

بررسی و تحلیل تغییرات بارش و دما استان خراسان جنوبی با استفاده از شبیه ساز اصلاح

اریبی شده مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم

نازلی زنوزی علمداری^۱، بهروز سبحانی^{۱*}، مهدی اصلاحی^۳، مسیح اله محمدی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

۲. استاد، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

Email: sobhaniardabil@gmail.com

۳. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل،

ایران

۳. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل،

ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

چکیده

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر میزان توزیع بارش و دما در استان خراسان جنوبی بررسی شد. به این منظور خروجی ۱۲ مدل اقلیمی جهانی گزارش ششم IPCC برای دوره پایه (۲۱۰۰ - ۱۹۸۹) برای بارش و دما در مقایسه داده‌های مشاهداتی براساس شاخص ترکیبی کلینگ - گوپتا (KGE) وزن دهی شده و بر مبنای رتبه‌های حاصل مدل‌های CESM2 و HadGEM3-GC به ترتیب بیشترین توانایی را در شبیه سازی دما و بارش در تمامی ایستگاه‌های منتخب (بیرجند، قائن، فردوس، نهبندان و بشرویه) دارا هستند. در ادامه با استفاده از سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و با کمک شبیه‌ساز اصلاح اریبی اقلیم آینده را مطالعه می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها نشان داد که در شرایط اقلیمی آینده دما و بارش سالانه در هر سه سناریوی SSP دارای روند افزایشی خواهد بود؛ به‌طوری که دما از ۰/۰۷ تا ۲/۷۸ درجه سلسیوس و بارش به میزان ۱ تا ۸/۸۱ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج شاخص ترکیبی کلینگ - گوپتا بیانگر این مطلب است که دقت مدل‌های مورد مطالعه در شبیه سازی دما خوب و در شبیه سازی بارش ضعیف، ارزیابی شده است.

کلمات کلیدی: شبیه سازی دما و بارش، CMIP6، سناریوهای SSP، تصحیح اریبی، خراسان جنوبی.

مقدمه

اقلیم به شرایط آب و هوایی یک منطقه جغرافیایی نظیر دما، رطوبت، فشار اتمسفری، باد، بارش و سایر مشخصه‌های هواشناسی در مدت زمان نسبتاً طولانی نسبت داده می‌شود. تغییر اقلیم به تغییر در وضعیت آب‌وهوا که برای یک دوره طولانی مثل چند دهه یا بیشتر ادامه داشته باشد گفته می‌شود (آخوندی خلفی و همکاران، ۱۳۹۹). از این رو پیش‌بینی بلندمدت متغیرهای اقلیمی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی اقلیم آینده وجود دارد (کاظمی راد و مدبری، ۱۴۰۱) که معتبرترین ابزار جهت بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر سامانه‌های مختلف استفاده از متغیرهای آب و هوایی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های جفت شده اتمسفر - اقیانوس گردش عمومی جو GCM است (دابرفسکی، ۲۰۱۴). مدل‌های گردش عمومی جوی - اقیانوس سیستم آب و هوایی تکامل زمین در هر زمان شامل شرایط اتمسفری، اقیانوس، یخ دریا و شرایط سطح زمین و جو را شبیه‌سازی می‌کند. مدل‌های گردش عمومی جو توصیف می‌کنند که چگونه این مؤلفه‌ها با هم یک از مدل‌ها برای ایجاد و تغییر متغیرهای اقلیمی پیچیده زمین ارتباط برقرار می‌کنند؛ بنابراین آن‌ها به عنوان ابزاری بسیار مهم برای شبیه‌سازی تغییر اقلیم و از این رو برآورد آینده شناخته شده‌اند (Zhu et al, 2020). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) به عنوان مهم‌ترین مرجع پژوهش‌ها و پیش‌بینی‌های مربوط به تغییر اقلیم تا کنون چندین نسل از سناریوهای انتشار را ارائه داده است و بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های مختلف تغییر اقلیم، شش گزارش ارزیابی از تغییر اقلیم را منتشر کرده است. در گزارش اخیر (IPCC) جدیدترین مدل‌های تغییر اقلیم با عنوان مدل‌های سری CMIP6 می‌باشند که آب و هوای آینده را تحت سناریوهای SSP شبیه‌سازی می‌کنند (IPCC, 2021). با این حال مدل‌ها هنوز ناقص هستند، زیرا درک ما از سیستم آب و هوایی واقعی هنوز محدود است و مشکلاتی در زمینه محاسبه فرمول‌های غیرخطی برای نمایش طبیعت و اتخاذ پارامترهای ناکافی برای فرایندهای فیزیکی وجود دارد (Ahmad et al, 2013). شبیه‌سازی تاریخی برای ارزیابی دقت مدل‌ها مفید هستند. شبیه‌سازی‌های تاریخی ابزار مهمی برای تعیین سازگاری و حساسیت مدل‌های اقلیمی نسبت به داده‌های مشاهداتی و کنترل عدم قطعیت این مدل‌ها می‌باشند (Eyring et al, 2016). با وجود این پیشرفت‌ها، شبیه‌سازی GCM ها بیشتر مواقع دارای اریبی قابل توجه است و تفکیک پذیری مکانی کم آن‌ها از توانایی این ابزار برای بازتولید داده‌های اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه‌ای به‌ویژه در مناطق کوهستانی است (Fang et al, 2015)؛ بنابراین برای انجام شبیه‌سازی‌های قابل اعتماد در مقیاس محلی، برون‌دادهای GCM ها قبل از استفاده باید پس پردازش شوند (کلاچیان و همکاران، ۱۳۹۹). پس پردازش مدل‌های اقلیمی با استفاده از ریز مقیاس یا تصحیح اریبی انجام می‌شود و بر این فرض استوار است که داده‌های مشاهداتی و برون‌داد مدل‌های اقلیمی دارای همبستگی بوده و الگوی تغییر رفتار داده‌ها در گذشته و آینده یکسان است. تصحیح اریبی در واقع به مقیاس‌بندی برون‌داد مدل‌های آب و هوایی برای منعکس کردن ویژگی‌های آماری آن‌ها مثل میانگین و واریانس داده‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد (Räty et al, 2014). استفاده از روش‌های پی پردازش در هر مطالعه بستگی به نوع مدل اقلیمی و ویژگی‌های آب و هوایی منطقه مورد مطالعه دارد (Lou et al, 2018).

اهمیت مطالعات بارش و دما و روند تغییرات آن به‌خصوص در آینده باعث شده است تا طیف گسترده‌ای از پژوهشگران به مطالعه تغییرات دما و روند آن در آینده بپردازند. در ادامه، با توجه به هدف تعیین شده در این پژوهش

به برخی از این پژوهش‌ها پرداخته می‌شود. در پژوهشی که (Ongoma et al. 2018) در افریقا انجام دادند، آن‌ها با استفاده از تابع چگالی کرنال بر داده‌های بارش و دما به این نتیجه رسیدند که احتمال وقوع بارش‌های حدی در این منطقه در دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. با این حال نتایج نهایی نشان داد که تغییرات واریانس بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. (Almazroui et al (2020) تغییر دما و بارش را در افریقا با استفاده از ۲۷ مدل GCM مربوط به CMIP6 پیش بینی کردند. پیش بینی‌ها با استفاده از بدبینانه‌ترین سناریوها نشان داد که میانگین دمای سالانه در پایان سال ۲۱۰۰ در منطقه صحرا و افریقای مرکزی به ترتیب به میزان ۵/۶ و ۳/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. (Kamworapan et al (2021) عملکرد ۱۳ مدل آب و هوایی جهانی CMIP6 را برای دما در تایلند طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ ارزیابی کرد و مدل 1-CNRM-CM6 را به عنوان مناسب‌ترین مدل معرفی نمود. (Boonmam et al (2021) در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی‌های مبتنی بر ویژگی اثرات تغییر اقلیم بر توزیع‌های زیستی جهانی به مطالعه جنگل‌ها و علفزارها پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر این مطلب بود که بیش از ۷۰ تا ۷۵ درصد از توزیع فعلی جنگل‌های پهن برگ و مخلوط معتدل و علفزارهای معتدل به سمت شمال جابه‌جا شوند. (Castro et al (2022) در پژوهشی به مدل سازی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر کیفیت آب برای مخازن استوایی اقدام کردند و نتایج پژوهش نشان داد که سناریوهای RCP افزایش تغییرات WQI را برای مقادیر دما پایین‌تر نشان داد. (Chen et al (2022) به ارزیابی عملکرد ۲۸ مدل CMIP6 برای شبیه‌سازی دمای هوای سطحی بر روی قلات تبت در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۴ استفاده کرد. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از میانگین نتایج چند مدل نسبت به نتایج هر مدل به تنهایی، الگوی مکانی - زمانی دمای هوای سطحی را برای دهه گذشته به طور دقیق‌تر به تصویر می‌کشد. عزیزی و همکاران (۱۳۹۹)، با ارزیابی شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیر زمینی اقدام کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که دمای متوسط در منطقه به طور میانگین، تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 افزایش ۱ تا ۱/۲ درجه سلسیوسی را نشان می‌دهد. اکبری و صیاد (۱۴۰۰) در پژوهشی به تجزیه و تحلیل تغییر اقلیم در ایران نمودند. نتایج پژوهش مهم‌ترین پیامد تغییر اقلیم در ایران افزایش فرین‌های جوی است که به طور کلی می‌توان این گونه بیان کرد که یا بازده زمانی - مکانی الگوهای آب و هوایی تغییر کرده است یا رخداد آن‌ها بیش‌تر یا کمتر از میانگین بوده است. میان آبادی و همکاران (۱۴۰۲)، با استفاده از شبیه ساز اصلاح اریبی و مدل‌های اقلیمی گزارش ششم تغییرات بارش و دما ایستگاه همدیدی کرمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی روند تغییرات بارش و توزیع آن نشان دهنده عدم معنی دار بودن روند تغییرات (مقادیر P-value بیشتر از ۰/۱) و عدم معنی داری تغییر میانگین و واریانس بارش (مقادیر P-value کمتر از ۰/۵) بود و لذا احتمال افزایش وقوع بارش‌های حدی نمی‌تواند از نظر آماری قابل انتظار باشد؛ اما تغییرات روند، میانگین و واریانس دما از نظر آماری معنی دار بوده و احتمال وقوع تنش‌های گرمایی در آینده افزایش خواهد یافت. حجازی زاده و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی چشم انداز تغییرات شاخص‌های حدی دما و بارش استان کردستان اقدام نمودند و به این یافته‌ها رسیدند که در دوره (۲۰۱۶ - ۱۹۹۰) شاخص‌های فرین گرم دارای روندی مثبت و افزایشی هستند.

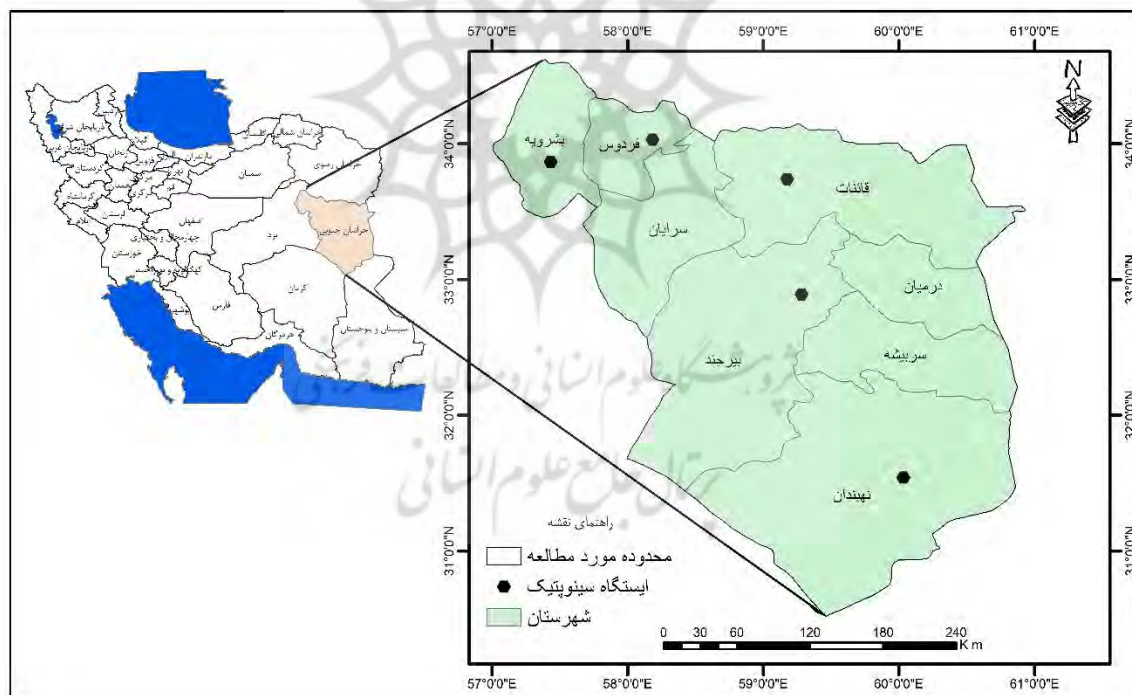
تاکنون بیشتر مطالعات در زمینه مدل‌سازی تغییر اقلیم براساس داده‌های گزارش چهارم و پنجم انجام شده است؛ بنابراین، اجرای مطالعات به روز رسانی با داده‌های گزارش ششم (CMIP6) برای کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی تغییر اقلیم دهه‌های آتی ضروری است؛ بنابراین، در این پژوهش با استفاده از گزارش ششم به مدل سازی پارامترهای آب

و هوایی بارش، بیشینه، کمینه و متوسط دما در استان خراسان جنوبی پرداخته می‌شود. به‌طوری مطالعات گذشته بر اساس گزارش ششم و پنجم و فقط برای بارش و متوسط دما است (عباس و همکاران، ۱۳۸۸؛ صالحی طبس و همکاران، ۱۳۹۹). بدین منظور، پارامترهای یاد شده بر اساس دوره پایه ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ مدل سازی شده و یک دوره ۸۰ ساله ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ شبیه سازی خواهد شد.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان خراسان جنوبی واقع در شرق کشور است که مساحتی در حدود ۱۵۱۱۹۳ کیلومترمربع دارد و در محدوده ۳۰ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۶۱ درجه طول شرقی قرار گرفته است. ارتفاعات خراسان جنوبی امتداد شمالی - جنوبی دارند و بلندترین نقطه استان قله باقران با ارتفاع ۳۶۱۵ متر و پست‌ترین منطقه در دشت کویر با ارتفاع ۶۵۰ متر از سطح دریا واقع شده است. استان خراسان جنوبی از شرایط اقلیمی خشک و بیابانی در نواحی پست و آب و هوایی نیمه خشک در نواحی کوهستانی برخوردار است. تفاوت ارتفاع بین مناطق کوهستانی و پست استان باعث به وجود آوردن شرایط آب و هوایی خشک و بیابانی در نواحی پست و آب و هوایی نیمه خشک در نواحی کوهستانی شده است (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۸).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)
بیرجند	سینوپتیک	۵۹/۲۸	۳۲/۸۹	۱۴۹۱
قائن	سینوپتیک	۵۹/۱۷	۳۳/۷۴	۱۴۳۲

۱۲۹۳	۳۴/۰۳	۵۸/۱۸	سینوپتیک	فردوس
۱۱۷۸۸	۳۱/۵۴	۶۰/۰۳	سینوپتیک	نهبندان
۸۷۹	۳۳/۸۶	۵۷/۴۳	سینوپتیک	بشرویه

منبع: اداره کل هواشناسی خراسان جنوبی

مدل‌های CMIP6

مدل‌های گردش عمومی، نماینگر فرایندهای فیزیکی در جو، اقیانوس و سطح زمین و در حال حاضر پیشرفته‌ترین ابزارهای موجود برای شبیه‌سازی پاسخ سیستم آب‌وهوای جهانی به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای هستند (Majumder, 2015). در حال حاضر CMIP6 با ارائه ۲۸ مدل آب و هوایی آخرین نسل از پروژه مقایسه مدل‌های آب و هوایی (CMIP) هستند. هر یک از پروژه‌های مقایسه‌ای مورد تأیید CMIP6 موضوعات منحصر به فرد آب و هوایی را پوشش می‌دهد. فعالیت اصلی در فاز ۶ پروژه متقابل مدل جفت شده (CMIP6) پروژه متقابل سناریو (ScenarioMIP)^۱ می‌باشد؛ که پیش‌بینی این مدل‌های اقلیمی ترکیبی از مجموعه جدید از سناریوهای انتشار و کاربری اراضی تولید شده به وسیله مدل‌های IAMs بر مبنای خطوط سیر مشترک اقتصادی - اجتماعی (SSP) آینده (که عناصر مانند جمعیت، رشد اقتصادی، شهرنشینی، سن، تحصیلات و ... را در برمی‌گیرد) و مرتبط با سناریوهای غلظت گازهای گلخانه‌ای RCPs می‌باشد (Eyring et al, 2016). مهران و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعات خود معتقدند که وابسته به منطقه آب و هوایی مورد مطالعه، ممکن است مدل‌های آب و هوایی در مناطق با توپوگرافی پیچیده و پر شیب، برای بعضی از متغیرهای اقلیمی پیش برآورد و یا در مناطق خشک کم برآورد داشته باشد.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام مدل	کشور توسعه‌دهنده	نام مرکز تحقیقاتی	دقت مکانی (درجه)	مدل
۱	ACCESS-CM2	Australia	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science,	$1.87 \times 1.25^\circ$	
۲	BCC-CSM2-MR	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administratio	$1.12^\circ \times 1.12^\circ$	
۳	CESM2	USA	Community Earth System Model Contributors	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$	
۴	CNRM-CM6-1	France	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique (CNRM)	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	
۵	CanESM5	Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis-Canada	$2.81^\circ \times 2.78^\circ$	
۶	MIROC6	Japan	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	
۷	MRI-EMS2-0	Japan	Meteorological Research Institute	$1.12^\circ \times 1.12^\circ$	
۸	IPSL-CM6A-LR	France	Institut Pierre-Simon Laplace	$2.5^\circ \times 1.26^\circ$	
۹	GISS-E2-1-G	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	$2.5^\circ \times 2^\circ$	
۱۰	HadGEM3-GC31-LL	UK	Meteorological Office Hadley Centre	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$	
۱۱	NESM3	China	Nanjing university of Information and Technology (NUIST)	$1^\circ \times 1.3^\circ$	
۱۲	NOR-ESM2-MM	Norway	Norwegian Climate Center	$0.94 \times 1.25^\circ$	

¹ Senario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP)

سناریوهای انتشار SSP

سناریوها بخش اساسی تحقیقات تغییر اقلیم را تشکیل می‌دهد و استفاده از آن به ما کمک می‌کند تا عواقب طولانی مدت تصمیمات کوتاه مدت بشر را بیشتر درک کنیم و با توجه به عدم قطعیت، سناریوها به محققان کمک می‌کند تا بتوانند آینده‌های احتمالی را کشف کنند (Riahi et al. 2017). در سناریوهای CMIP6 فاکتورهای اجتماعی - اقتصادی نظیر رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شده است (زرین و صالح‌آبادی، ۱۳۹۸). چهارچوب سناریو جدید که توسط جامعه تحقیقاتی تغییر اقلیم طراحی شده‌اند می‌توانند تجزیه و تحلیل یکپارچه‌ای از تأثیرات آینده آب و هوایی، آسیب‌پذیرها، سازگاری و کاهش این آسیب‌ها را فراهم کنند. (Riahi et al. 2017). سناریوهای گزارش ششم به صورت ترکیبی از خط سیرهای اقتصادی - اجتماعی (SSP) (توسعه پایدار، SSP1، توسعه بر اساس سیاست‌های میانی، SSP2، منطقه‌ای SSP3، نابرابری SSP4 و توسعه سوخت فسیلی SSP5) و خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) تولید می‌شوند؛ به طوری که امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی - اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری را فراهم می‌آورد (انصاری مهابادی و همکاران، ۱۴۰۱).

جدول ۳- تمام سناریوهای مورد استفاده در مجموعه آزمایشی ScenarioMIP به همراه ویژگی‌های مرتبط آن‌ها

(Gidden et al. 2019).

Scenario name	SSP	Target forcing level (Wm ⁻²)	Scenario type	Tier	IAM	Contributing to other MIPs
SSP1-1.9	1	1.9	Mitigation	2	IMAGE	ScenarioMIP
SSP1-2.6	1	2.6	Mitigation	1	IMAGE	ScenarioMIP
SSP2-4.5	2	4.5	Mitigation	1	MESSAGE-GLOBIOM	ScenarioMIP, VIACS AB, CORDEX, GeoMIP, DAMIP, DCPD
SSP3-7.0	3	7	Baseline	1	AIM/CGE	ScenarioMIP, AerChemMIP, LUMIP
SSP3-LowNTCF	3	6.3	Mitigation	2	AIM/CGE	ScenarioMIP, AerChemMIP, LUMIP
SSP4-3.4	3	3.4	Mitigation	2	GCAM4	ScenarioMIP
SSP4-6.0	4	6	Mitigation	2	GCAM4	ScenarioMIP, GeoMIP
SSP5-3.4-OS	4	3.4	Mitigation	2	REMIND-MAGPIE	ScenarioMIP
SSP5-8.5	5	8.5	Baseline	1	REMIND-MAGPIE	ScenarioMIP, C4MIP, GeoMIP, ISMIP6, RFMIP

رتبه‌بندی مدل‌های GCM براساس دقت در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

برای تعیین دقت هر یک از مدل‌های CMIP6، نتایج شبیه‌سازی بارش و دما هر حوضه در دوره تاریخی با آمار مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. در این مرحله، از سنجه آماری کلینگ - گوپتا (KGE) برای تعیین میزان دقت هر مدل (روابط ۱ تا ۵) استفاده شد. این سنجه در عین سادگی، آماره میانگین، انحراف معیار و ضریب همبستگی سری داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی حاصل از مدل را لحاظ کرده و وزن دهی براساس این سنجه می‌تواند کمک شایانی

را در افزایش دقت نتایج تصویرسازی مدل‌ها داشته باشد. هر چه میزان این سنجه به ۱ نزدیک‌تر باشد، توانایی مدل GCM در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی بهتر خواهد بود. (Knoben et al, 2019). مبنای این مدل‌ها، توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی مقادیر مشاهداتی دوره پایه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۸) بوده. وزن دهی این مدل‌ها براساس روابط ذیل صورت گرفت:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (a-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

$$a = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه S_i و O_i به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش یا دما در هر ماه، $\bar{S}$ و μ_s میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ و μ_o میانگین داده‌های مشاهده شده، r ضریب همبستگی پیرسون، σ_s و σ_o به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و KGE شاخص ترکیبی کلینگ - گویتا هستند. مقادیر این شاخص

بین -۱ تا ۱ متغیر بوده و هر چقدر به یک نزدیک‌تر باشد تطابق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بیشتر خواهد بود (Patil et al, 2015).

• تعیین وزن (وزن دهی) مدل‌های GCM در ایستگاه‌های منتخب

باهدف کاهش عدم قطعیت در نتایج حاصل از مدل‌های CMIP6 این مدل‌ها بر مبنای دقت محاسبه شده در مراحل قبل بر اساس معادله (۶) وزن دهی شدند (Chen et al, 2011).

$$W_m = \frac{1/1-KGM_m}{\sum_{m=1}^7 (1/1-KGM_m)} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در رابطه فوق W_m وزن هر کدام از مدل‌های AOGCM در هر ماه برای برآورد دما و بارش است. مقدار تغییرات دما و بارش در دوره آتی (۲۰۲۱ - ۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۸) برای هر ماه از رابطه ۷ تا ۹ محاسبه شد:

$$\Delta T = \sum_{m=1}^7 (W_m \times \Delta T_m) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\Delta P = \sum_{m=1}^7 (W_m \times \Delta P_m) \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\Delta P_m = \frac{P_m(2021-2100)}{P_m(1988-2018)} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در روابط فوق، ΔT_m و ΔP_m متوسط ۸۰ ساله تغییرات دما و بارش پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌های AOGCM در هر یک از سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 هستند (Semenov, 2008).

• روش ارزیابی

روش ارزیابی بر مبنای رویکردهای مختلفی مانند نگاشت توزیع احتمال، نگاشت توابع توزیع تجمعی تجربی، نگاشت چندک و نگاشت توزیع چگالی گذرنال ارائه شده (McGinnis et al, 2015) که در مطالعات متعدد جهت ارزیابی

بارش‌هایی شبکه‌ای و ثبت شده استفاده می‌شود. این روش با تصحیح میانگین، انحراف استاندارد و چندک‌ها با یکسان سازی توابع توزیع خروجی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی کار می‌کند. در روش آریبی فرض بر این است که بارش شبیه سازی شده و مشاهده شده، توزیع پیشنهادی یکسانی را دنبال می‌کنند که به نوبه خود ممکن است باعث ایجاد آریبی گردد. بر این اساس برای توزیع رویدادهای بارشی، غالباً توزیع گاما به شکل α و مقیاس β استفاده می‌شود (Yeboah et al, 2022 ; Gunavathi & Selvasidhu, 2021).

$$f_Y(x|\alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \times \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \times e^{-\frac{x}{\beta}}; \geq 0; \alpha, \beta > 0 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در این معادله، f_Y تابع توزیع گاما، α متغیر تصادفی، β نشان دهنده تابع گاما است و α و β به ترتیب، شکل و مقیاس پارامتری هستند که برای هر توزیع گاما با استفاده از تخمین حداکثر درستنمایی تعیین می‌شود. e نیز عدد ثابت اولیر (۲/۷۱۸۲۲۸) یک ثابت مهم است که در بسیاری از زمینه‌ها یافت می‌شود و پایه لگاریتم‌های طبیعی است (Teutschbein & Seibert, 2012).

قبل از اجرای روش آریبی، روش مقیاس گذاری شدت محلی برای تعیین روزهای مرطوب با استفاده از آستانه‌های خاص اعمال می‌شود؛ سپس خروجی‌های مدل بر حسب تابع توزیع تجمعی گاما (f_Y) و تابع معکوس آن (f_Y^{-1}) مطابق روابط و تصحیح می‌گردند:

$$P_{control}^*(d) = \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$F_Y^{-1}(F_Y(P_{control}(d)|\alpha_{control,m}, \beta_{control,m})|\alpha_{observed,m} \beta_{observed,m})$$

$$P_{control}^*(d) = \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$F_Y^{-1}(F_Y(P_{scenario}(d)|\alpha_{control,m}, \beta_{control,m})|\alpha_{observed,m} \beta_{observed,m})$$

در روابط بالا، منظور از $P_{control}$ و $P_{scenario}$ بارش ثبت شده و شبکه است. همچنین P^* نشان دهنده آریبی تصحیح شده، P بارش و d سری زمانی روزانه است. f_Y و f_Y^{-1} نیز به ترتیب توابع توزیع تجمعی گاما (CDF_s) و معکوس آن‌ها را نشان می‌دهد.

• پیش‌بینی دما و بارش دوره آتی در مقیاس ایستگاه‌های منتخب

پس از ارزیابی و وزن دهی مدل‌ها که در مراحل پیش انجام شد، به منظور پیش‌بینی تغییرات دما و بارش استان خراسان جنوبی در طی ۸۰ سال آینده (۲۱۰۰ - ۲۰۲۱)، متغیرهای دما و بارش مدل‌های مختلف CMIP6 تحت سناریوهای انتشاری (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) استخراج شد. سپس نتایج مدل‌ها (سری‌های زمانی بارش و دمای کمینه و بیشینه) بر اساس وزن‌های محاسبه شده برای هر ایستگاه سینوپتیک ترکیب شدند؛ به طوری که برای هر ایستگاه سینوپتیک و هر سناریو انتشار، یک سری زمانی بارش و یک سری دمای بیشینه و کمینه حاصل شد. در مرحله بعد، از سری زمانی میانگین‌گیری شده و برای هر سناریو یک مقدار متوسط تعیین شد. در مرحله آخر، میانگین سری‌های زمانی بارش و دمای کمینه و بیشینه دوره آتی در هر سناریو با ترکیب نتایج مدل‌ها در دوره پایه (تاریخی) مقایسه شدند تا میزان تغییرات دما کمینه، دمای بیشینه و بارش ۸۰ سال آینده استان خراسان جنوبی تعیین شود.

یافته‌های تحقیق

رتبه بندی مدل‌های CMIP6 بر اساس توانایی شبیه سازی در دوره تاریخی

(جدول - ۴) مقادیر محاسبه شده شاخص KGE را بر اساس توانایی مدل‌های AOGCM مختلف برای برآورد دمای ایستگاه‌های سینوپتیک در دوره پایه (۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸) ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های سینوپتیک مختلف، توانایی مدل‌های AOGCM در برآورد دما و بارش دوره پایه با یکدیگر متفاوت بوده است. در حالت کلی مدل CESM2، بالاترین دقت را در برآورد دمای دوره پایه در تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک از خود نشان داده است. از طرف دیگر در ایستگاه‌های مورد مطالعه، مدل MIROC6 کمترین توانایی را در شبیه سازی دمای دوره پایه در میان تمامی مدل‌های AOGCM از خود نشان داد. مقادیر شاخص KGE محاسبه شده برای بررسی توانایی مدل‌های مختلف در برآورد بارش در دوره پایه بر اساس جدول (۵) مدل HadGEM3-GC را نشان داد. در مقابل مدل GISS-E2-1-G کمترین قابلیت را در برآورد بارش دوره پایه در تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک داشته است.

جدول ۴- مقادیر KGE مدل‌های برتر در شبیه سازی دما و بارش در استان خراسان جنوبی

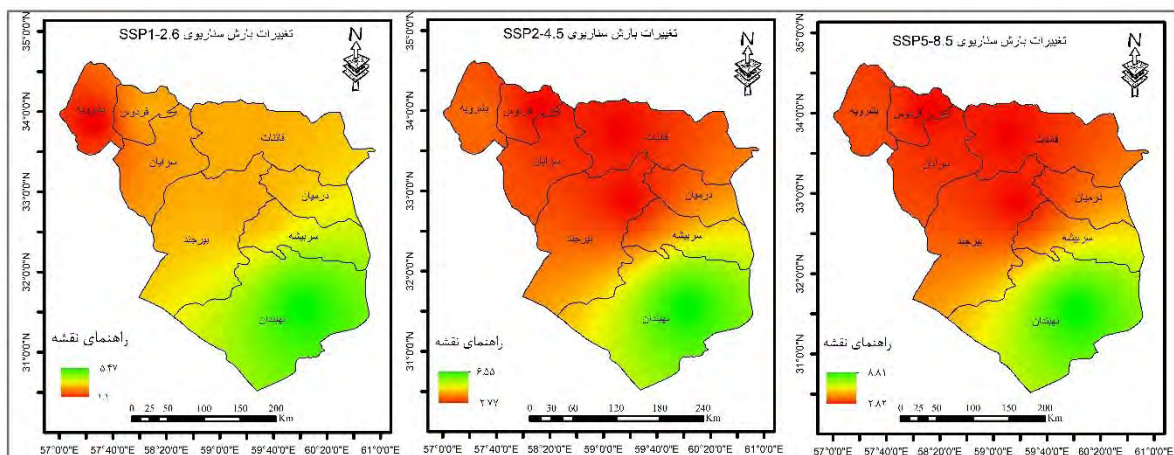
ایستگاه	دما		بارش	
	مدل برتر	شاخص KGE	مدل برتر	شاخص KGE
بیرجند	CESM2	۰/۹۳	HadGEM3-GC	۰/۶۵
قائن	CESM2	۰/۹۷	HadGEM3-GC	۰/۶۱
فردوس	CESM2	۰/۹۴	HadGEM3-GC	۰/۵۷
نهبندان	CESM2	۰/۹۶	HadGEM3-GC	۰/۵۴
بشرویه	CESM2	۰/۹۲	HadGEM3-GC	۰/۵۹

تغییرات بارش طی دوره آتی (۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰) در استان خراسان جنوبی

در جدول (۵) و شکل (۲) مقادیر متوسط بارش سالانه دوره آتی (۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰) توسط مدل Had GEM3-GC تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برآورد شده است. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که در دوره آتی (۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰) مقادیر بارش برای هر سه سناریوی SSP افزایش خواهد بود. همچنین نتایج نشان دهنده این مطلب است که در سطح استان ایستگاه نهبندان با ۵/۴۷، ۶/۵۶ و ۷/۸۲ درصد افزایش تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیشترین افزایش و ایستگاه بشرویه به ترتیب با ۱، ۲/۴۰ و ۳/۴۴ درصد تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کمترین افزایش بارش را در سطح استان خواهد داشت.

جدول ۵- دامنه تغییرات بارش دوره آتی (۲۰۲۰ - ۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

ایستگاه سناریو	بیرجند	قائن	فردوس	نهبندان	بشرویه
SSP1-2.6	۲/۵۶	۲/۴۶	۲/۳۱	۵/۴۷	۱
SSP2-4.5	۲/۸۸	۲/۶۵	۲/۷۸	۶/۵۶	۲/۴۰
SSP5-8.5	۲/۸۲	۳/۱	۲/۸۲	۸/۸۱	۳/۴۴



شکل ۲- تغییرات بارش طی دوره (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به درصد

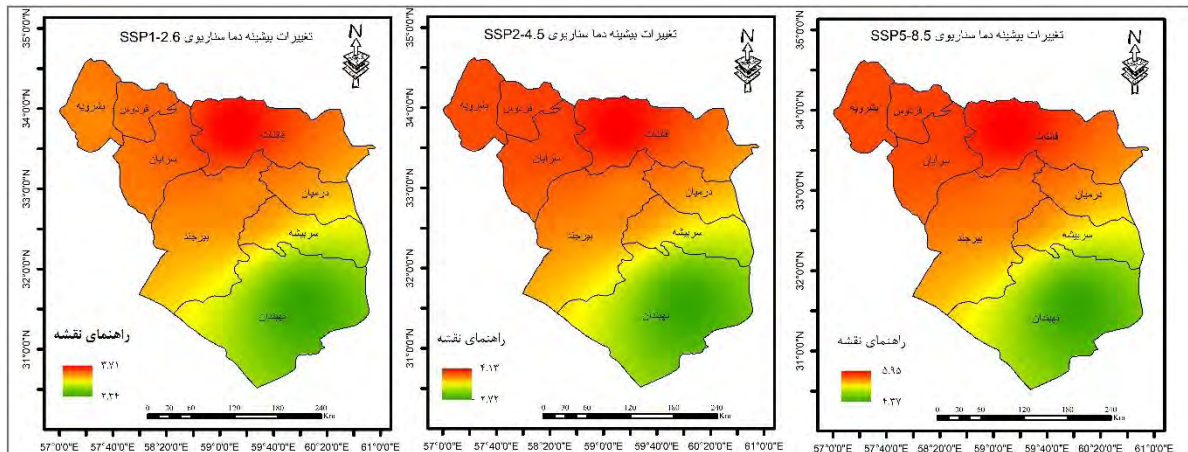
تغییرات دما طی دوره آتی (۲۱۰۰ تا ۲۰۲۰) در استان خراسان جنوبی

تغییرات بیشینه دما

پس از تعیین بهترین مدل با استفاده از دوره آماری پایه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۹) به شبیه سازی پارامتر بیشینه دما ر دوره آتی (۲۱۰۰ تا ۲۰۲۰) تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 اقدام شد. نتایج شبیه سازی آینده دمای بیشینه (جدول ۶-۱) نشان داد داده‌های مدل‌سازی شده توسط سناریوهای SSP از روند افزایش برخوردار است. ولی مقدار آن در سناریوها و ایستگاه‌های مختلف استان متفاوت می‌باشد. با توجه به جدول (۶) ایستگاه قائن به ترتیب با ۳/۷۱، ۴/۱۴ و ۵/۹۶ درجه سلسیوس، تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیشترین افزایش دما و ایستگاه نهبندان به ترتیب با ۲/۳۴، ۲/۷۲ و ۴/۳۸ درجه سلسیوس تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کمترین افزایش دما را شاهد خواهد بود.

جدول ۶- دامنه تغییرات بیشینه دما در دوره آتی (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

ایستگاه سناریو	بیرجند	قائن	فردوس	نهبندان	بشرویه
SSP1-2.6	۳/۳۳	۳/۷۱	۳/۴۲	۲/۳۴	۳/۳۳
SSP2-4.5	۳/۷۵	۴/۱۴	۳/۹۴	۲/۷۲	۳/۹۱
SSP5-8.5	۵/۵۷	۵/۹۶	۵/۷۴	۴/۳۸	۵/۷۱



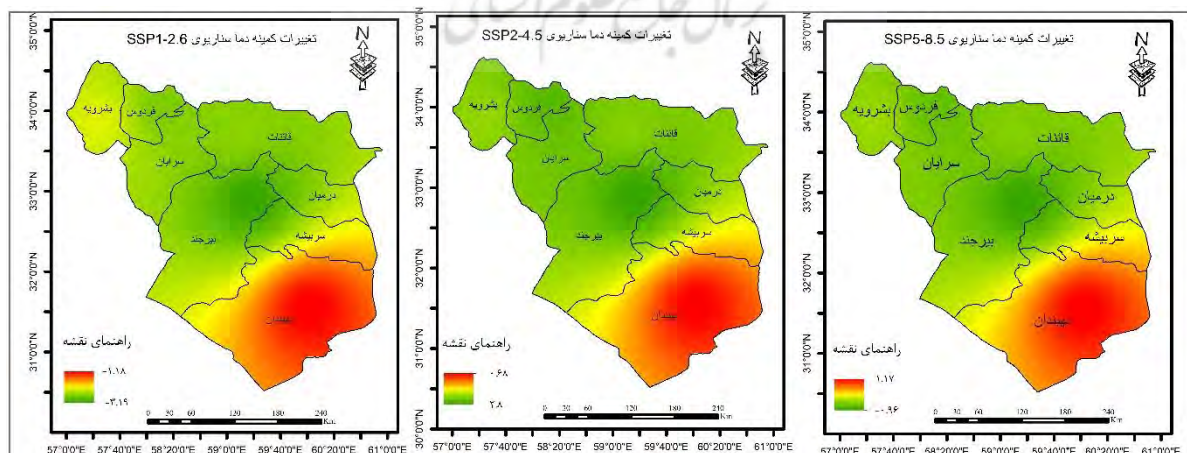
شکل ۳- تغییرات دمای بیشینه در طی دوره (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به درجه سلسیوس

تغییرات کمینه دما

به توجه به جدول (۷) و شکل (۴) تحت تمام سناریوها در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ مقدار میانگین دما کمینه نسبت به دوره پایه برخلاف بیشینه دما کاهش پیدا کرده است. تحت تمام سناریوها، بیشترین کاهش مربوط به ایستگاه بیرجند با $-۳/۲۰$ ، $-۲/۸۱$ و $-۰/۶۹$ درجه سلسیوس برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می‌باشد. کمترین تغییر دما کمینه در استان برای هر سه سناریوی پیش بینی شده مربوط به ایستگاه نهندان با $-۱/۱۸$ ، $-۰/۶۸$ و $-۰/۳۵$ درجه سلسیوس است.

جدول ۷- دامنه تغییرات بیشینه دما در دوره آتی (۲۰۲۰ - ۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

ایستگاه سناریو	بیرجند	قائن	فردوس	نهندان	بشرویه
SSP1-2.6	-۳/۲۰	-۲/۷۰	-۲/۷۶	-۱/۱۸	-۲/۳۱
SSP2-4.5	-۲/۸۱	-۲/۳۱	-۲/۵۷	-۰/۶۸	-۲/۲۴
SSP5-8.5	-۰/۶۹	-۰/۴۶	-۰/۶۴	۱/۱۸	-۰/۳۵



شکل ۴- تغییرات دمای کمینه در طی دوره (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به درجه سلسیوس

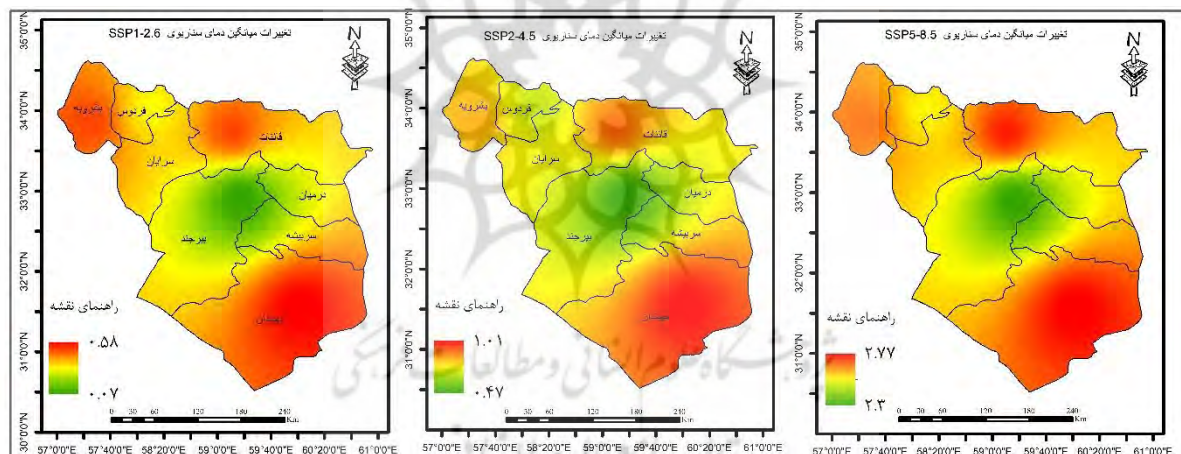
تغییرات میانگین دما

با توجه به جدول ۸ میانگین دما استان خراسان جنوبی در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ در مقایسه با دوره آماری در تمامی ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. شکل (۵) میانگین سالانه دمای استان را در دوره آتی نشان می‌دهد با توجه به شکل (۵) بیشترین افزایش دما در مناطق جنوبی استان (شهرستان نهبندان) رخ خواهد داد و همچنین نتایج نشان دهنده این مطلب است که در بین سه سناریوی اقلیمی مورد مطالعه سناریوی SSP5-8.5 بیشترین افزایش دما را تجربه خواهد کرد.

جدول ۸- دامنه تغییرات بیشینه دما در دوره آتی (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

8.5

ایستگاه سناریو	بیرجند	قائن	فردوس	نهبندان	بشرویه
SSP1-2.6	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۳۳	۰/۵۸	۰/۵۱
SSP2-4.5	۰/۴۷	۰/۹۱	۰/۶۹	۱/۰۲	۰/۸۳
SSP5-8.5	۲/۳۱	۲/۷۵	۲/۵۵	۲/۷۸	۲/۶۸



شکل ۵- تغییرات دمای کمینه در طی دوره (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به درجه سلسیوس

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی پارامترهای آب و هوایی در استان خراسان جنوبی که دارای شرایط اقلیمی نیمه خشک و خشک است (که نسبت به تغییر اقلیم حساسیت بیشتری نشان می‌دهد) از گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده شد. مدل گزارش ششم از به گزارش‌های قبلی از دقت و وضوح بیشتری برخوردار است. بنابراین کاربرد این مدل در استان خراسان جنوبی که از مناطق نیمه‌خشک و خشک ایران محسوب می‌شود ضروری است. بر اساس تعریفی که از تغییر اقلیم توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم ارائه شده است منطقه مورد مطالعه طبق نتایج مدل CMIP6

از این پدیده مستثنا نیست. بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته مدل (CESM2) روند معنی دار افزایش دما متوسط را در دوره آتی (۲۱۰۰ - ۲۰۲۰) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش بینی کرده است که نتایج حاصل با نتایج عباسی و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت دارد. میانگین دما در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ میلادی به طور متوسط ۱/۲۷ درجه سلسیوس در مقایسه با دوره آماری پایه ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ افزایش می یابد که بیشترین افزایش در سناریوی SSP5.8-5 با میانگین (۲/۶۸) درجه سلسیوس خواهد بود. بیشترین افزایش دمای کمینه مربوط به ایستگاه نهبندان و کمترین افزایش در ایستگاه بیرجند (۰/۹۵) می باشد.

میانگین دمای بیشینه استان ۴/۱۳ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت و بر خلاف میانگین بیشینه میانگین کمینه ۱/۶۰- درجه سلسیوس کاهش خواهد بود که این بیانگر افزایش پدیده های حدی دمایی در سطح استان خراسان جنوبی خواهد بود.

بر اساس نتایج حاصل از داده های مشاهده شده (۲۰۱۸ - ۱۹۸۹) بارندگی در استان از روند خاصی تبعیت نمی کند. همچنین طبق داده های مدل سازی شده توسط مدل HadGEM3-GC تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بارندگی در دوره آینده افزایش خواهد یافت. به طور کلی و بر اساس نتایج حاصل از سناریوهای SSP میانگین بارندگی در دوره آینده نسبت به داده دوره پایه ۳/۵۳ درصد افزایش خواهد داشت. نتایج ارزیابی کارایی مدل توسط معیارهای آماری KGE نشان داد مدل در پارامترهای دما از قابلیت بالا برخوردار است در حالی که در مورد پارامتر بارندگی به علت وجود مقادیر صفر از قابلیت مناسبی برخوردار نیست.

منابع

- اکبری، مهری و صیاد، وحیده. (۱۴۰۰) تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران. پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۳، شماره ۱، صص ۷۴-۴۳.
- انصاری مهابادی، ثمین،. دهقان، حسین،. زارعیان، محمد جواد،. فرخ نیا، اشکان،. ۱۴۰۱، بررسی روند تغییرات دما و بارش حوزه های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برون داد مدل های CMIP6، مجله پژوهش آب ایران، جلد ۱۶، شماره ۱، صص ۲۴-۱۱.
- آخوندی خلفی، امیر محمد؛ زارع بیدکی، رفعت؛ فاضلی عطار، سیده رزیتا، ۱۳۹۹، شبیه سازی پارامترهای هواشناسی تحت تأثیر تغییر اقلیم بر اساس سال های ۲۰۳۰ - ۲۰۱۱ و ۲۰۶۵ - ۲۰۴۶ در نرم افزار LARS- WG5، مطالعات علوم محیط زیست، دوره پنجم، شماره ۳، صص ۲۷۹۱-۲۸۰۰.
- حجازی زاده، زهرا؛ زارعی، شریفه و صیاد، وحیده، (۱۴۰۲) بررسی چشم انداز تغییرات شاخص های حدی دما و بارش در استان کردستان بر اساس سناریوهای (RCP) واداشت تابشی. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره ۲۳، شماره ۶۹، صص ۱۴-۱.
- زرین، آذر و. صالح آبادی، نسرين،. ۱۳۹۸، پیش آگاهی مخاطره خشک سالی در تهران بر اساس برون داد مدل های CMIP6، ششمین کنفرانس بین المللی - منطقه ای تغییر اقلیم.

- عابدینی، الهام، موسوی بایگی، محمد، خاشعی سیوکی، عباس، سلاح ورزی، یحیی، ۱۳۹۸، بررسی روند رویدادهای اقلیمی حدی در استان خراسان جنوبی، نشریه هواشناسی کشاورزی، جلد ۷، شماره ۲، صص ۶۶-۵۵.
- کاظمی راد، لادن؛ مدبری، هادی، ۱۴۰۲، ارزیابی پارامترهای اقلیمی دریاچه اوان تحت تأثیر تغییر اقلیم، مطالعات محیط زیست، دوره هشتم، شماره سوم، صص ۶۹۳۶ - ۶۹۴۲.
- کلاچیان، رویا، ثقفیان، بهرام & معظمی، صابر. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی روش‌های پس پردازش و اصلاح اریبی بر پیش‌بینی‌های ماهانه بارش و دما در حوضه کارون. *تحقیقات منابع آب ایران*. 16(4), 98-111.
- میان‌آبادی، آمنه؛ باطنی، محمد مهدی؛ محمدی، صدیقه، ۱۴۰۲، پیش‌نمای تغییرات بارش و دما با استفاده از شبیه‌سازی اصلاح اریبی شده مدل‌های اقلیمی گزارش ششم، نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، سال چهارم، شماره ۱۳، صص ۸۴-۶۵.
- میراکبری، مریم، مصباح‌زاده، طیبه، محسنی ساروی، محسن، خسروی، حسن و مرتضایی فریزه‌ندی، قاسم. (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی مدل سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد (مطالعه موردی: استان یزد). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، دوره ۵۰، شماره ۵، صص ۶۰۹ - ۵۹۳.
- Ahmed, K.F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A.M., Allen, J.M., Horton, R., Anyah, R., 2013. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast, *Global and Planetary Change*, 100, 320-332.
- Almazroui M, Saeed F, Saeed S, Nazrul Islam M, Ismail M, Ama N, Klutse B, Siddiqui M (2020) Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment* 4:455-475
- Boonman, C.C.F., Huijbregts, M.A.J., López, A.B., Schipper A.M., Thuiller, W., Santini, L. (2021). Trait-based projections of climate change effects on global biome distributions, *Diversity and Distributions*, 28 (1): 25-37. <https://doi.org/10.1111/ddi.13431>
- Castro, A.Q.; Yaneth, A. B.T.; Erick, R.B.; Juan G.L.; Jesús, G.R.P. (2022). Modeling the effect of climate change scenarios on water quality for tropical reservoirs, *Journal of Environmental Management*, 322: 116137. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116137>.
- Chen R, Li H, Wang X, Gou X, Yang M, Wan G (2022) Surface air temperature changes over the Tibetan Plateau: Historical evaluation and future projection based on CMIP6 models. *Geoscience Frontiers* 13(6):101452.
- Chen W. Jiang Z. and Li L. 2011. Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*. 24(17): 4741-4756.
- Dubrovský, M., Hayes, M., Duce, P., Trnka, M., Svoboda, M., & Zara, P. (2014). Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change*, 14(5), 1907-1919.

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9 (5), 1937-1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Fang G H, Yang J, Chen Y N, Zammit C (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:2547–2559
- Gunavathi, S., Selvasidhu, R. (2021). Assessment of Various Bias Correction Methods on Precipitation of Regional Climate Model and Future Projection, Research Square, doi:10.21203/rs.3.rs-339080/v1.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- Kamworapan S, Bich Thao P T, Gheewala S H, Pimonsree S, Prueksakorn K (2021) Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century. *Heliyon* 7(11):e08263.
- Knoben, W. J., J. E. Freer and R. A. Woods. 2019. Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(10): 4323-4331.
- Liu X, Liu Y, Liu Z, Chen Z (2021) Impacts of climatic warming on cropping system borders of China and potential adaptation strategies for regional agriculture development. *Science of the Total Environment* 755:142415.
- Majumder, M. (2015). *Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations*. Springer.
- McGinnis, S., Nychka, D., Mearns, L. O. (2015). A new distribution mapping technique for climate model bias correction. In *Machine learning and data mining approaches to climate science* (pp. 91-99). Springer, Cham.
- Mehran, A., AghaKouchak, A., & Phillips, T. J. (2014). Evaluation of CMIP5 continental precipitation simulations relative to satellite-based gauge-adjusted observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (4), 1695-1707.
- Ongoma V, Chena H and Gaoa C (2018) Projected changes in mean rainfall and temperature over east Africa based on CMIP5 models. *International Journal of Climatology* 38(3):1375–1392
- Patil, S. D. and M. Stieglitz. 2015. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology* 525: 409-417.
- Rätty O, Räisänen J, Ylhäisi J S (2014) Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: Intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate Dynamics* 42(9-10):2287-2303.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., & Lutz, W. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land

use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

- Srivastava, A., Grotjahn, R., Ullrich, P.A. 2020. Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions, *Weather and Climate Extremes*, 29, 100268.
- Teutschbein, C., Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, pp 12-29.
- Yeboah, K. A., Akpoti, K., Kabo-bah, A. T., Ofosu, E. A., Siabi, E. K., Mortey, E. M., Okyereh, S. A. (2022). Assessing climate change projections in the Volta Basin using the CORDEX-Africa climate simulations and statistical bias correction. *Environmental Challenges*, 6, pp 1-18.
- Zhu, Y. Y., . and Yang, S. (2020). Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 11(3),): 239-251.

