

تغییرات روزها و شب‌های سرد و گرم در ایران با استفاده پیکربندی‌های همادی چند مدلی EC-Earth3

عباسعلی داداشی رودباری^{*۱}

^۱ استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲)

چکیده

تغییر اقلیم به‌طور فزاینده‌ای فراوانی و شدت رخداد‌های فرین‌دمایی را تحت‌تأثیر قرار داده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی این مخاطرات در ایران، تغییرات چهار شاخص فرین TX90p، TN90p، Tx10p و TN10p را بر اساس پنج پیکربندی اصلی مدل سامانه زمین ماژولار EC-Earth3 و تحت چهار سناریوی SSPs مورد ارزیابی قرار داده است. ابتدا یک چند مدلی همادی از پنج پیکربندی مدل EC-Earth3 تولید شد. نتایج نشان داد چندمدلی همادی (MME) با کاهش خطاهای مدل‌های منفرد، کارایی بالاتری ارائه داده است. نتایج تحقیق نشان دهنده یک ناهمگونی شدید در الگوی تغییرات فرین‌های دمایی است؛ به‌طوری‌که کاهش معنی‌دار در فراوانی روزها و شب‌های سرد با افزایش در رخداد‌های گرم در ایران همراه شده است. تحت سناریوی SSP5-8.5، شاخص روزهای گرم (TX90p) در مناطق داخلی و کویری ایران تا پایان قرن حاضر به بیش از ۶۵ درصد خواهد رسید که نشان‌دهنده تغییر ماهیت اقلیمی این مناطق است. کانون‌های اصلی تغییرات فرین‌های دمایی عمدتاً بر مناطق مرکزی، دشت لوت و جنوب‌شرق کشور منطبق هستند. در این مناطق بازخوردهای مثبت ناشی از کسری رطوبت خاک موجب تشدید امواج گرمایی و روند افزایشی تبخیر می‌شود. در مقابل، مناطق شمالی و ارتفاعات البرز، اگرچه روند افزایشی دارند، اما به دلیل اثرات تعدیل‌کننده توپوگرافی و رطوبتی، آهنگ تغییرات کمتری را تجربه می‌کنند. همچنین، واگرایی شدید بین سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در نیمه دوم قرن، بر نقش حیاتی سیاست‌های کاهش انتشار در کنترل شدت تغییرات فرین‌های تأکید دارد.

کلمه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، CMIP6، فرین‌دمایی، سناریوهای SSP، ایران

۱ مقدمه

تحلیل مخاطرات جهانی بیانگر آن است که تغییر اقلیم از یک ریسک احتمالی در آینده دور، به یک واقعیت قطعی و مخرب در زمان حال تبدیل شده است. در همین راستا، گزارش جهانی ریسک (۲۰۲۵) رخدادهای فرین اقلیمی را به عنوان دومین ریسک بزرگ با شدت بالا در افق زمانی کوتاه مدت طبقه‌بندی کرده است (World Economic Forum, 2025). این گزارش با تأکید بر گذار از مرحله هشدار به مرحله بحران فعال، تصریح می‌کند که تشدید غیرخطی رخدادهایی نظیر سیلاب‌های ناگهانی، امواج گرمایی و طوفان‌ها، فراتر از نوسانات جوی معمول بوده و منجر به تخریب‌های ساختاری در اکوسیستم‌های حیاتی و زیرساخت‌های اقتصادی شده است. فرین‌های اقلیمی با ایجاد اختلالات گسترده در زنجیره‌های تأمین کالا و خدمات به شکل مستقیم امنیت زیستی جوامع را تهدید کرده و نشان‌دهنده شکنندگی فرایندهای تاب‌آوری سیستمی در برابر شوک‌های اقلیمی هستند که آثار آن هم‌اکنون در مقیاس جهانی قابل پایش و اندازه‌گیری است.

فرین‌های دمایی شامل هر دو حالت گرمایی و سرمایی، تهدیدات قابل توجهی را از جمله افزایش مرگ‌ومیر انسانی، فشار بر زیرساخت‌ها، تشدید آتش‌سوزی‌های جنگلی و ایجاد اختلال در کشاورزی و حمل‌ونقل به همراه دارند؛ که همگی به شدت بر محیط‌های طبیعی و انسان ساخت تأثیر می‌گذارند (فوتسو-نگوئمو و همکاران، ۲۰۲۲).

ارزیابی رخدادهای فرین دمایی در ایران، چه با استفاده از مشاهدات ایستگاهی و چه برونداد مجموعه داده‌های بازتحلیل همانند ERA5 و مدل‌های گردش کلی (GCM)، همچنان نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تری است. بدین ترتیب، این مطالعه با اشراف بر نقاط قوت و محدودیت‌های مدل‌های گردش کلی

مشارکت یافته در پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) و تولید یک چند مدلی همادی برای کاهش عدم قطعیت خروجی این مدل‌ها، الگوهای زمانی و مکانی فرین‌های دمایی و به طور ویژه روزها/شب‌های سرد و گرم را در نواحی مختلف ایران بررسی کرده است. لذا این پژوهش مکمل مطالعات پیشینی (رحیم‌زاده و همکاران، ۲۰۰۹) است که به ارزیابی فرین‌های و تغییرپذیری مکانی آن در ایران پرداخته‌اند و در مجموع زمینه را برای بهبود مدل‌های گردش کلی و برنامه‌ریزی‌های کلان ملی فراهم می‌آورد.

تغییر اقلیم ناشی از فعالیت‌های انسانی، توزیع احتمالاتی متغیرهای جوی را تغییر داده است. در این بین، رخدادهای فرین دمایی به عنوان آشکارترین و مخرب‌ترین پیامدهای گرمایش جهانی شناخته می‌شوند (سنه‌ویراتنه و همکاران، ۲۰۲۱). برای بررسی فرین‌ها و یکسان‌سازی تعاریف و قابل مقایسه کردن نتایج در سطح جهانی، از مجموعه نمایه‌های استاندارد معرفی شده توسط تیم تخصصی آشکارسازی و نمایه‌های تغییر اقلیم (ETCCDI) استفاده می‌شود. این تحقیق نیز بر چهار شاخص کلیدی صدک‌منا شامل شاخص‌های روزهای سرد (TX10p)، روزهای گرم (TX90p)، شب‌های سرد (TN10p) و شب‌های گرم (TN90p) تأکید داشته است. بررسی فرین‌های دمایی با مطالعات الکساندر و همکاران (۲۰۰۶) آغاز شد. آن‌ها با ارائه نخستین ارزیابی جهانی، نشان دادند که بیش از ۷۰ درصد از خشکی‌های زمین کاهش معنی‌دار شب‌های سرد و افزایش شب‌های گرم را تجربه کرده‌اند. دونات و همکاران (۲۰۱۳) با توسعه مجموعه داده مشاهداتی مرکز هادلی (HadEX2) تأیید کردند فرین‌های گرم از اواسط قرن بیستم افزایش چشمگیری داشته‌اند. با انتشار مجموعه داده HadEX3 توسط دان و همکاران (۲۰۲۰) که با استفاده از داده‌های بیش از ۷۰۰۰ ایستگاه همدیدی و رفع خلاهای آماری

(بیشینه دما) را آشکار کردند و نشان دادند که شب‌های گرم با آهنگ بیش‌تری نسبت به روزهای گرم افزایش می‌یابد. در همین راستا اختر و همکاران (۲۰۲۴) پدیده عدم تقارن گرمایش را در جنوب آسیا گزارش کردند، بطوریکه همانند کولازو و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که افزایش شب‌های گرم از روزهای گرم پیشی گرفته و فرین‌های سرد با سرعتی نابرابر در حال از بین رفتن هستند. این نتیجه پژوهشی در مطالعه ساب‌ریناث و همکاران (۲۰۲۵) نیز نشان داده شد. بطوریکه آن‌ها افزایش رخداد‌های ترکیبی روز و شب گرم را گزارش کردند. همزمان کادیو و یو (۲۰۲۵) نیز نشان دادند که علی‌رغم این گرمایش، حرکات جوی همچنان پتانسیل ایجاد امواج سرمای ناگهانی را حفظ کرده‌اند.

بررسی روند مطالعات در ایران نشان می‌دهد که پژوهشگرانی که فرین‌هایی دمایی و به‌طور ویژه روزها و شب‌های سرد و گرم را بررسی کرده‌اند بیشتر شامل پایش‌های کلی و تغییرات زمانی-مکانی این پدیده طی دوره تاریخی است. تقوی (۱۳۸۹) با بررسی ایستگاه‌های همدیدی کشور، تغییر فرین‌های دمایی را با کاهش شاخص‌های سرد (مانند روزهای یخبندان) و افزایش شاخص‌های گرم (مانند دمای ۴۰ درجه سلسیوس) گزارش کردند. در ادامه درگاهیان و پوره‌اشمی (۱۴۰۱) در پهنه رویشی زاگرس، به الگوی نامتقارن تغییرات پی بردند و نشان دادند که کاهش فرین‌های سرد در شب‌ها با سرعتی بیشتر از روزها رخ داده است. همسو با این نتایج، زند و همکاران (۱۴۰۲) در غرب و جنوب غرب ایران، ضمن تأیید حاکمیت مطلق روند گرمایشی (افزایش شب‌ها و روزهای گرم)، با اشاره به روند افزایشی روزهای خشک متوالی، هشدار می‌دهند بر حرکت اقلیم این مناطق به سوی بیابانی شدن صادر کردند.

مرور پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که توافق جهانی در خصوص فرین‌های دمایی وجود دارد. بطوریکه کاهش

نسخه‌های پیشین انجام شد، روند افزایشی در شاخص‌های گرم (TX90p و TN90p) و روند کاهش در نمایه‌های سرد (TX10p و TN10p) در تمام قاره‌ها را گزارش کردند. دان و همکاران (۲۰۲۰) تأکید کردند که شدت تغییرات در شب‌های گرم (TN90p) غالب بر روزهای گرم است. سیلمن و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند مدل‌های نسل پنجم (CMIP5) توانایی خوبی در بازتولید الگوهای مکانی فرین‌ها دارند، اما در برآورد دامنه تغییرات با خطا مواجه هستند. در همین راستا، کیم و همکاران (۲۰۲۰) در ارزیابی جامع مدل‌های CMIP6 نشان دادند این مدل‌ها در شبیه‌سازی نمایه‌های TX90p و TN90p نسبت به نسل قبل (CMIP5) بهبود یافته‌اند، اما همچنان یک اریبی سرد در برآورد شب‌های سرد در برخی مناطق دارند. فن و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که مدل‌های CMIP6 دارای حساسیت اقلیمی ترازمند (ECS) بالاتری نسبت به CMIP5 هستند و این فرضیه مطرح شد که حساسیت بالا منجر به برآورد‌های اغراق‌آمیز از فرین‌های دمایی می‌شود. در همین راستا سن‌ویراتنه و هاووزر (۲۰۲۰) نشان دادند که علی‌رغم ECS بالاتر در مدل‌های CMIP6، رابطه بین گرمایش جهانی و تغییرات فرین‌های دمایی در هر دو نسل CMIP5 و CMIP6 بسیار شبیه به یکدیگر است. جدیدترین گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC AR6) نیز با جمع‌بندی مطالعات انجام شده از فرین‌های دمایی تأیید می‌کند که افزایش فراوانی و شدت نمایه‌های گرم (TX90p, TN90p) و کاهش نمایه‌های سرد، تحت سناریوهای SSPs اجتناب‌ناپذیر است و این تغییرات با شدت بیشتری در مدل‌های CMIP6 نسبت به CMIP5 در سناریوهای با انتشار بالا همانند SSP5-8.5 دیده می‌شود (سنه‌ویراتنه و همکاران، ۲۰۲۱). کولازو و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی مدل‌های CMIP6 در آمریکای جنوبی، تفاوت کارایی آن‌ها در شبیه‌سازی فرین‌های شبانه (کمینه دما) و روزانه

(شکل ۱). اقلیم کشور متأثر از موقعیت آن در کمربند خشک جهانی و همچنین برهمکنش توده‌های هوایی مختلف، دارای تنوع مکانی قابل توجهی است. این تنوع اقلیمی ایران را به یکی از نواحی آسیب‌پذیر در برابر تغییر اقلیم و رخدادهای فرین جوی-اقلیمی تبدیل کرده است.

۲-۲ داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱ ایستگاه‌های هواشناسی همدید

برای درستی سنجی مدل‌های منفرد و چندمدلی همادی (MME) در بازتولید دمای کمینه و بیشینه ایران، از داده‌های مشاهداتی روزانه شامل متغیرهای دمای کمینه و بیشینه ۹۶ ایستگاه هواشناسی همدید استفاده شد که پراکنش مکانی در شکل (۱-الف) نمایش داده شد. این مجموعه داده به‌عنوان داده مشاهداتی برای بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ انتخاب شد.

۲-۲-۲ مدل ماژولار (توکیبی) سامانه زمین-EC-Earth3

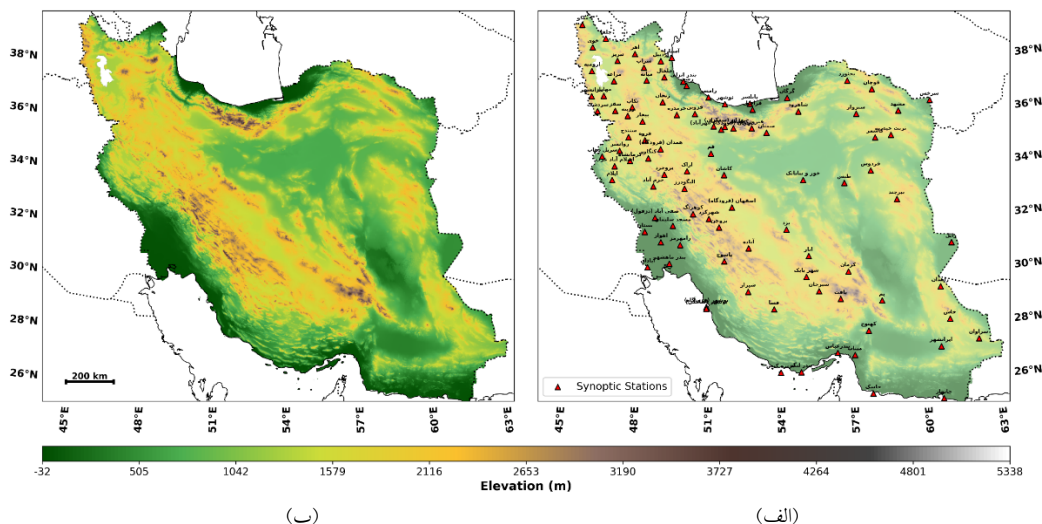
در این پژوهش، از مدل سامانه زمین EC-Earth3 استفاده شده است که توسط کنسرسیوم پژوهشی اروپایی

روزها/شب‌های سرد (TX10p/TN10p) و افزایش روزها/شب‌های گرم (TX90p/TN90p) قطعی است. همچنین تحقیقات نشان دادند که گرمایش شبانه سریع‌تر از گرمایش روزانه رخ می‌دهد، که این امر در داده‌های ERA5 و HadEX3 و در نهایت مدل‌های CMIP6 با وجود حساسیت اقلیمی بالاتر، الگوی فضایی مشابهی با CMIP5 دارند و پیش‌نگری‌های قابل اعتمادی ارائه می‌دهند. با این حال در ایران تحقیقی که روزها و شب‌های سرد و گرم را تا پایان قرن پیش‌نگری نماید انجام نشده است و لذا ضرورت دارد در یک تحقیق مستقل تغییرات این پدیده در کشور مورد بررسی همه جانبه قرار گیرد.

۲ روش تحقیق

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در این پژوهش، کشور ایران در غرب آسیا است. ایران با توپوگرافی پیچیده، از جمله رشته‌کوه‌های مرتفع البرز در شمال و زاگرس در غرب که حوضه‌های آبریز داخلی و دشت‌های وسیع کویری (دشت کویر و لوت) را احاطه کرده‌اند، متمایز می‌شود



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، الف) موقعیت ۹۶ ایستگاه هواشناسی همدید مورد بررسی؛ ب) مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از داده‌های ماهواره پیشرفته مشاهده زمین (ALOS)، رادار دهانه ترکیبی باند L با آرایه فازی (PALSAR) با تفکیک افقی ۳۰ متر (واحد: متر).

پوشش گیاهی (DGVM) پیشرفته است که با ترکیب فیزیولوژی گیاهی، ساختار پوشش گیاهی و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی (کربن، نیتروژن و آب) را در اکوسیستم‌های خشکی شبیه‌سازی می‌کند. فرآیندهای شیمیایی و هواپزها در جو توسط مدل TM5 توصیف می‌شوند (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۴؛ ون نویژ و همکاران، ۲۰۱۴).

بکارگیری مدل‌های سامانه زمین (ESMs) نظیر EC-Earth3 در مطالعات تغییر اقلیم از اهمیتی بنیادین برخوردار است، زیرا این مدل‌ها با فراتر رفتن از هسته فیزیکی مدل‌های کلاسیک و ادغام فرآیندهای پیچیده بیوفیزیکی و بیوژئوشیمیایی، ابزارهای معتبری برای کاوش دقیق مسیرهای انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند که آن‌ها را به منبع اصلی اطلاعات برای درک بازخوردهای اقلیمی و تدوین سیاست‌های کاهش اثرات تبدیل می‌کند (دوشر و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق از پنج پیکربندی اصلی مدل سامانه زمین EC-Earth3 با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر استفاده شده است تا ابعاد مختلف تغییر اقلیم بر رخداد روزها و شب‌های سرد و گرم مورد بررسی قرار گیرند. این پیکربندی‌ها شامل مدل پایه جو-اقیانوس (EC-Earth3)، مدل دارای پوشش گیاهی پویا و تعاملی (EC-Earth3-Veg)، مدل شامل شیمی جو و هواپزهای فعال (EC-Earth3-AerChem)، مدل با چرخه کربن کامل (EC-Earth3-CC) و نسخه با تفکیک پایین‌تر همراه با پوشش گیاهی (EC-Earth3-Veg-LR) می‌باشند.

۲-۳ سناریوها و دوره‌های مورد بررسی

به منظور بررسی تغییرات نمایه‌های فرین دمایی در گستره ایران، از سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs) استفاده شد. این سناریوها در چارچوب پروژه ScenarioMIP توسعه یافته‌اند و مبنای علمی گزارش ارزیابی ششم هیئت

EC-Earth با هدف مشارکت در پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) توسعه یافته است. این مدل به عنوان یک سامانه ماژولار و پیچیده، هسته کلاسیک اقلیمی شامل مدل‌های فیزیکی جو، یخ دریا، اقیانوس و خشکی را با اجزای اختیاری دیگری ترکیب می‌کند تا بتواند فرآیندهای بیوفیزیکی و بیوژئوشیمیایی را نیز پوشش دهد (آپرینگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ دوشر و همکاران، ۲۰۲۲). ساختار این مدل بر پایه جفت‌شدگی دامنه‌های فیزیکی گوناگون بنا شده است؛ به طوری که در مولفه جو و خشکی، از چرخه 36r4 مدل IFS متعلق به مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جو (ECMWF) استفاده شده است. چرخه 36r4 مدل IFS نسخه‌ای از سامانه پیش‌بینی عددی جو ECMWF است که با استفاده از روش پیشرفته داده گواری 4D-Var و فیزیک بهبودیافته در بخش ابرها و سطح زمین، متغیرهای جوی را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین دینامیک اقیانوس توسط مدل NEMO3.6 شبیه‌سازی می‌شود (مادک و همکاران، ۲۰۱۵). این مدل یک چارچوب دینامیکی پیشرفته است که با حل معادلات اولیه، گردش‌های کلی، ترمودینامیک و ویژگی‌های فیزیکی اقیانوس را شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین، مؤلفه یخ دریا، مدل LIM3 است که به همراه مدل بیوژئوشیمی اقیانوس (PISCES) به صورت یکپارچه ادغام شده‌اند (وانکوپنول و همکاران، ۲۰۰۹؛ اومونت و همکاران، ۲۰۱۵). مدل EC-Earth3 دارای پیکربندی‌های متعددی است که بسته به نیاز و اهداف پژوهشی، از جمله پیکربندی پایه، پوشش گیاهی تعاملی (EC-Earth3-Veg)، چرخه کربن کامل (EC-Earth3-CC) و ترکیب جوی فعال (EC-Earth3-AerChem) قابل بهره‌برداری هستند. در این پیکربندی‌ها، فرآیندهای پوشش گیاهی پویا و کاربری اراضی توسط مدل شبیه‌ساز عمومی اکوسیستم لوند-پوتسدام-ینا (LPJ-GUESS) ارائه می‌شوند. مدل LPJ-GUESS یک مدل دینامیکی

پژوهش از رویکرد چندمدلی همادی (MME) استفاده شد. بر اساس دستورالعمل راهنمای عملکرد مطلوب برای ارزیابی و تلفیق پیش‌نگری‌های اقلیمی چندمدلی IPCC (تیم، ۲۰۱۰) در شرایطی که معیار قاطع و پذیرفته شده‌ای برای وزن‌دهی به مدل‌ها بر اساس کارایی آن‌ها وجود ندارد و حذف مدل‌ها بدون شواهد فیزیکی قوی ممکن است منجر به از دست رفتن اطلاعات ارزشمند شود، رویکرد وزن‌دهی برابر یا میانگین حسابی به عنوان شفاف‌ترین و محتاطانه‌ترین روش توصیه می‌شود. لذا در این مطالعه، برای تولید خروجی همادی، از روش میانگین حسابی استفاده شد. این روش بر پایه فرض یک مدل، یک رأی (One Model, One Vote) استوار است که در آن تمامی مدل‌های منتخب به عنوان واقعیت‌های به یک اندازه محتمل (Equally Plausible) از سامانه اقلیمی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین از آنجا که کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی اقلیم گذشته لزوماً تضمین‌کننده دقت آن‌ها در پیش‌نگری‌های آینده نیست و تعریف سنجه‌های درستی سنجی می‌تواند بسیار سلیقه‌ای باشد، میانگین‌گیری حسابی با فرض استقلال نسبی خطاها، مؤثرترین روش برای کاهش خطاهای تصادفی مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود (تیم، ۲۰۱۰). بر این اساس در این تحقیق یک چندمدلی همادی از مدل‌های EC-Earth3، EC-Earth3-AerChem، EC-Earth3-Veg و Earth3-CC-LR و EC-Earth3-Veg تولید شد.

۲-۳-۲ ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد و MEE

برای ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد ماژولار خانواده EC-Earth3 و چندمدلی همادی (MME) از نمودار تیلور (Taylor Diagram) و نمودار هدف (Target Diagram) استفاده شد. نمودار تیلور با تلفیق هندسی سه آماره کلیدی شامل ضریب همبستگی پیرسون (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSD) و انحراف معیار

بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC AR6) را تشکیل می‌دهند (اونیل و همکاران، ۲۰۱۶). بر خلاف نسل پیشین سناریوها (RCPs)، سناریوهای SSP بر پایه ترکیبی از سطوح مختلف غلظت گازهای گلخانه‌ای بنا شده‌اند. این رویکرد، امکان تلفیق سناریوهای توسعه اجتماعی-اقتصادی شامل رشد جمعیت، همکاری‌های بین‌المللی و توسعه فناوری را با واداشت تابشی فراهم می‌آورد (ون وارن و همکاران، ۲۰۱۳). به منظور پوشش کامل دامنه عدم قطعیت‌های آینده و انطباق با استانداردهای ScenarioMIP، چهار سناریوی Tier 1 شامل SSP1-2.6 (سناریو توسعه پایدار خوش‌بینانه)، SSP2-4.5 (سناریو حد واسطه)، SSP3-7.0 (سناریو رقابت‌های منطقه‌ای) و SSP5-8.5 (سناریو توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی) انتخاب شدند. این چهار سناریو، ترکیبی از مسیرهای پایه اجتماعی-اقتصادی و فرضیات سیاست‌گذاری اقلیمی (SPAs) هستند که منجر به واداشت‌های تابشی مشخصی (به ترتیب واداشت‌های تابشی ۲/۶، ۴/۵، ۷/۰ و ۸/۵ وات بر متر مربع) در سال ۲۱۰۰ می‌شوند (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). جهت تحلیل دقیق روندهای زمانی تغییرات فرین‌های دمایی، اثرات این سناریوها در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. اتخاذ این چارچوب زمانی-سناریویی جامع، امکان تمایز میان تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت ناشی از سیاست‌های متفاوت انتشار و توسعه را فراهم می‌آورد.

۲-۳ روش تحقیق

۲-۳-۱ تولید چندمدلی همادی (Multi-Model Ensemble)

به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ذاتی در مدل‌های منفرد و ارائه برآوردی قابل اطمینان از تغییر اقلیم آینده، در این

شب است. شاخص‌های مرتبط با فرین سرد شامل TX10p (روزهای سرد) و TN10p (شب‌های سرد) می‌باشند. شاخص TX10p معرف درصد روزهایی است که بیشینه دمای روزانه (TX) کمتر از صدک دهم دوره پایه ثبت شود و شاخص TN10p درصد روزهایی را محاسبه می‌کند که کمینه دمای شبانه (TN) پایین‌تر از صدک دهم دوره مرجع (در این تحقیق ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) باشد (دان و موریس، ۲۰۲۲).

۳ نتایج و بحث

۳-۱- کارایی مدل‌های منفرد و چند مدلی همادی ماژولار EC-Earth3 در بازتولید دمای کمینه و بیشینه سالانه

به منظور درستی‌سنجی دمای کمینه بیشینه ایران، کارایی پنج پیکربندی مختلف از مدل EC-Earth3 در کنار میانگین چندمدلی (MME) با استفاده از نمودارهای تیلور (Taylor) و هدف (Target) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). تحلیل نمودار تیلور (شکل ۲-الف) برای دمای بیشینه نشان‌دهنده همبستگی مناسب میان داده‌های مدل و مشاهدات است. تمامی مدل‌های مورد بررسی ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۶ را ثبت کردند که بیانگر توانایی بالای مدل‌ها در بازتولید مکانی دما در کشور است. چند مدلی همادی ماژولار، با به ضریب همبستگی ۰/۸۲، بالاترین تطابق را با مشاهدات از خود نشان داد. بررسی انحراف معیار نشان می‌دهد که مدل‌ها در بازه ۰/۵ تا ۰/۸ قرار گرفته‌اند. این نتیجه نشان از کمتر برآورد کردن تغییرپذیری و واریانس دمایی نسبت به داده‌ها مشاهداتی است؛ پدیده‌ای که در مدل‌های گردش کلی (GCMs) معمول بوده و غالباً ناشی از هموارسازی پارامترسازی در فرآیندهای فیزیکی و محدودیت در تفکیک افقی تغییرات روزانه دما می‌باشد. در مقابل، ارزیابی دمای کمینه نشان‌دهنده چالش‌های

(Standard Deviation)، دامنه نوسانات مدل‌ها را نسبت به مشاهدات در یک فضای واحد به تصویر می‌کشد (تیلور، ۲۰۰۱). در مقابل نمودار هدف، با ترسیم اریبی (Bias) در محور عمودی و مجذور میانگین مربعات خطای بدون اریبی (CRMSD) در محور افقی نمایانگر خطای کل (Total RMSD) است (تونس و همکاران، ۲۰۱۲). به‌طور کلی نمودار تیلور بر شباهت الگو و همبستگی تمرکز دارد، نمودار هدف بر مقدار خطا و منشأ آن متمرکز است.

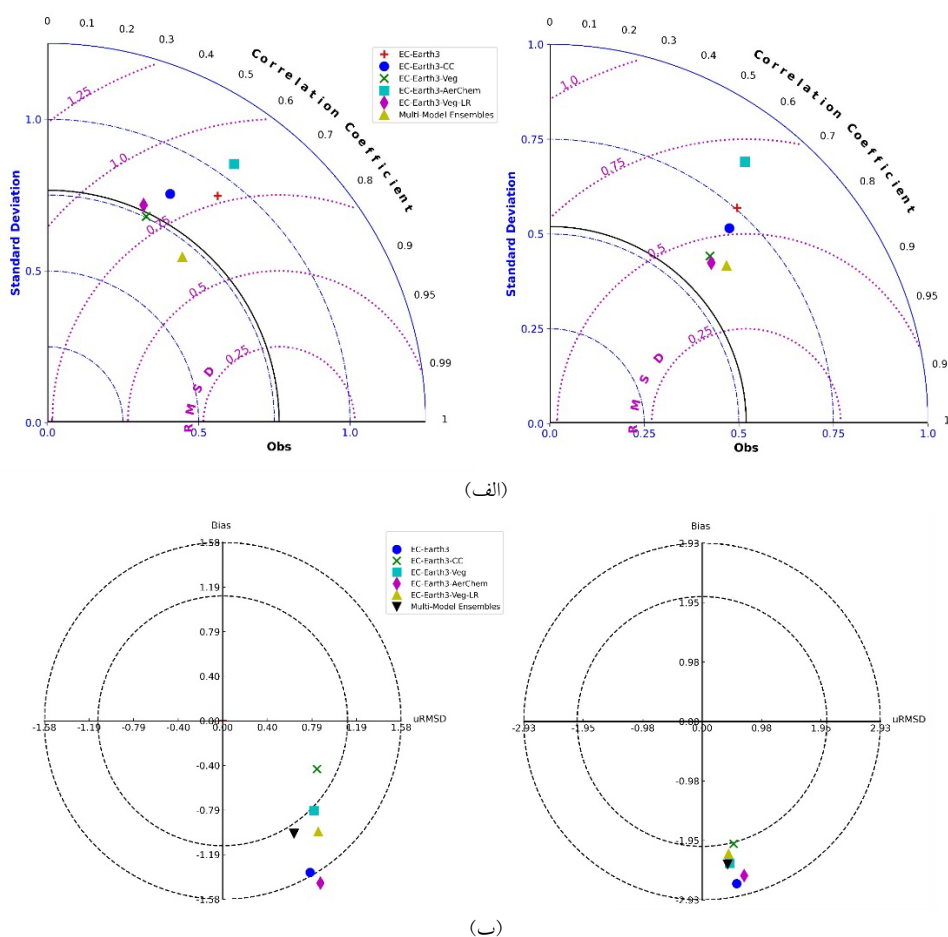
۳-۲-۳ شاخص‌های فرین دمایی

به منظور ارزیابی تغییرات رخداد‌های فرین گرم و سرد در دوره‌های آتی، در این پژوهش از چهار شاخص استاندارد فرین استفاده شده است. این شاخص‌ها بر اساس دستورالعمل‌های تیم تخصصی آشکارسازی و شاخص‌های تغییر اقلیم (ETCCDI) انتخاب شده‌اند که به‌طور گسترده برای پایش تغییرات فرین‌های اقلیمی به کار می‌روند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). در این تحقیق تمرکز بر شاخص‌های مبتنی بر صدک (-Percentile based) است که اغلب پیامدهای محیطی و اقلیمی شدیدتری نسبت به تغییرات در میانگین دما دارند. همانطور که گفته شد در این تحقیق از چهار شاخص فرین در دو گروه شاخص‌های مرتبط با گرم و سرد استفاده شد. شاخص‌های مرتبط با فرین گرم شامل TX90p (روزهای داغ یا روزهای گرم) و TN90p (شب‌های گرم) هستند. شاخص TX90p بیانگر درصد روزهایی در سال است که دمای بیشینه دمای روزانه (TX) فراتر از صدک نودم دوره پایه قرار می‌گیرد. به‌طور مشابه، TN90p درصد روزهایی را نشان می‌دهد که دمای حداقل شبانه (TN) از صدک نودم دوره مرجع بیشتر است. افزایش در این شاخص‌ها، نشان‌دهنده گسترش امواج گرمایی و تنش‌های گرمایی در روز و

(U-RMSE) در بازه ۱/۱۹ تا ۰/۷۹ و مقدار اریبی (Bias) مدل‌ها در دامنه -۱/۵۸ تا ۰/۴۰ متغیر است. موقعیت مدل‌ها نسبت به مبدأ مختصات نشان می‌دهد که مدل EC-Earth3 کمترین فاصله شعاعی را داشته و به عنوان دقیق‌ترین مدل منفرد عمل می‌کند. همچنین، چندمدلی همادی (MME) با کاهش خطاهای مدل‌های منفرد، کارایی پایدار و قابل قبول‌تر از مدل‌های منفرد ارائه داده است. در سوی دیگر، تحلیل خطاهای دمای کمینه گستره وسیع‌تری از عدم قطعیت را نشان می‌دهد؛ به طوری که بازه U-RMSE بین ۰/۳۹ تا ۰/۹۸ و اریبی بین -۲/۹۳ تا -۱/۹۵ نوسان دارد.

محاسباتی بیشتر در شبیه‌سازی دقیق شرایط دمای کمینه است. ضرایب همبستگی در بازه بین ۰/۵۰ تا ۰/۸۰ نوسان دارد. مدل‌هایی نظیر EC-Earth3-Veg-LR انحراف معیار نزدیک‌تری به مشاهدات ثبت کرده‌اند. کاهش دقت در شبیه‌سازی دمای کمینه را می‌توان به پیچیدگی‌های فیزیکی مرتبط با لایه مرزی شبانه، عدم قطعیت در مدل‌سازی پوشش ابر و برهمکنش تابشی طول موج بلند نسبت داد (شکل ۲).

بررسی خطاهای سیستماتیک و تصادفی با استفاده از نمودار هدف (Target Diagram) (شکل ۲-ب)، نتایج دقیق‌تری از کارایی مدل‌ها ارائه می‌دهد (شکل ۲). برای دمای بیشینه، مجذور میانگین مربعات خطای بدون اریبی

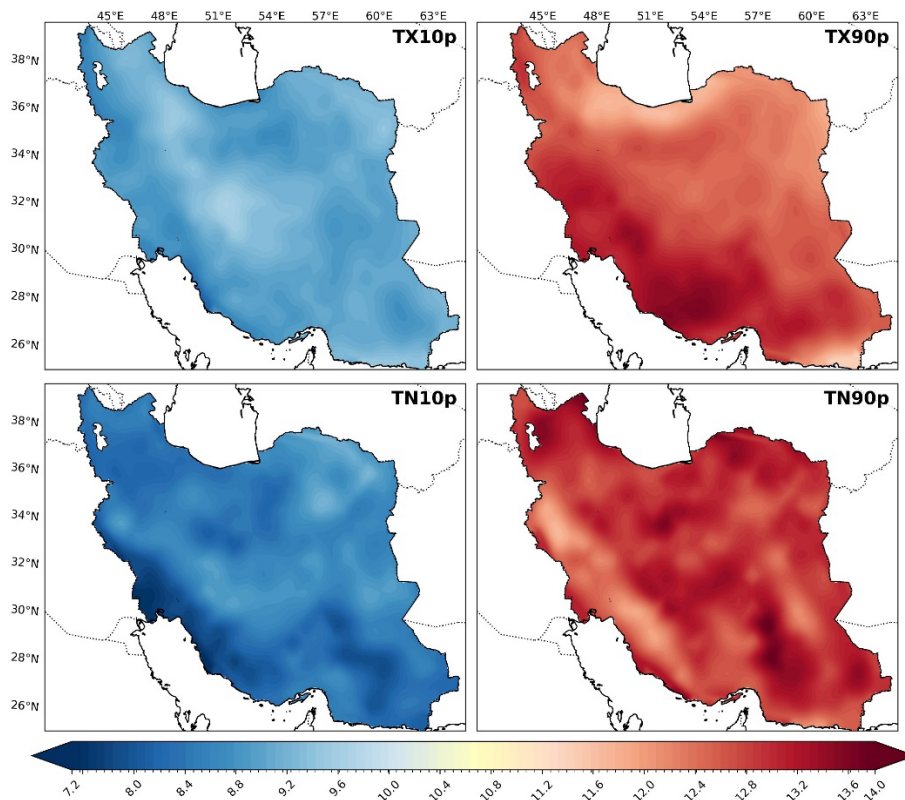


شکل ۲. نمودارهای تیلور (الف) و هدف (ب) جهت درستی سنجی مدل‌های منفرد و همادی ماژولار در باز تولید دمای کمینه و بیشینه سالانه نسبت به داده‌های مشاهداتی.

بیانگر تغییرات ساختاری در کمینه‌های دمای شبانه است. در مقابل الگوی افزایشی شاخص‌های گرم، تحلیل شاخص‌های سرد (TX10p و TN10p) نشان‌دهنده یک مقدار کاهشی سیستماتیک در سطح کشور است که مؤید جابه‌جایی کلی تابع توزیع احتمال می‌باشد. توزیع مکانی روزهای سرد (TX10p) در بازه‌ای بین ۷/۸ تا ۱۰/۳ درصد نوسان دارد، که مقادیر کمتر آن عمدتاً در شمال شرق و نواحی مرتفع کوهستانی رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس مشاهده می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که حتی در مناطقی با اقلیم سردتر و ارتفاع بالاتر، رخداد‌های فرین سرما با کاهشی محسوس مواجه شده‌اند. به طور مشابه، شاخص شب‌های سرد (TN10p) نیز در حدود همان بازه قرار دارد، اما توزیع جغرافیایی آن متفاوت بوده و مقادیر بالاتر در مناطق شمالی و شمال‌غربی متمرکز شده‌اند (شکل ۳).

۲-۳ پراکنش فضایی نمایه‌های فرین دمایی شب‌ها و روزهای سرد و گرم طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴).

تحلیل الگوی مکانی نمایه‌های فرین دما، بیانگر ناهمگنی قابل توجهی در رخداد‌های فرین گرم و سرد در ایران طی دوره تاریخی است. روزهای گرم (TX90p)، نشان می‌دهد این پدیده در پهنه کشور بین ۱۱ تا ۱۳ درصد متغیر است (شکل ۳). بیشینه شاخص در مناطق جنوب شرقی و نواحی مرکزی ایران تمرکز بیشتری دارد. همگام با این مقدار، شاخص شب‌های گرم (TN90p) الگوی تشدید یافته‌تری را به نمایش می‌گذارد؛ به گونه‌ای که دامنه نوسانات آن از ۱۲ درصد در کرانه‌های جنوبی دریای خزر تا حدود ۱۴ درصد در سواحل خلیج فارس و مناطق مرکزی گسترش می‌یابد. حساسیت بالاتر شاخص TN90p نسبت به موقعیت جغرافیایی و عرض جغرافیایی،



شکل ۳. پراکنش فضایی سالانه شاخص‌های فرین گرم TX90p (روزهای داغ یا روزهای گرم) و TN90p (شب‌های گرم) و فرین سرد TX10p (روزهای سرد) و TN10p (شب‌های سرد) طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) براساس چند مدلی همادی ماژولار EC-Earth3 (واحد: درصد).

۳-۳ تحلیل شاخص شب‌های سرد (TN10p) در گستره ایران

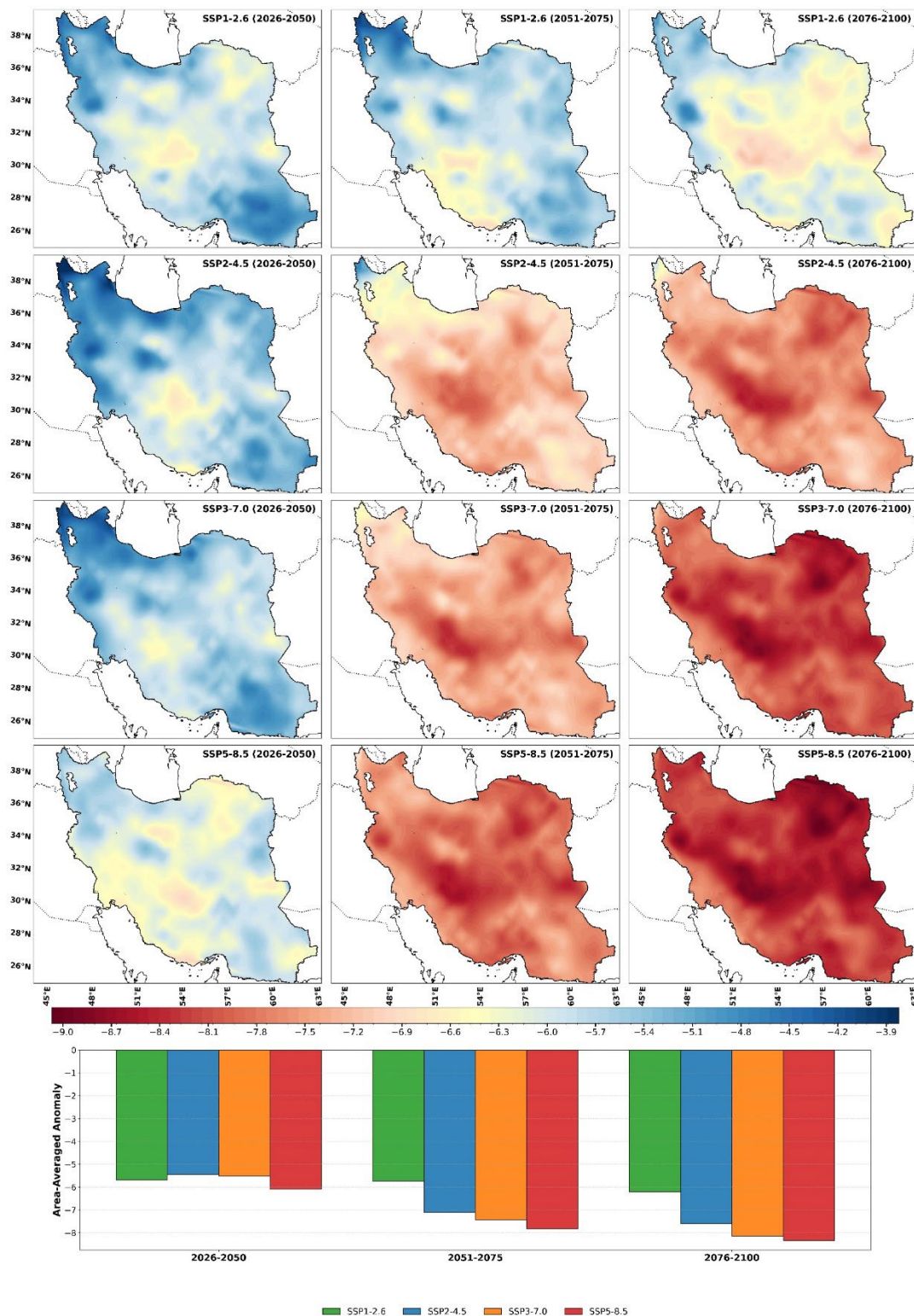
ارزیابی کمی برون‌داد همادی CMIP6 برای شاخص TN10p در گستره ایران، بیانگر روندی کاهشی در رخداد شب‌های سرد طی سده بیست‌ویکم است. مقادیر منفی محاسبه‌شده (بی‌هنجاری) برای این شاخص در تمامی سناریوهای SSPs و بازه‌های زمانی، نشان دهنده کاهش فراوانی رخدادهای فرین سرد و جابه‌جایی توزیع دمایی به سمت شرایط گرم‌تر در کشور است. در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانگین فضایی تغییرات شاخص TN10p در بازه‌ای محدود بین $-5/45$ تا $-6/09$ درصد نوسان می‌کند. در این بازه زمانی، واگرایی میان سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه اندک است؛ به طوری که مقدار شاخص در سناریوی SSP1-2.6 برابر با $-5/69$ درصد و در سناریوی SSP5-8.5 برابر با $-6/09$ درصد برآورد شده است (شکل ۴).

با گذر از نیمه قرن و ورود به دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)، حساسیت شاخص TN10p نسبت به تغییر سناریوها به روشنی آشکار می‌شود. در حالی که تحت سناریوی SSP1-2.6، روند کاهشی شب‌های سرد با آهنگی ملایم به $-5/73$ درصد می‌رسد، در سناریوهای میانه تا بدبینانه، بی‌هنجاری کاهشی به شکل معناداری افزایش می‌یابد. مقادیر متوسط پهنه‌ای بی‌هنجاری در سناریوهای SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب به $-7/10$ ، $-7/43$ و $-7/82$ درصد می‌رشد که نشان‌دهنده کاهش شدید فراوانی رخداد شب‌های سرد در کشور است. این روند در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) به نقطه اوج خود می‌رسد؛ جایی که تفاوت میان سناریوی توسعه پایدار (SSP1-2.6) با مقدار $-6/2$ درصد و سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) با مقدار $-8/33$ درصد، شکافی معادل $2/13$ درصدی را ایجاد می‌کند (شکل ۴). این اختلاف، نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده

سیاست‌های اقلیمی در حفظ یا حذف فرین‌های سرد در ایران است.

از منظر توزیع مکانی، الگوی تغییرات TN10p ناهمگنی قابل توجهی را متأثر از توپوگرافی و عرض جغرافیایی در کشور نشان می‌دهد. نواحی مرکزی و پهنه‌های وسیع کویری، از جمله دشت لوت و دشت کویر، کانون‌های اصلی تغییر اقلیم در این شاخص محسوب می‌شوند. این مناطق که دارای ظرفیت گرمایی پایین و بازتابش سطحی بالا هستند، بیشترین نرخ کاهش شب‌های سرد را تجربه می‌کنند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در این نواحی، به‌ویژه در دوره‌های میانی و دور تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5، بی‌هنجاری‌های منفی به حداکثر مقدار خود رسیده و عملاً رخداد شب‌های سرد در این زیست‌بوم‌ها به سمت صفر می‌رشد. در مقابل، سواحل جنوبی دریای خزر و بخش‌هایی از نوار شمالی کشور، به دلیل اثر تعدیل‌کننده رطوبت، کمترین دامنه تغییرات منفی را نشان می‌دهند و به عنوان نواحی با تاب‌آوری نسبی بالاتر در برابر حذف شب‌های سرد شناسایی شدند.

بررسی تغییرات شاخص در مناطق کوهستانی، پیچیدگی‌های بیشتری را آشکار می‌سازد. در رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز، گرادیان تغییرات به شدت وابسته به ارتفاع است. در دوره آینده نزدیک، نوسانات فضایی در این مناطق مشهود است. در ارتفاعات زاگرس، یک تفکیک ارتفاعی مشاهده می‌شود؛ به این صورت که دامنه‌های پایین دست سریع‌تر از قله‌ها و ارتفاعات بالا دچار گرمایش شبانه می‌شوند. با این حال، در سناریوی SSP5-8.5 و در آینده دور، حتی ارتفاعات کوهستانی شمال شرق و البرز نیز شب‌های سرد خود را از دست داده و الگوهای کاهشی شدیدی را در شب‌های سرد تجربه می‌کنند (شکل ۴).



شکل ۴. شاخص روزهای شب‌های سرد (TN10p) در پهنه ایران مبتنی بر برونداد همادی CMIP6. در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) سناریوهای چهار سناریوی Tier 1 شامل SSP1-2.6 (سناریو توسعه پایدار خوش‌بینانه)، SSP2-4.5 (سناریو حد واسطه)، SSP3-7.0 (سناریو رقابت‌های منطقه‌ای) و SSP5-8.5 (سناریو توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی). (واحد: درصد).

۳-۴ تحلیل شاخص شب‌های گرم (TN90p) در گستره ایران

در تمام سناریوها و در هر سه بازه زمانی، افزایش معنادار و یکنواخت شاخص TN90p در ایران مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که حتی خوش‌بینانه‌ترین سناریو نیز تداوم افزایش فراوانی شب‌های گرم دیده می‌شود. در آینده نزدیک، میانگین پهنه‌ای TN90p تحت سناریوی SSP1-2.6 حدود ۱۵/۹۹ درصد برآورد می‌شود که کمترین افزایش را نسبت به سایر سناریوها نشان می‌دهد و نزدیک‌ترین وضعیت به اقلیم فعلی محسوب می‌شود (شکل ۵). با حرکت به سوی سناریوهای با انتشار بالاتر، این مقدار به ۱۶/۱۵ درصد در SSP2-4.5، ۱۸/۶۲ درصد در SSP3-7.0 و ۲۲/۵۱ درصد در SSP5-8.5 افزایش می‌یابد. اگرچه دامنه اختلاف سناریویی در این دوره محدود است، اما همین تفاوت‌ها زمینه‌ساز تغییرات بسیار شدیدتر در دوره‌های بعدی می‌شود.

در آینده میانی، تمایز میان سناریوهای انتشار به‌طور چشمگیری تشدید می‌شود. سناریوی SSP1-2.6 افزایش کمی را تجربه کرده و میانگین پهنه‌ای آن به ۱۸/۹۶ درصد می‌رسد. در مقابل، سناریوهای با انتشار متوسط تا بالا افزایش غیرخطی دیده می‌شود، به طوری که مقدار TN90p در SSP2-4.5 به ۳۱/۶۵ درصد، در SSP3-7.0 به ۳۹/۴۱ درصد و در SSP5-8.5 به ۵۰/۰۸ درصد افزایش می‌یابد. این روند افزایشی در آینده دور ادامه یافته و تفاوت‌های سناریویی به بیشینه خود می‌رسد. در این بازه، مقدار TN90p تحت SSP1-2.6 در حدود ۱۹/۵۶ درصد تثبیت می‌شود که نشان می‌دهد بدون تشدید انتشار، افزایش شب‌های گرم در سطحی محدودتر باقی می‌ماند. در مقابل، سناریوهای بدبینانه جهشی بسیار شدید را تجربه می‌کنند، به طوری که میانگین پهنه‌ای TN90p به ۶۱/۲۷ درصد در SSP3-7.0 و ۷۰/۷۵ درصد در SSP5-8.5 می‌رسد (شکل ۵). این مقادیر، تقریباً سه برابر مقدار آینده

نزدیک هستند.

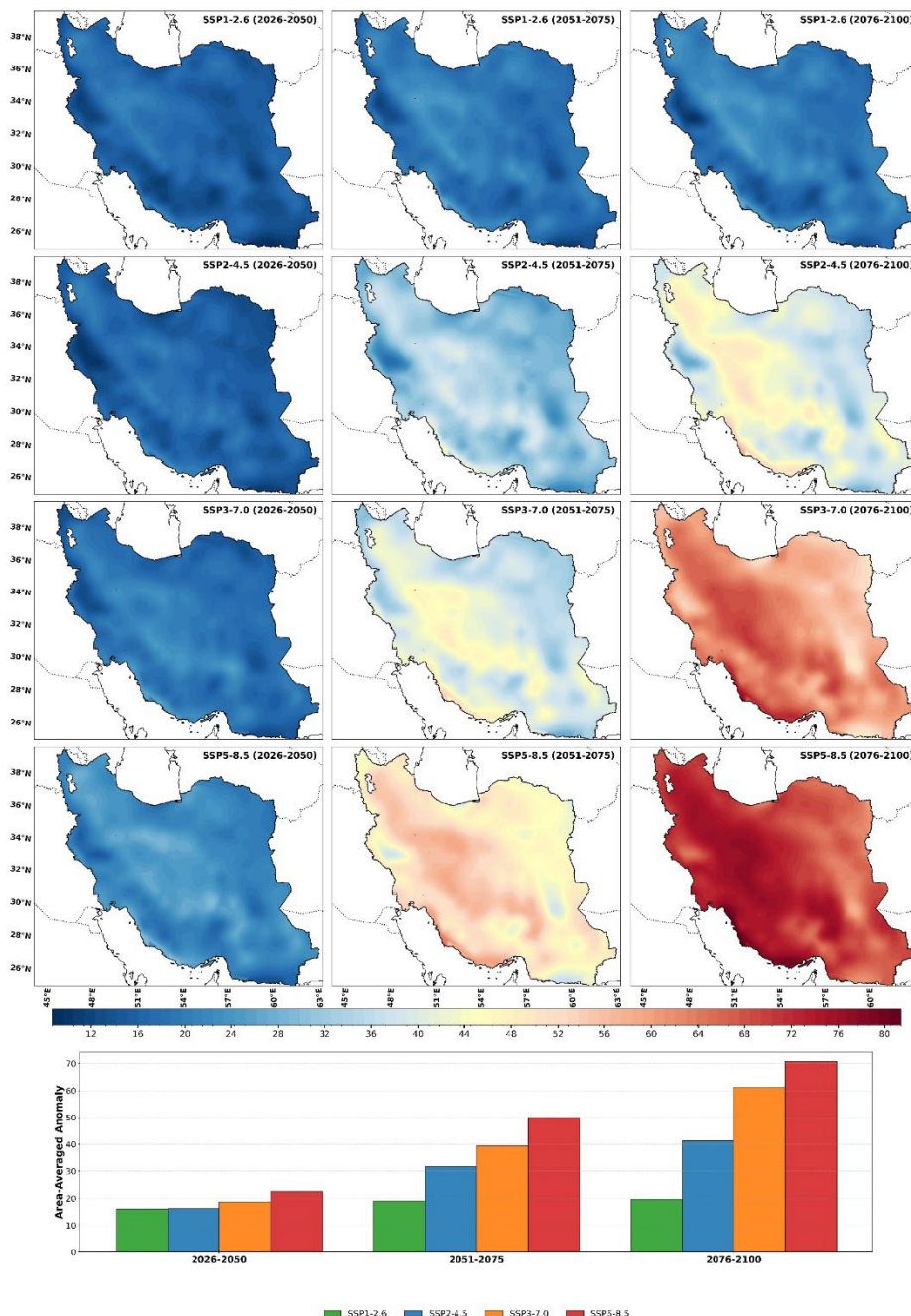
از منظر فضایی، الگوی تغییرات TN90p ناهمگن بوده و وابستگی آشکاری به ویژگی‌های توپوگرافی و اقلیم منطقه‌ای نشان می‌دهد. در آینده نزدیک و تحت سناریوی SSP1-2.6، افزایش شاخص در اغلب مناطق کشور نسبتاً یکنواخت است. دشت‌های داخلی و نواحی کویری مرکز و شرق ایران تمایل به مقادیر بالاتر TN90p دارند، در حالی که مناطق مرتفع، به‌ویژه البرز و زاگرس، افزایش ملایم‌تری را نشان می‌دهند. در آینده میانی، اختلاف میان نواحی مرتفع و کم‌ارتفاع تشدید می‌شود. مناطق شمالی کشور در مجاورت دریای خزر، اگرچه افزایش کمتری نسبت به دشت‌های داخلی تجربه می‌کنند، اما همچنان روند افزایشی آن‌ها کاهش نمی‌یابد. در مقابل، دشت‌های مرکزی، فلات شرقی و بخش‌هایی از جنوب و جنوب‌شرق کشور به‌عنوان کانون‌های افزایش شدیدتر TN90p ظاهر می‌شوند. سواحل جنوبی ایران و نواحی مجاور خلیج فارس و دریای عمان نیز در این دوره مقادیری از افزایش شاخص را تجربه می‌کنند که قابل مقایسه با برخی مناطق درونی کشور است.

در آینده دور، تحت سناریوهای SSP3-7.0 و به‌ویژه SSP5-8.5، الگوی فضایی به سمت افزایش قابل توجه TN90p در سراسر کشور است و تنها برخی قله‌های بسیار مرتفع در شمال و شمال‌شرق کشور مقادیر نسبتاً پایین‌تری را حفظ می‌کنند. این وضعیت نشان می‌دهد که در شرایط خیلی بدبینانه، عوامل محلی و توپوگرافی نیز توان تعدیل کامل گرمایش شبانه را از دست می‌دهند و افزایش شب‌های گرم به پدیده‌ای فراگیر در مقیاس کشور تبدیل می‌شود (شکل ۵).

تحلیل مناطق بیشینه و کمینه بی‌هنجاری نیز مؤید همین الگو است. کمینه‌های پایدار در تمامی سناریوها و دوره‌های مربوط به شاخص TN90p عمدتاً در نواحی کوهستانی مرتفع هستند و حتی در سناریوهای بدبینانه،

متمرکز می‌شوند. همچنین، دامنه‌های جنوبی دریای خزر در آینده دور و تحت سناریوهای بسیار بدبینانه، افزایش چشمگیری را نشان می‌دهند.

نسبت به سایر مناطق افزایش محدودتری را تجربه می‌کنند. در مقابل، بیشینه‌های شاخص به‌طور منسجم در دشت‌های کویری مرکزی و شرقی، فلات‌های داخلی و در دوره‌های آینده میانی و دور در سواحل جنوبی کشور



شکل ۵. شاخص روزهای شب‌های گرم (TN90p) در پهنه ایران مبتنی بر برونداد همادی CMIP6. در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت چهار سناریوی Tier 1 شامل SSP1-2.6 (سناریو توسعه پایدار خوش‌بینانه)، SSP2-4.5 (سناریو حد واسطه)، SSP3-7.0 (سناریو رقابت‌های منطقه‌ای) و SSP5-8.5 (سناریو توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی). (واحد: درصد).

۳-۵ تحلیل شاخص روزهای سرد (TX10p) در گستره ایران

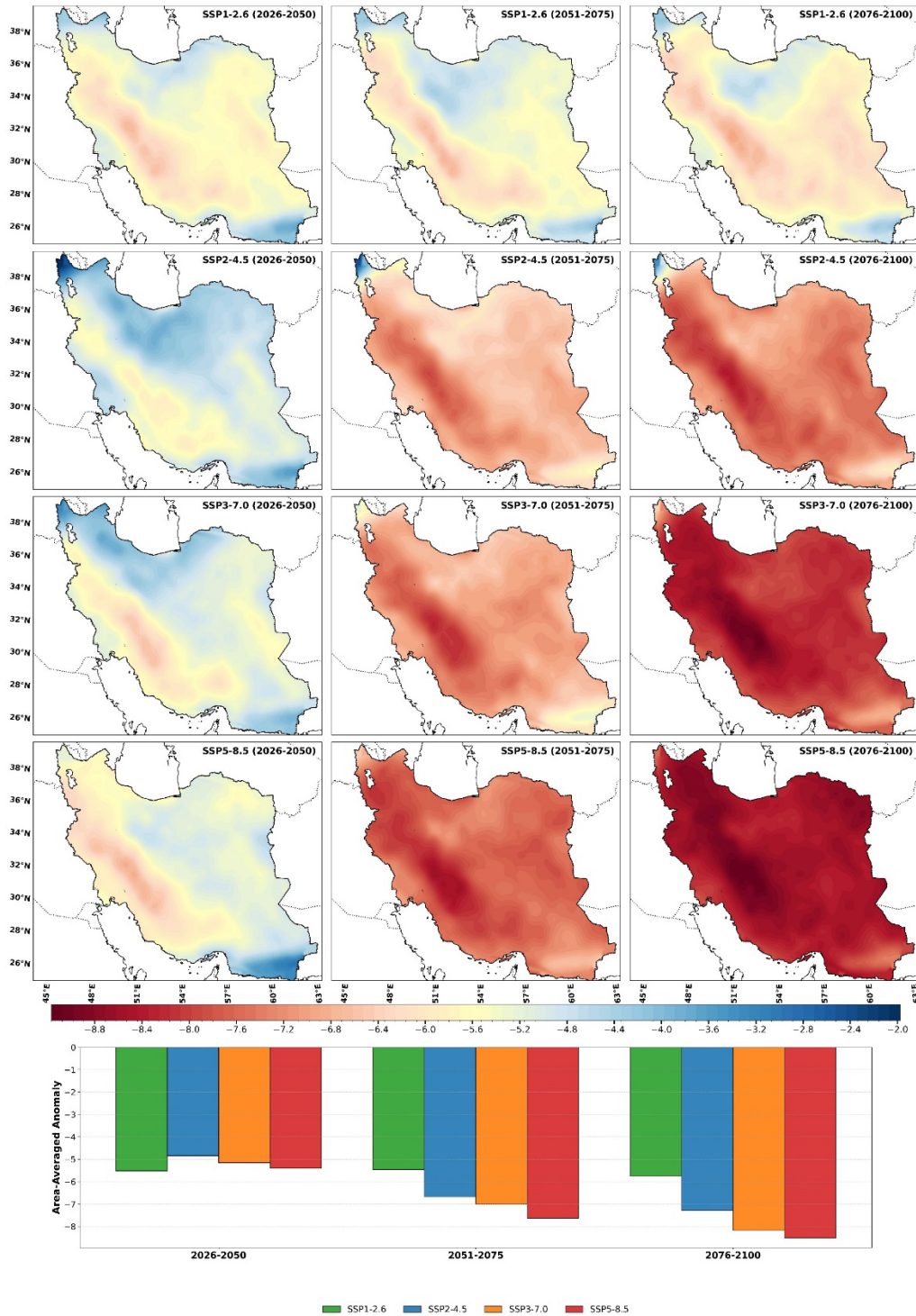
بررسی تغییرات زمانی شاخص TX10p در متوسط پهنه‌ای کشور یک روند کاهشی یکنواخت و فراگیر را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری منفی در این شاخص برای تمامی دوره‌های زمانی و تحت هر چهار سناریوی SSP، بیانگر کاهش معنادار در فراوانی روزهایی است که دمای بیشینه آن‌ها کمتر از صدک دهم دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) است. این کاهش سیستماتیک، نشان‌دهنده جابجایی توزیع دمایی به سمت مقادیر گرم‌تر است. در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، واگرایی میان سناریوها محدود بوده و پاسخ اقلیمی کمتر تحت تأثیر شدت واداشت‌های تابشی متفاوت قرار دارد. در این دوره، میانگین کاهش شاخص TX10p برای سناریوی SSP1-2.6 برابر با سناریوهای چهارگانه بین ۴/۸۴ درصد تا ۵/۵۰ درصد برآورد شده است (شکل ۶). دامنه تغییرات بین‌سناریویی در این بازه حدود ۰/۵ درصد است که حاکی از غلبه تغییرپذیری درونی سامانه اقلیم بر سیگنال‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در کوتاه‌مدت است.

با ورود به دوره‌های آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶)، واگرایی سناریوها و تشدید روند کاهش روزهای سرد به روشنی نمایان می‌شود. در دوره میانی، دامنه اختلاف بین خوش‌بینانه‌ترین (SSP1-2.6) با کاهش ۵/۴۵ درصد و بدبینانه‌ترین سناریو (SSP5-8.5) با کاهش ۷/۶۲ درصد به ۲/۱۷ درصد افزایش می‌یابد. این شکاف در آینده دور به بیشینه مقدار خود می‌رسد؛ به طوری که سناریوی SSP1-2.6 با کاهشی معادل ۵/۷۵ درصدی به یک وضعیت نسبتاً پایدار می‌رسد، سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب کاهش‌های شدید ۸/۱۷ درصد و ۸/۵۱ درصد را تجربه می‌کنند (شکل ۶). توزیع مکانی تغییرات TX10p الگوی پیچیده‌ای را

نشان می‌دهد که همبستگی بالایی با توپوگرافی و عرض جغرافیایی دارد. تحلیل نقشه‌های خروجی نشان می‌دهد که حساسیت مناطق مختلف ایران به گرمایش، یکسان نیست و بسته به نوع سناریو و افق زمانی، رفتارهای متفاوتی از خود بروز می‌دهند. در مناطق کوهستانی مرتفع، به ویژه رشته کوه البرز و ارتفاعات شمال شرقی، دوگانگی مشهودی وجود دارد. در دوره نزدیک و تحت سناریوی SSP1-2.6، این مناطق تغییرات محدودی را تجربه می‌کنند که بیانگر لختی یا اینرسی حرارتی و مقاومت نسبی اقلیم‌های کوهستانی در برابر گرمایش اولیه است. با این حال، در افق‌های زمانی دورتر و تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5، همین مناطق به کانون‌های اصلی تغییر تبدیل شده و شدیدترین کاهش در فراوانی روزهای سرد را نشان می‌دهند. این پدیده بیانگر آسیب‌پذیری بالای اکوسیستم‌های کوهستانی در برابر تداوم گرمایش جهانی است.

در سواحل جنوبی دریای خزر، نقش تعدیل‌کنندگی پهنه آبی و اقلیم خزری در دوره‌های آینده نزدیک و میانی و سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 مشهود است، اما با تشدید واداشت‌های تابشی در سناریوی SSP5-8.5 و در دوره انتهایی قرن، کاهش قابل توجهی در شاخص TX10p رخ می‌دهد. در مقابل، مناطق خشک و بیابانی مرکزی و همچنین سواحل جنوبی خلیج فارس به طور ذاتی دارای فراوانی پایین روزهای سرد هستند. بررسی مناطق زاگرس در غرب و جنوب غرب نیز الگوی متمایزی را آشکار می‌سازد؛ پایداری نسبی در سناریوی SSP1-2.6 در تقابل با کاهش شدید در سناریوهای SSP5-8.5 قرار دارد (شکل ۶). به طور کلی، تحلیل فضایی نشان می‌دهد که مناطق انتقالی بین کوهستان و دشت و همچنین ارتفاعات شمالی، بیشترین حساسیت را به تغییر اقلیم نشان می‌دهند. در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که ایران با یک گذار اقلیمی مواجه است که در

آن روزهای سرد به عنوان یک پدیده اقلیمی، به ویژه در نیمه شمالی و مرتفع کشور، به شدت کمیاب خواهند شد و این روند در صورت تحقق سناریوهای بدبینانه، با شتابی فزاینده تا پایان قرن ادامه خواهد یافت.



شکل ۶. شاخص روزهای سرد (TX10p) در پهنه ایران مبتنی بر پروتکل همادی CMIP6، در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت چهار سناریوی Tier 1 شامل SSP1-2.6 (سناریو توسعه پایدار خوش‌بینانه)، SSP2-4.5 (سناریو حد واسطه)، SSP3-7.0 (سناریو رقابت‌های منطقه‌ای) و SSP5-8.5 (سناریو توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی). (واحد: درصد).

۳-۶ تحلیل شاخص روزهای گرم (TX90p) در گستره ایران

تحلیل بی‌هنجاری شاخص TX90p در گستره ایران، بیانگر یک روند افزایشی در هر سه دوره زمانی آینده نزدیک، میانی و دور است. دامنه تغییرات میانگین شاخص بین ۱۵/۱۷ درصد در سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و ۱۹/۹۶ درصد در سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) متغیر است. این اختلاف حاکی از این واقعیت است که گرمایش در دهه‌های آتی مستقل از سناریوهای انتشار، تا حد زیادی قطعی و اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در آینده میانی، در حالی که سناریوی SSP1-2.6 افزایشی محدود با میانگین ۱۹/۴۸ درصد را نشان می‌دهد، سناریوی SSP5-8.5 جهشی به میزان ۴۴/۰۴ درصد را ثبت می‌کند که بیانگر اختلاف ۲۲/۵۶ درصدی است. این تغییرات در آینده دور به اوج خود می‌رسد؛ جایی که میانگین شاخص در SSP1-2.6 در مقایسه با SSP5-8.5 اختلاف فاحش ۴۴/۹۸ درصدی را نشان می‌دهد (شکل ۷).

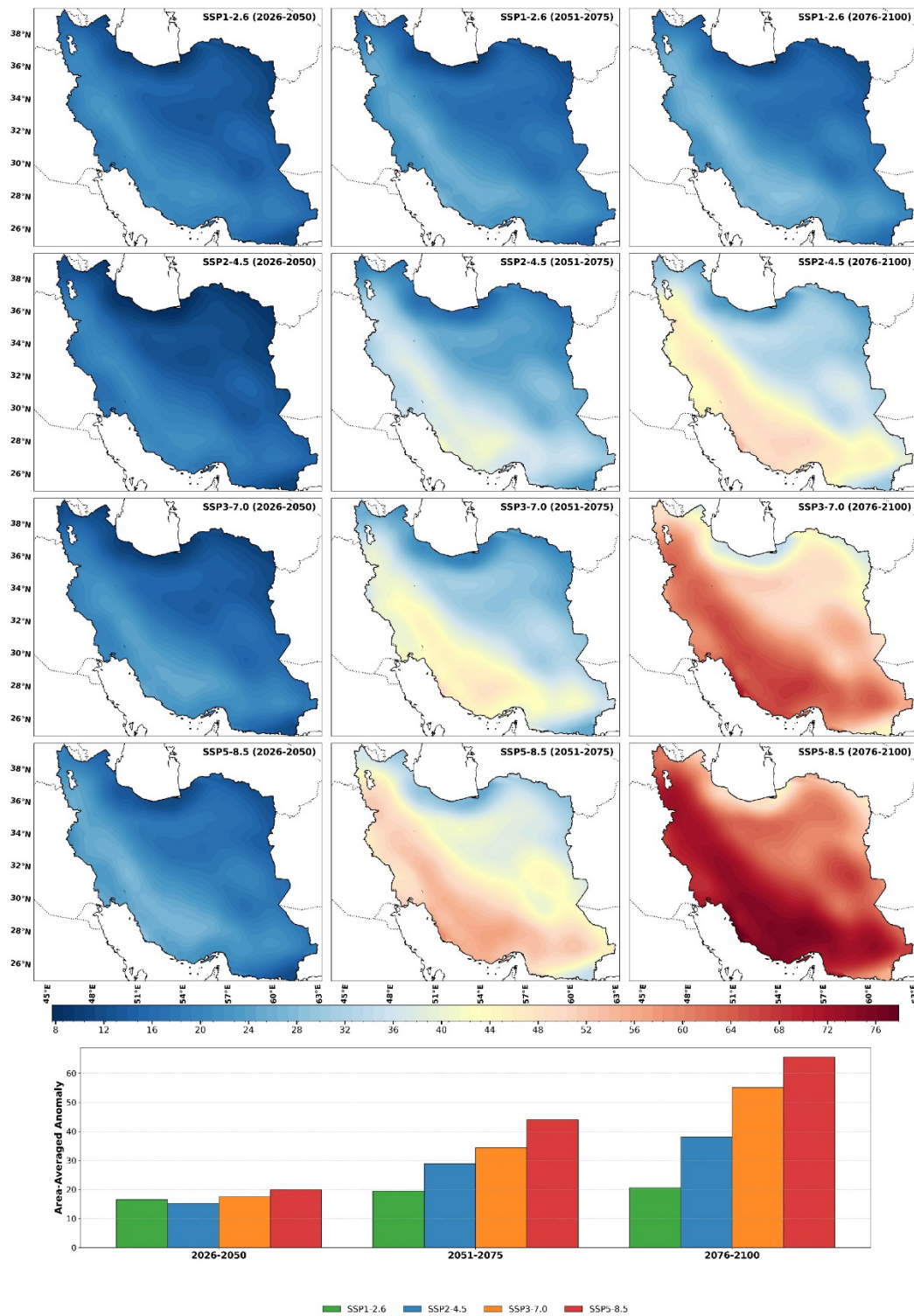
واکای توزیع مکانی شاخص TX90p ناهمگونی فضایی قابل توجهی را آشکار می‌سازد که متأثر از توپوگرافی پیچیده و عرض جغرافیایی است. مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی ایران و استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان، به‌عنوان کانون‌های داغ تغییر شاخص TX90p شناسایی شدند. این پهنه‌ها در تمام سناریوها بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند. به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5 و دوره آینده دور، مقادیر TX90p در مناطق داخلی و جنوب شرقی از آستانه ۷۰ درصد فراتر می‌رود؛ بدین معنا که بخش اعظم روزهای سال شرایطی فراتر از صدک نودم دوره تاریخی را تجربه خواهند کرد. روندهای تغییرات در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP3-7.0 نیز در این مناطق افزایشی است، به‌طوری که میانگین شاخص در آینده دور به ترتیب به ۳۸/۰۷ و ۵۵/۰۴ درصد می‌رسد. در

دوره آینده نزدیک و تحت سناریوی SSP1-2.6، کمینه مقادیر شاخص (کمتر از ۱۵ درصد) در ارتفاعات البرز و مناطق کوهستانی خراسان شمالی مشاهده می‌شود. با این وجود، تاب‌آوری این مناطق در برابر سناریوهای با واداشت تابشی بالا شکننده است (شکل ۷). تحلیل‌ها نشان می‌دهند که اثر ارتفاعات در دوره‌های زمانی دورتر و تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 تضعیف شده و حتی مناطق مرتفع و دامنه‌های شمالی البرز نیز مقادیر بالایی از TX90p (در بازه ۵۰ تا ۶۰ درصد) را تجربه خواهند کرد.

الگوی تغییرات در نواحی شمال‌غرب (حوضه دریاچه ارومیه) و زاگرس میانی در دوره‌های آینده نزدیک و میانی و سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 تغییرات کمتری را نشان می‌دهند، اما در سناریوی SSP5-8.5 با شیب تند تغییرات مواجه می‌شوند. به‌طور خاص، در مناطق کویری داخلی و استان‌های واقع در زاگرس جنوبی، افزایش شاخص در آینده دور تحت سناریوهای بدبینانه بسیار محسوس است و مقادیر بین ۵۰ تا ۷۶ درصد نوسان می‌کند (شکل ۷). در نهایت، نتایج این پژوهش بر همبستگی مستقیم میان شدت واداشت‌های اقلیمی و گسترش جغرافیایی پدیده‌های فرین‌گرایی در ایران دلالت دارد، به‌گونه‌ای که در شدیدترین سناریو، تقریباً تمام پهنه سرزمینی ایران، فارغ از توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی، در مواجهه تنش‌های گرمایی بی‌سابقه قرار خواهد گرفت.

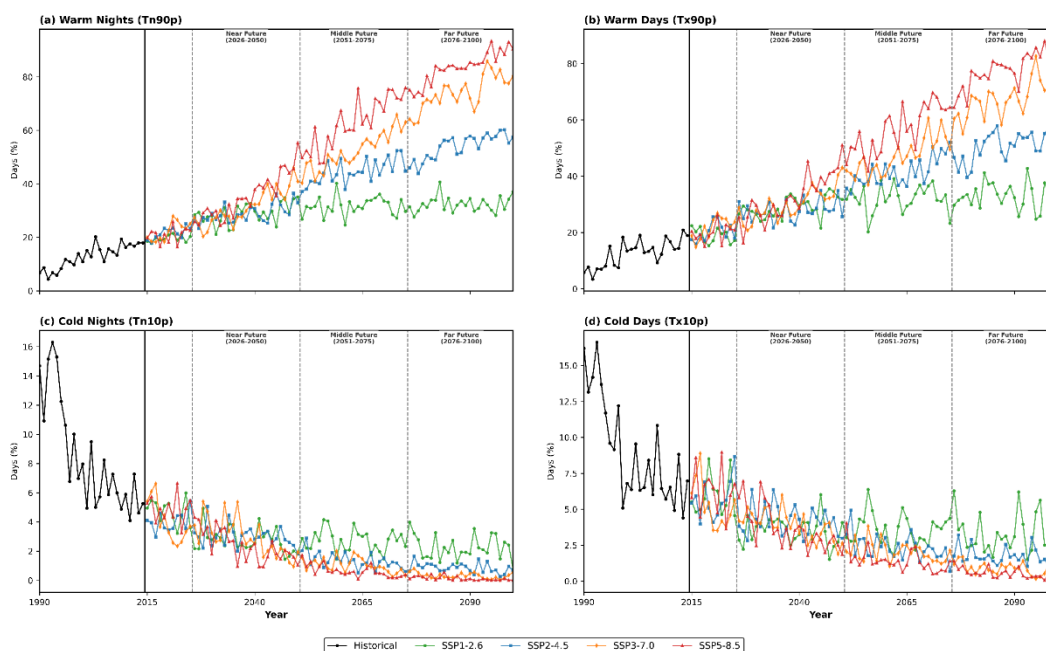
۳-۷ سری زمانی متوسط پهنه‌ای نمایه‌های فرین گرم و سرد تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن حاضر

تحلیل سری‌های زمانی متوسط پهنه‌ای شاخص‌های فرین دمایی سرد و گرم ایران بر مبنای برونداد چند مدلی همادی ماژولار CMIP6، بیانگر تغییرات ساختاری و



شکل ۷. شاخص روزهای روزهای گرم (TX90p) در پهنه ایران مبتنی بر پرونداد همادی CMIP6، در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت چهار سناریوی Tier 1 شامل SSP1-2.6 (سناریو توسعه پایدار خوش‌بینانه)، SSP2-4.5 (سناریو حد واسطه)، SSP3-7.0 (سناریو رقابت‌های منطقه‌ای) و SSP5-8.5 (سناریو توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی). (واحد: درصد).

برای TX90p (روزهای گرم) نیز مشهود است که با افزایش اولیه بین ۱۵ تا ۳۰ درصد آغاز شده و در نهایت تحت سناریوی SSP5-8.5 به بیشینه تقریبی ۱۰۰ درصد نزدیک می‌شود. در نقطه مقابل شاخص‌های فرین گرم، رخداد‌های فرین سرد با کاهش شدید مواجه‌اند، چنانکه شاخص TN10p (شب‌های سرد) با کاهش بین ۱۰- تا ۲۰- درصد در آینده نزدیک، به کاهش قابل توجه بیش از ۸۰- درصد در انتهای قرن می‌رسد. شاخص TX10p نیز کاهش از ۵- تا ۱۵- درصد در آینده نزدیک به بازه قابل توجه ۵۰- تا ۹۰- درصد در آینده دور برای SSP5-8.5 را تجربه می‌کند.



شکل ۸. سری‌های زمانی متوسط پهنه‌های شاخص‌های فرین دمای در ایران بر اساس پرونداد همادی چند مدلی ماژولار CMIP6. نمودارها روند تغییرات را برای درصد شب‌های گرم (TN90p)، درصد روزهای گرم (TX90p)، درصد شب‌های سرد (TN10p) و درصد روزهای سرد (TX10p) نشان می‌دهند. خطوط رنگی بیانگر سناریوهای مختلف اجتماعی-اقتصادی (SSPs) شامل SSP1-2.6 سبز، SSP2-4.5 آبی، SSP3-7.0 نارنجی و SSP5-8.5 قرمز هستند که بازه ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ را پوشش می‌دهند (واحد: درصد).

ترکیبی در نمودار هدف، به عنوان برترین مدل منفرد برای شبیه‌سازی اقلیم ایران برای دمای کمینه و بیشینه شناخته می‌شود. افزون بر این، میانگین چندمدلی (MME) به دلیل میانگین‌گیری از عدم قطعیت‌های ساختاری و پارامتریک مدل‌های مختلف، گزینه‌ای

قطعی اقلیم ایران به سمت شرایط گرمایش تشدید یافته است، به گونه‌ای که شاخص‌های فرین گرم TN90p و TX90p روندی سراسر افزایشی و شاخص‌های فرین سرد TN10p و TX10p کاهش پیوسته و معنادار را نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) نشان می‌دهند (شکل ۸). در این راستا، بی‌هنجاری‌های TN90p (شب‌های گرم) از بازه ۱۰ تا ۳۵ درصد در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) به مقادیر ۸۰ تا ۱۰۰ درصد در آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت سناریوهای بدبینانه SSP3-7.0 و SSP5-8.5 می‌رسد، در حالی که سناریوی SSP1-2.6 این افزایش را در حدود ۴۰ درصد محدود می‌کند؛ الگویی مشابه

۴ نتیجه‌گیری

تحلیل جامع روزها و شب‌های سرد و گرم در ایران، بیانگر یک تغییر اساسی در کشور طی سده بیست و یکم است. نتایج نشان می‌دهد که نسخه استاندارد EC-Earth3 به دلیل همبستگی بالا (۰/۸۵) و کمترین فاصله خطای

آسیب‌پذیری اقلیمی بالاتری را نشان می‌دهند. تفسیر فیزیکی این روند افزایشی در ایران، نیازمند واکاوی برهم‌کنش‌های پیچیده میان دینامیک جو و بازخوردهای سطح زمین است. نتایج نشان می‌دهد که پایداری سامانه‌های جوی نقش کلیدی در شکل‌گیری و تداوم این فرین‌های دمایی ایفا می‌کند. به طور مشخص، استقرار پرفشارهای جنب‌حاره، زمینه را برای انباشت گرمایی فراهم می‌آورند. در چنین شرایطی، فرونشینی هوا در مقیاس بزرگ و در پی آن گرمایش آدیاباتیکی، به عنوان سازوکار غالب در مناطق جنب‌حاره‌ای نظیر ایران عمل کرده و بر فرآیندهای فرارفت افقی غلبه می‌کند (Pfahl and Wernli, 2012; Nabizadeh et al., 2021).

علاوه بر محرک‌های دینامیکی، بازخوردهای ترمودینامیکی سطح زمین و جو نقش فزاینده‌ای در تشدید شدت فرین‌هایی دمایی در آینده ایران خواهند داشت. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، کاهش رطوبت خاک به عنوان یک عامل محدودکننده حیاتی عمل می‌کند. در شرایط کمبود رطوبت خاک، سهم شار حرارتی نهان (سرمايش تبخیری) کاهش یافته و توازن انرژی به نفع شار حرارتی محسوس تغییر می‌کند که این امر مستقیماً منجر به افزایش دمای هوای مجاور سطح زمین می‌شود (Fischer et al., 2007; Miralles et al., 2012). این چرخه بازخوردی مثبت، به‌ویژه در سناریوهای با انتشار بالا (SSP5-8.5) که با خشکیدگی بیشتر همراه هستند، می‌تواند منجر به رخداد فرین‌های گرمایی بسیار شدید شود که ترکیبی از انباشت گرما و خشکی شدید سطح زمین است. در افق‌های زمانی دورتر (۲۱۰۰-۲۰۷۶)، اثر مستقیم گرمایش ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری اراضی، بر نوسانات طبیعی اقلیمی غالب شده و موجب جابجایی توزیع احتمالی دما به سمت مقادیر فرین گرم می‌شود.

مطمئن برای برآوردهای اقلیمی آتی محسوب می‌شود. یافته‌ها همچنین بیانگر آن است که افزودن پیچیدگی‌های دینامیکی نظیر شیمی جو (در نسخه AerChem) یا پوشش گیاهی دینامیک (در نسخه Veg)، لزوماً منجر به بهبود خطی دقت در شبیه‌سازی متغیرهای دما در ایران نشده است.

بررسی روند تغییرات روزها و شب‌های سرد و گرم در چهار سناریوی انتشار (SSP1-2.6 تا SSP5-8.5) و سه بازه زمانی (آینده نزدیک، میانی و دور)، حاکی از افزایش معنادار فراوانی رخداد‌های فرین گرم است. در سناریوی SSP1-2.6، اگرچه بی‌هنجاری‌های مثبت فرین‌های گرم مشاهده می‌شود، اما دامنه تغییرات تا پایان قرن در محدوده‌ای قابل کنترل باقی می‌ماند. در مقابل، سناریوهای بدبینانه SSP3-7.0 و SSP5-8.5، به‌ویژه در نیمه دوم قرن، تصویری از شرایط اقلیمی را ترسیم می‌کنند که در آن روزها و شب‌های گرم نه به عنوان یک بی‌هنجاری، بلکه به عنوان وضعیت غالب اقلیمی تثبیت می‌شوند. این تشدید گرمایش، که با افزایش واداشت تابشی گازهای گلخانه‌ای همبستگی مستقیم دارد، نه تنها میانگین دما را تغییر می‌دهد، بلکه بر اساس یافته‌های پژوهش‌های پیشین، تغییرپذیری و احتمال رخداد‌های فرین را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Donat et al., 2012; Seneviratne et al., 2013).

بررسی دقیق‌تر تفاوت‌های منطقه‌ای آشکار می‌سازد که مولفه‌های جغرافیایی نظیر عرض جغرافیایی، توپوگرافی و مجاورت با منابع آبی، نقش تعدیل‌کننده یا تشدیدکننده در بروز این تغییرات ایفا کرده‌اند. در نوار شمالی کشور، به دلیل اثرات تعدیل‌کننده دریای خزر، نرخ رخداد روزها و شب‌های گرم (TX90p و TN90p) نسبت به میانگین کشوری پایین‌تر است. در مقابل، مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی، به‌ویژه سواحل خلیج فارس و دشت لوت که به طور ذاتی دارای میانگین دمای تابستانه،

- HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098-2118.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J., ... & Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098-2118.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneft, A., Arsouze, T., ... & Zhang, Q. (2021). The EC-earth3 Earth system model for the climate model intercomparison project 6. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021, 1-90.
- Dunn, R. J., & Morice, C. P. (2022). On the effect of reference periods on trends in percentile-based extreme temperature indices. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034026.
- Dunn, R. J., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., ... & Bin Hj Yussof, M. N. A. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2019JD032263.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Lüthi, D., & Schär, C. (2007). Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- Fotso-Nguemo, T. C., Weber, T., Diedhiou, A., Chouto, S., Vondou, D. A., Rechid, D., & Jacob, D. (2023). Projected impact of increased global warming on heat stress and exposed population over Africa. *Earth's Future*, 11(1), e2022EF003268.
- Kim, Y. H., Min, S. K., Zhang, X., Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100269.
- Madec, G. (2015). NEMO ocean engine.
- Miralles, D. G., Teuling, A. J., Van Heerwaarden, C. C., & Vilà-Guerau de Arellano, J. (2014). Mega-heatwave
- منابع
- تقوی، فرحناز. (۱۳۸۹). ارتباط بین تغییر اقلیم و رویدادهای حدی. *فیزیک زمین و فضا*، ۳۶(۲)، ۳۳-۴۳.
- درگاهیان، فاطمه؛ پورهایمی، مهدی. (۱۴۰۱). رخداد تغییر اقلیم براساس شاخص‌های دمایی سرد در اکوسیستم جنگلی زاگرس مرکزی. پژوهش و توسعه جنگل، ۸(۲)، ۱۹۷-۲۱۵.
- زند، مهران؛ غلامرضایی، سارا؛ دریاباری، سید جمال الدین؛ علیجانی، بهلول. (۱۴۰۲). آشکار سازی تغییر اقلیم با تحلیل روند وقوع رخداد‌های فرین اقلیمی در غرب و جنوب غرب ایران. پژوهش های اقلیم شناسی، ۱۴۰۲(۵۴)، ۳۷-۵۴.
- Akter, M. Y., Islam, A. R. M. T., Mallick, J., Alam, M. M., Alam, E., Shahid, S., ... & Oliver, M. M. H. (2024). Temperature extremes projections over Bangladesh from CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(9), 8843-8869.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Aumont, O., Éthé, C., Tagliabue, A., Bopp, L., & Gehlen, M. (2015). PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(2), 1375-1509.
- Cadiou, C., & Yiou, P. (2025). Intensity and dynamics of extreme cold spells of the 21st century in France from CMIP6 data. *Earth System Dynamics*, 16(5), 1759-1778.
- Collazo, S., Barrucand, M., & Rusticucci, M. (2022). Evaluation of CMIP6 models in the representation of observed extreme temperature indices trends in South America. *Climatic Change*, 172(1), 21.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J., ... & Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The

- temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nature geoscience*, 7(5), 345-349.
- Nabizadeh, E., Lubis, S. W., & Hassanzadeh, P. (2021). The 3D structure of northern hemisphere blocking events: Climatology, role of moisture, and response to climate change. *Journal of Climate*, 34(24), 9837-9860.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6.
- Pfahl, S., & Wernli, H. (2012). Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-) daily time scales. *Geophysical Research Letters*, 39(12).
- Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3), 329-343.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.
- Sabarinath, A., Rajesh, A. N., Kesavavarthini, T., & Nair, M. M. (2025). CMIP6 Simulations of Compound Hot Days and Nights over Interior Peninsular Region of India. *Natural Hazards*, 1-19.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., ... & Allan, R. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., ... & Zwiers, F. W. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 118(4), 1716-1733.
- Smith, B., Wårlind, D., Arneth, A., Hickler, T., Leadley, P., Siltberg, J., & Zaehle, S. (2014). Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model. *Biogeosciences*, 11(7), 2027-2054.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- Team, C. W. (2010, January). Good practice guidance paper on assessing and combining multi model climate projections. In *IPCC Expert meeting on assessing and combining multi model climate projections* (p. 1).
- Thunis, P., Pederzoli, A., & Pernigotti, D. (2012). Performance criteria to evaluate air quality modeling applications. *Atmospheric Environment*, 59, 476-482.
- Van Noije, T. P. C., Le Sager, P., Segers, A. J., Van Velthoven, P. F. J., Krol, M. C., Hazeleger, W., ... & Chambers, S. D. (2014). Simulation of tropospheric chemistry and aerosols with the climate model EC-Earth. *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2435-2475.
- Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., ... & Winkler, H. (2014). A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture. *Climatic change*, 122(3), 373-386.
- Vancoppenolle, M., Fichefet, T., Goosse, H., Bouillon, S., Madec, G., & Maqueda, M. A. M. (2009). Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation. *Ocean Modelling*, 27(1-2), 33-53.
- World Economic Forum. (2025). The global risks report 2025: 20th ed. insight report. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870.

Changes in cold and hot days and nights indices in Iran using EC-Earth3 multi-model ensemble configurations

Abbasali Dadashi-Roudbari ^{1*}

¹ Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 31 December 2025, Accepted: 22 March 2026)

Summary

Global risk assessments underscore a critical paradigm shift: climate change has evolved from a distant potentiality into an immediate and destructive certainty. Accordingly, the *Global Risks Report (2025)* classifies extreme climate events as the second most severe risk within the short-term horizon. By highlighting a transition from a warning phase to an active crisis, the report elucidates that the nonlinear intensification of phenomena such as flash floods, heatwaves, and storms has surpassed normal atmospheric variability, inflicting structural damage upon critical ecosystems and economic infrastructure. Since climate change increasingly dictates the frequency and intensity of temperature extremes, the present study evaluates these hazards within the context of Iran. We examined variations in four extreme indices—TX90p, TN90p, TX10p, and TN10p—utilizing five primary configurations of the EC-Earth3 modular Earth system model across four Shared Socioeconomic Pathways (SSPs).

Initially, a Multi-Model Ensemble (MME) was generated from the five EC-Earth3 configurations. The analysis demonstrated that the MME provided superior performance by mitigating the errors inherent in individual models. Findings reveal a pronounced heterogeneity in the changing patterns of temperature extremes; specifically, a significant decline in the frequency of cold days and nights runs parallel to a surge in warm events across the country. Under the SSP5-8.5 scenario, the warm days index (TX90p) in Iran's internal and desert regions is projected to exceed 65% by the end of the century, signaling a fundamental transformation in the climate of these areas. The primary hotspots of these warm extremes align largely with the central regions, the Dasht-e Lut, and the southeast. In these zones, positive feedbacks driven by soil moisture deficits appear to exacerbate heatwaves and accelerate evaporation trends. Conversely, northern regions and the Alborz highlands, while still exhibiting an upward trend, experience a more gradual rate of change due to the moderating influences of topography and moisture availability.

Furthermore, the stark divergence between scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5 during the latter half of the century underscores the critical imperative of emission reduction policies in curbing the severity of extreme fluctuations. Thermodynamic land-atmosphere feedbacks are poised to play an increasingly dominant role in amplifying future temperature extremes in Iran. Given the country's arid and semi-arid climate, soil moisture depletion acts as a critical limiting factor. Under conditions of soil moisture scarcity, the contribution of latent heat flux (evaporative cooling) diminishes, shifting the energy balance in favor of sensible heat flux; this mechanism directly drives an increase in air temperatures. This positive feedback loop particularly under high-emission scenarios (SSP5-8.5) associated with intensified aridification may precipitate ultra-severe warm extremes characterized by a synergy of heat accumulation and profound surface desiccation.

Keywords: Climate change, CMIP6, Temperature extremes, SSP scenarios, Iran

* Corresponding author:

a-dadashi@um.ac.ir