

تحلیل مکانی نمایه‌های حدی دما تحت تأثیر تغییر اقلیم مبتنی بر داده‌های CORDEX و روش توسعه‌یافته تصحیح اریبی در ایران

فرشاد فتحیان^{۱*}، محمد قدمی^۲ و زهره دهقان^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۸)

چکیده

در این پژوهش، روند تغییرات مکانی نمایه‌های حدی دما مرتبط با بخش‌های سلامت و کشاورزی شامل تعداد روزهای یخبندان، تعداد روزهای تابستانی، تعداد روزهای یخی، تعداد شب‌های حاره‌ای، طول فصل رویش، دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما، طول مدت سرما و طول مدت گرما برای ۵۴ ایستگاه همدیدی در سرتاسر ایران برای دوره‌های مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و آینده (۲۰۵۴-۲۰۲۵) بررسی شدند. بدین منظور، داده‌های دمای کمینه و بیشینه ۳ مدل اقلیمی منطقه‌ای به نام‌های CCSM4، MPI-ESM-MR و NORESM1-ME پروژه CORDEX تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از روش توسعه‌یافته تصحیح اریبی چند مقیاسه برای هر ایستگاه ریزمقیاس‌نمایی شدند. سپس، روند و تغییرات نمایه‌های حدی دما با استفاده از روش‌های من-کندال و شیب خط روند شن بررسی شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که نمایه‌های گرم همانند تعداد روزهای تابستانی و تعداد روزهای حاره‌ای در بیشتر ایستگاه‌ها برای هر دو دوره مشاهداتی و آینده روند مثبتی داشته‌اند. در مقابل، نمایه‌های سرد مانند تعداد روزهای یخبندان در بیشتر ایستگاه‌ها روند کاهشی داشته‌اند. نتایج نمایه‌های طول مدت گرما و سرما نشان داد که بیشتر ایستگاه‌ها برای هر دو دوره زمانی فاقد روند هستند. طول فصل رویش در بیش از ۶۰ درصد ایستگاه‌ها (۴۵ درصد معنی‌دار) که بیشتر در نواحی شمالی، شمال غربی و غرب واقع شده کشور افزایش یافته است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که بدون در نظر گرفتن اقدامات سازگاری با شرایط اقلیمی، برخی از نقاط کشور ممکن است در آینده با خطر سلامت و قابلیت سکونت و کشاورزی محدود مواجه شوند.

واژه‌های کلیدی: مقادیر حدی دما، تغییر اقلیم، داده CORDEX، ریزمقیاس‌نمایی، تحلیل مکانی روند، ایران

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

۲. دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: f.fathian@vru.ac.ir

مقدمه

است. تغییرات این دو متغیر در آینده می‌تواند شرایط اقلیمی یک منطقه را از هر نظر تحت شعاع قرار دهد؛ بنابراین، بررسی دقیق روند مقادیر حدی (Extremes) این متغیرها و شدت تغییرات آنها در دوره‌های آتی در هر منطقه ضروری به نظر می‌رسد. اهمیت وقایع حدی و لزوم پیش‌بینی آنها به منظور برنامه‌ریزی در جهت تعدیل خسارات وارده باعث شده است تا گروهی از متخصصان پروژه مشترک اقلیم و هواشناسی Commission for Climatology (CCI) و پیش‌بینی اقلیم Climate Variability and Predictability (CLIVAR) به معرفی نمایه‌های حدی دما و بارش ترغیب شوند. با استفاده از این نمایه‌ها می‌توان وقوع پدیده‌های حدی مرتبط با دما و بارش را در طول زمان شناسایی کرد. بر اساس گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) در سال ۲۰۱۳، تعداد روزهای سرد و تعداد شب‌های سرد به‌عنوان نمایه‌های حدی دما در مقیاس جهانی کاهش؛ و برعکس، تعداد روزهای گرم و تعداد شب‌های گرم افزایش خواهند یافت (۱۰).

در طول چند دهه اخیر، مطالعات متنوعی توسط پژوهشگران مختلف در سرتاسر جهان در مورد بررسی این نمایه‌ها برای داده‌های دوره زمانی مشاهداتی صورت گرفته است که همگی در تغییر روند نمایه‌های دما توافق داشته‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به نمونه‌ای از این مطالعات در سرتاسر جهان نظیر وان و همکاران (۳۰)، آویلا و همکاران (۱)، بالینگ و همکاران (۲)، سلطانی و همکاران (۲۶)، کارکی و همکاران (۱۲)، شرسا و همکاران (۲۵) و نملنگ و همکاران (۱۷) اشاره کرد. در ایران نیز مطالعات مختلفی برای ارزیابی تغییرات این نمایه‌ها در سطح وسیع طی دهه‌های اخیر انجام شده است که می‌توان به ذکر مطالعات رحیم‌زاده و همکاران (۲۱)، سلطانی و همکاران (۲۶) و فتحیان و همکاران (۵) پرداخت. بر اساس بررسی‌های این پژوهشگران، نمایه‌های حدی مرتبط با سرما روند منفی و نمایه‌های مرتبط با گرما روند مثبت معنی‌داری در بیشتر ایستگاه‌ها در دوره‌های مورد مطالعه داشته‌اند.

بررسی پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن بر رخداد‌های آب و هوایی توجه بسیاری از پژوهشگران را نسبت به گذشته به خود جلب کرده است (۳۲). افزایش طول دوره رشد گیاهان، افزایش دما و ذوب شدن یخ‌های قطب شمال و پس از آن بالا آمدن سطح تراز آب‌ها، کاهش بارش و وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی و شدید، افزایش رخداد سیلاب، افزایش امواج گرمایی و کاهش امواج سرما به‌عنوان نشانه‌هایی از پدیده تغییر اقلیم هستند که موجب بروز مشکلات اقتصادی و اجتماعی فراوانی در سراسر جهان شده و اثرات مخربی بر سلامت انسان داشته است (۴). بنابراین، رخداد‌های حدی آب و هوایی یکی از مهم‌ترین چالش‌ها برای جوامع و موضوع قابل توجهی برای پژوهشگران به‌منظور بررسی رفتار آنها است. لذا، از آنجایی که کشاورزی تابع عوامل بیلان آبی و متغیرهای آب و هواشناسی است، پدیده تغییر اقلیم، وضعیت کشاورزی ایران را در چند دهه آینده تحت تأثیر قرار خواهد داد. بنابراین، برای آمادگی در برابر اثرات نامطلوب پدیده تغییر اقلیم و برنامه‌ریزی مناسب برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و محیط زیست در هر منطقه، بررسی روند و تغییرات مقادیر حدی متغیرهای هواشناسی امری ضروری است. کارل و همکاران (۱۳) نشان دادند که فراوانی رویدادهای حدی مرتبط با پدیده‌های آب و هوایی و رفتار آنها در آینده افزایش خواهد یافت و با افزایش مقادیر حدی، مخاطرات زیست محیطی نیز در آینده با فراوانی و شدت بیشتری به‌وقوع می‌پیوندند (۱۸).

به‌طور کلی، وقوع پدیده تغییر اقلیم به سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر باعث برهم خوردن تعادل آب و هوایی کره زمین شده و تأثیرات منفی این پدیده بر سیستم‌های مختلف مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت و سایر بخش‌های مرتبط با آن موجب نگرانی‌هایی برای جوامع بشری شده است (۱۰). دما و بارش دو متغیر مهم در تعیین آب و هوای یک منطقه هستند و تغییرات آنها نیز بر سیستم‌های مختلف به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تأثیرگذار

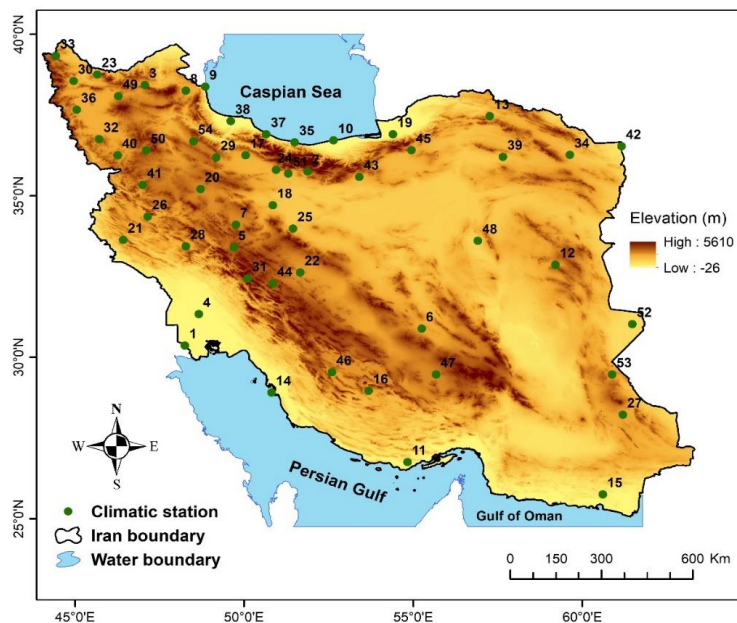
محاسبه نمایه‌های حدی مرتبط با دما، از بسته نرم‌افزاری "climindex.pcic" توسط پروناف (۳) استفاده شد. کدنویسی و اجرای این بسته‌های نرم‌افزاری در محیط نرم‌افزار زبان برنامه‌نویسی R انجام شد (۲۰). در پایان، روند تغییرات نمایه‌های حدی دما برای دوره‌های مشاهداتی و آینده مقایسه شدند.

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

کشور ایران به‌طور تقریبی بین طول جغرافیایی ۴۰ و ۶۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۰ و ۴۰ درجه شمالی در ناحیه جنوب غرب قاره آسیا واقع شده است. از لحاظ توپوگرافی، ایران دارای دو رشته کوه البرز در قسمت شمالی و زاگرس در غرب و جنوب غرب است که نواحی خشک و نیمه‌خشک بخش مرکزی ایران را که شامل دو بیابان بزرگ به نام‌های دشت کویر و دشت لوت است، احاطه کرده‌اند. دامنه ارتفاعی ایران از ۲۸ متر پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد تا ۵۵۹۵ متر بالاتر از آن در نواحی کوهستانی تغییر می‌کند (۶). اقلیم کشور ایران از شمال به جنوب و از غرب به شرق به دلیل شرایط آب و هوایی مختلف و توزیع غیریکنواخت بارش و رطوبت متفاوت است. در این پژوهش، ۵۴ ایستگاه همدیدی که به‌طور پراکنده در سرتاسر ایران پخش شده‌اند، به‌منظور رسیدن به اهداف مورد نظر، انتخاب و داده‌های مورد نیاز با طول دوره آماری ۳۰ سال از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. شکل ۱ پراکندگی مکانی و جدول ۱ نیز مشخصات ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. اعداد درج شده در نزدیکی نقاط ایستگاه‌ها در شکل ۱ با شماره ردیف ایستگاه‌های آورده شده در جدول ۱ تطابق دارند. در این پژوهش، از داده‌های روزانه دمای بیشینه و کمینه در محاسبه نمایه‌های حدی دما برای دوره مشاهداتی (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) استفاده شدند. همچنین، برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر نمایه‌های حدی دما در دوره آینده، از داده‌های پروژه CORDEX که در ادامه تشریح خواهند شد، استفاده شد (۲۷).

با توجه به اینکه کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک نیمکره شمالی واقع شده است؛ بنابراین، پیش‌بینی‌های معتبر متغیرهای آب و هوایی به‌منظور شناخت و درک صحیح وقایع حدی در حال وقوع ناشی از پدیده تغییر اقلیم ضروری به‌نظر می‌رسد. زیرا تغییرات شدید دما و افزایش مقدار آن در فصول مختلف سال شرایط مناطق اقلیمی مختلف کشور را از نظر کشاورزی و دامپروری به‌منظور تأمین نیاز غذایی انسان‌ها وخیم‌تر کرده است. با توجه به این شرایط، انجام مطالعات دقیق و پیش‌بینی وضعیت اقلیمی آینده در مناطق مختلف کشور، اولین گام در مدیریت مخاطرات ناشی از پدیده تغییر اقلیم است که باید مدنظر مسئولین زیربند در بسیاری از سازمان‌ها قرار گیرد. بنابراین، در این مطالعه، ابتدا، داده‌های دما حداقل و حداکثر روزانه پروژه Coordinated Regional Climate Downscaling (CORDEX) Regional Climate Experiment برای مدل اقلیمی منطقه‌ای (RCM) Model به نام‌های CCSM4, MPI-ESM-MR و NORESM1-ME تحت دو سناریوی RCP4.5 (Representative Concentration Pathway) و RCP8.5 حاصل از گزارش پنجم IPCC برای دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) و دوره مشاهداتی (۱۹۷۶-۲۰۰۵) برای ۵۴ ایستگاه همدیدی انتخاب شده به صورت پراکنده در سرتاسر ایران استخراج شدند.

برای ریزمقیاس‌نمایی آماری این داده‌ها با استفاده از روش توسعه‌یافته تصحیح اربیبی چند مقیاسه، از بسته نرم‌افزاری "musica" توسط هانل و همکاران (۹) استفاده شد. سپس، ۸ نمایه حدی دما مرتبط با بخش‌های سلامت، کشاورزی و امنیت غذایی که به‌ندرت برخی از نمایه‌ها در مطالعات پیشین استفاده شده‌اند، برای دوره آتی شبیه‌سازی شدند. این نمایه‌ها شامل تعداد روزهای یخبندان (Frost Days (FD)، تعداد روزهای تابستانی (Summer Days (SU)، تعداد روزهای یخی (Icing Days (ID)، تعداد شب‌های حاره‌ای (Tropical Nights (TR)، طول فصل رویش (Growing Season Length (GSL)، دامنه تغییرات شبانه روزی دما (Diurnal Temperature Range (DTR)، طول مدت سرما (Cold Spell Duration Index (CSDI) و طول مدت گرما (Warm Spell Duration Index (WSDI) هستند. به‌منظور



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همیدی مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های همیدی مورد مطالعه

| ردیف نام ایستگاه | طول جغرافیایی عرض جغرافیایی ارتفاع از سطح | | | ردیف نام ایستگاه | طول جغرافیایی عرض جغرافیایی ارتفاع از سطح | | |
|------------------|---|--------|------------|------------------|---|--------|------------|
| | (درجه) | (درجه) | دریا (متر) | | (درجه) | (درجه) | دریا (متر) |
| ۱ آبادان | ۴۸/۲۵ | ۳۰/۳۶ | ۶/۶ | ۱۶ فسا | ۵۳/۶۸ | ۲۸/۹۶ | ۱۲۸۸/۳ |
| ۲ آبدلی | ۵۱/۸۸ | ۳۵/۷۵ | ۲۴۶۵/۲ | ۱۷ قزوین | ۵۰/۰۵ | ۳۶/۲۵ | ۱۲۷۹/۲ |
| ۳ اهر | ۴۷/۰۷ | ۳۸/۴۳ | ۱۳۹۰/۵ | ۱۸ قم | ۵۰/۸۵ | ۳۴/۷۰ | ۸۷۷/۴ |
| ۴ اهواز | ۴۸/۶۶ | ۳۱/۳۳ | ۲۲/۵ | ۱۹ گرگان | ۵۴/۴ | ۳۶/۹ | ۱۳/۳ |
| ۵ الیگودرز | ۴۹/۷ | ۳۳/۴ | ۲۰۲۲ | ۲۰ همدان | ۴۸/۷۱ | ۳۵/۲ | ۱۶۷۹/۷ |
| ۶ انار | ۵۵/۲۵ | ۳۰/۸۸ | ۱۴۰۸/۸ | ۲۱ ایلام | ۴۶/۴۳ | ۳۳/۶۳ | ۱۳۳۷ |
| ۷ اراک | ۴۹/۷۶ | ۳۴/۱۰ | ۱۷۰۸ | ۲۲ اصفهان | ۵۱/۶۶ | ۳۲/۶۲ | ۱۵۵۰/۴ |
| ۸ اردبیل | ۴۸/۲۸ | ۳۸/۲۵ | ۱۳۳۲ | ۲۳ جلفا | ۴۵/۶۶ | ۳۸/۷۵ | ۷۳۶/۲ |
| ۹ آستارا | ۴۸/۸۵ | ۳۸/۳۷ | -۲۱/۱ | ۲۴ کرج | ۵۰/۹۵ | ۳۵/۸ | ۱۳۰۰ |
| ۱۰ بابلسر | ۵۲/۶۵ | ۳۶/۷۱ | -۲۱ | ۲۵ کاشان | ۵۱/۴۵ | ۳۳/۹۸ | ۹۸۲/۳ |
| ۱۱ بندر لنگه | ۵۴/۸۳ | ۲۶/۷۵ | ۲۲/۷ | ۲۶ کرمانشاه | ۴۷/۱۵ | ۳۴/۳۵ | ۱۳۱۸/۶ |
| ۱۲ بیرجند | ۵۹/۲ | ۳۲/۸۶ | ۱۴۹۱ | ۲۷ خاش | ۶۱/۲ | ۲۸/۲۲ | ۱۳۹۴ |
| ۱۳ بجنورد | ۵۷/۲۶ | ۳۷/۴۶ | ۱۱۱۲ | ۲۸ خرم آباد | ۴۸/۲۸ | ۳۳/۴۳ | ۱۱۴۷/۸ |
| ۱۴ بوشهر | ۵۰/۸۲ | ۳۰/۳۳ | ۷۲۶ | ۲۹ خرم دره | ۴۹/۱۸ | ۳۶/۱۸ | ۱۵۷۵ |
| ۱۵ چابهار | ۴۶/۴۳ | ۳۳/۶۳ | ۱۳۳۷ | ۳۰ خوی | ۴۴/۹۶ | ۳۸/۵۵ | ۱۱۰۳ |

ادامه جدول ۱

| ردیف | نام ایستگاه | طول جغرافیایی عرض جغرافیایی ارتفاع از سطح | | | ردیف | نام ایستگاه | طول جغرافیایی عرض جغرافیایی ارتفاع از سطح | | |
|------|-------------|---|--------|------------|------|-------------|---|--------|------------|
| | | (درجه) | (درجه) | دریا (متر) | | | (درجه) | (درجه) | دریا (متر) |
| ۳۱ | کوه‌رنگ | ۵۰/۱۱ | ۳۲/۴۳ | ۲۲۸۵ | ۴۳ | سمنان | ۵۳/۴۱ | ۳۵/۵۸ | ۱۱۲۷ |
| ۳۲ | مهاباد | ۴۵/۷۲ | ۳۶/۷۵ | ۱۳۵۱/۸ | ۴۴ | شهرکرد | ۵۰/۸۵ | ۳۲/۲۸ | ۲۰۴۸/۹ |
| ۳۳ | ماکو | ۴۴/۴۳ | ۳۹/۳۳ | ۱۴۱۱/۳ | ۴۵ | شاهرود | ۵۴/۹۵ | ۳۶/۴۱ | ۱۳۴۹/۱ |
| ۳۴ | مشهد | ۵۹/۶۳ | ۳۶/۲۶ | ۹۹۹/۲ | ۴۶ | شیراز | ۵۲/۶ | ۲۹/۵۳ | ۱۴۸۴ |
| ۳۵ | نوشهر | ۵۱/۵ | ۳۶/۶۵ | -۲۰/۹ | ۴۷ | سیرجان | ۵۵/۶۸ | ۲۹/۴۶ | ۱۷۳۹/۴ |
| ۳۶ | ارومیه | ۴۵/۰۵ | ۳۷/۶۶ | ۱۳۲۸ | ۴۸ | طبرس | ۵۶/۹۱ | ۳۳/۶ | ۷۱۱ |
| ۳۷ | رامسر | ۵۰/۶۶ | ۳۶/۹ | -۲۰ | ۴۹ | تبریز | ۴۶/۲۸ | ۳۸/۱ | ۱۳۶۱ |
| ۳۸ | رشت | ۴۹/۶۱ | ۳۷/۳۱ | -۸/۶ | ۵۰ | تکاب | ۴۷/۱ | ۳۶/۴ | ۱۸۱۷/۲ |
| ۳۹ | سبزوار | ۵۷/۶۵ | ۳۶/۲ | ۹۷۲ | ۵۱ | تهران | ۵۱/۳۱ | ۳۵/۶۸ | ۱۱۹۰/۸ |
| ۴۰ | سقز | ۴۶/۲۶ | ۳۶/۲۵ | ۱۵۲۲/۸ | ۵۲ | زابل | ۶۱/۴۸ | ۳۱/۰۲ | ۴۸۹/۲ |
| ۴۱ | سنندج | ۴۷ | ۳۵/۳۳ | ۱۳۷۳/۴ | ۵۳ | زاهدان | ۶۰/۸۸ | ۲۹/۴۶ | ۱۳۷۰ |
| ۴۲ | سرخس | ۶۱/۱۶ | ۳۶/۵۳ | ۲۳۵ | ۵۴ | زنجان | ۴۸/۵ | ۳۶/۶۸ | ۱۶۶۳ |

پروژه CORDEX

پروژه CORDEX یک برنامه برای پیشبرد سناریوهای تغییر اقلیم منطقه‌ای در سطح جهانی است. این برنامه توسط برنامه جهانی تحقیقات آب و هوا World Climate Research Programme (WCRP) برای هدایت یک چارچوب هماهنگ بین‌المللی برای تولید یک نسل پیشرفته از پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم منطقه‌ای مورد حمایت قرار گرفته است. پروژه CORDEX محدوده جنوب آسیا شامل ۱۱ قسمت مختلف می‌شود که ترکیبی است از RCM های مختلف که به صورت پویا تحت Global Climate Model (GCM) های مختلف اجرا می‌شود (۷). داده‌های پروژه CORDEX جنوب آسیا دارای دقت مکانی ۰/۴۴ درجه (۵۰ کیلومتر) و دقت زمانی آن به صورت ماهانه و روزانه در دسترس است. داده‌های مربوط به منطقه CORDEX جنوب آسیا از مرکز تحقیقات اقلیمی Center of Climate Change Research (CCCR)، مؤسسه هواشناسی گرمسیری هند، گرفته شده است. مدل‌های اقلیم منطقه‌ای مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه

شده‌اند و این مدل‌ها تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 انتخاب شدند. بسته نرم‌افزاری توسعه یافته "musica" توسط هانل و همکاران (۹) برای ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های RCM از طریق روش تصحیح اُریبی چندمقیاسه استفاده شد (۲۷).

تصحیح اُریبی

روش تصحیح اُریبی چندمقیاسه Multiscale bias correction یک روش توسعه یافته برای تصحیح اُریبی داده‌های اقلیمی بارش و دما است. این روش در قالب بسته نرم‌افزاری "musica" در زبان برنامه‌نویسی R قابل اجرا است. در این روش، داده‌های دما و بارش در چند مقیاس روزانه، هفتگی ماهانه و سالانه تصحیح می‌شوند تا عدم قطعیت داده‌ها کاهش یابد. فرض کنیم که می‌خواهیم متغیر X را در تعدادی از مقیاس‌های زمانی $S = [S[0], S[1], S[2], \dots]$ که $S[0]$ مقیاس اصلی است (معمولاً روز اول، D1، و ماه اول، M1) تصحیح کنیم. سری زمانی $X_s [i]$ به وسیله روش نگاشت چندک

جدول ۲. مدل‌های RCM مورد استفاده از خروجی پروژه CORDEX

| نام مدل | نام اختصاری | مرکز تحقیقاتی | دقت مکانی (درجه) |
|-------------|-------------|---------------------------------|------------------|
| CCSM4 | CCSM | مرکز ملی تحقیقات اتمسفری آمریکا | ۰/۵×۰/۵ |
| MPI-ESM-MR | MPI | مؤسسه اقلیمی ماکس پلانک آلمان | ۰/۵×۰/۵ |
| NORES-M1-ME | NOR | مرکز تحقیقات اقلیمی نروژ | ۰/۵×۰/۵ |

شده و به معادله ۱ منتقل می‌شوند). مقدار تکرارهای مورد نیاز معمولاً کوچک است، اما به تعداد مقیاس‌های زمانی در نظر گرفته شده و ساختار ارب‌ها بستگی دارد (۱۱ و ۱۶). از این رو، این روش به‌عنوان تصحیح ارب‌ی چندمقیاسه شناخته می‌شود.

نمایه‌های حدی دما

در چهارچوب فعالیت‌های سازمان جهانی هواشناسی، پروژه مشترکی بین کمیسیون اقلیم‌شناسی، سازمان بررسی تغییرپذیری و پیش‌بینی اقلیم و برنامه تحقیقات جهانی در زمینه پایش و آشکارسازی تغییر اقلیم و نمایه‌های آن انجام شد. خروجی حاصل از این پروژه مشترک، تعریف کردن ۲۷ نمایه حدی اقلیمی شامل ۱۶ نمایه حدی مربوط به دما و ۱۱ نمایه حدی مربوط به بارش بود که در نرم‌افزار زبان برنامه‌نویسی R قابل محاسبه هستند. در این خصوص، بسته نرم‌افزاری توسعه‌یافته "climdex.pcic" توسط برونوف (۳) برای محاسبه نمایه‌های حدی مربوط به دما در نرم‌افزار R استفاده شد. جدول ۳ نیز نمایه‌های حدی مهم مربوط به دما و تأثیرگذار در بخش‌های مختلف سلامت و کشاورزی (۱۹ و ۳۱) را بیان می‌کند.

روش تحلیل روند من-کندال Mann-Kendall

تحلیل روند برای شناسایی رفتار کلی متغیر مورد مطالعه در طول دوره زمانی ثبت شده به‌کار می‌رود. در این پژوهش، برای شناسایی روند فصلی و سالانه متغیرهای هواشناسی از آزمون تحلیل روند من-کندال استفاده شد. این آزمون ناپارامتری (۱۴) و (۱۵) توسط سازمان جهانی هواشناسی برای ارزیابی داده‌های

استاندارد Standard quantile mapping برای هر مقیاس زمانی به‌طور مستقل اصلاح می‌شود (۸). به‌غیر از مقیاس اصلی، مقادیر سری زمانی در مقیاس $S[i]$ می‌توانند از طریق مجموع متغیرهای تصحیح شده از نزدیک‌ترین مقیاس زمانی کوتاه‌مدت محاسبه شوند. برای مثال، در عبارت $X_{s[i]}^A = A \left(X_{s[i-1]}^C \right)$ جمله A شامل مجموع $s[i-1]$ تا $s[i]$ است. هر بخش از سری‌های زمانی در مقیاس اصلی $X_{s[0]}$ می‌تواند با شاخص زمانی $t_{s[0]}$ (به‌عنوان مثال در روز خاص) مشخص شود. اما شاخص زمانی همچنین به بعضی دوره‌ها با مقیاس زمانی طولانی‌تر تعلق دارد (برای مثال، ماه، فصل یا سال مشخص). به‌عنوان نمونه، برای روز اول ماه اول از سال ۲۰۷۰ $s = (D_1, M_1, Y_1)$ ما داریم $t_{D_1} = 2070-01-01$ و $t_{M_1} = 2070-01-01$ و در این حالت، $t_i = t_{s[i]}, t_{s[i+1]}, \dots$ شاخص زمانی را در مقیاس $S[i]$ نشان می‌دهد. مقدار $X_{s[0]}^M$ تصحیح شده چندمقیاسه با استفاده از رابطه (۱) برای دما به‌دست می‌آید:

$$X_{s[0]}^M(t_0) = X_{s[0]}^C(t_0) + \sum_{i>0} \frac{X_{s[i]}^C(t_i)}{X_{s[i]}^A(t_i)} \quad (1)$$

از آنجا که هر مقدار در مقیاس اصلی با توجه به مقیاس‌های چندگانه تصحیح می‌شود، سری‌های تصحیح شده با مقیاس چند بُعدی به‌طور کامل با داده‌های مشاهداتی مطابقت ندارند. برای به حداقل رساندن تفاوت در تمام مقیاس زمانی در نظر گرفته شده، این روش باید چندین بار تکرار شود (به‌عنوان مثال، سری‌های اصلاح شده چندمقیاس به‌طور مستقل در هر مقیاس زمانی اصلاح می‌شوند، سپس جمع

جدول ۳. نمایه‌های حدی دما مورد استفاده در بخش‌های سلامت و کشاورزی

| نمایه | شرح نمایه | واحد |
|-------|--|------|
| FD | تعداد روزهای یخبندان (دمای حداقل روزانه کمتر از 0 °C) | روز |
| SU | تعداد روزهای تابستانی (دمای بیشینه روزانه بیشتر از 25 °C) | روز |
| ID | تعداد روزهای یخی (دمای بیشینه روزانه کمتر از 0 °C) | روز |
| TR | تعداد شب‌های حاره‌ای (دمای کمینه روزانه بیشتر از 20 °C) | روز |
| GSL | طول فصل رویش (دوره زمانی بین زمانی که دمای روزانه برای بیش از ۵ روز بیش از ۵ درجه سانتی‌گراد و کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد باشد) | روز |
| DTR | دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما (میانگین اختلاف دما بین دماهای حداقل و حداکثر روزانه) | °C |
| CSDI | نمایه طول مدت سرما، تعداد روزهایی که حداقل شش روز متوالی دمای کمینه کمتر از صدک دهم باشد. | روز |
| WSDI | نمایه طول مدت گرما، تعداد روزهایی که حداقل شش روز متوالی دمای بیشینه آنها بیشتر از صدک نودم باشد. | روز |

t_i تعداد داده‌های گره‌دار در هر دسته است. دسته گره‌دار، مجموعه نمونه داده‌هایی است که دارای مقادیر مشابه هستند. در مواردی که تعداد نمونه‌ها $n > 10$ باشد، آماره آزمون نرمال استاندارد (Z) از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

اگر مقدار قدر مطلق آماره Z کمتر از یک مقدار بحرانی (برگرفته از جدول نرمال استاندارد برای $\alpha = 0.1$ برابر با $Z_{1-\alpha/2} = 1.64$) باشد، فرض صفر (H_0) عدم وجود روند معنی‌دار پذیرفته می‌شود، در غیر این صورت، زمانی که $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ باشد، روند معنی‌دار افزایشی یا کاهش‌ی در سری زمانی وجود دارد و فرض صفر رد می‌شود.

روش برآوردگر شیب تایل - شن Theil-Sen

مقدار شیب خط روند که میزان تغییرات روند زمانی داده‌ها را بیان می‌کند با استفاده از روش پیشنهادی تایل (۲۸) و شن (۲۴)

هیدرولوژیکی و هواشناسی توصیه شده است. از جمله ویژگی‌های این آزمون این است که این آزمون به توزیع احتمالاتی داده‌ها وابسته نیست و نسبت به داده‌های پرت حساس نیست. مراحل محاسبه آماره آزمون من - کندال به شرح ذیل است:

گام نخست در به دست آوردن آماره Z آزمون، محاسبه آماره S به صورت رابطه ۲ است:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n (x_j - x_k) \quad (2)$$

که در آن n تعداد مشاهدات، x_j و x_k به ترتیب ژامین و k امین داده مشاهده‌ای هستند و $\text{sgn}(\cdot)$ تابع علامت است که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

سپس، واریانس آماره S از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (4)$$

که در آن n تعداد داده‌ها، m تعداد دسته‌ها با داده‌های گره‌دار و

جدول ۴. شیب متوسط روند نمایه‌های حدی دما برای دوره مشاهداتی و مدل- سناریوهای اقلیمی مختلف

| NOR- RCP8.5 | NOR- RCP4.5 | MPI- RCP8.5 | MPI- RCP4.5 | CCSM- RCP8.5 | CCSM- RCP4.5 | مشاهداتی | مدل- سناریو |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------|
| | | | | | | | نمایه حدی دما |
| -۴/۱۶ | -۳/۴۵ | -۴/۴۰ | -۳/۰۰ | -۲/۶۱ | ۱۷/۱۱ | -۳/۹۱ | FD (day/decade) |
| ۰/۳۲ | ۰/۳۴ | ۲/۸۸ | ۳/۷۸ | ۳/۹۱ | ۳/۲۱ | ۵/۴۸ | SU (day/decade) |
| -۰/۴۱ | -۰/۹۱ | ۰/۰۲ | -۰/۰۹ | -۰/۹۸ | ۲/۳۳ | -۱/۵۶ | ID (day/decade) |
| ۵/۸۸ | ۱/۵۱ | ۶/۶۲ | ۴/۵۰ | ۷/۳۳ | -۳۰/۷۰ | ۵/۶۳ | TR (day/decade) |
| ۲/۰۵ | ۵/۰۴ | ۳/۹۴ | ۴/۴۴ | ۲/۳۴ | -۱۱/۷۰ | ۵/۲۷ | GSL (day/decade) |
| ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۸ | ۰/۰۵ | ۰/۱۱ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | DTR (°C/decade) |
| -۰/۳۷ | -۰/۲۳ | -۰/۰۴ | -۰/۱۱ | -۰/۲۲ | ۲/۲۸ | -۰/۲۵ | CSDI (day/decade) |
| -۰/۰۴ | ۰/۰۲ | ۰/۶۳ | ۰/۱۴ | ۰/۱۷ | -۰/۸۰ | ۰/۴۱ | WSDI (day/decade) |

تعداد روزهای تابستانی (SU)، تعداد روزهای یخی (ID)، تعداد شب‌های حاره‌ای (TR)، طول فصل رویش (GSL)، دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما (DTR)، طول مدت سرما (CSDI) و طول مدت گرما (WSDI) را نشان می‌دهند.

نمایه FD

نتایج روند متغیر FD برای دوره مشاهداتی نشان داد که حدود ۸۱ درصد ایستگاه‌ها روند منفی را در این نمایه تجربه کرده‌اند که حدود ۳۸ درصد این ایستگاه‌ها روند منفی معنی‌داری داشته‌اند (شکل ۲- الف). این بدان معنی است که تعداد روزهای یخبندان تقریباً در یک‌سوم ایستگاه‌های کشور کاهش معنی‌داری داشته است. علاوه بر این، میانگین تغییرات روند برای دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۴ در بیشتر مدل‌ها تحت هر دو سناریو حاکی از کاهش تعداد روزهای یخبندان در سال‌های آتی است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، فقط در مدل- سناریو CCSM4-RCP4.5 (شکل ۲- ب) نتایج تحلیل روند متفاوت بود، اما تغییرات روند در این مدل تحت سناریوی RCP8.5 و سایر مدل‌ها تحت هر دو سناریو یکنواخت است. به عبارت دیگر، میانگین روند FD در مدل‌های یاد شده منفی است که در RCP8.5 این مقدار نسبت به RCP4.5 محسوس‌تر است (جدول ۴).

که به عنوان برآوردگر شن نیز نامیده می‌شود، محاسبه شد. شیب میانه تایل- شن یک روش ناپارامتری برای تحلیل روند است که داده‌های پرت بر روی آن اثری ندارند و شیب میانه بین هر ترکیب جفتی از داده‌ها طی زمان را به عنوان شیب خط روند برآورد می‌کند. برای محاسبه این شیب، ابتدا شیب N جفت داده به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

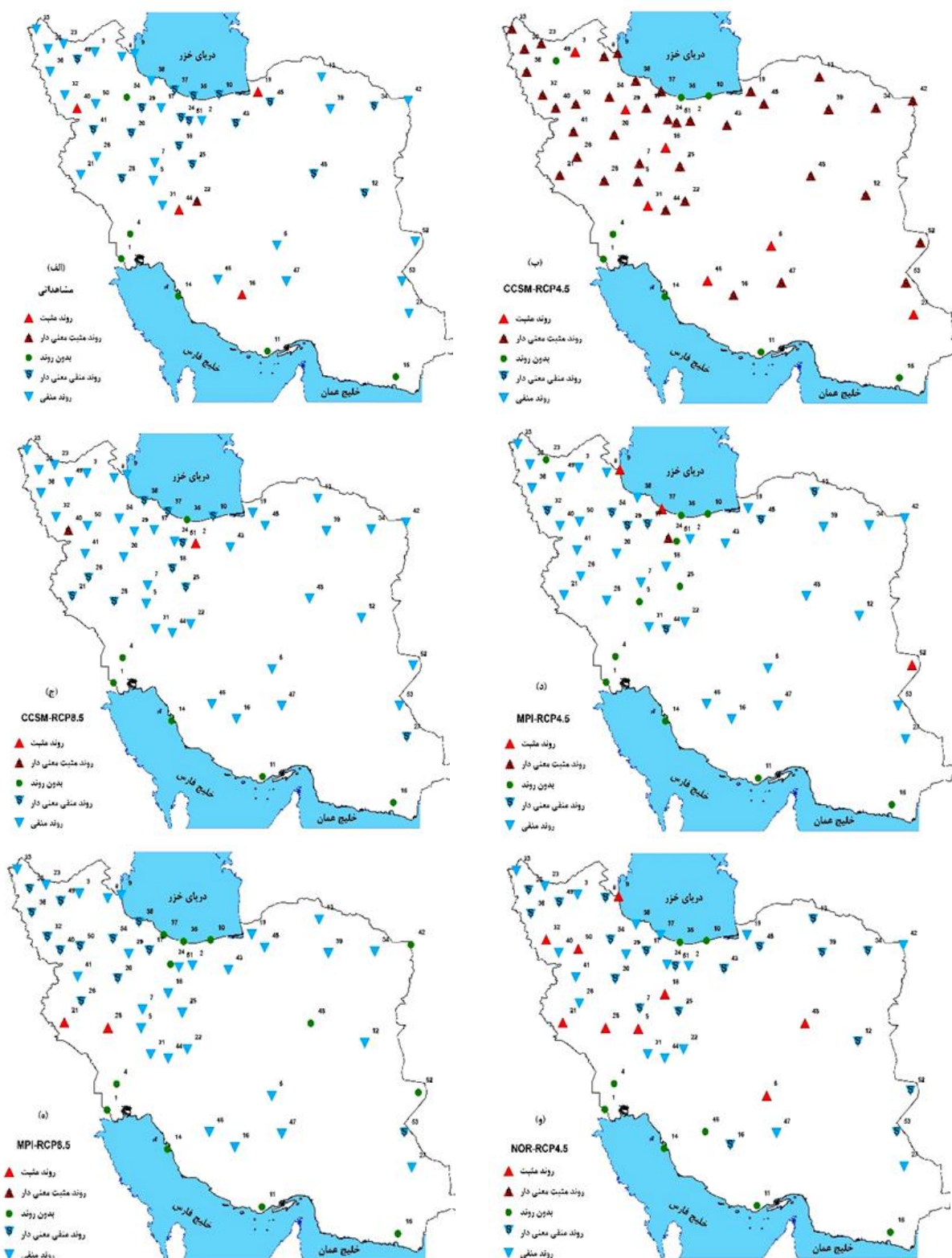
$$\beta_k = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (6)$$

که در آن x_j و x_i به ترتیب مقدار داده‌های اقلیمی در زمان j و i هستند، $N = n(n-1)/2$ و n تعداد کل داده‌های مشاهداتی است. میانه N مقدار شیب β_k ، برآوردگر شیب شن است. مقدار منفی آماره روند کاهشی و مقدار مثبت آن روند افزایشی سری زمانی داده‌ها را نشان می‌دهد.

نتایج

تحلیل روند نمایه‌های حدی دما

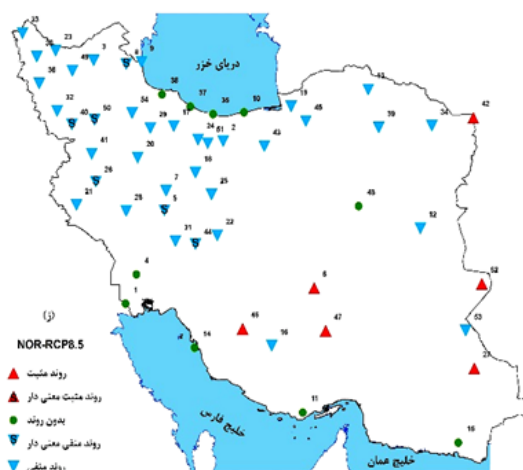
در این بخش، به ارائه نتایج تحلیل روند و شیب نمایه‌های حدی دما، مورد استفاده در این مطالعه برای دوره مشاهداتی و مدل- سناریوهای اقلیمی مختلف برای دوره آینده پرداخته می‌شود. جدول ۴ جزئیات شیب متوسط روند نمایه‌های حدی دما طی یک دهه را بیان می‌کند. شکل‌های ۲ تا ۹ نیز به ترتیب روند مکانی نمایه‌های حدی دما شامل تعداد روزهای یخبندان (FD)،



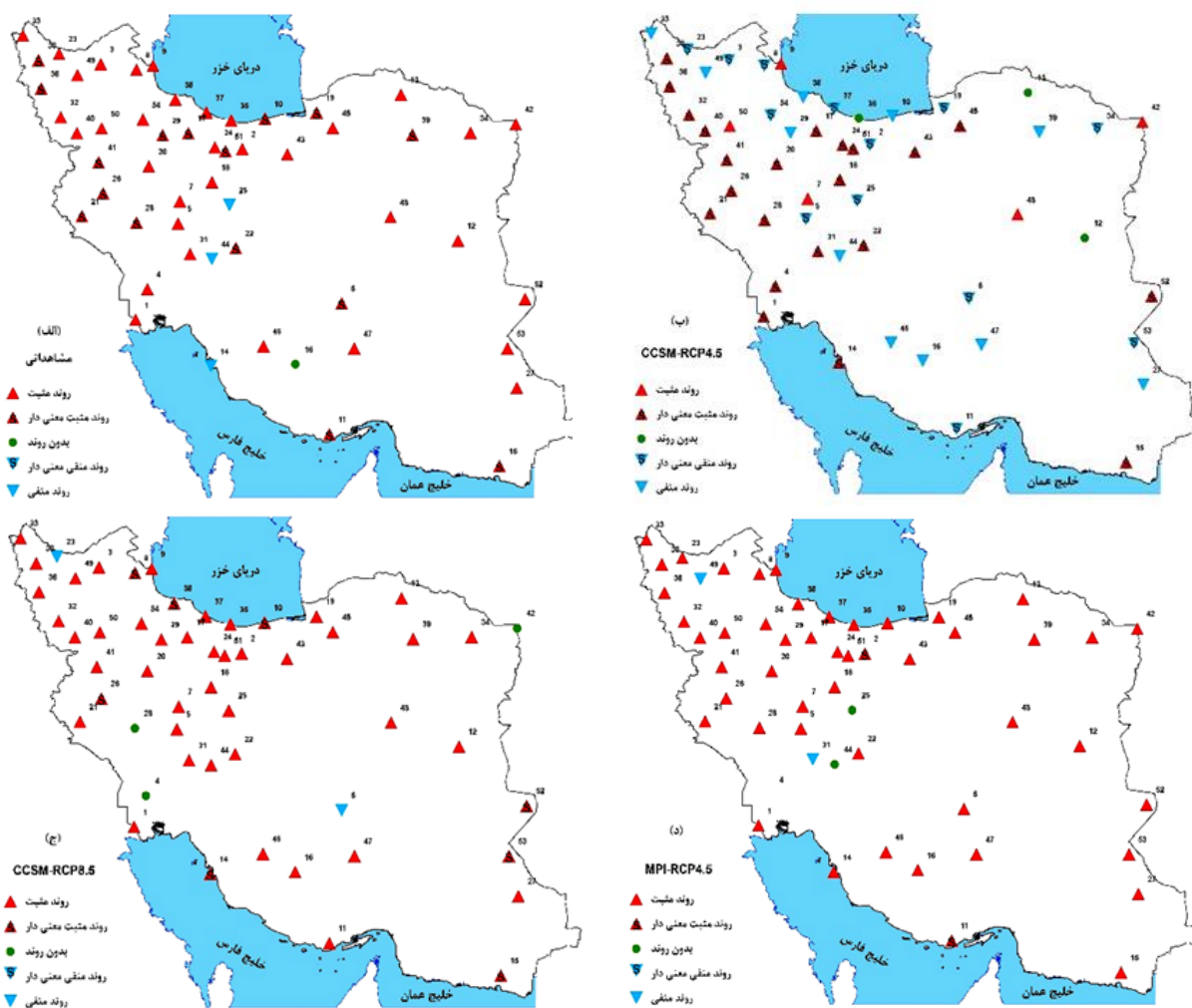
شکل ۲. روندهای مکانی FD برای مدل - سناریوهای: (الف) دوره مشاهداتی، (ب) CCSM-RCP4.5، (ج) CCSM-RCP8.5، (د) MPI-

RCP4.5، (ه) MPI-RCP8.5، (و) و (ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز رنگ مشخص شده‌اند.)



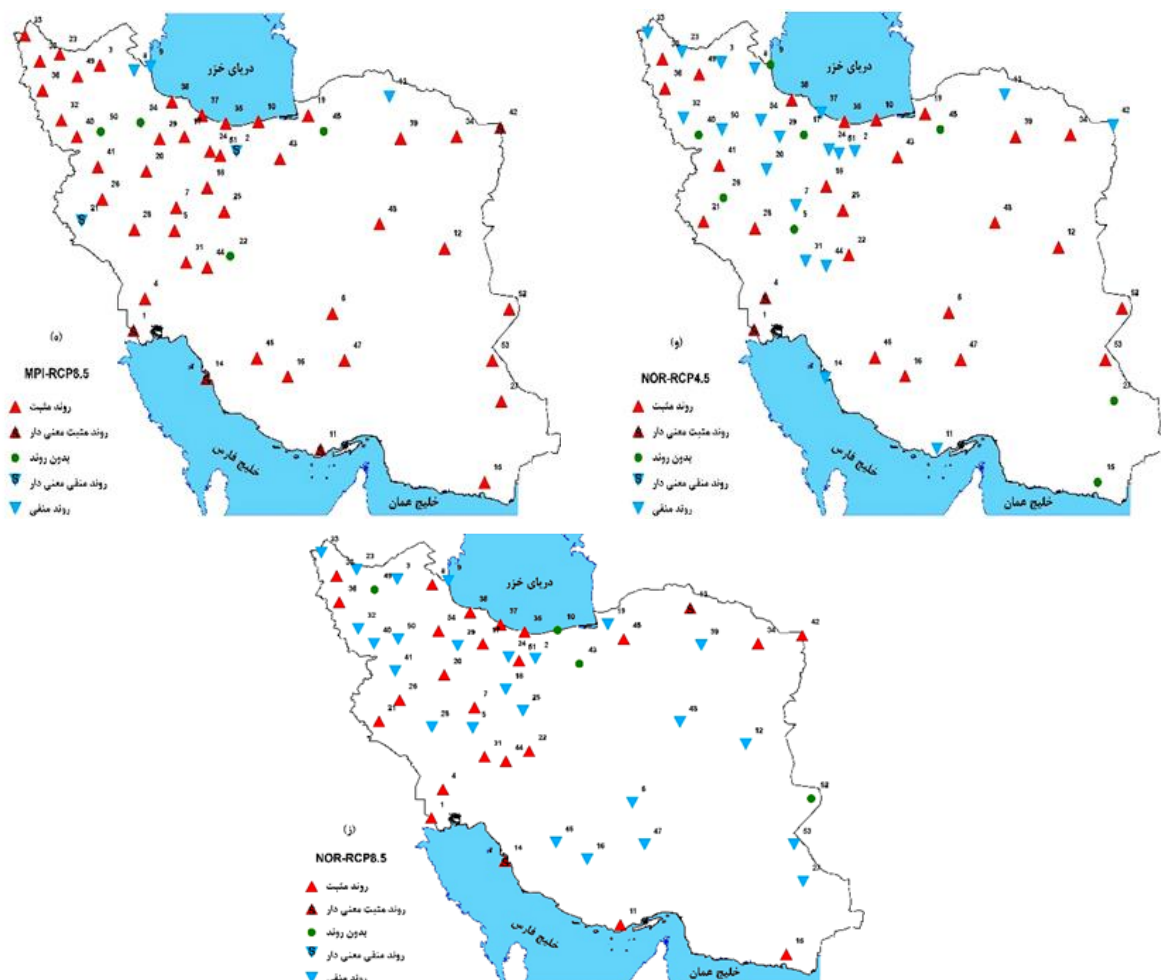
ادامه شکل ۲



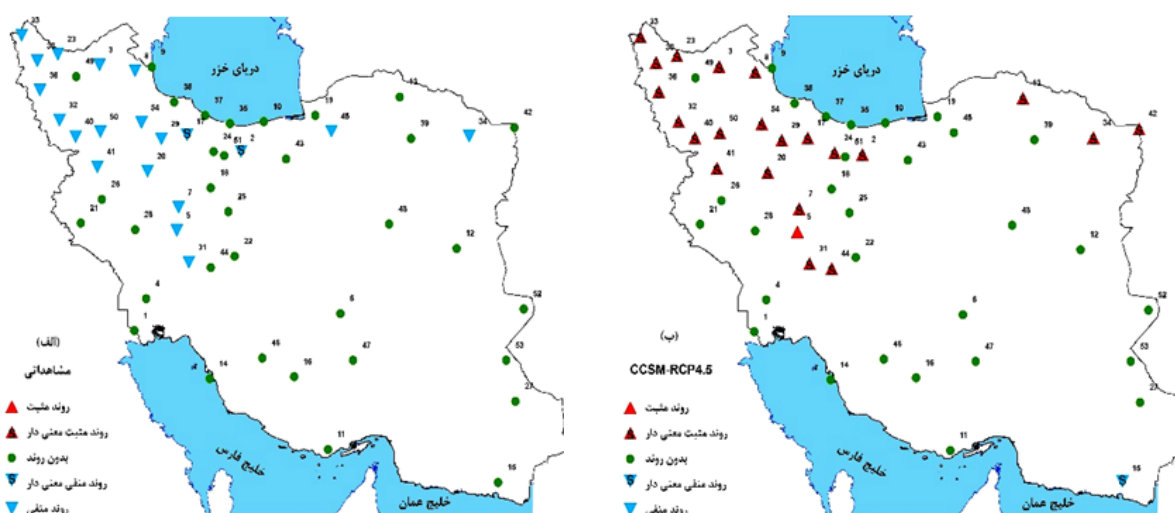
شکل ۳. روندهای مکانی SU برای مدل- سناریوهای: الف) دوره مشاهداتی، ب) CCSM-RCP4.5، ج) CCSM-RCP8.5،

د) MPI-RCP4.5، ه) MPI-RCP8.5، و) NOR-RCP4.5، ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز مشخص شده‌اند.)



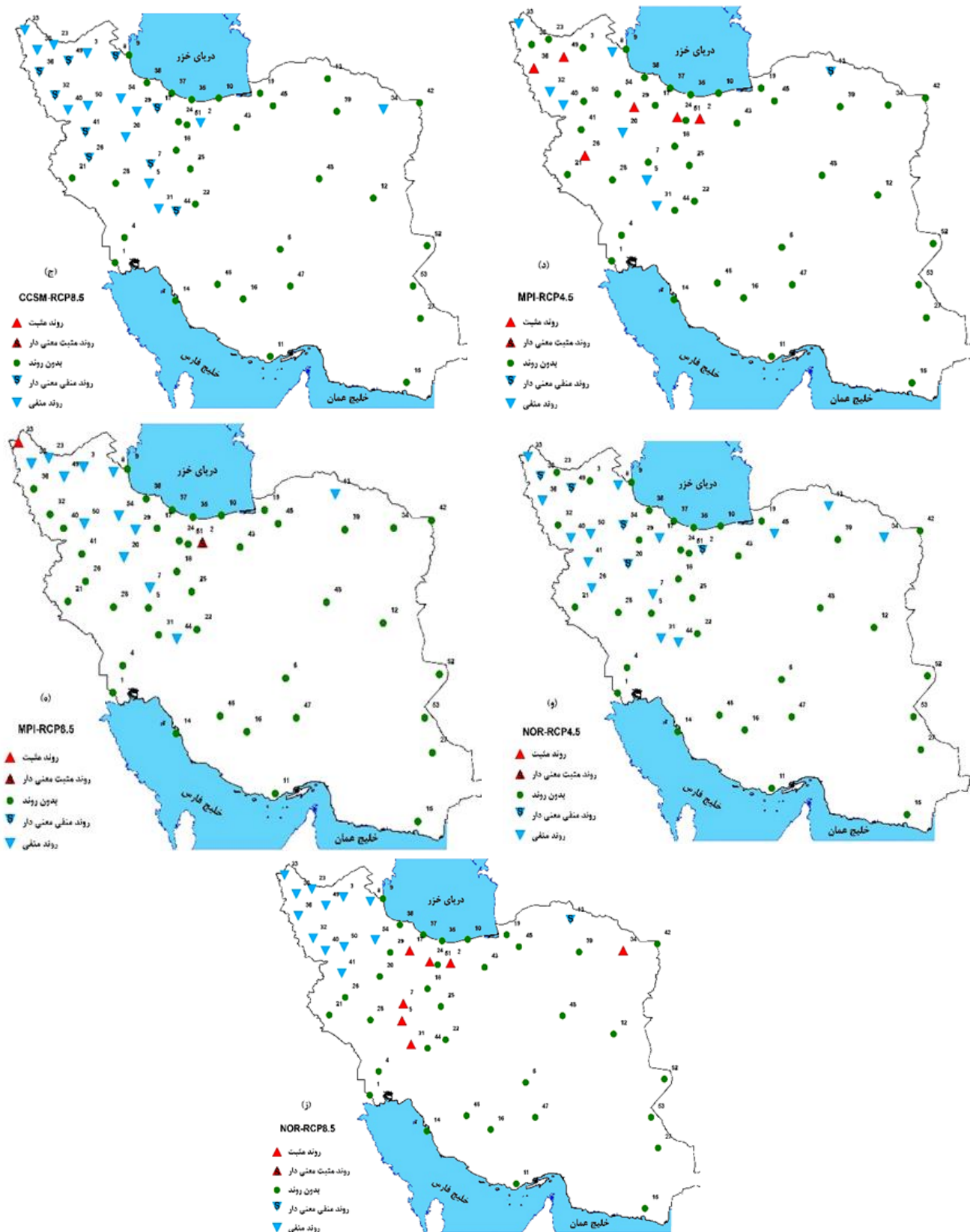
ادامه شکل ۳



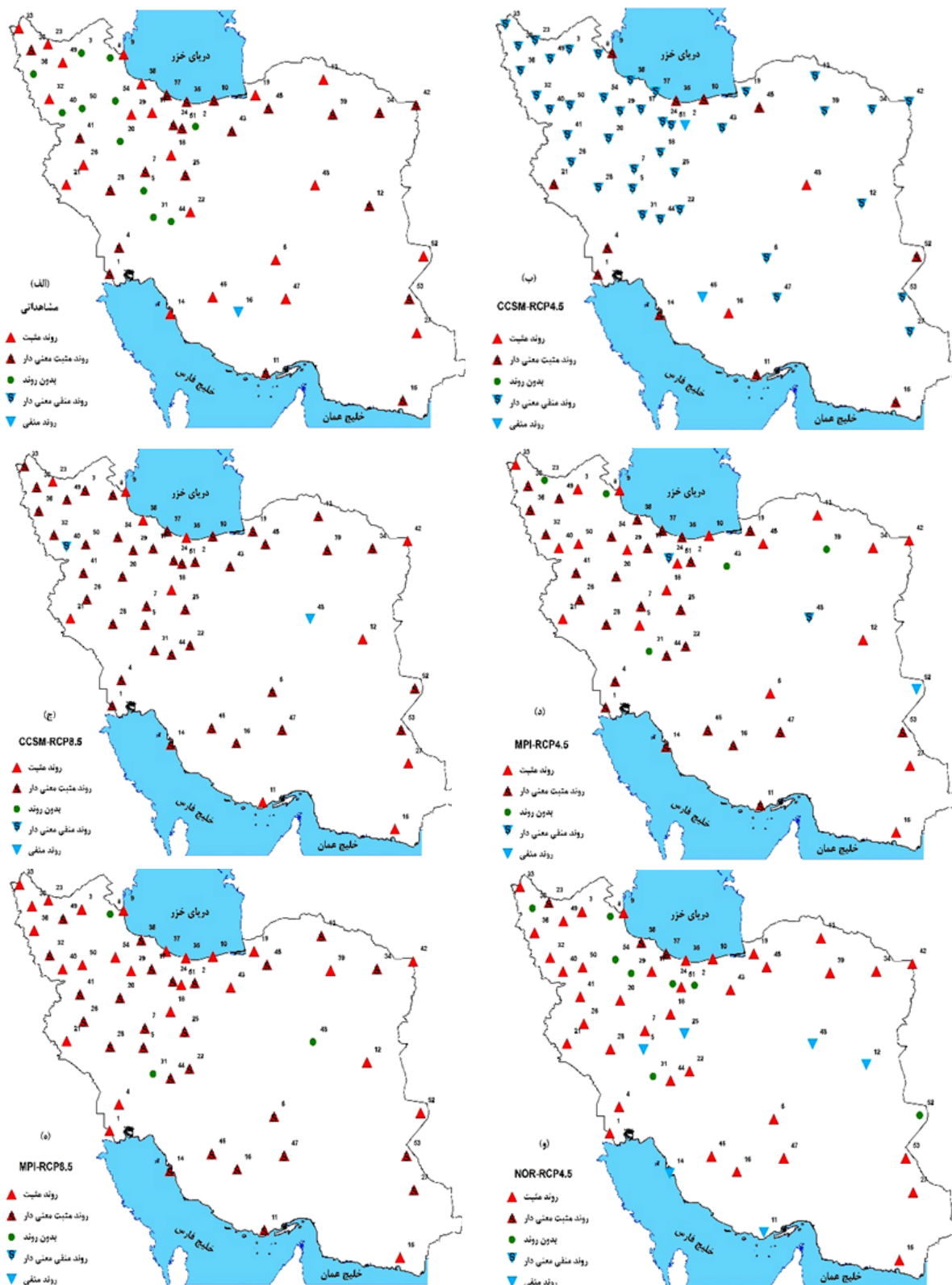
شکل ۴. روندهای مکانی ID برای مدل - سناریوهای (الف) دوره مشاهداتی، (ب) CCSM-RCP4.5، (ج) CCSM-RCP8.5.

(د) MPI-RCP4.5، (ه) MPI-RCP8.5، (و) NOR-RCP4.5 و (ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز رنگ مشخص شده‌اند.)



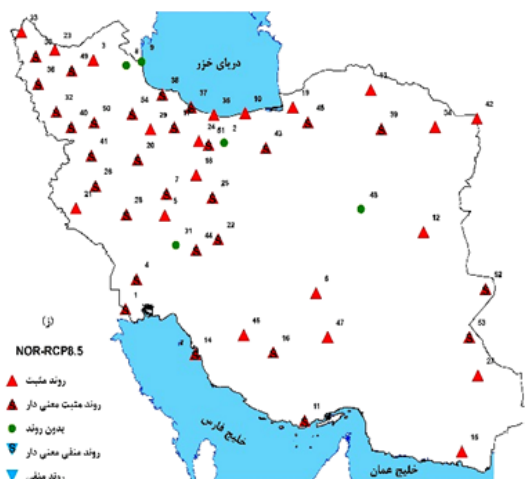
ادامه شکل ۴



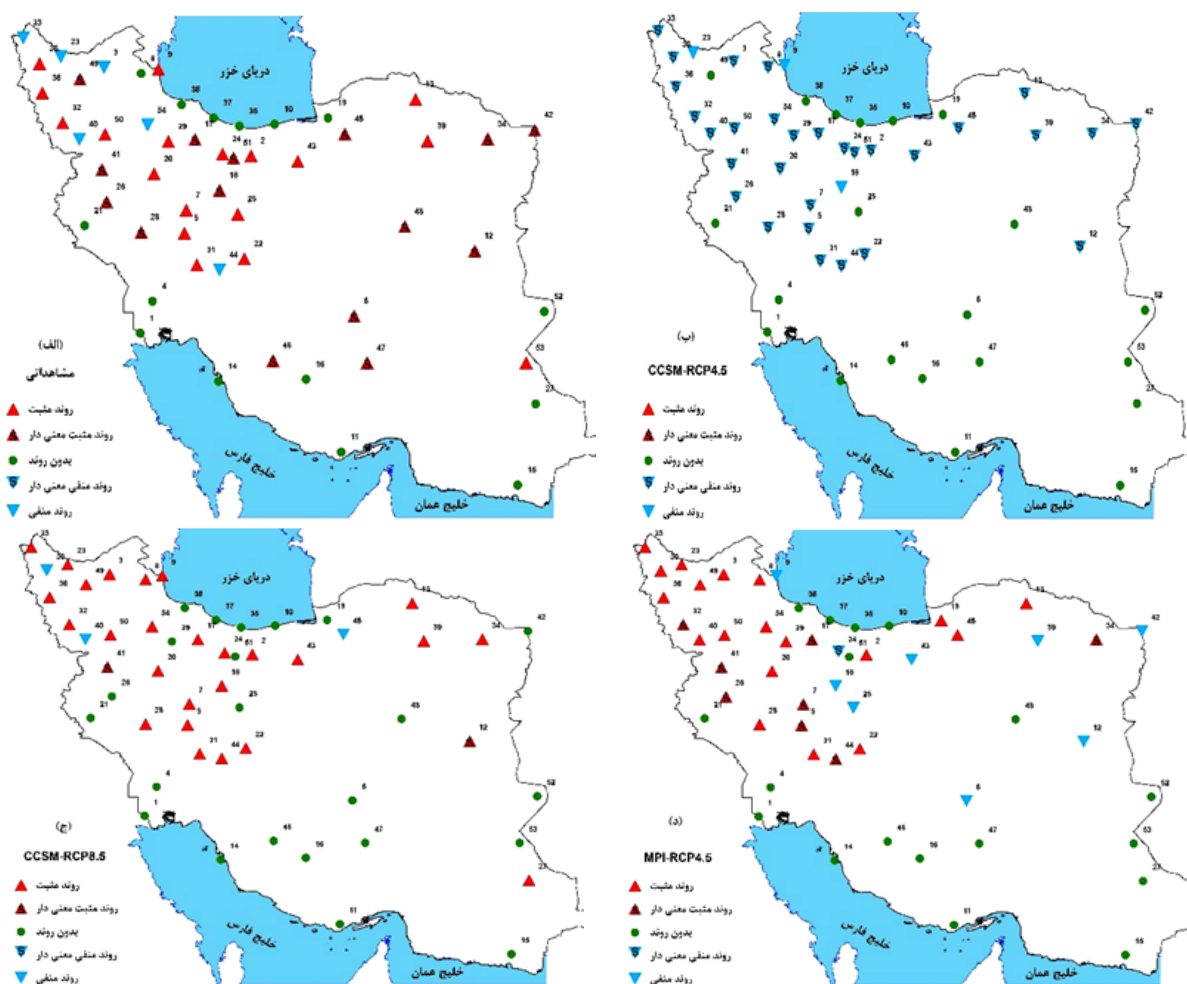
شکل ۵. روندهای مکانی TR برای مدل- سناریوهای: الف) دوره مشاهداتی، ب) CCSM-RCP4.5، ج) CCSM-RCP8.5،

د) MPI-RCP4.5، ه) MPI-RCP8.5، و) NOR-RCP4.5 و ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی‌دار با حرف S داخل مثلث و عدم‌روند با دایره سبز رنگ مشخص شده‌اند.)



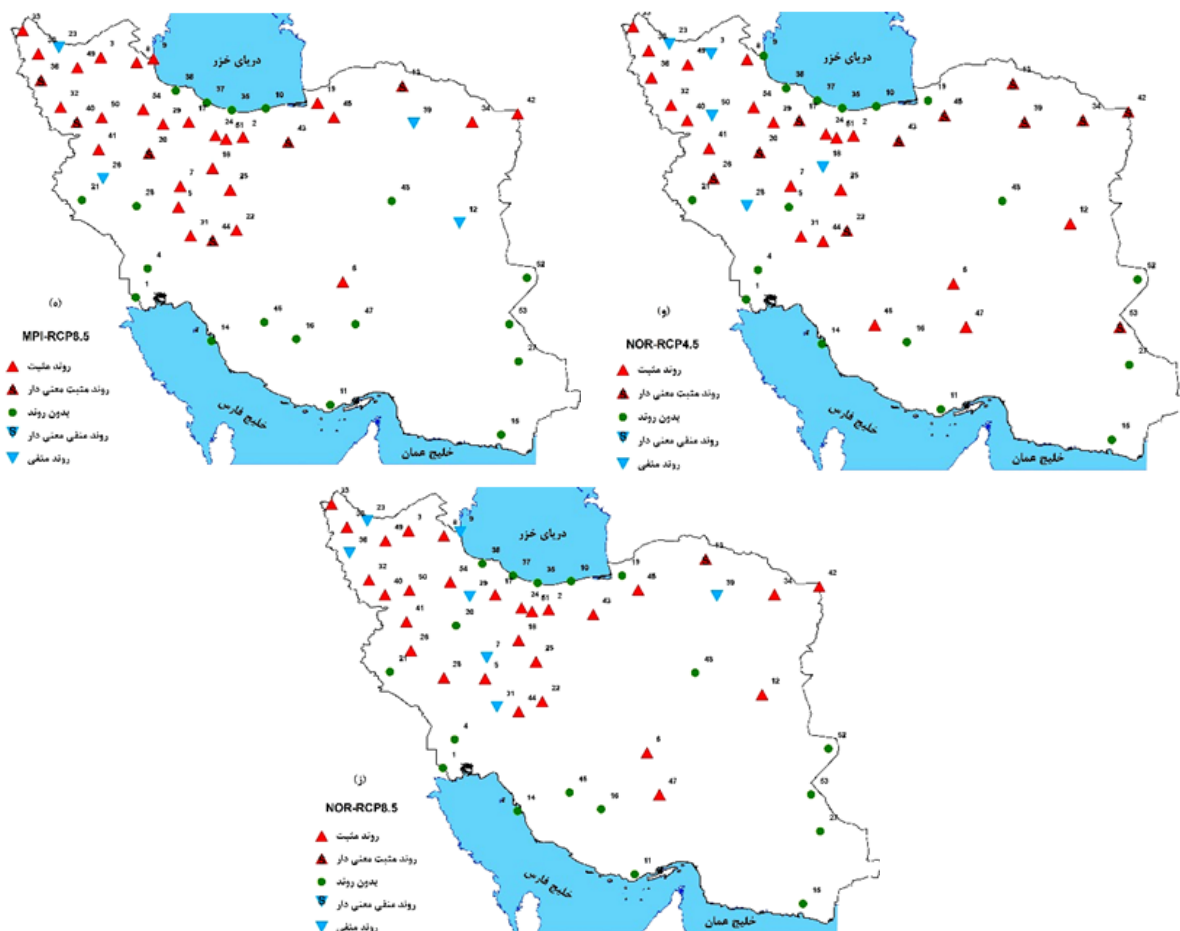
ادامه شکل ۵



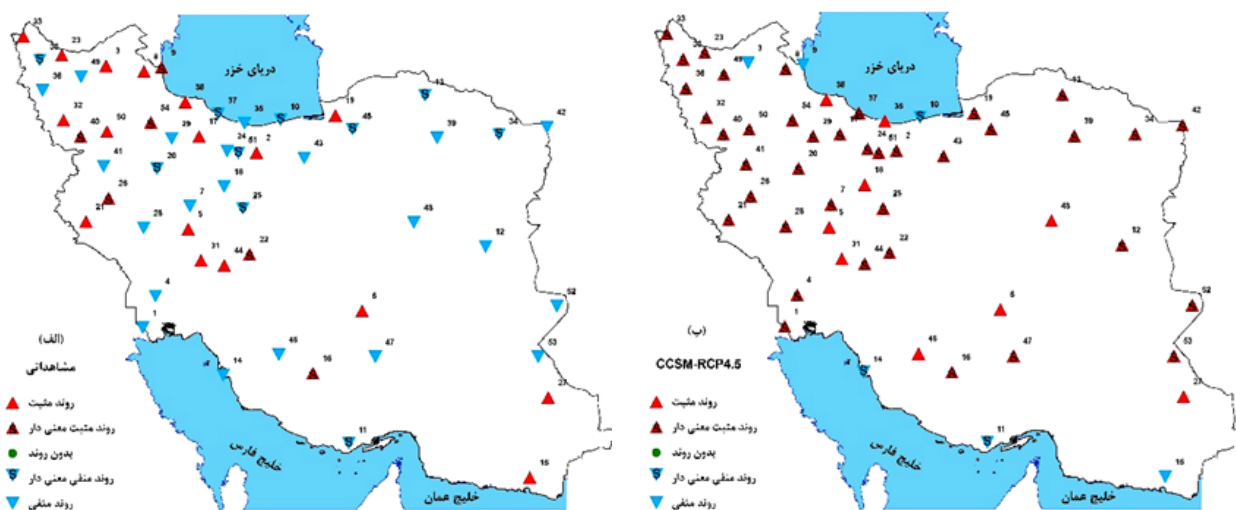
شکل ۶. روندهای مکانی برای مدل - سناریوهای: الف) دوره مشاهداتی، ب) CCSM-RCP4.5، ج) CCSM-RCP8.5.

د) MPI-RCP4.5، ه) MPI-RCP8.5، و) NOR-RCP4.5، ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز مشخص شده‌اند.)



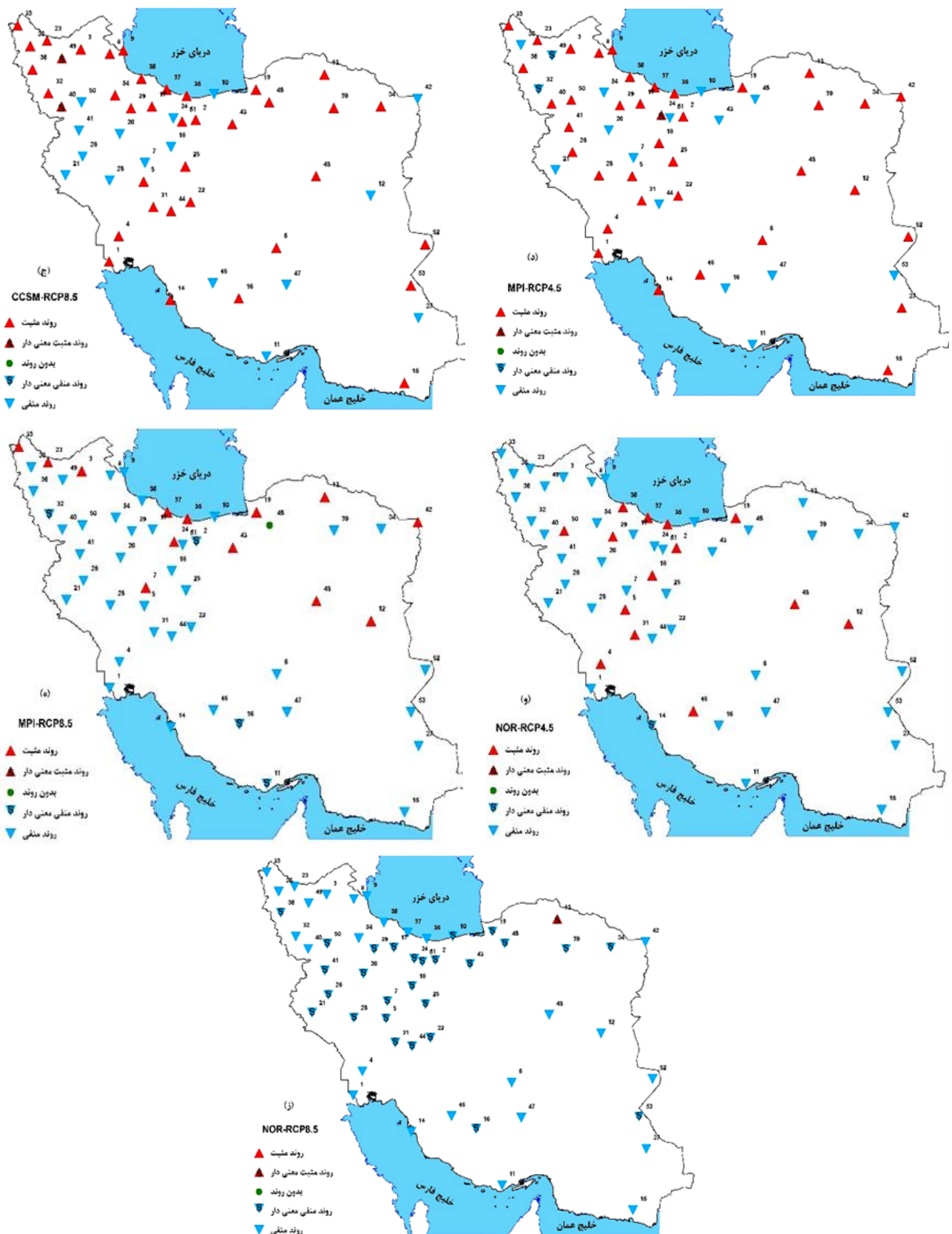
ادامه شکل ۶



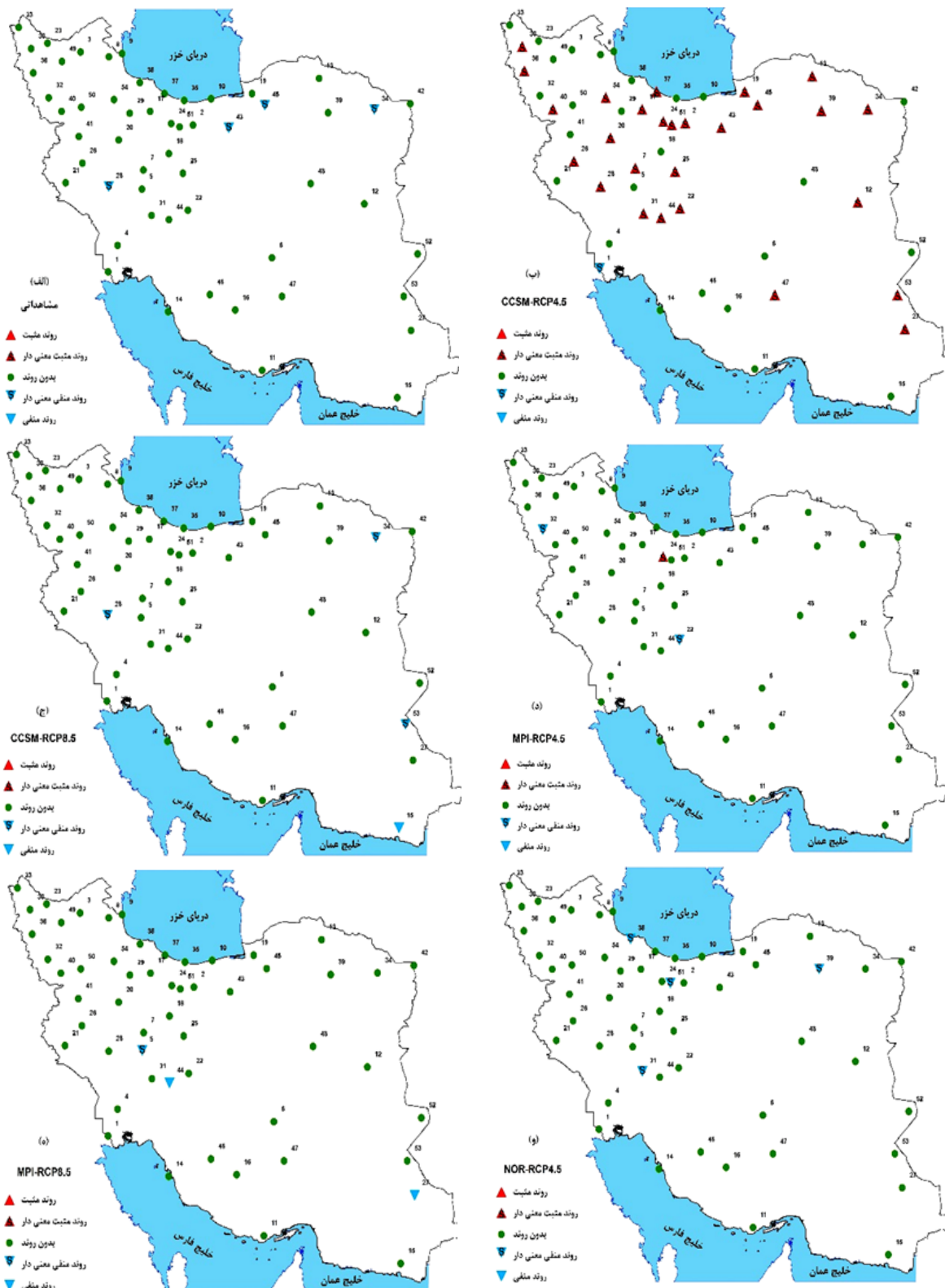
شکل ۷. روندهای مکانی DTR برای مدل- سناریوهای: (الف) دوره مشاهداتی، (ب) CCSM-RCP4.5، (ج) CCSM-RCP8.5.

(د) MPI-RCP4.5، (ه) MPI-RCP8.5، (و) NOR-RCP4.5 و (ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی‌دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز مشخص شده‌اند.)



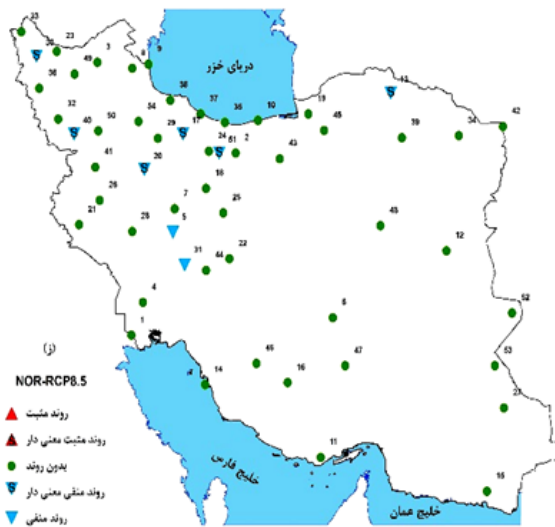
ادامه شکل ۷



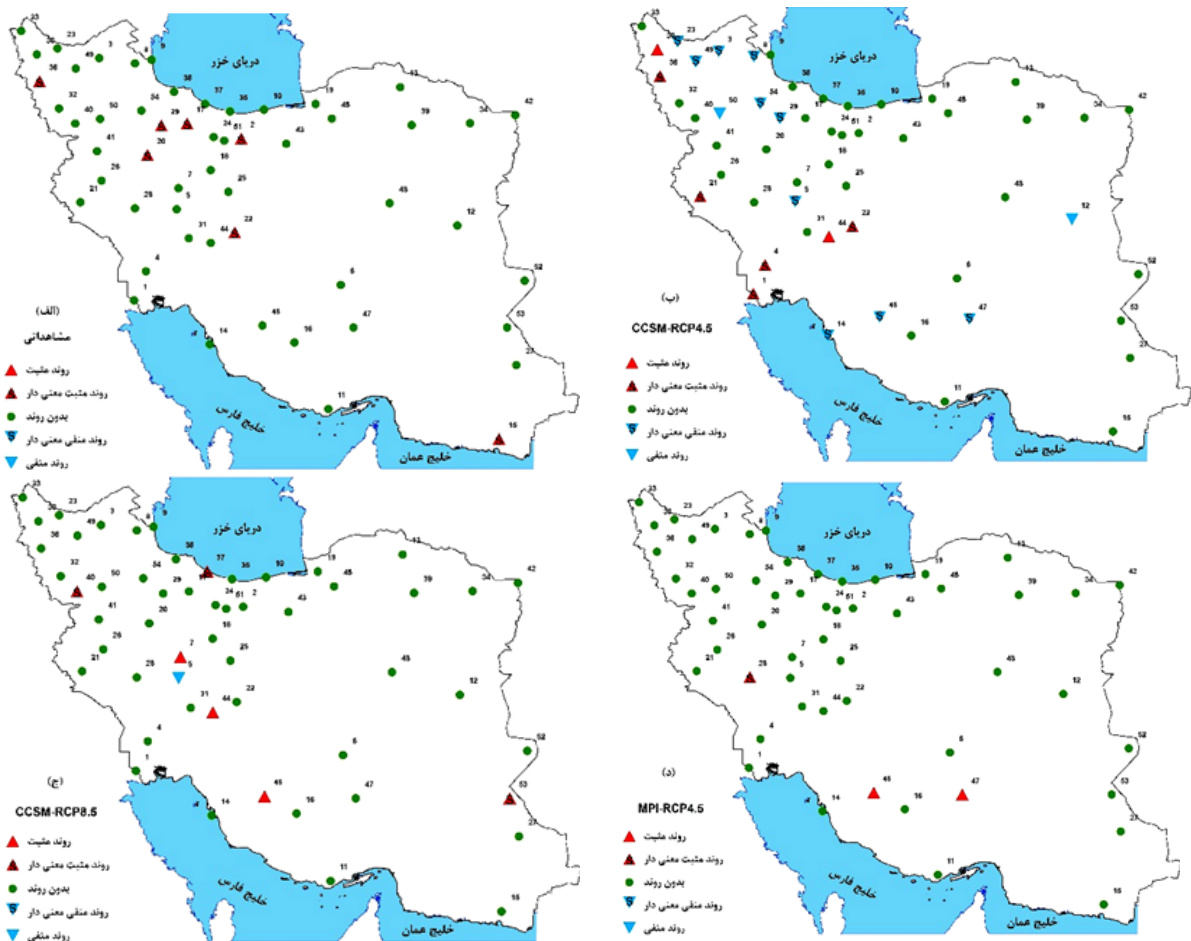
شکل ۸. روندهای مکانی CSDI برای مدل - سناریوهای: الف) دوره مشاهداتی، ب) CCSM-RCP4.5، ج) CCSM-RCP8.5.

د) MPI-RCP4.5، ه) MPI-RCP8.5، و) NOR-RCP4.5 و ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)

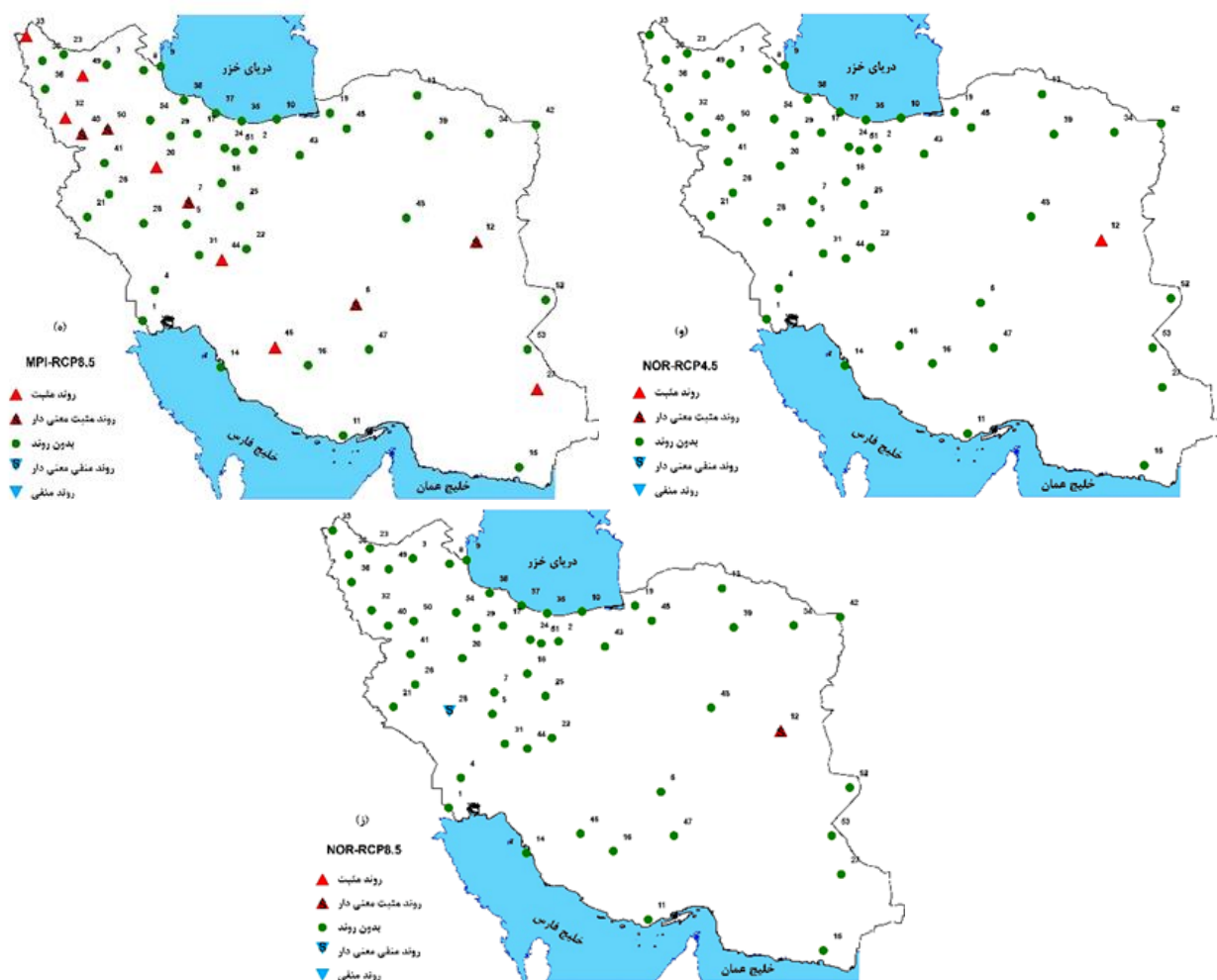
(نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز مشخص شده‌اند.)



ادامه شکل ۸



شکل ۹. روندهای مکانی WSDI برای مدل-سناریوهای: الف) دوره مشاهداتی، ب) CCSM-RCP4.5، ج) CCSM-RCP8.5، د) MPI-RCP4.5، ه) MPI-RCP8.5، و) NOR-RCP4.5 و ز) NOR-RCP8.5 در ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)
 (نکته: روند مثبت با مثلث قرمز، روند منفی با مثلث آبی، روند معنی دار با حرف S داخل مثلث و عدم روند با دایره سبز رنگ مشخص شده‌اند.)



ادامه شکل ۹

نمایه SU

روند تغییرات نمایه SU برای دوره مشاهداتی نشان داد که میانگین تعداد روزهای تابستانی در کشور حدود ۱۵ روز افزایش یافته است (جدول ۴) و حدود ۹۲ درصد ایستگاه‌ها روند مثبتی (۳۲ درصد معنی‌دار) را در این نمایه تجربه کرده‌اند (شکل ۳-الف). تغییرات روند این نمایه در آینده نیز حاکی از آن است که به‌طور متوسط، تعداد روزهای تابستانی افزایش خواهد یافت و بیشتر ایستگاه‌ها روند مثبتی را در این نمایه بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل-سناریوها تجربه کرده‌اند. به نحوی که، برای مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای MPI و CCSM در مقایسه با مدل NOR، تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها به‌صورت پراکنده در سرتاسر کشور، روند افزایشی SU را نشان می‌دهند و

شیب تغییرات آنها نیز نسبت به مدل NOR بیشتر است.

نمایه ID

بررسی روند تغییرات نمایه ID در دوره مشاهداتی نشان داد که بیشتر ایستگاه‌ها (حدود ۶۳ درصد ایستگاه‌ها) که بیشتر در ناحیه مرکزی و نیمه‌شرقی کشور واقع شده‌اند، فاقد روند هستند و در سایر ایستگاه‌ها، روند منفی (کاهش تعداد روزهای یخی) مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها نیز حاکی از آن است که تقریباً در همه مدل-سناریوها، تعداد زیادی از ایستگاه‌ها فاقد روند هستند و در سایر ایستگاه‌ها نیز، روند منفی خواهد بود که این موضوع می‌تواند بیان‌کننده ادامه روند کاهش تعداد روزهای یخی در آینده باشد. اگرچه، نتایج شبیه‌سازی مدل‌های MPI و CCSM

نمایه DTR

روند مکانی نمایه DTR در شکل ۷ نشان می‌دهد که روند مشخصی در نمایه دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما برای دوره آتی و بر اساس شبیه‌سازی مدل-سناریوهای مختلف وجود ندارد. بر اساس خروجی مدل‌های CCSM-RCP4.5&8.5 و MPI-RCP4.5، بیشتر ایستگاه‌ها روند مثبت داشته‌اند (شکل ۷-ب و ۷-د)؛ در حالی که، شبیه‌سازی مدل‌های MPI-RCP8.5 و NOR-RCP4.5&8.5 نشان می‌دهد که بیشتر ایستگاه‌ها روند منفی خواهند داشت (شکل ۷-ه و ۷-ز) و نتایج برای ایستگاه‌ها همسو نیستند. علاوه بر این، با حرکت از سناریو RCP4.5 به سوی RCP8.5 بر تعداد ایستگاه‌ها با روند منفی افزوده می‌شود و شیب روند DTR به‌طور میانگین بین ۰/۲ تا ۰/۱۱ درجه سانتی‌گراد در طی یک دهه متغیر است. از لحاظ تحلیل مکانی نیز، روندهای مثبت و منفی بسته به نوع مدل-سناریو به‌طور پراکنده در سطح کشور قابل مشاهده هستند.

نمایه CSDI

مطابق شکل ۸، طول مدت سرما تقریباً در کل کشور برای دوره مشاهداتی و همه مدل-سناریوها، به جز CCSM-RCP4.5، فاقد روند است (حدود بیش از ۹۲ درصد ایستگاه‌ها). نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها-سناریوها نشان می‌دهد که فقط تعداد اندکی از ایستگاه‌ها روند منفی دارند. به‌طور کلی، نتایج مدل-سناریوهای مختلف حاکی از آن است که طول مدت سرما تغییرات قابل توجهی نخواهد داشت و روندی را برای دوره آینده از خود نشان نخواهد داد و میانگین شیب منفی روند نمایه CSDI بین ۰/۰۴ تا ۰/۳۷ روز طی یک دهه متغیر است (جدول ۴).

نمایه WSDI

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۹، طول مدت گرما برای دوره مشاهداتی در بیشتر ایستگاه‌ها فاقد روند بود و در حدود ۱۳ درصد ایستگاه‌ها روند مثبت معنی‌دار مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی این نمایه برای دوره آینده نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌ها، طول مدت گرما روند مشخص و تغییر چندانی ندارد

تحت سناریو RCP4.5 نشان‌دهنده روند مثبت نمایه ID در برخی ایستگاه‌های واقع شده در ناحیه شمال‌غربی کشور است.

نمایه TR

شکل ۵-الف نشان می‌دهد که تعداد روزهای حاره‌ای در دوره مشاهداتی در بیشتر ایستگاه‌ها افزایش یافته است (۷۷ درصد ایستگاه‌ها دارای روند مثبت بودند). شبیه‌سازی این نمایه برای دوره آینده نیز حاکی از افزایش تعداد روزهای حاره‌ای در سرتاسر کشور ایران در همه مدل-سناریوها، به‌جز CCSM-RCP4.5 (شکل ۵-ب)، است؛ به نحوی که بیش از ۷۰ درصد ایستگاه‌ها روند مثبت دارند و تعداد آنها تحت سناریو RCP8.5 نسبت به RCP4.5 افزایش یافته است. میانگین شیب روند نمایه نشان می‌دهد که تعداد روزهای حاره‌ای بسته به نوع مدل-سناریو بین ۱/۵ تا ۷/۳ روز در طول یک دهه افزایش می‌یابد که در سناریو RCP8.5 میانگین روند نمایه نسبت به RCP4.5 افزایشی است (جدول ۴).

نمایه GSL

بر اساس نتایج جدول ۴، تغییرات روند در نمایه GSL نشان داد که به‌طور متوسط، طول فصل رویش در حال افزایش است. مقدار شیب مثبت روند این نمایه بسته به نوع داده اقلیمی و سناریو مورد استفاده به‌طور متوسط بین ۲ تا ۵/۳ روز در طی یک دهه متغیر است. روند نمایه GSL برای دوره مشاهداتی در ۶۱ درصد ایستگاه‌ها افزایش یافته است که در ۴۵ درصد آنها روند معنی‌داری از خود نشان دادند (شکل ۶-الف). شبیه‌سازی نتایج آینده نیز نشان‌دهنده آن است که مقدار این نمایه در نواحی شمال، شمال‌غربی و غرب کشور افزایش خواهد یافت. از نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که به جز در مدل CCSM-RCP4.5 که روندی کاملاً متفاوت ارزیابی کرده است، سایر مدل-سناریوهای مورد استفاده برای بیشتر ایستگاه‌ها، روند مثبتی دارند (شکل ۶-ج و ۶-ز). همچنین، شکل ۶ نشان می‌دهد که در همه مدل-سناریوها، ایستگاه‌های واقع شده در نواحی نیمه‌جنوبی و خط ساحلی شمالی کشور فاقد روند در GSL خواهند بود.

شمال غرب کشور) نمایه ID روند کاهشی خواهد داشت. همچنین، بیشتر ایستگاه‌هایی که روند منفی معنی‌دار داشتند در این نواحی مشاهده شدند. یافته‌های پژوهش در تطابق با مطالعه سلطانی و همکاران (۲۶) است که نشان دادند تغییرات ارتفاع با نمایه‌های FD و ID دارای همبستگی هستند و روند کاهشی این نمایه‌ها در مناطق کوهستانی مشاهده می‌شود. این در حالی است که تعداد روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای در بیشتر ایستگاه‌ها در آینده افزایش خواهد یافت و برای دوره مشاهداتی نیز، غالب ایستگاه‌ها روند افزایشی داشتند. در راستای تأیید نتایج پژوهش حاضر، صدیق و همکاران (۲۳) نیز نشان دادند که در بیشتر مناطق شمالی پاکستان تحت شرایط تغییر اقلیم، تعداد روزهای تابستانی روند افزایشی با بالاترین نرخ ۳/۸۹ روز بر دهه داشته است. بنابراین، روند افزایشی نمایه‌های گرم و کاهشی نمایه‌های سرد حاکی از تداوم و افزایش میزان گرما در بیشتر مناطق کشور در آینده خواهد بود. این تداوم می‌تواند برای استان‌های ساحلی بخش‌های جنوبی کشور بسیار حائز اهمیت باشد. در چند سال اخیر، اگرچه اطلاعات دقیقی در خصوص گرم‌زدگی در استان‌های جنوبی و جنوب شرقی کشور در دسترس نیست، اما شواهد حکایت از افزایش میزان مرگ و میر ناشی از گرم‌زدگی که آن نیز نتیجه افزایش دما است، دارد. به عبارتی دیگر، این مسئله در آینده می‌تواند یک چالش بسیار مهم به‌خصوص برای کودکان و سالمندان تلقی شود و سلامت انسان را به مخاطره اندازد. واقفی و همکاران (۲۹) نیز در تطابق با پژوهش حاضر، در بررسی مقادیر حدی اقلیمی ایران در آینده نیز نشان دادند که دمای بیشینه با نرخ بین ۱/۱ تا ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد برای دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ در سرتاسر ایران افزایش می‌یابد و این موضوع، مسئله سلامتی انسان‌ها و مرگ و میر آنها را به مخاطره می‌اندازد.

به‌طور کلی، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که کشور ایران در معرض خطرهای احتمالی رویدادهای حدی آب و هوایی است

و در برخی مدل-سناریوها، تعداد کمی از ایستگاه‌ها روند منفی نشان دادند. به‌عبارت دیگر، نمایه WSDI تقریباً در کل سطح کشور فاقد روند خواهد بود؛ علاوه بر این، در مدل NOR بر خلاف دو مدل اقلیمی دیگر، با حرکت از سناریو RCP4.5 به سوی RCP8.5، میانگین تغییرات روند طی یک دهه کاهش خواهد یافت.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر تلاشی برای درک مناسبی از آسیب‌پذیری وضعیت اقلیمی کشور تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم و بررسی تغییرات و روند نمایه‌های حدی دما مرتبط با بخش‌های سلامت و کشاورزی در ۵۴ ایستگاه همدیدی کشور برای دو دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) بود. بدین منظور، داده‌های دمای کمینه و بیشینه ۳ مدل اقلیمی منطقه‌ای پروژه CORDEX تحت دو سناریو مختلف با استفاده از روش تصحیح آریبی چند مقیاسه در زبان برنامه‌نویسی R برای هر ایستگاه ریزمقیاس‌نمایی شدند. سپس، روند و تغییرات نمایه‌های حدی آنها با استفاده از روش‌های من-کندال و شیب خط روند شن بررسی شدند.

نتایج نشان داد که تعداد روزهای یخبندان در بیشتر نواحی کشور در آینده روند کاهشی خواهند داشت و این موضوع می‌تواند مشکل تأمین نشدن نیاز سرمایی گیاهانی را که نیازمند سرما با دمای کمینه کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد طی دوره زمانی معینی از سال هستند را تحت تأثیر قرار دهد. روند کاهشی نمایه‌های مرتبط با سرما نیز موجب عدم تأمین سرمای کافی برای شکسته شدن خواب گیاه در انتهای فصل زمستان می‌شود که عدم مدیریت صحیح و نادیده گرفتن ملاحظات اقلیمی ممکن است باعث ایجاد خسارات جدی به باغات کشور در آینده شود (۲۲). اگرچه تعداد روزهای یخی در بیشتر ایستگاه‌ها فاقد روند بود، اما به‌طور کلی می‌توان بیان کرد از تعداد این روزها در آینده کم خواهد شد و بیشتر در نواحی مرتفع کوهستانی (غرب و

راهبردی منطقه‌ای مفید و مؤثر باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) با شماره طرح ۹۸۰۰۵۰۲۳ است. نویسندگان از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به‌خاطر حمایت مالی و از داوران محترم که با بیان نظرات ارزشمندشان کمک به بهبود کیفیت مقاله کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کند.

و یافته‌های آن دارای مزایای کاربردی مناسب برای تصمیم‌گیرندگان به‌منظور به‌کارگیری اقدامات مناسب برای کاهش خسارات و سازگاری کشور در مقابله با تغییرات اقلیم و پیامدهای ناشی از آن است. در صورت عدم توجه مدیران ذیربط، فجایع جبران‌ناپذیری به بخش‌های مختلف کشور در آینده نه‌چندان دور وارد خواهد آمد. امید است که پژوهش حاضر بتواند به‌عنوان یک مرجع مناسب برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر سلامت انسان، کشاورزی، محیط زیست و امنیت غذایی در جهت بهبود تصمیم‌گیری، سازگاری و برنامه‌ریزی

منابع مورد استفاده

1. Ávila, A., F. Justino, A. Wilson, D. Bromwich and M. Amorim. 2016. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environmental Research Letters* 11(11): 114029.
2. Balling, R. C., M. S. Keikhosravi Kiany, S. Sen Roy and J. Khoshhal. 2016. Trends in extreme precipitation indices in Iran: 1951-2007. *Theoretical and Applied Climatology* 126: 775-795.
3. Bronaugh, D. 2020. climdex.pcic: Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) Implementation of Climdex Routines. R package version 1.1-11. <https://CRAN.R-project.org/package=climdex.pcic>.
4. Darand, M. 2015. Assessing and recognizing climate change in Iran during recent decades. *Journal of Watershed Management Science and Engineering* 9(30): 1-14.
5. Fathian, F., M. Ghadami, P. Haghighi, M. Amini, S. Naderi and Z. Ghaedi. 2020. Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 141: 1119-1133.
6. Ghadami, M., T. Raziei, M. Amini and R. Modarres. 2020. Regionalization of drought severity-duration index across Iran. *Natural Hazards* 103: 2813-2827.
7. Ghimire, S., A. Choudhary and A. P. Dimri. 2015. Assessment of the performance of CORDEX-South Asia experiments for monsoonal precipitation over the Himalayan region during present climate: part I. *Climate Dynamics* 50(7-8): 2311-2334.
8. Gudmundsson, L., J. Bremnes, J. Haugen and T. Engen-Skaugen. 2012. Technical note: downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 3383-3390.
9. Hanel, M., R. Kozin, M. Hermanovský and R. Roub. 2017. An R package for assessment of statistical downscaling methods for hydrological climate change impact studies. *Environmental Modelling & Software* 95: 22-28.
10. IPCC. 2013. Climate change 2013: the physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Cambridge Univ Press, New York, p 1535. <https://doi.org/10.1029/2000JD000115>
11. Johnson, F. and A. Sharma. 2012. A nesting model for bias correction of variability at multiple time scales in general circulation model precipitation simulations. *Water Resources Research* 48: W01504.
12. Karki, R., U. Schickhoff, T. Scholten and J. Böhrner. 2017. Rising precipitation extremes across Nepal. *Climate* 5(1): 4.
13. Karl, T. R., R. W. Knight and B. Baker. 2000. The record breaking global temperature of (1997 and 1998): Evidence for an increase in the rate of global warming? *Geophysical Research Letter* 27: 719-722.
14. Kendall, M. 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin, London.
15. Mann, H. B. 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13: 245-259.
16. Mehrotra, R. and A. Sharma. 2016. A multivariate quantile-matching bias correction approach with auto-and cross-dependence across multiple time scales: implications for downscaling. *Journal of Climate* 29(10): 3519-3539.
17. Nkemelang, T., M. New and M. Zaroug. 2018. Temperature and precipitation extremes under current, 1.5 °C and 2.0 °C global warming above preindustrial levels over Botswana, and implications for climate change vulnerability. *Environmental Research Letters* 13(6): 065016.

18. Pendergrass, A. G. and D. L. Hartmann. 2014. Changes in the distribution of rain frequency and intensity in response to global warming. *Journal of Climate* 27(22): 8372-8383.
19. Peterson, T. C., C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit and N. Plummer. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 143pp.
20. R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
21. Rahimzadeh, F., A. Asgari and E. Fattahi. 2009. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal Climatology* 29(3): 329-343.
22. Sabzi Parvar, A. A. and R. Nowruz Valashdi. 2015. The effect of climate change on the process of meeting the cooling needs of deciduous plants (Case study: Hamadan province). *Journal of Horticultural Sciences* 29(3): 367-358.
23. Saddique, N., A. Khaliq and C. Bernhofer. 2020. Trends in temperature and precipitation extremes in historical (1961-1990) and projected (2061-2090) periods in a data scarce mountain basin, northern Pakistan. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 34(10): 1441-1455.
24. Sen, P. K. 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379-1389.
25. Shrestha, A. B., S. R. Bajracharya, A. R. Sharma, C. Duo and A. Kulkarni. 2017. Observed trends and changes in daily temperature and precipitation extremes over the Koshi river basin 1975-2010. *International Journal of Climatology* 37(2): 1066-1083.
26. Soltani, M., P. Laux, H. Kunstmann, K. Stan, M. M. Sohrabi, M. Molanejad, A. A. Sabziparvar, A. Ranjbar SaadatAbadi, F. Ranjbar, I. Rousta, P. Zavar-Reza, F. Khoshakhlagh, I. Soltanzadeh, C. A. Babu, G. H. Azizi and M. V. Martin. 2016. Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 126: 775-795.
27. Soltani, S., P. Almasi, R. Helfi, R. Modarres, P. M. Esfahan and M. Ghadami. 2020. A new approach to explore climate change impact on rainfall intensity-duration-frequency curves. *Theoretical and Applied Climatology* 142(3): 911-928.
28. Theil, H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen, Series A Mathematical Sciences. A53: 386-392.
29. Vaghefi, S. A., M. Keykhai, F. Jahanbakhshi, J. Sheikholeslami, A. Ahmadi, H. Yang and K. C. Abbaspour. 2019. The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports* 9(1): 1-11.
30. Whan, K., L. V. Alexander, A. Imielska, S. McGree, D. Jones, E. Ene, S. Finaulahi, K. Inape, L. Jacklick, R. Kumar, V. Laurent, H. Malala, P. Malsale, R. Pulehetoa-Mitiepo, M. Ngemaes, A. Peltier, A. Porteous, S. Seuseu, E. Skilling, L. Tahani, U. Toorua and M. Vaiimene. 2014. Trends and variability of temperature extremes in the tropical Western Pacific. *International Journal of Climatology* 34(8): 2585-2603.
31. World Meteorological Organization. 2012. Meeting of the Commission for Climatology (CCI) expert team on climate risk and sector-specific climate indices (ET-CRSCI).
32. Yang, W. 2010. Drought analysis under climate change by application of drought indices and copulas. M. S. Thesis, Portland State University, USA. DOI: 10.15760/etd.716

Spatial Analysis of Extreme Temperature Indices under Climate Change Based on CORDEX Data and a Developed Bias Correction Method in Iran

F. Fathian^{1*}, M. Ghadami² and Z. Dehghan³

(Received: January 19-2022; Accepted: May 29-2022)

Abstract

In this research, the trend of spatial changes in extreme indices of temperature related to the health and agriculture sectors such as the number of frost days, number of summer days, number of icing days, number of tropical nights, growing season length, diurnal temperature range, cold spell duration index, and warm spell duration index were investigated for 54 synoptic stations throughout Iran for observational (1976-2005) and future (2025-2054) periods. Daily maximum and minimum temperature data of three regional climate models namely, CCSM4, MPI-ESM-MR, and NORESM1-ME from the CORDEX project under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were downscaled for each station using a developed multiscale bias correction method. Then, trends and changes of extreme temperature indices were investigated using Mann-Kendall and Sen's trend line slope methods. The results indicated that the warm indices such as the number of summer days and tropical nights indices have had a positive trend at most stations in both observational and future periods. In contrast, cold indices like the number of frost days have had a decreasing trend in most stations. The results of cold and warm spell duration indices showed that most stations have had no trend for both periods. The growing season length has increased in more than 60% of stations (45% having a significant trend) mainly located in the northern, northwestern, and western regions of the country. Based on the results, it can be concluded that without considering thoughtful climate adaptation measures, some parts of the country may face health risks and limited habitability and agriculture in the future.

Keywords: Temperature extremes, Climate change, CORDEX data, Downscaling, Spatial trend analysis, Iran.

1. Department of Water Science and Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3. Department of Water Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: f.fathian@vru.ac.ir