش‌بینی‌ها نیز نشان داد که میانگین دما و بارش افزایش پیدا خواهد کرد. مسگری و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی عملکرد الگوهای CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات بارش در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا پرداختند؛ نتایج نشان داد که از بین ۱۱ الگوی مورد بررسی، الگوی MPI-ESM1-2-HR بهترین عملکرد را در منطقه مورد مطالعه دارد. وانگ و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی عملکرد الگوهای CMIP6 و CMIP5 در شبیه‌سازی تغییرات بارش در حوضه رودخانه هانجیانگ پرداختند؛ نتایج نشان داد که الگوهای CMIP6 در شبیه‌سازی بارش لزوماً بهتر از الگوهای قبلی یعنی CMIP5 عمل نمی‌کنند. اما در مقایسه با هر الگوی دیگری عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. مجد و همکاران (۲۰۲۲) به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا با استفاده از ترکیب ۲۳ الگوی CMIP6 تحت دو سناریوی SSP پرداختند؛ نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در بیشتر مناطق مورد مطالعه است. پالمرو و همکاران (۲۰۲۳) یک ارزیابی مبتنی بر عملکرد الگوهای CMIP6 برای اروپا ایجاد کردند که می‌توان از آن برای اطلاع‌رسانی الگوهای منطقه استفاده کرد. جیاویرا و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان حداکثر بارندگی سالانه در زمان طوفان-ها در قاره استرالیا را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که افزایش در مدت‌زمان کوتاه (کمتر از یک ساعت)، حداکثر بارندگی سالانه بیشتر از افزایش حداکثر سالانه طولانی‌مدت (بیشتر از یک

ساعت) در سراسر استرالیا از سال ۱۹۶۷ تا ۲۰۲۱ است. همچنین رویدادهای با شدت نادرتر بیشتر از رویدادهای مکرر افزایش یافته است. بزی و همکاران (۱۴۰۰) به برآورد تبخیر از سطح چاه‌نیمه‌های سیستم با استفاده از الگوی SDSM و سناریوهای وادشت تابشی (RCP) پرداختند، نتایج نشان داد که میزان تبخیر در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۰ افزایش بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال را تجربه خواهد کرد. کوهی و همکاران (۱۴۰۱) به پیش‌نگری خشک‌سالی با استفاده از سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP)^۱ در حوضه آبخیز کارون پرداختند؛ نتایج نشان داد که در دوره آینده مناطق شمالی، شمال‌غرب و غرب حوضه آبریز کارون بیشتر در معرض شرایط خشک قرار خواهند داشت. حسینی و همکاران (۱۴۰۲) سه الگوی CMIP6 با کاربست الگوی مقیاس‌کاهی SDSM را در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در شهرستان سقز مورد ارزیابی قرار دادند؛ نتایج نشان داد که الگوی MPI-ESM1-2-HR از دقت بیشتری نسبت به سایر الگوها در شبیه‌سازی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه برخوردار است. محمدی و همکاران (۱۴۰۳) به پیش‌نگری تغییرات بارش با استفاده از الگوهای CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران پرداختند. نتایج نشان داد که براساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 میزان بارش تا پایان قرن ۲۱ به ترتیب ۱۴/۵ و ۳/۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد.

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش ششم ارزیابی خود از سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) استفاده کرد تا بتواند تجزیه و تحلیل یکپارچه تأثیرات اقلیمی، آسیب‌پذیری‌ها، سازگاری و کاهش آتی آن را تسهیل کند. لذا با توجه به اهمیت تغییرات اقلیمی در این پژوهش به ارزیابی الگوهای CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سه سناریوی SSP در ایران پرداخته شد.

مبانی نظری

ابعاد نظامی و امنیتی تغییر اقلیم

کارکنان نظامی براساس اقتضای شغلی یکی از بیشترین و مستعدترین گروه‌هایی هستند که به‌طور مستقیم تحت تأثیر گرمایش جهانی قرار می‌گیرند و تغییر اقلیم و افزایش دما می‌تواند مشکلات بهداشتی متعددی از جمله استرس گرمایی و عوارض مربوط به آن را برای شاغلین به‌ویژه شاغلین محیط‌های روباز ایجاد نماید (Crowe, 2009).

افزایش میانگین دمایی می‌تواند منجر به پیدایش روزهای گرم‌تر و موج‌های گرمایی طولانی‌تر و مکرر شود. این امر به نوبه خود می‌تواند باعث افزایش بیماری‌های مرتبط با گرما همچون گرم‌زدگی، کرامپ گرمایی، ضعف گرمایی و حتی در موارد پیشرفته باعث مرگ شود (امینی و رضائی، ۱۴۰۱). این اثرات احتمالاً در نواحی گوناگون و براساس حساسیت‌پذیری افراد جامعه، مقدار و طول مدت مواجهه و همچنین توانایی افراد در برقراری سازش با تغییرات دمایی متفاوت خواهد بود. چنانچه افزایش دمایی همراه با افزایش رطوبت محیط برای چندین روز متوالی اتفاق بیفتد (موج گرمایی) و یا دما در شب کاهش محسوسی پیدا نکند، مواجهه با گرما فوق‌العاده کشنده خواهد بود (حیدری و همکاران، ۲۰۱۵). گرما و استرس‌های مربوطه به آن می‌تواند باعث افزایش سطح تلاش درک‌شده توسط فرد و کاهش ظرفیت کار فیزیکی گردد؛ همچنین افزایش دمای عمقی بدن در طول مواجهه با گرما می‌تواند باعث افزایش ریسک ابتلا به عوارض و بیماری‌های ناشی از گرما گردد (Abbiss, Peiffe & 2013).

بسیاری از مردم به واسطه تأثیرات آب‌وهوایی و بلایای طبیعی به‌اجبار از خانه‌های خود آواره می‌شوند و برای زنده‌ماندن به مهاجرت‌های اجباری تن می‌دهند و این‌چنین، چالش جهانی پناهندگی آب‌وهوایی پدید می‌آید. پناهنده آب‌وهوایی مفهومی است که در رسانه‌ها و گفتگوها به‌کار می‌رود، ولی در حقوق بین‌الملل اسمی از آن برده نشده است. این چالش جهانی، بسیاری از موضوعات مهم و اساسی که جامعه جهانی باید با آن روبه‌رو شود را ایجاد خواهد کرد و ادامه خواهد یافت (بیات و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۷۹).

مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۹ توسط مؤسسه جهانی اقتصاد و صلح^۱ روی همه کشورها انجام شده است، نشان داد که خاورمیانه و ایران با تهدیدهای متعدد اکولوژیکی درگیر هستند. در این مطالعه شاخصی به اسم تهدیدهای اکولوژیکی ثبت شده^۲ برای کشورهای مختلف تعریف شده است که نشان می‌دهد، ایران در بین ۲۰ کشور جهان با بیشترین خطرات اکولوژیکی قرار دارد؛ نمره این شاخص برای ایران چهار است، هرچه این عدد بالاتر باشد تعداد تهدیدهای اکولوژیکی هم برای یک کشور بیشتر است (بیات و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۱۶۴).

1 - Institute for Economics and Peace (IEP)

2 - Ecological Threat Register (ETR)

تغییرات اقلیمی در سده‌های گذشته در ایران پیامدهای مخربی داشته است. ایران با واقع شدن در کمربند خشک جهان، در دوده گذشته با خشک‌سالی، بحران ریزگردها، تشدید مهاجرت، سیل، آلودگی هوا، تخریب محیط‌زیست، گرمای شدید، پدیده یخبندان و سرمای مفرط و ... مواجه شده است. زندگی در اصفهان به زاینده‌رود وابسته است، ولی سال‌هاست زاینده‌رود در اصفهان گم شده یا به ندرت پیدا می‌شود. سرچشمه زاینده‌رود از شهرها و استان‌های پیرامونی مثل چهارمحال بختیاری، بلداجی، سامان، فریدون‌شهر و... در داخل کشور است. تغییرات میزان آب‌دهی و کاهش حجم آب رودخانه، زندگی سکونتگاه‌های انسانی و جمعیتی که به آنها وابسته است را تحت تأثیر قرار داده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۴، ص. ۲۱). تصمیم‌سازی برای زاینده‌رود و تعیین حقابه سکونتگاه‌های وابسته به آن، تنها یک نظم، یک حاکمیت و یک بازیگر کلان می‌طلبد و آن ساختار دولتی ج.ا.ایران (رهبری، شورای عالی امنیت ملی، ریاست جمهوری، استان‌های چهارمحال بختیاری، خوزستان و اصفهان و...) است. در واقع جدا از هر مسأله و تنگنای دیگر، مانند تغییر اقلیم، تغییر رژیم بارش، خشک‌سالی و ترسالی، حل این مسأله یا تنگنا در کنترل و هدایت مدیریت تک‌ساختی و یک‌نظمی است (بیات و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۱۶۱).

آینده‌پژوهی

آینده‌پژوهی در شکل دادن به آینده‌های منافع اجتماعی که ارزش‌های ذاتی و ابزاری را به ارمغان می‌آورد بسیار مهم است (Mao et al, 2020, p. 2). امروزه متون نظری برنامه‌ریزی از مفاهیم پیش‌بینی و آینده‌نگری عبور کرده و به حوزه آینده‌پژوهی یا آینده‌نگاری که وظیفه‌اش معماری آینده می‌باشد، رسیده است (فرج‌پور و همکاران، ۱۳۹۴، ص. ۲). آینده‌پژوهی مشتمل بر مجموعه تلاش‌های نظام‌مندی است که با استفاده از تجربه و تحلیل منابع، الگوها و عوامل تغییر یا ثبات، به تجسم آینده‌های بالقوه و برنامه‌ریزی برای آنها می‌پردازد (کلهر و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۱۸۸). آینده‌پژوهی، با تشخیص فرصت‌ها و تهدیدهای آینده، با بهره‌گیری از توانایی‌ها و استعداد‌های طیف متنوعی از نیروهای انسانی و مدیریت مؤثر آن، در فضایی اطمینان‌بخش و مشارکتی، آینده مطلوب را رقم می‌زند (حاتمی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۴۲). اولین گام برای ساختن آینده روشن، برنامه‌ریزی است و یک برنامه دقیق دربرگیرنده سه فاکتور مهم است: اولین فاکتور، در نظر گرفتن گذشته از طریق ثبت وقایع و تأثیر آن‌ها در زندگی است؛ دومین فاکتور، تبیین چشم‌اندازی شفاف از آینده و فاکتور سوم، ارائه ایده‌هایی که به کارگیری آن‌ها باعث موفقیت

خواهد شد.

سناریوهای جدید تغییرات آب‌وهوایی تحت عنوان سناریوهای SSPs

سناریوهای SSPs بخشی از چارچوب جدیدی است که جامعه تحقیقاتی در مورد تغییرات آب‌وهوا اتخاذ کرده است تا بتواند تجزیه و تحلیل یکپارچه تأثیرات اقلیمی، آسیب‌پذیری‌ها، سازگاری و کاهش آبی آن را تسهیل کند. کمیت‌های SSP، براساس تلاش مشترک بین انجمن‌های IAV و IAM بنا شده است که در یک سلسله جلسات برگزار شده و مجموعه محدودی از پنج خط داستان SSP را مشخص کرده‌اند. خط داستان‌ها ویژگی‌های اصلی مسیرهای توسعه آینده SSP را توصیف می‌کنند که می‌توان از ابزارهای مختلف الگوسازی برای توسعه کمیت‌های این داستان، از جمله عواملی مانند جمعیت، توسعه اقتصادی، کاربری اراضی و مصرف انرژی استفاده کرد (Nazarenko et al, 2022, p.3).

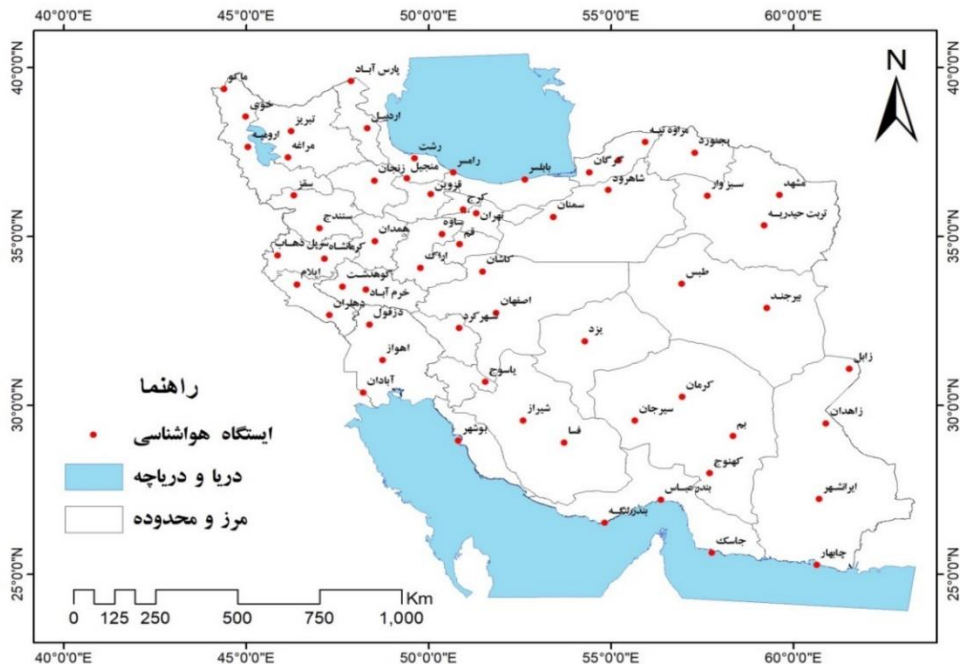
برای هر SSP یک سناریوی جمعیتی و شهرسازی وجود دارد که توسط مؤسسه بین‌المللی تجزیه و تحلیل سیستم‌های کاربردی (IIASA) و مرکز ملی تحقیقات جوی (NCAR) تهیه شده است. برای تولید ناخالص داخلی، سه تفسیر جایگزین از SSP توسط تیم‌های سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD)، مؤسسه بین‌المللی تجزیه و تحلیل سیستم‌های کاربردی (IIASA) و مؤسسه پوتسدام^۱ برای تحقیقات تأثیر آب‌وهوا (PIK) تهیه شده است (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). پیش‌بینی تولید ناخالص داخلی مبتنی بر مفروضات هماهنگ برای تفسیر خطوط داستانی SSP از عوامل اصلی رشد اقتصادی است. با این حال با توجه به روش و نتایج به‌کاررفته متفاوت هستند. توصیه می‌شود برای پیش‌بینی حساسیت نتایج به‌دلیل فرض‌های مختلف تولید ناخالص داخلی از پیش‌بینی‌های تولید ناخالص داخلی استفاده شود (Doelman et al, 2018, p. 121).

روش پژوهش

این پژوهش از نظر ماهیت، اسنادی- آماری است و از نظر نوع تحقیق، یک تحقیق کاربردی محسوب می‌شود. زیربنای این پژوهش، استفاده از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی با دوره آماری بلندمدت به‌صورت روزانه می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های همدیدی با دوره آماری ۳۰ساله متناسب با دوره پایه الگوها (۲۰۲۲-۱۹۹۲) استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های

هواشناسی مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است که شامل ۶۰ ایستگاه همدیدی با پراکنش مناسب در سطح کشور و دارای دوره آماری ۳۰ سال می‌باشد.

آمار لازم برای بررسی تغییرات اقلیمی دوره ۳۰ ساله برای الگوهای CMIP6 از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ به‌عنوان دوره تاریخی از تارنمای ESGF و داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. در این پژوهش ابتدا به ارزیابی عملکرد الگوهای CMIP6 منتخب و روش اصلاح اربیی پرداخته شد و پس از انتخاب الگو با عملکرد بهتر به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در دوره آینده (۲۰۳۱-۲۰۵۰) تحت سناریوهای مختلف SSP پرداخته شد و تغییرات دما و بارش نسبت به دوره پایه بررسی شد. در ادامه به شرح روش‌های مورد بررسی در این پژوهش پرداخته می‌شود.



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

الگوهای CMIP6 مورد بررسی

در این پژوهش به‌منظور بررسی و پیش‌نگری از داده‌های روزانه دما و بارش از الگوهای مختلف CMIP6 استفاده شد. به‌همین منظور از بین الگوهای مختلف CMIP6، الگوهای با قدرت

تفکیک بالا که هر سه سناریوی موردبررسی ما را در اختیار داشتند، استفاده گردید. مشخصات الگوهای مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. داده‌های روزانه الگوهای CMIP6 برای دوره تاریخی (۲۰۲۲-۱۹۹۲) و دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۳۱) از مرکز ESGF-ESGF (<https://node.llnl.gov/search/cmip6/>) دریافت گردید.

جدول (۱). مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	الگو	مؤسسه / کشور	قدرت تفکیک
۱	MPI-ESM1-2-LR	مؤسسه ماکس پلانک، آلمان	۰/۹×۰/۹
۲	MRI-ESM2-0	مؤسسه تحقیقات جوی، ژاپن	۱/۱×۱
۳	GFDL-ESM4	آزمایشگاه ژئوفیزیک و دینامیک سیالات، ایالات متحده	۱/۲۵×۱
۴	MIROC6	مؤسسه تحقیقات جو و اقیانوس‌شناسی و مؤسسه ملی مطالعات محیطی، ژاپن	۱/۴×۱/۴
۵	MIROC-ES2L	مؤسسه فیزیک جو، چین	۲/۸×۲/۸
۶	FGOALS-g3	مرکز تحلیل و الگوسازی اقلیمی، کانادا	۱×۱
۷	CanESM5	مرکز اقلیم‌شناسی پکن، سازمان هواشناسی، چین	۱/۱×۱/۱
۸	BCC_CSM2_MR		۱/۱۲×۱/۱۲

پس از دریافت داده‌ها، مقادیر پارامترهای مشاهداتی و تاریخی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه با تهیه برنامه در محیط MATLAB با استفاده از نزدیکترین یاخته داده‌های CMIP6 در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۲) استخراج گردید. سپس با استفاده از روش اصلاح اریبی، داده‌ها اصلاح شدند. در ادامه اختلاف بین مقادیر پارامترهای مشاهداتی و تاریخی با استفاده از سنجه‌های مختلف خطاسنجی ارزیابی گردید. پس از صحت‌سنجی و ارزیابی دقت الگوهای مختلف CMIP6، با استفاده از بهترین الگوی CMIP6 تغییرات دما و بارش در دوره آینده پیش‌نگری گردید. دلیل انتخاب الگوهای مذکور از مجموعه الگوهای CMIP6، اعتبار، دقت و در دسترس بودن پارامترها و سناریوهای موردنیاز جهت مطالعه است.

اصلاح اریبی

در این پژوهش جهت اصلاح اریبی داده‌های CMIP6 از رویکرد مقیاس‌بندی خطی (LSBC)^۱

1. Linear Scaling Bias Correction

استفاده شد. اصلاح اریبی براساس میانگین تفاوت بین سری‌های زمانی مشاهده‌شده ماهانه و سری‌های زمانی دوره تاریخی GCM/RCM در همان دوره از سری زمانی مشاهده‌شده است. سپس این تفاوت‌ها برای داده‌های آب‌وهوایی شبیه‌سازی‌شده اعمال می‌شوند (شرستا و همکاران، ۲۰۱۵). رویکرد مقیاس‌بندی خطی (LSBC) با مقادیر اصلاح‌شده ماهانه براساس تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده عمل می‌کند. داده‌های هواشناسی با ضربی براساس نسبت میانگین بلندمدت ماهانه داده‌های مشاهداتی و داده‌های الگو اصلاح می‌شوند. در این حالت شرط بر این است که ضرایب تصحیح اعمال‌شده و افزوده‌ها حتی برای شرایط آبی نیز بدون تغییر باقی می‌مانند. روابط روش اصلاح اریبی LSBC برای دما و بارش به شرح زیر است (توچیان و همکاران، ۲۰۱۲):

$P_{hst,m,d} \times \left[\frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{hst,m})} \right] P_{hst,m,d}^{cor}$	(۱)
$T_{hst,m,d} + \left[\frac{\mu(T_{obs,m}) - T_{hst,m,d}^{cor}}{\mu(T_{obs,m})} \right]$	(۲)

در روابط بالا P بارش، T دما، d روز و m ماه است. cor همان بارش یا دمای اصلاح‌شده است و hst و obs به ترتیب نشان‌دهنده دما یا بارش دوره تاریخی (الگو) و دوره مشاهداتی می‌باشد و u میانگین بلندمدت است. براساس بررسی‌ها با اعمال روش اصلاح اریبی روی داده‌های شبیه‌سازی‌شده، عملکرد الگو در شبیه‌سازی بلندمدت متغیر اقلیمی به مقدار زیادی افزایش می‌یابد (لائو و همکاران، ۲۰۱۸).

سناریوهای مورد بررسی

سناریوهای مربوط به CMIP6 تحت عنوان خط سیر اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) ارائه شده‌اند. سناریوهای SSPs بخشی از چارچوب جدیدی است که جامعه تحقیقاتی در مورد تغییرات آب‌وهوا اتخاذ کرده است تا بتواند تجزیه و تحلیل یکپارچه تأثیرات اقلیمی، آسیب‌پذیری‌ها، سازگاری و کاهش آبی آن را تسهیل کند. کمیت‌های SSP براساس تلاش مشترک بین انجمن‌های IAV و IAM بنا شده است که در یک سلسله جلسات برگزار شده و مجموعه محدودی از پنج خط داستان SSP را مشخص کرده‌اند. خط داستان‌ها، ویژگی‌های اصلی مسیرهای توسعه آینده SSP را توصیف می‌کنند که می‌توان از ابزارهای مختلف الگوسازی برای توسعه کمیت‌های این داستان، از جمله عواملی مانند جمعیت، توسعه اقتصادی، کاربری اراضی و مصرف انرژی استفاده

کرد. پنج سناریوی SSP از SSP1 تا SSP5 وجود دارد که به ترتیب نشان‌دهنده گذر از راه سبز، وسط راه، راه سنگی، راه تقسیم‌شده و اتمام بزرگراه است (زهرائی و حسینی، ۱۳۹۹). سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش شامل سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 است که به ترتیب نشان‌دهنده حد پایین خط سیر انتشار آینده، خط سیر میانه و حد بالای انتشار آینده هستند (جدول ۲).

جدول (۲). سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک مورد استفاده در این پژوهش

سناریو	روایت	چالش‌ها
SSP1-2.6	پایداری - در پیش گرفتن خط سیر سبز (چالش‌های کم برای کاهش و سازگاری)	کم برای کاهش انطباق
SSP3-7.0	رقابت منطقه‌ای - جاده‌های صخره‌ای (چالش‌های بالا برای کاهش و انطباق)	بالا برای کاهش و انطباق
SSP5-8.5	توسعه با سوخت فسیلی - در پیش گرفتن بزرگراه (چالش‌های بالا برای کاهش، چالش‌های کم برای سازگاری)	بالا برای کاهش، کم برای سازگاری

ارزیابی عملکرد الگوهای CMIP6

جهت ارزیابی و تحلیل عملکرد الگوهای مورد بررسی، شاخص‌ها و سنجه‌های عملکردی مختلفی وجود دارد که در ادامه به توضیح مختصری راجع به سنجه‌های مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود.

ضریب تعیین (R^2) معیاری بدون بعد و بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد. رابطه (۳) روش محاسبه آن را نشان می‌دهد (صداقت‌کردار و همکاران، ۱۳۸۷). دومین سنجه مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) است که به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی-شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود. این معیار که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود به عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطاسنجی به کار می‌رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا (MAE) نیز برای مقایسه خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی‌شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری‌شده به کار می‌رود که به صورت رابطه (۵) ارائه می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۱).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_o X_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_o^2 \sum_{i=1}^N X_s^2}} \quad (۳)$$

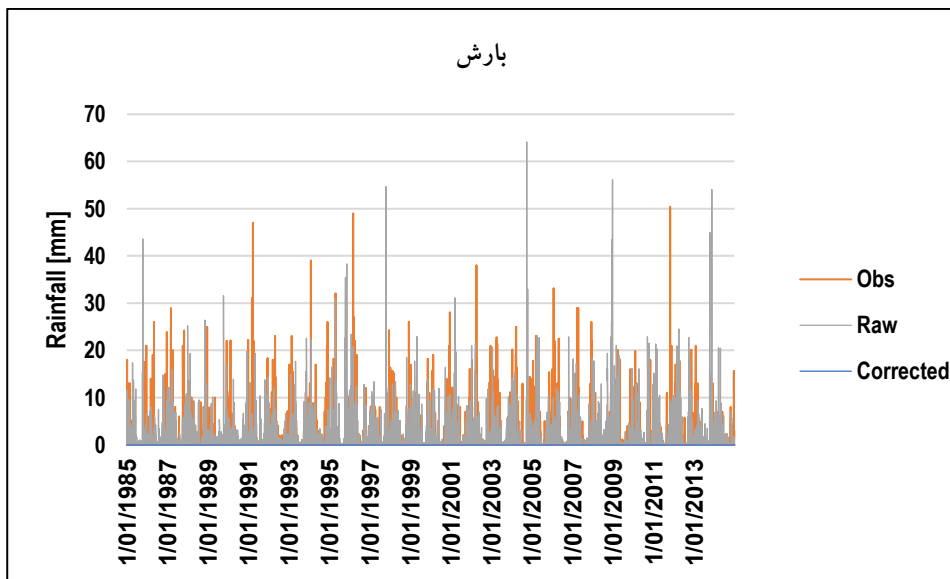
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (۵)$$

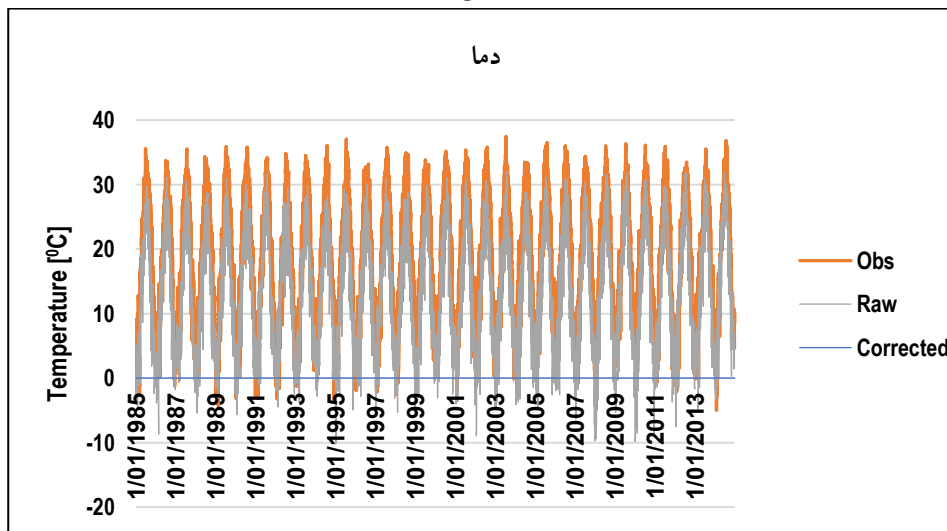
در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

یافته‌های پژوهش

در این پژوهش، هشت الگوی GCMs از پروژه متقابل الگوی جفت‌شده مرحله ششم (CMIP6) مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از اصلاح اریبی به روش LSBC به ارزیابی عملکرد الگوها در شبیه‌سازی دما و بارش در دوره پایه الگوها (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. نمونه‌ای از اصلاح اریبی بر روی داده‌های دما و بارش ایستگاه مهرآباد در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های بارش دارای عدم قطعیت زیادی است، لذا انجام عمل اصلاح اریبی توانسته است به میزان زیادی عملکرد الگو را در شبیه‌سازی بلندمدت بارش در ایستگاه مورد مطالعه افزایش دهد. با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌ها و نمودارهای حاصل، فقط خروجی دما و بارش ایستگاه مهرآباد تهران برای مثال در این بخش ارائه شده است.



شکل ۲. مقادیر مشاهداتی، تاریخی و اصلاح‌شده بارش در ایستگاه مهرآباد در دوره پایه



شکل ۳. مقادیر مشاهداتی، تاریخی و اصلاح‌شده متوسط دما در ایستگاه مهرآباد در دوره پایه

پس از اصلاح اریبی به نتایج حاصل از ارزیابی الگوهای مختلف و سنج‌های خطاسنجی در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. براساس مقادیر $R2$ ، $RMSE$ و MAE ، الگوی MPI-ESM1-2-LR در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه از دقت بیشتری به‌منظور شبیه‌سازی بارش برخوردار است. میزان متوسط $R2$ داده‌های تاریخی این الگو با داده‌های بارش مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه برابر با

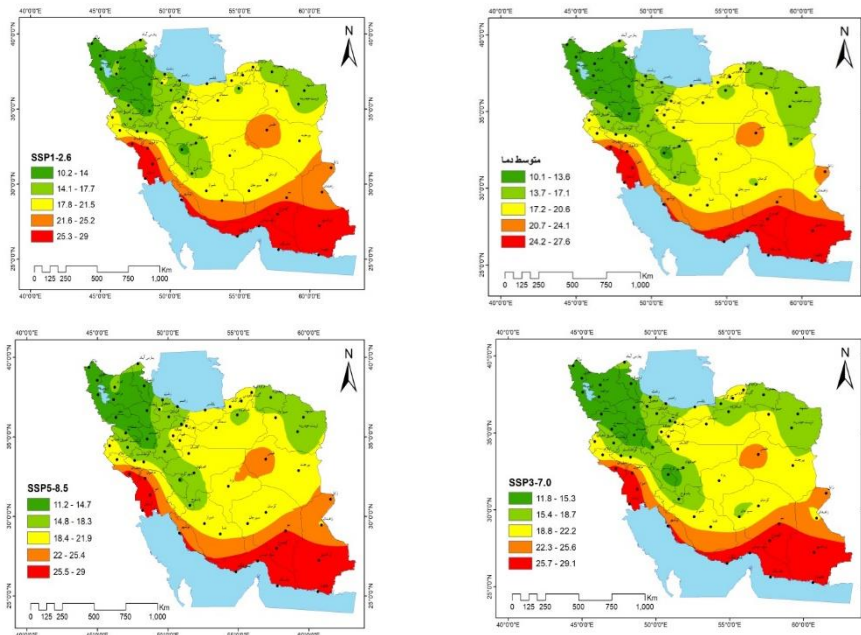
۰/۹۱ و میزان RMSE و MAE آن نیز به ترتیب برابر با ۱۹/۹ و ۱۵/۳ است. در بین الگوهای مورد بررسی نیز الگوی MIROC-ES2L با R2 برابر با ۰/۵۱ ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش در منطقه مورد مطالعه دارند. ارزیابی عملکرد الگوهای CMIP6 در شبیه‌سازی دما در منطقه مورد مطالعه نشان داد که بر مبنای مقادیر RMSE و MAE، الگوی MRI-ESM2-0 در بیشتر پهنه مورد مطالعه از دقت بیشتری برخوردار است. به طوری که میزان متوسط RMSE و MAE این الگو به ترتیب برابر با ۲/۵۵ و ۲/۳۱ و مقدار R2 آن نیز برابر با ۰/۹۹ است. همچون شبیه‌سازی بارش، الگوی MIROC-ESL2 با RMSE برابر با ۶/۷۱ ضعیف‌ترین عملکرد را در بین الگوهای مورد بررسی برای شبیه‌سازی دما دارد. بر اساس نتایج حاصل، دقت اکثر الگوهای مورد بررسی در نواحی پربارش منطقه مورد مطالعه کمتر از مناطق دیگر است و می‌توان بیان کرد تغییرات زیاد بارش، توپوگرافی، سامانه‌های جوی مختلف و ساختار خود الگوها از مهم‌ترین دلایل افزایش خطا در برخی ایستگاه‌ها و مناطق مورد مطالعه است. اما اکثر الگوها در شبیه‌سازی دما به دلیل نوسان کمتر آن دارای خطای کمتری نسبت به بارش هستند. در مجموع در این پژوهش الگوهای MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-L به ترتیب برای پیش‌نگری دما و بارش در دوره آینده انتخاب شدند. نتایج ارزیابی عملکرد الگوهای مورد بررسی با استفاده از سنجه‌های مختلف در شبیه‌سازی دما و بارش در سطح کشور در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. ارزیابی الگوهای CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش بر اساس متوسط سنجه‌های خطاسنجی در کشور

R2		RMSE		MAE		الگو	ردیف
دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش		
۰/۹۹	۰/۹۱	۳/۲۵	۱۹/۹	۲/۹۸	۱۵/۳	MPI-ESM1-2-LR	۱
۰/۹۹	۰/۸۶	۲/۵۵	۲۲/۹۴	۲/۳۱	۱۹/۳۴	MRI-ESM2-0	۲
۰/۹۸	۰/۸۵	۴/۵۳	۲۵/۶	۳/۱۲	۱۷/۲۳	BCC_CSM2_MR	۳
۰/۹۵	۰/۸۵	۵/۶۲	۲۵/۹۱	۴/۷۱	۲۰/۳۹	GFDL-ESM4	۴
۰/۹۷	۰/۸۲	۵/۹۳	۲۸/۰۵	۵/۱۷	۲۲/۸۹	FGOALS-g3	۵
۰/۸۵	۰/۶۵	۶/۲۴	۳۷/۱۴	۵/۲۱	۲۹/۸۴	CanESM5	۶
۰/۹۹	۰/۵۳	۶/۴۱	۳۶/۵۸	۶/۰۴	۲۸/۸۹	MIROC6	۷
۰/۹۹	۰/۵۱	۶/۷۱	۴۰/۳۲	۶/۵۳	۳۲/۷۶	MIROC-ES2L	۸

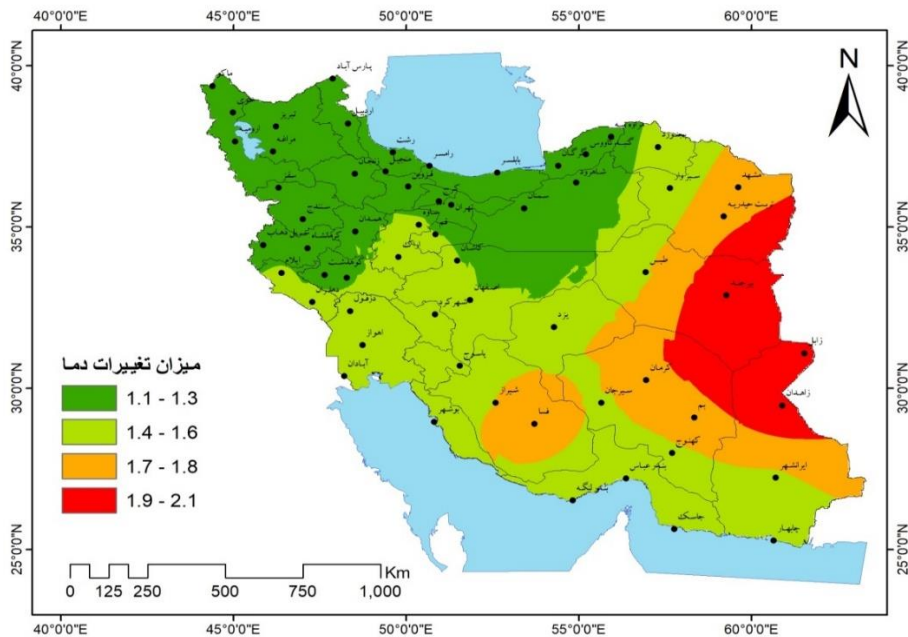
پس از انتخاب الگوهای بهینه، به پیش‌نگری دما و بارش در دوره آینده (۲۰۳۱-۲۰۵۰) تحت

سه سناریوی موردبررسی و تغییرات آن نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) براساس متوسط سناریوها پرداخته شد. بررسی توزیع فضایی متوسط دما در کشور در دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریوی مورد بررسی نشان داد که متوسط دما در دوره پایه در سطح کشور بین ۱۰ تا ۲۸ درجه سلسیوس در نوسان است که بیشترین مقادیر آن مربوط نواحی جنوب شرقی، جنوبی و جنوب غربی و سپس نواحی مرکزی کشور است. کمترین مقادیر متوسط دمای سالانه نیز مربوط به نواحی شمال غربی، غربی و شمال شرقی کشور است. توزیع فضایی تغییرات متوسط دما در دوره آینده براساس سناریوهای مختلف نیز نشان می‌دهد که براساس هر سه سناریوی موردبررسی، میزان دما نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد و به ۱۱/۸ تا ۲۹/۱ درجه سلسیوس خواهد رسید. کمترین و بیشترین تغییرات دما نسبت به دوره پایه نیز به ترتیب براساس سناریوهای SSP1-2.6 و SSP3-7.0 پیش‌نگری شده است. (شکل ۴)



شکل ۴. توزیع فضایی متوسط دما در دوره پایه و دوره آینده براساس سناریوهای مختلف بر حسب درجه سلسیوس درونیابی تغییرات دما براساس روش «کریجینگ» در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی براساس متوسط هر سه سناریوی موردبررسی در منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که در پهنه مورد مطالعه متوسط دما بین ۱/۱ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد. بیشترین تغییرات

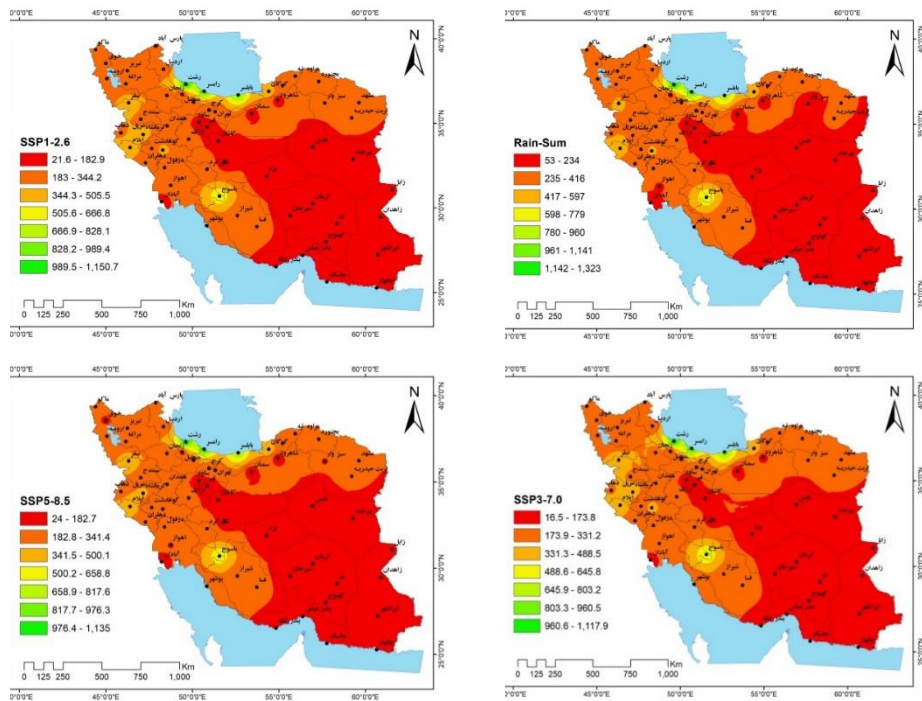
دما براساس الگوی CMIP6 منتخب مربوط به مناطق شرقی و سپس جنوبی و مرکزی کشور با ۱/۷ تا ۲/۱ درجه سلسیوس است. کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی سردسیر کشور از جمله نواحی غربی، شمال غربی و شمال شرقی، افزایش ۱/۱ تا ۱/۳ درجه سلسیوس است. در مجموع در منطقه مورد مطالعه میزان دما در دوره آینده نسبت به دوره پایه به طور متوسط، ۱/۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد که توزیع تغییرات آن در منطقه مورد مطالعه در شکل (۵) آورده شده است.



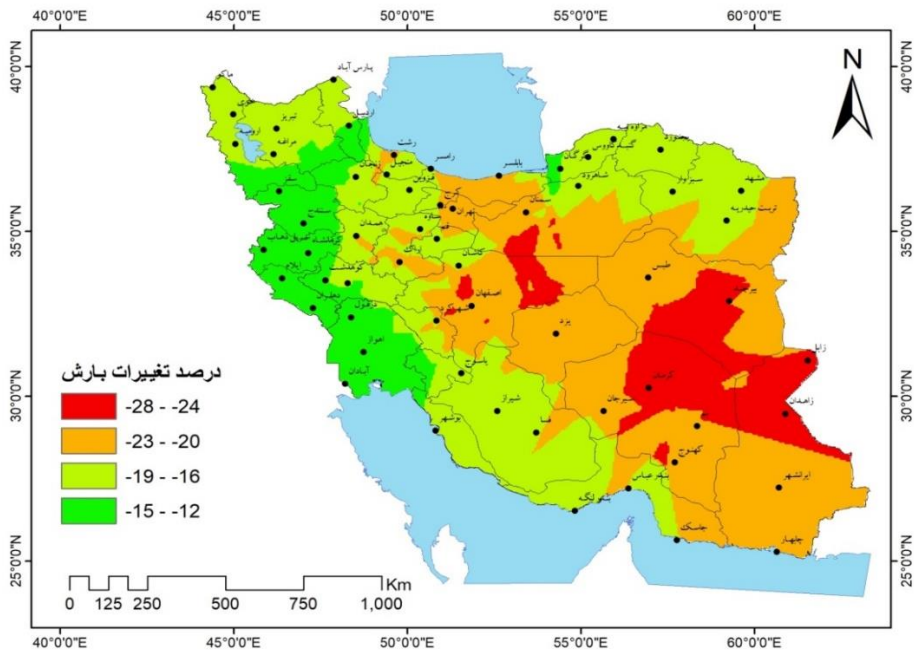
شکل ۵. توزیع فضایی تغییرات دما در دوره آینده نسبت به دوره پایه بر حسب درجه سلسیوس

بررسی توزیع فضایی تغییرات بارش در کشور نیز نشان داد که دامنه تغییرات بارش در سطح کشور در دوره پایه بین ۵۳ تا ۱۳۲۳ میلی‌متر است. بیشترین مقادیر بارش مربوط به سواحل جنوبی دریای خزر و سپس نواحی زاگرس مرکزی و غرب کشور است. کمترین مقادیر بارش نیز مربوط به مناطق بیابانی و سپس نواحی جنوب شرقی کشور است که بین ۵۳ تا ۲۰۰ میلی‌متر در سال بارش دارند. در مجموع براساس نتایج حاصل از پراکنش بارش در سطح کشور به طور نسبی با حرکت از شمال به جنوب و از غرب به شرق کشور از میزان بارش‌ها کاسته می‌شود. توزیع فضایی تغییرات بارش در دوره آینده براساس سناریوهای مختلف نیز نشان می‌دهد که براساس هر

سه سناریوی موردبررسی میزان بارش نسبت به دوره پایه کاهش پیدا خواهد کرد و دامنه تغییرات بارش در کشور به ۱۶ تا ۱۱۱۷ میلی‌متر خواهد رسید. کمترین و بیشترین تغییرات کاهشی بارش نسبت به دوره پایه نیز به ترتیب براساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP1-2.6 پیش‌نگری شده است. (شکل ۶)



شکل ۶. توزیع فضایی بارش در دوره پایه و دوره آینده براساس سناریوهای مختلف بر حسب درصد واکاوی تغییرات بارش در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در کل منطقه مورد مطالعه میزان بارش کاهش خواهد یافت که میزان آن بین ۱۲ تا ۲۸ درصد خواهد بود. بیشترین تغییرات کاهشی بارش مربوط به نواحی شرقی و مرکزی کشور با ۲۰ تا ۲۸ درصد است. کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی غربی و سپس نواحی شمال غربی و شمال شرقی کشور با ۱۲ تا ۱۹ درصد است. در مجموع در منطقه مورد مطالعه میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش پیدا خواهد کرد که میزان آن به طور متوسط در سطح کشور برابر با ۱۸/۵ درصد خواهد بود. (شکل ۷)



شکل ۷. توزیع فضایی تغییرات بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه بر حسب درصد (قربان‌زاده‌سوار و ناطقی، ۱۳۹۱، ص، ۱۴۹)

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

پیش‌نگری تغییرات دما و بارش برای اطلاع از میزان تغییرات آن در آینده و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات آب‌وهوایی بر منابع آبی و کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش، هشت الگوی GCMs از CMIP6 که دارای قدرت تفکیک بالایی هستند مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از اصلاح اریبی به‌روش LSBC به ارزیابی عملکرد آن‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. براساس نتایج حاصل، الگوی MPI-ESM1-2-LR در بیشتر پهنه مورد مطالعه از دقت بیشتری نسبت به سایر الگوها جهت شبیه‌سازی بارش برخوردار است. به طوری که میزان متوسط $R2$ آن ۰/۹۱ و میزان RMSE آن نیز برابر با ۱۹/۹ است. همچنین الگوهای MRI-ESM2-0 با $R2$ ، RMSE و MAE برابر با ۲/۵۵، ۰/۹۹ و ۲/۳۱ بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی دما در منطقه مورد مطالعه دارند. نتایج عملکرد الگوهای CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش نشان داد که الگوهای CMIP6 دما را بهتر از بارش شبیه‌سازی می‌کنند. نتایج حاصل با مطالعات مسگری و همکاران (۲۰۲۲) و محمدی و همکاران (۱۴۰۳) در ارزیابی عملکرد الگوهای

CMIP6 در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در ایران و منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا مطابقت دارد. نتایج حاصل از پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در منطقه مورد مطالعه نیز نشان داد که در پهنه مورد مطالعه متوسط دما بین ۱/۱ تا ۲/۱ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد که بیشترین تغییرات آن مربوط به مناطق شرقی و سپس جنوبی و مرکزی کشور است. کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی سردسیر کشور است. در مجموع در منطقه مورد مطالعه میزان دما در دوره آینده نسبت به دوره پایه به طور متوسط، ۱/۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد. اما براساس نتایج، میزان بارش در منطقه مورد مطالعه بین ۱۲ تا ۲۸ درصد کاهش پیدا خواهد کرد که بیشترین تغییرات آن مربوط به نواحی شرقی و مرکزی کشور و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی غربی و شمال غربی کشور است. براساس نتایج، میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه به طور متوسط در کشور به میزان ۱۸/۵ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج حاصل از این بخش با مطالعات مجدی و همکاران (۲۰۲۲)، مسگری و همکاران (۲۰۲۲) و محمدی و همکاران (۱۴۰۳) مبنی بر افزایش دما و کاهش بارش در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا و به ویژه ایران مطابقت دارد. در مجموع براساس نتایج حاصل در منطقه مورد مطالعه دما افزایش و بارش کاهش خواهد یافت که این تغییرات می‌تواند افزایش تبخیر و تعرق، کاهش منابع آبی، کاهش بارش‌های برفی و افزایش بارش‌های رگباری و سیل‌آسا و همچنین کاهش دوره رشد محصولات کشاورزی و در نتیجه کاهش عملکرد محصول را در منطقه به دنبال داشته باشد. مجموع این شرایط می‌تواند شرایط اقلیمی منطقه را دچار تغییر کند. بنابراین لازم است برنامه‌ریزان مسئول در بخش‌های گوناگون، راهکارهای لازم برای سازگاری با شرایط جدید را اتخاذ نمایند. از نتایج این پژوهش می‌توان در مقابله با معضلاتی همچون خشک‌سالی، سیلاب‌های ناگهانی و همچنین مدیریت منابع آب، کشاورزی، انرژی و غیره استفاده نمود.

فهرست منابع

الف) منابع فارسی

- امینی، داود و رضایی، حسن (۱۴۰۱). تحلیلی بر اثرات تغییر اقلیم بر فعالیت‌های نظامی در استان اصفهان بر مبنای شاخص میسنارد و سناریوهای آینده‌پژوهانه. *علوم و فنون نظامی*، ۶۱، ۲۶-۵.
- بزی، حسین؛ ابراهیمی، حسین و امین‌نژاد، بابک (۱۴۰۰). اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تبخیر از سطح چاه‌نیمه‌های سیستان. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۳ (۱۲)، ۱۳۵-۱۲۱.
- حاتمی‌نژاد، حسین؛ پوراحمد، احمد و نصرتی هشی، مرتضی (۱۳۹۸). آینده‌پژوهی در بافت فرسوده شهری (مطالعه موردی: ناحیه یک، منطقه ۹ شهر تهران). *فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*، ۲۸ (۱۰۹)، ۵۵-۳۸.
- حسینی، سید اسعد؛ علائی، خالد و پناهی، علی (۱۴۰۲). پیش‌نگری تغییرات دما و بارش با استفاده از الگوهای CMIP6 و کاربری الگوی مقیاس‌کاهی SDSM در شهرستان سقز. *هفتمین کنفرانس بین‌المللی تغییر اقلیم، سازمان هواشناسی کشور*، ص ۱۲.
- ذهبیون، باقر؛ گودرزی، محمدرضا و مساح‌بوانی، علیرضا (۱۳۸۹). کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۱ (۲)، ۵۸-۴۳.
- شائمی، اکبر و حبیبی‌نوخندان، مجید (۱۳۸۸). گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی. *انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد*.
- صداقت‌کردار، علی و فتاحی، ابراهیم (۱۳۸۷). شاخص‌های پیش‌آگاهی خشک‌سالی در ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۶ (۱۱)، ۷۶-۵۹.
- صلاحی، پرومند؛ گودرزی، مسعود و حسینی، سید اسعد (۱۳۹۶). پیش‌بینی تغییرات اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱. *نشریه علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*، ۱۱ (۳۷)، ۵۷-۴۷.
- کارآموز، محمد؛ رضائی، فرید و رضوی، سامان (۱۳۸۵). پیش‌بینی بلندمدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی. *هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران*، ص ۱۱.
- کوهی، سکینه؛ عزیزیان، اصغر و مازندرانی‌زاده، حامد (۱۴۰۱). اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی تحت سناریوهای SSP3 و SSP5 با استفاده از روش فازی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۸ (۳)، ۱۷-۱.
- کلهر، مهدی و ذبیحی، حسین (۱۳۹۸). آینده‌پژوهی تأخیرات پروژه‌های شهری با رویکرد تحلیل لایه‌ای علت‌ها. *فصلنامه آینده‌پژوهی مدیریت*، ۳۰ (۱۱۶)، ۱۹۹-۱۸۵.
- گودرزی، مسعود؛ صلاحی، پرومند و حسینی، سید اسعد (۱۳۹۷). چشم‌انداز آبی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل ریزگردانی آماری (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه). *فصلنامه فضای جغرافیایی*، ۱۸ (۶۴)، ۶۰-۴۱.
- محمدی، نبی؛ ساری صراف، بهروز و رستم‌زاده، هاشم (۱۴۰۳). پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱ (۴۳)، ۳۱-۱۷.

ب) منابع انگلیسی

- Beecham, S., Rashid, M., Chowdhury R.K. (2014). Statistical downscaling of

- multi-site daily rainfall in a South Australian catchment using a Generalized Linear Model. *International Journal of Climatology*, 34(14): 3654–3670.
- Crowe J, de Joode BvW, Wesseling C. (2009). A pilot field evaluation on heat stress in sugarcane workers in Costa Rica: What to do next? *Global Health Act*. 2.
 - Dibike Y.B, Coulibaly P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay Watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models, *J Hydro*, 145-163.
 - Doelman, J. C., Stehfest, E., Tabeau, A., van Meijl, H., Lassaletta, L., Gernaat, D. E., ... & van Vuuren, D. P. (2018). Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation. *Global Environmental Change*, 48, 119-135.
 - Hardy, J.T. (2003). *Climate Change: Causes, Effects, and Solutions*. John Wiley & Sons, Ltd. 247.
 - IPCC. (2013). Summary for Policymakers. 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*.
 - Jayaweera, L., Wasko, C., Nathan, R., Johnson, F. (2023). Non-stationarity in extreme rainfalls across Australia, *Journal of Hydrology*, 624, 129872.
 - Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L. (2020). Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections, *Environ. Res. Lett*, 15: 1-4.
 - Kay, AL., Davies, HN., Bell, VA., Jones, RG. (2009). Comparison of uncertainty sources for climate change impactsL flood frequency in England. *Climate Change*, 92: 41-63.
 - Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A., Wilby, R.L. (2007). A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling & Software*, 22: 1705–1719.
 - Lane, M. E., Kirshen, P. H., Vogel, R. M.. (1999). Indicators of impact of global climate change on U.S. water resources. *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4): 194-204.
 - Luo, M. Liu, T. Meng, F. Duan, Y. Frankl, A.B. Maeyer, P.D. (2018). Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water*, 10, 1046.
 - Majdi, F., Hosseini, S.A., Karbalaee, A., Kaseri, M., Marjanian, S. (2022). Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, 147: 1249–1262.
 - Mao, Caixia; Koide, Ryu; Brem, Alexander, (2020), Technology foresight for social good: Social implications of technological innovation by 2050 from a Global Expert Survey, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 153(8), pp.2-13.
 - Nazarenko, L. S., Tausnev, N., Russell, G. L., Rind, D., Miller, R. L., Schmidt, G. A., ... & Yao, M. S. (2022). Future climate change under SSP emission scenarios with GISS-E2. 1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*,

14(7), e2021MS002871.

- Palmer, T. E., McSweeney, C. F., Booth, B. B. B., Priestley, M. D. K., Davini, P., Brunner, L., Borchert, L., Menary, M. B. (2023). Performance-based sub-selection of CMIP6 models for impact assessments in Europe, *Earth Syst. Dynam.*, 14, 457–483.
- Panol, T.J., Loret, F. (1998). Climatic warning hazard and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climate Change*, 38. 345-357.
- Peiffer J, Abbiss C. (2013). Thermal stress in North Western Australian iron ore mining staff. *Ann Occup Hyg.* 57(4):519-27.
- Shrestha, S., Shrestha, M., Babel, M.S. (2016). Modelling the potential impacts of climate change on hydrology and water resources in the Indrawati River Basin, Nepal. *Environ Earth Sci*, 75, 280
- Teutschbein, C., Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulation for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J. Hydrology*, 456: 12-29
- Wang, D., Liu, J., Wang, H., Shao, W., Mei, M., Ding, X. (2022). Performance evaluations of CMIP6 and CMIP5 models for precipitation simulation over the Hanjiang River Basin, China. *Journal of Water and Climate Change*; 13 (5): 2089–2106.
- Wilks, D.S., Wilby, R.L. (1999). The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23: 329-357.