

بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم در استان خراسان رضوی

علی اصغر زاده^۱، غلامرضا جانباز قبادی^{۲*}، صدرالدین متولی^۳، مجید طاهریان^۴، منصوره کوهی^۵

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گرایش اقلیم‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نور، نور، ایران

۲ و ۳- دانشیار، آب و هواشناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۴- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی سازمان

تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

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

چکیده

رویدادهای حدی تأثیر شدیدی بر سلامت انسان، اکولوژی، تنوع زیستی و اقتصاد دارند؛ بنابراین تحلیل و پیش‌بینی رفتار رویدادهای حدی از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های گردش عمومی (GCMs) به طور گسترده برای شبیه‌سازی وضعیت آب و هوای گذشته و پیش‌بینی آب و هوای آینده استفاده می‌شوند. هدف این تحقیق بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی بود. بدین منظور سه ایستگاه قوچان، سبزوار و کاشمر انتخاب و ۱۷ نمایه حدی شامل نمایه‌های میانگین، مطلق، طول دوره و روز با استفاده از مدل‌های CMIP6 مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت‌سنجی نتایج مدل از سه روش ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین اربیبی خطا (MBE) و درصد اربیبی (PBIAS) استفاده شد. نتایج نشان داد که MPI-ESM-HR ریزمقیاس شده با مدل CMhyd مدلی بهینه در برآورد دما و بارش است. بطور کلی، این مدل در برآورد دما و بارش دارای بیش‌برآوردی است. بررسی نمایه‌های حدی دما طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) نشان داد که نمایه‌های WSDI، Tm، TNm، TNx، TXm و TXx دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ هستند و به همین ترتیب نمایه روزهای یخبندان (FD) دارای روند کاهشی معنادار در سطح ۰/۰۵ است. پیش‌نگری نمایه‌های حدی دما و بارش تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) نشان داد که نمایه‌های حدی دما با شدت بیشتری نسبت به نمایه‌های بارشی در آینده تغییر خواهند کرد و این تغییر نیز افزایشی خواهد بود. همچنین نتایج نشان داد در هر سه ایستگاه مورد بررسی در استان خراسان رضوی نمایه‌های شدت بارش روزانه (SDII) و بیشینه بارش یک روزه (RX1day) در تمامی دوره‌های مورد بررسی روند افزایشی خواهد داشت که این نتیجه نشان می‌دهد که در دوره‌های آتی بارش‌های سیل‌آسا در سطح استان روند افزایشی خواهند داشت.

کلید واژه‌ها: نمایه‌های حدی دما و بارش، تغییر اقلیم، استان خراسان رضوی، مدل CMhyd.

۱- مقدمه

کلیدی در جلوگیری از خسارات مرتبط است (اوتسومی و همکاران، ۲۰۱۱).

در سال‌های اخیر، تأثیرات نمایه‌های حدی آب و هوایی مانند موج‌های گرمایی مداوم، رویدادهای بارش شدید و خشکسالی برجسته‌تر و گسترده‌تر شده است (میشرا و همکاران، ۲۰۱۲؛ خارین و همکاران، ۲۰۱۳). بارش‌های حدی علاوه بر تأثیر شدید و بلایای ثانویه مرتبط با آن مانند سیل، رانش زمین و سایر بلایای طبیعی، چالش بزرگی را برای زندگی مردم و همچنین توسعه اقتصادی به همراه دارد (گائو و همکاران، ۲۰۲۰). ششمین گزارش ارزیابی هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) نشان داده است که شدت و فراوانی رویدادهای حدی دما و بارش شدید در آینده بزرگ‌تر و با فراوانی بیشتر خواهد بود، زیرا دما همچنان در حال افزایش است و نگرانی‌هایی را در مورد تغییر ویژگی‌های رویدادهای حدی ایجاد می‌کند (یان و همکاران، ۲۰۲۲). لذا مطالعه این پدیده و بررسی تغییرات آن در آینده برای هر منطقه‌ای ضروری است.

استان خراسان رضوی به دلیل وسعت زیاد و وجود مناطق زیاد جمعیتی و کشاورزی در معرض مخاطرات اقلیمی مختلفی قرار دارد. این استان به طور مداوم تحت تأثیر نمایه‌های حدی مختلف در طول سال است بطوریکه از خشکسالی شدید تا بارش‌های سیل‌آسا گرفته تا امواج گرمایی و سرمایای مختلف این استان را در طول سال تحت تأثیر قرار می‌دهند (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰ الف). این مخاطرات تأثیر قابل توجهی بر گیاهان و جانوران، کشاورزی، زیرساخت‌های شهری و سلامت انسان دارند. بنابراین، بررسی نمایه‌های حدی شبیه‌سازی شده در شرایط اقلیمی آینده استان خراسان رضوی، بسیار مهم است. برای بررسی شرایط اقلیمی آینده از مدل‌های گردش جهانی (GCMs) استفاده می‌شود. این مدل‌ها به شکل گسترده‌ای در سال‌های اخیر در دسترس هستند و توسط پژوهشگران مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶).

مدل‌های گردش عمومی (GCMs) به‌طور گسترده برای درک تغییرات گذشته و آینده در رویدادهای حدی آب و هوایی در سطح جهانی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (خارین و همکاران، ۲۰۱۳). برای تجزیه و تحلیل تأثیر تغییرات آب و هوایی آینده، برنامه تحقیقات جهانی آب و هوا (WCRP) پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP) را در سال ۱۹۹۵ تأسیس کرد (میهل

تغییر اقلیم تغییرات بلندمدت شرایط متوسط جو، اقیانوس‌ها و سطح زمین، مانند دما، بارش، باد و غیره است. تغییر اقلیم می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی، مانند تغییرات فعالیت خورشید، فوران‌های آتشفشانی یا تغییرات مداری، یا عوامل انسانی، مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کاربری اراضی یا انتشار هواپزها ناشی باشد (کانی، ۲۰۱۵). پیامدهای تغییر اقلیم را می‌توان با استفاده از مشاهدات، مدل‌ها و روش‌های آماری شناسایی کرد و سپس با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان پیامدهای آن را کاهش داد. تغییر اقلیم یک چالش بزرگ برای بخش کشاورزی در مقیاس جهانی است، زیرا بر تولید و مصرف مواد غذایی تأثیر می‌گذارد. تغییر اقلیم می‌تواند کشاورزی را به طرق مختلف تحت تأثیر قرار دهد بطوریکه با تغییر الگوها و تغییرپذیری دما، بارش و دی اکسید کربن بر رشدونمو محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد (ماهاتو، ۲۰۱۴). تغییر اقلیم همچنین می‌تواند بر زمان و طول فصل رشد، وقوع و شدت آفات و بیماری‌ها و در دسترس بودن و کیفیت منابع آب و خاک تأثیر بگذارد (FAO, 2024). تغییر اقلیم پدیده‌ای پیچیده و پویا است که برای درک علل و پیامدهای آن برای کشاورزی نیاز به تحقیق و نوآوری بیشتری دارد. لذا این مسئله مستلزم همکاری و ارتباط بیشتر میان ذینفعان بخش کشاورزی مانند کشاورزان، محققان، مصرف‌کنندگان و سیاستگذاران برای توسعه و اجرای راه‌حل‌های مؤثر و پایدار برای آینده غذا است.

ششمین گزارش ارزیابی (AR6) هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) گزارش داده است که میانگین دمای جهانی در ۲۰ سال آینده به ۱/۵ درجه سانتیگراد خواهد رسید یا از آن فراتر خواهد رفت (ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). تغییرات در رویدادهای حدی یکی از پیامدهای مربوط به گرمایش جهانی است و با تشدید گرمایش جهانی، رویدادهای حدی دما و بارش احتمالاً با شدت بیشتر و فراوانی بالاتری رخ خواهند داد. رویدادهای حدی سلامت انسان، ثبات اقتصادی و تولید محصولات کشاورزی را تهدید می‌کنند لذا با ادامه گرمایش جهانی، انتظار می‌رود که مخاطرات اقلیمی نیز افزایش یابد (ماسون-دل‌موت و همکاران، ۲۰۲۱). رویدادهای حدی آب و هوایی می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست، معیشت و اقتصاد در سراسر جهان داشته باشد؛ بنابراین درک فراوانی، شدت و تغییرات مکانی و زمانی این رویدادها گامی

بارش حدی در حوضه ولتا را با مدل‌های CMIP6 مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که روزهای مرطوب متوالی روند کاهش‌ی و روزهای خشک متوالی روند افزایشی خواهد داشت. همچنین آن‌ها نشان دادند در این حوضه روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین نیز در آینده روند افزایشی خواهد داشت. پیش‌نگری بارش و نمایه‌های بارش حدی با استفاده از مدل CMIP6 در حوضه رودخانه یانگ تسه در چین پژوهشی است که ژو و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی آن پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که سناریوی SSP5-8.5 افزایش قابل توجهی در شاخص‌های بارش حدی را به تصویر می‌کشد. کوشوها و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش کشور هند پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که عدم قطعیت قوی در مدل‌های CMIP6 برای بارش فرین در مقایسه با میانگین بارش مشاهده می‌شود. به طور کلی، مدل‌های CMIP6 برای میانگین بارش خوب عمل می‌کنند در مقابل دارای اریبی زیاد برای بارش حدی بخصوص در بارش‌های موسمی هستند. تغییرات آینده در رژیم بارش در شبه جزیره عربستان با تاکید بر امارات متحده عربی با استفاده از شبیه‌سازی مدل‌های CMIP6 از پروژه NEX-GDDP توسط راتو و همکاران (۲۰۲۴) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد بارش سالانه در بیشتر مناطق امارات تا ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت. به طور خاص، توزیع مکانی-زمانی حداکثر بارش مانند شدت، بیشینه بارش یک روزه و بارش بیش از ۱۰ میلی متر روزه در منطقه در حال افزایش است. شتیوی و برجاء (۲۰۲۴) به پیش‌بینی دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 برای دشت‌های مرتفع ستیف در شمال شرقی الجزایر پرداختند. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه دما و کاهش بارش است. سناریو SSP5-5.8 بدبینانه‌ترین چشم انداز را ارائه داده و بالاترین افزایش دما را پیش‌بینی می‌کند. کورنیادی و همکاران (۲۰۲۴) به پیش‌نگری آینده از رویدادهای فرین بارش در اندونزی پرداختند و نشان دادند که رویدادهای شدید مرطوب و خشک در آینده مکررتر و شدیدتر خواهند شد.

در ایران نیز نمایه‌های حدی دما و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های CMIP5 و CMIP6 مورد بررسی بسیاری قرار گرفته است. رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) به تغییرپذیری فرین‌های دما و بارش در ایران طی دهه‌های اخیر

و همکاران، ۲۰۰۰). پیش‌بینی‌های قلیل اعتماد از اهمیت زیادی در مطالعات تغییر اقلیم آینده برخوردار است. CMIP6 چشم‌اندازهایی را از تأثیرات تغییرات آب و هوایی ناشی از گرمایش جهانی ارائه می‌کند. این چشم‌اندازها از آینده ذینفعان مربوطه را قادر می‌سازد تا از مخاطرات آینده آگاه بوده و نسبت به برنامه‌ریزی آن اقدام کنند.

مطالعات مختلفی به بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در مناطق مختلف ایران و جهان پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر بر تعداد این مطالعات نیز افزوده شده است و بیشتر مطالعات انجام شده در چند سال گذشته به بررسی نمایه‌های حدی تحت شرایط آینده با استفاده از مدل‌های CMIP6 انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به تحقیق گوسین و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد. آن‌ها مدل‌های CMIP5 و CMIP6 را برای شبیه‌سازی بارش باران‌های موسمی تابستان هند مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP6 بهتر از CMIP5 عمل می‌کنند، زیرا اریبی مدل در CMIP6 به طور قابل توجهی کاهش یافته است. ژو و همکاران (۲۰۲۰) مدل‌های CMIP5 و CMIP6 را در چین بر اساس مجموعه داده‌های مشاهده‌ای روزانه مقایسه کردند و دریافتند که مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی کل بارش، شدت بارش، بارش‌های حدی و روزهای بارانی بسیار شدیدتر عمل می‌کنند. اوکولا و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که تغییرات خشکسالی در آینده (۲۰۵۱-۲۱۰۰) در CMIP6 قابل توجه‌تر خواهد بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین بارندگی و تغییرپذیری بر مدت و فراوانی خشکسالی تأثیرگذار است. چن و همکاران (۲۰۲۰) پس از ارزیابی داده‌های تاریخی، بارندگی و دمای شدید را در آینده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات نمایه‌های حدی آب و هوایی تحت مدل‌های CMIP6 در آینده بیشتر خواهد بود. نشانان و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی مدل CMIP6 برای شبیه‌سازی بارش و دمای حدی در قاره استرالیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمایه‌های حدی دما مانند بیشینه مطلق دما، تعداد روزهای تابستانی و تعداد روزهایی که حداکثر دما بیشتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد است در استرالیا در آینده به شکل قابل توجهی افزایش خواهند یافت. همچنین آن‌ها نشان دادند که شدت بارش روزانه و روزهای خشک متوالی نیز در استرالیا تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده روند افزایشی خواهند داشت. آگیکوم و همکاران (۲۰۲۲) شاخص‌های

ایران با بکارگیری مدل همادی CMIP6 پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بیشینه شاخص روزهای همراه بارش سنگین با ۳۶/۱۴ روز در حوضه دریای خزر و کمینه آن با ۴۵/۱ روز در حوضه مرزی شرق ایران دیده می‌شود و بارش سنگین در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده افزایش خواهد داشت. همچنین آنها نشان دادند که بیشینه افزایش روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب در سه حوضه دریای خزر، دریاچه ارومیه و قره‌قوم دیده شد. پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۰۲۶-۲۱۰۰ بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6 در مشهد پژوهشی است که چمانه‌فر و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی آن پرداختند و نشان دادند که مدل ACCESS-CM2 توانمندی بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی شاخص‌های حدی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۹) دارد. همچنین آنها نشان دادند که شاخص شب‌های سرد روند کاهشی معنادار و درصد شب‌های گرم روند افزایشی معنادار داشته و در سطح اطمینان ۹۰ درصد تعداد روزهای تابستانی نیز در سناریوی خوش‌بینانه در آینده نزدیک، میلنه و دور روند افزایشی معنی‌دار دارد. علوی‌نیا و زارعی (۲۰۲۱) به تحلیل تغییرات فضایی بارش و دمای فرین در ایران طی یک دوره ۵۰ ساله پرداختند. نتایج کلی آن‌ها نشان داد که به طور کلی، شاخص‌های فرین دما روند افزایشی و شاخص‌های فرین بارش روند کاهشی دارد.

جابجایی تاریخ کاشت و تغییر طول فصل رشد در استان یزد تحت شرایط اقلیم گرم‌تر پژوهشی است که توسط کوهی و همکاران (۱۴۰۱) انجام شده است. سناریوهای آتی دما این استان بر مبنای دو مدل GFDL و HadGEM شرایط نامناسب‌تری را نشان می‌دهد بطوریکه دما به طور معنی‌داری افزایش خواهد یافت. پیش‌نگری بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم پژوهشی است که ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۲) به مطالعه آن پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در حوضه دریاچه ارومیه روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین بیش‌تری را در آینده نزدیک تجربه خواهد نمود. شدت بارش روزانه در بخش‌های بزرگی از حوضه، بخصوص در مناطق غربی و شمالی، روند افزایشی خواهد داشت. هلالی و همکاران (۲۰۲۲) به پیش‌نگری یخبندان دیررس بهاره در ایران با مدل‌های CMIP6 پرداختند. بررسی نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین

پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها روند منفی برای شاخص‌هایی مانند روزهای یخبندان (FD)، روزهای یخبندان (ID)، روزهای خنک (TX10p)، شب‌های سرد (TN10p) و دامنه تغییرات شبانه روزی دما (DTR) در اکثر مناطق ایران نشان داده است. برعکس، روندهای مثبت برای روزهای تابستانی (SU25)، روزهای گرم (TX90p) و شب‌های حاره‌ای (TR20) در بیش‌تر مناطق کشور دیده شد. همچنین آن‌ها روند منفی را برای روزهای خشک متوالی (CDD) در بیشتر مناطق کشور نشان دادند. تقوی (۱۳۸۹) ارتباط بین تغییر اقلیم و رویدادهای حدی را در ایران بررسی کرده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که روند کاهشی شاخص‌های حدی سرد FD و روند افزایشی در شاخص‌های حدی گرم مانند T40 در همه نواحی اقلیمی ایران به‌جز در ناحیه شمال غرب وجود دارد و گرمایش متقارن در بیشتر دنباله سری‌های زمانی شاخص‌های حدی به‌جز در دو ایستگاه همدان و ارومیه وجود دارد.

کوهی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تغییرات پیش‌بینی شده در بارش‌های فرین مشهد طی قرن بیست و یکم پرداختند. نتایج نشان داد که بارش سنگین و آبرسنگین، بیشینه بارش پنج روزه و شدت بارش طی سه دوره افزایش خواهد یافت. همچنین سهم بیشتری از کل بارش سالانه به وقوع بارش‌های بیش از صدک ۹۵ و ۹۹ دوره پایه تعلق خواهد داشت. ارزیابی تغییرات فرین‌های دما و بارش در ایران پژوهشی است که توسط سلطانی و همکاران (۲۰۱۶) انجام شده است. آن‌ها نشان دادند که در طی ۱۵ سال گذشته (۱۹۹۵-۲۰۱۰)، فراوانی سالانه روزها و شب‌های گرم به ترتیب ۱۲ و ۱۴ روز در دهه افزایش یافته است. تعداد روزها و شب‌های سرد به ترتیب ۴ و ۳ روز در دهه کاهش یافته است. همچنین روندهای آماری معنی‌دار در رویدادهای بارش فرین در کمتر از ۱۵ درصد از ایستگاه‌های هواشناسی دیده شده است. در تحقیقی دیگر کوزه‌گران و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی روند رویدادهای حدی اقلیمی در شمال شرق ایران پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص‌های حدی گرم روند افزایشی دارند که این روند برای شاخص‌هایی مانند روزهای تابستانی، تعداد شب‌های حاره‌ای، روزها و شب‌های گرم معنادار بود. در حالیکه شاخص‌های حدی سرد در دوره مورد مطالعه روند کاهشی دارند که نشان‌دهنده کاهش شدت و فراوانی رویدادها و روزها و شب‌های سرد است. زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) به تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین

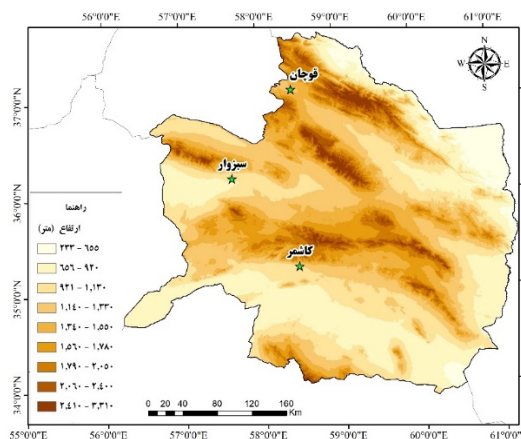
منطقه مورد مطالعه این پژوهش استان خراسان رضوی واقع در شمال شرقی ایران است. استان خراسان رضوی بین ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول خاوری و ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته که از شمال به کشور ترکمنستان، از شرق به افغانستان، از غرب و شمال غربی به استان‌های خراسان شمالی، سمنان و یزد و از جنوب و جنوب غربی به استان‌های خراسان جنوبی و یزد محدود است. این استان یکی از پهناورترین استان‌های ایران و در عین حال یکی از پر جمعیت‌ترین استان کشور است. فارغ از نقش بسیار مهم گردشگری و صنعتی استان خراسان رضوی، این استان در حوضه کشاورزی نیز یک استان‌های مهم در کشور است که محصولات استراتژیک بسیاری در آن کشت می‌شود. این مطالعه به بررسی نمایه‌های حدی سه ایستگاه سینوپتیک قوچان، سبزوار و کاشمر پرداخته است که موقعیت آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. شایان ذکر است که این سه شهرستان عمده تولید انگور خراسان رضوی را دارا هستند بطوریکه بیش از ۷۰ درصد تولید انگور در خراسان رضوی در این سه شهرستان می‌باشد. لذا تغییرات اقلیمی و نمایه‌های حدی دما روی کشاورزی و بخصوص کشت انگور تأثیر خواهد داشت.

تغییرات پیش‌بینی شده بر اساس مدل‌ها و سناریوهای ACCESS-ESM1-5-SSP1-2.6 و NorESM2. -SSP5-8.5 در ایستگاه‌های اراک، اصفهان، خرم‌آباد، سبزوار، شهرکرد و شاهرود اتفاق می‌افتد.

بررسی پیش‌بینی تحقیق نشان می‌دهد به رغم اینکه تحقیقات زیادی به بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در سطح جهانی و حتی ایران پرداخته‌اند، اما با این حال پژوهشی که به بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در استان خراسان رضوی پرداخته باشد انجام نشده است. لذا مسئله اصلی این تحقیق بررسی توامان نمایه‌های حدی دما و بارش در سطح استان خراسان رضوی است. این نمایه‌ها می‌توانند نقش موثری در تغییر الگوی کشت محصولات زراعی و باغی در آینده داشته باشند. بر این اساس سؤال اصلی این تحقیق این است که نمایه‌های حدی دما و بارش در استان خراسان تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره‌های آتی چگونه خواهد بود؟ نتایج این تحقیق برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران حوضه کشاورزی، مدیریت منابع آب و انرژی در مناطق مورد بررسی می‌تولند مفید باشد.

۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه سینوپتیک مورد بررسی

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌ها کنترل کیفی روی داده‌ها انجام شد و خطاهای احتمالی همانند عدم وجود داده برطرف شد.

۲-۳- مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل

گزارش ششم (CMIP6)

منطقه مورد مطالعه این تحقیق استان خراسان رضوی با تأکید بر سه ایستگاه سینوپتیک قوچان، سبزوار و کاشمر است (شکل ۱). برای این منظور داده‌های این سه ایستگاه برای دوره ۱۹۹۰ از ۲۰۱۴ برای متغیرهای دما و بارش اخذ شده است. پس دریافت

شده است. روش میانگین اریبی خطا و درصد اریبی دارای مقادیر مثبت و منفی هستند. مقادیر مثبت نشان دهنده بیش برآوردی و مقدار منفی نشان دهنده کم برآوردی مدل است. روش RMSE برای بررسی خطا مورد استفاده قرار گرفته است مقدار نزدیک به صفر در این روش نشان دهنده بهینه بودن مدل است (چای و دراکسلر، ۲۰۱۴).

در این روابط، P_i مقدار برآورد شده توسط مدل، O_i مقدار مشاهده‌ای بر اساس داده‌های ایستگاهی، n تعداد کل داده‌ها است.

۳-۲- نمایه‌های حدی دما و بارش

هدف از این مطالعه تجزیه و تحلیل نمایه‌های حدی دما و بارش ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی توصیه شده توسط کارگروه ETCCDI^۱ (جدول ۲) است. این شاخص‌ها را می‌توان به شاخص‌های شدت، شاخص‌های آستانه مطلق، شاخص‌های آستانه نسبی، شاخص‌های طول مدت و غیره تقسیم کرد. این نمایه‌ها اطلاعات مهمی را برای تحقیقات مرتبط در مورد تغییر اقلیم ارائه می‌دهند.

۳-۳- آزمون روند من-کندال

آزمون من-کندال یک آزمون روند ناپارامتریک است (من، ۱۹۴۵). از این آزمون به طور گسترده‌ای برای تشخیص روند افزایش یا کاهش قابل توجه در سری‌های زمانی هواشناسی و اقلیم شناسی استفاده می‌شود. در مقایسه با سایر روش‌های آزمون روند مانند رگرسیون خطی ساده و آزمون Student-t، آزمون من-کندال نسبت به نقاط پرت و توزیع‌های نمونه حساسیت کمتری دارد.

مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل گزارش ششم (CMIP6) (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶) به عنوان یکی از معتبرترین ابزار پیش‌نگری اقلیمی، به منظور بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی مورد استفاده قرار گرفته است. برون‌داد مدل‌های فاز ششم یا CMIP6 تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) در کنار سناریوهای نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای بر تحلیل پسخورهای بین تغییرات اقلیمی و فاکتورهای اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری در دسترس قرار دارند. این سناریوها که در آخرین نسل مدل‌های اقلیمی بکار رفته‌اند، به منظور بررسی این موضوع که چگونه انتخاب‌های اجتماعی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر می‌گذارد و بنابراین چگونه می‌توان به اهداف اقلیمی پاریس دست یافت، تدوین شده‌اند (کوهی و بلبائیان، ۱۴۰۱). در این تحقیق از مدل MPI-ESM-HR ریزمقیاس شده با مدل CMhyd استفاده شده است. برای بررسی نمایه‌های حدی از دو سناریو حدواسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۲۵) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) استفاده شده است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- صحت سنجی دما و بارش مدل‌های CMIP6

برای صحت سنجی نتایج مدل در برابر داده‌های ایستگاهی در این تحقیق از سه روش ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین اریبی خطا (MBE) و درصد اریبی (PBIAS) استفاده

جدول ۱- روش‌های صحت سنجی مورد استفاده

رابطه آماری	نام روش
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}}$	ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)
$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N}$	میانگین اریبی خطا (MBE)
$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \times 100$	درصد اریبی (PBIAS)

¹ Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

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
GSL	طول فصل رشد در سال	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
TNx	بزرگ‌ترین دمای کمینه: میزان حداکثر دمای کمینه 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 ۹۰ ام دوره مینا باشد	روز
CSDI	موج سرما: تعداد روزهای از سال که حداقل ۶ روز متوالی دمای شبانه کوچکتر از صدک ۱۰ ام 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 (حداقل ۱ میلی‌متر) سالانه به دست می‌آید.	میلی‌متر در روز
R10mm	تعداد روزهای همراه با بارش سنگین: تعداد روزهایی که در سال بارش دستکم ۱۰ میلی‌متر باشد	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 از ۱ میلی‌متر بیشتر باشد) سالانه	میلی‌متر

دهنده روند کاهشی در طول زمان است. اهمیت روند را می‌توان در سطح معنی داری ۹۵ درصد بررسی کرد تا فرضیه صفر مبنی بر اینکه هیچ روندی در سری زمانی وجود ندارد رد شود. همانطور که گفته شد احتمال وجود یک روند صعودی یا نزولی در آزمون من-کندال ارزیابی و آزمایش می‌شود (مک لئود، ۲۰۰۵). از آنجایی

گام اول در آزمون من-کندال سازماندهی داده‌ها به ترتیب رتبه است. تفاوت بین هر دو داده به ترتیب رتبه برای تعیین تعداد تفاوت‌های مثبت و تعداد اختلاف منفی استفاده می‌شود. سپس آمار آزمون Z من-کندال قابل محاسبه است. مقدار مثبت آزمون به معنای روند افزایشی داده‌ها است، در حالی که مقدار منفی نشان

که آزمون روند من کندال ناپارامتریک است، می‌تواند برای هر داده توزیع آماری اعمال شود و در مطالعات مختلف اقلیم شناسی مورد استفاده قرار گیرد. برای استفاده از این روش، ابتدا آماره MK به همراه احتمال مرتبط با آن محاسبه شود. متغیر S در ابتدا به عنوان صفر در نظر گرفته می‌شود. در آزمون من-کندال مقایسه هر نقطه داده با نقطه قبلی آن انجام می‌شود و با نقطه داده دوم متغیر ارزیابی شده شروع می‌شود. برای هر نقطه، داده‌ای که مقدار آن از مقدار نقطه قبلی بیشتر باشد، مقدار S آماره MK افزایش می‌یابد. برای هر نقطه از داده‌ای که مقدار آن کمتر از مقدار قبلی باشد، از مقدار S کم می‌شود (لتن مایر و همکاران، ۱۹۹۴).

۴- بحث

۴-۱- صحت سنجی بارش و دمای CMIP6 در

ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

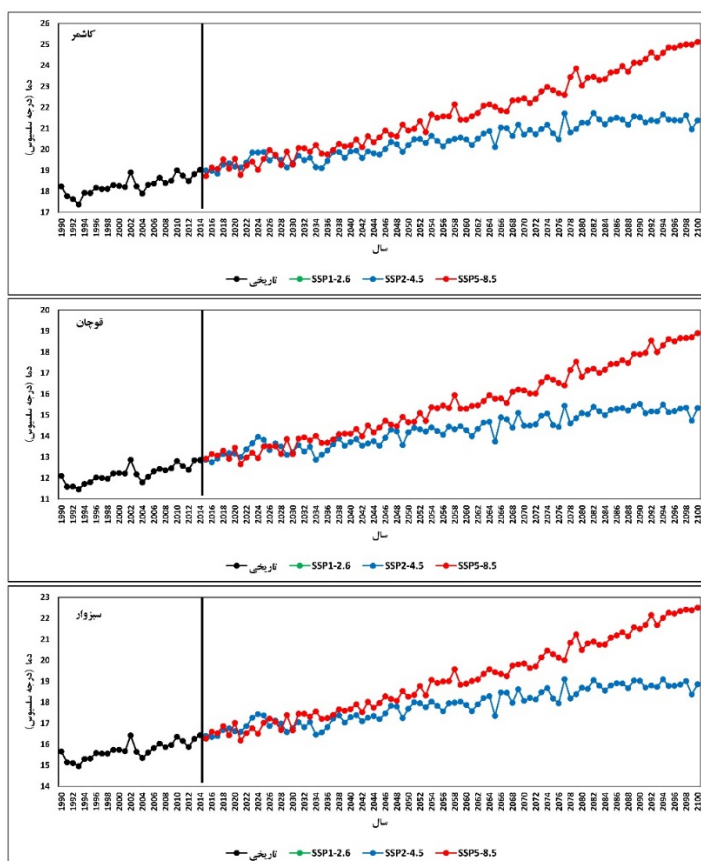
نتایج صحت سنجی سه ایستگاه منتخب در ایستگاه‌های استان خراسان رضوی برای دو متغیر دمای میانگین و بارش در مقیاس سالانه در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مدل MPI-ESM-HR از سری مدل‌های CMIP6 دما را به دقت بالاتری نسبت به بارش در استان خراسان رضوی برآورد می‌کند. کمینه اریبی برای دما در ایستگاه کاشمر با مقدار ۰/۳۳ درجه سلسیوس و بیشینه اریبی با مقدار ۰/۷۸ درجه سلسیوس در ایستگاه سبزوار به دست آمد. مقدار اریبی دمای میانگین در مقیاس سالانه برای ایستگاه قوچان نیز ۰/۵۱ درجه سلسیوس محاسبه شد. بررسی شاخص اریبی نشان می‌دهد که مدل در برآورد دما در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی دارای بیش برآوردی است. مقدار RMSE نیز در بین ایستگاه‌های مورد بررسی بین ۰/۸۷ در ایستگاه کاشمر تا ۱/۲۰ در ایستگاه سبزوار متغیر است. روش PBIAS بهتر می‌تواند دقت یک مدل را نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان دهد. بر این اساس مدل مورد بررسی از سری مدل‌های CMIP6 دما را در ایستگاه کاشمر ۱/۸۰ درصد بیشتر از داده‌های ایستگاهی در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ برآورد می‌کند. به همین ترتیب مدل دمای قوچان را ۴ درصد و سبزوار را ۵/۲۱ درصد بیش‌تر از داده‌های برآورد می‌کند.

نتایج صحت سنجی بارش نیز برای همین سه ایستگاه مورد بررسی در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مدل در برآورد بارش نیز همانند دما در ایستگاه‌های منتخب استان دارای بیش‌برآوردی است. مقدار اریبی نسبی بارش بین ۲۰/۸۰ میلی‌متر در ایستگاه سبزوار تا ۵۲/۵۶ میلی‌متر قوچان در تغییر است. به همین ترتیب مقدار RMSE مدل نیز ۵۹/۶۸، ۶۴/۳۳ و ۷۸/۸۹ میلی‌متر به ترتیب در ایستگاه‌های قوچان، سبزوار و کاشمر محاسبه شده است. همانطور که پیش‌تر برای دما گفته شد مدل در برآورد بارش خطای بیش‌تری را نسبت به دما نشان داده است. درصد اریبی هر ایستگاه برای بارش بیش از ۱۱ درصد به دست آمده است. مدل در برآورد بارش در ایستگاه سبزوار ۱۱/۴۰ درصد، در ایستگاه قوچان ۲۴ درصد و در ایستگاه کاشمر ۲۶/۸۰ درصد دارای بیش‌برآوردی برای بارش سالانه است.

بررسی صحت سنجی نشان داده است که مدل مورد بررسی برای بررسی تغییرات نمایه‌های حدی در ایستگاه‌های منتخب استان دارای دقت قابل قبولی است. دما یکی از متغیرهای کلیدی در مطالعات تغییر اقلیم است و این متغیر به عنوان یک نشانگر مهم در مطالعات تغییر اقلیم به کرات مورد استفاده قرار گرفته است. لذا پیش از بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب در استان خراسان رضوی دمای میانگین در سه ایستگاه مورد بررسی تحت دو سناریو حد واسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) تا پایان قرن مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل نیز مشخص است دما در دوره تاریخی و هم تحت دو سناریو SSP مورد بررسی با شیب قابل توجهی تا پایان قرن افزایش خواهد داشت. مقدار افزایش تحت سناریو بدبینانه (SSP5-8.5) به دلیل انتشار بالاتر گازهای گلخانه‌ای این سناریو به شکل قلیل توجهی بالاتری از سناریو SSP2-4.5 است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش دما تا میانه قرن حاضر (۲۰۵۰) تقریباً برای هر دو سناریو نزدیک به هم است اما با افزایش طول دوره آماری تا پایان قرن حاضر فاصله بین دو سناریو حدواسط و بدبینانه در ایستگاه‌های منتخب استان به شکل قابل توجهی افزایشی خواهد بود (شکل ۲).

جدول ۳- صحت سنجی نتایج مدل برای دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی (۱۹۹۰-۲۰۱۴)

دمای میانگین			
ایستگاه/روش	MBE	RMSE	PBIAS
قوچان	۰/۵۱	۱/۱۲	۴
سبزوار	۰/۷۸	۱/۲۰	۵/۲۱
کاشمر	۰/۳۳	۰/۸۷	۱/۸۰
بارش			
ایستگاه/روش	MBE	RMSE	PBIAS
قوچان	۵۲/۵۶	۵۹/۶۸	۲۴
سبزوار	۲۰/۸۰	۶۴/۳۳	۱۱/۴۰
کاشمر	۵۰/۹۰	۷۸/۸۹	۲۶/۸۰



شکل ۲- بررسی تغییرات دمای میانگین در ایستگاه‌های منتخب کاشمر، قوچان و سبزوار تحت دو سناریو حد واسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) تا پایان قرن حاضر

۴-۲- بررسی روند نمایه‌های حدی دما و بارش

CMIP6 در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان

رضوی

میانگین دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) نمایه‌های حدی مورد بررسی در سه ایستگاه منتخب استان خراسان رضوی در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج نشان داد که بالاترین میانگین روزهای خشک متوالی (CDD) در ایستگاه کاشمر با ۱۵۸ روز و کمترین مقدار آن در ایستگاه قوچان با ۶۷ روز در سال دیده می‌شود. به همین ترتیب بالاترین روزهای مرطوب متوالی (CWD) در قوچان با ۷/۵ روز در سال و کمترین روزهای مرطوب متوالی با ۵/۷ روز در ایستگاه کاشمر به دست آمد. این نتیجه از این دو نمایه نشان می‌دهد که از شمال به جنوب در استان خراسان رضوی روزهای خشک افزایشی هستند. شاخص Precipot که مقدار بارش را در روزهایی با بارش بیش از یک میلی‌متر نشان می‌دهد نیز از شمال به جنوب در استان روند کاهشی دارد. بالاترین مقدار این شاخص در ایستگاه قوچان با ۲۳۸/۹ میلی‌متر و کمترین مقدار آن با ۱۳۸/۹ میلی‌متر در ایستگاه کاشمر دیده می‌شود. بیشینه بارش یک روزه (RX1day) نیز از رفتاری مشابه با سه شاخص بارشی پیشین پیروی می‌کند. بالاترین بارش روزانه در ایستگاه‌های منتخب استان در ایستگاه قوچان با مقدار ۸/۲۷ میلی‌متر برای میانگین دوره تاریخی به دست آمد. برعکس نمایه‌های روزهای خشک و مرطوب و مقدار بارش و بیشینه بارش یک روزه که تغییرات زیادی را در بین ایستگاه‌های استان نشان داده‌اند شاخص شدت بارش روزانه (SDII) در بین سه ایستگاه مورد بررسی در استان تغییرات چندانی را ندارد، بطوریکه این شاخص از حداقل ۲/۲۷ میلی‌متر/روز در ایستگاه سبزوار تا ۲/۴۲ میلی‌متر/روز در ایستگاه قوچان در تغییر است.

بررسی نمایه‌های حدی دما نشان داد که دما در استان خراسان رضوی و سه ایستگاه مورد بررسی از ارتفاعات و عرض جغرافیایی پیروی می‌کند بطوریکه بالاترین مقدار روزهای یخبندان و پایین‌ترین دماها در ایستگاه قوچان و بالاترین دماها و کمترین روزهای سرد و یخبندان در ایستگاه کاشمر دیده می‌شود. روزهای یخبندان در سه ایستگاه مورد بررسی از حداقل ۲۴ روز در سال در

ایستگاه کاشمر تا ۱۲۱ روز در ایستگاه قوچان در تغییر است. برعکس این نمایه، شاخص WSDI که طول مدت گرما را نشان می‌دهد در کاشمر با ۱۷ روز بیشینه و در قوچان با ۱۱ روز کمینه مقدار را خود را نشان داد به همین ترتیب این نمایه در سبزوار ۱۴/۹ روز محاسبه شده است. دمای میانگین (Tmm) در سه ایستگاه مورد بررسی به ترتیب در قوچان، سبزوار و کاشمر ۱۲/۱۹، ۱۵/۷۲ و ۱۸/۲۹ درجه سلسیوس محاسبه شده است. بیشینه دما نیز به ترتیب برای سه ایستگاه مورد بررسی مقادیر ۱۸/۸۸، ۲۲/۱۸ و ۲۴/۷۴ درجه سلسیوس محاسبه شده است. کمینه دما نیز در این سه ایستگاه برای قوچان ۵/۵۱ درجه سلسیوس، سبزوار ۹/۲۶ درجه سلسیوس و در کاشمر ۱۱/۸۵ درجه سلسیوس محاسبه شده است. بیشینه نمایه GSL نیز در ایستگاه کاشمر و کمینه آن در ایستگاه قوچان محاسبه شده است. تغییرات سایر نمایه‌های دمایی کمینه مطلق و بیشینه مطلق در جدول (۴) ارائه شده است که نمایه‌های مطلق نیز از رفتاری مشابیه با نمایه‌های میانگین پیروی می‌کنند.

برای بررسی تغییرات بلندمدت نمایه‌های حدی بارش و دما در استان خراسان رضوی طی دوره تاریخی با استفاده از CMIP6 تعداد ۱۷ نمایه حدی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمایه‌های حدی دمایی در ایستگاه‌های منتخب استان دارای روند افزایشی هستند. از بین نمایه‌های مورد بررسی، پنج نمایه دمایی TMm، TNm، TNx، TXm و TXx در هر سه ایستگاه مورد بررسی دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ بودند. نمایه طول دوره گرمايي (WSDI) نیز در هر سه ایستگاه مورد بررسی دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است. بالاترین افزایش این نمایه در ایستگاه کاشمر با مقدار افزایشی ۳/۱۷ روز در دهه محاسبه شده است. نمایه روزهای یخبندان (FD) نیز در هر سه ایستگاه مورد بررسی در سطح استان خراسان رضوی دارای روند کاهشی معنی‌دار است. این نتیجه نشان می‌دهد که روزهای یخبندان تحت تأثیر پدیده گرمایش جهانی در سطح استان خراسان رضوی روند کاهشی را طی سه دهه اخیر ثبت کرده‌اند. نمایه‌های TXn، TNn و GSL روند افزایشی را طی دوره تاریخی نشان دادند اما این مقدار روند در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نبوده است. نمایه‌های بارش، شدت بارش

روزانه و روزهای مرطوب متوالی در سطح استان دارای روند کاهشی هستند اما این مقدار روند در هیچ یک از سطوح آماری معنی‌دار نیست (جدول ۴).

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)

کاشمر			سبزوار			قوچان			نمایه/ایستگاه
نمره Z	شیب روند	میانگین	نمره Z	شیب روند	میانگین	نمره Z	شیب روند	میانگین	
-۰/۸۲	-۰	۱۵۸/۶	-۱/۸۰	-۱۰/۳	۱۲۷/۲	۰/۰۲	۰/۲	۶۷/۳۶	CDD
-۰/۳۶	-۰/۱۱	۵/۷۲	-۰/۰۲	-۰/۱۳	۶/۲۴	-۰/۳۸	-۰/۱۲	۷/۵۲	CWD
۱/۱۹	۰/۳۷	۶/۶۵	-۳/۰	-۰/۱۵	۷/۰۹	۰/۷۲	۰/۳۲	۸/۲۷	RX1day
۰/۴۴	۴/۱۷	۱۳۸/۹۸	۰/۷۲	-۵/۹	۱۶۱/۸۱	۱	-۱۳/۷	۲۳۸/۹۳	Preptot
-۰/۵۴	-۰/۱۷	۲/۳۰	-۰/۳۵	-۰/۰۹	۲/۲۷	-۰/۶۳	-۱/۰	۲/۴۲	SDII
-۲/۳۸	-۳/۸	۳/۳۶	-۳/۲۳	-۲/۹۲	۴/۰۸	-۳/۰۴	-۴/۲	۳/۶۸	CSDI
۳/۱۷	۱۳/۵۱	۱۷/۱۶	۲/۸۱	۹/۳	۱۴/۹۶	۲/۴۰	۶/۶	۱۱/۶۸	WSDI
-۱/۸۵	-۰	۲۴/۰۴	-۲/۸۵	-۸/۴۹	۶۶/۸۴	-۲/۱۶	-۴/۱۶	۱۲۱/۵۶	FD
-۰/۰۲	-۰/۰۰۳	۱۲/۸۸	-۰/۵۴	-۰/۰۲	۱۲/۹۱	-۰/۷۲	-۰/۰۴	۱۳/۳۶	DTR
۴/۷۴	۰/۴۴	۱۸/۲۹	۴/۵۱	۰/۴۷	۱۵/۷۲	۴/۶۵	۰/۴۸	۱۲/۱۹	TMm
۴/۸۳	۰/۴۴	۱۱/۸۵	۵/۰۲	-۰/۴۴	۹/۲۶	۵/۱۱	۰/۴۶	۵/۵۱	TNm
۰/۸۲	۰/۲۶	-۲/۹۸	۰/۳۵	-۰/۱۱	-۵/۷۸	۱/۱۹	۰/۴۵	-۱۰/۱۹	TNn
۳/۹۰	۰/۷۸	۲۲/۶۴	۳/۷۶	۰/۷۰	۲۲/۲۴	۳/۷۶	۰/۷۵	۱۸/۸۱	TNx
۴/۲۳	۰/۴۶	۲۴/۷۴	۳/۹۰	۰/۴۵	۲۲/۱۸	۳/۸۵	۰/۴۸	۱۸/۸۸	TXm
۰/۵۴	۰/۱۷	۶/۷۶	۰/۵۸	۰/۱۹	۳/۹۲	۰/۳۰	۰/۱۲	-۰/۶۵	TXn
۲/۶۹	۰/۴۶	۳۹/۱۷	۲/۸۷	۰/۵۴	۳۷/۲۸	۳/۲۰	۰/۶۶	۳۴/۷۸	TXx
۱/۰۲	۲/۷۵	۳۵۰/۶	۱/۱۹	۵/۳۱	۲۹۹/۶	۰/۶۶	۱/۳۳	۲۵۲/۴	GSL

مقادیر پررنگ در جدول در سطح آماری ۰/۰۵ معنی‌دار است.

در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده در هر سه دوره آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور بی‌هنجاری افزایشی دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که تحت شرایط تغییر اقلیم آینده سهم بارش‌های رگباری و سیل آسا در ایستگاه‌های استان روند افزایشی خواهد داشت. روزهای خشک متوالی نیز در ایستگاه قوچان در تمامی دوره‌ها ناهنجاری افزایشی

۳-۴- تغییرات دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و

پیش‌نگری شده (۲۰۲۶-۲۱۰۰) با سناریوهای SSP

نمایه‌های حدی بارش

پیش‌نگری نمایه‌های حدی دما و بارش با استفاده از خروجی سناریو SSP2-4.5 در جدول (۵) ارائه شده است. همانطور که در جدول نیز مشخص است بیشینه بارش یک روزه و شدت بارش

جهانی باعث کاهش طول دوره سرد در آینده خواهد شد. به همین ترتیب نمایه روزهای یخبندان (FD) نیز در تمامی دوره‌ها و ایستگاه‌های مورد بررسی تحت سناریو SSP2-4.5 بی‌هنجاری کاهشی خواهد داشت. بیشترین کاهش روزهای یخبندان با مقدار ۴۰ روز کاهش در آینده دور ایستگاه سبزوار دیده می‌شود.

دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که پربارش‌ترین ایستگاه استان که قوچان است در آینده روزهای خشک بیشتری را تجربه خواهد کرد. این نمایه به نوعی نشان‌دهنده خشکسالی نیز می‌باشد لذا انتظار می‌رود که در شرایط تغییر اقلیم آینده خشکسالی در بخش‌های شمالی استان خراسان رضوی روندی افزایشی داشته باشد. نمایه طول دوره سرد (CSDI) به غیر از دوره آینده نزدیک در دو ایستگاه قوچان و سبزوار در سایر دوره‌ها و ایستگاه کاشمر بی‌هنجاری سراسر کاهشی دارد که نشان می‌دهد که گرمایش

جدول ۵- بررسی بی‌هنجاری نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی طی دوره آینده نزدیک

(۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۲۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سناریوی حد واسط (SSP2-4.5)

نمایه	قوچان			سبزوار			کاشمر		
	نزدیک	میانی	دور	نزدیک	میانی	دور	نزدیک	میانی	دور
CDD	۸	۸/۸۸	۱۵/۷۲	۷	-۹/۷۲	۰/۰۸	-۰/۵۲	-۱۴/۰۸	-۱۰/۵۶
CWD	۵/۱۲	۴/۲۴	۴/۴۸	۳/۰۴	۲/۹۲	۲/۴	۲/۸	۲/۴۸	۲/۷۶
RX1day	۰/۳۴	۰/۴۳	۱/۱۶	۰/۶۶	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۹۹	۱/۳۰	۰/۷۱
Preptot	۱۴/۰۴	۱۳/۸۴	۷/۸۷	۱۵/۱۳	۱۲/۸۸	۶/۷۰	۱۳/۸۹	۱۱/۰۷	۴/۶۰
SDII	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۰۸
CSDI	۹/۱۶	-۱/۸۴	-۲/۷۲	۱۱/۲۴	-۲/۰۴	-۲/۷۲	۱۱/۴۰	-۱/۷۲	-۰/۹۶
WSDI	-۱۱/۴۴	-۵/۹۶	۵/۹۶	-۱۴/۹۶	-۷/۴۸	۷/۹۲	-۱۶/۹۲	-۱۱/۴۸	۴/۸۸
FD	-۸/۸	-۲۰/۶	-۲۷/۰۸	-۱۸/۹۲	-۲۹/۱۶	-۴۰/۰۴	-۱۴/۲۸	-۱۸/۴۸	-۲۰/۸۴
DTR	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۰۹	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۰۷	۰/۲۵	۰/۲۹
TMm	۱/۳۹	۲/۲۸	۲/۹۶	۱/۴۱	۲/۳۴	۳/۰۲	۱/۴۱	۲/۳۴	۳/۰۴
TNm	۱/۳۶	۲/۱۷	۲/۸۱	۱/۳۶	۲/۲۱	۲/۸۵	۱/۳۷	۲/۲۲	۲/۸۹
TNn	۰/۸۹	۱/۳۵	۲/۶۹	۱/۲۷	۱/۷۷	۲/۶۹	۱/۱۵	۱/۵۴	۲/۳۷
TNx	۱/۶۹	۲/۷۶	۳/۶۱	۱/۶۷	۲/۷۸	۳/۴۹	۱/۶۶	۲/۷۰	۳/۴۵
TXm	۱/۴۲	۲/۳۸	۳/۱۲	۱/۴۶	۲/۴۷	۳/۲۰	۱/۴۴	۲/۴۷	۳/۱۸
TXn	۱/۱۰	۱/۴۲	۲/۵۲	۱/۲۳	۱/۷۱	۲/۴۹	۱/۱۷	۱/۸۶	۲/۶۸
TXx	۱/۷۷	۲/۹۵	۳/۷۵	۱/۷۷	۲/۹۵	۳/۶۶	۱/۶۶	۲/۷۷	۳/۴۸
GSL	۱۰/۲۸	۱۸/۸۸	۲۷/۶۸	۲۷/۲	۳۷	۵۶/۵۲	۱۲/۸۴	۱۳/۴	۱۴/۲۸

SSP2-4.5 حداقل ۱/۳۹ درجه سلسیوس در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) در ایستگاه قوچان و حداکثر ۳/۰۴ درجه سلسیوس در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) ایستگاه کاشمر افزایش خواهد داشت. به همین ترتیب سایر نمایه‌های دمایی نیز همانند میانگین دمای بیشینه (TXm) و میانگین دمای کمینه (TNm) نیز بی‌هنجاری افزایشی قابل توجهی را ایستگاه‌های منتخب برای استان نشان داده‌اند. بیشینه بی‌هنجاری نمایه‌هایی در بین سه ایستگاه مورد بررسی مربوط به نمایه بیشینه مطلق دمای بیشینه روزانه است که این نمایه در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در ایستگاه قوچان افزایش ۳/۷۵ درجه سلسیوسی را نسبت به دوره

بررسی نمایه‌های دمایی در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی تحت سناریو SSP2-4.5 نشان می‌دهد که تمامی نمایه‌های دمایی در این سه ایستگاه بی‌هنجاری سراسر افزایشی خواهند داشت. کمترین تغییرات را در بین نمایه‌های مورد بررسی شاخص DTR دارد که حداکثر ۰/۳۴ درجه سلسیوس در آینده دور در ایستگاه سبزوار افزایش خواهد داشت. همانطور که گفته شد تمامی نمایه‌های دمای میانگین، دمای کمینه و بیشینه در استان بی‌هنجاری افزایشی را در آینده تجربه می‌کنند. این نتیجه نشان می‌دهد که استان خراسان رضوی در آینده نسبت به دوره تاریخی گرم‌تر خواهد شد. دمای میانگین (TMm) در استان تحت سناریو

منتخب استان خراسان رضوی در جدول (۶) ارائه شده است. بررسی نتایج سناریو SSP5-8.5 نشان می‌دهد که نمایه‌های حدی همانند سناریو حد واسط برای نمایه‌های دمایی بی‌هنجاری افزایشی و برای نمایه‌هایی همانند روزهای یخبندان و طول دوره سرد بی‌هنجاری کاهش می‌یابد. بارزترین تغییرات نمایه‌های حدی مربوط به نمایه‌های حدی دمایی است. بر اساس نتایج سناریو بدبینانه SSP5-8.5 روزهای یخبندان در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی به شکل قابل توجهی روند کاهش می‌یابد. بطوریکه در دوره آینده دور ایستگاه سبزوار روزهای یخبندان کاهش ۵۹/۸ روز در دهه را نسبت به دوره تاریخی خواهد داشت.

تاریخی نشان داده است (جدول ۵). نتایج مربوط به این نمایه‌ها به روشنی نشان می‌دهد که گرمایش جهانی باعث روند افزایشی قابل توجه نمایه‌های حدی دما در سطح استان خراسان رضوی خواهد شد. همچنین تغییر اقلیم باعث شده است تا بارش‌ها نیز در آینده سیل‌آسا و رگباری‌تر شده و شدت بارش‌ها افزایش یابد. افزایش شدت بارش می‌تواند تهدیدات جدی را در خصوص سیل‌خیزی، فرسایش خاک و آسیب به محصولات کشاورزی به همراه داشته باشد.

بی‌هنجاری نمایه‌های حدی دما و بارش تحت سناریو SSP5-8.5 طی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) برای سه ایستگاه

جدول ۶- بررسی بی‌هنجاری نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی طی دوره آینده نزدیک

(۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۲۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)

نمایه	قوچان			سبزوار			کاشمر		
	نزدیک	میانی	دور	نزدیک	میانی	دور	نزدیک	میانی	دور
CDD	۸/۳۶	۱۳/۸۸	۱۴/۲	۴/۷۲	۷/۷۶	۱۷/۵۲	-۵/۹۶	-۱۵/۴	
CWD	۵/۶۴	۳/۸۸	۴/۹۲	۲/۱۶	۲/۸	۲/۴۴	۲/۲	۳/۰۸	
RX1day	۰/۷۵	۱/۸۰	۱/۷۵	۰/۳۴	۱/۴۷	۱/۸۶	۰/۰۳	۲/۴۴	
Preptot	۱۸/۴۱	۲۲/۲۷	۳۰/۹۱	۱۳/۴۵	۱۹/۲۷	۲۴/۱۰	۱۰/۳۹	۱۷/۳۵	۲۵/۲۵
SDII	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۲۶
CSDI	۱۰/۱۲	-۲/۵۲	-۳/۴۰	۱۱/۹۶	-۲/۸۴	-۴/۰۸	۱۰/۷۶	-۳/۱۲	-۳/۳۶
WSDI	-۱۱/۶۸	-۱۰/۸	۳۳/۸	-۱۴/۷۲	-۱۳/۷۲	۴۰/۸۴	-۱۷/۱۶	-۱۶/۴۴	۴۰/۹۶
FD	-۱۶/۲۴	-۳۵/۴	-۶۱/۴۸	-۲۶	-۴۹/۱۶	-۵۹/۸۸	-۱۵/۰۴	-۲۱/۹۶	-۲۳/۶۸
DTR	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۲	۰/۲۱	۰/۳۷	۰/۵۴	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۳۶
TMm	۱/۸۴	۳/۵۱	۵/۵۵	۱/۸۸	۳/۶۱	۵/۶۹	۱/۹۰	۳/۶۲	۵/۷۱
TNm	۱/۷۷	۳/۳۶	۵/۳۳	۱/۷۷	۳/۴۳	۵/۴۲	۱/۸۱	۳/۵۰	۵/۵۲
TNn	۱/۱۶	۲/۷۷	۴/۲۸	۱/۱۴	۲/۹۰	۴/۴۵	۱/۱۰	۲/۷۶	۴/۴۰
TNx	۲/۱۲	۴/۲۲	۶/۷۳	۲/۰۶	۴/۲۲	۶/۶۱	۲/۰۰	۴/۱۶	۶/۵۲
TXm	۱/۹۱	۳/۶۷	۵/۷۶	۱/۹۸	۳/۸۰	۵/۹۶	۱/۹۸	۳/۷۴	۵/۸۹
TXn	۰/۸۷	۲/۶۶	۳/۹۲	۱/۱۵	۲/۸۱	۴/۲۲	۱/۳۳	۲/۹۰	۴/۳۹
TXx	۲/۲۸	۴/۴۰	۶/۷۱	۲/۲۲	۴/۴۴	۶/۷۷	۲/۰۱	۴/۱۵	۶/۵۷
GSL	۱۱/۹۶	۳۶/۶	۶۵/۶۸	۳۷/۳۲	۶۰/۵۶	۶۴/۳۶	۱۱/۸	۱۴/۵۶	۱۴/۴

است. هفت نمایه مربوط به میانگین، کمینه و بیشینه دما در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی و دوره‌ها بی‌هنجاری افزایشی دارد. مقدار بی‌هنجاری افزایشی تحت سناریو بدبینانه SSP5-8.5 نسبت به نتایج سناریوی حد واسط SSP2-4.5 از شدت بیشتری برخوردار است. همانطور که می‌توان در جدول (۶) نیز مشاهده کرد در شرایط بدبینانه در دوره‌های آینده میانی (۲۰۷۶-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) بی‌هنجاری‌های افزایشی ۵ تا ۶ درجه

روزهای خشک متوالی نیز در دو ایستگاه قوچان و سبزوار بی‌هنجاری افزایشی سراسری خواهد داشت که این تغییرات برای ایستگاه قوچان تحت سناریو حد واسط نیز دیده شده است. شدت بارش و بیشینه بارش روزانه نیز تحت سناریو بدبینانه SSP5-8.5 در تمامی دوره‌ها و ایستگاه‌ها بی‌هنجاری افزایشی با شدت بیشتری رخ خواهد داد که این نتیجه نشان دهنده افزایش بارش‌های سیل‌آسا در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

یخبندان توسط تقوی (۱۳۸۹) نیز گزارش شده است. همچنین چمانه فر و همکاران (۱۴۰۱) نیز با استفاده از مدل‌های CMIP6 نشان دادند که شاخص شب‌های سرد روند کاهشی معنادار و درصد شب‌های گرم روند افزایشی معنادار در مشهد دارند.

از بین نمایه‌هایی دمایی مورد بررسی نمایه دامنه شبانه روزی دما (DTR) در هر سه ایستگاه مورد بررسی طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) دارای روند کاهشی بوده است هر چند که این روند کاهشی در هیچ یک از سطوح آماری معنی دار نبوده است اما این نتیجه نشان داد که دمای کمینه با شدت بیشتری در ایستگاه‌های استان دارای روند افزایشی است و این افزایش بیشتر دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه باعث شده است که تا اختلاف این نمایه منفی شود. روند کاهشی شاخص DTR با داده‌های ایستگاهی طی دهه‌های گذشته نیز در ایران توسط رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده شده است

بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم آینده نشان داد که نمایه‌های دمایی تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند افزایشی را تجربه خواهند کرد. شدت افزایش تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 نسبت به سناریو SSP2-4.5 بیش‌تر است. همچنین با افزایش دوره از آینده نزدیک به آینده دور بر مقدار ناهنجاری نمایه‌های حدی دما افزوده می‌شود. روند افزایشی پیش‌نگری شده نمایه‌های حدی دما در این تحقیق پیش‌تر توسط کوزه‌گران و همکاران (۱۳۹۴) نیز که به بررسی روند رویدادهای حدی اقلیمی در شمال شرق ایران پرداخته‌اند نیز تایید شده است.

بررسی نمایه‌های بارشی نیز نشان داده است که شدت بارش روزانه (SDII) و بیشینه بارش روزانه (RX1day) در تمامی دوره‌ها و سناریوها در ایستگاه‌های مورد بررسی دارای ناهنجاری افزایشی هستند. افزایش بارش‌های فرین در تحقیق‌های پیشین نیز گزارش شده است بطوریکه کوهی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل‌های CMIP3 نشان دادند که بارش سنگین و ابرسنگین، بیشینه بارش پنج روزه و شدت بارش در آینده افزایش خواهد یافت. همچنین زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) نیز با استفاده از مدل‌های CMIP6 افزایش سهم بارش‌های فرین و سنگین را در ایران گزارش کردند. این مقدار ناهنجاری می‌تواند نشان دهنده روند افزایشی شدت بارش و افزایش بارش‌های سیل آسا در

سلسیوسی را نیز می‌توان مشاهده کرد. برای نمونه نمایه بالاترین دماهای کمینه (TNx) در ایستگاه کاشمر در آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) افزایش ۶/۵۲ درجه سلسیوسی در دهه را نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) نشان می‌دهد. به‌همین ترتیب نمایه بالاترین دماهای بیشینه (TXx) نیز در ایستگاه کاشمر در آینده دور افزایش ۶/۵۷ درجه سلسیوسی را نسبت به دوره تاریخی نشان داده است. نمایه طول فصل رشد (GSL) در سال نیز در تمامی دوره‌ها و ایستگاه‌ها همانند سناریو SSP2-4.5 در سناریو بدبینانه SSP5-8.5 نیز بی‌هنجاری افزایشی قابل توجهی را نشان داده است (جدول ۶).

۵- نتیجه‌گیری

تولنایی مدل‌های گردش جهانی در شبیه‌سازی تغییرات نمایه‌های حدی در مقیاس زمانی روزانه برای جامعه و همچنین برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاران در مدیریت منابع آب، خشکسالی و پایش سیلاب و کشاورزی اهمیت زیادی دارد. با این حال، شناسایی و تعیین کمیت رویدادهای حدی دما و بارش روزانه برای درک و ارزیابی تغییرات آب و هوایی چالش برانگیز است. بنابراین، ارزیابی عملکرد مدل‌های جدید در قالب مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) در ارائه ویژگی‌های نمایه‌های حدی دما و بارش بسیار مهم است. بررسی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل MPI-ESM-HR از سری مدل‌های CMIP6 دما را با دقت بالاتری نسبت به بارش در استان خراسان رضوی برآورد می‌کند. بررسی اریبی بارش و دما در سه ایستگاه قوچان، سبزوار و کاشمر نشان داد که مدل دارای بیش‌برآوردی برای هر دو متغیر مورد بررسی است. بررسی نمایه‌های حدی دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب استان نشان داد که نمایه‌های WSDI، TMm، TNm، TXm، TNx و TXx که نمایه‌های دمایی هستند در هر سه ایستگاه مورد بررسی روند افزایشی معنی‌دار را در سطح ۰/۰۵ نشان دادند. همچنین نمایه روزهای یخبندان (FD) نیز روند کاهشی را در سطح ۰/۰۵ در هر سه ایستگاه مورد بررسی نشان داده است. در تایید نتایج به دست آمده رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی تغییرپذیری فرین‌های دما در ایران طی دهه‌های اخیر روند منفی را برای شاخص‌هایی مانند روزهای یخبندان (FD)، روزهای یخبندان (ID)، روزهای خنک (TX10p)، شب‌های سرد (TN10p) نشان دادند. روند کاهشی روزهای

- Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
10. FAO (2024). The State of the Global Climate and implications for food and agriculture, Available from: <https://www.fao.org/climate-change/news/news-detail/the-state-of-the-global-climate-and-implications-for-food-and-agriculture/en>.
 11. Fathian, F., Ghadami, M., Haghghi, P., Amini, M., Naderi, S., & Ghaedi, Z. (2020). Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1119-1133.
 12. Gao, X., Guo, M., Yang, Z., Zhu, Q., Xu, Z., & Gao, K. (2020). Temperature dependence of extreme precipitation over mainland China. *Journal of Hydrology*, 583, 124595.
 13. Gusain, A., Ghosh, S., & Karmakar, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmospheric Research*, 232, 104680.
 14. Helali, J., Oskouei, E. A., Hosseini, S. A., Saeidi, V., & Modirian, R. (2022). Projection of changes in late spring frost based on CMIP6 models and SSP scenarios over cold regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1405-1418.
 15. Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Wehner, M. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic change*, 119, 345-357.
 16. Kohi, M., & Babaeian, I. (2022). Projections of the Sea Level Rise and Sea Surface Temperature of Pars Sea Region Under SSPs Scenarios. *Nivar*, 46(116-117), 179-189. doi: 10.30467/nivar.2022.360864.1225.
 17. Kouhi, M., Babaeian, I., Mousavi -Baygi, M., Farid Hosseini, A. R., & Khazanedari, L. (2013). Projected Changes in Precipitation Extremes of Mashhad During the Twenty First Century. *Iran-Water Resources Research*, 9(1), 61-74.
 18. Kouhi, M., Fattahi, E., & Asadi Oskouei, E. (2022). Shifts in Planting Date and Change in Length of Growing Season in Yazd Province Under Warmer Climate Conditions. *Nivar*, 46(118-119), 55-72. doi: 10.30467/nivar.2023.361965.1226
 19. Kouzegaran, S., & Mousavi Baygi, M. (2015). Investigation of Meteorological Extreme Events in the North-East of Iran. *Water and Soil*, 29(3), 750-764. doi: 10.22067/jsw.v0i0.40845.
 20. Kurniadi, A., Weller, E., Salmond, J., & Aldrian, E. (2024). Future projections of extreme rainfall events in Indonesia. شرایط آینده در ایستگاه‌های مورد بررسی باشد. روزهای یخبندان (FD) نیز در آینده در تمامی ایستگاه‌ها و سناریوها روند کاهشی خواهد داشت که توسط فتاحیان و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش شده است. به طور کلی افزایش دما و شدت بارش در آینده می‌تواند به عنوان یک تهدید جدی در مدیریت منابع آب و کشاورزی در سطح استان خراسان رضوی باشد که لازم است تا برنامه‌های لازم در این زمینه اتخاذ شود.

منابع

1. Agyekum, J., Annor, T., Quansah, E., Lamptey, B., & Okafor, G. (2022). Extreme precipitation indices over the Volta Basin: CMIP6 model evaluation. *Scientific African*, 16, e01181.
2. Alavinia, S. H., & Zarei, M. (2021). Analysis of spatial changes of extreme precipitation and temperature in Iran over a 50-year period. *International Journal of Climatology*, 41, E2269-E2289.
3. Caney, S. (2015). Climate change. In *The Routledge handbook of global ethics* (pp. 384-398). Routledge.
4. Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). *Geoscientific model development discussions*, 7(1), 1525-1534.
5. Chamanehfar, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I., & 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.
6. Chen, H., Sun, J., Lin, W., & Xu, H. (2020). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Sci. Bull*, 65(17), 1415-1418.
7. Chetioui, C., & Bouregaa, T. (2024). Temperature and precipitation projections from CMIP6 for the Setif high plains in Northeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(2), 63.
8. Ebrahimi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Projected Precipitation Extremes in Lake Urmia Basin under Climate Change. *Water and Soil*, 37(5), 769-785. doi: 10.22067/jsw.2023.81891.1270.
9. 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.

- V. (2016). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 126, 775-795.
33. Taghavi, F. (2010). Linkage between Climate Change and Extreme Events in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 36(2), -.
34. Ukkola, A. M., De Kauwe, M. G., Roderick, M. L., Abramowitz, G., & Pitman, A. J. (2020). Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087820.
35. Utsumi, N., Seto, S., Kanae, S., Maeda, E. E., & Oki, T. (2011). Does higher surface temperature intensify extreme precipitation?. *Geophysical research letters*, 38(16).
36. Yan, Y., Wang, H., Li, G., Xia, J., Ge, F., Zeng, Q., Ren, X. and Tan, L. (2022). Projection of Future Extreme Precipitation in China Based on the CMIP6 from a Machine Learning Perspective. *Remote Sensing*, 14(16), 4033.
37. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Drought Risk Management in a Changing Climate: The Role of National Policies and the Drought Management Plan (DMP). *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(1), 107-112.
38. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Technical Note: Assessing the Effect of Climate Change on Heavy Precipitation in Iran Based on a CMIP6 Ensemble Model. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(4), 119-124.
39. 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.
40. Zhao, Y., Qian, C., Zhang, W., He, D., & Qi, Y. (2021). Extreme temperature indices in Eurasia in a CMIP6 multi-model ensemble: Evaluation and projection. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5368-5385.
41. Zhu, C., Yue, Q., & Huang, J. (2023). Projections of mean and extreme precipitation using the CMIP6 Model: A study of the Yangtze River Basin in China. *Water*, 15(17), 3043.
42. Zhu, H., Jiang, Z., Li, J., Li, W., Sun, C., & Li, L. (2020). Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China?. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 1119-1132.
- International Journal of Climatology, 44(1), 160-182.
21. Kushwaha, P., Pandey, V. K., Kumar, P., & Sardana, D. (2024). CMIP6 Model Evaluation for Mean and Extreme Precipitation Over India. *Pure and Applied Geophysics*, 1-24.
22. Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Wallis, J. R., (1994). Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948-88. *J Clim.* 7(4), 586-607.
23. Mahato, A. (2014). Climate change and its impact on agriculture. *International journal of scientific and research publications*, 4(4), 1-6.
24. Mann, H. B., (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: J. Econom*, 245-259.
25. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I. and Huang, M. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2.
26. McLeod, A. I. (2005). Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. *R package Kendall*, 602, 1-10.
27. Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., & Stouffer, R. J. (2000). The coupled model intercomparison project (CMIP). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(2), 313-318.
28. Mishra, V., Wallace, J. M., & Lettenmaier, D. P. (2012). Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States. *Geophysical Research Letters*, 39(16).
29. Nishant, N., Di Virgilio, G., Ji, F., Tam, E., Beyer, K., & Riley, M. L. (2022). Evaluation of Present-Day CMIP6 Model Simulations of Extreme Precipitation and Temperature over the Australian Continent. *Atmosphere*, 13(9), 1478.
30. Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3), 329-343.
31. Rao, K. K., Al Mandous, A., Al Ebri, M., Al Hameli, N., Rakib, M., & Al Kaabi, S. (2024). Future changes in the precipitation regime over the Arabian Peninsula with special emphasis on UAE: insights from NEX-GDDP CMIP6 model simulations. *Scientific Reports*, 14(1), 151.
32. Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M. M., Molanejad, M., ... & Martin, M.