

پیش‌نگری تغییرات نمایه‌های حدی اقلیمی در استان خراسان رضوی (مطالعه موردی: تربت حیدریه و کاشمر)

مهدیه زینل زاده^۱، غلامرضا جانباز قبادی^{۲*}، صدرالدین متولی^۲، مجید طاهریان^۳، منصوره کوهی^۴

۱- دانشجوی دکتری، آب و هواشناسی، دانشگاه آزاد-واحد نور-نور-ایران.

۲ - دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد-واحد نور-نور-ایران.

۳-استادیار بخش تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی مشهد ایران.

۴- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران.

چکیده

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های بزرگ قرن بیست و یکم، تأثیرات گسترده‌ای بر الگوهای آب و هوایی جهانی و منطقه‌ای دارد. استان خراسان رضوی، به عنوان یکی از مناطق حساس به تغییرات اقلیمی در ایران، با تغییرات قابل توجهی در نمایه‌های حدی بارش و دما مواجه است. در این مطالعه پنج مدل ACCESS-ESM1-5، JPSL-CM6A-LR، BCC-CSM2-MR، MIROC6 و CanESM5 از آخرین نسخه موجود مدل‌های فاز ششم (CMIP6) با دو سناریوی اجتماعی-اقتصادی (SSP) SSP2.4.5 و SSP5.8.5 برای دوره ۲۰۲۶-۲۱۰۰ جهت شناسایی رویدادهای حدی در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه استفاده شد. ابتدا داده‌های پنج مدل از مدل‌های CMIP6 با استفاده از نرم افزار CMhyd و با روش تغییر عامل دلتا (DCF) ریزمقیاس شدند. در نهایت روند داده‌ها با استفاده از آزمون من-کنندال بررسی شد. صحت سنجی مدل‌های مورد بررسی با دو روش ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای دو متغیر دما و بارش نشان داد مدل ACCESS-ESM1-5 دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق داشته است. تغییرات زمانی شاخص‌های حدی دما و بارش از سال ۲۰۲۶ تا ۲۱۰۰ به طور مداوم شرایط خشک‌تری را نشان داده و رویدادهای حدی بارش مکرر و شدیدتر خواهد شد. نمایه‌های حدی دما نشان‌دهنده افزایش شدید دما در هر دو سناریوی SSP2.4.5 و SSP5.8.5 در آینده است. سناریوی SSP5.8.5 نشان‌دهنده تنش آبی شدیدتری نسبت به سناریوی SSP2.4.5 است. رویدادهای حدی بارش نشان‌دهنده افزایش باران‌های شدید و بسیار شدید و همچنین افزایش سهم بارش‌های حدی از کل بارش سالانه است. تحت شرایط تغییر اقلیم آینده در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه انتظار می‌رود دماهای حدی مانند کمترین، گرمترین و میانگین حداکثر دمای روزانه در تمام دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۷-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) و سناریوها افزایش یابد که نشان دهنده شرایط گرمتر تا پایان قرن است. این شرایط لزوم بکارگیری برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیمی به‌ویژه در زمینه آب و کشاورزی را ضروری می‌سازد.

کلید واژه‌ها: نمایه‌های حدی دما و بارش، تغییر اقلیم، کاشمر، تربت حیدریه، مدل CMhyd.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تشدید رویدادهای حدی آب و هوایی به عنوان یک نمود آشکار از تغییر اقلیم ظهور کرده است و درک بشر از سامانه زمین را به چالش کشیده است. تشدید چنین رویدادهایی - از خشکسالی‌های شدید و امواج گرمایی گرفته تا طوفان‌ها و سیل‌های بی‌سابقه - خطرات قابل توجهی را برای اکوسامانه‌ها، اقتصادها و جوامع در سراسر جهان به همراه داشته است (استوت، ۲۰۱۶).

در نتیجه گرمایش زمین و تغییر اقلیم، رویدادهای آب و هوایی حدی مانند سیل، خشکسالی، آتش سوزی و امواج گرمایی روند افزایشی نشان داده است (باراس و همکاران، ۲۰۲۱). تغییر اقلیم باعث تشدید مدت، شدت و فراوانی رویدادهای حدی شده است که بر بخش‌های مختلف اجتماعی-اقتصادی در سراسر جهان تأثیر نامطلوبی گذاشته است (بیاکرمی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، رویدادهای حدی آب و هوایی که نسبت به میانگین اقلیم، حساسیت بیشتری به تغییرات آب و هوایی دارند به عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات جهانی شناخته می‌شوند (گوآن و همکاران، ۲۰۲۲). مرکز تحقیقات بلایای طبیعی (CRED) گزارش داده است که رویدادهای حدی دمایی در دو دهه گذشته، عامل ۱۳ درصد از مرگ و میر ناشی از بلایای طبیعی در سطح جهان بوده و سیل و خشکسالی نیز به ترتیب ۱/۶۵ میلیارد و ۱/۴۵ میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار داده‌اند (باقل و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعه رویدادهای حدی اقلیمی در کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این رویدادها تأثیر عمیقی بر میزان محصول، کیفیت تولید و به طور کلی امنیت غذایی دارند. نمایه‌های حدی اقلیم مانند خشکسالی، سیل و موج گرما می‌توانند منجر به زیانهای قابل توجهی در بخش کشاورزی شده و در نتیجه کمیت و کیفیت تولید مواد غذایی را تحت تأثیر قرار دهند (کوگاتو و همکاران، ۲۰۱۹). درک الگوها و تأثیرات بالقوه این رویدادها امکان آمادگی بهتر و توسعه راهکارهای مؤثر کاهش و سازگاری را فراهم می‌آورد. این دانش برای تضمین انعطاف‌پذیری سامانه‌های کشاورزی، به ویژه در مناطق دیمی که تغییرات در بارشها می‌تواند بر میزان محصولات کشاورزی تأثیر شدیدی داشته باشد، حیاتی است (سوامیناتان و رانگالاکشمی، ۲۰۱۶). علاوه بر این، رسیدگی به تأثیرات فوری تغییرات آب و هوایی و رویدادهای حدی جوی برای مدیریت عرضه، جلوگیری از نوسانات قیمت و حفظ ثبات

بازار ضروری است. بنابراین، مطالعه رویدادهای حدی جوی نه تنها برای حفاظت از روشهای کشاورزی فعلی بلکه برای برنامه‌ریزی و تأمین مواد غذایی آینده در برابر تغییرات آب و هوایی اهمیت دارد (های، ۲۰۰۷).

بررسی رویدادهای حدی در استان خراسان رضوی، به ویژه در مناطق تربت حیدریه و کاشمر، به دلیل تأثیر قابل توجهی که این رویدادها می‌توانند بر کشاورزی محلی، اقتصاد و رفاه ساکنان آن داشته باشند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. تربت حیدریه که به خاطر کشت زعفران شناخته شده است و کاشمر که دارای کشاورزی غنی است، هر دو در معرض تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی قرار دارند. خشکسالی‌ها، موجهای گرما و الگوهای نامنظم بارش می‌توانند به شدت بر میزان و کیفیت زعفران تأثیر بگذارند، و همچنین تهدیدی برای کلیت تولیدات کشاورزی این مناطق باشند (برنامه آمایش سرزمین استان خراسان رضوی، ۱۴۰۱). درک فراوانی، شدت و پیامدهای رویدادهای حدی جوی برای توسعه استراتژیهای مؤثر کاهشی، تضمین شیوههای کشاورزی پایدار و حفظ معیشت جوامع کشاورزی حیاتی است. علاوه بر این، چنین تحقیقاتی می‌تواند به تصمیم‌گیریهای سیاستی، توسعه زیر ساخت‌ها و برنامه‌های آمادگی اضطراری کمک کند تا انعطاف‌پذیری تربت حیدریه و کاشمر در برابر چالش‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی تقویت شود. لذا بررسی نمایه‌های حدی اقلیمی طی دوره تاریخی و پیش‌نگری آن در آینده یک ضرورت جدی برای این منطقه از ایران محسوب می‌شود.

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP)، با مشارکت مراکز مدل‌سازی اقلیمی در سراسر جهان، برای درک بهتر تغییرات آب و هوایی از گذشته تا آینده تأسیس شد. این پروژه برای بررسی قابلیت پیش‌بینی سامانه اقلیمی و انجام پیش‌نگریها بر اساس اقلیم مشاهده شده، توسعه داده است (استوفر و همکاران، ۲۰۱۷). در حال حاضر آخرین فاز (فاز ۶) CMIP، که با نام CMIP6 شناخته می‌شود، در مقایسه با نسل قبلی خود (CMIP5)، پیشرفت‌های قابل توجهی را به همراه داشته است.

نمایه‌ای حدی دما و بارش در ساله‌ای اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفتند. در همین راستا تحقیقات مختلفی به بررسی این نمایه‌ها در مناطق مختلف جهان پرداختند. در ادامه به برخی از مهمترین این تحقیقات پرداخته می‌شود. باگچی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که مدل‌های CMIP6 در مقایسه با

پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۶ بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 در مشهد تحقیقی است که توسط چمانه‌فر و همکاران (۱۴۰۱) انجام شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که شاخص شب‌های سرد روند کاهشی معنادار و درصد شب‌های گرم روند افزایشی معنادار دارند و در سطح اطمینان ۹۰ درصد تعداد روزهای تابستانی نیز در سناریو خوش‌بینانه در آینده نزدیک، میانه و دور روند افزایشی معنی‌دار دارد و در سناریو میانه (آینده نزدیک و میانه) و در سناریو بدبینانه (تنها در آینده نزدیک) روند افزایشی دارد. زرین و همکاران (۱۴۰۱) به پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست‌ویکم در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که شدت خشکسالی و درصد سال‌های کمتر از نرمال در آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) بیش‌تر از آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) بخصوص برای سناریو SSP5.8.5 در متوسط پهنه‌ای حوضه است. آشکار سازی تغییر اقلیم با تحلیل روند وقوع رخداد‌های فرین اقلیمی در غرب و جنوب غرب ایران تحقیق است که زند و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی آن پرداختند. نتایج آنها نشان داد که فراوانی رخداد و روند شاخص‌های حدی بارش در سطح منطقه، مؤید آنست که همانند بسیاری از نواحی کشور، مجموع بارش منطقه با کاهش مواجه شده است. در مقابل بارش‌های حداکثری در عین اینکه مقادیر حدی قابل توجهی را نشان می‌دهند، طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ دارای روند نزولی بوده‌اند.

بررسی پیشینه تحقیق نشان داده است که هر چند که مطالعات زیادی در خصوص نمایه‌های حدی اقلیمی انجام شده است اما تاکنون تحقیقی که بررسی فرین‌های اقلیمی دما و بارش در استان خراسان رضوی و بخصوص در ایستگاه‌های ترتب حیدریه و کاشمر انجام نشده است. نتایج این تحقیق دارای اهمیت زیادی بخصوص در حوزه تغییر اقلیم و پیامدهای آن در کشاورزی است. این مقاله با داده‌های مدل‌های در دسترس CMIP6 و روشهای آماری، به بررسی رابطه پیچیده بین پدیده‌های آب و هوایی حدی و تغییرات آن در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی می‌پردازد.

مدل‌های CMIP5. هنگام ارزیابی تغییرات بارش و دما در ترکیه، عملکرد بهتری دارند. سونگ و یان (۲۰۲۲) به ارزیابی رویدادهای حدی با استفاده مدل‌های CMIP6 در چین پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که اکثر مدل‌های CMIP6 فراوانی نمایه‌های حدی را در چین بیشتر از داده‌های مشاهداتی برآورد میکنند. در پژوهشی دیگر لی و همکاران (۲۰۲۲) رویدادهای دمای حدی در جنوب غربی چین را با استفاده از نه مدل CMIP6 بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان که روند گرمایشی قابل توجهی برای نمایه‌های حدی در جنوب چین وجود خواهد داشت. همچنین DTR (محدوده دمایی روزانه) روند کاهشی را نشان داد. بایار (۲۰۲۳) با مقایسه طبقه‌بندی کوپن-گایگر با استفاده از مدل‌های CMIP5 و CMIP6 و بررسی تفاوت‌های آن‌ها، نشان داد که CMIP6 به دلیل پیش‌نگری گرم‌تر، تغییرات بیشتری در طبقات اقلیمی خواهد داشت. علی و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی عملکرد GCM های CMIP6 برای پیش‌نگری‌های حدی بارش در پاکستان پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های EC-Earth3-NorESM2-MM و Veg0 MRI-ESM بهترین عملکرد را در بین GCM ها در شبیه سازی تاریخی و پیش‌نگری نمایه‌های بارش در آینده داشتند.

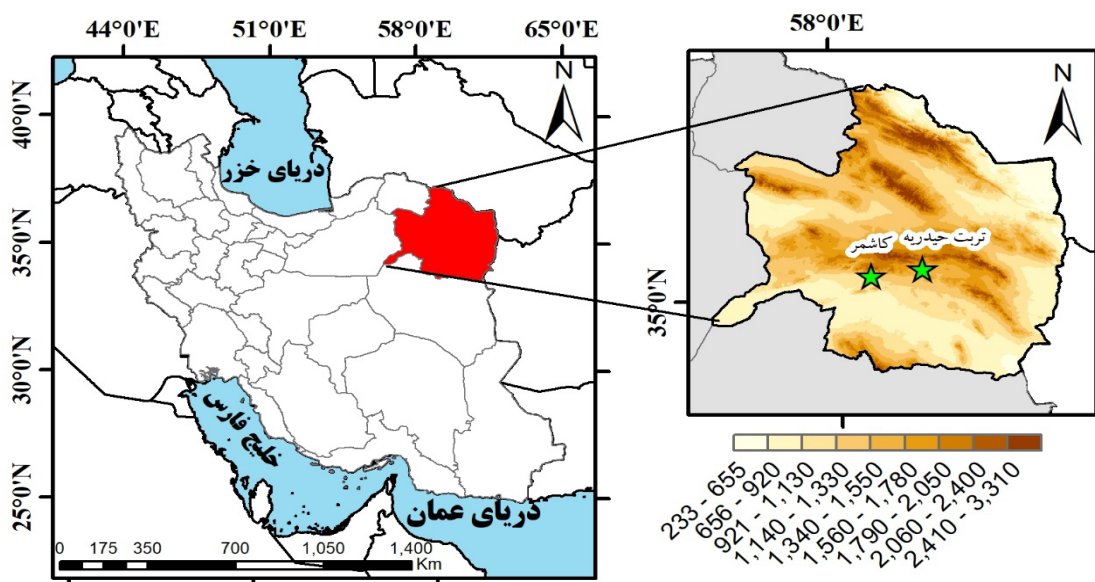
نمایه‌های حدی دما و بارش در ایران نیز مورد بررسی زیادی قرار گرفتند. از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهش احمدی و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی دورنمای فرین‌های گرم ایران مبتنی بر برونداد مدل میان مقیاس منطقه‌ای (REGCM) پرداخته شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در دهه‌های آینده بیشینه گرماهای فرین در نیمه غربی و نوار ارتفاعی (کوهستان و کوهپایه) رخ خواهد داد به طوریکه فرین‌های دمایی در مناطق یادشده بیشتر از نواحی داخلی و سواحل جنوبی کشور خواهند بود. پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP6 تحقیق دیگری است که زرین و داداشیرو دباری (۱۴۰۰) به بررسی آن پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بر اساس سناریوهای SSP ۷-۳ و SS-۵، ۸.۵ میانگین دمای سالانه کشور به ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۲۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. کمینه بی‌هنجاری در جنوب شرق و بیشینه آن در مناطق شمال غربی و مرکزی ایران اتفاق می‌افتد.

به طور کلی با تابستان‌های طولانی، گرم، خشک و آسمانی صاف و زمستان‌های بسیار سرد، برفی و عمدتاً صاف مشخص می‌شود. کاشمر که در غرب استان واقع شده، در نزدیکی رودخانه شش‌تراز قرار دارد و با محیطی بیابانی احاطه شده است که بر نواحی گرم جنوبی آن تأثیر می‌گذارد. در مقابل، مناطق شمالی کاشمر از آب و هوای معتدل برخوردار هستند. کاشمر در ارتفاع ۱۰۶۳ متری و در جنوب مشهد واقع شده است. آب و هوای این منطقه نیمه‌خشک توصیف می‌شود که تحت تأثیر بیابان، منجر به شرایط گرم و خشک، به ویژه در مناطق با ارتفاع پایین‌تر می‌شود. با این حال، مناطق کوهستانی زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم و خشک را به همراه دارند.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

ترت حیدریه و کاشمر، دو منطقه برجسته در استان خراسان رضوی هستند که هر کدام از ویژگی‌های جغرافیایی و آب و هوایی متمایزی برخوردارند (شکل ۱). ترت حیدریه در منطقه‌ای کوهستانی و دامنه‌ی کوه‌ها واقع شده است که به الگوهای آب و هوایی متنوع آن در مناطق مختلف کمک می‌کند. این شهر در ارتفاع ۱۳۳۰ متری از سطح دریا و با فاصله تقریبی ۱۵۷ کیلومتری از مشهد، مرکز استان، قرار دارد. این منطقه به دلیل تولید زعفران مشهور بوده و لقب پایتخت طلای سرخ ایران را به خود اختصاص داده است. اقلیم ترت حیدریه



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاههای مورد بررسی

درک بهتر تغییرات گذشته، حال و آینده ناشی از نوسانات طبیعی یا تغییر اقلیم ناشی از عوامل انسانی است. مدل‌های CMIP6 علاوه بر بررسی تغییرات در بازه‌های زمانی بلندمدت، با مشارکت سازمان‌های تحقیقاتی مرتبط در سراسر جهان، قابلیت پیش‌بینی سامانه اقلیمی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بررسی می‌کند و بر اساس مشاهدات وضعیت اقلیمی، پیش‌بینی‌هایی انجام می‌دهد. نسخه ششم CMIP با نام CMIP6، عملکرد بهتری نسبت به نسل قبلی خود یعنی CMIP5 نشان داده است (استوفر و همکاران، ۲۰۱۷). نام مدل‌های مورد بررسی در دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، سناریو SSP2.4.5، سناریو SSP5.8.5 برای

داده‌های ایستگاهی

از داده‌های دو ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ترت حیدریه و کاشمر با طول دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ (همهانگ با طول دوره آماری مدل‌های CMIP6) برای بررسی تغییرات نمایه‌های فرین دما و بارش در استان خراسان رضوی استفاده شده است. متغیر مورد بررسی در این تحقیق دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش است.

مدل‌های اقلیمی CMIP6

در این پژوهش، برای پیش‌نگری‌های آینده اقلیمی از جدیدترین مدل‌های CMIP6 استفاده شد. هدف CMIP6،

مدل‌های CMIP6 طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) در جدول (۱) نشان داده شده است.

ریزمقیاس‌نمایی توسط CMHyd

برونداد مدل‌های GCM به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن به‌طور مستقیم قابل استفاده نیستند برای رفع مشکل از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای ریزمقیاس‌نمایی برونداد مدل‌های گردش عمومی جدول (۱) از نرم‌افزار CMHyd استفاده شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هیدرولوژی توسط (Rathjens et al, ۲۰۱۶) در دانشگاه پردو آمریکا در محیط پایتون توسعه داده شده است. CMHyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرایندی مجزا برای بارش و دما استفاده می‌کند. از بین هشت روش یاد شده، پنج روش مختص بارش است. اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۲). این نرم‌افزار نیازمند سه نوع داده شامل داده دیده‌بانی، داده دوره گذشته مدل اقلیمی (دوره تاریخی) و داده سناریو (آینده) مدل‌های اقلیمی است. فرایند ریزمقیاس‌نمایی در پنج مرحله انجام می‌شود. در این تحقیق از روش تغییر عامل دلتا (Delta-Change (DC)) استفاده شده است. این روش هم برای دما و هم برای بارش قابل استفاده است. روش تغییر عامل یکی از روش‌های تصحیح اریبی در مدل‌های اقلیمی است. این روش به منظور کاهش خطاهای سیستماتیک در داده‌های مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود. در این روش، تغییرات نسبی یا مطلق بین داده‌های تاریخی و داده‌های مدل برای دوره‌های آینده اعمال می‌شود. مراحل روش به این شرح است که ابتدا تغییرات دلتا (Δ) بین داده‌های تاریخی و داده‌های مدل محاسبه می‌شود. این تغییرات می‌تواند به صورت نسبی (درصدی) یا مطلق باشد. سپس این تغییرات دلتا به داده‌های مدل برای دوره‌های آینده اعمال می‌شود تا داده‌های تصحیح شده به دست آید (Rätty et al, 2014).

روش‌های صحت‌سنجی مدل‌های مورد بررسی از شاخص‌های آماری برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد تا شباهت بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره تاریخی در قالب مقادیر آماری بررسی شود (Gupta et al, ۲۰۰۹). برای تعیین دقت هر یک از پنج مدل این تحقیق در دو ایستگاه شمال شرق ایران، پس از تصحیح اریبی، شاخص‌های آماری R^2 (ضریب تبیین) (رابطه ۱) و RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) (رابطه ۲) محاسبه شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i S_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O_i^2 \sum_{i=1}^n S_i^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_o - x_s)^2}{N}} \quad (2)$$

نمایه‌های فرین مورد بررسی

سازمان هواشناسی جهانی (WMO) جهت تجزیه و تحلیل تأثیر پدیده‌های اقلیمی، نمایه‌ها حدی را توسعه داده است. این نمایه‌ها را می‌توان به چهار گروه دسته‌بندی کرد: (۱) نمایه‌های مطلق، (۲) نمایه‌های آستانه، (۳) نمایه‌های طول دوره، و (۴) نمایه‌های صدک (سیلمن و همکاران، ۲۰۱۳). نمایه‌های مطلق، حداکثر یا حداقل مقدار را طی یک دوره زمانی نشان می‌دهند، در حالی که نمایه‌های آستانه تعداد روزهایی را می‌شمارند که مقدار دما یا بارش از یک آستانه انتخابی بالاتر یا پایین‌تر می‌رود. نمایه‌های دوره‌ای بیانگر دوره گرم، خشک یا سرد هستند و نمایه‌های صدک میزان عبور از یک درصد را توصیف می‌کنند که بر اساس یک دوره پایه تعریف شده محاسبه می‌شوند. نمایه‌های حدی مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۱). مدل‌های CMIP6 مورد بررسی برای بررسی نمایه‌های فرین در ایستگاههای منتخب خراسان رضوی

ردیف	موسسه سازنده مدل	ابعاد شبکه	کشور سازنده	مدل
1	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	250km	ژاپن	MIROC6
2	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	100km	چین	BCC-CSM2-MR
3	Institute Pierre-Simon Laplace	250km	فرانسه	IPSL-CM6A-LR
4	CSIRO-ARCCSS; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, and Bureau of Meteorology (Australia)	100km	استرالیا	ACCESS-ESM1-5
5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis-Canada	250km	کانادا	CanESM5

جدول (۲). نمایه‌های حدی دما و بارش گروه کارشناسی شناسایی تغییر اقلیم و نمایه‌ها مورد استفاده در این تحقیق

(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱)

نمایه	تعریف	واحد
FD	روزهای یخبندان: تعداد روزهایی از سال که دمای کمینه روزانه کوچکتر از صفر درجه سلسیوس باشد	روز
TXx	بزرگ‌ترین دمای بیشینه: میزان حداکثر دمای بیشینه روزانه در ماه	درجه سلسیوس
TXn	کوچک‌ترین دمای بیشینه: میزان حداقل دمای کمینه روزانه در ماه	درجه سلسیوس
TNm	میانگین دمای کمینه روزانه	درجه سلسیوس
TXm	میانگین دمای بیشینه روزانه	درجه سلسیوس
TMm	میانگین دمای روزانه	درجه سلسیوس
TNn	کوچک‌ترین دمای کمینه: میزان حداقل دمای کمینه در ماه	درجه سلسیوس
WSDI	موج گرما: تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز پیاپی دمای روزانه بیشتر از صدک ۹۰ام دوره مینا باشد	روز
CSDI	موج سرما: تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز متوالی دمای شبانه کوچکتر از صدک ۱۰ام دوره مینا باشد	روز
DTR	دامنه دمای شبانه‌روزی: تفاوت میانگین ماهانه دمای روزانه و شبانه	درجه سلسیوس
RX1day	بیشترین مقدار بارش یک‌روزه: بیشترین بارش یک‌روزه در ماه	میلیمتر
SDII	نمایه ساده شدت بارش روزانه: از تقسیم مقدار کل بارش سالانه بر تعداد روزهای بارشی (دستکم ۱ میلیمتر) سالانه به دست می‌آید.	میلیمتر در روز
CDD	روزهای متوالی خشک: بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش کمتر از ۱ میلیمتر باشد	روز
CWD	روزهای متوالی مرطوب: بیشترین تعداد روزهای متوالی که بارش بیشتر از ۱ میلیمتر باشد	روز
PRCPTOT	مقدار کل بارش روزهای مرطوب سالانه: مقدار کل بارش روزهای مرطوب (مقدار بارش دستکم از ۱ میلیمتر بیشتر باشد)	میلیمتر

روند نمایه‌های حدی اقلیم

خواهند بود. با تحلیل این امتیازها، آزمون می‌تواند وجود یک

روند آماری معنادار را تعیین کند (کندال، ۲۰۱۵).

آزمون روند شیب سن (Sen's Slope)، همچنین شناخته شده

به عنوان برآوردگر Theil-Sen، یک روش ناپارامتری برای

تخمین شیب روند در یک سری زمانی تک‌متغیره است. این

روش به ویژه در برابر داده‌های پرت مقاوم بوده و نیازی به

تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال ندارد و به همین دلیل برای

تحلیل داده‌های اقلیمی بسیار مناسب است (دابانی و

همکاران، ۲۰۱۶). این آزمون میانگین تمامی شیب‌های ممکن

بین جفت به جفت نقاط داده در سری زمانی را محاسبه

آزمون روند من-کندال (Mann-Kendall)) یک روش آماری

است که برای شناسایی روندهای داده به کار می‌رود. مزیت

مهم این آزمون، ناپارامتری بودن آن است، یعنی نیازی به

تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال ندارد (حامد و راثو، ۱۹۹۸). این

ویژگی برای تحلیل داده‌های دنیای واقعی که اغلب با توزیع

نرمال مطابقت ندارند، بسیار مفید است. این آزمون با مقایسه

زوج‌های داده در یک سری زمانی و اختصاص امتیاز بر اساس

ترتیب آن‌ها عمل می‌کند. در صورت وجود روند، امتیازها

برای روندهای افزایشی مثبت و برای روندهای کاهش منفی

ایستگاه تربت حیدریه و کاشمر به ترتیب ۵۴/۲۴ و ۵۷/۹۸ به دست آمده است. نتایج مربوط به سایر مدل‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از پنج مدل مورد بررسی در این تحقیق، مدل ACCESS-ESM-۱ مدلی با کارایی بالاتر در این تحقیق است که برای بررسی نمایه‌های حدی از نتایج این مدل استفاده شده است.

شاخص CDD در جدول (۴)، حداکثر تعداد روزهایی متوالی را نشان می‌دهد که بارش روزانه آن‌ها کمتر از ۱ میلی‌متر است. در این شاخص، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده فصل‌های خشک طولانی‌تر است. برای دوره تاریخی، بالاترین مقادیر CDD در ایستگاه کاشمر با ۱۵۸ روز به دست آمده، در حالی که کمترین مقادیر در ایستگاه تربت حیدریه مشاهده می‌شود (جدول ۴). نمایه CWD، حداکثر تعداد متوالی روزهایی را نشان می‌دهد که بارش روزانه آن‌ها بیش از ۱ میلی‌متر است. در این شاخص، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده دوره‌های بارش طولانی‌تر است. برای دوره تاریخی، مقادیر CWD بین ۵/۷۲ تا ۸/۱۶ روز متغیر است، که بالاترین و پایین‌ترین مقادیر به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های تربت حیدریه و کاشمر است.

در هر دو ایستگاه مورد بررسی برای هر دو سناریوی انتشار در طول دوره پیشنگری، کاهش جزئی در CWD مشاهده می‌شود، با این حال SSP5.8.5 مقدار کمی پایین‌تر از SSP2.4.5 را پیشنهاد می‌کند. در مقایسه با تغییرات در CDD، تغییر آینده CWD در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه کمتر است. با این حال، با در نظر گرفتن هر دو شاخص، افزایش مقادیر CDD و کاهش مقادیر CWD نشان می‌دهد که شرایط خشکسالی در آینده در این بخش از استان تشدید خواهد شد. شاخص R95p در جدول (۴)، کل بارش سالانه را نشان می‌دهد که در آن بارش روزانه از صدک ۹۵م فراتر رود. صدک ۹۵م بر اساس دوره تاریخی محاسبه شده و برای همه دوره‌های پیش‌بینی ثابت نگه داشته شده است. با مقایسه مقادیر بین دوره‌های زمانی و ایستگاه‌های مورد بررسی، بر اساس نتایج شاخص R95p، در هر دو ایستگاه مورد بررسی تحت همه سناریوها انتظار افزایش بارش‌های حدی وجود دارد. این افزایش در ایستگاه تربت حیدریه مشهودتر است. از سوی دیگر، در حالی که انتظار افزایش کلی در هر دو سناریوی SSP5.8.5 و SSP2.4.5 در آینده

می‌کند. این برآوردگر اغلب در کنار آزمون من-کندال برای دستیابی به درک جامع از روندهای داده‌های سری زمانی به کار می‌رود، به ویژه در مطالعات محیطی و اقلیم‌شناسی ترجیح داده می‌شوند (جیگین و همکاران، ۲۰۲۳).

روش P-Value یکی از ابزارهای مهم در آزمونهای فرضیه آماری است که برای تعیین میزان شواهد علیه فرضیه صفر (null hypothesis) استفاده می‌شود. P-Value یا مقدار احتمال، عددی است که از یک آزمون آماری محاسبه می‌شود و نشان می‌دهد که داده‌های مشاهده شده چقدر با فرضیه صفر سازگار هستند. به عبارت دیگر، P-Value احتمال مشاهده نتایجی حداقل به اندازه نتایج مشاهده شده، در صورتی که فرضیه صفر درست باشد، را نشان می‌دهد. در آزمون‌های فرضیه، فرضیه صفر (H_0) معمولاً بیان می‌کند که هیچ تفاوت یا رابطه‌ای بین متغیرهای مورد بررسی وجود ندارد. فرضیه جایگزین (H_1) بیان می‌کند که تفاوت یا رابطه‌ای وجود دارد. P-Value به ما کمک می‌کند تا تصمیم بگیریم که آیا باید فرضیه صفر را رد کنیم یا نه (Abbott, 2001). در این تحقیق P-Value در سطح ۵ درصد برای روند آزمون شده است.

نتایج بحث

صحت سنجی بارش و دمای CMIP6 در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

نتایج صحت سنجی دو ایستگاه تربت حیدریه و کاشمر از ایستگاه‌های استان خراسان رضوی برای دو متغیر دمای میانگین و بارش در مقیاس سالانه در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان داده است مدل ACCESS-ESM-۱-۵ در بین مدل‌های مورد بررسی برای دما در هر دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه با مقدار ضریب تعیین ۰/۷۰ و ۰/۷۴ دارای دقت بالاتری است. به همین ترتیب همین مدل از بین مدل‌های BCC-CSM2-MR، IPSL-CM6A-LR، CanESM5 و MIROC6 با ضریب تعیین ۰/۷۲ و ۰/۷۳ در ایستگاه‌های تربت حیدریه و کاشمر مدلی با دقت بالاتر است. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای مدل ACCESS-ESM-۱-۵ در ایستگاه کاشمر برای دما ۱/۰۵ و در ایستگاه تربت حیدریه ۰/۸۸ محاسبه شده است. به همین ترتیب مقدار روش RMSE برای بارش به ترتیب در دو

گرفتن مقادیر شاخص بارش Rx5day، نشان می‌دهد که از بین دو ایستگاه مورد بررسی در استان خراسان رضوی ایستگاه تربت حیدریه با میانگین $20/77$ میلی‌متر، بالاترین مقدار را دارد، در حالی که ایستگاه کاشمر با میانگین $15/59$ میلی‌متر، کمترین مقدار را داراست. به طور کلی، انتظار می‌رود که در اواخر قرن، میانگین کل بارش‌های سنگین در این منطقه از شمال شرق کشور افزایش یابد. این افزایش طبق سناریوی SSP5.8.5 کمی بیشتر از سناریوی SSP2.4.5 پیش‌بینی می‌شود. شاخص PRCPTOT اطلاعاتی در مورد کل بارش بر حسب میلی‌متر در دوره‌ها و سناریوهای مورد بررسی ارائه می‌دهد. طی دوره تاریخی، بالاترین مقدار کل بارش در منطقه تربت حیدریه ($202/35$ میلی‌متر) مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین بارش در منطقه کاشمر ($138/99$ میلی‌متر) مشاهده می‌شود. مقدار کل بارش تحت سناریوی SSP2.4.5، برای دو ایستگاه مورد بررسی کاهش را پیش‌بینی می‌کند که نشان دهنده کاهش نسبی بارش در این دو منطقه از شمال شرق کشور است.

شاخص FD تعداد کل روزهایی را در یک سال نشان می‌دهد که حداقل دما کمتر از صفر درجه سلسیوس است. همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، شاخص FD در دوره تاریخی بیشتری مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. در این دوره، ایستگاه تربت حیدریه با $77/96$ روز در رتبه اول قرار دارد. در حالی که ایستگاه کاشمر با میانگین ($24/04$ روز) در رتبه بعدی قرار دارد. با توجه به سناریوی SSP2.4.5، پیش‌بینی می‌شود که شاخص FD در مقایسه با دوره مشاهدات در هر دو ایستگاه مورد بررسی کاهش یابد. به طور مشابه، در هر دو منطقه شمال شرق کشور تحت سناریوی SSP5.8.5 نیز کاهش پیش‌بینی می‌شود، اما به طور کلی میزان کاهش نسبت به سناریوی SSP2.4.5 بیشتر است. با در نظر گرفتن نسبت کاهش، مشاهده می‌شود که بالاترین کاهش‌ها در ایستگاه تربت حیدریه پیش‌بینی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که در هر دو سناریو، به احتمال زیاد در طول قرن، فراوانی و مدت زمان وقوع یخبندان (FD) در این دو منطقه در استان خراسان رضوی کاهش می‌یابد، اما سرعت کاهش به تغییرات سناریوی آینده حساس خواهد بود (جدول ۵ و ۶).

نزدیک، آینده میانی و آینده دور وجود دارد، اما در مقایسه با میانگین کل، تفاوت قابل توجهی بین سناریوها مشاهده نمی‌شود. با بررسی تفاوت‌های بین دو ایستگاه مورد بررسی، مشاهده می‌شود که اختلافات فاحشی بین آنها وجود ندارد (جدول ۵ و ۶).

شاخص بارش سنگین R99p در جدول (۴)، تغییرات مورد انتظار در فراوانی رویدادهای بارش حدی را در دو ایستگاه مورد بررسی و دوره‌های زمانی گوناگون را نشان می‌دهد. در دوره تاریخی، بالاترین مقادیر شاخص R99p در ایستگاه تربت حیدریه ($7/76$ میلی‌متر) و سپس ایستگاه کاشمر ($4/43$ میلی‌متر) مشاهده می‌شود. با توجه به سناریوهای SSP2.4.5 و SSP5.8.5، شاخص R99p در مقایسه با دوره مشاهداتی در تمام مناطق شروع به افزایش می‌کند. میزان این افزایش به ویژه در ایستگاه تربت حیدریه بیشتر است. این امر نشان‌دهنده افزایش قابل توجهی در فراوانی رویدادهای بارش حدی بسیار سنگین در این منطقه است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که در حالی که ممکن است در آینده، فراوانی رویدادهای بارش حدی در دو ایستگاه مورد بررسی در استان خراسان رضوی تغییر کند، اما به طور اجتناب‌ناپذیری، به ویژه در آینده دور، افزایش خواهند یافت.

شاخص Rx1day حداکثر بارش روزانه را نشان می‌دهد که در یک سال خاص رخ داده است. طبق جدول (۴)، میانگین مقدار تاریخی شاخص Rx1day برای ایستگاههای کاشمر و تربت حیدریه به ترتیب $6/66$ و $8/45$ میلی‌متر است. بررسی تغییرات مکانی مقادیر تاریخی شاخص Rx1day نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر به طور کلی در منطقه تربت حیدریه و کمترین مقادیر در منطقه کاشمر ثبت شده است. پیش‌نگری نشان می‌دهد که انتظار می‌رود مقادیر شاخص در آینده برای تمام مناطق و سناریوها افزایش یابد، و بالاترین افزایش در ایستگاه کاشمر و دوره آینده دور تحت سناریوی SSP5.8.5 پیش‌نگری می‌شود. مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی‌های مدل‌های گردش عمومی (GCM) نشان می‌دهد که ممکن است در آینده، به ویژه تحت سناریوهای SSP5.8.5، فراوانی و شدت رویدادهای بارش حدی افزایش یابد. شاخص Rx5day در جدول (۴)، حداکثر بارش تجمعی در ۵ روز متوالی برای دوره مورد نظر را نشان می‌دهد. با در نظر

جدول (۴). میانگین، روند و شیب روند نمایه‌های حدی دما و بارش ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی با استفاده از آزمون من-کندال و سنس طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) (منبع: یافته‌های تحقیق)

تربت حیدریه				کاشمر				نمایه/ایستگاه
p-value	Z	شیب روند	میانگین	p-value	Z	شیب روند	میانگین	
۰/۴۱۲۹	۰/۸۲	۳/۷۴	۱۵۰/۸۰	۰/۴۱۳۷	-۰/۸۲	-۵/۰۰	۱۵۸/۶۰	CDD
۰/۲۲۷۲	-۱/۲۱	-۰/۸۶	۸/۱۶	۰/۷۱۹۶	-۰/۳۶	۰/۰۰	۵/۷۲	CWD
۰/۷۹۷۳	۰/۲۶	۰/۲۲	۸/۴۵	۰/۰۴۷۹	۱/۱۹	۰/۳۷	۶/۶۶	RX1day
۰/۴۴۰۹	-۰/۷۷	-۰/۸۰	۲۰/۷۷	۰/۷۲۶۱	۰/۳۵	۰/۳۹	۱۵/۵۹	RX5day
۰/۷۲۶۱	۰/۳۵	۴/۹۴	۲۰۲/۳۵	۰/۶۵۷۲	۰/۴۴	۴/۱۸	۱۳۸/۹۹	Preptot
۰/۴۷۵۳	-۰/۵۸	-۰/۰۴	۲/۵۴	۰/۵۹۱۲	-۰/۵۴	-۰/۰۳	۲/۳۱	SDII
۰/۷۴۳۶	۰/۳۳	۱/۲۵	۳۰/۰۷	۰/۶۷۴۱	۰/۴۲	۱/۲۶	۱۷/۹۹	R95p
۰/۳۵۷۹	۰/۹۲	۰/۰۰	۷/۷۶	۰/۵۰۲۰	۰/۶۷	۰/۰۰	۴/۴۳	R99p
۰/۰۹۸۰	-۲/۱۵	۰/۰۰	۳/۴۴	۰/۰۱۷۴	-۲/۳۸	۰/۰۰	۳/۳۶	CSDI
۰/۰۰۰۰	۳/۱۵	۱۰/۷۵	۱۳/۶۴	۰/۰۰۰۰	۳/۱۷	۱۳/۵۱	۱۷/۱۶	WSDI
۰/۰۰۰۱	-۲/۹۷	-۷/۳۷	۷۷/۹۶	۰/۰۰۶۱	-۱/۸۵	-۵/۰۰	۲۴/۰۴	FD
۰/۹۲۳۵	۰/۰۷	۰/۰۰	۱۴/۱۶	۰/۹۷۴۸	-۰/۰۲	۰/۰۰	۱۲/۸۹	DTR
۰/۰۰۰۰	۴/۷۴	۰/۴۵	۱۵/۱۰	۰/۰۰۰۰	۴/۷۴	۰/۴۵	۱۸/۳۰	TMm
۰/۰۰۰۰	۴/۷۹	۰/۴۵	۸/۰۲	۰/۰۰۰۰	۴/۸۳	۰/۴۵	۱۱/۸۶	TNm
۰/۸۳۳۵	۰/۲۱	۰/۰۵	-۶/۸۹	۰/۴۱۳۷	۰/۸۲	۰/۲۶	-۲/۹۹	TNn
۰/۰۰۰۰	۴/۱۳	۰/۴۵	۲۲/۱۸	۰/۰۰۰۰	۴/۲۳	۰/۴۶	۲۴/۶۵	TXm
۰/۶۹۱۳	۰/۴۰	۰/۰۸	۴/۰۲	۰/۵۹۱۲	۰/۵۴	۰/۱۸	۲۴/۷۴	TXn
۰/۰۰۸۳	۲/۶۴	۰/۵۲	۳۶/۸۸	۰/۰۰۷۲	۳/۷۰	۹/۳۳	۳۹/۱۷	TXx
۰/۰۰۰۰	۳/۹۴	۹/۵۰	۹/۵۶	۰/۰۰۴۴	۲/۶۹	۰/۴۶	۶/۷۷	Tr

مقادیر پر رنگ در جدول در سطح آماری ۰/۰۵ معنی دار است.

از کاهش طول دوره‌های سرد و همچنین ممکن است به معنای عدم وقوع آن‌ها در برخی سال‌ها باشد. هنگام بررسی تفاوت‌های بین سناریوها، اگرچه مقادیر SSP2.4.5 و SSP5.8.5 در آینده نزدیک به هم نزدیک هستند، اما به مقادیر سناریوی SSP2.4.5 و SSP5.8.5 که برای دوره میانی و پایان قرن محاسبه شده است، نشان دهنده دوره‌های گرم شدید و خشکسالی در آینده است.

نمایه TNn نشان‌دهنده کمترین مقدار دماهای کمینه روزانه در یک سال است. نتایج نشان داده است که مقادیر دما علیرغم وجود تفاوت‌های دارد و ایستگاه مورد بررسی، برای همه دوره‌ها و سناریوها در حال افزایش است. مقادیر این شاخص در دوره تاریخی از محدوده -۶/۸۹- درجه سلسیوس (تربت حیدریه) تا ۲/۹- درجه سلسیوس (کاشمر) در تغییر است. در ایستگاه کاشمر انتهای قرن بر اساس سناریوی SSP2.4.5 به

شاخص TR در جدول (۴) تعداد روزهایی را در یک سال نشان می‌دهد که حداقل دما از ۲۵ درجه سلسیوس بالاتر است. همانطور قابل مشاهده است که مقادیر شاخص TR در طول زمان برای همه دوره‌ها و سناریوها افزایش یافته است و بر این اساس می‌توان گفت که خطر دماهای حدی شبانه افزایش یافته است. مقادیر شاخص CSDI نشان‌دهنده‌ی مدت زمان کوتاه‌تر رویدادهای سرد و مقدار بالاتر نشان‌دهنده‌ی رویدادهایی با دوام بیشتر است. به طور کلی، انتظار می‌رود که مدت زمان رویدادهای سرد در مقایسه با دوره مشاهداتی در هر دو ایستگاه مورد بررسی برای مناطق مورد مطالعه کاهش یابد. به طور خاص، مقادیر سناریوی SSP5.8.5 در طول دوره ۲۰۷۶-۲۱۰۰ نشان می‌دهد که انتظار می‌رود CSDI در دو ایستگاه مورد بررسی در شمال شرق به طور قابل توجهی کاهش یابد. این همچنین نشانه‌ی

مقدار ۰/۶۱- درجه سلسیوس می‌رسد. همچنین بر اساس نتایج سناریوی SSP5.8.5 این شاخص در ایستگاه کاشمر به ۱/۴۱ و در ایستگاه تربت حیدریه به ۲/۲۳- درجه سلسیوس خواهد رسید. اگرچه مقادیر در برخی از دوره‌ها و سناریوها همچنان زیر صفر درجه سلسیوس باقی می‌مانند، اما مشاهده می‌شود که افزایش قابل توجهی وجود دارد.

جدول (۵). نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۲۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سناریوی حد واسط (SSP2.4.5) (منبع: یافته‌های تحقیق)

نمایه	کاشمر			تربت حیدریه		
	نزدیک	میانی	دور	نزدیک	میانی	دور
CDD	۱۵۸/۰۸	۱۴۴/۵۲	۱۴۸/۰۴	۱۴۷/۰۴	۱۳۸/۷۲	۱۴۰/۵۶
CWD	۶/۱۶	۵/۸۴	۶/۱۲	۸/۹۶	۸/۰۴	۶/۸۸
RX1day	۷/۶۵	۷/۹۵	۷/۳۶	۹/۴۲	۹/۷۹	۹/۰۹
RX5day	۱۷/۲۱	۱۸/۱۱	۱۷/۵۰	۲۱/۷۳	۲۳/۳۱	۲۱/۷۴
Prcptot	۱۵۲/۸۷	۱۵۰/۰۵	۱۴۳/۵۸	۲۱۸/۲۸	۲۰۹/۵۳	۲۰۴/۴۳
SDII	۲/۳۳	۲/۴۲	۲/۳۹	۲/۶۲	۲/۶۵	۲/۵۸
R95p	۲۰/۰۴	۲۱/۰۶	۲۲/۵۹	۳۲/۰۶	۳۲/۳۲	۳۰/۶۱
R99p	۵/۳۴	۶/۰۷	۵/۵۵	۷/۹۳	۱۰/۰۲	۸/۷۱
CSDI	۱۴/۷۶	۱/۶۴	۲/۴	۱۳/۹۲	۱/۸	۲/۴۸
WSDI	۳/۲۴	۵/۶۸	۲۲/۰۴	۲/۴۸	۴/۹۲	۱۹/۹۲
FD	۹/۷۶	۵/۵۶	۳/۲	۶۴/۱۶	۵۳/۶۴	۴۲/۹۶
DTR	۱۲/۹۵	۱۳/۱۳	۱۳/۱۷	۱۴/۲۳	۱۴/۴۵	۱۴/۵۰
TMm	۱۹/۷۰	۲۰/۶۴	۲۱/۳۳	۱۶/۵۰	۱۷/۴۳	۱۸/۱۲
TNm	۱۳/۲۲	۱۴/۰۷	۱۴/۷۴	۹/۳۸	۱۰/۲۱	۱۰/۸۷
TNn	-۱/۸۳	-۱/۴۴	-۰/۶۱	-۵/۶۴	-۵/۲۱	-۴/۴۵
TXm	۲۶/۱۸	۲۷/۲۱	۲۷/۹۲	۲۳/۶۲	۲۴/۶۶	۲۵/۳۷
TXn	۷/۹۳	۸/۶۲	۹/۴۴	۵/۱۸	۵/۹۰	۶/۶۳
TXx	۴۰/۸۳	۴۱/۹۴	۴۲/۶۵	۳۸/۶۶	۳۹/۸۲	۴۰/۶۱
tr	۱۰۹/۸۴	۱۱۹/۶	۱۲۸/۱۶	۴۵/۹۲	۶۴	۷۵/۹۲

در نتیجه، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به احتمال زیاد حداکثر مقدار دماهای کمینه روزانه در آینده در استان خراسان رضوی افزایش خواهد یافت و این افزایش در سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای بالاتر (SSP5.8.5) قابل توجه‌تر است. میانگین دماهای کمینه روزانه (TNm) در جدول (۴) نشان می‌دهد که پیش‌بینی می‌شود این مقادیر در طول زمان، به ویژه در دوره‌های آتی، در استان خراسان رضوی افزایش یابد. با در نظر گرفتن تغییرات، نکته قابل توجه این است که افزایش این شاخص نسبت به تغییرات در شاخص TNn کمتر است. با در نظر گرفتن میانگین، مقدار این نمایه در دوره تاریخی ۱۱/۸۶ درجه سلسیوس در کاشمر و ۸/۰۲ درجه سلسیوس در تربت حیدریه است که در سناریوهای

در نتیجه، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به احتمال زیاد حداکثر مقدار دماهای کمینه روزانه در آینده در استان خراسان رضوی افزایش خواهد یافت و این افزایش در سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای بالاتر (SSP5.8.5) قابل توجه‌تر است. میانگین دماهای کمینه روزانه (TNm) در جدول (۴) نشان می‌دهد که پیش‌بینی می‌شود این مقادیر در طول زمان، به ویژه در دوره‌های آتی، در استان خراسان رضوی افزایش یابد. با در نظر گرفتن تغییرات، نکته قابل توجه این است که افزایش این شاخص نسبت به تغییرات در شاخص TNn کمتر است. با در نظر گرفتن میانگین، مقدار این نمایه در دوره تاریخی ۱۱/۸۶ درجه سلسیوس در کاشمر و ۸/۰۲ درجه سلسیوس در تربت حیدریه است که در سناریوهای

در پایان قرن به ترتیب به ۱۰/۸۷ و SSP2.4.5 و SSP5.8.5 در پایان قرن به ترتیب به ۱۳/۴۷ درجه سلسیوس و ۱۳/۴۷ درجه سلسیوس در ایستگاه تربت حیدریه می‌رسد. با این حال، هر دو سناریو برای شاخص‌های TNx و TNn افزایش‌های بیشتری را پیش‌بینی کردند. این امر نشان می‌دهد که در هنگام ارزیابی دماهای کمینه، مقادیر حدی مطلق تحت تأثیر بیشتری نسبت به میانگین قرار می‌گیرند. جدول (۴) نتایج شش شاخص دمای حدی را برای دوره‌های زمانی مختلف و دو سناریوی پیش‌نگری نشان می‌دهد (ID، TXm، TXn، TXx، WSDI، SU). با توجه به مقادیر WSDI در دو ایستگاه مورد بررسی، تربت حیدریه و کاشمر در دوره تاریخی مقادیر بین ۱۳/۶۴ تا ۱۷/۱۶ روز دارند (جدول ۴). در سناریوهای مختلف مدل گردش عمومی

با ۳۹/۱۷ درجه سلسیوس بالاترین مقدار و ایستگاه تربت حیدریه با ۳۶/۸۸ درجه سلسیوس کمترین مقادیر را نشان داده است.

شاخص TXn کمترین مقدار دمای بیشینه روزانه را در طول سال نشان می‌دهد. دیده می‌شود که شاخص TXn در مناطق مختلف در دوره تاریخی از ۶/۷۷ درجه سلسیوس تا ۳۶/۸۸ درجه سلسیوس متغیر است. شاخص TXn در تمام سناریوها، در همه مناطق و در تمام دوره‌های زمانی افزایش می‌یابد، بالاترین افزایش در پایان قرن تحت سناریوی SSP5.8.5 مشاهده می‌شود (جدول ۶). شاخص (TXm) که میانگین سالانه حداکثر دما را نشان می‌دهد، انتظار می‌رود این شاخص در طول زمان و در همه مناطق افزایش یابد.

مقادیر WSDI برای مناطق SSP2.4.5 و SSP5.8.5، مختلف در دوره‌های آبی با پیشرفت بازه زمانی از ۲۰۵۰-۲۰۲۶ به ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ افزایش می‌یابد. این افزایش به ویژه در سناریوی SSP5.8.5 در پایان قرن افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. شاخص WSDI در مقایسه با دوره تاریخی نشان می‌دهد که میانگین این دو ایستگاه در سناریوی SSP2.4.5 به ویژه در آینده دور از ۲۲ روز و در SSP5.8.5 از ۵۸ روز فراتر رفته است. به طور کلی، سناریوی SSP5.8.5 به ویژه در آینده، نشان دهنده تنش آبی شدیدتری نسبت به سناریوی SSP2.4.5 است. شاخص TXx در جدول (۵)، حداکثر سالانه دمای روزانه را نشان می‌دهد. بررسی مقادیر TXx برای ایستگاههای مورد بررسی در خراسان رضوی نشان داده است که در دوره تاریخی مقدار شاخص در کاشمر

جدول (۶). نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده

میانی (۲۰۲۵-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت سناریوی بدبینانه (SSP5.8.5) (منبع: یافته‌های تحقیق)

نمایه	کاشمر			تربت حیدریه		
	نزدیک	میانی	دور	نزدیک	میانی	دور
CDD	۱۴۱/۰۸	۱۵۲/۶۴	۱۴۲/۲	۱۳۷/۶۸	۱۳۷/۹۶	۱۳۳/۸۴
CWD	۵/۸	۵/۵۶	۶/۴۴	۷/۹۶	۸/۵۶	۸/۲۸
RX1day	۶/۶۳	۸/۱۴	۹/۰۹	۸/۲۲	۹/۳۶	۱۰/۶۰
RX5day	۱۰/۴۶	۱۹/۴۰	۲۰/۸۷	۲۰/۰۹	۲۳/۵۶	۲۵/۶۳
Prcptot	۱۴۹/۳۷	۱۵۶/۳۳	۱۶۴/۲۳	۲۰۷/۶۴	۲۱۶/۸۵	۲۲۵
SDII	۲/۳۰	۲/۴۶	۲/۵۶	۲/۵۴	۲/۶۹	۲/۸۳
R95p	۱۳/۵۹	۲۴/۷۶	۳۰/۸۷	۲۲/۶۲	۳۳/۳۴	۴۳/۷۵
R99p	۰/۷۹	۷/۷۷	۱۲/۰۸	۲/۹۳	۹/۷۸	۱۷/۶۲
CSDI	۱۴/۱۲	۰/۲۴	۰	۱۱/۳۶	۰/۸۴	۰
WSDI	۲/۵۸	۷/۷	۵۸/۱۲	۶/۵۵	۱۴/۱۲	۵۱/۰۸
FD	۹	۲/۰۸	۰/۳۶	۵۵/۶۴	۳۱/۸۸	۱۴/۸۴
DTR	۱۳/۰۵	۱۳/۱۳	۱۳/۲۵	۱۴/۳۶	۱۴/۴۷	۱۴/۵۸
TMm	۲۰/۱۹	۲۱/۹۲	۲۴	۱۶/۹۹	۱۸/۷۰	۲۰/۷۶
TNm	۱۳/۶۶	۱۵/۳۵	۱۷/۳۷	۹/۸۱	۱۱/۴۶	۱۳/۴۷
TNn	-۱/۸۸	-۰/۲۳	۱/۴۱	-۵/۹۳	-۳/۸۸	-۲/۲۳
TNx	۲۶/۶۵	۲۸/۸۰	۳۱/۱۶	۲۲/۸۵	۲۴/۹۸	۲۷/۳۶
TXm	۲۶/۷۲	۲۸/۴۸	۳۰/۶۳	۲۴/۱۷	۲۵/۹۵	۲۸/۰۶
TXn	۸/۰۹	۹/۶۶	۱۱/۱۵	۵/۱۶	۶/۹۹	۸/۴۳
TXx	۴۱/۱۸	۴۳/۳۱	۴۵/۷۴	۳۹/۰۹	۴۱/۰۹	۴۳/۵۹
tr	۱۱۳/۵۶	۱۳۵/۵۶	۱۵۸/۲	۵۲/۱۶	۸۴/۸۴	۱۱۵/۰۸

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تغییرات زمانی و مکانی دما و بارش‌های حدی در دو ایستگاه تربت حیدریه و کاشمر بین سالهای ۱۹۹۱ تا ۲۱۰۰ با استفاده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) پروژه فاز ششم (CMIP6) پرداخته است. تغییرات زمانی شاخص‌های حدی دما و بارش نشان داده است بین سالهای ۲۰۲۶ تا ۲۱۰۰ به طور مداوم شرایط خشک‌تر، اما رویدادهای حدی بارش مکرر و شدیدتر و گرم شدن شدید دما در دو ایستگاه تربت حیدریه و کاشمر را تحت دو سناریو نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن شرایط روزهای خشک، مناطق کاشمر و تربت حیدریه با دوره‌های خشک طولانی‌تری نسبت به میانگین خواهند داشت. که به معنای حساسیت بیشتر به تغییرات آب و هوایی است. به طور کلی، سناریوی SSP5.8.5 به ویژه در آینده، نشان دهنده تنش آبی شدیدتری نسبت به سناریوی SSP2.4.5 است.

رویدادهای حدی بارش نشان دهنده افزایش بارش‌های بسیار شدید و افزایش سهم روزهای بارشی بسیار شدید به کل بارش است. افزایش شاخص SDII (شدت بارش رزوانه) و کاهش کل بارش نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند.

انتظار می‌رود دماهای حدی مانند کمترین، گرمترین و میانگین حداکثر دمای روزانه در دو ایستگاه کاشمر و تربت حیدریه افزایش یابد که نشان دهنده شرایط گرم است. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) نیز نشان دادند که شاخص‌های حدی دما در خراسان بزرگ شامل خراسان رضوی، شمالی و جنوبی تغییرات قابل توجهی را تجربه خواهد کرد. بطوریکه شاخص‌های روزهای تابستانی، روزهای گرم، حداکثر دمای حداکثر، شب‌های گرم، طول دوره گرم، ۱۰۰ درصد روند افزایشی و شاخص روزهای سرد ۱۰۰ درصد روند کاهش را نشان می‌دهند. همچنین شاخص‌های شب‌های حاره ای و حداکثر دمای حداقل، حداقل دمای حداقل با بیش از ۸۵ درصد روند افزایشی و شاخص شب‌های سرد با ۸۵ درصد روند کاهش دارند.

علاوه بر این، حداکثر دماهای روزانه سردتر حساسیت بالاتری به تغییرات آب و هوایی نشان می‌دهند و با نرخ شدیدتری در آینده افزایش خواهند یافت. عرفانیان و

همکاران (۱۳۹۳) در تأیید یافته‌های این تحقیق نشان دادند تعداد روزهای یخبندان، روزهای یخی و وقوع دوره‌های سرد کاهش یافته و بالعکس تعداد روزهای آفتابی، شب‌های حاره-ای و طول دوره گرم در سه ایستگاه مشهد، سبزوار و تربت حیدریه افزایش یافته است. همچنین اصغر زاده و همکاران (۱۴۰۳) نشان دادند که در سه ایستگاه قوچان، سبزوار و کاشمر خشک‌ترین منطقه در استان خراسان رضوی را با ۱۵۱/۳۵ روز در کاشمر و مرطوب‌ترین ایستگاه در این مطالعه با ۸۴/۳۵ روز قوچان است. میانگین دمای بیشینه در سه ایستگاه مورد بررسی نشان داد که بیشینه این نمایه ۲۵/۲۵ درجه در سبزوار و کمینه آن ۱۹/۶۹ درجه در قوچان محاسبه شده است. این یافته‌ها با نتایج به دست آمده در ایستگاه کاشمر در یک راستا است.

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده با مدل‌های CMIP6 در این مطالعه، با یافته‌های سایر مطالعات موجود همانند زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) و چمانهر و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت دارد. این نتایج برای توسعه پایدار در سامانه‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است. لازم به ذکر است که درک تغییرات آب و هوایی برای سازگاری با تغییرات و اجتناب از اثرات منفی آنها ضروری است.

تغییر اقلیم تأثیرات منفی متعددی بر کشاورزی و محیط زیست استان خراسان رضوی، به ویژه در مناطق تربت حیدریه و کاشمر، دارد. این تأثیرات می‌تواند شامل کاهش منابع آبی، افزایش دما، و تغییر الگوهای بارش باشد که همگی می‌توانند بر عملکرد محصولات کشاورزی مانند زعفران تأثیر بگذارند. در ادامه، چند راهکار برای مقابله با این پیامدها ارائه می‌شود. سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی می‌توانند به کاهش مصرف آب و افزایش کارایی آبیاری کمک کنند. ایجاد مخازن ذخیره‌سازی آب باران برای استفاده در دوره‌های خشکسالی می‌تواند مفید باشد. انتخاب و کشت گونه‌های زعفران که مقاومت بیشتری به خشکی و دماهای بالا دارند، می‌تواند به کاهش تأثیرات منفی تغییر اقلیم کمک کند. بر اساس یافته‌های به دست آمده در این تحقیق پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مطالعات میدانی برای جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و به‌روزتر از شرایط اقلیمی و کشاورزی در سطح منطقه انجام شود.

- 9- Bayar, A. S., Yılmaz, M. T., Yücel, İ., & Dirmeyer, P. (2023). CMIP6 Earth system models project greater acceleration of climate zone change due to stronger warming rates. *Earth's Future*, 11(4), e2022EF002972.
- 10- Brás, T. A., Seixas, J., Carvalhais, N., & Jägermeyr, J. (2021). Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe. *Environmental Research Letters*, 16(6), 065012.
- 11- chamanehfar, S. , Mousavi Baygi, M. , babaecian, I. and Modaresi, F. (2022). Future projection for extreme indices of precipitation and temperature over the period 2026-2100 based on the output of CMIP6 models (Case study: Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(5), 963-976.
- 12- Cogato, A., Meggio, F., De Antoni Migliorati, M., & Marinello, F. (2019). Extreme weather events in agriculture: A systematic review. *Sustainability*, 11(9), 2547.
- 13- CRED, F. (2022). 2021 Disasters in numbers.
- 14- Dabanlı, İ., Şen, Z., Yeleğen, M. Ö., Şişman, E., Selek, B., & Güçlü, Y. S. (2016). Trend assessment by the innovative-Şen method. *Water resources management*, 30, 5193-5203.
- 15- Erfanian, M. , Ansari, H. , Alizadeh, A. and Banayan Aval, M. (2014). Assessment of Climatic Extreme Events Variations in Khorasan Razavi province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(4), 817-825.
- 16- Guan, J., Yao, J., Li, M., Li, D., & Zheng, J. (2022). Historical changes and projected trends of extreme climate events in Xinjiang, China. *Climate Dynamics*, 1-22.
- 17- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- 18- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- 19- Hay, J. (2007). Extreme weather and climate events, and farming risks. *Managing weather and climate risks in agriculture*, 1-19.
- 20- Iyakaremye, V., Zeng, G., & Zhang, G. (2021). Changes in extreme temperature events over Africa under 1.5 and 2.0 C global warming scenarios. *International Journal of Climatology*, 41(2), 1506-1524.
- 21- Jiqin, H., Gelata, F. T., & Chaka Gameda, S. (2023). Application of MK trend and test of همچنین پیشنهاد می‌شود از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور برای پایش تغییرات اقلیمی استفاده شود تا به شکل دقیق‌تری بتوان تغییرات محیطی را پیش کرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود به بررسی تأثیرات اقتصادی تغییر اقلیم بر کشاورزی و معیشت کشاورزان پرداخته شود.

منابع

- 1- Abbott, S. (2001). *Understanding analysis* (Vol. 2). New York: Springer.
- 2- Ahmadi, M. , Dadashi, A. and Ebrahimi, R. (2017). Prospects of Iran's warm climates based on the regional mesoscale model output (REGCM4). *Geography*, 15(52), 67-81.
- 3- Ahmadi, M. , Lashkari, H. , Keykhosravi, G. and Azadi, M. (2015). Analysis of extreme temperature indicators in the detection of climate change in Greater Khorasan. *Geography*, 13(45), 53-75.
- 4- Ali, Z., Hamed, M. M., Muhammad, M. K. I., Iqbal, Z., & Shahid, S. (2023). Performance evaluation of CMIP6 GCMs for the projections of precipitation extremes in Pakistan. *Climate Dynamics*, 61(9), 4717-4732.
- 5- Asgharzadeh, A. , janbazghobadi, G. , Motevalli, S. , Taheryan, M. and Koochi, M. (2024). Investigating the role of extreme climate profiles on grape yield(Case study: Qochan, Sabzevar and Kashmer). *Irrigation and Water Engineering*, 15(2), 143-163. doi: 10.22125/iwe.2024.463786.1814
- 6- Babaecian, I. , Modirian, R. , Khazanedari, L. , Karimian, M. , Kouzegaran, S. , Kouhi, M. , Falamarzi, Y. and Malbusi, S. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 431-449. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436
- 7- Bağçacı, S. Ç., Yucel, I., Duzenli, E., & Yilmaz, M. T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576.
- 8- Baghel, T., Babel, M. S., Shrestha, S., Salin, K. R., Viridis, S. G., & Shinde, V. R. (2022). A generalized methodology for ranking climate models based on climate indices for sector-specific studies: An application to the Mekong sub-basin. *Science of The Total Environment*, 829, 154551.

- change by analyzing the occurrence of Extreme-climatic events in the west and southwest of Iran. *Journal of Climate Research*, 1402(54), 37-54.
- 33- Zarrin, A. , Dadashi-Roudbari, A. and Kadkhoda, E. (2022). Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the End of the 21st Century. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1499-1516. doi: 10.22059/ijswr.2022.343700.669278.
- 34- zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research*, 53(1), 75-90. doi: 10.22059/jphgr.2021.308361.1007551.
- 35- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B. and Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870.
- Sen's slope estimator to measure impact of climate change on the adoption of conservation agriculture in Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 977-988.
- 22- Kendall, M. (2015). Trend analysis of Pahang River using non-parametric analysis: Mann Kendall's trend test. *Malays. J. Anal. Sci*, 19, 1327-1334.
- 23- Land preparation program of Razavi Khorasan province (1401). Khorasan Razavi Province's survey report 1401 revision, Khorasan Razavi Province's Agricultural Jihad Organization. Access link: <https://khr.acecr.ac.ir/fa/page/8033>
- 24- Land preparation program of Razavi Khorasan province (1401). Khorasan Razavi Province's survey report 1401 revision, Khorasan Razavi Province's Agricultural Jihad Organization. Access link: <https://khr.acecr.ac.ir/fa/page/8033>
- 25- Li, X., Chen, Z., Wang, L., & Liu, H. (2022). Future projections of extreme temperature events in Southwest China using nine models in CMIP6. *Frontiers in Earth Science*, 10, 942781.
- 26- 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, 2287-2303.
- 27- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 118(6), 2473-2493.
- 28- Song, S., & Yan, X. (2022). Evaluation of events of extreme temperature change between neighboring days in CMIP6 models over China. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(1), 53-72.
- 29- Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science*, 352(6293), 1517-1518.
- 30- Stouffer, R. J., Eyring, V., Meehl, G. A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K. E. (2017). CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 95-105.
- 31- Swaminathan, M. S., & Rengalakshmi, R. (2016). Impact of extreme weather events in Indian agriculture: Enhancing the coping capacity of farm families. *Mausam*, 67(1), 1-4.
- 32- Zand, M. , Gholamrezaei, S. , Daryabari, S. J. and Alijani, B. (2023). Detection of climate