

بررسی روند و تحلیل فضایی تداوم دوره های گرم و سرد مبتنی بر سناریوهای SSPs در شمال غرب ایران

نبی محمدی^۱؛ دکتری آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
بهروز ساری صراف؛ استاد آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
هاشم رستم زاده؛ استادیار آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

چکیده

امروزه به دلیل گرمایش جهانی، خشکسالی و رخداد دوره های سرد و تنش های گرمایی، بررسی فرین های اقلیمی دارای اهمیت زیادی است. لذا در این پژوهش به پیش‌نگری بلند مدت تغییرات فرین های دمایی در شمال غرب ایران در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده متوسط (۲۰۸۰-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۸۱) پرداخته شد. بدین منظور از ۲ شاخص حدی دمایی شامل تداوم دوره گرم (WSDI) و تداوم دوره سرد (CSDI) و آزمون روند من کندانال (Maan-Kendall) جهت بررسی تغییرات استفاده شد. برای پیش‌نگری تغییرات نمایه ها در دوره آینده نیز پس از ارزیابی ۷ مدل گردش کلی (GCMs) از سری مدل های گزارش ششم (CMIP^۶) از دو مدل پهنه تحت سه سناریوی خط سیر مشترک اجتماعی-اقتصادی شامل SSP۳-۷.۰، SSP۱-۲.۶ و SSP۵-۸.۵ بهره گرفته شد. توزیع فضایی روند تغییرات تداوم دوره گرم در دوره پایه نشان داد که هسته بیشینه آن در جنوب و جنوب غربی منطقه قرار دارد و با حرکت به سمت شمال و شمال شرقی از میزان آن کاسته می شود. تغییرات مکانی نمایه تداوم دوره سرد با هسته های بیشینه آن در نواحی غربی و اطراف دریاچه ارومیه و هسته های کمینه در نواحی مرکزی و شمالی منطقه مشخص می شود. بر اساس نتایج، میانگین تداوم دوره گرم و تداوم دوره سرد در دوره پایه به ترتیب برابر با ۵/۵۳ و ۳/۸۰ روز در سال است که حداکثر و حداقل تداوم دوره گرم با ۸/۱ و ۲/۷ روز به ترتیب مربوط به ایستگاههای پیرانشهر و پارس آباد و حداکثر و حداقل تداوم دوره سرد نیز با ۵/۷ و ۱/۳۲ روز مربوط به ایستگاههای زرینه و مریوان است. بررسی روند تغییرات نیز نشان داد که در بیشتر ایستگاهها نمایه WSDI دارای روند افزایشی است که این روند در برخی ایستگاهها معنی دار شده است ولی نمایه CSDI دارای روند کاهشی و در هیچ کدام از ایستگاهها معنی دار نشده است. ارزیابی مدل های مختلف با شاخص های خطاسنجی مختلف نیز نشان داد که مدل های MRI-ESM^{۲-۰} و MPI-ESM^{۱-۲-L} بهترین عملکرد را در شبیه سازی فرین های دمایی در منطقه مورد مطالعه دارند. توزیع روند تغییرات در دوره آینده نیز نشان داد که نمایه WSDI در بیشتر ایستگاهها و بر اساس هر سه سناریو به ویژه سناریوی SSP۵-۸.۵ دارای روند افزایشی خواهد بود ولی روند CSDI در بیشتر ایستگاهها کاهشی و براساس سناریوهای SSP۳-۷.۰ و SSP۵-۸.۵ معنی دار خواهد بود.

واژه های کلیدی: تحلیل فضایی، تداوم دوره گرم، تداوم دوره سرد، شمال غرب ایران، SSPs

مقدمه

مسئله تغییر اقلیم امروزه به عنوان یکی از شایع ترین مباحث علمی و حتی سیاسی-اجتماعی مطرح است. گرم شدن کره زمین در چند دهه اخیر نه تنها از نظر میانگین آب و هوایی بلکه با توجه به رویدادهای فرین در مناطق مختلف جهان به شدت بر اقلیم تأثیر گذاشته است (shiu et al, ۲۰۱۲). گرم شدن کره زمین و تغییر اقلیم منجر به افزایش احتمال رویدادهای فرین و تغییرات در فراوانی، شدت، وسعت مکانی، مدت و زمان آنها می شود و می تواند منجر به حدی های بی سابقه شود (Nikools et al, ۲۰۱۲). یکی از نمودهای گرمایش جهانی و تغییر اقلیم افزایش فراوانی و شدت دوره های همراه با دماهای بالا و پایین است و برخی مطالعات نشان داده اند که تأثیرات فرین های اقلیمی آشکارتر و مستقیم تر از میانگین های آب و هوایی است (IPCC, ۲۰۱۳). تغییرات اقلیمی به طور فزاینده بر رویدادهای فرین آب و هوایی در سراسر جهان تأثیر می گذارد و این رویدادهای حدی باعث وقوع امواج گرما، سرما، خشکسالی، سیل و طوفان می شود (Wang et al, ۲۰۲۱). در دهه های اخیر، فراوانی و شدت رویدادهای فرین آب و هوایی (به عنوان مثال، بارندگی شدید، خشکسالی، سیل و غیره) ناشی از گرمایش جهانی به طور قابل توجهی افزایش یافته است و اثرات شدیدی بر توسعه جامعه و همچنین اکوسیستم ها داشته است. از این رو، کاوش رویدادهای فرین آب و هوایی و تغییرات آن برای کاهش تغییرات اقلیمی و تصمیم گیری از اهمیت بالایی برخوردار است (Lin and Chen, ۲۰۲۰). امروزه در بیشتر مطالعات اقلیمی بر پیش بینی و تغییرات آب و هوایی در آینده تأکید شده است.

پژوهش های انجام شده در مورد رخداد های فرین دما در خارج از کشور با محوریت قرار دادن جنبه های متنوعی از این رویداد مورد توجه بوده است. در این راستا چن و همکاران (Chen et al, ۲۰۱۹) تغییرات اقلیمی فرین های دمایی را در حوضه رودخانه مینجیانگ^۳ با استفاده از ۲۶ فرین دمایی و با کمک تحلیل روند خطی و آزمون من-کندال در یک دوره ۵۵ ساله مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمایه های فرین گرم، افزایشی و نمایه های فرین سرد کاهشی هستند. آیوگی و همکاران (Ayugi et al, ۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی فرین های اقلیمی در شرق قاره آفریقا را در دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) تغییرات آینده آن تا پایان قرن بیست و یکم (۲۰۸۱-۲۱۰۰) بر اساس مدل های جفت شده پروژه میان مقایسه ای گزارش ششم (CMIP^۶) تحت دو سناریو پرداختند. نتایج نشان داد که نمایه روزهای خشک متوالی (CDD) در دوره آینده افزایش و نمایه روزهای مرطوب متوالی (CWD) کاهش می یابد. اوزترک و همکاران (Ozturk et al, ۲۰۲۱) به پیش بینی نمایه های فرین با استفاده از سناریوهای RCP^۴, RCP^۵ در حوزه منا تا پایان قرن بیست و یکم پرداخت. نتایج حاکی از افزایش شدت فرین های گرم مانند تداوم دوره گرم (WSDI) و شب های گرم (TN^{۹۰}p) و کاهش یا عدم تغییر فرین های سرد مانند تداوم دوره سرد (CSDI) و شب های سرد (TN^{۱۰}p) در دوره های آینده بود. چنگ و همکاران (Cheng et al, ۲۰۲۱) مدل های گزارش پنجم و ششم را در شبیه سازی فرین های آب و هوایی با هم مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان داد، مدل های فردی گزارش ششم (CMIP^۶) توانایی بهتری نسب به مدل های گزارش پنجم (CMIP^۵) برای شبیه سازی فرین های اقلیمی دارند. شیرو و همکاران (Shiru and Chung, ۲۰۲۱) به ارزیابی مدل های

۱- Intergovernmental Panel on Climate Change

۳- Minjiang

۶- Coupled Model Intercomparison Project

CMIP^۶ برای انتخاب مدل بهینه جهت پیش‌نگری فرین آب و هوا از ۱۳ مدل پرکاربرد گزارش ششم استفاده نمودند. نتایج حاکی از برتری مدل‌های CMCC-CM^۲-SR^۵ و NESM^۳، IPSL-CM^۶A-LR و MRI-ESM^۲-۰، BCC-CSM^۲-MR و INM.CM^۴-۸ برای دمای بیشینه بود. یوو و همکاران (Wu et al, ۲۰۲۱) در پژوهشی با بکارگیری ۲۰ مدل از مدل‌های گزارش ششم (CMIP^۶) به بررسی روند و عدم قطعیت مجموعه داده‌های دما در چین پرداختند. برای این تحقیق تغییرات میانگین دمای سطحی را طی دوره (۲۰۱۴-۲۱۰۰) و با کمک سناریوهای خط سیر مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs)^۵ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده روند افزایش دما در هر سه سناریو بود و بیشترین روند افزایش نیز مربوطه به سناریوی SSP^۵-۸،۵ در دوره آینده دور بود. نیشانت و همکاران (Nishant et al, ۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی بارش و دماهای فرین در استرالیا با استفاده از ۳۷ مدل گزارش ششم (CMIP^۶) پرداختند. نتایج نشان داد مدل‌ها برای شبیه‌سازی داده‌های فرین دما عملکرد بهتری نسبت به فرین‌های بارشی دارد. داس و همکاران (Das et al, ۲۰۲۲) به ارزیابی فرین‌های اقلیمی با کمک مدل‌های گزارش ششم تحت دو سناریوی SSP^۲-۵،۴ و SSP^۵-۸،۵ در دوره‌های زمانی آینده در خلیج بنگال پرداختند. نتایج نشان داد که نرخ افزایش فرین‌های گرم در مناطق ساحلی و داخلی کشور مشابه است ولی افزایش فرین‌های دمایی سرد در نواحی داخلی کمی بیشتر است، همچنین روند افزایش فرین‌های اقلیمی در دوره‌های آینده دور بیشتر از آینده نزدیک است. باباوسمایل و همکاران (Babaousmail et al, ۲۰۲۲) به پیش‌نگری فرین‌های دمایی در حوزه مدیترانه و صحرای آفریقا به کمک مدل‌های CMIP^۶ پرداختند. نتایج نشان دهنده کاهش روزهای سرد (TX^{۱۰}p) و شب‌های سرد (TN^{۱۰}p) و افزایش قابل توجه شاخص‌های تداوم دوره گرم (WSDI) و روزهای تابستان (SU) بود. وو و همکاران (Wu et al, ۲۰۲۲) در پژوهشی با هدف تجزیه و تحلیل ویژگی‌های زمانی و مکانی فرین‌های آب و هوایی با استفاده از سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) در جهان پرداختند. نتایج تحقیق نشان دهنده افزایش قابل‌توجه در فراوانی فرین‌های گرم و کاهش در فرین‌های سرد بر اساس سناریوی SSP^۵-۸،۵ بود. علیجانی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی ۱۸ شاخص فرین دمایی و تغییرپذیری آن‌ها را در ایران در دوره ۱۹۶۱-۲۰۰۶ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که شاخص‌های میانگین حداقل دما و حداکثر دما، شب‌های گرم، شب‌های گرمسیری و تداوم دوره‌های گرم در ایران دارای روند افزایشی می‌باشد و شاخص دمای روزانه و تداوم دوره سرد دارای روند کاهشی است. عسکری زاده (۱۳۹۵) تغییرات زمانی و مکانی نمایه‌های حدی دما و بارش را در استان خراسان رضوی بر اساس داده‌های گزارش چهارم (CMIP^۴) در دوره آماری ۱۹۶۰-۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار داد. نتایج تحقیق نشان داد که نمایه‌های بارش پنج روزه، بارش‌های صدک ۹۵ و ۹۹، دمای حداقل و حداکثر روزانه در دوره مورد مطالعه در منطقه افزایش می‌یابد. لطفی سیرائی (۱۳۹۸) رویدادهای فرین اقلیمی در استان‌های تهران و البرز در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۵) مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق حاکی از افزایش دما و تغییرات معنی‌داری در تمام نمایه‌های فرین دمایی در منطقه مورد مطالعه بود. تاجیک و سبزواری (۱۳۹۹) به بررسی رخدادهای فرین‌های دمایی و شناسایی تغییرات مکانی و زمانی آنها در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که موقعیت جغرافیایی و شرایط محیطی و توپوگرافی در توزیع آنها موثر است و در فرین‌های گرم تداوم زمانی بیشتری دارند. زرین و

۵- Shared Socioeconomic Pathways

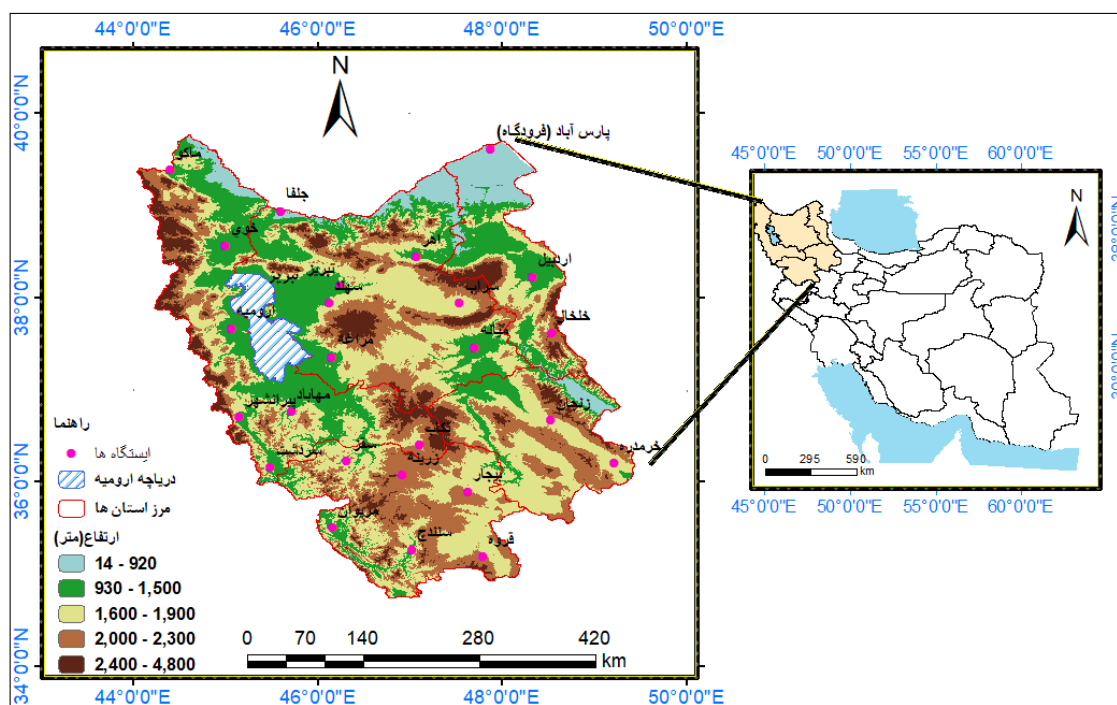
داداشی رودباری (۱۳۹۹) به پیش نگری دمای ایران را در بلند مدت با استفاده از مدل های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP^۶) تحت دو سناریوی SSP۲-۴,۵ و SSP۵-۸,۵ پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل MRI-ESM۲-۰ دارای بهترین عملکرد برای پیش نگری دما است. همچنین متوسط دما در تمامی ماهها و سناریوها افزایشی و در سطح ۱٪ معنی دار است. ذرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) به پیش نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس سناریوی SSP۳-۷,۰ و SSP۵-۸,۵ میانگین دمای سالانه کشور در دوره آینده به ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۲۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت.

همانطور که در بررسی پیشینه تحقیق مشخص شد، مطالعات صورت گرفته در زمینه فرین های اقلیمی در ایران و در منطقه شمال غرب ایران اندک و موارد انجام شده نیز بیشتر با کمک داده های مشاهداتی و حداکثر در بازه زمانی ۳۰ ساله صورت گرفته و در برخی تحقیقات اندک از برون داد مدل های گزارش سوم (CMIP^۳) و گزارش پنجم (CMIP^۵) استفاده گردیده است. تنها مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از داده های مدل های گزارش ششم (CMIP^۶) به تحقیقات ذرین و همکاران (۱۳۹۹ و ۱۴۰۰) می توان اشاره نمود که این پژوهش ها نیز کمتر بررسی جامعی از پیش نگری فرین های دمایی را ارائه نموده اند، بنابراین با توجه ویژگی های اقلیمی و جغرافیایی منطقه شمال غرب ایران و مستعد بودن آن جهت رخداد فرین های دمایی به ویژه تداوم دوره های گرم و سرد در این پژوهش سعی شده است که بررسی نسبتا کاملی از این فرین های دمایی در دوره پایه و دوره های آینده بعمل آید و با توجه به ناهنجاری ها و تهدیدهای حاصل از شدت رخداد فرین های اقلیمی و به ویژه تداوم دوره های گرم و سرد در منطقه شمال غرب، هدف از این پژوهش، ارزیابی روند و پیش نگری تغییرات نمایه های فرین تداوم دوره گرم (WSDI) و تداوم دوره سرد (CSDI) با استفاده از خروجی مدل های CMIP^۶ تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک در شمال غرب ایران در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) است. نتایج این پژوهش می تواند در اجرای راه کارهای علمی موثر جهت مقابله با حوادث ناشی از فرین های دمایی در بخش هایی مانند وزارت نیرو، کشاورزی، هواشناسی، مدیریت بحران و ... مورد استفاده قرار گیرد.

داده ها و روش کار

الف) قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

مساحت این منطقه حدود ۱۵۳۷۱۰ کیلومتر مربع می باشد که 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 ۴۴ درجه و ۵ دقیقه الی ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی از نظر تقسیمات اداری شامل استان های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان می باشد. جهت بررسی از داده های بارش، دمای بیشنه و دمای کمینه ۲۵ ایستگاه همدیدی بصورت روزانه، با توزیع مناسب و دارای دوره آماری بلندمدت (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، حداقل سی ساله در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده گردید که موقعیت جغرافیایی آن ها در شکل (۳-۱) آورده شده است.



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

• پروژه مقایسه مدل‌های گزارش ششم (CMIP^۶) و سناریوها (SSPs)

پروژه مدل‌های جفت شده میان مقایسه ای (CMIP) توسط کارگروه مدل‌های جفت شده (WGCM)^۶ از برنامه جهانی تحقیقات آب و هوا (WCRP)^۷ اداره می‌شود. این پروژه در سال ۱۹۹۵ شروع شد و اکنون وارد فاز ششم خود شده است. هدف مهم CMIP این است که خروجی چند مدل را در قالبی استاندارد در دسترس عموم قرار دهد (Eyring et al, ۲۰۱۸). مدل‌های CMIP^۶ نسبت به نسخه قبلی آن CMIP^۵ بهبود زیادی یافته است. در این پژوهش جهت بررسی تغییرات فرین‌های دمایی در دوره‌های آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۱۰۰)، ابتدا ۷ مدل گردش کلی (GCM) از مدل‌های گزارش ششم (CMIP^۶) که دارای داده‌های با وضوح بالا بودند انتخاب شدند. دلیل انتخاب مدل‌های مذکور از مجموعه مدل‌های CMIP^۶ اعتبار، دقت و در دسترس بودن سناریوهای مورد نیاز جهت مطالعه است. مشخصات مدل‌های مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. همچنین در این پژوهش از سه سناریوی اجتماعی-اقتصادی یعنی SSP۱،۲، ۳،۷-۰ و SSP۵،۸-۵ استفاده شد که مشخصات آنها در جدول ۲ آورده شده است (زهرائی و حسینی، ۱۳۹۹، Riahi et al, ۲۰۱۷).

^۶- Working Group on Coupled Modelling

^۷- World Climate Research Programme

جدول ۱- مشخصات مدل های CMIP^۱ مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	مدل	موسسه / کشور	قدرت تفکیک
۱	MRI-ESM ^{۲-۰}	موسسه تحقیقات جوی، ژاپن	۱/۱×۱
۲	MPI-ESM ^{۱-۲} -LR	موسسه ماکس پلانک، آلمان	۰/۹×۰/۹
۳	GFDL-ESM ^۴	آزمایشگاه ژئوفیزیک و دینامیک سیالات، ایالات متحده	۱/۲۵×۱
۴	MIROC ^۶	موسسه تحقیقات جو و اقیانوس شناسی و موسسه ملی مطالعات محیطی، ژاپن	۱/۴×۱/۴
۵	MIROC-ES ^۲ L		۲/۸×۲/۸
۶	FGOALS-g ^۳	موسسه فیزیک جو، چین	۱×۱
۷	CanESM ^۵	مرکز تحلیل و مدل سازی اقلیمی، کانادا	۱/۱×۱/۱

منبع: ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)

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

سناریو	روایت	چالش ها
SSP ^{۱-۲} ,۶	پایداری - در پیش گرفتن خط سیر سبز (چالش های کم برای کاهش و سازگاری)	کم برای کاهش انطباق
SSP ^{۳-۷} ,۰	رقابت منطقه‌ای - جاده‌ای صخره‌ای (چالش‌های بالا برای کاهش و انطباق)	بالا برای کاهش و انطباق
SSP ^{۵-۸} ,۵	توسعه با سوخت فسیلی - در پیش گرفتن بزرگراه (چالش های بالا برای کاهش، چالش های کم برای سازگاری)	بالا برای کاهش، کم برای سازگاری

منبع: اونیل و همکاران (۲۰۱۴)

• مقیاس کاهی و صحت‌سنجی

در مدل‌های گردش کلی جو بدلیل (GCMs) بدلیل بزرگ مقیاس بودن و داشتن اریبی نسبت به داده های مشاهداتی ضروری است که ابتدا بر روی این داده ها مقیاس کاهی صورت بگیرد. در این پژوهش از روش مقیاس کاهی خطی استفاده گردید. مقیاس کاهی بر اساس میانگین تفاوت بین سری های زمانی مشاهده شده ماهانه و سری های زمانی دوره تاریخی GCM/RCM در همان دوره از سری زمانی مشاهده شده است. سپس این تفاوت ها برای داده های آب و هوایی شبیه سازی شده برای دریافت متغیر های آب و هوایی با اریبی اصلاح شده اعمال می شوند (Shrestha et al, ۲۰۱۵). رویکرد مقیاس بندی خطی^۸ (LSBC) با مقادیر اصلاح شده ماهانه بر اساس تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده عمل می کند. داده های دما با ضریبی بر اساس نسبت میانگین بلند مدت ماهانه داده های مشاهداتی و داده های کنترل اصلاح می شود. در این حالت شرط بر این است که ضرایب تصحیح اعمال شده و افزوده ها حتی برای شرایط آتی نیز بدون تغییر باقی می ماند (Teutschbein and Seibert, ۲۰۱۲).

^۸ - Linear Scaling Bias Correction

$$P_{hst,m,d}^{cor} = P_{hst,m,d} \times \left[\frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{hst,m})} \right] \quad (۱)$$

$$T_{hst,m,d}^{cor} = T_{hst,m,d} + [\mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{hst,m})] \quad (۲)$$

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 نشان دهنده دما یا بارش دوره تاریخی (مدل) و دوره مشاهداتی می باشد و μ میانگین بلند مدت است (luo et. al, ۲۰۱۸). با اعمال روش مقیاس کاهی بر روی داده های شبیه سازی شده عملکرد مدل در شبیه سازی بلند مدت متغیرهای دما و بارش به مقدار زیادی افزایش می یابد.

پس از استخراج خروجی مدل ها برای صحت سنجی آن ها از سنجه های متداول آماری استفاده شد، این سنجه ها عبارتند از: ضریب تعیین (Rsqr) که معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار آن برابر یک می باشد (صدقت کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۷) و از طریق رابطه (۳) محاسبه می شود. مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) که بر اساس رابطه (۴) محاسبه می شود به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده از مقادیر اندازه گیری به کار می رود و به عنوان مرسوم ترین شاخص خطا به کار می رود (Lin et al, ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا (MAE) برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه سازی شده با توجه به مقادیر اندازه گیری شده به کار می رود (Hu et al, ۲۰۰۱). رابطه (۵) نحوه محاسبه آن را نشان می دهد.

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

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

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

در روابط فوق X_o داده های مشاهداتی، X_s داده های شبیه سازی شده، $\bar{X}_o$ میانگین داده های مشاهداتی، N تعداد داده ها می باشد.

• نمایه های مورد بررسی

در این مرحله اول فرایند بررسی کنترل کیفی داده ها صورت گرفت و بعد از آنکه سری زمانی بارش، دمای کمینه و بیشینه، برای دوره ی مشاهداتی و دوره آینده استخراج گردید و در مرحله بعد اقدام به شاخص سازی فرین های دمایی در دوره مشاهداتی و آینده گردید. این شاخص ها از داده های روزانه دما و بارش به دست می آیند که محاسبه و تجزیه و تحلیل آن ها از

طریق متمرکز شدن بر مقادیر آستانه‌ای است؛ قرار دادن فرمول مناسب برای هریک از شاخص‌ها و تحلیل آن‌ها در کشورها و مناطق مختلف متناسب با شرایط آن‌ها متفاوت است و هر محقق با توجه به شرایط آب‌وهوایی منطقه و هدف مورد مطالعه، یک دسته از این شاخص‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهد (عیسی پور، ۱۳۹۲) چرا که آستانه دماهای بحرانی از جایی به جای دیگر فرق می‌کند (علیجانی، 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^۱) معرفی شده‌اند استفاده گردید (جدول ۳).

جدول ۳- شاخص های فرین دمایی مورد بررسی در این پژوهش

شاخص	نام تشریحی	تعریف	واحد
WSDI	(TX>TX ^{۹۰} p, Warm Spell Duration Index) تداوم دوره گرم	تعداد روزها در سال وقتی که حداقل شش روز متوالی دمای بیشینه بیشتر از صدک ۹۰ ام باشد	روز
CSDI	(TN>TN ^{۱۰} p, Cold Spell Duration Index) تداوم دوره سرد	تعداد روزها در سال وقتی که حداقل شش روز متوالی دمای کمینه کمتر از صدک ۱۰ ام باشد	روز

شرح و تفسیر نتایج

• مدل بهینه

برای درستی سنجی مدل های منتخب CMIP^۶ در این پژوهش از سنجه های آماری مختلفی بهره گرفته شد و اقدام به انتخاب مدل های بهینه جهت پیش نگری تغییرات فرین های دمایی در دوره های آینده گردید. برای برآورد فرین های آب و هوایی نیاز به برآورد بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه داریم در نتیجه پس از برآورد این متغیرهای اقلیمی نتایج سنجه های خطاسنجی بر روی آنها برای انتخاب مدل های بهینه مورد بررسی قرار گرفت. مدل MPI-ESM^{۱-۲}-LR در بیشتر پهنه مورد مطالعه از دقت بالاتری جهت شبیه سازی بارش و دمای بیشینه برخوردار است. میزان متوسط R^۲ و RMSE این مدل با داده های دمای بیشینه مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۹۸ و ۳/۱۶ است. متوسط MAE نیز برابر با ۲/۷۹ می باشد. پس از مدل MPI-ESM^{۱-۲}-LR دو مدل MIROC-ES^۲L و MIROC^۶ هر دو از بهترین مدل های CMIP^۶ برای پیش نگری دمای بیشینه در منطقه مورد مطالعه هستند. همچنین مدل های MIROC-ES^۲L و FGOALS-g^۳ در حد متوسط هستند. بر اساس مقادیر RMSE و MAE، مدل MRI-ESM^{۲-۰} در بیشتر پهنه مورد مطالعه از دقت بالاتری جهت شبیه سازی دمای کمینه برخوردار است. بطوریکه میزان متوسط RMSE و MAE این مدل با داده های دمای مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۲/۷۶ و ۲/۵۲ می باشد. مقدار R^۲ نیز ۰/۹۹ است. پس از مدل MRI-ESM^{۲-۰}، مدل MPI-ESM^{۱-۲}-LR در رتبه دوم برای شبیه سازی دمای کمینه در منطقه مورد مطالعه قرار می گیرد. در مجموع مدل های MRI-ESM^{۲-۰} و MPI-ESM^{۱-۲}-L در این پژوهش برای شاخص سازی فرین های

^۱ - Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices

دمایی انتخاب شدند. برای مقایسه بهتر نتایج رتبه‌بندی عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه شمال غرب ایران در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

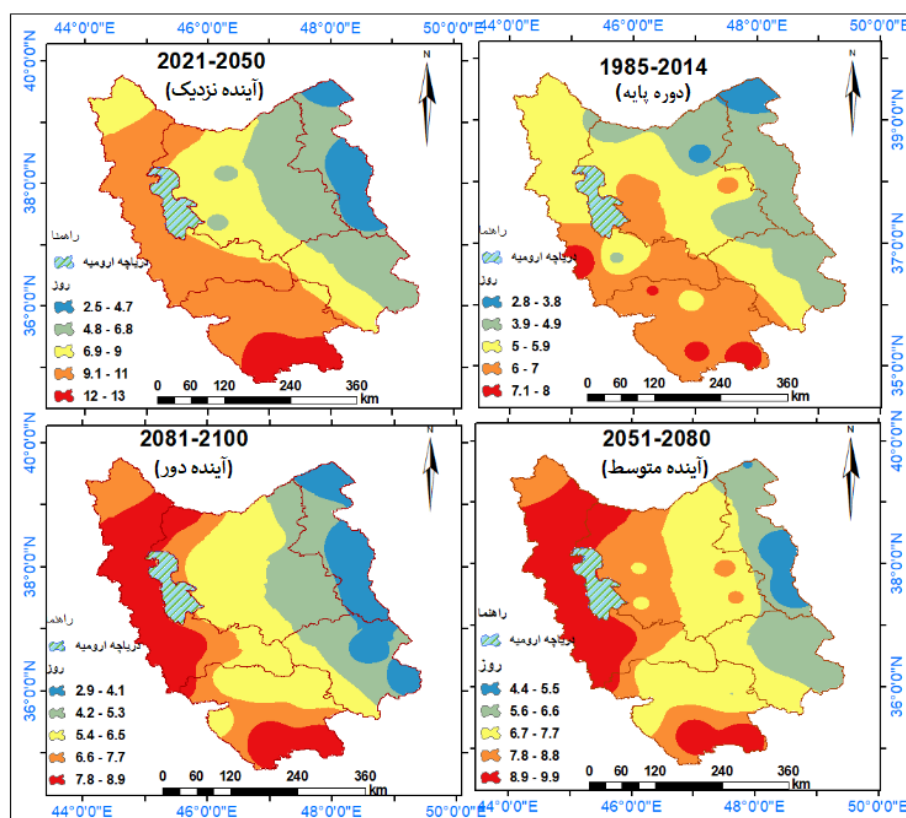
جدول ۴- رتبه‌بندی مدل‌های CMIP^۶ جهت شبیه‌سازی دمای بیشینه بر اساس متوسط سنج‌های خط‌سنجی

ردیف	مدل	ضریب تعیین	مجذور میانگین مربعات خطا	میانگین مطلق خطا
۱	MPI-ESM ^۱ -۲-LR	۰/۹۸	۳/۱۶	۲/۷۹
۲	MIROC-ES ^۲ L	۰/۹۸	۶/۲۳	۵/۸۹
۳	MIROC ^۶	۰/۹۸	۹/۶۴	۸/۰۶
۴	MRI-ESM ^۲ -۰	۰/۹۸	۴/۸۹	۴/۵۰
۵	FGOALS-g ^۳	۰/۷۷	۸/۰۸	۶/۷۰
۶	GFDL-ESM ^۴	۰/۸۲	۷/۴۴	۵/۸۵
۷	CanESM ^۵	۰/۸۱	۷/۸۲	۶/۶۷

جدول ۵- رتبه‌بندی مدل‌های CMIP^۶ جهت شبیه‌سازی دمای کمینه بر اساس متوسط سنج‌های خط‌سنجی

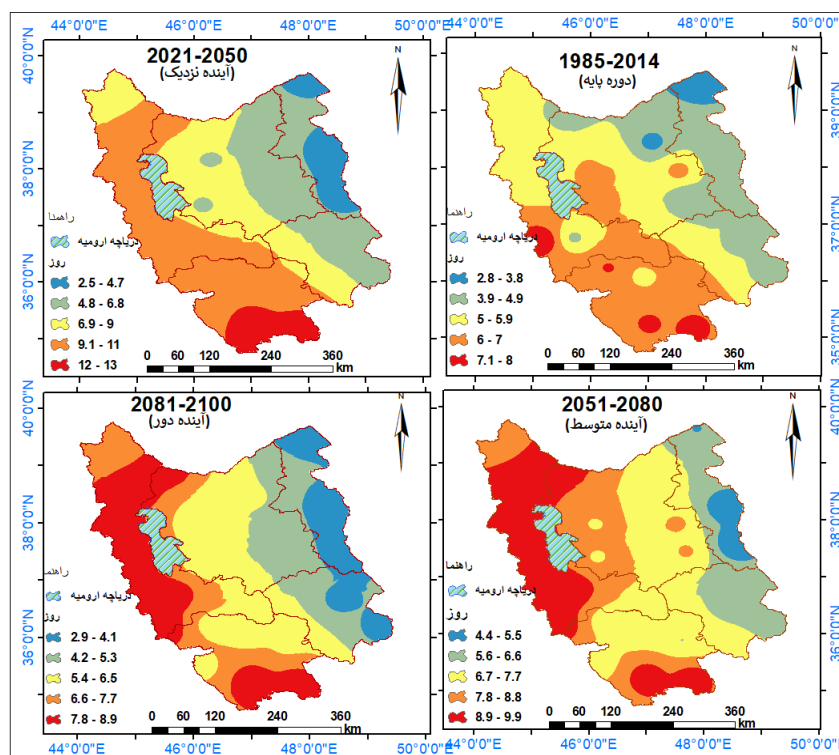
ردیف	مدل	ضریب تعیین	مجذور میانگین مربعات خطا	میانگین مطلق خطا
۱	MRI-ESM ^۲ -۰	۰/۹۹	۲/۷۶	۲/۵۲
۲	MPI-ESM ^۱ -۲-LR	۰/۹۹	۳/۲۳	۲/۹۶
۳	GFDL-ESM ^۴	۰/۸۳	۵/۶۲	۴/۷۱
۴	FGOALS-g ^۳	۰/۷۷	۵/۹۳	۵/۱۷
۵	CanESM ^۵	۰/۸۵	۶/۲۴	۵/۲۱
۶	MIROC ^۶	۰/۹۹	۶/۴۱	۶/۰۴
۷	MIROC-ES ^۲ L	۰/۹۹	۶/۶۴	۶/۴۶

بررسی توزیع فضایی نمایه WSDI در دوره پایه نشان داد که میانگین آن در منطقه مورد مطالعه ۵/۵ روز می‌باشد. با توجه به سناریوی SSP^۱-۲,۶ بیشترین تغییرات در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) اتفاق افتاده است. هسته بیشینه ۱۲ تا ۱۳ روز در این دوره در جنوب منطقه متمرکز شده است. در واقع نقش عرض جغرافیایی را در توزیع مکانی این نمایه نشان می‌دهد. ایستگاههای سنندج و سردشت به ترتیب با ۱۳/۳ و ۱۱ روز دارای بیشترین رزوه‌های همراه با WSDI هستند. کمینه نمایه نیز در عرضهای بالاتر و مناطق شمالی منطقه یعنی در ایستگاههای اردبیل و خلخال با ۲/۵ روز قرار دارد. افزایش آن در این دوره نسبت به دوره پایه ۲/۶ روز می‌باشد و در دوره‌های بعدی نیز به ترتیب ۲/۲ و ۰/۶ روز افزایش خواهد یافت. در دو دوره آینده متوسط و دور، با حرکت از شرق به غرب منطقه بر تعداد روزهای همراه با WSDI افزوده خواهد شد (شکل ۲).

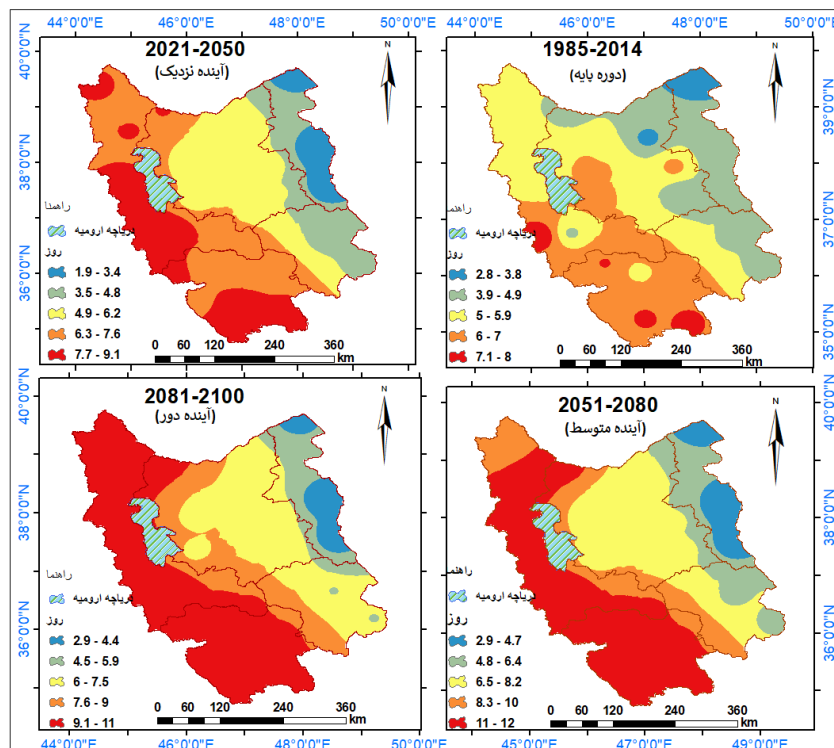


شکل ۲- توزیع فضایی شاخص WSDI با استفاده از سناریوی SSP۱-۲.۶ در منطقه مورد بررسی

توزیع فضایی WSDI بر مبنای سناریوی SSP۳-۷.۰ نشان داد که در دوره های (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) به ترتیب ۱/۰۶، ۱/۰۱ و ۰/۵۴ روز نسبت به دوره پایه افزوده خواهد شد. هسته حداقلی WSDI مربوط به دوره انتهای قرن بیست و یکم یعنی ۲۰۸۱-۲۱۰۰ می باشد که در شرق منطقه مورد مطالعه واقع شده است. هسته بیشینه نیز در دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و با میانگین ۹ روز در غرب و جنوب غرب منطقه واقع شده است (شکل ۳). توزیع فضایی نمایه WSDI بر اساس سناریوی SSP۵-۸.۵ نیز نشان داد که بر مبنای این سناریو تغییرات بیشتری در منطقه رخ خواهد داد. میانگین این نمایه در دوره های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) به ترتیب ۷۵٪، ۳/۰۱ و ۲/۵۸ روز نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. بیشینه ۱۱-۱۲ روز در دوره (۲۰۵۰-۲۰۸۱) گستره نواحی غربی و بخشی از شمال منطقه را پوشش می دهد. کمترین تعداد روزهای WSDI مربوط به دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) می باشد که در غرب و گوشه شمال غربی منطقه یعنی دشت مغان واقع شده است (شکل ۴).

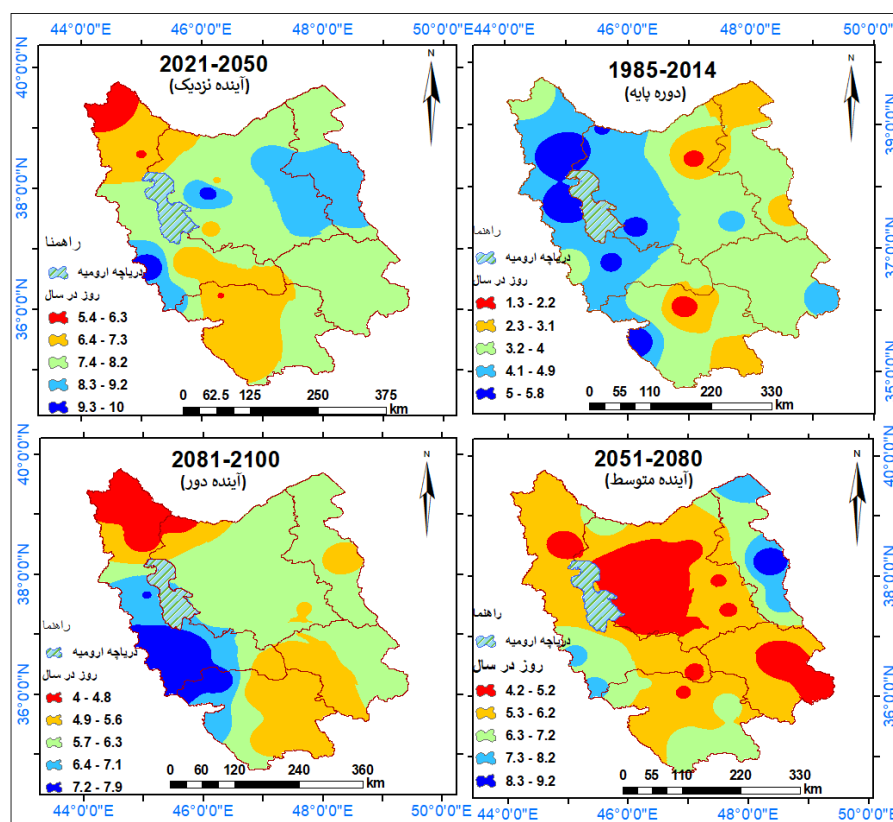


شکل ۳- توزیع فضایی WSDI با استفاده از سناریوی SSP3-7.0 در منطقه مورد بررسی



شکل ۴- توزیع فضایی شاخص WSDI با استفاده از سناریوی SSP5-8.5 در منطقه مورد بررسی

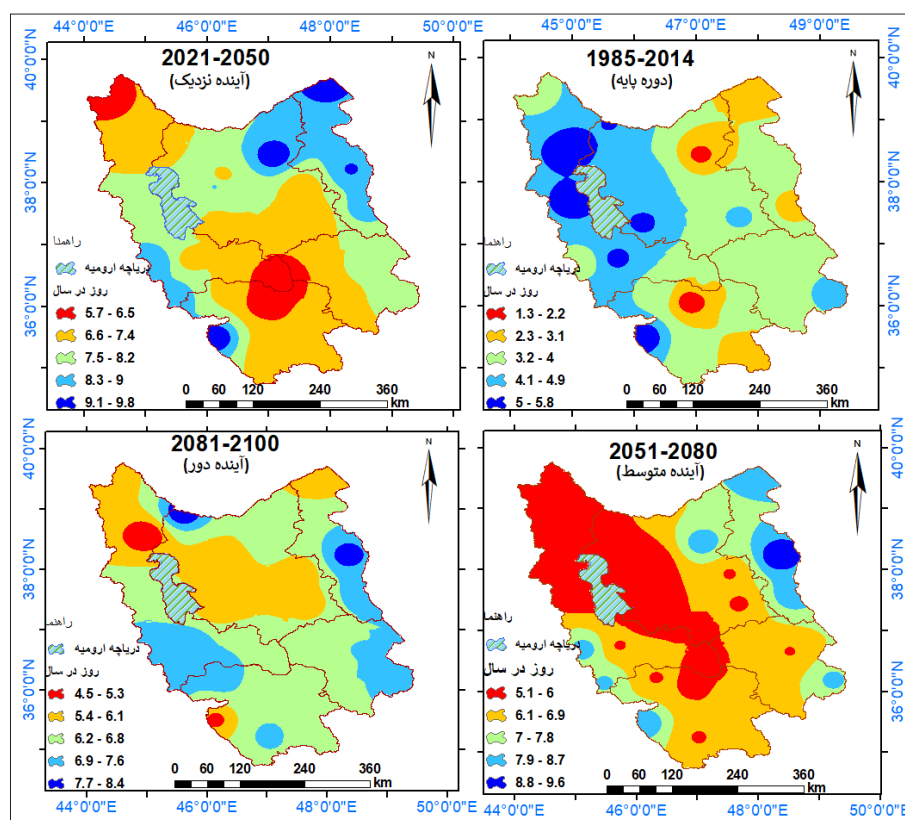
توزیع فضایی نمایه CSDI در دوره پایه و سناریو ۲،۶-SSP۱ در منطقه مورد مطالعه نشان داد که میانگین آن در دوره پایه برابر با ۳/۸۰ روز است که در دوره های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) به ترتیب ۳/۷۲، ۲/۱۹ و ۲/۱۱ روز افزایش خواهد یافت. بیشینه آن در دوره پایه در شمال و غرب دریاچه ارومیه و جنوب غرب منطقه متمرکز شده است که در دوره آینده نزدیک بیشینه ۹ تا ۱۰ روز به شرق دریاچه ارومیه و غرب منطقه مورد مطالعه منتقل شده است. در دوره آینده متوسط (۲۰۵۰-۲۰۸۱) هسته بیشینه نمایه در شرق منطقه مورد مطالعه قرار دارد. در دوره آینده دور (۲۰۸۱-۲۱۰۰) بیشترین تعداد روزهای همراه با تداوم دوره سرد در غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده است. در مجموع توزیع فضایی این نمایه بر اساس این سناریو در دوره های مختلف آن تغییرات چشمگیری را نشان می دهد (شکل ۵).



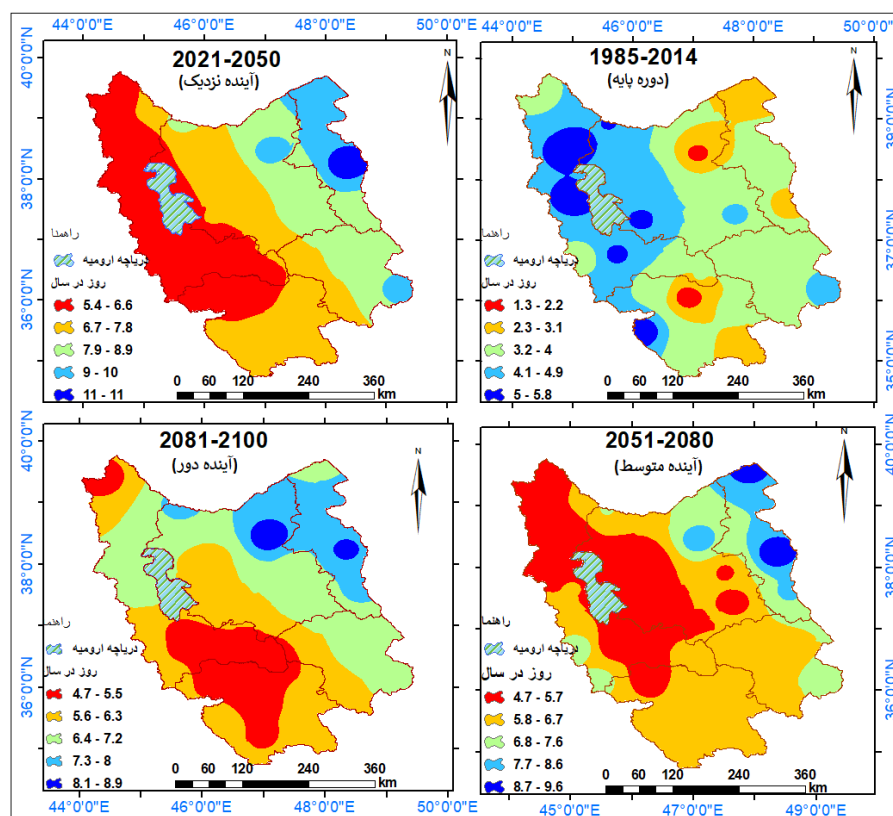
شکل ۵- توزیع فضایی نمایه CSDI با استفاده از سناریوی ۲،۶-SSP۱ در منطقه مورد بررسی

بررسی نمایه CSDI بر اساس سناریو ۷،۰-SSP۳ نشان داد که تعداد روزهای همراه با تداوم دوره سرد در هر سه دوره زمانی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. این افزایش در هر سه دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) به ترتیب برابر با ۳/۷۴، ۲/۸۰ و ۲/۶۸ می باشد. در این سناریو بیشترین تغییرات در دوره آینده نزدیک مشاهده می شود. هسته های بیشینه ۹ تا ۹/۸ روز در نواحی شمالشرقی و جنوب غربی منطقه قرار گرفته اند. مرکز و شمال شرق منطقه نیز دارای کمترین دوره همراه با CSDI هستند. در دوره (۲۰۸۰-۲۰۵۱) هسته بیشینه به شرق منطقه منتقل شده است و نواحی شمالغرب تا مرکز منطقه دارای کمترین روزهای همراه با CSDI هستند. در دوره آینده دور (۲۰۸۱-۲۱۰۰) دو

هسته بیشینه در شمال و شرق منطقه و دو هسته کمینه در شمالغرب دریاچه ارومیه و غرب منطقه واقع شده است (شکل ۶). توزیع فضایی نمایه CSDI تحت سناریو SSP۵-۸.۵ نیز نشان داد که میانگین نمایه در دوره های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه به ترتیب ۳/۵۵، ۲/۴۵ و ۲/۴۶ روز افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش مربوط به دوره آینده نزدیک است. در این دوره یک هسته بیشینه ۱۱ روزه در شرق منطقه متمرکز شده که با حرکت به طرف غرب از تعداد روزهای همراه با تداوم دوره سرد کاسته می شود. الگوی توزیع فضایی در دوره (۲۰۸۰-۲۰۵۱) مشابه دوره قبل است با دو هسته بیشینه در شرق و شمال شرق منطقه. در دوره (۲۰۸۱-۲۱۰۰) هسته های بیشینه همچنان در شرق و شمالشرق متمایل به مرکز منطقه واقع شده است (شکل ۷).



شکل ۶- توزیع فضایی شاخص CSDI با استفاده از سناریوی SSP۳-۷.۰ در منطقه مورد بررسی



شکل ۷- توزیع فضایی شاخص CSDI با استفاده از سناریوی SSP۸.۵ در منطقه مورد بررسی

نتایج حاصل از آزمون آماری من-کندال و شیب سن بر روی سری زمانی داده های نمایه تداوم دوره گرم و سرد در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) نشان داد که در بیشتر ایستگاهها نمایه های WSDI افزایشی و نمایه CSDI کاهشی می باشد. نمایه تداوم دوره گرم در برخی ایستگاهها معنی دار شده است. بیشترین و کمترین روند افزایشی به ترتیب با ۲/۸۲ و ۰/۷۸ مربوط به ایستگاههای مهاباد و تبریز است (جدول ۶). بررسی نمایه CSDI نیز نشان داد که این نمایه در برخی ایستگاهها دارای روند کاهشی و در برخی ایستگاهها نیز روند افزایشی دارد. این روند در هیچ کدام از ایستگاههای منطقه مورد مطالعه معنی دار نشده است. بیشترین روند کاهشی و افزایشی به ترتیب با ۱/۹۲- و ۱/۶۸ مربوط به ایستگاههای سردشت و سقز می باشد. بررسی تخمینگر شیب سن نشان داد که به جز ایستگاه های ماکو، سنندج و مهاباد در سایر ایستگاه ها، تغییرات شیب چندان محسوس نبوده است (جدول ۶).

جدول ۶- نتایج حاصل از آزمون آماری من-کندال و شیب سن در دوره پایه بر روی سریهای زمانی نمایه های WSDI و CSDI

ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI		ردیف	ایستگاه
		من-کندال	شیب سن	من-کندال	شیب سن		
۱	اردبیل	۲/۳۱*	۰/۰۰	-۵۱	۰/۰۰	۱۴	زنجان
۲	ارومیه	۱/۲۳	۰/۰۰	۳۴	۰/۰۰	۱۵	سراب
۳	اهر	۱/۳۶	۰/۰۰	۵۹	۰/۰۰	۱۶	سردشت

۰/۰۰	۱/۶۸	۰/۰۰	۱/۱۱	سقز	۱۷	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۰۰	۱/۷۳	بیجار	۴
۰/۰۰	-۰/۲۴	۰/۱۷	۲/۳۶*	سنندج	۱۸	۰/۰۰	-۰/۴۵	۰/۰۰	۱/۶۱	پارس آباد	۵
۰/۰۰	-۰/۸۰	۰/۰۰	-۱/۳۶	سهند	۱۹	۰/۰۰	-۰/۷۵	۰/۰۰	۱/۵۰	پیرانشهر	۶
۰/۰۰	۰/۴۰	۰/۰۰	۱/۱۱	قروه	۲۰	۰/۰۰	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۷۸	تبریز	۷
۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۱۵	۲/۲۶*	ماکو	۲۱	۰/۰۰	۱/۴۳	۰/۰۰	۱/۶۶	تکاب	۸
۰/۰۰	-۰/۸۰	۰/۰۰	۲/۲۴*	مراغه	۲۲	۰/۰۰	۰/۳۱	۰/۰۰	۱/۲۲	جلفا	۹
۰/۰۰	-۰/۵۳	۰/۰۰	۱/۴۸	مریوان	۲۳	۰/۰۰	-۰/۹۸	۰/۰۰	۲/۴۵*	خرمدره	۱۰
۰/۰۰	-۰/۱۹	۰/۰۹	۲/۸۲**	مهاباد	۲۴	۰/۰۰	-۰/۶۳	۰/۰۰	۱/۷۰	خلخال	۱۱
۰/۰۰	-۱/۰۷	۰/۰۰	۱/۲۴	میانه	۲۵	۰/۰۰	-۰/۴۹	۰/۰۰	۱/۶۲	خوی	۱۲
						۰/۰۰	۰/۲۶	۰/۰۰	۰/۹۲	زربنه	۱۳

**معنی داری در سطح ۱٪ درصد *معنی داری در سطح ۵٪ درصد

روند تغییرات نمایه WSDI در منطقه بر اساس سناریوی SSP۱-۲,۶ نشان داد که این شاخص در برخی ایستگاهها دارای روند کاهشی و در برخی ایستگاهها نیز روند افزایشی دارد. این روند در هیچ کدام از ایستگاههای مورد مطالعه معنی دار نشده است. بیشترین روند کاهشی و افزایشی با آماره من-کندال ۱/۱۶- و ۱/۱۱+ به ترتیب مربوط به ایستگاه سنندج و قروه است (جدول ۷). بررسی روند نمایه CSDI نیز بر اساس سناریوی SSP۱-۲,۶ نشان داد که روند آن در بیشتر ایستگاهها کاهشی است و در چند ایستگاه نیز مانند پارس آباد، مریوان، مهاباد و سقز دارای روند افزایشی است. این روند در هیچ کدام از ایستگاهها معنی دار نشده است. تغییرات شیب سن برای هر دو نمایه بسیار کم است (جدول ۷).

جدول ۷- روند تغییرات WSDI و CSDI تحت سناریوی SSP۱-۲,۶ در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI		ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI	
		من-کندال	شیب سن	من-کندال	شیب سن			من-کندال	شیب سن	من-کندال	شیب سن
۱	اردبیل	۰/۴۸	۰/۰۰	-۰/۸۰	۰/۰۰	۱۴	زنجان	-۰/۳۰	۰/۰۰	-۰/۶۰	۰/۰۰
۲	ارومیه	۰/۲۲	۰/۰۰	-۰/۵۳	۰/۰۰	۱۵	سراب	۰/۲۴	۰/۰۰	-۰/۳۸	۰/۰۰
۳	اهر	۰/۲۵	۰/۰۰	-۰/۵۷	۰/۰۰	۱۶	سردشت	-۰/۴۲	۰/۰۰	-۰/۱۶	۰/۰۰
۴	بیجار	-۰/۶۱	۰/۰۰	-۱/۱۴	۰/۰۰	۱۷	سقز	-۰/۹۵	۰/۰۰	۰/۵۰	۰/۰۰
۵	پارس آباد	-۰/۷۱	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۱۸	سنندج	-۱/۱۶	۰/۰۰	-۰/۸۱	۰/۰۰
۶	پیرانشهر	-۰/۱۲	۰/۰۰	-۰/۴۷	۰/۰۰	۱۹	سهند	۰/۸۳	۰/۰۰	۰/۶۹	۰/۰۰
۷	تبریز	۰/۶۱	۰/۰۰	-۰/۷۹	۰/۰۰	۲۰	قروه	۱/۱۱	۰/۰۰	-۰/۷۰	۰/۰۰
۸	تکاب	-۰/۷۹	۰/۰۰	-۰/۵۳	۰/۰۰	۲۱	ماکو	-۰/۳۰	۰/۰۰	-۰/۴۲	۰/۰۰
۹	جلفا	۰/۲۳	۰/۰۰	-۰/۷۰	۰/۰۰	۲۲	مراغه	۰/۶۵	۰/۰۰	-۰/۷۹	۰/۰۰
۱۰	خرمدره	۰/۰۷	۰/۰۰	-۰/۹۳	۰/۰۰	۲۳	مریوان	-۰/۷۹	۰/۰۰	۰/۳۱	۰/۰۰
۱۱	خلخال	۰/۴۷	۰/۰۰	-۰/۳۴	۰/۰۰	۲۴	مهاباد	-۰/۵۷	۰/۰۰	۰/۷۱	۰/۰۰
۱۲	خوی	۰/۲۴	۰/۰۰	-۰/۹۳	۰/۰۰	۲۵	میانه	۰/۵۰	۰/۰۰	-۰/۴۷	۰/۰۰
۱۳	زربنه	-۰/۷۹	۰/۰۰	-۰/۵۴	۰/۰۰						

**معنی داری در سطح ۱٪ درصد *معنی داری در سطح ۵٪ درصد

بررسی نمایه WSDI بر مبنای سناریوی SSP۳-۷,۰ نشان داد که این نمایه در بیشتر ایستگاهها دارای روند افزایشی بوده ولی این روند معنی دار نشده است. در ایستگاههای اردبیل، سهند و خلخال روند آن کاهشی شده است. بیشترین روند

افزایشی با آماره من-کندال ۱/۱۸ مربوط به ایستگاه ارومیه می باشد. تغییرات شیب سن بسیار کم است (جدول ۸). بررسی نمایه CSDI بر اساس سناریوی SSP۳-۷,۰ نشان داد که روند آن تمام ایستگاهها منفی و کاهشی می باشد و این روند کاهشی در ایستگاههای ارومیه، تبریز، خوی و مراغه در سطح اطمینان ۵٪ معنی دار شده است. شیب سن نیز در تمام ایستگاهها بسیار جزئی است (جدول ۸).

جدول ۸- روند تغییرات WSDI و CSDI تحت سناریوی SSP۳-۷,۰ در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI	ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI
		من-کندال	شیب سن	من-کندال			من-کندال	شیب سن	
۱	اردبیل	-۵۲	۰/۰۰	-۸۴	۱۴	زنجان	۰/۶۷	۰/۰۰	-۱/۳۷
۲	ارومیه	۱/۱۸	۰/۰۰	-۲/۰۱*	۱۵	سراب	۰/۵۴	۰/۰۰	-۱/۷۰
۳	اهر	۰/۵۴	۰/۰۰	-۲/۱۰*	۱۶	سردشت	۰/۵۷	۰/۰۰	-۱/۵۵
۴	بیجار	۱/۰۲	۰/۰۰	-۱/۴۵	۱۷	سقز	۱/۰۱	۰/۰۰	-۱/۳۹
۵	پارس آباد	۰/۰۳	۰/۰۰	-۲/۳۱*	۱۸	سنندج	۰/۵۰	۰/۰۰	-۱/۳۱
۶	پیرانشهر	۰/۴۴	۰/۰۰	-۱/۴۴	۱۹	سهند	-۰/۰۸	۰/۰۰	-۸۱
۷	تبریز	۰/۵۴	۰/۰۰	-۲/۲۳*	۲۰	قروه	۰/۵۴	۰/۰۰	-۱/۴۵
۸	تکاب	۱/۰۱	۰/۰۰	-۰/۴۲	۲۱	ماکو	۰/۱۰	۰/۰۰	-۷۵
۹	جلفا	۱/۰۸	۰/۰۰	-۰/۶۱	۲۲	مراغه	۰/۵۵	۰/۰۰	-۲/۳۳*
۱۰	خرمدره	۰/۶۷	۰/۰۰	-۱/۲۷	۲۳	مریوان	۱/۰۳	۰/۰۰	-۱/۷۴
۱۱	خلخال	-۰/۵۶	۰/۰۰	-۱/۳۷	۲۴	مهاباد	۰/۴۰	۰/۰۰	-۱/۳۷
۱۲	خوی	۱/۰۷	۰/۰۰	-۲/۱۳*	۲۵	میانه	۰/۵۴	۰/۰۰	-۱/۶۹
۱۳	زرنه	۱/۰۴	۰/۰۰	-۰/۶۰					

***معنی داری در سطح ۱٪ درصد **معنی داری در سطح ۵٪ درصد

نتایج بررسی روند سری های زمانی WSDI بر مبنای سناریوی SSP۵-۸,۵ نشان داد که روند آن در همه ایستگاهها افزایشی و در برخی ایستگاهها معنی دار شده است. بیشترین روند افزایشی به ترتیب با آماره من-کندال ۲/۷۲ و ۲/۶۶ در ایستگاههای ارومیه و خوی مشاهده گردید. تغییرات شیب سن نیز بسیار کم و بیشترین شیب افزایشی با ۰/۰۹ مربوط به ایستگاه ارومیه است (جدول ۹). روند تغییرات نمایه CSDI نیز بر اساس سناریوی SSP۵-۸,۵ نشان داد که این نمایه دارای روند کاهشی بوده که بیشتر در سطح ۵٪ و در برخی ایستگاهها نیز در سطح ۱٪ معنی دار شده است. این روند در چند ایستگاه نیز فاقد معنی داری است. بیشترین تغییرات کاهشی شیب سن نیز با -۰/۰۸ درجه در ایستگاه اردبیل مشاهده شد (جدول ۹).

جدول ۹- روند تغییرات WSDI و CSDI تحت سناریوی SSP۵-۸,۵ در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI	ردیف	ایستگاه	WSDI		CSDI
		من-کندال	شیب سن	من-کندال			من-کندال	شیب سن	
۱	اردبیل	۱/۳۵	۰/۰۰	-۲/۱۷*	۱۴	زنجان	۱/۸۲	۰/۰۰	-۲/۸۳**
۲	ارومیه	۲/۷۲**	۰/۰۹	-۱/۶۰	۱۵	سراب	۱/۸۷	۰/۰۰	-۲/۴۳**
۳	اهر	۲/۱۶*	۰/۰۰	-۱/۷۹	۱۶	سردشت	۲/۱۳*	۰/۰۳	-۱/۴۳
۴	بیجار	۲/۵۵*	۰/۰۴	-۲/۵۰*	۱۷	سقز	۲/۴۷*	۰/۰۳	-۱/۹۰

۰/۰۰	-۲/۷۳**	۰/۰۰	۱/۶۸	سندج	۱۸	-۰/۰۳	-۲/۱۴*	۰/۰۰	۱/۱۱	پارس آباد	۵
۰/۰۰	-۲/۰۲*	۰/۰۰	۱/۸۷	سهند	۱۹	۰/۰۰	-۱/۵۵	۰/۰۴	۲/۱۸*	پیرانشهر	۶
۰/۰۰	-۲/۵۹**	۰/۰۰	۱/۶۸	قروه	۲۰	۰/۰۰	-۲/۰۰*	۰/۰۰	۱/۸۷	تبریز	۷
۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۱۰	۲/۱۲*	ماکو	۲۱	۰/۰۰	-۱/۸۷	۰/۰۳	۲/۴۶*	تکاب	۸
۰/۰۰	-۲/۰۳*	۰/۰۰	۱/۹۸*	مراغه	۲۲	-۰/۰۲	-۲/۲۰*	۰/۰۸	۲/۶۵**	جلفا	۹
۰/۰۰	-۱/۷۳	۰/۰۳	۲/۴۶*	مریوان	۲۳	-۰/۰۴	-۲/۶۰**	۰/۰۰	۱/۸۲	خرمدره	۱۰
۰/۰۰	-۱/۹۰	۰/۰۴	۲/۲۶*	مهاباد	۲۴	-۰/۰۲	-۲/۱۷*	۰/۰۰	۱/۳۵	خلخال	۱۱
-۰/۰۲	-۲/۸۳**	۰/۰۰	۲/۳۳*	میانه	۲۵	۰/۰۰	-۱/۶۳	۰/۰۸	۲/۶۶**	خوی	۱۲
						۰/۰۰	۱/۷۶	۰/۰۳	۲/۴۶*	زرینه	۱۳

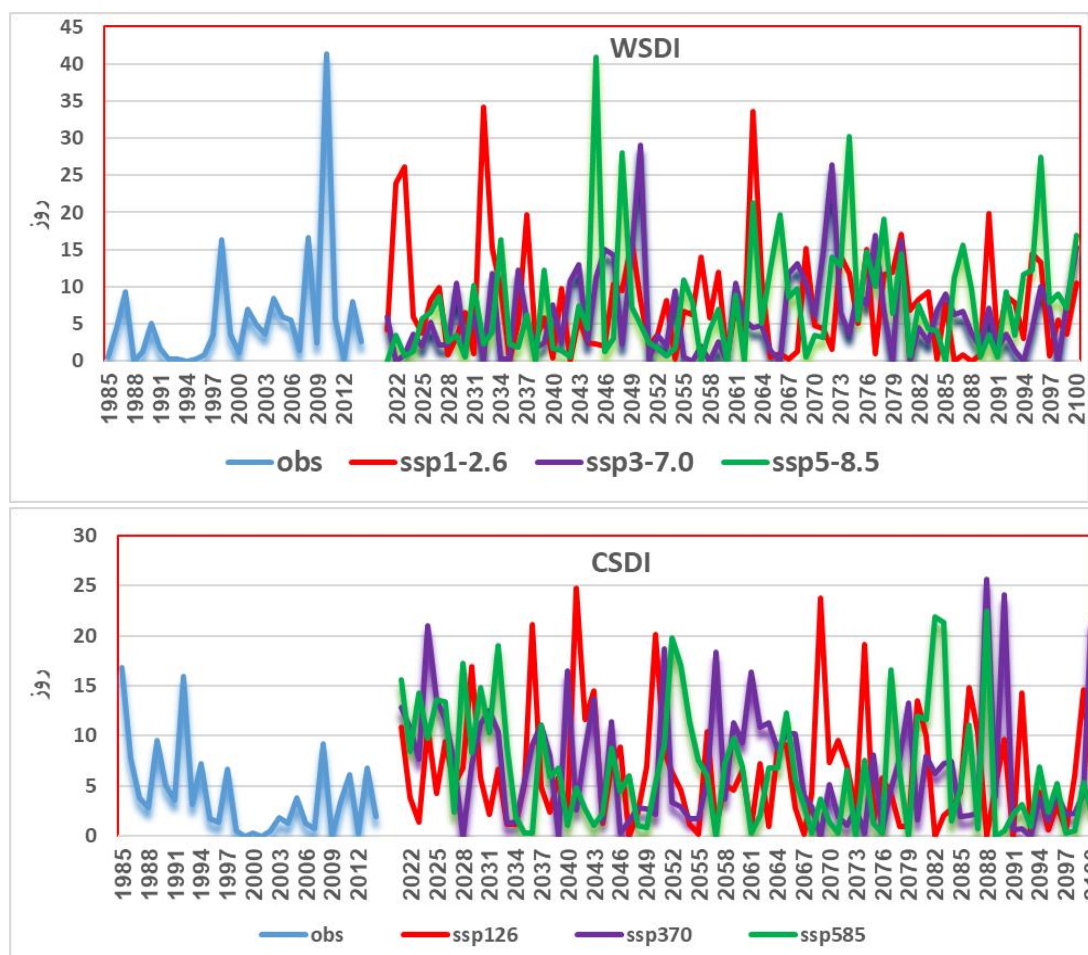
**معنی‌داری در سطح ۱٪ درصد *معنی‌داری در سطح ۵٪ درصد

در مجموع نتایج حاصل از پیش‌نگری سناریوهای مختلف در دوره های مختلف نشان داد که متوسط نمایه های تداوم دوره گرم (WSDI) و تداوم دوره سرد (CSDI) در هر سه دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که خلاصه نتایج آن برای هر سه سناریو و هر سه دوره مورد بررسی در مقایسه با دوره پایه در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور میانگین بیشترین میزان افزایش در سناریوی SSP۳-۷,۰ و در دوره آینده نزدیک مربوط به نمایه تداوم دوره سرد و به میزان ۳/۷۴ روز نسبت به میانگین دوره پایه (۳/۸۰) می باشد. همچنین بر اساس سناریوی SSP ۳-۷,۰ در دوره انتهایی قرن بیست و یکم شاخص WSDI حدود ۱ روز کاهش می یابد.

جدول ۱۰ - تغییرات فرین های دمایی در دوره های آینده نسبت به دوره پایه بر اساس سناریوهای مختلف

۲۰۸۱-۲۱۰۰		۲۰۵۱-۲۰۸۰		۲۰۲۱-۲۰۵۰		سناریو
CSDI	WSDI	CSDI	WSDI	CSDI	WSDI	
۲/۱۱	۰/۶۶	۲/۱۹	۲/۱۸	۳/۷۲	۲/۶۳	SSP۱-۲,۶
۲/۶۸	-۰/۵۴	۲/۸۰	۱/۰۱	۳/۷۴	۱/۰۷	SSP ۳-۷,۰
۲/۴۶	۲/۵۸	۲/۴۵	۳/۰۲	۳/۵۵	۰/۷۶	SSP ۵-۸,۵

بررسی سری های زمانی نمایه WSDI در دوره پایه و دوره های آینده نشان دهنده افزایش آن به ویژه در دوره های آینده است. افزایش این نمایه در دوره های آینده بر اساس سناریو SSP۵-۸,۵ بیشتر از دو سناریوی دیگر است. به طور کلی در دوره های آینده نمایه WSDI در منطقه مورد مطالعه افزایشی خواهد بود و جهش های افزایشی بر اساس سناریو SSP۱-۲,۶ در سالهای ۲۰۲۳، ۲۰۳۲ و ۲۰۶۴ مشاهده می شود. بر اساس سناریو SSP۵-۸,۵ نیز در سال ۲۰۴۵ جهش افزایشی در نمایه دیده می شود که می تواند ناشی از ویژگیهای این سناریو باشد (شکل ۸). بررسی سری های زمانی نمایه CSDI نشان داد که در دوره های آینده در هر سه سناریو افزایش خواهد یافت. جهش های افزایشی در تغییرات این نمایه بیشتر در سناریوهای SSP۱-۲,۶ و SSP۳-۷,۰ دیده می شود. شکل ۸ جهت بررسی بهتر تغییرات نمایه تا سال ۲۱۰۰ آورده شده است (شکل ۸).



شکل ۸- سری زمانی تغییرات نمایه WSDI و CSDI دوره مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

نتیجه گیری

با توجه به گرمایش جهانی و رخداد تغییرات اقلیمی در سراسر جهان، امروزه بررسی و مطالعه فرین‌های اقلیمی به عنوان یکی از پیامدهای تغییرات آب و هوایی و در نظر گرفتن تهدیدات لازم برای تعدیل اثرات سوء ناشی از این تغییرات لازم و ضروری است. لذا در این پژوهش به بررسی توزیع فضایی تغییرات ۲ نمایه حدی دمایی یعنی تداوم دوره گرم (WSDI) و تداوم دوره سرد (CSDI) با استفاده از مدل‌های GCM از CMIP۶ تحت سه سناریوی SSP۱-۲٫۶، SSP۳-۷٫۰ و SSP۵-۸٫۵ در سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده متوسط (۲۰۵۱-۲۰۸۰) و آینده دور (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) پرداخته شد. نتایج نشان داد که میانگین تداوم دوره گرم و تداوم دوره سرد در دوره پایه در منطقه برابر با ۵/۵۳ و ۳/۸۰ روز در سال است که حداکثر و حداقل تداوم دوره گرم با ۷/۱ و ۲/۷ روز به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های پارس آباد و سنندج و بیشترین و کمترین مقدار تداوم دوره سرد نیز با ۵/۷ و ۱/۳ روز مربوط به ایستگاه‌های مریوان و زرینه است. بر اساس نتایج نمایه‌های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه با توجه به افزایش دما و ماهیت هر دو

نمایه فرین، شاخص تداوم دوره گرم دارای روند افزایشی و شاخص تداوم دوره سرد دارای روند کاهشی هستند که این روند بر اساس آزمون من کندال در دوره پایه برای نمایه WSDI در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایشی و معنی دار شده است ولی روند نمایه CSDI کاهشی و فاقد روند معنی داری است. نتایج آزمون من-کندال در دوره آینده برای نمایه تداوم دوره گرم بر اساس هر سه سناریو افزایشی می باشد ولی فقط بر اساس سناریوی SSP۵-۸٫۵ معنی دار شده است و نتایج نمایه CSDI نیز نشان داد که در هر سه سناریو دارای روند کاهشی و این روند در SSP۳۷٫۰ و SSP۵-۸٫۵ در برخی ایستگاهها معنی دار شده است. تغییرات نمایه ها در دوره آینده نسبت به دوره پایه نیز نشان داد که میانگین تعداد روزهای همراه با تداوم دوره سرد بر اساس هر سه سناریو و در هر سه دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد و این به ماهیت افزایشی فرین های اقلیمی و تغییرات آب و هوایی بر می گردد. و همچنین تعداد روزهای همراه با تداوم دوره گرم نیز در هر سه سناریو افزایش می یابد و فقط در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ و در سناریوی SSP۳۷٫۰ کاهش می یابد. توزیع فضایی WSDI نشان داد که بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی بیشینه این نمایه بیشتر در نواحی جنوب غربی منطقه و کمینه آن در نواحی شرق و شمال شرقی منطقه مورد مطالعه رخ خواهد داد و در واقع تاحدی متاثر از عرض جغرافیایی و شیب د ولی توزیع تغییرات مقادیر بیشینه و کمینه نمایه CSDI در دوره های آینده در نواحی مختلف منطقه می تواند تابع ارتفاع از سطح دریا و فرارفت سامانه های سرد بر روی منطقه باشد. نتایج حاصل از این پژوهش، مطالعات یو و همکاران (۲۰۲۱)، تاجیک و سبزواری (۱۳۹۹)، بابااوسمایل و همکاران (۲۰۲۲) و زرین و داداشی (۱۴۰۰) و اوزترک و همکاران (۲۰۲۱) مبنی افزایش نمایه های فرین گرم از جمله WSDI، بی هنجاری دمایی و روند کاهشی نمایه های فرین سرد مانند CSDI و همچنین بیشترین میزان تغییرات بر اساس سناریوی SSP۵-۸٫۵ را مورد تایید قرار می دهد. در مجموع بر اساس نتایج حاصل از تغییرات زیاد نمایه های فرین تداوم دوره گرم و سرد در دوره های آینده و پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی ناشی از این تغییرات، بنابراین لازم است برنامه ریزان در بخش های مختلف، راهکارهای لازم برای مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی حاصل را اتخاذ نمایند.

منابع

- تاجیک، اعظم و آزاده اربابی سبزواری. ۱۳۹۹. بررسی تغییرات فضایی دماهای حدی در سطح ایران. *فصل نامه جغرافیای طبیعی*، سال دوازدهم، ۴۹: ۱۰۹-۱۲۴
- جهانبخش اصل، سعید، بهروز ساری صراف، حسین عساکره و سهیلا شیر محمدی. ۱۳۹۸. تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی-مکانی بارندگی حدی فوقانی طی سال های ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۶. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، سال ۷. شماره ۱: ۸۹-۱۰۶
- ذرین، آذر و عباسعلی داداشی رودباری. ۱۳۹۹. پیش نگری چشم انداز بلند مدت دمای ایران مبتنی بر برونداد پروژه مقایسه مدل های جفت شده فاز ششم (CMIP۶). *فیزیک زمین و فضا*، ۴۶: ۵۸۳-۶۰۲.
- ذرین، آذر و عباسعلی داداشی رودباری. ۱۴۰۰. پیش نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکردهای همادی چند مدلی CMIP۶. *پژوهش های جغرافیای طبیعی*، ۵۳: ۷۵-۹۰.
- زهرائی، اکبر و سید اسعد حسینی. ۱۳۹۹. تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب، چاپ اول، *انتشارات هاوار*، ایلام.

صداقت کردار، علی و ابراهیم فتاحی، ۱۳۸۷، شاخص های پیش آگاهی خشک سالی در ایران، *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۶(۷۶): ۱۱-۵۹.

عسکری زاده، سید محمد. ۱۳۹۵. آشکارسازی و پیش یابی نوسانات مکانی- زمانی نمایه های حدی دما و بارش در استان خراسان رضوی با استفاده از مدل LARS-WG. رساله دکتری مخاطرات آب و هواشناسی، استاد راهنما: غلامعلی مظفری. پردیس علوم انسانی، دانشگاه یزد.

علیجانی، بهلول. احمد روشنی، فاطمه پرک و روح اله حیدری. ۱۳۹۱. روند تغییرپذیری فرین های دما با استفاده از شاخص های تغییر اقلیم در ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۲: ۲۸-۱۷.

عیسی پور، مصطفی. ۱۳۹۲. تحلیل و پیش بینی سری های زمانی دما در استان خراسان رضوی با استفاده از مدل باکس-جنکینز، پایان نامه کارشناسی ارشد اقلیم شناسی، استاد راهنما: محمود احمدی و حسن لشکری، دانشگاه شهید بهشتی.

لطفی سیرائی، علی. ۱۳۹۸. شبیه سازی و پیش بینی شاخص های حدی اقلیمی در استان تهران و البرز، رساله دکتری رشته آب و هواشناسی، استاد راهنما: بهلول علیجانی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده جغرافیا.

Ayugi, B.Y; V, Dike; H, Ngoma;H, Babausmail;R, Mumo, and Victor Ongoma. ۲۰۲۱. Future Changes in Precipitation Extremes over East Africa Based on CMIP^۶ Models. *Water*, ۱۳, ۲۳۵۸. PP. ۱-۲۰.

Babausmail, H.; B, Ayugi.;A, Rajasekar; H, Zhu;C, Odoro;R, Mumo, and Victor Ongoma. Projection of Extreme Temperature Events over the Mediterranean and Sahara Using Bias-Corrected CMIP^۶ Models. *Atmosphere* ۲۰۲۲, ۱۳, ۷۴۱. doi.org/۱۰,۳۳۹۰/atmos۱۳۰۵۰۷۴۱.

Chen, T; Ao,T; Zheng, X; Li, X and Kebi Yang. ۲۰۱۹. Climate Change Characteristics of Extreme Temperature in the Minjiang River Basin. *Advances in Meteorology*. Volume ۲۰۱۹, Article ID ۱۹۳۵۷۱۹, ۱۵ pages. <https://doi.org/۱۰,۱۱۵۵/۲۰۱۹/۱۹۳۵۷۱۹>.

Cheng, Q., F, Zhong, and Ping Wang. ۲۰۲۱. Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China. *Atmospheric Research*, ۲۴۷, PP.۱-۲۲.

Das, S.; M, Kamruzzaman.; R.M.T, Islam;D, Zhu, and Amit Kumar. ۲۰۲۲. Comparison of Future Changes in Frequency of Climate Extremes between Coastal and Inland Locations of Bengal Delta Based on CMIP^۶ Climate Models. *Atmosphere*, ۱۳, ۱۷۴۷. PP. ۱-۱۹. <https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/atmos۱۳۱۱۱۷۴۷>.

Eyring,V;G, Flato; J, Meehl; C, Senior; B, Stevens; R, Stouffer and Karl Taylor. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase ۶ (CMIP^۶) Experimental Design and Organization. ۲۰۱۸.

Hu, T.S., K.C, Lam., and S.T Ng. ۲۰۰۱. River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, ۴۶: ۷۲۹-۷۴۵.

IPCC (۲۰۱۳) The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Eds.), Cambridge and New York, p. ۱۵۳۵.

Lin, J.Y., C.T, Cheng., Chau and KWOK-WING CHAU. ۲۰۰۶. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Science Journal*, ۵۱: ۵۹۹-۶۱۲.

Lin,v and Huopo CHEN. ۲۰۲۰. Assessment of model performance of precipitation extremes over the mid-high latitude areas of Northern Hemisphere:from CMIP^۵ to CMIP^۶, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, ۱۳:۶, ۵۹۸-۶۰۳, DOI:۱۰,۱۰۸۰/۱۶۷۴۲۸۳۴,۲۰۲۰,۱۸۲۰۳۰۳.

Luo,M;T, Liu.;F, Meng.;Y, Duan;A.B. Frankl, and Philippe De Maeyer. ۲۰۱۸. 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* ۲۰۱۸, ۱۰, ۱۰۴۶. doi:۱۰,۳۳۹۰/w۱۰۰۸۱۰۴.

Nicholls, S.I., N. Easterling, D; Goodess, C.M; Kanae, S; Kossin, J; Luo, Y; Marengo,J; McInnes,K; Rahimi,M; Reichstein, M; Sorteberg, A; Vera, C. and Zhang,X. ۲۰۱۲: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, PP. ۱۰۹-۲۳۰.

- Nishant, N., G, Di Virgilio; F, Ji;E, Tam;K, Beyer, and Matthew L. Riley. Evaluation of Present-Day CMIP^۶ Model Simulations of Extreme Precipitation and Temperature over the Australian Continent. *Atmosphere* ۲۰۲۲, ۱۳, ۱۴۷۸. PP. ۱-۲۸. <https://doi.org/10.3390/atmos13091478>.
- O'Neill B.C; E, Kriegler; K, Riahi; K.L. Ebi; S, Hallegatte; T.R. Carter; R, Mathur, and van Vuuren. ۲۰۱۴. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Chang* ۱۲۲(۳):۳۸۷-۴۰۰.
- Ozturk, T.; Saygili-Araci, F.S.; Kurnaz, M.L. Projected Changes in Extreme Temperature and Precipitation Indices Over CORDEX-MENA Domain. *Atmosphere* ۲۰۲۱, ۱۲, ۶۲۲. <https://doi.org/10.3390/atmos12050622>.
- Riahi, K., D. P, Van Vuuren.,E, Kriegler., J, Edmonds., B.C, O'Neill., S, Fujimori., N, Bauer., K, Calvin., R, Dellink., O, Fricko, and Hermann Wolfgang Lutz. ۲۰۱۷, The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, ۴۲, ۱۵۳-۱۶۸.
- Shiru, M.S and Eun-Sung Chung. ۲۰۲۱. Performance evaluation of CMIP^۶ global climate models for selecting models for climate projection over Nigeria. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03746-2>
- Shiu, C. J., S. C. Liu; C, Fu, A, Dai, and Ying Sun. ۲۰۱۲. Howmuch do precipitation extremes change in a warming climate? *Geophys. Res. Lett.*, ۳۹, L۱۷۷۰۷. PP. ۱-۵., <https://doi.org/10.1029/2012GL052762>.
- Shrestha, S., M, Shrestha and Mukand. S. Babel. ۲۰۱۵. Modelling the potential impacts of climate change on hydrology of Indrawati River Basin in Nepal. *Environmental Earth Science*.
- Shrestha, S.,M, Shrestha, and Mukand. S. Babel. (۲۰۱۵). Modelling the potential impacts of climate change on hydrology of Indrawati River Basin in Nepal. *Environmental Earth Science*.
- Swart, N. C., , J. N, Cole., V. V, Kharin., M, Lazare., J. F, Scinocca., N. P, Gillett, and B, Winter. ۲۰۱۹. The canadian earth system model version ۵ (CanESM۵. ۰,۳). *Geoscientific Model Development*, ۱۲(۱۱), ۴۸۲۳-۴۸۷۳.
- Teutschbein, C and Jan Seibert. (۲۰۱۲). Bias correcion of regional climate model simulation for hydrological climate <https://doi.org/10.3390/W11020283>.
- Wang, S., Q, Liu, and Chang Huang. ۲۰۲۱. Vegetation Change and Its Response to Climate Extremes in the Arid Region of Northwest China; *Remote Sens*. ۲۰۲۱, ۱۳, ۱۲۳۰.
- Wu, Y., C, Miao.,Y, Sun.,A, AghaKouchak.,C, Shen, and Xuwei Fan. ۲۰۲۱. Global observations and CMIP^۶ simulations of compound extremes of monthly temperature and precipitation. *GeoHealth*, ۵, e۲۰۲۱GH۰۰۰۳۹۰. <https://doi.org/10.1029/2021GH000390>.

