

بررسی روند و پیش‌نگری تغییرات فرین‌های دمایی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در شمال غرب ایران

بهروز ساری صراف^۱، هاشم رستم زاده^۲، نبی محمدی^{۳*}

۱- استاد آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

چکیده

بررسی تغییرات فرین‌های دمایی به دلیل گرمایش جهانی، خشکسالی و رخداد سرما و یخبندان دارای اهمیت زیادی است. لذا در این پژوهش به بررسی روند و پیش‌نگری تغییرات فرین‌های دمایی در شمال غرب ایران در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱)، آینده متوسط (۲۰۸۰-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۸۱) پرداخته شد. بدین منظور از ۲ شاخص حدی دمایی شامل روزهای یخبندان (FD) و روزهای یخی (ID) و آزمون روند من‌کندال ($Maan-Kendall$) جهت بررسی تغییرات استفاده شد. جهت پیش‌نگری تغییرات در دوره آینده نیز از بهترین مدل پس از ارزیابی ۷ مدل گردش کلی ($GCMs$) از سری مدل‌های گزارش ششم ($CMIP6$) تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی-اقتصادی شامل $SSP3-7.0$ ، $SSP1-2.6$ و $SSP5-8.5$ بهره گرفته شد. توزیع فضایی روند تغییرات حدی‌های دمایی در دوره پایه نشان داد که با حرکت از شمال به جنوب و از غرب به شرق منطقه روزهای یخبندان افزایش می‌یابد. هسته بیشینه روزهای یخی نیز تقریباً در جنوب منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج، میانگین روزهای یخبندان و روزهای یخی در دوره پایه به ترتیب برابر با ۱۰۱ و ۱۹ روز در سال است که حداکثر و حداقل روزهای یخ‌بندان با ۱۴۶ و ۵۲ روز به ترتیب مربوط به ایستگاههای سراب و پارس آباد و حداکثر و حداقل روزهای یخی نیز با ۴۲/۳۲ و ۱/۲۳ روز مربوط به ایستگاههای زرینه و پارس آباد است. همچنین روند تغییرات روزهای یخبندان و روزهای یخی در دوره پایه در بیشتر ایستگاهها کاهش است که در سطح ۰/۰۵ معنی دار شده است. ارزیابی مدل‌های مختلف با شاخص‌های خطاسنجی مختلف نیز نشان داد که مدل‌های $MRI-ESM2-0$ و $MPI-ESM1-2-L$ بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی فرین‌های دمایی در منطقه مورد مطالعه دارند. توزیع روند تغییرات در دوره آینده نیز نشان داد که روندها مشابه با دوره پایه است به طوری که روندهای کاهش در شاخص‌های مورد بررسی به ویژه بر اساس سناریوی $SSP5-8.5$ در هر دوره تشدید خواهد شد. بدین صورت که روزهای یخبندان و روزهای یخی در انتهای قرن ۲۱ نسبت به دوره پایه به ترتیب ۴۵ و ۱۳ روز، کاهش داشته است که بیشترین کاهش آنها نیز مربوط به ایستگاه‌های سردسیر منطقه است که نشان می‌دهد با افزایش دما، شاخص‌های یخبندان و روزهای یخی کاهش پیدا خواهد کرد.

کلید واژه‌ها: فرین‌های دمایی، شمال غرب، $CMIP6$ ، SSP .

مقدمه

مدل منطقه‌ای (RCM) برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و آینده دور ۲۰۶۰-۲۰۹۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج افزایش در فراوانی روزهای گرم و شب‌های و کاهش در روزهای مرطوب را نشان داد. واقفی و همکاران (۲۰۱۹) آینده فرین‌های اقلیمی در ایران را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق حاکی از وجود یک اقلیم همراه با دوره‌های خشک طولانی‌مدت با احتمال وقوع بارش‌های متناوب شدید همراه با رویداد سیل در آینده است. تان و همکاران (Tan et al, 2019) رخدادهای فرین دما و بارش را با استفاده از ETCCDI در حوزه رودخانه مودا بررسی کردند. نتایج نشان داد که شاخص‌های روز و شب‌های سرد تمایل به کاهش و تعداد روزها و شب‌های گرم تمایل به افزایش دارند. چنگ و همکاران (Cheng et al. 2020) در پژوهشی به مقایسه مدل‌های گزارش پنجم و ششم در شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که توانایی مدل‌های فردی در شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی در مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) نسبت به مدل‌های گزارش پنجم (CMIP5) بسیار بیشتر است و به‌طور خلاصه مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) در شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی و الگوهای روند در مقایسه با مشاهدات، بهبود کلی را به نمایش می‌گذارند. زرین و همکاران (۲۰۲۱) براساس مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) بارش‌های فرین آینده ایران را پیش‌بینی کردند. برای این منظور از پنج مدل و سه سناریو بهره بردند. در بین مدل‌های مورد استفاده گزارش ششم مدل IPSL-CM6A-MPI از ارزش کمتری نسبت به سایر مدل‌ها و مدل ESM1-2-HR دارای بالاترین عملکرد بودند. به‌طور کلی نتایج مطالعه عدم قطعیت‌ها در مدل‌های CMIP6 برای بارش نشان داد که براساس آن هیچ مدل واحدی حتی قابل اعتماد نیست. آیوگی و همکاران (Ayugi et al, 2021) تغییرات آینده فرین‌های اقلیمی در شرق قاره آفریقا را بر اساس مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) تحت دو سناریو مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق در هر دو سناریو، افزایش در روزهای خشک متوالی (CDD) و کاهش در روزهای مرطوب متوالی (CWD) تا پایان قرن بیست و یکم (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) را نشان دادند. علیجانی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از ۱۸ شاخص فرین دمایی، تغییرپذیری آن‌ها را در ایران در دوره ۱۹۶۱-

مسئله تغییر اقلیم امروزه به‌عنوان یکی از شایع‌ترین و مهم‌ترین مباحث علمی و حتی سیاسی-اجتماعی مطرح است. اصولاً تغییر و حرکت جزء وجودی سامانه‌های طبیعی است. انسان در تلاش است که با ابزارها و دانستنی‌های خود قانونمندی این تغییرات را کشف کند و بدین وسیله اقدام به پیش‌بینی رفتارهای بعدی سامانه آب و هوا نماید (عزیزی، ۱۳۸۳). یکی از نمودهای گرمایش جهانی و تغییر اقلیم افزایش فراوانی و شدت دوره‌های همراه با دماهای بالا و پایین است و برخی مطالعات نشان داده‌اند که تأثیرات فرین‌های اقلیمی آشکارتر و مستقیم‌تر از میانگین‌های آب و هوایی است (IPCC, 2013). تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده بر رویدادهای فرین آب و هوایی در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد و این رویدادهای حدی باعث وقوع امواج گرما، سرما، خشکسالی، سیل و طوفان می‌شود (Wang et al, 2021). برنامه ریزی و عملکرد زیرساخت‌های جوامع بشری در ارتباط با غذا، آب و انرژی، مسکن و ... به مقادیر فرین متغیرهای هواشناسی بستگی دارد (WMO, 2011). پیش‌بینی پدیده‌های فرین آب و هوا بر اساس شاخصهای دما و بارش در گزارش پنجم IPCC، نشان دهنده افزایش تعداد و شدت دوره‌های گرم و خشک است (Filho et al, 2016). شناخت اثرات فرین‌های اقلیمی بر روی سامانه‌های محیطی بسیار مهم است (زرین و همکاران، ۱۳۹۹). فرین‌های اقلیمی به‌عنوان پدیده‌های نادر و در واقع دارای شدت بالا هستند و با وقوع آن‌ها سامانه محیط و ساکنان به سختی می‌توانند خود را با تغییرات ایجاد شده تطبیق دهند. در واقع شرایط دمایی و بارشی می‌تواند بستر ایجاد رویدادهای آب و هوایی فرین باشد، در نتیجه مطالعه شاخص‌های حدی آب و هوایی ضروری به نظر می‌رسد (لطفی سیرایی، ۱۳۹۸). تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده بر رویدادهای فرین آب و هوایی در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد و این رویدادهای حدی باعث وقوع امواج گرما، سرما، خشکسالی، سیل و طوفان می‌شود (Wang et al, 2021). در این راستا آدیری و همکاران (Adeyeri et al, 2019) روندهای شاخص‌های فرین اقلیمی را در حوزه کومادوگویوبه (Komadugu-Yobe) را براساس داده‌های دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۱۷ و شبیه‌سازی‌های

شاخص‌های حدی دمایی دارای تغییرات معنی‌دار هستند. زرین و داداشی (۱۳۹۹) با استفاده از بروداد سه مدل-BCC-CSM2-MR، CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6، چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده کشور را تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌نگری کردند. نتایج نشان داد در تمام ماه‌های سال تا پایان قرن بیست و یک بی‌هنجاری مثبت دما در ایران وجود دارد و شدت آن نیز در ماه‌های گرم سال بیشتر است. زرین و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم پرداختند. نتایج نشان داد که مدل BCC-CSM2-MR در دو پهنه Bsh و Bwh عملکرد بهتری دارد و در پنج پهنه اقلیمی دیگر، مدل CAMS-CSM1-0 بهترین عملکرد را دارد. همچنین در هر دو سناریو مورد بررسی بی‌هنجاری دما در دهه‌های آتی در ایران مثبت است و توزیع آن از توپوگرافی پیروی می‌کند. جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۹۹) تغییرات زمانی و مکانی بارش‌های فرین در ایران را با استفاده از آمار ۸۲۳ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک طی دوره ۲۰۱۶-۱۹۶۵ مورد مطالعه قرار دادند. از نتایج جالب توجه این تحقیق می‌توان به نقش عرض جغرافیایی در بارش‌های فرین اشاره نمود. همچنین نتایج نشان داد که در ۶۰ درصد کشور نسبت بارش‌های حدی در حال افزایش است.

امروزه در بیشتر مطالعات اقلیمی بر پیش‌بینی و تغییرات آب و هوایی در آینده تأکید شده است. مدل‌های جهانی اقلیم در این مورد کاربرد زیادی دارند و این تغییرات را البته همراه با مقداری عدم قطعیت، پیش‌بینی می‌کنند (شائمی و حبیبی نونخندان، ۱۳۸۸). بررسی‌ها نشان داد که ۶۰ تا ۷۰ درصد شمال غرب ایران زیر پوشش فرین‌های اقلیمی واقع می‌شود و حداقل ۳۰ درصد از بارش‌های شمال‌غرب با بارش‌های فرین توجیه می‌شود (عساکره، ۱۳۹۱، جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین با توجه به ویژگی‌های طبیعی شمال غرب و مستعد بودن آن جهت برخورداری از فرین‌های اقلیمی و به ویژه روزهای یخبندان و یخی در این پژوهش سعی شده است که ارزیابی جامعی از این فرین‌های دمایی بعمل آید. بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که مطالعات انجام شده در زمینه فرین‌های اقلیمی در ایران و در منطقه

۲۰۰۶ بررسی کردند. نتایج نشان دهنده روند افزایشی شاخص‌های میانگین حداقل دما، میانگین حداکثر دما، شب‌های گرم، شب‌های گرمسیری و تداوم دوره‌های گرم و روند کاهش شاخص‌های محدوده دمای روزانه و تداوم دوره‌های سرد در کشور است. در مجموع نتایج بیانگر افزایش دما در بیشتر مناطق به‌ویژه مناطق مرکزی کشور است. یو و همکاران (۲۰۲۱) روند و عدم قطعیت مجموعه داده‌های دما را با استفاده از ۲۰ مدل گزارش ششم (CMIP6) در چین مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان تغییرات میانگین دمای سطحی را طی دوره ۲۰۱۴-۲۱۰۰ و با استفاده از سه سناریوی اجتماعی-اقتصادی (SSP126، SSP245 و SSP585) مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق روند افزایش دما در هر سه سناریو نشان داد. سناریوی SSP585 و در دوره آینده دور یعنی ۲۰۸۰-۲۱۰۰ بیشترین افزایش دما را نشان داد. نتایج عملکرد بهتر مدل‌های گزارش ششم را در شبیه‌سازی دما و روند شتابان گرمایش را در شمال غربی چین و فلات تبت نشان داد. حجازی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تغییرات زمانی-مکانی بارش‌های حدی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در خاورمیانه و شمال آفریقا پرداختند. نتایج نشان داد بارش‌های حدی در دوره‌های آینده بر اساس سناریوهای مختلف در منطقه مورد مطالعه افزایش خواهد یافت.

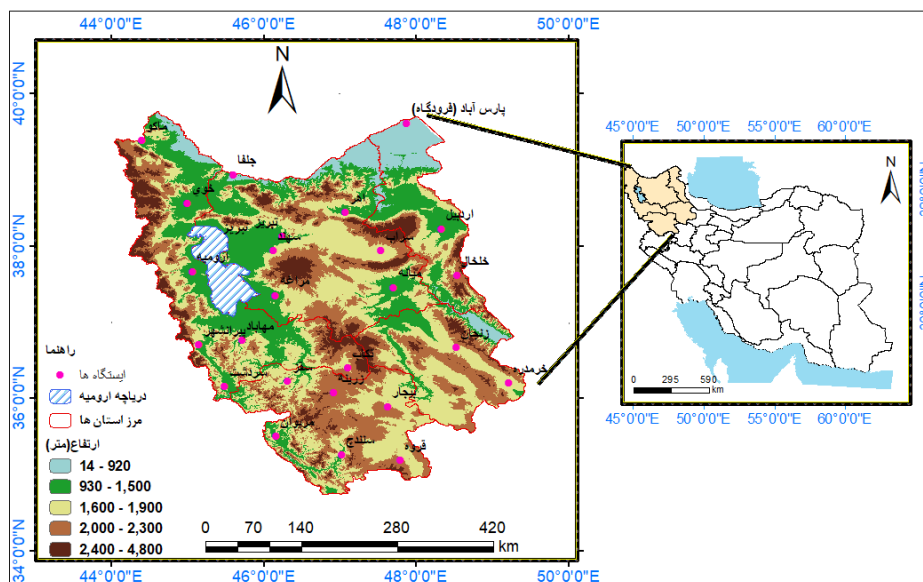
عسکری زاده (۱۳۹۵) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی ۱۶ نمایه حدی دما و ۱۱ نمایه حدی بارش طی دوره آماری ۱۹۶۰-۲۰۱۴ بر اساس داده‌های گزارش چهارم در استان خراسان رضوی پرداخت. نتایج حاکی از افزایش میانگین بارش پنج روزه و بارش‌های صدک ۹۵ و ۹۹ و همچنین دمای حداقل و حداکثر روزانه در منطقه مورد مطالعه است. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۷) روند وردایی فرین‌های اقلیمی را با استفاده از داده‌های روزانه ۴۷ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ را بررسی کردند. نتایج نشان دهنده کاهش در فراوانی حالت‌های سرد و افزایش در فراوانی حالت‌های گرم در بیش از ۸۰ درصد ایستگاه‌ها است. لطفی سیرائی (۱۳۹۸) به بررسی رویدادهای حدی اقلیمی در استان‌های تهران و البرز در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵) پرداخت. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه دما افزایش و بارش کاهش خواهد یافت و تمام

داده‌ها و روش شناسی

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شمال غرب ایران است که از عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه الی ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵ دقیقه الی ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی و شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان و کردستان می‌باشد. جهت بررسی از داده‌های بارش ۲۵ ایستگاه همدیدی بصورت روزانه، با توزیع مناسب و دارای دوره آماری بلندمدت (۲۰۱۴-۱۹۸۵)، حداقل سی‌ساله در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده گردید که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) آورده شده است.

شمال غرب بیشتر با استفاده از داده‌های دوره مشاهداتی صورت گرفته و در بعضی موارد از برون‌داد مدل‌های گزارش سوم (CMIP3) و یا گزارش پنجم (CMIP5) و داده‌های این مدل‌ها استفاده گردیده است (علیچانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ عسکری زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷) و تاکنون بررسی فرین‌های دمایی بصورت جامع و با استفاده از مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) در منطقه شمال غرب ایران صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش سعی شده است به ارزیابی روند و پیش‌نگری تغییرات فرین‌های دمایی در شمال غرب ایران در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) با استفاده از خروجی مدل منتخب با کمترین میزان خطا تحت سناریوهای مختلف SSP پرداخته شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

بودند انتخاب شدند. مشخصات مدل‌های مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. دلیل انتخاب مدل‌های مذکور از مجموعه مدل‌های CMIP6 اعتبار، دقت و در دسترس بودن سناریوهای مورد نیاز جهت مطالعه است. داده‌های بارش و دمای مدل‌های مذکور از مرکز ESGF دانلود گردید. سپس مقادیر بارش و دمای مشاهداتی و تاریخی برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه با تهیه برنامه در محیط MATLAB2020 با استفاده از نزدیکترین گرید داده‌های GCMs در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) استخراج

مدل‌های CMIP6 مورد مطالعه

در این پژوهش از داده‌های بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل ایستگاه‌های همدید شمال غرب کشور بصورت روزانه در دوره آماری بلندمدت و متناسب با دوره تاریخی مدل‌های جهانی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) استفاده شد که از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. جهت بررسی تغییرات فرین‌های دمایی در دوره‌های آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۱۰۰)، ابتدا ۷ مدل گردش کلی (GCM) از مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) که دارای داده‌های با وضوح بالا

گردید. سپس از روش تصحیح اریبی یا روش مقیاس کاهی خطی جهت ریزگردانی داده‌ها استفاده گردید. در ادامه اختلاف بین مقادیر بارش و دمای مشاهداتی و تاریخی با استفاده از شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین (R-squared) ارزیابی گردید.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

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

سناریوهای SSPs

(۲۰۲۱-۲۰۵۰) تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی-اقتصادی پیش‌نگری گردید (جدول ۲) و تغییرات آن در دوره آینده نسبت به دوره پایه محاسبه گردید. در ادامه با استفاده از آزمون آماری من کندال و تخمینگر شیب سن، روند و شیب تغییرات فرین‌های دمایی در منطقه شمال غرب کشور مشخص گردید. همچنین جهت نمایش بهتر تغییرات شاخص‌های فرین مورد بررسی از نمودار باکس-ویشر استفاده گردید. در این نمودار حد بالا و پایین هر کادر به ترتیب مقادیر صدک ۷۵ و ۲۵ را نشان می‌دهد. در حالی که خط افقی در هر جعبه میانه توزیع داده‌ها را نشان می‌دهد. طول عمودی جعبه‌ها نیز نشان دهنده دامنه میان چارکی است (شکل ۹).

تعداد و درصد ایستگاه‌های فاقد روند، دارای روند معنی‌دار افزایشی و کاهشی تبخیر-تعرق در ماه‌های مختلف فصل تابستان در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور دستیابی به نحوه پراکنش ایستگاه‌های فوق، موقعیت مکانی آنها در کشور در شکل ۳ ارائه شده است. با ورود به فصل تابستان در تیر ماه روند افزایشی همچنان در حال رشد است به طوری که این حالت در ۳۹٫۲ درصد ایستگاه‌ها آن هم بیشتر در بخش شمالی و همچنین به صورت پراکنده در بیشتر نقاط کشور دیده می‌شود. همچنین روند کاهشی به شدت کم شده به طوری که فقط ۱٫۳ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است. در مردادماه روند افزایشی که شامل ۱۵

سناریوها بخش مهمی از تحقیقات و ارزیابی تغییرات آب و هوایی را تشکیل می‌دهند. سناریوها به ما کمک می‌کنند تا پیامدهای بلندمدت و تصمیم‌گیری‌های کوتاه مدت را بهتر درک کنیم و محققان را قادر می‌سازند تا تغییرات ممکن آینده در زمینه عدم قطعیت‌های اساسی آینده را بررسی کنند (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). سناریوهای ssp با هدف مستندسازی پیش‌آگاهی‌های کمی از مسیرهای به اصطلاح مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) هستند (Frame et al., 2018). این سناریوها براساس پنج رویکرد بنیادین توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، توسعه سوخت فسیلی و توسعه مبتنی بر سیاست‌های بینابین توصیف شده‌اند (زرین و داداشی، ۱۳۹۹). پنج سناریوی SSP از SSP1 تا SSP5 وجود دارد که به ترتیب نشان‌دهنده گذر از خط سیر سبز، خط سیر میانه، خط سیر سنگلاخی، خط سیر تقسیم شده و خط سیر بزرگراهی است. کمیت‌های SSP براساس تلاش مشترک بین IAV و جامعه IAM ساخته شده است. سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش (جدول ۲) یعنی SSP1.2-6، SSP3.7-0 و SSP5.8-5 نشان دهنده حد پایین خط سیر انتشار آینده، خط سیر میانه و حد بالای انتشار آینده هستند (زهرائی و حسینی، ۱۳۹۹). پس از ارزیابی مدل‌های مختلف GCM، با استفاده از بهترین مدل، تغییرات فرین‌های دمایی در دوره آینده

و شهرپور، دمای بالا انتظار می‌رود و به طور معمول دمای هوا در این دو ماه بالاست، با این‌حال روند تبخیر در بخش‌های مرکزی و شرق ایران کاهش یافته است. اما وجود روند معنی‌دار افزایشی به خصوص در ماه مرداد با توجه به کم بودن نوسانات بارشی و بالا بودن دما باعث کاهش بیشتر منابع آب و هشدار کاهش مصرف آب خواهد شد.

درصد ایستگاه‌ها است به صورت پراکنده و روند کاهشی در نواحی مرکزی و شرق کشور در ۱۴ درصد ایستگاه‌ها به چشم می‌خورد. در ماه شهرپور روند کاهشی نسبت به ماه قبل ثابت مانده و روند افزایشی کمتر از ماه مرداد، یعنی تنها در ۱۲ درصد ایستگاه‌ها آن هم در شمال غرب و نواحی مرکزی مشاهده می‌گردد. با توجه به اینکه در ماه‌های مرداد

جدول ۲- سناریوهای اجتماعی- اقتصادی مورد استفاده در این پژوهش

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

منبع: اوئیل و همکاران (۲۰۱۴)

نشان دهنده دما یا بارش دوره تاریخی (مدل) و دوره مشاهداتی می‌باشد و μ میانگین بلند مدت است (luo et. al, 2018). با اعمال روش مقیاس کاهی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده عملکرد مدل در شبیه‌سازی بلند مدت متغیرهای دما و بارش به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. پس از استخراج خروجی مدل‌ها برای صحت‌سنجی آن‌ها از سنج‌های متداول آماری استفاده شد، این سنج‌ها عبارتند از: ضریب تعیین (R_{sqrt}) که معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد (صداقت‌کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۷) و از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) که بر اساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود و به عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطا به کار می‌رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا (MAE) برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده به کار می‌رود (هو و همکاران، ۲۰۰۱). رابطه (۵) نحوه محاسبه آن را نشان می‌دهد.

مقیاس کاهی و صحت‌سنجی

جهت مقیاس کاهی داده GCMs از روش مقیاس کاهی خطی استفاده گردید. مقیاس کاهی براساس میانگین تفاوت بین سری‌های زمانی مشاهده شده ماهانه و سری‌های زمانی دوره تاریخی GCM/RCM در همان دوره از سری زمانی مشاهده شده است. سپس این تفاوت‌ها برای داده‌های آب و هوایی شبیه‌سازی شده برای دریافت متغیرهای آب و هوایی با اربیی اصلاح شده اعمال می‌شوند (شرستا و همکاران، ۲۰۱۵). رویکرد مقیاس بندی خط ($LSBC$) با مقادیر اصلاح شده ماهانه براساس تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عمل می‌کند. داده‌های دما با ضریبی براساس نسبت میانگین بلندمدت ماهانه داده‌های مشاهداتی و داده‌های کنترل اصلاح می‌شود. در این حالت شرط بر این است که ضرایب تصحیح اعمال شده و افزوده‌ها حتی برای شرایط آتی نیز بدون تغییر باقی می‌مانند (توچباین و همکاران، ۲۰۱۲).

$$P_{hst,m,d}^{cor} = P_{hst,m,d} \times \left[\frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{hst,m})} \right] \quad (1)$$

$$T_{hst,m,d}^{cor} = T_{hst,m,d} + [\mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{hst,m})] \quad (2)$$

در روابط بالا P بارش، T دما، d روز و m ماه است. cor بارش یا دمای اصلاح شده است و hst و obs به ترتیب

دماهای بحرانی از جایی به جای دیگر فرق می‌کند (علیچانی، ۱۳۹۰). در پژوهش پیش رو جهت محاسبه و تجزیه و تحلیل شاخص‌ها از نمایه‌های فرین مبتنی بر آستانه‌ها که توسط تیم کارشناسی تحقیقاتی و پایش تغییر اقلیم (ETCCDMI) معرفی شده‌اند استفاده گردید (جدول ۳).

تعداد و درصد ایستگاه‌های فاقد روند، دارای روند معنی‌دار افزایشی و کاهشی تبخیر- تعرق در ماه‌های مختلف فصل پاییز در جدول ۴ ارائه شده است و موقعیت مکانی آنها در کشور در شکل ۴ ارائه شده است. با ورود به فصل پاییز، روند کاهشی در ماه مهر به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۹ درصد ایستگاه‌ها می‌رسد به نحوی که بیشتر نقاط کشور به صورت پراکنده دارای روند کاهشی است و تمرکز این نقاط در مناطق مرکزی کشور بیشتر است اما روند افزایشی تنها در ۹ درصد ایستگاه‌ها به صورت پراکنده قابل رؤیت می‌باشد. با این حال، در آبان تنها یک ایستگاه در جنوب کشور دارای روند افزایشی بوده و ۷/۷ درصد از ایستگاه‌ها در نواحی غربی کشور دارای روند کاهشی هستند. دیگر ایستگاه‌ها نیز بدون روند می‌باشند. در آذرماه هیچ روند افزایشی مشاهده نشده و روند کاهشی تنها در ۵ درصد ایستگاه‌ها در نواحی غربی کشور مشهود است و حدود ۹۵ درصد از ایستگاه‌های ایران فاقد روند معنی‌دار در تبخیر بوده است. با توجه به افزایش نوسانات بارشی در این فصل و عدم وجود روند یا روند کاهشی معنی‌دار تبخیر در اغلب بخش‌های ایران، انتظار می‌رود با کمبود منابع آبی کم تر مواجه شده و احتمالاً ذخیره منابع آبی بیش تر شود.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_o X_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_o^2 \sum_{i=1}^N X_s^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (5)$$

در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهداتی، N تعداد داده‌ها می‌باشد.

فرین‌های دمایی

بعد از آنکه سری زمانی بارش، دمای کمینه و بیشینه، برای دوره مشاهداتی و دوره آینده استخراج گردید، با استفاده از نرم‌افزار Relimindex و همچنین بهره‌گیری از سایت Climpack در مرحله اول فرایند بررسی کنترل کیفی داده‌ها صورت گرفت و در مرحله بعد اقدام به شاخص‌سازی فرین‌های دمایی در دوره مشاهداتی و آینده گردید. این شاخص‌ها از داده‌های روزانه دما و بارش به دست می‌آیند که محاسبه و تجزیه و تحلیل آن‌ها از طریق متمرکز شدن بر مقادیر آستانه‌ای است؛ قرار دادن فرمول مناسب برای هر یک از شاخص‌ها و تحلیل آن‌ها در کشورها و مناطق مختلف متناسب با شرایط آن‌ها متفاوت است (الکساندر و همکاران، ۲۰۰۶) و هر محقق با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و هدف مورد مطالعه، یک دسته از این شاخص‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهد (عیسی پور، ۱۳۹۲) چرا که آستانه

جدول ۳- شاخص‌های فرین دمایی مورد بررسی در این پژوهش

شاخص	نام تشریحی	تعریف	واحد
FD	Forest Days (روزهای یخبندان)	تعداد روزهایی از سال که دمای کمینه روزانه کوچکتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد ($TN < 0 C^0$)	روز
ID	Ice Days (روزهای یخی)	تعداد روزهایی از سال که دمای بیشینه روزانه کوچکتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد ($TX < 0 C^0$)	روز

نتایج و بحث

برخوردار است. میزان متوسط R2 این مدل با داده‌های بارش مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۰/۸۶ و میزان RMSE آن نیز برابر با ۱۹/۷ است. پس از مدل MPI-ESM1-2-LR دو مدل MIROC-ES2L و MIROC6 هر دو با ضریب تعیین برابر با ۰/۸۵ بهترین مدل‌های CMIP6 برای پیش‌نگری بارش در منطقه مورد مطالعه هستند. همچنین مدل‌های MIROC-ES2L و FGOALS-g3 در حد متوسط هستند. در مجموع مدل‌های MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR در این پژوهش برای شاخص سازی فرین‌های دمایی انتخاب شدند. برای مقایسه بهتر نتایج رتبه‌بندی عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی بارش و دمای شمال غرب ایران در جدول ۴ آورده شده است.

در این مرحله با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های منتخب برای این پژوهش، اقدام به انتخاب مدل بهینه جهت پیش‌نگری تغییرات فرین‌های دمایی در دوره‌های آینده گردید. چون برای برآورد فرین‌های اقلیمی نیاز به داده‌های بارش و دما داریم در نتیجه در مجموع و براساس مقادیر RMSE و MAE، مدل MRI-ESM2-0 در بیشتر پهنه مورد مطالعه از دقت بالاتری جهت شبیه‌سازی دما برخوردار است. بطوریکه میزان متوسط RMSE و MAE این مدل با داده‌های دمای مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۲/۷۶ و ۲/۵۲ می‌باشد. مقدار R2 نیز ۰/۹۹ است. پس از مدل MRI-ESM2-0، مدل MPI-ESM1-2-LR در رتبه دوم برای شبیه‌سازی دما در منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین مدل MPI-ESM1-2-LR در بیشتر پهنه مورد مطالعه نیز از دقت بالاتری جهت شبیه‌سازی بارش

جدول ۴- رتبه بندی مدل های CMIP6 جهت شبیه سازی دما و بارش بر اساس متوسط سنج‌های خطاستنچی

ردیف	مدل	میانگین مطلق خطا		مجذور میانگین مربعات خطا		ضریب تعیین	
		دمای	بارش	دمای	بارش	دمای	بارش
۱	MRI-ESM2-0	۱۵/۱۰	۲/۵۲	۱۹/۷۱	۲/۷۶	۰/۸۶	۰/۹۹
۲	MPI-ESM1-2-LR	۱۹/۱۴	۲/۹۶	۲۲/۷۵	۳/۲۳	۰/۸۵	۰/۹۹
۳	GFDL-ESM4	۲۲/۸۹	۴/۷۱	۲۸/۰۵	۵/۶۲	۰/۸۵	۰/۸۳
۴	FGOALS-g3	۲۹/۸۴	۵/۱۷	۳۷/۱۴	۵/۹۳	۰/۸۲	۰/۷۷
۵	CanESM5	۳۲/۷۶	۵/۲۱	۴۰/۳۲	۶/۲۴	۰/۶۵	۰/۸۵
۶	MIROC6	۲۸/۸۹	۶/۰۴	۳۶/۵۸	۶/۴۱	۰/۵۳	۰/۹۹
۷	MIROC-ES2L	۲۰/۳۹	۶/۴۶	۲۵/۹۱	۶/۶۴	۰/۴۹	۰/۹۹

داد به جز دو ایستگاه پارس آباد و سنندج در سایر ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است و در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز این روند کاهشی معنی‌دار شده است. براساس تخمینگر شیب سن بیشترین شیب تغییرات روزهای یخبندان و روزهای یخی به ترتیب با ۱/۸- و ۰/۸۳- مربوط به ایستگاه اردبیل است (جدول ۵).

جدول ۵ نتایج حاصل از اعمال آزمون من-کنال و تخمینگر شیب سن بر روی داده‌های فرین دمایی روزهای یخبندان و روزهای یخی در دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل، شاخص روزهای یخبندان در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای روند کاهشی است و این روند کاهشی به غیر از ایستگاه‌های زرینه، سقز، میوان در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه معنی دار شده است که بیانگر تغییرات دارای روند در منطقه مورد مطالعه است. بیشترین روند کاهشی به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های اردبیل، سنندج و پیرانشهر می‌باشد. بررسی شاخص روزهای یخی نیز نشان

جدول ۵- نتایج حاصل از آزمون آماری من کندال و شیب سن در دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۸۵) بر روی سری‌های زمانی روزهای یخبندان

(FD) و روزهای یخی (ID) در منطقه مورد بررسی

ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		ردیف	ایستگاه	روزهای یخی		ردیف	ایستگاه
		من کندال	شیب سن			من کندال	شیب سن		
۱	اردبیل	-۴/۴۴***	-۱/۷۹	۱۴	زنجان	-۳/۶۳***	-۸۳	۱	شیب سن
۲	ارومیه	-۹۳	-۲۳	۱۵	سراب	-۲/۳۰*	-۳۳	۲	من کندال
۳	اهر	-۱/۶۹+	-۵۹	۱۶	سردشت	-۲/۲۶*	-۳۷	۳	شیب سن
۴	بیجار	-۲/۵۵*	-۸۳	۱۷	سقز	-۳/۲۶**	-۹۳	۴	من کندال
۵	پارس آباد	-۲/۲۷*	-۶۴	۱۸	سنندج	-۳/۶۸***	۰/۰	۵	شیب سن
۶	پیرانشهر	-۳/۲۶**	-۱/۷۱	۱۹	سهند	-۲/۸۲+	-۵۰	۶	من کندال
۷	تبریز	-۲/۱۶*	-۶۵	۲۰	قروه	-۲/۴۲*	-۴۸	۷	شیب سن
۸	تکاب	-۲/۱۱*	-۵۸	۲۱	ماکو	-۳/۰۱**	-۸۰	۸	من کندال
۹	جلفا	-۱/۹۲+	-۵۵	۲۲	مراغه	-۰/۵۷	-۰/۶	۹	شیب سن
۱۰	خرمدره	-۳/۶۴***	-۱/۰	۲۳	مریوان	-۱/۶۹+	-۳۳	۱۰	من کندال
۱۱	خلخال	-۴/۳۶***	-۱/۵۰	۲۴	مهاباد	-۱/۵۹	-۸۲	۱۱	شیب سن
۱۲	خوی	-۲/۸۵**	-۹۲	۲۵	میانه	-۱/۴۶	-۳۳	۱۲	من کندال
۱۳	زرینه	-۶۸	-۲۵			-۴/۶۹***	-۱/۸۳	۱۳	شیب سن

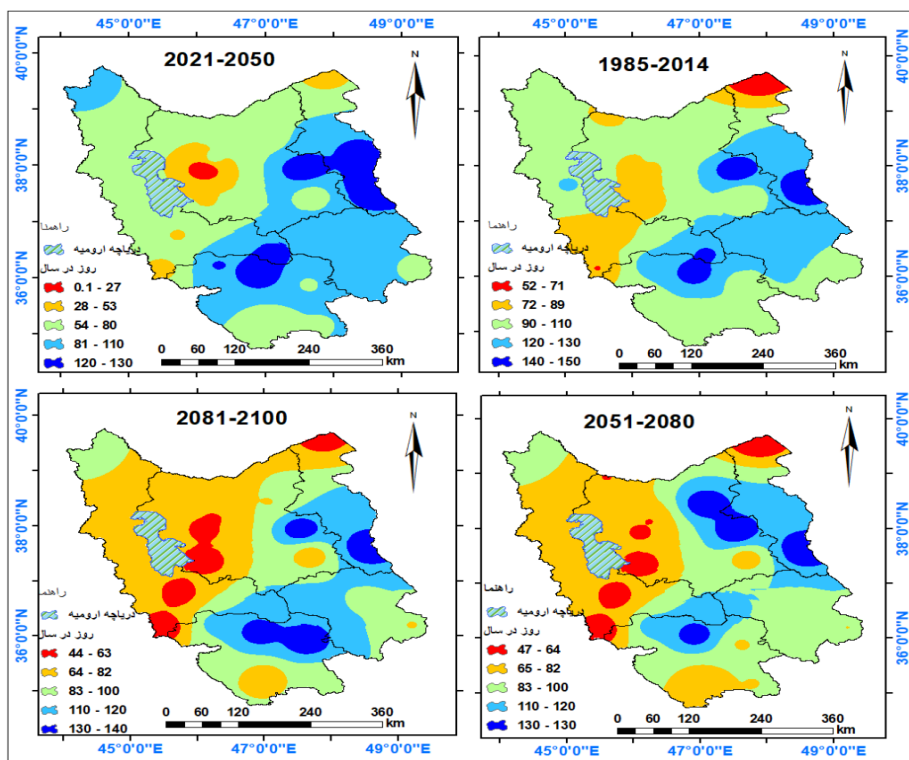
**معنی داری در سطح ۰/۰۱ درصد، *معنی داری در سطح ۰/۰۵ درصد

مشاهده می‌شود، افزایش تعداد روزهای یخبندان در شمالغرب و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه است. در دو دوره دیگر یعنی ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۵۱-۲۱۰۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تعداد روزهای یخبندان کاهش خواهد یافت و هسته حداقلی آن مشابه دوره پایه در دشت مغان، غرب و جنوب غرب دریاچه ارومیه مشاهده می‌شود. براساس این سناریو کاهش تعداد روزهای یخبندان در دوره‌های (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۰۵۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه به ترتیب برابر با ۳۵ و ۳۶ روز است که نسبت به دوره پایه، ۳۶ درصد کاهش را نشان می‌دهد (شکل ۳).

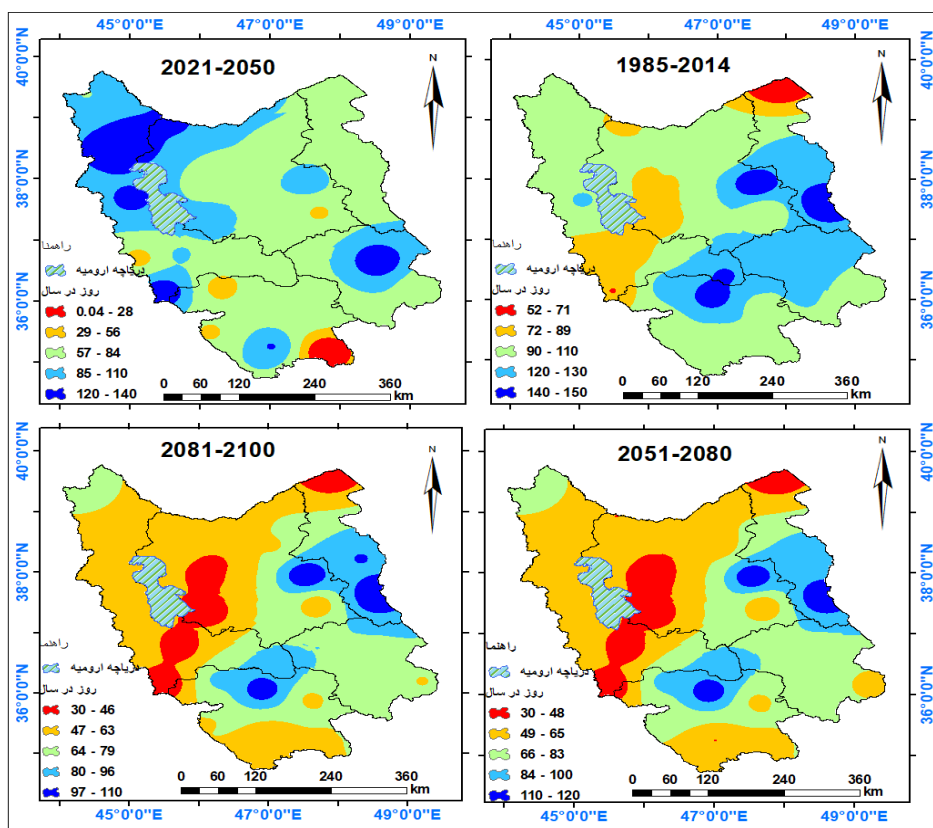
براساس سناریوی SSP5-8.5 تعداد روزهای یخبندان در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه در سطح منطقه مور مطالعه به طور متوسط حدود ۱۷ روز کاهش خواهد یافت. این میزان در دوره‌های ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ به ترتیب برابر با ۳۷ و ۴۲ روز خواهد بود که حاکی از افزایش دمای بیشتر دوره انتهایی قرن بیست و یکم است. توزیع فضایی روزهای یخبندان براساس این سناریو نشان می‌دهد که در دوره‌های آینده، دشت مغان، نواحی جنوبی و شرقی دریاچه ارومیه دارای کمترین تعداد روزهای یخبندان خواهند بود (شکل ۴).

توزیع فضایی تعداد روزهای یخبندان در دوره پایه برابر با ۱۰۱ روز در سال است که بیشترین و کمترین مقدار آن با ۱۴۶ و ۵۲ روز و مربوط به ایستگاه‌های سراب و پارس آباد است. براساس سناریوی SSP1-2.6 در سه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) این شاخص به ترتیب ۱۹، ۱۴ و ۱۸ روز کاهش خواهد یافت که نسبت به دوره پایه ۱۸.۸۲، ۱۴.۲ و ۱۷.۱۷ درصد کاهش را نشان می‌دهد. بیشترین تغییرات کاهشی در بین دوره‌های مورد بررسی نسبت به دوره پایه نیز مربوط به دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ می‌باشد. توزیع فضایی تعداد روزهای یخبندان در دوره آینده نشان می‌دهد که در هر سه دوره مورد بررسی کمترین تعداد روزهای یخبندان مربوط به نواحی اطراف دریاچه ارومیه و بیشترین مقدار آن نیز مربوط به نواحی شرقی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۲).

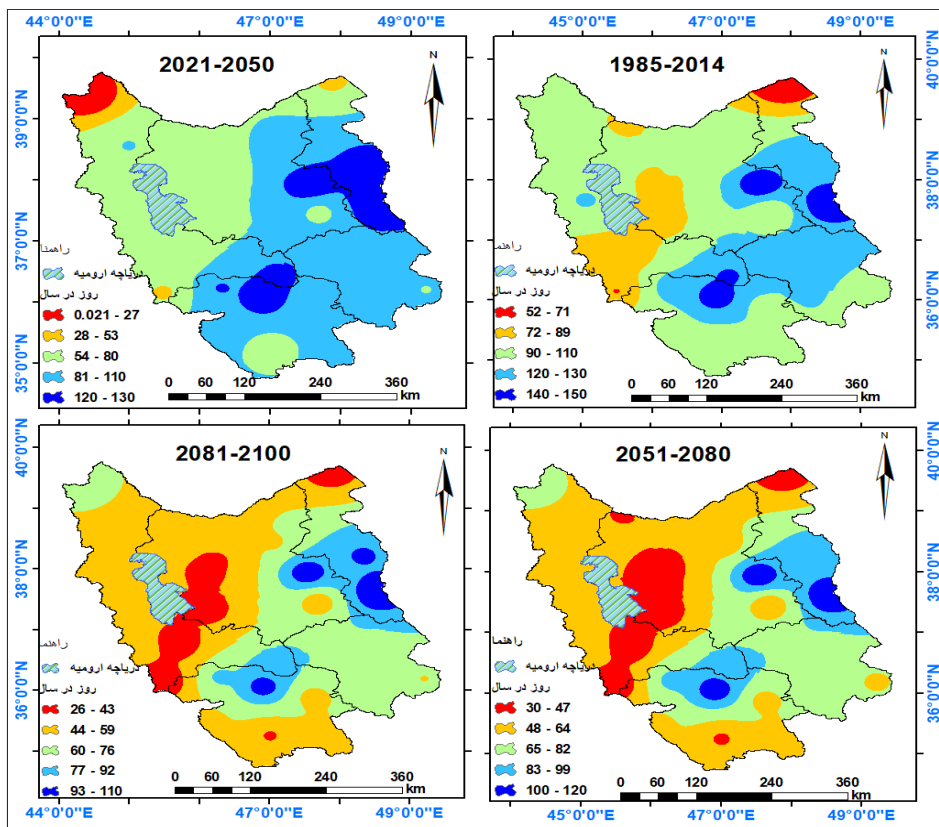
توزیع فضایی روزهای یخبندان با استفاده از سناریوی SSP3-7.0 نیز نشان داد که بیشترین تغییرات نسبت به دوره پایه همچنان مربوط به دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) می‌باشد. هسته حداقل روزهای یخبندان (۰-۲۸) در این سناریو به جنوب منطقه مورد بررسی منتقل شده است و تغییر چشم گیر دیگری که در این دوره نسبت به دوره پایه



شکل ۲- توزیع فضایی شاخص روزهای یخبندان (FD) بر اساس سناریوی SSP1-2.6 در دوره‌های مورد مطالعه



شکل ۳- توزیع فضایی شاخص روزهای یخبندان (FD) بر اساس سناریوی SSP3-7.0 در دوره‌های مورد مطالعه

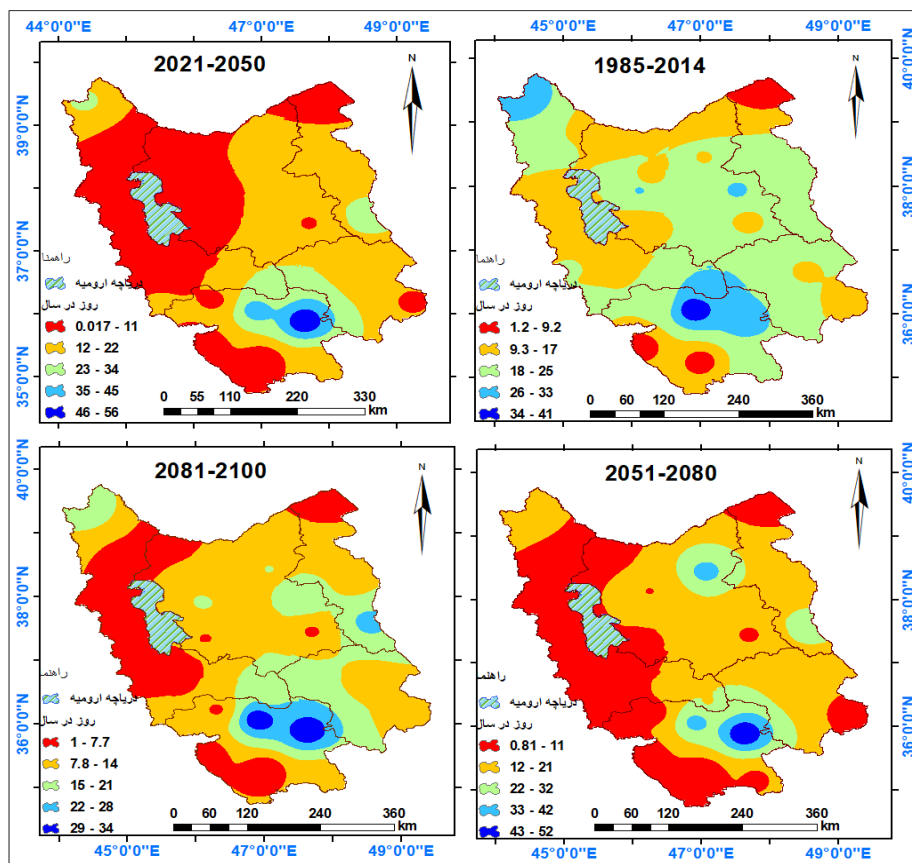


شکل ۴- توزیع فضایی شاخص روزهای یخبندان (FD) بر اساس سناریوی SSP5-8.5 در دوره‌های مورد مطالعه

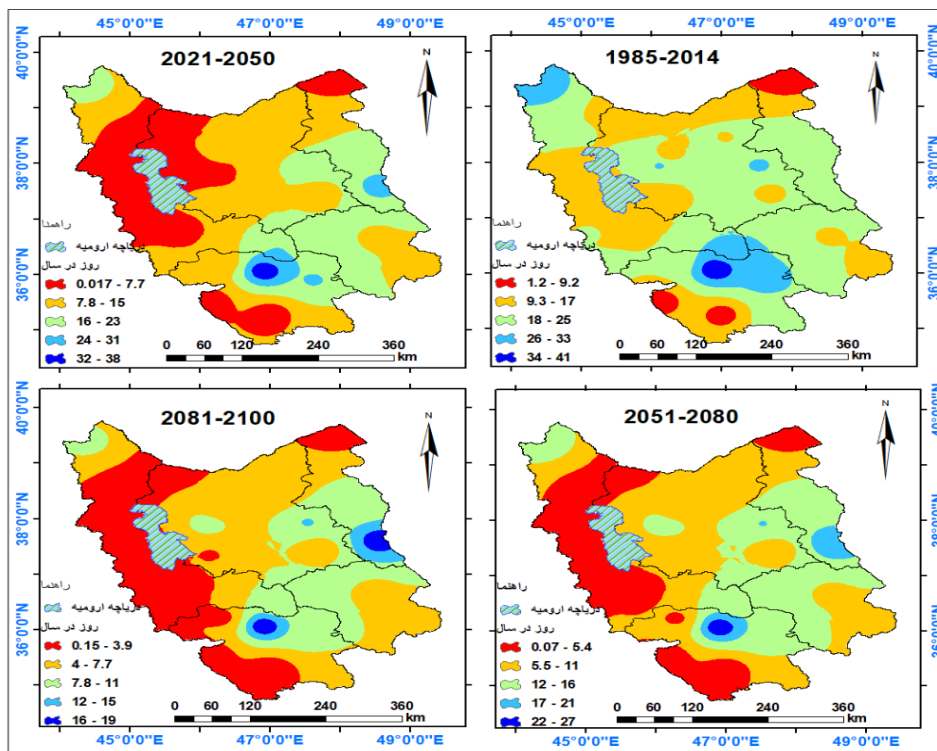
توزیع فضایی تعداد روزهای یخی براساس سناریوی SSP3-7.0 در منطقه مورد مطالعه در سه دوره آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) به ترتیب برابر با ۶، ۱۰ و ۱۳ روز می‌باشد، که نسبت به دوره پایه ۳۱/۵، ۵۳ و ۶۹ درصد کاهش را نشان می‌دهد. در این سناریو نیز بیشترین کاهش مربوط به مناطق غربی، جنوبی و شمال شرق منطقه مورد مطالعه و بطور کلی حوزه دریاچه ارومیه خواهد بود (شکل ۶).

بررسی روزهای یخی براساس سناریوی SSP5-8.5 نشان داد که در سه دوره آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) میانگین روزهای یخی به ترتیب برابر با ۹، ۳/۱۰ و ۱۳ روز خواهد بود که نسبت به دوره پایه ۴۷، ۵۶ و ۷۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد (شکل ۷).

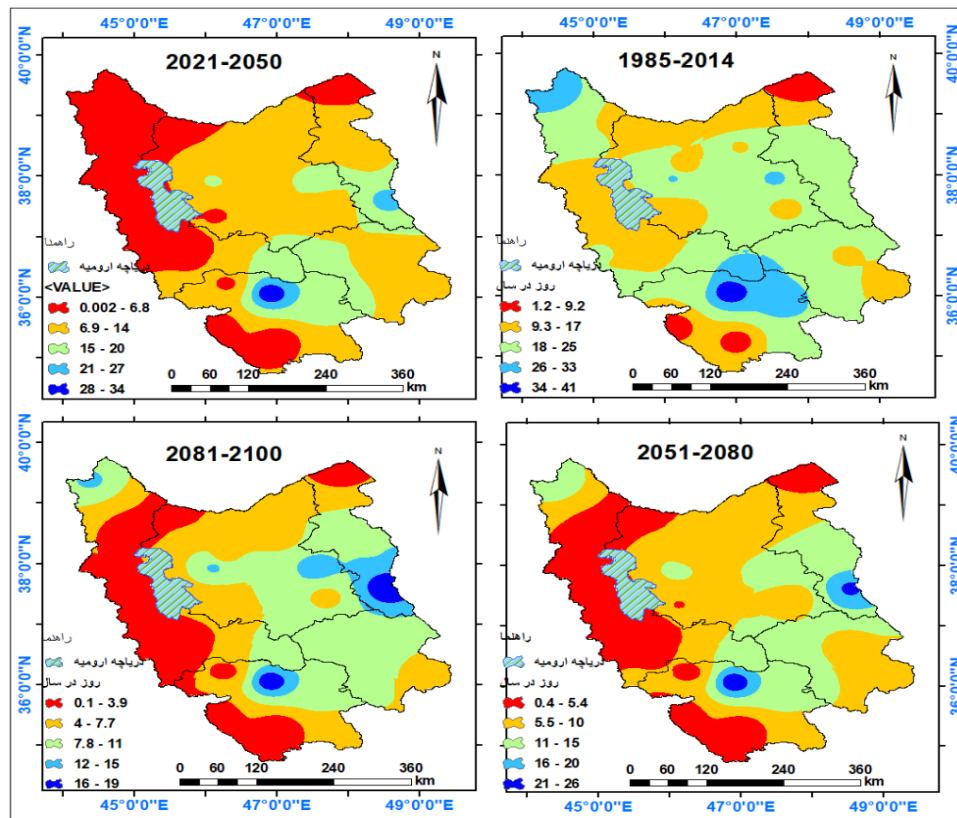
تحلیل توزیع فضایی روزهای یخی براساس سناریوی SSP1-2.6 نشان داد که میانگین روزهای یخی در دوره پایه برابر با ۱۸/۵ روز در سال می‌باشد که بیشترین و کمترین مقدار آن با ۴۱/۳۲ و ۱/۲۳ روز در سال مربوط به ایستگاه‌های زرینه و پارس آباد است. براساس سناریوی SSP1-2.6 میانگین روزهای یخی در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب برابر با ۹، ۵ و ۷ روز در سال می‌باشد. علیرغم اینکه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ شاهد افزایش دما و کاهش شدید روزهای یخی در بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه از جمله غرب، شمال شرقی و شمال غربی خواهیم بود اما در این دوره بیشینه روزهای یخی با ۵۶ روز در جنوب شرق منطقه مورد مطالعه (ایستگاه بیجار) وجود دارد که می‌تواند ناشی از ارتفاع زیاد و توپوگرافی ویژه این منطقه باشد. در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نیز روزهای یخی در غرب، جنوب، جنوب شرقی و شمال شرقی منطقه کاهش خواهد یافت و همچنان بیشینه روزهای یخی با ۵۲ روز مربوط به جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۵).



شکل ۵- توزیع فضایی شاخص روزهای یخی (ID) با استفاده از SSP1-2.6 در منطقه مورد بررسی



شکل ۶- توزیع فضایی شاخص روزهای یخی (ID) با استفاده از SSP3-7.0 در منطقه مورد بررسی



شکل ۷- توزیع فضایی شاخص روزهای یخی (ID) با استفاده از SSP5-8.5 در منطقه مورد بررسی

حاکمی از احتمال زیاد رخداد تغییرات حاصل است (جدول ۸).

بررسی سری‌های زمانی روزهای یخبندان و یخی در دوره ۱۹۸۵ تا ۲۱۰۰ نشان می‌دهد که در دوره بلندمدت تفاوت‌های قابل توجهی نسبت به دوره پایه وجود دارد و تغییرات شدیدتری براساس سناریوی SSP5-8.5 وجود دارد. به طور کلی، بررسی تغییرات شاخص‌های فرین مورد مطالعه در دوره‌های آتی (۲۰۲۰-۲۱۰۰) در شمال غرب ایران نشان داد که می‌توان انتظار کاهش تعداد روزهای یخبندان و روزهای یخی در منطقه را با توجه به افزایش دماهای کمینه و بیشینه داشت (شکل ۸).

روند تغییرات فرین‌های دمایی مورد بررسی براساس سناریوی SSP1-2.6 نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه شاخص‌های روزهای یخبندان و روزهای یخی دارای روند کاهشی است. بیشترین روند کاهشی برای روزهای یخبندان مربوط به ایستگاههای مراغه، پارآباد و اهر است. بیشترین روند کاهشی شاخص روزهای یخی نیز مربوط به ایستگاه پارس‌آباد می‌باشد که معنی‌دار شده است (جدول ۶). براساس سناریوی SSP3-7.0 نیز روند شاخص‌های مذکور کاهشی است که این روند کاهشی فقط در ایستگاه زرینه و برای شاخص روزهای یخی معنی‌دار شده است. در واقع میزان کاهش تعداد روزهای یخی و یخبندان در ایستگاه‌های سردسیر مانند زرینه، زنجان و بیجار بیشتر از سایر ایستگاه‌ها است (جدول ۷). بیشترین تغییرات روند فرین‌های دمایی براساس سناریوی SSP5-8.5 نشان داده شده است، بطوری که روندهای کاهشی روزهای یخبندان در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس این سناریو در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شده است که

جدول ۶- روند تغییرات روزهای یخبندان و روزهای یخی تحت سناریوی SSP1-2.6 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰)

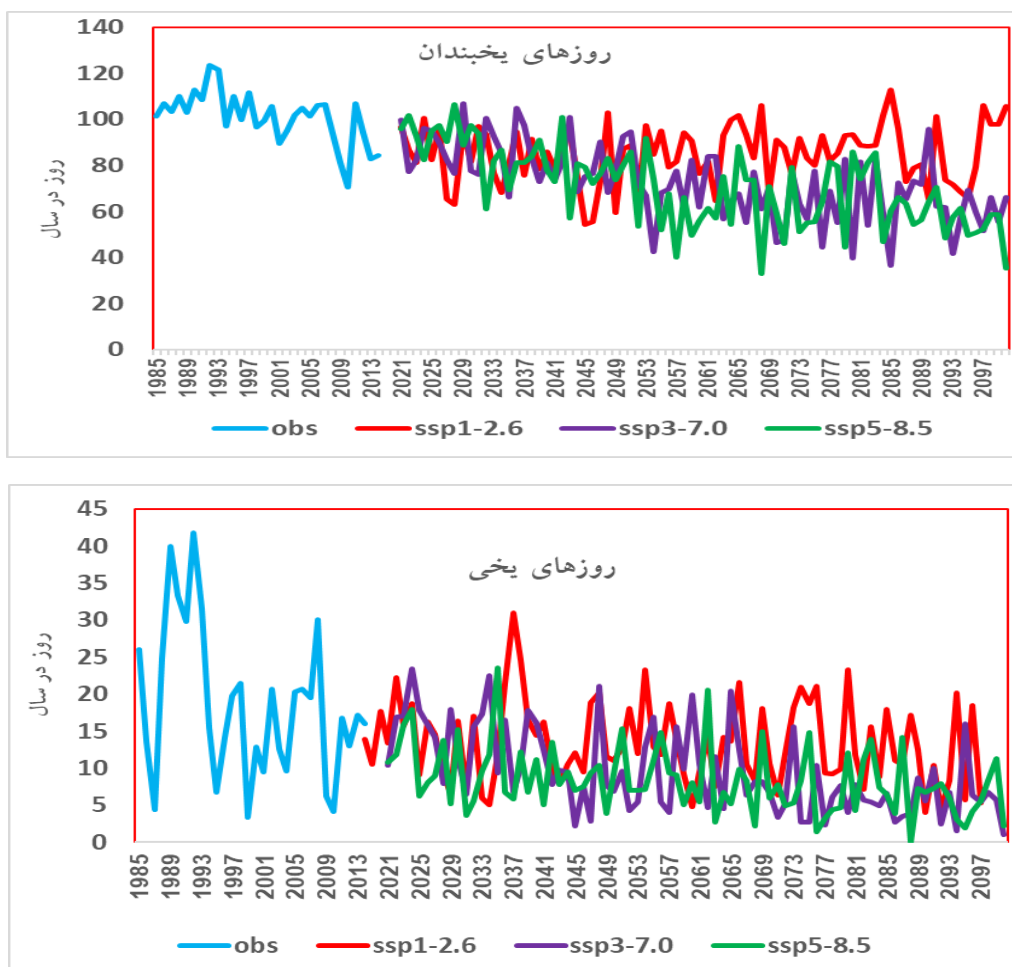
ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		روزهای یخی		ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		روزهای یخی	
		من کندال	شیب سن	من کندال	شیب سن			من کندال	شیب سن	من کندال	شیب سن
	اردبیل	-۹۱	-۲۳	-۷۸	-۲۱	۱۴	زنجان	-۲۴	-۶۵	-۲۴	-۱۵
۱	ارومیه	-۰۳	۰/۰۰	-۳۹	-۰۹	۱۵	سراب	۰/۰۰	۰/۰۰	-۳۴	-۷۸
۲	اهر	-۱/۲۷	-۲۰	-۴۲	-۱۲	۱۶	سردشت	-۲۲	-۴۵	-۳۲	-۷۱
۳	بیجار	-۰/۶	۰/۰۰	-۲۹	۰/۰۰	۱۷	سقز	۰/۰۹	۱/۹	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	پارس آباد	-۱/۴۹	-۰/۷	۲۶	۰/۰۰	۱۸	سنندج	-۲۱	-۱/۹۶*	۰/۰۰	۱/۲۰
۵	پیرانشهر	۱/۳	-۰/۰	-۴۲	-۱/۷	۱۹	سهند	-۱۱	-۶۴	۰/۰۷	-۴۵
۶	تبریز	-۱/۰۴	-۲۰	-۳۶	-۱۱	۲۰	قروه	-۱۵	-۶۵	۲/۲	-۵۲
۷	تکاب	۱/۹	۰/۰۰	-۳۷	-۰/۷	۲۱	ماکو	-۳۳	-۵۵	-۵۱	-۷۵
۸	جلفا	-۲۳	۰/۰۰	-۱/۷۲	-۳۰	۲۲	مراغه	۰/۰۰	۱/۹	-۱/۷	-۴۵
۹	خرمدره	-۱/۲۳	-۲۸	-۹۷	۰/۰۰	۲۳	مریوان	۰/۰۸	۳۲	۰/۰۰	۳/۶
۱۰	خلخال	-۸۸	-۳۳	-۸۸	۰/۰۰	۲۴	مهاباد	-۳۳	-۶۵	۰/۰۰	۲/۶
۱۱	خوی	-۳۶	-۰/۳	-۳۰	-۲۸	۲۵	میانه	۰/۰۰	۰/۰۰	-۱/۳	-۳۹
۱۲	زرنه	-۵۵	-۱۱	-۱/۳۰	-۲۸			-۱۳	-۱۶		

جدول ۷- روند تغییرات روزهای یخبندان و روزهای یخی تحت سناریوی SSP3-7.0 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰)

ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		روزهای یخی		ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		روزهای یخی	
		من کندال	شیب سن	من کندال	شیب سن			من کندال	شیب سن	من کندال	شیب سن
۱	اردبیل	۰/۰۰	-۰/۳	-۱/۰۷	-۸۰	۱۴	زنجان	-۱۹	-۱۹	-۰/۶	-۱۹
۲	ارومیه	-۴۹	-۳۳	-۲۳	-۱۵	۱۵	سراب	-۱۳	-۴۲	-۲۵	-۱/۰۷
۳	اهر	-۵۲	-۳۳	-۲۹	-۰/۷	۱۶	سردشت	-۱۹	-۹۱	۰/۰۰	-۱۳
۴	بیجار	-۱/۴۶	-۶۹	-۸۴	-۵۰	۱۷	سقز	-۵۰	-۱/۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰
۵	پارس آباد	-۸۴	-۶۵	-۶۵	-۳۶	۱۸	سنندج	۰/۰۰	۵۲	۰/۰۰	-۵۵
۶	پیرانشهر	-۸۸	-۳۱	-۶۵	-۳۶	۱۹	سهند	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۱۳
۷	تبریز	-۵۸	-۳۴	-۱/۲۷	-۸۲	۲۰	قروه	-۱۳	-۵۸	۰/۰۰	-۱۰
۸	تکاب	-۷۸	-۵۰	-۱/۰۱	-۴۶	۲۱	ماکو	-۳۷	-۱/۷۵	-۱/۳	-۵۲
۹	جلفا	-۳۶	-۲۵	-۶۲	-۵۷	۲۲	مراغه	-۰/۳	-۴۵	-۱/۷	-۸۱
۱۰	خرمدره	-۶۸	-۴۵	-۱/۲۷	-۶۲	۲۳	مریوان	-۱۴	-۸۱	۰/۰۰	۱/۹
۱۱	خلخال	-۲۶	-۱۹	-۵۲	-۳۵	۲۴	مهاباد	-۱۱	-۷۵	۰/۰۰	۱/۰
۱۲	خوی	-۶۲	-۳۶	-۵۸	-۳۱	۲۵	میانه	-۰/۰	-۲۹	-۰/۳	-۱/۶
۱۳	زرنه	-۱/۶	-۰/۷	-۱/۹۸*	-۶۵			-۶۵	-۱/۹۸*		

جدول ۸- روند تغییرات روزهای یخبندان و روزهای یخی تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰)

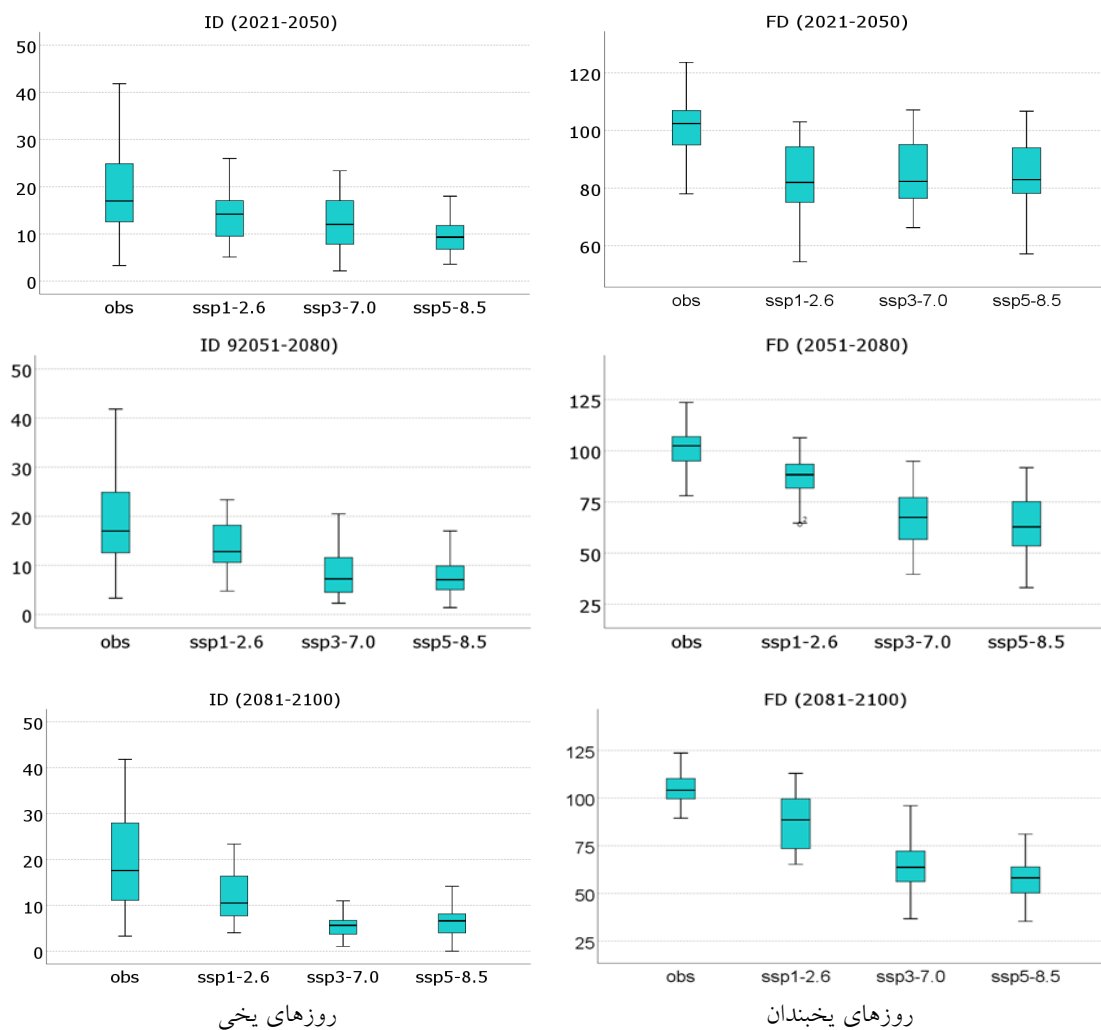
ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		روزهای یخی		ردیف	ایستگاه	روزهای یخبندان		روزهای یخی	
		من کندال	شیب سن	من کندال	شیب سن			من کندال	شیب سن	من کندال	شیب سن
۱	اردبیل	-۲/۷۹**	-۱/۰۰	-۳۷*	-۱/۲۵	۱۴	زنجان	-۳۲	-۹۱	-۲۱	-۷۸
۲	ارومیه	-۱/۷۸	-۶۸	-۳۰*	-۳۸	۱۵	سراب	۰/۰۰	-۰/۳	-۱۰	-۳۹
۳	اهر	-۲/۳۰*	-۱/۰۰	-۱/۱۷	-۷۴	۱۶	سردشت	-۲۰	-۱/۲۷	-۱۲	-۴۲
۴	بیجار	-۱/۹۱	-۹۷	-۱/۹۱	-۷۴	۱۷	سقز	۰/۰۰	-۰/۶	۰/۰۰	-۲۹
۵	پارس آباد	-۲/۰۴*	-۱/۱۴	-۱/۵۶	-۸۸	۱۸	سنندج	-۰/۷	-۱/۴۹	۰/۰۰	۲/۶
۶	پیرانشهر	-۲/۶۳**	-۱/۳۲	-۲/۲۱*	-۱/۱۳	۱۹	سهند	۰/۰۰	۱/۳	-۱/۷	-۴۲
۷	تبریز	-۲/۱۷*	-۱/۱۴	-۱/۸۲	-۸۸	۲۰	قروه	-۲۰	-۱/۰۴	-۱۰	-۳۶
۸	تکاب	-۲/۴۰*	-۶۵	-۱/۷۲*	-۱۲	۲۱	ماکو	۰/۰۰	۱/۹	۰/۰۰	-۳۵
۹	جلفا	-۲/۴۰*	-۱/۱۸	-۱/۶۹	-۹۷	۲۲	مراغه	۰/۰۰	-۲۳	-۱/۳۰	-۱/۷۲
۱۰	خرمدره	-۲/۱۷*	-۱/۰۰	-۲/۰۸*	-۱/۰۰	۲۳	مریوان	-۲۸	-۱/۲۳	۰/۰۰	-۹۷
۱۱	خلخال	-۲/۰۱*	-۵۹	-۱/۷۵	-۸۶	۲۴	مهاباد	-۳۳	-۸۸	۰/۰۰	-۸۸
۱۲	خوی	-۲/۵۳*	-۱/۰۳	-۲/۳۰*	-۲۲	۲۵	میانه	-۰/۳	-۳۶	-۱/۲۸	-۱/۳۰
۱۳	زرنه	-۲/۲۱*	-۴۸	-۲/۳۰*	-۲۲			-۱/۲	-۵۵		



شکل ۸- سری زمانی تغییرات روزهای یخی و یخبندان در دوره مورد بررسی به طور متوسط در منطقه مورد مطالعه

در شکل (۹) نمودار باکس-ویشر برای تغییرات فرین‌های دمایی روزهای یخبندان و روزهای یخی در سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده متوسط (۲۰۵۱-۲۰۸۰) و آینده دور (۲۰۸۱-۲۱۰۰) تحت سه سناریوی مورد بررسی آورده شده است. براساس این نمودار روزهای یخبندان در دوره پایه داده‌ها دارای چولگی منفی هستند. یعنی داده‌ها به صدک ۷۵ نزدیک ترند و دارای توزیع نسبتاً کوچک با دنباله طویل می‌باشد در حالی که در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) داده‌ها در هر سه سناریوی مورد بررسی دارای چولگی مثبت هستند که بیانگر کاهش روزهای یخبندان در منطقه مورد مطالعه است. نمودار جعبه‌ای روزهای یخی نیز نشان دهنده کاهش تعداد روزهای یخی در هر سه سناریوی مورد بررسی است. در سناریوی SSP1-2.6 و دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ توزیع داده‌ها بزرگتر شده است. بر اساس نتایج شکل

توزیع نمودار با کس-ویشر رزوه‌های یخی در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه در تمام سناریوها کوچکتر شده است که حاکی از کاهش تعداد روزهای یخی است. در مجموع نتایج حاصل از پیش‌نگری سناریوهای مختلف در دوره‌های آینده نشان داد که روزهای یخبندان و روزهای یخی در هر سه دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت و از روزهای یخبندان در شمال غرب کشور نسبت به دوره پایه کاسته خواهد شد که خلاصه نتایج آن برای هر سه سناریو و هر سه دوره مورد بررسی در مقایسه با دوره پایه در جدول (۹) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور میانگین بیشترین میزان کاهش روزهای یخی و یخبندان به ترتیب با ۱۳ و ۴۵ روز مربوط به دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ نسبت به دوره پایه و بر اساس سناریوی SSP5-8.5 می‌باشد (جدول ۹).



شکل ۹- نمودار باکس-ویشر تغییرات شاخص‌های روزهای یخبندان و روزهای یخی در دوره‌های آینده

جدول ۹- تغییرات فرین‌های دمایی در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف

۲۰۸۱-۲۱۰۰		۲۰۵۱-۲۰۸۰		۲۰۲۱-۲۰۵۰		سناریو
روزهای یخی	روزهای یخبندان	روزهای یخی	روزهای یخبندان	روزهای یخی	روزهای یخبندان	
-۷/۹۸	-۱۸/۰۴	-۴/۶۴	-۱۴/۳۲	-۳/۸۸	-۱۹/۲	SSP1-2.6
-۱۳/۷۴	-۴۰/۹۶	-۹/۸۹	-۳۵/۰۹	-۵/۸۴	-۱۶/۰۳	SSP 3-7.0
-۱۲/۹۲	-۴۵/۳۲	-۱۰/۳۹	-۳۶/۶۲	-۸/۶۸	-۱۶/۵۲	SSP 5-8.5

سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0، SSP5-8.5، در سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده متوسط (۲۰۸۰-۲۰۸۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) پرداخته شد. نتایج نشان داد که میانگین روزهای یخبندان و روزهای یخی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۰۱ و ۱۸/۵ روز در سال است که حداکثر و حداقل

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بحث تغییر اقلیم در دنیا، مطالعه پارامترها و رخدادهای حدی آب‌وهوایی به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی روند و پیش‌نگری تغییرات شاخص‌های حدی دمایی (FD و ID) با استفاده از بهترین مدل GCM از CMIP6 تحت سه

- Climate Extreme Indexes Khorasan Razavi Using LARS-WG Model, Thesis submitted for The Degree of PHD Meteorology-Climatic Hazards, Yazd University. 221P.
4. Ayugi, B.Y; Dike, V; Ngoma, H; Babausmail, H; Mumo, R; Ongoma, V. 2021. Future Changes in Precipitation Extremes over East Africa Based on CMIP6 Models. *Water*, 13, 2358.
 5. Aziz, G. 2004. *Climate Change*. Ghomes publication. 284P.
 6. Cheng, Q., Zhong, F., Wang, P. 2021. Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China. *Atmospheric Research*, 247 (2021) 105256. PP.1-22.
 7. Esmacili, H., Raoshani, A., Shakiba, A., Parak, F. 2018. The changing trend of extreme climatic based on the combined indicators of climate change in the area of Iran. *Geography and environmental hazards*. N.28, PP.89-109.
 8. Filho, W. L, Musa H., Cavan, G., O'Hare, P., Seixas, J. 2016. *Climate Change Adaptation, Resilience and Hazards*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-39880-8.
 9. Frame, B., Lawrence, J., Ausseil, A. G., Reisinger, A. and Daigneault, A., 2018, adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. *Climate Risk Management*, 21, 39-51.
 10. Hejazizadeh, Z., Hosseini, S A., Karbalaee, A., Poorkarim Barabadi, R., Mousavi, S M. 2022. Spatiotemporal variations in precipitation extremes based on CMIP6 models and Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios over MENA. *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (20): 1-14.
 11. Jahanbakhsh, A. S., Sari Saraf, B., Asakereh, H., Shirmoahamadi, S. 2020. Analyzing the temporal-spatial changes of precipitation upper extreme during the years 1965 to 2016. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*. Year.7, N.1. PP. 89-106.
 12. Lotfi siraei, A. 2019. *Simulation and Projection of Climate Extreme in Tehran and Alborz Province*. Ph.D Thesis in Climatology, Kharazmi University. Department of Geography.
 13. Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A. B., Maeyer, P. D. 2018. Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water* 2018, 10, 1046. Doi: 10.3390/w1008104.
- روزهای یخبندان با ۱۴۶ و ۵۲ روز به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سراب و پارس‌آباد و بیشترین و کمترین روزهای یخی نیز با ۴۱/۳۲ و ۱/۲۳ روز مربوط به ایستگاه‌های زرینه و پارس‌آباد است. براساس نتایج شاخص‌های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه با توجه به افزایش دما دارای روند کاهشی هستند که این روند کاهشی براساس آزمون من کندال در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه معنی دار شده است. توزیع روند تغییرات در دوره آینده نسبت به دوره پایه نیز نشان داد که روزهای یخبندان و روزهای یخی بر اساس هر سه سناریو و در هر سه دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش پیدا خواهد کرد و بیشترین تغییرات آن نیز مربوط به نواحی سردسیر منطقه و حاشیه دریاچه ارومیه است. بیشترین تغییرات نیز بر اساس سناریوی SSP5-8.5 برآورد شده است که توسط نتایج تحقیق حاصل مطالعه یو و همکاران (۲۰۲۱) و ژو و همکاران (۲۰۲۱) تایید می‌شود. همچنین نتایج حاصل مطالعات زرین و داداشی (۱۳۹۹) و زرین و همکاران (۱۳۹۹) مبنی بر بی‌هنجاری مثبت دما در ایران در دوره‌های آتی را نیز مورد تایید قرار می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل می‌توان بیان کرد تغییرات شاخص‌های حدی دمایی با ناهنجاری‌های آب‌وهوایی و همچنین پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی همراه خواهد بود و دارای آسیب‌پذیری بالایی از نظر تغییرپذیری حدی‌های دمایی است. بنابراین لازم است برنامه‌ریزان مربوطه در بخش‌های مختلف، برنامه‌ها و راهکارهای لازم برای مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی حاصل را اتخاذ نمایند.

منابع

1. Adeyeri, O.E., Lawin, A.E., Laux, P., Ishola, K.A., Ige, S.O. 2019, Analysis of climate extreme indices over the Komadugu-Yobe basin, Lake Chad region: Past and future occurrences; *Weather and Climate Extremes* 23, 100194.
2. Alijani, B., Raoshani, A., Parak, F., Haidari, R. 2012. The trend of variability of temperature extreme using climate change indicators in Iran. *Geography and Environmental hazards*, No.2, PP.17-28.
3. Askarizadeh, S. M. 2016. *Spatial and Temporal Detection and Prediction of*

21. Wang, S., Liu, Q., Huang, C. 2021. Vegetation Change and Its Response to Climate Extremes in the Arid Region of Northwest China; *Remote Sens.*, 13, 1230.
22. World Meteorological Organization. 2009. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72*.
23. You, Q., Cai, Z., Wu, F., Jiang, Zh., Pepin, N., Shen, S.S.P. 2021. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*.
24. Zarin, A., Dadashi Roodbari, A. 2021. Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144: 643–660.
25. Zarin, A., Dadashi Roodbari, A. 2020. Projection of the long-term vision of Iran's future Temperature on the output of Coupled Model Intercomparison Project phase 6. *Journal of Earth and Space Physics*. 46, 583-602.
26. Zhu, X., Lee, S.Y; Wen, X., Ji, x., Lin, L., Wei, Zh., Zheng, Z. 2021. Extreme climate changes over three major river basins in China as seen in CMIP5 and CMIP6. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05767-z>.
14. O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., Vuuren, D. P. 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Chang* 122(3):387–400.
15. Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W. 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
16. Shrestha, S., Shrestha, M., Babel, M.S. 2015. Modelling the potential impacts of climate change on hydrology of Indrawati River Basin in Nepal. *Environmental Earth Science*.
17. Tan, M. L., Samat, N., Chan, N.W., Lee, A. J., Li, C. 2019. Analysis of Precipitation and temperature extremes over the Muda River basin, Malaysia, *Water*, 11(2), 283.
18. Teutschbein, C., Seibert, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulation for hydrological climate <https://doi.org/10.3390/W11020283>.
19. Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhsh, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., Abbaspour, K.C. 2019. The future of extreme climate in Iran. 9:1464.
20. Vogel, E., Donat, M., VAlexander, L., Meinshausen, M., KRay, D., Karoly, D., Meinshausen, N., Frieler, K. 2019. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environ. Res. Lett.* 14, 054010.