

Projecting changes in absolute temperature indices and heat risk intensification across Iran using the CTHI

Abbasali Dadashi-Roudbari^{1*}, Shima Tajeri²

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

2- Undergraduate student in Climatology, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* Corresponding Author: a-dadashi@um.ac.ir

Introduction

In the 21st century, anthropogenic global warming has become a paramount crisis for human societies, profoundly altering Earth's energy balance and hydrological cycle. The Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (IPCC AR6) confirms that the global mean surface temperature during the last decade (2011–2020) increased by 1.09–1.1 °C relative to the pre-industrial baseline. Notably, warming over land areas is substantially more pronounced than over the oceans (IPCC, 2021). To address methodological and practical gaps in regional climate risk assessments, this study investigates a central research question: What spatiotemporal patterns will absolute temperature extremes—specifically, the annual minimum of daily minimum temperature (TNn) and the annual maximum of daily maximum temperature (TXx)—exhibit across Iran under various emission scenarios?

Materials and Methods

This observational study uses meteorological data from the Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO) network. We extracted daily time series of minimum and maximum temperatures from 103 synoptic weather stations that capture Iran's diverse climate regimes and topographical heterogeneity. To project future climate variables, we generated a multi-model ensemble (MME) using 14 Global Climate Models (GCMs) and Earth System Models (ESMs) from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The selected models include GFDL-ESM4, CanESM5, CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3, IITM-ESM4, KACE-1-0-G, MIROC6, TaiESM1, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL. To evaluate the MME's performance in reproducing absolute temperature extreme indices (TXx and TNn) against synoptic station observations, we used the refined index of agreement. Furthermore, integrating hot and cold extremes required developing a dimensionless composite indicator, which we term the Compound Thermal Hazard Index (CTHI). Because the simulated anomalies of TNn and TXx vary widely in amplitude, we applied min-max normalization. This approach strictly aligns with the IPCC risk assessment framework and the OECD benchmark guidelines for constructing composite indicators.

Results and Discussion

Performance evaluation of the MME—derived from bias-corrected CMIP6 outputs over the historical reference period (1990–2014)—reveals distinct spatial and structural heterogeneities in replicating Iran's absolute temperature extremes. The refined index of agreement highlights a pronounced discrepancy between the simulations of absolute maximum (TXx) and absolute minimum (TNn) temperatures. Specifically, TXx is reproduced with greater fidelity across the 103 synoptic stations, largely because synoptic-scale forcings, shortwave radiative fluxes, and warm-air advection primarily govern it. Conversely, the TNn simulation shows markedly lower skill. This deficiency stems from the index's sensitivity to highly localized nocturnal boundary-layer dynamics, radiative inversions, soil moisture–atmosphere feedbacks, and the inherent parameterization limitations of GCMs/ESMs over complex terrain. Future projections under the Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios indicate a systemic shift toward pervasive warming in TNn across Iran. Notably, no region is projected to experience negative (cooling) anomalies; instead, temperatures are projected to increase by 1.2 to 8.1 °C. The analysis of TXx similarly reveals an unmitigated warming trajectory, which is mechanistically distinct from the nocturnal cold regime. This index is projected to rise in the near-term climatological future, exhibiting a spatial mean increase of 1.5 to 2.3 °C, and ultimately culminating in severe thermal extremes by the end of the century (2076–2100).

Conclusion

Projections under the SSP scenarios robustly confirm a ubiquitous warming trend, with no negative temperature anomalies across the study domain. In the near term, the models' thermodynamic responses remain largely convergent, mainly because of the climate system's historical thermal inertia. However, by the end of the 21st century under the fossil-fueled development scenario (SSP5-8.5), spatial mean anomalies are projected to reach +5.8 °C for TNn and +6.9 °C for TXx. The Zagros and Alborz mountain ranges, along with the northwestern territories, are projected to

experience anomalies exceeding $+8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, emerging as critical hotspots for this thermal intensification. Elevation-dependent warming (EDW) mechanisms and positive snow–albedo feedbacks directly modulate these amplified warming rates. To integrate these risks comprehensively, we formulated the CTHI in accordance with OECD guidelines for composite indicators. In the absence of definitive empirical evidence prioritizing the socio-ecological impacts of either extreme, we assigned equal weight to both variables. Under the strong mitigation scenario (SSP1-2.6), the compound thermal hazard stabilizes at a low threshold (maximum CTHI of 0.25). Conversely, the unmitigated SSP5-8.5 scenario propels the index beyond 0.8 across vast expanses of the country by the century's close. This profound destabilization of the temperature-extremes regime, coupled with reduced snow-cover duration and intensified actual evapotranspiration, is expected to pose unprecedented and potentially irreversible challenges to water security in Iran's major river basins.

Keywords: Absolute temperature extremes, Compound Thermal Hazard Index (CTHI), CMIP6, SSP scenarios, Iran.

پیش‌نگری تغییرات شاخص‌های فرین مطلق دما و تشدید مخاطره گرمایی ایران با استفاده از شاخص ترکیبی CTHI

عباسعلی داداشی رودباری^{۱*}، شیما تاجری^۲

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

۲- دانشجوی کارشناسی اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

هدف این پژوهش، پیش‌نگری تغییرات شاخص‌های فرین مطلق دما و ارزیابی مخاطره گرمایی در ایران با استفاده از شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI) است. ارزیابی چندمدلی همادی (CMIP6-MME) متشکل از ۱۴ مدل تصحیح‌اریبی شده، ناهمگنی مکانی آشکاری را در بازتولید فرین‌ها طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) نشان می‌دهد. بر اساس سنجه ضریب توافق تصحیح‌شده، کارایی بیشینه مطلق دما (TXx) نسبت به کمینه مطلق (TNn) بالاتر است. هرچند کاهش کارایی CMIP6-MME در پهنه‌های پیچیده توپوگرافیک نظیر زاگرس مشهود است، اما در مناطق داخلی انطباق بالایی با داده‌های مشاهداتی دیده می‌شود. پیش‌نگری‌ها گرمایش سراسری را بدون بی‌هنجاری منفی نشان می‌دهند. در آینده نزدیک به دلیل آختی سامانه اقلیمی، پاسخ ترمودینامیکی همگراست؛ اما در اواخر قرن واگرایی چشمگیری میان سناریوها دیده می‌شود. به‌طوری‌که میانگین پهنه‌ای بی‌هنجاری شاخص‌های TXx و TNn تحت سناریوی SSP1-2.6 به ترتیب در محدوده ۱/۸ تا ۲ درجه سلسیوس تثبیت شده، اما تحت سناریوی SSP3-7.0 بی‌هنجاری شاخص‌ها به ۴/۴ تا ۵/۷ درجه سلسیوس رسیده و در سناریوی SSP5-8.5 به بیش از ۸ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. قانون اصلی این تغییرات با بی‌هنجاری‌های فراتر از ۸ درجه سلسیوس، ارتفاعات زاگرس، البرز و شمال غرب است که مستقیماً از سازوکار گرمایش وابسته به ارتفاع (EDW) و بازخورد برف - سپیدایی نشئت می‌گیرد. در پایان قرن، شاخص CTHI تحت سناریوی SSP1-2.6 در پایین‌ترین سطح مخاطره (حداکثر ۰/۲۵) تثبیت می‌شود، اما تحت سناریوی SSP5-8.5 در بخش‌های وسیعی از کشور بازتاب‌دهنده بالاترین سطح مخاطره (مقدار ۰/۸) است. این گسیختگی در رژیم فرین‌های دمایی، همراه با کاهش ماندگاری پوشش برفی و تشدید تبخیر - تعرق واقعی، امنیت آبی حوضه‌ها را با چالشی بی‌بازگشت مواجه خواهد کرد.

واژگان کلیدی: فرین‌های مطلق دمایی، تصحیح‌اریبی، پروژه CMIP6، سناریوهای SSP، ایران.

مقدمه

گرمایش جهانی در قرن بیست و یکم، به یکی از بحران‌های جوامع بشری تبدیل شده است. چالشی که بیلان انرژی سیاره و چرخه هیدرولوژیک آن را دستخوش تغییرات ساختاری کرده است (IPCC, 2021). ششمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (AR6) تأیید می‌کند که میانگین دمای سطح زمین در دهه اخیر (۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰) افزایشی معادل ۱/۰۹ تا ۱/۱ درجه سلسیوس را نسبت به دوران پیش از انقلاب صنعتی تجربه کرده است. شایان ذکر است که نرخ این تغییرات در پهنه‌های خشکی به مراتب شدیدتر و نگران‌کننده‌تر از اقیانوس‌ها گزارش می‌شود (IPCC, 2021).

در پارادایم سنتی ارزیابی‌های اقلیمی، تمرکز عمده بر نوسانات بلندمدت و میانگین‌های متغیرهای جوی معطوف بود. با این حال، امروزه در جامعه علمی این اجماع حاصل شده است که مخرب‌ترین جنبه‌های تغییر اقلیم نه در تغییر میانگین‌ها، بلکه در تغییرات شدت و فراوانی رخدادهای فرین نهفته است (Vidya et al., 2026). واقعیت فیزیکی حاکم بر دینامیک جو تأیید می‌کند که حتی یک افزایش جزئی در میانگین‌های اقلیمی، جابه‌جایی نمایی و شدیدی را در تعداد روزهای فراتر از آستانه‌های بحرانی رقم می‌زند (Schuhen et al., 2026). این امر، پایداری اکولوژیک، امنیت غذایی، منابع آب و سلامت عمومی جوامع را در ابعاد بین‌المللی با مخاطرات جدی روبرو می‌سازد (Ge et al., 2021).

در راستای تبیین کمی این فرایندها، فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6¹) تحت نظارت برنامه جهانی پژوهش اقلیم (WCRP²)، گامی تکاملی در شبیه‌سازی سامانه اقلیمی برداشته است (Eyring et al., 2016). این پروژه با ارتقای تفکیک افقی و بهینه‌سازی طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی، کارایی بالایی را نسبت به مدل‌های پیشین فراهم آورده است (Xu et al., 2022; dos Santos, 2026). به موازات آن، نمایه‌های استاندارد تیم متخصصان تشخیص و نمایه‌های تغییر اقلیم (ETCCDI³) ابزاری ضروری و استاندارد برای کمی‌سازی سیستماتیک فرین‌های اقلیمی توسعه داده‌اند (Zhang et al., 2011).

اگرچه تغییرپذیری فرین‌های اقلیمی در پهنه ایران در دهه‌های گذشته گزارش شده است (Rahimzadeh et al., 2009; Fakhri, 2024; Chehreghara Ziabari & Hajivand Paydari, 2026; Ramezani Etedali and Koochi, 2026)، اما پیش‌نگری آن همچنان با چالش‌های روش‌شناختی زیادی روبروست. تنوع اقلیمی پیچیده ایران از مناطق فوق‌العاده خشک داخلی تا نواحی کوهستانی و ساحلی این منطقه را به شدت در برابر نوسانات گرمایی آسیب‌پذیر ساخته است با وجود برخی تحقیقات انجام شده، ادبیات تحقیق موجود با یک شکاف تحقیقاتی روبرو است که تاکنون هیچ مطالعه جامع و منسجمی، پیش‌نگری فرین‌های مطلق دمایی کمینه (TNn) و بیشینه (TXx) را در گستره ایران با استفاده از رویکرد چندمدلی همادی ارائه نداده است.

ارزیابی تک متغیره متغیرهای دمایی مطلق نمی‌تواند ابعاد واقعی مخاطرات را تبیین کند؛ لذا سنجش و مدل‌سازی یکپارچه این مخاطرات از طریق توسعه یک شاخص ترکیبی که برهم‌کنش فرین‌ها را شبیه‌سازی کند، خلأ علمی دیگری است که به شدت احساس می‌شود. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف رفع این شکاف روش‌شناختی و کاربردی انجام شده است تا به این پرسش‌های کلیدی پاسخ دهد که فرین‌های مطلق دمایی کمینه (TNn⁴) و بیشینه (TXx⁵) تحت سناریوهای مختلف در ایران چه الگویی را تجربه خواهند کرد؟ و برون‌داد تلفیق شاخص‌های فرین مطلق دما با شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI)، چه تصویری از تشدید مخاطره گرمایی و پیامدهای آن برای ساختارهای اجتماعی - اقتصادی و اکولوژیک ایران ترسیم می‌کند؟ در راستای دستیابی به اهداف و پاسخ به این پرسش‌ها، مسیر پژوهش بر پایه دو فرضیه کلیدی تدوین شده است. نخست آنکه الگوی تغییرات شاخص‌های فرین مطلق دما تحت سناریوهای مختلف SSP، در ایران ناهمگن بوده و مناطق کوهستانی کشور بی‌هنجاری‌های دمایی شدیدتری را نسبت به سایر مناطق تجربه می‌کنند. همچنین، کاربست شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI) نشان می‌دهد که تشدید فرین‌های دمایی

¹ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

² World Climate Research Programme (WCRP)

³ Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

⁴ Minimum value of daily minimum temperature (TNn)

⁵ Maximum value of daily maximum temperature (TXx)

تحت سناریوهای خیلی بدبینانه، مانند SSP5-8.5، مخاطره گرمایی و پیامدهای بالقوه آن را برای ساختارهای اجتماعی - اقتصادی و اکولوژیک ایران به آستانه‌های بحرانی می‌رساند؛ لذا این تحقیق با پاسخ به این دو پرسش کلیدی و فرضیه‌های یادشده، چارچوبی حیاتی جهت تدوین راهبردهای هدفمند سازگاری و ارتقای تاب‌آوری ملی در برابر تغییر اقلیم فراهم می‌سازد.

درک دقیق از تغییرات فرین‌های اقلیمی، نیازمند گذار از تحلیل‌های نقطه‌ای و تک‌مدلی به سمت رویکردهای جامع مبتنی بر چندمدلی همادی است. مرور ادبیات تحقیق در این زمینه نشان می‌دهد که دانش اقلیم‌شناسی در سال‌های اخیر، چه در حوزه روش‌شناسی از نظر ارتقای روش‌های مقیاس‌کاهی و تولید چندمدلی همادی و چه در حوزه تحلیل شاخص‌های فرین به‌ویژه فرین‌های مطلق دمایی کمینه و بیشینه، به توسعه قابل توجهی دست یافته است. به‌کارگیری روش‌های تولید چندمدلی همادی، مبنای اصلی پیش‌نگری‌های اقلیمی است. داس و همکاران (Das et al., 2023) در ارزیابی خود از مناطق حاره‌ای، با استفاده از تحلیل فراوانی مبتنی بر گشتاورهای خطی، نشان دادند که توزیع نرمال تعمیم‌یافته برای برازش فرین‌های دمایی کارآمد است. در همین راستا، پل و مایتی (Paul & Maity, 2023) با استفاده از ۱۴ مدل CMIP6 به بررسی فرین‌های اقلیمی پرداخته و نشان دادند که عدم به‌کارگیری چندمدلی همادی، به درک ناقصی از پیامدهای تغییر اقلیم منجر می‌شود.

با این حال، پیچیدگی‌های توپوگرافیک و بی‌هنجاری‌های اقلیمی، ضرورت عبور از روش‌های سنتی را ایجاب می‌کند. کویی و همکاران (Cui et al., 2025) کارایی روش‌های یادگیری ماشین را برای شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی بر فراز فلات تبت ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها اثبات کرد که الگوریتم‌هایی نظیر جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، در ثبت توزیع فضایی شاخص‌های فرین، کارایی بالاتری نسبت به رویکردهای سنتی میانگین حسابی و میانگین‌گیری بیزین دارند. هم‌زمان، سریدهارا و همکاران (Sridhara et al., 2026) از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای رتبه‌بندی دقیق ۱۳ مدل CMIP6 استفاده کردند تا عدم قطعیت‌ها را در حوضه‌های حساس آبی کاهش دهند.

فرین‌های مطلق دمایی، به‌ویژه کمینه (TNn) و بیشینه (TXx)، حساس‌ترین شاخص‌های پاسخ سامانه اقلیمی به واداشت‌های انسانی و طبیعی هستند. بررسی روندهای تاریخی توسط متوا و همکاران (Mtewa et al., 2025) در قاره آفریقا نشان داد که تغییرات معناداری در فرین‌های مطلق TXx و TNn رخ داده است که این گرمایش با تغییرات کاربری اراضی و جنگل‌زدایی ارتباط نزدیکی دارد. در مقیاس پیش‌نگری، شدت تغییرات این شاخص‌ها به‌مراتب بیش‌تر است. پژوهش‌های ژو و همکاران (Zhu et al., 2023) و ژو و همکاران (Zhu et al., 2025) روی قاره جنوبگان، پدیده تشدید قطبی^۱ را در شاخص‌های فرین تأیید کردند. آن‌ها دریافتند که فرین‌های دمایی، به‌ویژه مقادیر مطلق TXn و TNx، تحت سناریوهایی همانند SSP5-8.5 با روندی قابل توجه در حال افزایش هستند. این روند در مناطق حاره‌ای و نیمه‌خشک نیز با الگوهای متفاوتی گزارش شده است. نذرویل و همکاران (Nazrul et al., 2026) پیش‌نگری کردند که تا اواخر قرن بیست‌ویکم، مقادیر TXx و TNn در بنگلادش به ترتیب ۵/۱۲ و ۵/۴۹ درجه سلسیوس افزایش خواهند یافت. در اقلیم نیمه‌خشک که شباهت ساختاری با بخش‌های بزرگی از ایران دارد، دوس سانتوس (dos Santos, 2026) در برزیل پیش‌نگری کرد که مقدار TXx می‌تواند از مرز بحرانی ۴۲ درجه سلسیوس عبور کند و حتی در سناریوهایی همانند SSP1-2.6 نیز روند گرمایش متوقف نخواهد شد.

درک آثار مخرب تغییر اقلیم تنها با تحلیل تک‌شاخصی ممکن نیست و مستلزم ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های ترکیبی و طول دوره تداوم آن‌هاست. شوئن و همکاران (Schuhen et al., 2026) با بررسی ۲۱ مدل CMIP6 نشان دادند شاخص‌های فرین دمایی (به‌ویژه شاخص‌های مبتنی بر صدک) بسیار زودتر از شاخص‌های بارشی، از تغییرپذیری طبیعی اقلیم خارج می‌شوند. در سطح منطقه‌ای نیز ویدیا و همکاران (Vidya et al., 2026) در هند دریافتند که تحت سناریوی SSP5-8.5، فرین‌های سرد مانند TN10p و TX10p تقریباً به طور کامل ناپدید خواهند شد و شاخص تداوم روزهای گرم (WSDI^۲) به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. مشابه این الگو توسط

^۱ Antarctic Amplification

^۲ Warm Spell Duration Index (WSDI)

انیو و همکاران (Enyew et al., 2026) در اتیوپی نیز گزارش شد؛ جایی که کاهش معنادار شب‌ها و روزهای سرد، با افزایش هم‌زمان فرین‌های بارش همراه شده و ریسک رخدادهای فرین ترکیبی را به شدت بالا برده است.

مطالعات انجام شده از فرین‌های اقلیمی ایران نشان می‌دهد که ارزیابی و پیش‌نگری این پدیده پیش‌تر در حوزه کارایی مدل‌های گردش کلی (GCMs¹) و پیچیدگی‌های جغرافیایی آن در مناطق مختلف کشور است. چنان‌که معصوم‌پور سماکوش و همکاران (Masoompour Samakosh et al., 2018) با ارزیابی مدل‌های CMIP5 بر عدم قطعیت بالا و توانایی ضعیف این مدل‌ها در برآورد فرین‌های بارشی به‌ویژه در مناطق ساحلی ایران اشاره کردند. اسماعیلی و همکاران (Esmaili et al., 2019) کاهش معنی‌دار فراوانی رخدادهای سرمایشی و افزایشی فرین گرمایشی را گزارش کردند. در تحقیقی دیگر ساری صراف و همکاران (Sarisaraf et al., 2023) با به‌کارگیری سناریوهای SSP در شمال غرب کشور، روند کاهشی شدیدی را در شاخص‌های فرین مطلق سرمایشی را به‌ویژه تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 پیش‌نگری کردند. این کاهش تدریجی فرین‌های سرد و تشدید فرین گرم در سایر مناطق کشور نیز تأیید شد؛ به‌گونه‌ای که نوروز ولاشیدی و همکاران (Norooz-Valashedi et al., 2024) در سواحل جنوبی دریای خزر، افزایش این روندها را در دهه‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۸۰ آشکار کرده و افزایش معنادار طول دوره گرمایش، روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای را گزارش کردند. میری و همکاران (Miri et al., 2025) بر اساس خروجی‌های مدل CNRM-CM6-1، نشان دادند که فرین‌های دمایی گرم ایران دارای روند افزایشی قابل توجه در سراسر کشور است.

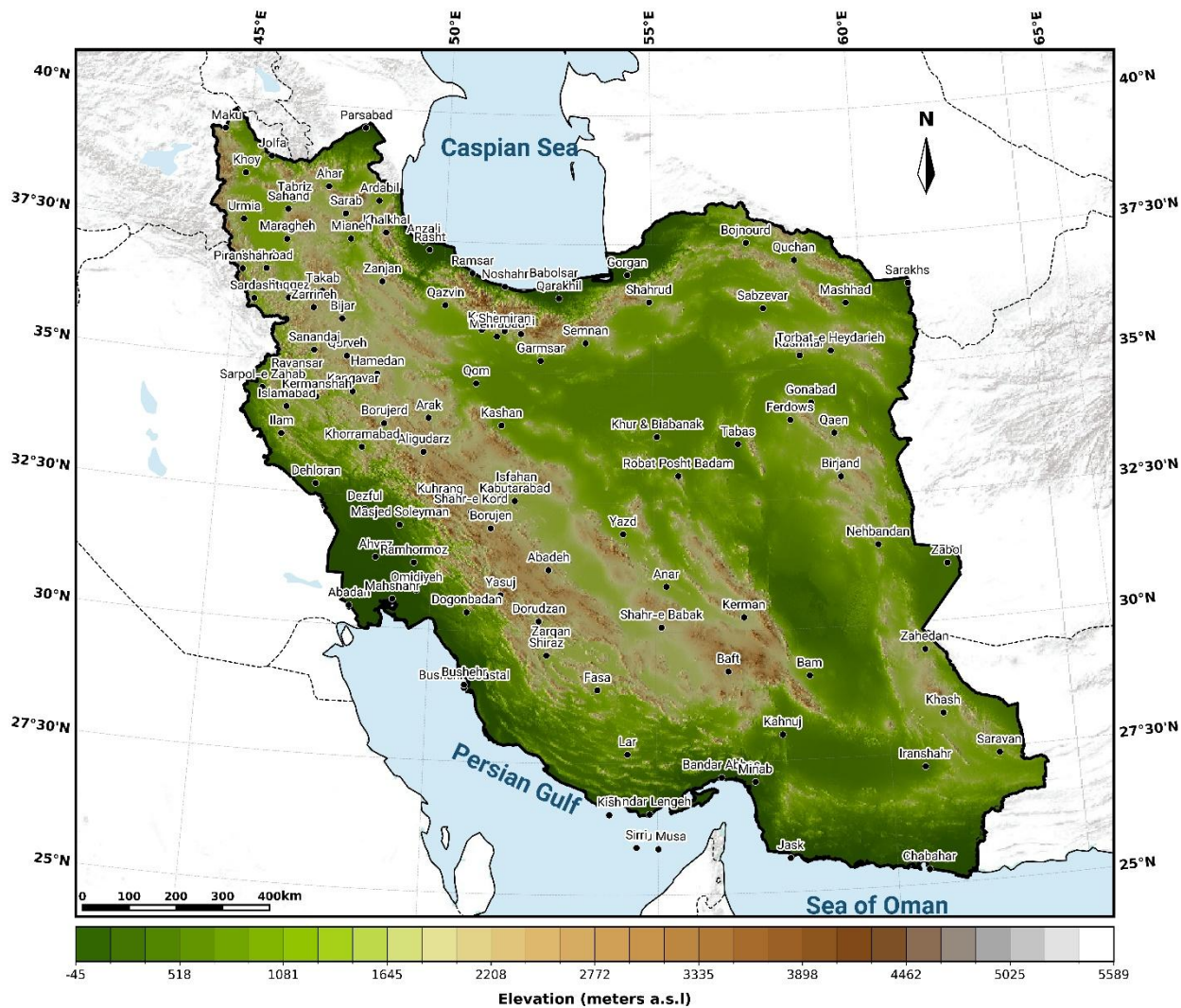
مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم توسعه روش‌های مدل‌سازی اقلیمی، ارزیابی فرین‌های دمایی در ایران عمدتاً به مطالعات منطقه‌ای، تک‌مدلی و تحلیل‌های منفرد شاخص‌ها محدود بوده است. این محدودیت‌های روش‌شناختی، درک جامع از پاسخ سامانه اقلیمی را در پهنه‌ای با توپوگرافی پیچیده و ناهمگن با چالش مواجه ساخته است. در پاسخ به این شکاف علمی، پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب یکپارچه، دو نوآوری کلیدی، شبیه‌سازی و پیش‌نگری فرین‌های مطلق دمایی (TXx و TNn) در مقیاس ملی، با بهره‌گیری از رویکرد چندمدلی همادی تصحیح‌اریبی شده مبتنی بر برون‌دادهای CMIP6 و دوم گذر از تحلیل‌های تک‌متغیره از طریق توسعه یک شاخص ترکیبی نوین به‌منظور سنجش دینامیک فرین‌ها را در ارزیابی مخاطرات اقلیمی معرفی می‌نماید. این چارچوب نوآورانه، ضمن کاهش عدم قطعیت در ارزیابی مناطق آسیب‌پذیر، بستر علمی متقنی را جهت تدوین راهبردهای تاب‌آوری و سازگاری ملی در برابر رژیم‌های آبی اقلیم فراهم می‌آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران است (شکل ۱). اختلاف ارتفاع در این گستره جغرافیایی، از ترازهای پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد در نوار ساحلی خزر تا مناطق بیش از ۵۶۰۰ متر در رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس، گرادیان‌های ترمودینامیکی قدرتمندی را بر دمای کشور تحمیل می‌کند. تقابلی فیزیکی که اختلاف فرین‌های مطلق دمای بیشینه (TXx) و کمینه (TNn) را در برخی مناطق خشک مرکزی به بیش از ۶۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهد. پراکنش مکانی ۱۰۳ ایستگاه همدیدی، تنوع رژیم‌های گرمایی را با بالاترین دقت استخراج کرده و پایه مشاهداتی را برای درستی‌سنجی چندمدلی همادی و پیش‌نگری دقیق در برابر تنش‌های گرمایی آبی فراهم می‌آورد.

¹ General Circulation Models (GCMs)



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی مورد استفاده

Figure 1. Location of the study area along with the utilized synoptic meteorological stations

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مشاهداتی و شبکه ایستگاهی

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، مبتنی بر آمار ثبت‌شده در شبکه ایستگاهی سازمان هواشناسی کشور است. در همین راستا و به منظور انجام فرایند درستی‌سنجی، سری‌های زمانی روزانه دو متغیر اقلیمی دمای کمینه و دمای بیشینه از ۱۰۳ ایستگاه هواشناسی همدیدی (سینوپتیک) برای دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۰ استخراج شد. در خصوص مدیریت داده‌های گمشده، به منظور پرهیز از ورود هرگونه خطای محاسباتی و عدم قطعیت ناشی از روش‌های بازسازی داده‌ها، پس از اعمال کنترل کیفیت و انتخاب ایستگاه‌هایی با کمتر از ۳ درصد داده ناقص (WMO, 2018)، مقادیر گمشده‌ی ناچیز باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های تهی (NaN) در نظر گرفته شده و از فرایند محاسبات و درستی‌سنجی آماری مستثنی شدند. ارزیابی توزیع مکانی این شبکه ایستگاهی نشان می‌دهد که ایستگاه‌های منتخب، گستره پهنای از قلمرو جغرافیایی ایران را پوشش می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که از عرض جغرافیایی ۲۵/۲۸ درجه (چابهار) تا ۳۹/۶۱ درجه شمالی (پارس‌آباد) و طول جغرافیایی ۴۴/۳۹ درجه (ماکو) تا ۶۲/۳۲ درجه شرقی (سراوان) امتداد یافته‌اند. افزون بر این، از منظر ناهمگنی‌های توپوگرافیک، تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌های مورد مطالعه دامنه وسیعی را در بر می‌گیرد؛ به نحوی که از

۲۳/۶- متر (پایین تر از سطح تراز آب‌های آزاد در ایستگاه بندر انزلی) تا ۲۴۶۵/۲ متر (بالا تر از سطح دریا در ایستگاه آبعلی) متغیر است. این گستردگی در پراکنش مکانی و تنوع ارتفاعی، بیانگر کفایت شبکه ایستگاهی مذکور در نمایندگی تنوع رژیم‌های اقلیمی و پیچیدگی‌های توپوگرافیک کشور با سطح اطمینان بالاست.

فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده (CMIP6)

پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی نیازمند به‌کارگیری مجموعه‌ای مستقل از مدل‌های سامانه زمین است. بر این اساس، ۱۴ مدل گردش کلی (GCM) از فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) جهت تولید یک چندمدلی همادی انتخاب شدند. این مدل‌ها شامل GFDL-ESM4، CanESM5، CESM2-WACCM، CNRM-CM6-1، CNRM-ESM2-1، EC-Earth3، IITM-ESM4، KACE-1-0-G، MIROC6، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، TaiESM1، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL هستند. معیار اصلی در گزینش این مدل‌ها، استقلال ساختاری مدل‌ها و توانمندی آن‌ها در بازتولید حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) است. میانگین ECS این مدل‌ها معادل ۳/۷ درجه سلسیوس برآورد شده که انطباق بالایی با استانداردهای اقلیمی دارد (Meehl et al., 2020). تحلیل داده‌ها در قالب دوره‌های متمایز شامل دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) سازماندهی شد. پیش‌نگری‌های آتی این چندمدلی همادی تحت سه سناریوی اجتماعی - اقتصادی شامل SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 صورت می‌پذیرد تا عدم قطعیت به حداقل برسد. تمامی این سه سناریو بر اساس چارچوب ScenarioMIP جزو سناریوهای اولویت اول (Tier 1) در CMIP6 طبقه‌بندی می‌شوند (O'Neill et al., 2016). در این میان، انتخاب سناریوی SSP3-7.0 به‌عنوان سناریوی میانی رو به بالا، به جای سناریوهای حد اوسط نظیر SSP2-4.5، بر پایه ضرورت‌های ارزیابی ریسک اقلیمی صورت گرفته است. بر اساس پروتکل ScenarioMIP، سناریوی SSP3-7.0 برای پر کردن خلأ موجود در سناریوهای نسل قبل (CMIP5) توسعه یافته و نمایانگر یک سناریوی خط پایه بدون مداخله اقلیمی^۱ است. این سناریو، آسیب‌پذیری بالای اجتماعی (رقابت منطقه‌ای) را با تغییرات قابل توجه کاربری اراضی و انتشار بالای ذرات معلق ترکیب می‌کند. از آنجا که ارزیابی فرین‌های دمایی در مقیاس منطقه‌ای حساسیت بالایی به این متغیرها دارد، استفاده از SSP3-7.0 امکان شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تری از آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها را در غیاب سیاست‌های سخت‌گیرانه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌سازد (O'Neill et al., 2016).

برون‌داد خام مدل‌های گردش کلی به طور سیستماتیک دارای خطاهایی در شبیه‌سازی دامنه و فراوانی متغیرهای روزانه است. جهت تصحیح این اریبی‌ها، از رویکرد ISIMIP3BASD نسخه ۳ استفاده شد (Lange, 2019). این الگوریتم تصحیح اریبی بر پایه روش نگاشت چندک ناپارامتری^۲ استوار است و محاسبات را در یک پنجره متحرک ۳۱ روزه با گام‌های یک‌روزه پیاده‌سازی می‌کند. خروجی‌های تصحیح اریبی شده این روش، ورودی اصلی را برای محاسبه فرین‌های مطلق دمایی شامل TNn و Txx فراهم می‌سازند. استخراج این فرین‌ها منجر به محاسبه شاخص CTHI در پهنه جغرافیایی ایران می‌شود. برای تولید چندمدلی همادی از ۱۴ مدل تصحیح اریبی شده از روش میانگین حسابی استفاده شده است. این روش که در ادبیات تخصصی با عنوان همادی بی‌وزن شناخته می‌شود، سازوکاری قدرتمند برای فیلترکردن نوسانات تصادفی سامانه اقلیم فراهم می‌آورد. تخصیص سهم برابر به تمامی مدل‌ها (پارادایم One model, One vote)، از بروز خطاهای سیستماتیک مرتبط با روش‌های وزن‌دهی پیچیده جلوگیری می‌کند. ارزیابی‌های کلان در فازهای CMIP5 و CMIP6 نشان داده است خروجی میانگین حسابی در بازتولید میانگین‌های اقلیمی و فرین‌ها، عمدتاً از بهترین مدل‌های منفرد، کارایی بهتری دارد (Flato et al., 2014). اگرچه نتایج ارزیابی‌ها حاکی از تفاوت در کارایی مدل همادی در پهنه‌های مختلف اقلیمی است، اما دلیل به‌کارگیری رویکرد میانگین‌گیری هم‌وزن در این پژوهش بر چند اصل علمی استوار است. نخست، با توجه به اینکه داده‌های مدل‌های CMIP6 به‌کاررفته پیش‌تر تحت فرایند تصحیح اریبی قرار گرفته‌اند، بخش عمده‌ای از خطاهای سیستماتیک آن‌ها تعدیل شده است. دوم، تفاوت‌های مشاهده‌شده در کارایی منطقه‌ای مدل‌ها می‌تواند تا حد زیادی ناشی

¹ Unmitigated baseline scenario

² Non-parametric Quantile Mapping

از تغییرپذیری‌های ذاتی و وردایی درونی سالانه اقلیم باشد تا تفاوت‌های بنیادین در فیزیک مدل‌ها. در چنین شرایطی، اعمال وزن‌دهی مضاعف مبتنی بر کارایی در دوره تاریخی، احتمال بروز بیش‌برازش^۱ را به شدت افزایش می‌دهد. علی‌رغم بررسی و آگاهی از روش‌های وزن‌دهی مبتنی بر کارایی^۲، رویکرد دموکراسی مدل‌ها^۳ به‌عنوان یک راه‌برد محافظه‌کارانه و بسیار پایدار انتخاب شد تا از عدم قطعیت‌های کاذب ناشی از وزن‌دهی‌های خطا‌دار در شرایط تغییر اقلیم آینده جلوگیری شود.

روش تحقیق

تحلیل شاخص‌های فرین مطلق دمایی (TNn و TXx) بر مبنای شاخص‌های ETCCDI

برای تحلیل شاخص‌های فرین اقلیمی، بهره‌گیری از یک چارچوب استاندارد امری اجتناب‌ناپذیر است. بر این اساس، پژوهش حاضر از مجموعه شاخص‌های معتبر و بین‌المللی توسعه‌یافته توسط کارگروه تخصصی ETCCDI به‌عنوان الگوی تحلیلی جهت آشکارسازی فرین‌های مطلق دمایی استفاده کرده است. اگرچه مجموعه ETCCDI شامل طیف وسیعی از شاخص‌های دمایی است که هریک ابعاد مختلفی را بررسی می‌کنند، اما هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی شاخص‌های مطلق دمایی منطقه و بررسی شدت رخدادهایی است که فراتر از آستانه تحمل اکولوژیکی و زیرساختی عمل می‌کنند. از این رو، پژوهش حاضر به‌صورت ویژه بر دو شاخص کلیدی فرین‌های مطلق دمایی شامل بیشینه دمای روزانه سالانه (TXx) و کمینه دمای روزانه سالانه (TNn) (برحسب درجه سلسیوس) متمرکز شده است. دلیل انتخاب این دو شاخص از میان سایر شاخص‌ها، حساسیت بالای آن‌ها در بازنمایی شدیدترین تنش‌های گرمایی و سرمای^۴ است. برخلاف شاخص‌های صدکی یا آستانه‌ای، تغییرات در مقادیر TXx و TNn مستقیماً نشانگر جابه‌جایی در کرانه‌های توزیع آماری دما^۵ و بیانگر اوج شدت رخدادهای فرین هستند. در این راستا، شاخص TXx به‌عنوان نماینده بیشینه تنش گرمایی، بالاترین رکورد دمای روزانه را در مقیاس سالانه بررسی می‌کند و در تقابل با آن، شاخص TNn نمایانگر کمینه دمایی و شدت سرمای سالانه است (Zhang et al., 2011). در نهایت، کمی‌سازی دقیق این فرین‌های مطلق، نه تنها تصویری روشن از دامنه تغییرات و شدت بی‌هنجاری‌های اقلیمی ارائه می‌دهد، بلکه مبنای علمی و اتکاذیر برای تدوین راهبردهای سازگاری منطقه‌ای و جهت‌دهی به الگوهای سیاست‌گذاری محیطی فراهم می‌آورد.

درستی‌سنجی نمایه‌های TNn و TXx با روش ضریب توافق تصحیح شده

برای درستی‌سنجی نمایه‌های فرین مطلق TXx و TNn مستخرج از چند مدلی همادی تولید شده با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی از ضریب توافق تصحیح‌شده استفاده شد. این شاخص یک سنجه ارزیابی بدون بعد با دامنه بین -۱ تا +۱ است (Willmott et al., 2012). این روش، تصحیح شده نسخه اولیه ضریب توافق توسعه‌یافته در دهه ۱۹۸۰ با دامنه صفر و یک محسوب می‌شود. ارتباط ریاضی این سنجه آماری با شاخص نش - ساتکلیف کاملاً یکنواخت است. این سنجه خروجی منطقی‌تری در تبیین کارایی مدل نسبت به سایر سنجه‌های موجود نشان می‌دهد و به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، در طیف وسیعی از تحقیقات مرتبط با سنجش کارایی مدل‌ها کاربرد دارد (Willmott et al., 2015).

توسعه شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI^۶) بر اساس فرین‌های مطلق دمایی

بررسی ریسک توأمان فرین‌های سرد و گرم نیازمند توسعه یک شاخص ترکیبی بی‌بعد تحت عنوان شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI) است. ناهمگنی دامنه تغییرات بی‌هنجاری‌های TNn و TXx به‌کارگیری تکنیک استانداردسازی کمینه - بیشینه^۷ را بر اساس

^۱ Overfitting

^۲ Performance-based weighting

^۳ Model Democracy

^۴ Heat and Cold Stresses

^۵ Tails of the distribution

^۶ Compound Thermal Hazard Index (CTHI)

^۷ Min-Max Normalization

چارچوب ارزیابی ریسک¹ IPCC و دستورالعمل مرجع OECD² ضروری ساخت (IPCC, 2022; OECD, 2008). مقادیر بی‌هنجاری هر نقطه شبکه CMIP6-MME با استفاده از مطلق‌ترین مقادیر به بازه صفر تا یک تبدیل شدند.

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

متغیر X_i مقدار بی‌هنجاری در هر نقطه شبکه را نشان می‌دهد. پارامترهای X_{max} و X_{min} به ترتیب نمایانگر کمینه و بیشینه مطلق بی‌هنجاری محاسباتی در کل کشور هستند. ترکیب این دو متغیر نرمال‌شده از طریق میانگین‌گیری هم‌وزن همانند رابطه (۲) انجام شد.

$$CTHI_i = \frac{TNnorm + TXxnorm}{2} \quad (2)$$

انتخاب وزن‌های برابر به دلیل عدم وجود شواهد قطعی مبنی بر اثر مخرب‌تر یکی از فرین‌ها در کشور است. همچنین بر اساس دستورالعمل OECD در سطح کلان، اختصاص وزن برابر استانداردترین شیوه تولید شاخص ترکیبی محسوب می‌شود (OECD, 2008). خروجی نهایی این شاخص در بازه صفر تا یک تغییر می‌کند. مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده پایین‌ترین سطح مخاطره³ و مقادیر نزدیک به یک بازتاب‌دهنده بالاترین سطح مخاطره⁴ با فرین‌های مطلق دمایی هستند (IPCC, 2022). از نظر فیزیکی شاخص CTHI بیانگر گرادیان پیوسته تنش‌های ترمودینامیکی تحمیل‌شده بر سامانه‌های طبیعی و انسانی در اثر رخداد فرین‌های مطلق دمایی است. در این پژوهش، به جای اعمال آستانه‌هایی همانند چندک‌ها یا شکست طبیعی جنکس (Jenks) برای گسسته‌سازی و طبقه‌بندی این شاخص، ماهیت پیوسته آن در بازه صفر تا یک حفظ شده است. منطق علمی این رویکرد آن است که در تحلیل فرین‌های اقلیمی، طبقه‌بندی داده‌ها و ایجاد کلاس‌بندی می‌تواند به ازدست‌رفتن واریانس فضایی - زمانی و نادیده‌گرفتن تغییرات خرد؛ اما اثرگذار منجر شود. حفظ ساختار پیوسته این شاخص به سیاست‌گذاران و مدیران ریسک اجازه می‌دهد تا به جای اتکا به طبقات از پیش تعیین‌شده که ممکن است دارای اریبی‌های مرزی باشند، گرادیان دقیق شدت مخاطرات را درک نموده و برنامه‌های سازگاری فضایی را بر اساس نرخ دقیق تغییرات در هر منطقه برنامه‌ریزی کنند.

نتایج و بحث

بررسی کارایی چند مدلی همادی تولید شده برای بازتولید فرین‌های مطلق دمایی در ایران

ارزیابی چندمدلی همادی بر اساس ۱۴ مدل تصحیح اریبی شده CMIP6 طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) ناهمگنی مکانی زیادی را در شبیه‌سازی فرین‌های مطلق دمایی ایران نشان می‌دهد (شکل ۲). توزیع مقادیر شاخص توافق ویلموت تصحیح‌شده، با دامنه تعریف‌شده ۱- تا ۱، حاکی از تفاوت ترمودینامیکی روشنی میان بازتولید بیشینه مطلق (TXx) و کمینه مطلق (TNn) است. مقادیر سنجه ضریب توافق ویلموت تصحیح‌شده برای TXx در بیش‌تر ایستگاه‌های همدیدی در سطح بالاتری قرار دارد. سیگنال‌های گرمایی مقیاس‌بزرگ، تابش خورشیدی طول موج‌کوتاه و فرارفت گرم کنترل‌کننده‌های اصلی TXx هستند که به راحتی توسط مدل‌های گردش کلی (GCMs) تفکیک می‌شوند و به همین دلیل متغیر TXx کارایی بالاتری را دارد. کارایی TNn دچار افت ساختاری نسبت به TXx است. فرین‌های کمینه شبانه تابع مستقیم فرایندهای لایه مرزی محلی (Holtslag et al., 2013)، واریاسیون‌های دمایی، رطوبت خاک و سرمایش تابشی شبانه در شرایط آسمان صاف هستند (Vogel et al., 2017). پارامترسازی لایه مرزی پایدار شبانه و شار گرمای محسوس در سطح زمین (Holtslag et al., 2013) و محدودیت فیزیکی شبکه‌های محاسباتی CMIP6 از عمده دلایل کاهش کارایی بازتولید کمینه‌های مطلق در ایران هستند.

توپوگرافی پیچیده مستقیماً بر کارایی برون‌داد شبکه‌ای مدل‌های گردش کلی اثر می‌گذارد. ایستگاه‌های مستقر در زاگرس و البرز شامل شهرکرد، پیرانشهر، کوهرنگ، سردشت، سراب و زنجان مقادیر ضریب توافق کمتر از ۰/۵ را ثبت کرده‌اند. کاهش کارایی

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

² Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)

³ Low Hazard

⁴ Extreme Hazard

شبیه‌سازی شاخص TNn در این ایستگاه‌ها تا مرز صفر میل می‌کند. تفکیک افقی درشت GCMها نمی‌تواند شرایط خرداقلیمی دره‌ها و شیب‌ها شبیه‌سازی کند و پدیده تجمع هوای سرد در کف دره‌ها^۱ در سلول‌های شبکه‌ای هموار شده فیلتر می‌شود. ایستگاه‌های ساحلی با گرادیان‌های شدید نظیر رشت و بوشهر رفتار مشابهی دارند. برهمکنش خشکی - دریا و نوسانات شار رطوبتی پهنه‌های آبی، برآورد گرمایی نوار ساحلی را با خطای سیستماتیک در هر دو شاخص مواجه می‌سازد. مناطق گذار اقلیمی رفتار متفاوتی از خطای بازتولید شاخص مربوطه را بازتاب می‌دهند. ایستگاه‌های سمنان، قم، بجنورد و شیراز مقادیر سنجه ضریب توافق بین ۰/۳ تا ۰/۶ را ارائه می‌کنند. این نواحی فاقد پیچیدگی توپوگرافی زاگرس یا البرز هستند. در مقابل همگرایی مقادیر خطای TXx و TNn در ایستگاه‌های جلگه خوزستان مانند آبادان و اهواز ثبت شده است. دلیل این امر پهنه‌های وسیع با پوشش سطح یکنواخت پایدار است که بالاترین سطح تطابق مشاهداتی را ایجاد کرده است. دشت‌های داخلی، مناطق خشک و شرق، جنوب شرق و مرکز ایران شامل بم، طبس، بیرجند، فردوس، زاهدان، ابرانشهر، لار، کهنوج و سراوان مقادیر سنجه بالاتر از ۰/۵ تا آستانه ۰/۸ را تولید کرده‌اند (شکل ۲). دلیل این امر را می‌توان نبود پیچیدگی‌های توپوگرافیک همانند آنچه در زاگرس و البرز شاهد آن بوده‌ایم، تابش مداوم خورشید و خشکی هوا که موجب غلبه سیگنال گرمایی مقیاس بزرگ می‌شود؛ عنوان کرد.

در راستای جمع‌بندی وضعیت کارایی مدل همدادی بر اساس شکل (۲)، بررسی خلاصه آماری دامنه و میانگین ضریب توافق تصحیح‌شده به تفکیک پهنه‌های اقلیمی ایران، تفاوت‌های مکانی معناداری را نشان می‌دهد. در پهنه‌های اقلیمی کوهستانی نظیر زاگرس و البرز (مانند شهرکرد و سردشت)، سطح کلی ضریب توافق پایین ارزیابی می‌شود؛ به‌طوری‌که دامنه ضریب توافق کمینه‌های دمایی (TNn) به سمت صفر میل کرده و برای بیشینه‌ها (TXx) در محدوده ۰/۳ تا ۰/۵ قرار دارد. در نوار ساحلی با گرادیان شدید (نظیر رشت و بوشهر) نیز وضعیت مشابهی با سطح ضریب توافق پایین (دامنه‌ای تقریبی بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۵ برای هر دو شاخص) حاکم است. با فاصله گرفتن از این پیچیدگی‌ها، مناطق گذار اقلیمی (مانند سمنان و شیراز) وضعیت متوسطی با دامنه توافق ۰/۳ تا ۰/۶ را ارائه می‌کنند. در جلگه‌های هموار خوزستان، مقدار ضریب توافق به سطح متوسط رو به بالا ارتقا یافته و خطای بازتولید هر دو شاخص با یکدیگر همگرا می‌شود. در نهایت، بالاترین میانگین و دامنه ضریب توافق به پهنه‌های اقلیمی خشک (نظیر بم، طبس و زاهدان) با دامنه‌ای بین ۰/۵ تا آستانه ۰/۸ اختصاص دارد که نشان‌دهنده ارتقای چشمگیر کارایی مدل همدادی در شرایط غلبه سیگنال‌های مقیاس بزرگ و نبود عوارض خرداقلیمی است.

^۱ Cold Air Pooling



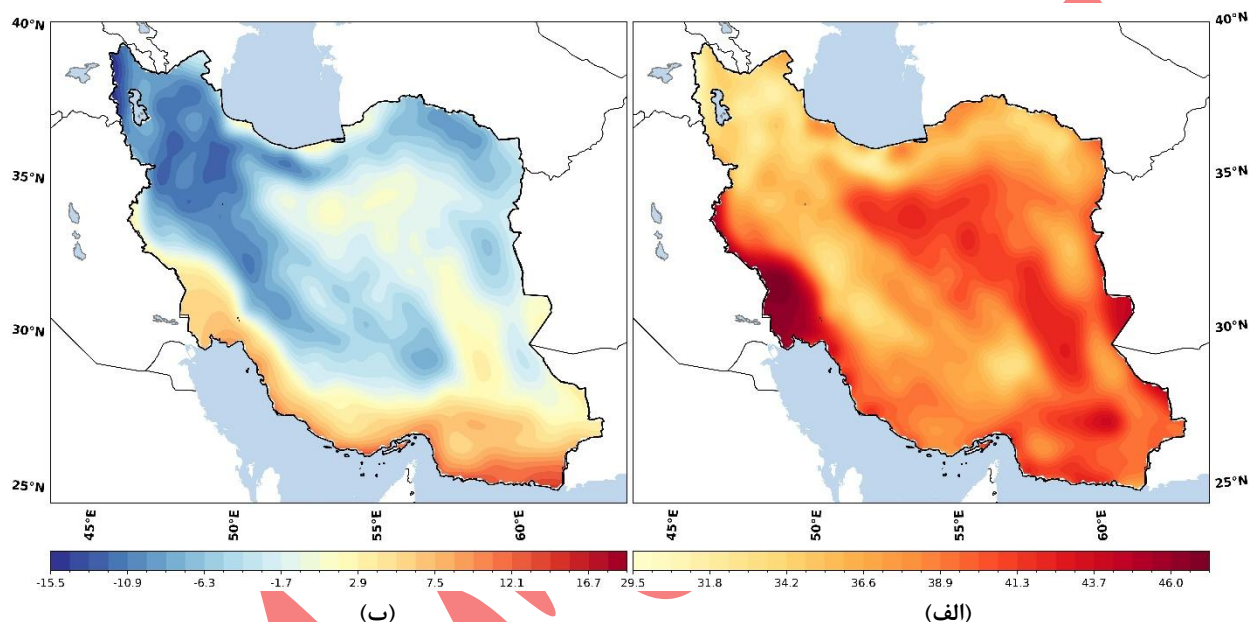
شکل ۲. درستی‌سنجی چندمدلی همادی CMIP6-MME با داده‌های ۱۰۳ ایستگاه هواشناسی همیدید. بر اساس نمودار دمبلی (Dumbbell Plot). این شکل، مقادیر سنجه ضریب توافق تصحیح شده را به‌عنوان معیاری بدون بعد برای ارزیابی دو نمایه بیشینه مطلق دما (TXx؛ نقاط نارنجی) و کمینه مطلق دما (TNn؛ نقاط آبی) در سطح ایستگاه‌ها ارائه می‌دهد. ایستگاه‌های مورد مطالعه جهت تحلیل دقیق‌تر مکانی و درک اثرات توپوگرافیک، در سه دسته با ضریب توافق پایین (پنل چپ)، متوسط (پنل میانی) و بالا (پنل راست) طبقه‌بندی شده‌اند.

Figure 2. Evaluation of the CMIP6 Multi-Model Ensemble (CMIP6-MME) using data from 103 synoptic meteorological stations, represented via a dumbbell plot. This figure presents modified index-of-agreement values as a dimensionless metric to evaluate two indices at the station level: absolute maximum temperature (TXx; orange dots) and absolute minimum temperature (TNn; blue dots). To enable more nuanced spatial analysis and capture topographic influences, we categorize the studied stations into three groups based on their index of agreement: low (left panel), moderate (middle panel), and high (right panel).

تحلیل فرین‌های مطلق دمایی (TXx و TNn) در ایران مبتنی بر چندمدلی همادی تصحیح‌اریبی شده CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴)

پراکنش مکانی فرین‌های مطلق دمایی در ایران طی دوره تاریخی ارتباط مستقیمی با بر همکنش‌های عرض جغرافیایی، ارتفاع و گرادیان بی‌دررو و دینامیک گردش‌های بزرگ‌مقیاس جو دارد. برون‌داد همادی CMIP6-MME دامنه کمینه مطلق دما (TNn) را در ایران بین ۱۵/۵- تا ۱۶/۷ درجه سلسیوس برآورد می‌کند (شکل ۳). کمینه مقادیر این نمایه اقلیمی در امتداد رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس مرکزی و ارتفاعات آذربایجان، تحت کنترل افت آدیاباتیک دما و ظرفیت گرمایی پایین سطوح مرتفع قرار دارد. نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان به‌واسطه ظرفیت گرمایی ویژه آب و اثرهای ترمودینامیکی تعدیل‌کننده دریا، بالاترین مقادیر TNn را ثبت کرده و رخداد یخبندان را در این مناطق محدود می‌سازد. رفتار بیشینه مطلق دما (TXx) ماهیتی کاملاً مستقل از رژیم سرمای شبانه

(TNn) دارد. مقادیر این نمایه از ۲۹/۵ درجه سلسیوس در ارتفاعات تا ۴۶ درجه سلسیوس در مناطق داخلی و جلگه‌های پست جنوبی متغیر است. سلطه پرفشار جنب‌حاره در فصل تابستان، پوشش ابر را سرکوب کرده و دریافت تابش موج‌کوتاه خورشیدی را در دشت کویر، بیابان لوت و جلگه خوزستان به بیشینه مطلق می‌رساند. کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی در نواحی خشک داخلی سبب می‌شود انرژی تابشی ورودی منحصراً صرف شار گرمای محسوس شود. جلگه خوزستان ترکیبی از عرض جغرافیایی و ارتفاع پایین را تجربه می‌کند. گرمایش آدیاباتیک ناشی از فرونشینی توده هوا، مقادیر TXx را در این منطقه از کشور به مقادیر بیشینه مطلق می‌رساند. گرادیان‌های مکانی TNn نسبت به TXx شیب بسیار تندتری دارند. همچنین کمینه دما به شدت تابع شرایط خرداقلیم‌های محلی و پایداری لایه مرزی شبانه است. در مقابل بیشینه دما بازتابی از ساختار گردش جوی فصل گرم و بیلان انرژی روزانه در مقیاس منطقه‌ای است.



شکل ۳. پراکنش مکانی فرین‌های مطلق دمایی در ایران طی دوره تاریخی (۱۹۹۰–۲۰۱۴) بر اساس برون‌داد تصحیح اریبی شده همادی CMIP6. الف پراکنش بیشینه مطلق دما (TXx) و ب کمینه مطلق دما (TNn) (واحد: درجه سلسیوس).

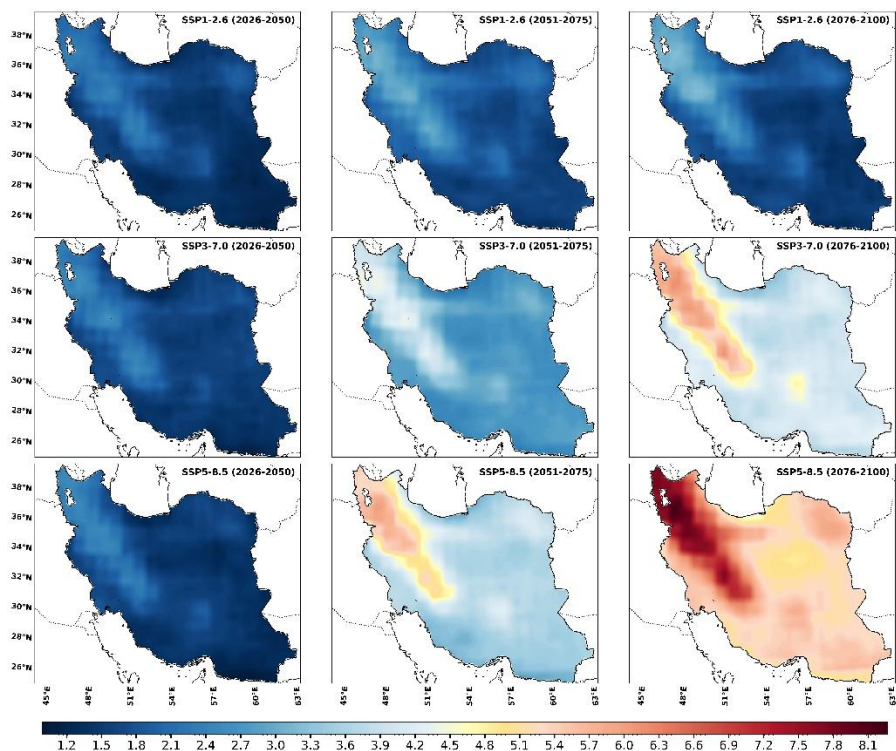
Figure 3. Spatial distribution of absolute temperature extremes in Iran during the historical period (1990–2014) based on the bias-corrected CMIP6-MME. (a) Spatial distribution of the absolute maximum temperature (TXx), and (b) spatial distribution of the absolute minimum temperature (TNn). (Unit: °C)

بی‌هنجاری نمایه فرین کمینه مطلق دما (TNn) در ایران بر اساس چندمدلی همادی CMIP6

تحلیل مکانی نمایه کمینه مطلق دما (TNn) در پهنه ایران نشان‌دهنده یک تغییر ساختاری و گرمایش سراسری در سرمای فرین شبانه است. داده‌های حاصل از پیش‌نگری همادی چندمدلی CMIP6 برای هیچ منطقه‌ای از ایران بی‌هنجاری منفی یا صفر مثبت نکرده‌اند. دامنه تغییرات از ۱/۲ درجه سلسیوس تا ۸/۱ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۴). در آینده نزدیک (۲۰۲۶–۲۰۵۰)، سیگنال‌های گرمایش در تمامی سناریوهای SSP همگرا هستند. میانگین پهنه‌ای بی‌هنجاری در این دوره برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بین ۱/۶ تا ۱/۷ درجه سلسیوس متغیر بوده و رفتار مکانی آن در غالب مناطق دامنه‌ای بین ۱ تا ۳ درجه سلسیوس دارد. این همگرایی در نتیجه لختی بالای سامانه اقلیمی است. لختی گرمایی جو مانع از تفکیک معنادار سناریوها تا اواسط قرن حاضر می‌شود.

در دوره زمانی آینده میانی (۲۰۵۱–۲۰۷۵) و تحت سناریوی توسعه پایدار و با انتشار کم (SSP1-2.6)، بی‌هنجاری پهنه‌ای کمینه مطلق دما در محدوده ۱/۸ تا ۲ درجه سلسیوس تثبیت می‌شود. گسست این روند در سناریوی SSP3-7.0 رخ می‌دهد؛ به‌طوری‌که

متوسط پهنه‌ای کشور به ۳ درجه سلسیوس افزایش یافته و الگوهای مکانی بین ۳ تا ۴ درجه سلسیوس غالب می‌شوند. در بدینانه‌تر سناریو (SSP5-8.5)، واگرایی با سایر سناریو تشدید شده و میانگین پهنه‌ای بی‌هنجاری به ۴ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۴). مناطق شمال غرب و امتداد زاگرس بی‌هنجاری‌های قابل توجه بین ۴/۵ تا ۵/۴ درجه سلسیوس را تجربه می‌کنند. انتهای قرن بیست و یکم (۲۰۷۶-۲۱۰۰) کمینه مطلق دما در ایران به شکل قابل توجهی افزایش خواهد یافت. در سناریوی SSP1-2.6 مهار انتشار گازهای گلخانه‌ای مانع از تشدید گرمایش شبانه شده و بی‌هنجاری در همان حد ۱/۸ تا ۲ درجه سلسیوس باقی می‌ماند. رفتار اقلیم تحت سناریوهایی با انتشار بالا کاملاً متفاوت است. در سناریوی SSP3-7.0، میانگین پهنه‌ای بی‌هنجاری کمینه دما به ۴/۳ تا ۴/۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که بخش‌های غربی، شمال غربی و امتداد البرز و زاگرس افزایش ۶ تا ۸ درجه سلسیوسی و مناطق مرکزی و شرقی افزایش ۴ تا ۶ درجه سلسیوسی را ثبت می‌کنند. این روند در سناریوی SSP5-8.5 به اوج خود رسیده و متوسط پهنه‌ای کشور افزایش قابل توجه به ۵/۵ تا ۵/۸ درجه سلسیوس را تجربه می‌کند. الگوی مکانی در این بازه به شدت ناهمگن است. زاگرس، البرز و پهنه شمال غرب کشور کانون‌های اصلی بی‌هنجاری فرین گرمایی با شدتی بین ۷/۲ تا بیش از ۸/۱ درجه سلسیوس هستند. نواحی مرکزی، شرقی و جنوبی ایران با بی‌هنجاری‌های کمتر در محدوده ۴/۵ تا ۶ درجه سلسیوس مواجه می‌شوند (شکل ۴). این الگوی تشدید گرمایش شبانه و ناپدیدشدن تدریجی فرین‌های سرد تحت سناریوهای انتشار بالا، با یافته‌های دوس سانتوس (dos Santos, 2026) در اقلیم‌های نیمه‌خشک در سطح جهانی همسو است. در مقیاس ملی نیز، روند افزایشی یادشده تطابق بالایی با نتایج پیش‌نگری‌های ساری صراف و همکاران (Sarisaraf et al., 2023) به‌ویژه در پهنه‌های کوهستانی شمال غرب ایران دارد. تمرکز شدید بی‌هنجاری‌های کمینه مطلق دما در مناطق کوهستانی و مرتفع فلات ایران تابع سازوکار فیزیکی گرمایش وابسته به ارتفاع (EDW) است. ارتفاعات زاگرس و البرز در سناریوی SSP5-8.5 با بی‌هنجاری بیش از ۸ درجه سلسیوس، بیشترین حساسیت اقلیمی را نشان می‌دهند (شکل ۴). نوسانات گرمایی اولیه سبب ذوب زود هنگام پوشش برف زمستانه یا تغییر فاز بارش از برف به باران می‌شود. کاهش سطح سپیدایی کوهستان، ضریب بازتابش انرژی خورشیدی را به شدت کاهش می‌دهد. سطح عریان شده زمین انرژی طول موج کوتاه بیشتری جذب کرده و آن را در غالب تابش موج‌بلند و گرمای محسوس به لایه‌های سطحی جو بازمی‌گرداند. این بازخورد مثبت سپیدایی - برف، روند گرمایش شبانه را در اکوسیستم‌های کوهستانی به صورت تصاعدی تشدید می‌کند. ماهیت شبانه و زمستانه نمایه TNn حساسیت مستقیم آن را به تغییرات بیلان تابشی موج‌بلند خروجی جو تبیین می‌کند. در طول شب و با قطع تابش کوتاه‌موج خورشیدی، بیلان انرژی جو عمدتاً تحت کنترل سازوکار حبس تابش موج‌بلند خروجی (OLR) قرار می‌گیرد. تشدید این بازخورد، شار تابش موج‌بلند فروسو (DLR) به سمت سطح زمین را در ساعات شبانه به طور محسوسی افزایش می‌دهد. در خصوص عدم قطعیت این برآوردها، باید توجه داشت که گستردگی پهنه ایران و تنوع شدید توپوگرافیک آن (به‌ویژه در امتداد البرز و زاگرس) همواره چالشی جدی برای مدل‌های منفرد بوده است؛ ضعفی که پیش‌تر معصوم‌پور سماکوش و همکاران (Masoompour et al., 2018) نیز در بازتولید اقلیم مناطق پیچیده ایران به آن اشاره کرده‌اند. با این حال، مطالعه حاضر برای غلبه بر این عدم قطعیت، بر پایه رویکرد پیش‌نگری همادی چندمدلی استوار است. این رویکرد با کاهش خطاهای سیستماتیک مدل‌های منفرد، بیشترین مقدار تطابق را با شرایط پیچیده توپوگرافی کشور فراهم می‌کند. قابلیت بالای خروجی‌های این نسل از مدل‌ها (CMIP6) در بازتولید شرایط اقلیمی ایران، در ارزیابی‌های میری و همکاران (Miri et al., 2025) نیز تأیید شده است.



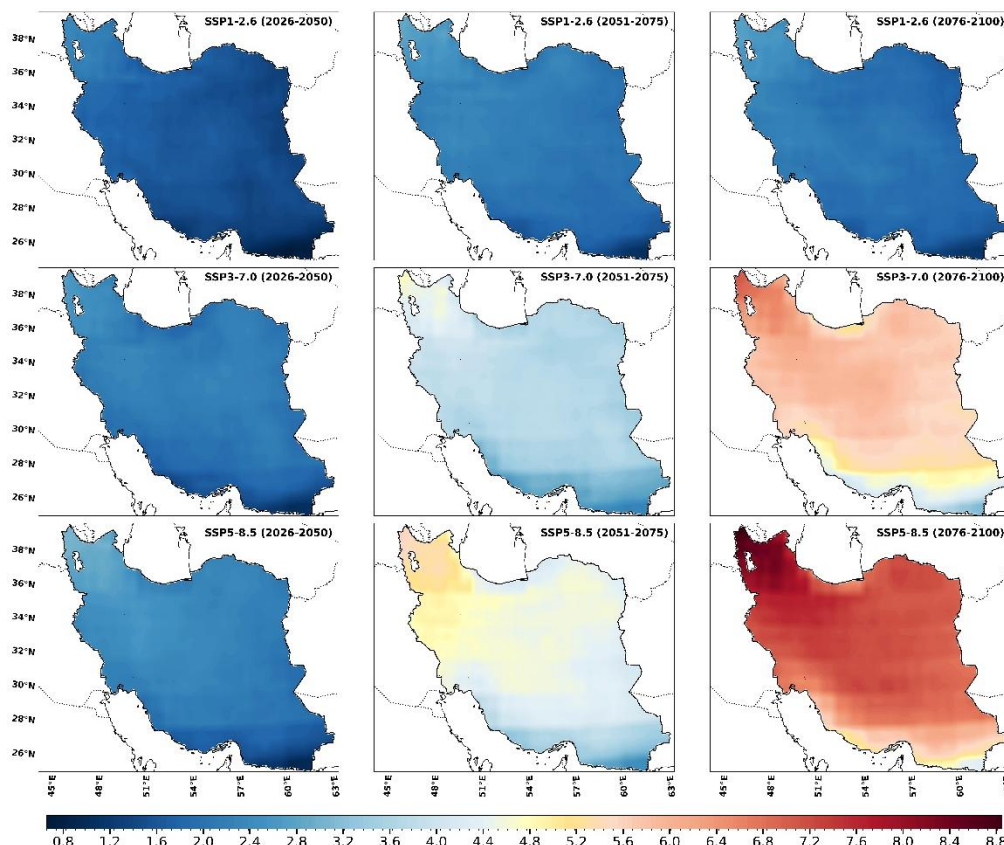
شکل ۴. بی‌هنجاری مکانی نمایه کمینه مطلق دما (T_N) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0، و SSP5-8.5 برای سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰). (واحد: درجه سلسیوس)

Figure 4. Spatial anomalies of the absolute minimum temperature (T_N) index relative to the historical period (1990–2014) under three Shared Socioeconomic Pathway scenarios (SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) across three future periods: near-future (2026–2050), mid-future (2051–2075), and far-future (2076–2100). (Unit: °C)

بی‌هنجاری نمایه فرین بیشینه مطلق دما (TX_x) در ایران بر اساس چندمدلی همادی CMIP6

تغییرات نمایه بیشینه مطلق دما (TX_x) طی دوره آینده نزدیک در تمامی سناریوها روند افزایشی نسبتاً همگنی دارد. میانگین پهنه‌ای بی‌هنجاری در این افق زمانی بین ۱/۵ درجه سلسیوس در SSP1-2.6 تا ۲/۳ درجه سلسیوس در دو سناریوی دیگر نوسان دارد و بازه آن در سطح کشور بین ۱ تا ۳ درجه سلسیوس است. واگرایی ترمودینامیکی در دوره آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) آشکار می‌شود. تحت سناریوی SSP1-2.6، بی‌هنجاری متوسط پهنه‌ای در مرز ۲/۱ درجه سلسیوس تثبیت می‌شود. سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 مسیر کاملاً متفاوتی را طی می‌کنند. میانگین پهنه‌ای TX_x در SSP3-7.0 به ۳/۷ و در SSP5-8.5 به ۴/۴ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۵). تمرکز مکانی این امواج گرمایی شدید در نیمه غربی، شمال غرب و نوارهای کوهستانی با بی‌هنجاری ۳/۵ تا ۶ درجه سلسیوس نمایان است. در آینده دور بی‌هنجاری متوسط پهنه‌ای TX_x تحت سناریوی SSP3-7.0 بازه ۵/۵ تا ۵/۷ درجه سلسیوس را ثبت می‌کند و در سناریوی SSP5-8.5 با یک روند قابل توجه به ۶/۹ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. توزیع مکانی این بی‌هنجاری در پایان قرن ناهمگن است. نواحی کوهستانی زاگرس، البرز و پهنه‌های شمال غرب بی‌هنجاری قابل توجه ۷ تا ۸/۸ درجه سلسیوسی را تجربه می‌کنند. نوار ساحلی جنوب در خلیج فارس و دریای عمان تحت تاثیر اینرسی حرارتی آب، دامنه بی‌هنجاری کمتری معادل ۴ تا ۵/۶ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد (شکل ۵). این روند فزاینده و ثبت بی‌هنجاری‌های شدید حرارتی در اواخر قرن، با پیش‌نگری‌های دوس سانتوس (dos Santos, 2026) در اقلیم‌های نیمه‌خشک مبنی بر عبور شاخص TX_x از مرزهای بحرانی تحت سناریوهای انتشار بالا، مطابقت دارد. در مقیاس کشور نیز، این تشدید فراگیر فرین‌های گرمایشی کاملاً همسو با یافته‌های میری و همکاران (Miri et al., 2025) و نوروز ولاشدی و همکاران (Norooz-Valashedi et al., 2024) است که بر افزایش معنادار فرین‌های

گرم و طول دوره تابستانی در دهه‌های آینده تاکید داشته‌اند. تضاد مکانی بی‌هنجاری میان ارتفاعات و سواحل جنوبی ریشه در سازوکارهای بنیادین بیلان انرژی سطح و دینامیک جو دارد. افزایش بی‌سابقه TXx در مناطق کوهستانی و داخلی، محصول مستقیم بازخورد رطوبت خاک - دما است. با تخلیه رطوبت خاک تحت تبخیر - تعرق پتانسیل بالا، شار گرمای نهان متوقف شده و انرژی تابشی خورشید تماماً به شار گرمای محسوس تبدیل می‌شود.



شکل ۵. بی‌هنجاری مکانی نمایه بیشینه مطلق دما (TXx) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰–۲۰۱۴) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 برای سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶–۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱–۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶–۲۱۰۰). (واحد: درجه سلسیوس)

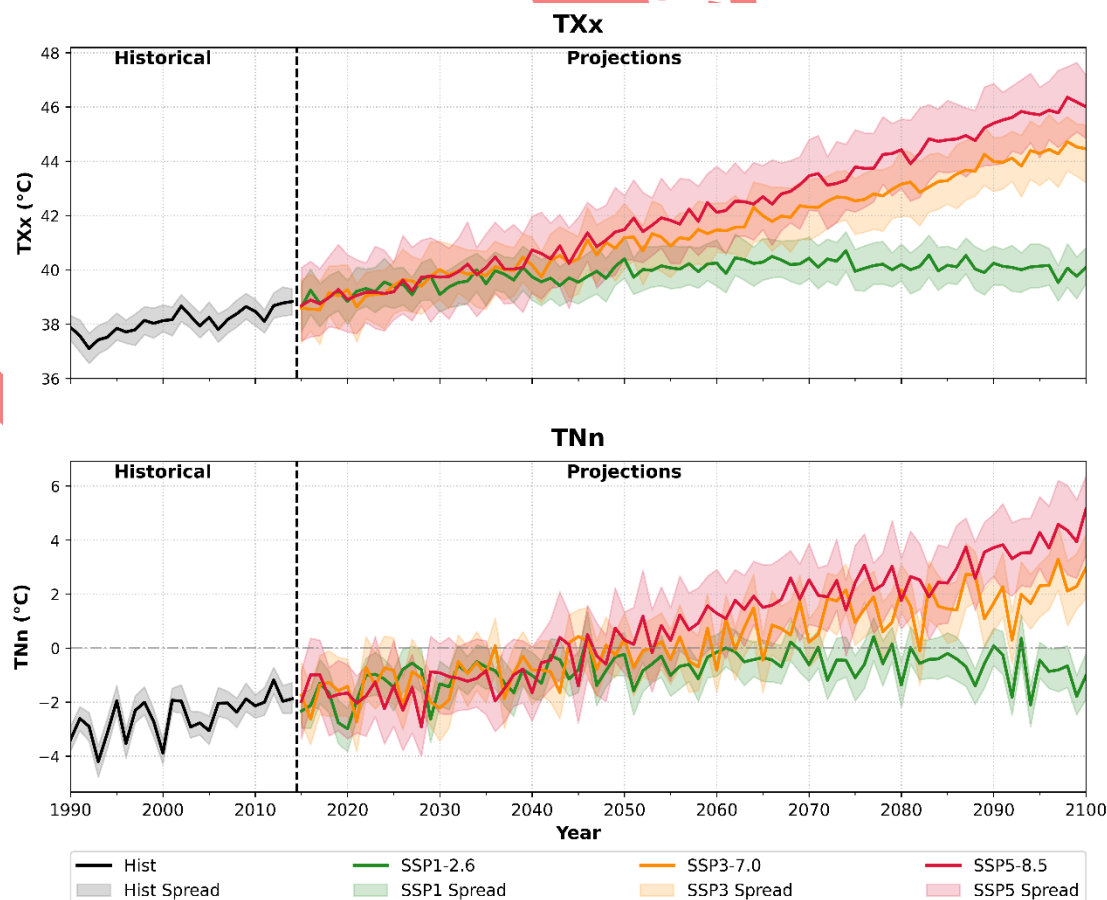
Figure 5. Spatial anomalies of the absolute maximum temperature (TXx) index relative to the historical period (1990–2014) under three Shared Socioeconomic Pathway scenarios (SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) across three future periods: near-future (2026–2050), mid-future (2051–2075), and far-future (2076–2100). (Unit: °C)

پیش‌نگری همادی فرین‌های مطلق دمایی و بررسی عدم قطعیت تحت سناریوهای SSP

تغییرات فرین‌های مطلق دمایی در مقیاس سالانه، نمودی فیزیکی از پاسخ سامانه اقلیم به سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای است. واکاوی شاخص TXx بر مبنای همادی ۱۴ مدل CMIP6 نشان می‌دهد که در دوره تاریخی (۱۹۹۰–۲۰۱۴)، این متغیر با توافق ساختاری بالای مدل‌ها در بازه ۳۷ تا ۳۹ درجه سلسیوس نوسان می‌کند. کاربست سناریوی SSP1-2.6 منجر به یک فاز افزایشی اولیه شده که تا میانه قرن در آستانه ۴۰ درجه سلسیوس می‌رسد. ثبات بازه عدم قطعیت بین مدلی در این سناریو، پایداری سامانه اقلیمی را تحت واداشت تابشی پایین تأیید می‌کند. تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5، رژیم فرین‌های دمایی را دچار تغییرات ساختاری می‌کند. تحت سناریو SSP3-7.0، شاخص TXx افزایشی پیوسته را تجربه کرده و تا پایان قرن به ۴۴/۵ تا ۴۵ درجه سلسیوس می‌رسد. سناریوی SSP5-8.5 این شاخص را از ۳۸/۵ تا ۳۹ درجه سلسیوس در ابتدای دوره پیش‌نگری، به بیشینه مطلق ۴۶ درجه سلسیوس در اواخر قرن می‌رساند. بازه عدم قطعیت در دهه‌های پایانی این سناریو به شدت

منبسط شده و گستره‌ای معادل ۴۴/۵ تا ۴۷/۵ درجه سلسیوس را در بر می‌گیرد (شکل ۶). تفکیک کامل و عدم همپوشانی بازه‌های پراکندگی SSP5-8.5 و SSP1-2.6 در اواخر قرن، استقلال آماری و معنادار بودن این دو سناریو را اثبات می‌کند. حساسیت اقلیمی متفاوت مدل‌ها و نحوه شبیه‌سازی بازخوردهای سطح زمین - جو علت اصلی این واگرایی در دهه‌های پایانی است.

تغییرات شاخص TNn رفتار نامتقارن سامانه اقلیم را در پاسخ به گرمایش جهانی آشکار می‌سازد. رکورد تاریخی این شاخص مقادیری بین ۴- تا ۲- درجه سلسیوس را ثبت کرده که در سال‌های پایانی این دوره افزایش آشکاری به سمت مقادیر کمتر منفی دارد. سناریو SSP1-2.6 این کمینه مطلق را از ۲- درجه سلسیوس به نزدیک صفر درجه سلسیوس در میانه قرن می‌رساند. سناریوهایی با انتشار بالا یک گذار حالت اکولوژیکی کامل را با از بین رفتن قطعی یخبندان‌های شدید سالانه نشان می‌دهند. مقدار TNn تحت سناریوی SSP3-7.0 در پایان قرن به ۲/۵ تا ۳ درجه سلسیوس می‌رسد. واداشت تابشی و گازهای گلخانه‌ای شدیدتر تحت سناریو SSP5-8.5 میانگین همادی را از ۲- درجه سلسیوس به ۴ تا ۵ درجه سلسیوس در انتهای دوره می‌رساند. پراکندگی بین مدلی در این مقطع بازه‌ای معادل ۳ تا ۶ درجه سلسیوس را پوشش می‌دهد (شکل ۶). نوسانات بالای بازه عدم قطعیت TNn نسبت به TXx، ریشه در پیچیدگی شبیه‌سازی فرایندهای محلی دارد. متغیرهایی نظیر پوشش برف، رطوبت خاک، ابرناکی شبانه و وارونگی‌های دمایی لایه مرزی، بازتولید فرین سرد را با چالش‌های پارامتریک بیشتری در مدل‌های GCM مواجه می‌سازند. تمامی مدل‌ها بدون استثنا بر حذف مطلق آستانه‌های زیر صفر در پایان قرن توافق دارند. دامنه پراکندگی بین مدلی در پیش‌نگری‌های CMIP6 ماهیتاً یک سنجش وابسته به زمان و سناریو برای درک عدم قطعیت‌های ساختاری است و نباید معادل بازه‌های اطمینان آماری کلاسیک تفسیر شود. پس از سال ۲۰۵۰، واگرایی سناریویی به مؤلفه غالب عدم قطعیت تبدیل می‌شود. بسط یافتن کرانه‌های پراکندگی همادی در دهه‌های پایانی تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5، مستقیماً از تفاوت در ساختار فیزیکی مدل‌ها بازخورد ابرها و حساسیت اقلیمی نشأت می‌گیرد.



شکل ۶. تغییرات زمانی و عدم قطعیت بین مدلی فرین‌های مطلق دمایی (TXx و TNn) طی بازه ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰. خطوط پیوسته چند مدلی همادی ۱۴ مدل CMIP6 و نوارهای سایه‌دار دامنه پراکندگی ساختاری آن‌ها را تحت سه سناریوی SSP نشان می‌دهند.

Figure 6. Temporal variations and inter-model uncertainties in absolute temperature extremes (TXx and TNn) for the period 1990–2100. Solid lines denote the multi-model mean of the 14 CMIP6 models, while shaded bands indicate the inter-model spread across the three SSP scenarios.

پیش‌نگری شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI) با فرین‌های مطلق دمایی بر پایه چندمدلی همادی CMIP6-MME ارزیابی رفتار مکانی شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی در ایران، نمایانگر تغییرات در فراوانی و شدت فرین‌های مطلق دمایی است. این شاخص ترکیبی که بر پایه TNn و TXx تولید شد، جابه‌جایی رژیم‌های اقلیمی را در آینده نزدیک، آینده میانی و دور تحت سناریوهای سه‌گانه توسعه یافته است. مقادیر محاسباتی نزدیک به حد آستانه‌ای یک، شاخصی مستقیم از بروز تنش‌های شدید گرمایی، تشدید امواج گرما و کاهش دوره‌های سرمایش شبانه منطبق بر تعاریف کارگروه بین‌المللی ETCCDI تلقی می‌شود. برآیند تفکیکی این شاخص، خط سیر آسیب‌پذیری گرمایی کشور را در پاسخ به گرمایش جهانی مشخص می‌سازد.

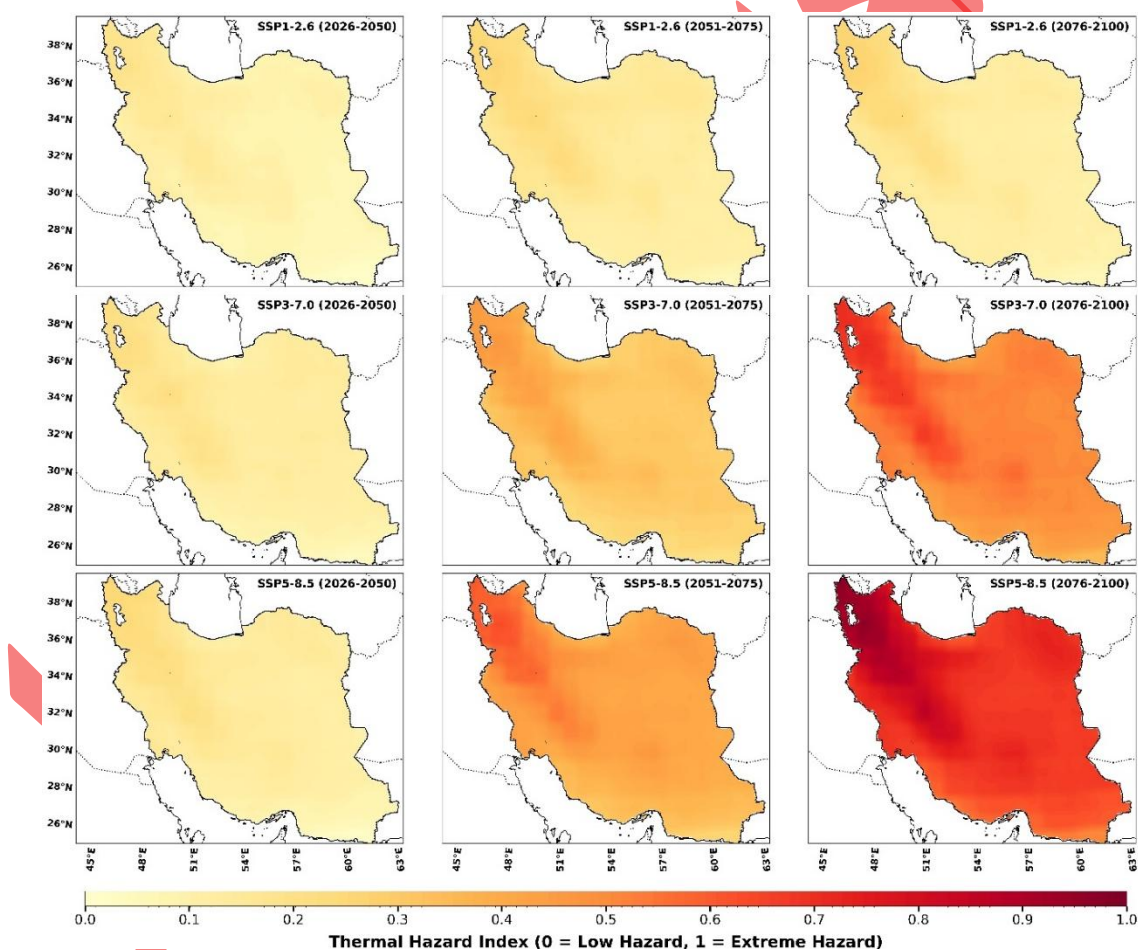
پایبندی به سیاست‌های کلان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در قالب سناریوی توسعه پایدار SSP1-2.6، پایداری گرمایی نسبی را در کل کشور نشان می‌دهد. شاخص تولید شده در تمامی دوره‌های آینده تا افق ۲۱۰۰ کاملاً در محدوده مخاطره پایین (بین ۰ تا حداکثر ۰/۲۵) تثبیت می‌شود (شکل ۷). این ثبات در شاخص، اثربخشی مستقیم راهبردهای اقلیمی را در جلوگیری از بروز تفکیک‌های ساختاری و نوسانات فرین‌های مطلق اثبات می‌کند. اتخاذ سناریوی رقابت منطقه‌ای (SSP3-7.0) شتاب افزایشی ناپیوسته اما مستمری را در نمایه مخاطرات گرمایی کشور آشکار می‌سازد. تحلیل زمانی نشان می‌دهد که در دوره نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) نوسانات شاخص در سطوح پایین کنترل می‌شود، اما در دوره میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و به‌ویژه اواخر قرن (۲۰۷۶-۲۱۰۰)، گرادبان‌های شدیدی شکل می‌گیرد که مقادیر مخاطره را در بخش‌های وسیعی از نوار غربی و شمال غربی به دامنه متوسط تا بالا یعنی محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ سوق می‌دهد. بر اساس این سناریو عدم همگرایی در سیاست‌های اقلیمی بین‌المللی، زنگ خطر جابه‌جایی رژیم فرین‌ها را در نواحی کوهستانی به صدا درمی‌آورد. سناریوی بدبینانه توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (SSP5-8.5) محرک اصلی شکل‌گیری فراگیرترین تنش گرمایی در اواخر قرن جاری است. در افق زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰، ایران با پوشش تقریباً مطلق مخاطره شدید مواجه شده و مقادیر شاخص ترکیبی در بخش‌های عمده کشور از مرز ۰/۸ عبور کرده و در کانون‌های بحرانی به مقدار یک می‌رسد (شکل ۷).

ساختار مکانی مخاطرات گرمایی در اواسط و اواخر قرن تحت سناریوهای بدبینانه، یک کانون آسیب‌پذیری متمرکز را در امتداد ارتفاعات غربی، شمال غربی و رشته‌کوه زاگرس آشکار می‌کند. در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ تحت سناریوی توسعه سوخت‌های فسیلی، مقادیر بحرانی شاخص ($CTHI > 0.9$) به طور مشخص استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان، کرمانشاه و امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس مرکزی و جنوبی را در بر می‌گیرد. این تمرکز مکانی مستقیماً با سازوکار گرمایش وابسته به ارتفاع (EDW)^۱ انطباق دارد. پدیده EDW به‌عنوان شتاب‌دهنده توپوگرافیک، ناهمگنی مکانی شدیدی را در نحوه توزیع بی‌هنجاری‌های فرین دمایی پدید می‌آورد. پیامدهای هیدرولوژیکی این تغییر رژیم فرین‌ها، امنیت آبی کلان‌حوضه‌های آبریز ایران را با چالش‌های غیر قابل بازگشت مواجه خواهد کرد. افزایش شدید نمایه TXx در زاگرس به‌عنوان سرچشمه اصلی حوضه‌های آبریز کشور و منابع برف‌گیر، نرخ ذوب زود هنگام یخچال‌ها، کاهش ماندگاری پوشش برفی و افزایش تصاعدی تبخیر - تعرق واقعی را به همراه دارد. مجموع یافته‌های شاخص CTHI از CMIP6-MME، لزوم بازنگری فوری در برنامه‌های کلان تاب‌آوری ملی را نشان می‌دهد. تحلیل شاخص ترکیبی تولید شده نشان می‌دهد که استمرار مسیر انتشار سناریوی بدبینانه، مناطق مرتفع غرب و شمال غرب ایران را به سرعت به سمت یک نقطه بی‌بازگشت^۲ سوق می‌دهد. تدوین برنامه‌های سازگاری ساختارمند در حوزه‌های سلامت عمومی، کشاورزی پایدار و بازتخصیص منابع آب در نوار زاگرس باید با فرض بدترین سناریوهای گرمایشی مبنای عمل قرار گیرد.

^۱ Elevation-dependent warming (EDW)

^۲ Tipping Point

در همین راستا و با توجه به پیامدهای آبخاری این تغییرات، بخش کشاورزی به‌ویژه در دیم‌زارهای راه‌بردی غرب و شمال غرب کشور با تهدیدات قابل توجهی مواجه خواهد شد؛ تشدید تنش‌های گرمایی ضمن ایجاد اختلال در فنولوژی گیاهی و کوتاه‌کردن طول دوره رشد، نیاز آبی گیاه را به‌موازات افزایش تبخیر - تعرق به شدت بالا برده و کاهش معنادار عملکرد محصولات پایه را به همراه دارد. از منظر تقاضای انرژی، افزایش فراوانی و شدت بی‌هنجاری‌های دمایی منجر به جهش بی‌سابقه در شاخص نیاز سرمایشی در فصول گرم می‌شود؛ این تغییر الگوی مصرف، زیرساخت‌های تأمین و توزیع برق را در زمان‌های اوج بار تابستانه با تنش مضاعف و خطر ناپایداری شبکه روبرو می‌سازد. در حوزه سلامت عمومی نیز، استمرار امواج گرمایی شدید و کاهش آستانه آسایش گرمایی، به‌ویژه در مناطقی که از نظر تاریخی و فیزیولوژیک سازگاری کمتری با این فرین‌های گرمایی دارند، استرس گرمایی، نرخ ابتلا و مرگ‌ومیر ناشی از عوارض قلبی - عروقی و تنفسی را در میان گروه‌های آسیب‌پذیر به شدت بالا می‌برد. این شرایط، به طور خاص سلامت و ایمنی شغلی نیروی کار فعال در فضاهای باز را با مخاطرات جدی مواجه کرده و لزوم توسعه زیرساخت‌های تطبیقی و سامانه‌های هشدار زودهنگام چندمنظوره را بیش از پیش نمایان می‌سازد.



شکل ۷. پراکنش مکانی شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI) در ایران طی دوره‌های پیش‌نگری کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت (۲۰۲۶-۲۱۰۰) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴). مقدار نزدیک به صفر مخاطره گرمایی پایین و مقادیر نزدیک به یک بیانگر بیشینه بی‌هنجاری نرمال‌شده در فرین‌های مطلق دمایی (TNn و TXx) و حاکمیت تنش‌های گرمایی است.

Figure 7. Spatial distribution of the Composite Thermal Hazard Index (CTHI) in Iran across the near-future, mid-future, and far-future projection periods (2026–2100) relative to the historical period (1990–2014). Values approaching zero indicate a low thermal hazard. In contrast, values approaching one represent the maximum normalized anomaly in absolute temperature extremes (TNn and TXx) and the dominance of heat-stress conditions.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر یک دوگانگی ترمودینامیکی آشکار را در رفتار مکانی فرین‌های مطلق دمایی ایران تحت سناریوهای SSP اثبات می‌کند. ارزیابی مدل‌های تصحیح اریبی شده CMIP6 نشان داد که شاخص TXx به دلیل وابستگی به سیگنال‌های کلان‌مقیاس، تابش طول‌موج کوتاه و فرارفت گرم در دشت‌های داخلی و شرقی (نظیر بم، طبس و زاهدان) با کارایی بالایی (ضریب توافقی ۰/۵ تا ۰/۸) برآورد می‌شود. پیش‌نگری‌های پایان قرن (۲۰۷۶-۲۱۰۰) حاکی از گسست اقلیمی شدید در سناریوی SSP5-8.5 است؛ به‌طوری‌که میانگین پهنه‌ای TXx تا ۶/۹ درجه سلسیوس افزایش یافته و بی‌هنجاری کمینه مطلق (TNn) در پهنه‌های کوهستانی البرز، زاگرس و پهنه شمال غرب، تحت تاثیر سازوکار گرمایش وابسته به ارتفاع (EDW) و بازخورد سپیدایی - برف، از مرز ۷ درجه سلسیوس عبور می‌کند. شاخص ترکیبی مخاطره گرمایی (CTHI) در همین سناریو برای مناطق شمال غرب و زاگرس مرکزی به بیشینه مقدار شاخص ($CTHI > 0.9$) می‌رسد، درحالی‌که سناریوی توسعه پایدار (SSP1-2.6) این شاخص را در سطح پایین (کمتر از ۰/۲۵) تثبیت خواهد کرد. کارایی مدل‌های به کار رفته در بازتولید فرین‌ها، یافته‌های ویدیا و همکاران (Vidya et al., 2026) و داس و همکاران (Das et al., 2023) را به طور کامل تأیید می‌کند. تشدید فرین‌های شبانه تحت سناریوهای با انتشار بالا نیز با یافته‌های دوس سانتوس (dos Santos, 2026) در مناطق نیمه‌خشک و پیش‌نگری‌های افزایش امواج گرمایی روزانه توسط نذول و همکاران (Nazrul et al., 2026) و انیو و همکاران (Enyew et al., 2026) همگرایی بالایی دارد. جابه‌جایی دامنه‌های توزیع فرین و پیامدهای آن نظیر جهش تصاعدی تبخیر - تعرق و کاهش ماندگاری برف، هم‌راستا با نتایج ویدیا و همکاران (Vidya et al., 2026)، نشان‌دهنده حرکت سریع زیست‌بوم‌های ایران به سوی یک نقطه بی‌بازگشت اقلیمی و تهدید امنیت آبی است.

بازتولید فرین‌های گرمایی شبانه به شکل کلیدی توسط محدودیت‌های ساختاری مدل‌های گردش کلی بر روی توپوگرافی پیچیده تضعیف شده است. کاهش ضریب توافقی مشاهداتی شاخص TNn به کمتر از ۰/۵ و مرز صفر در ایستگاه‌های کوهستانی نظیر شهرکرد، پیرانشهر، کوهرنگ، سردشت، سراب و زنجان نشان‌دهنده نقص سیستماتیک مدل‌ها در بازتولید فرایندهای فیزیکی محلی است. تفکیک افقی درشت در چندمدلی همادی CMIP6 مانع از شبیه‌سازی دقیق شرایط خرداقلیمی، پویایی لایه مرزی شبانه، وارونگی‌های دمایی و پدیده تجمع هوای سرد در کف دره‌ها می‌شود و خطای محاسباتی را در این پهنه‌ها افزایش می‌دهد. پیامدهای هیدرولوژیکی غیر قابل بازگشت ناشی از جابه‌جایی رژیم فرین‌ها، گذار به سوی روش‌های مقیاس‌کاهی مبتنی بر یادگیری ماشین با تفکیک‌پذیری بسیار بالا را در پژوهش‌های آتی الزامی می‌سازد. با توجه به پیش‌نگری افزایش قابل توجه دما و به تبع آن ذوب زود هنگام یخچال‌ها در سرچشمه‌های اصلی حوضه‌های آبخیز، توسعه مدل‌های منطقه‌ای مبتنی بر یادگیری با قابلیت تفکیک همرفت و آگاه از فیزیک برای درک دقیق‌تر پویایی لایه مرزی در کوهستان‌های زاگرس و البرز پیشنهاد می‌شود.

منابع

- Chehrebara Ziabari, T. and Hajivand Paydari, S. (2026). Variability of Cold Waves and the Role of Atmospheric Anomalies in Their Occurrence During the Last Half-Century: A Case Study of Isfahan City. (e4127). *Journal of Drought and Climate Change Research*. e4127 <https://doi.org/10.22077/jdcr.2026.11405.1240> [In Persian]
- Cui, T., Zheng, J., Zhang, Z., Han, Y., Huang, D., Yang, L., & Chen, S. (2025). Enhancing multi-model ensemble simulations of climate extremes over the Tibetan Plateau using machine learning. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(7), 390. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05622-9>
- Das, S., Islam, A. R. M. T., & Kamruzzaman, M. (2023). Assessment of climate change impact on temperature extremes in a tropical region with the climate projections from the CMIP6 model. *Climate Dynamics*, 60(1), 603-622. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06416-9>
- dos Santos, D. C. (2026). Escalating thermal extremes and climate risk in a Brazilian semi-arid region: insights from ETCCDI indices and CMIP6 model projections. *Natural Hazards*, 122(2), 64. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07814-y>
- Enyew, F. B., Sahlu, D., Tarekegn, G. B., & Alaminie, A. A. (2026). Analyzing the spatiotemporal distribution of climate extremes under the CMIP6 climate model in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Natural Hazards*, 122(6), 227. <https://doi.org/10.1007/s11069-026-07998-x>

- Esmaili, H., Roshani, A., Shakiba, A., and Parak, F. (2019). Trend Analysis of Climate Compound Extreme Indices in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 7(4), 89-110. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.67984> [In Persian]
- 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. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fakhri, M. (2024). Investigating the Condition of Iran's Temperature Changes Compared to the Past Long-Term Climatic Standard Period. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 17-32. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062> [In Persian]
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., ... & Rummukainen, M. (2014). Evaluation of climate models. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/evaluation-of-climate-models/>
- Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: Insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd7ad>
- Holtzlag, A. A. M., Svensson, G., Baas, P., Basu, S., Beare, B., Beljaars, A. C. M., ... & Van De Wiel, B. J. (2013). Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: challenges for weather and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(11), 1691-1706. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00187.1>
- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press, Cambridge. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3055-3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>
- Masoompour Samakosh, J., Miri, M., and Purkamar, F. (2018). Assessment of CMIP5 climate models with observed precipitation in Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(4), 40-53. https://www.ijgeophysics.ir/article_53232.html?lang=fa [In Persian]
- Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J. F., Stouffer, R. J., ... & Schlund, M. (2020). Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances*, 6(26), eaba1981. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1981>
- Miri, M., Zand, M., Kousari, M., and Rahimi, M. (2025). Spatial and temporal analysis of historical and future extreme temperature events in Iran under the influence of climate change. *Watershed Engineering and Management*, 17(3), 267-284. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.366334.2071> [In Persian]
- Mtewa, T. K., Ngongondo, C., Dulanya, Z., Boyce, C., & Mttilala, L. (2025). Temporal trends in extreme temperature indices over Malawi during 1961–2015. *Discover Atmosphere*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s44292-025-00025-x>
- Nazrul, F. B., Karim, M. R., Pavan, W., & Kamruzzaman, M. (2026). Future climate extremes in Bangladesh: insights from a multi-model ensemble of CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 10(2), 1369-1388. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00681-4>
- Norooz-Valashedi, R., Bararkhanpour Ahmadi, S., Bahrami Pichaghchi, H., and Mazloom Babanari, S. (2024). Forecasting the changes of temperature extreme indices in the area of Mazandaran Province under CMIP6 scenarios. *Watershed Engineering and Management*, 16(2), 279-301. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2024.363859.2036> [In Persian]
- OECD/European Union/EC-JRC. (2008). Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- 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. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Paul, A. R., & Maity, R. (2023). Future projection of climate extremes across contiguous northeast India and Bangladesh. *Scientific Reports*, 13(1), 15616. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42360-2>
- 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. <https://doi.org/10.1002/joc.1739>

- Ramezani Etedali, H., & Koohi, S. (2025). Assessing the impact of climate change on heat stress on strategic agricultural products in Qazvin province. *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9739.1157> [In Persian]
- Sarisaraf, B., Rostamzadeh, H., and Mohamadi, N. (2023). Investigating the trend and predicting changes in temperature extremes using CMIP6 models in northwest Iran. *Journal of Climate Research*, 1402(54), 87-104. https://clima.irimo.ir/article_166461.html?lang=en [In Persian]
- Schuhnen, N., Iles, C. E., Sandstad, M., Ananiev, V., & Sillmann, J. (2026). Emergence of climate change signal in CMIP6 extreme indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 26(2), 753-773. <https://doi.org/10.5194/nhess-26-753-2026>
- Sridhara, S., Thimmareddy, H., Haroli, M., Bal, S. K., Das, B., Jha, P. K., & Prasad, P. V. (2026). Historical and future extremes of Cauvery Basin analysed using CMIP6 models and ETCCDI indices. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-42818-z>
- Vidya, S., Siddappanavara, P. M., & Jeganathan, A. (2026). Temperature Extremities Under Current and Future SSP Scenarios for Indian States. In *Geospatial Solutions for Ecological Challenges and Sustainability* (pp. 9-27). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-12737-2_2
- Vogel, M. M., Orth, R., Cheruy, F., Hagemann, S., Lorenz, R., van den Hurk, B. J., & Seneviratne, S. I. (2017). Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks. *Geophysical Research Letters*, 44(3), 1511-1519. <https://doi.org/10.1002/2016GL071235>
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088-2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., Matsuura, K., & Ficklin, D. L. (2015). Assessment of three dimensionless measures of model performance. *Environmental Modelling & Software*, 73, 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.012>
- World Meteorological Organization. (2018). *Guide to climatological practices* (WMO-No. 100). <https://library.wmo.int/viewer/60113#page=1&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=>
- Xu, H., Chen, H., & Wang, H. (2022). Future changes in precipitation extremes across China based on CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 42(1), 635-651. <https://doi.org/10.1002/joc.7264>
- 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. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zhu, J., Xie, A., Qin, X., Wang, S., Xu, B., & Wang, Y. (2023). Projection of Antarctic temperature extremes from the CMIP6 multimodel ensemble under different scenarios. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62(8), 1129-1146. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0137.1>
- Zhu, J., Xie, A., Wang, S., Qin, X., Li, B., Xu, B., & Wang, Y. (2025). Future Antarctic amplification from extreme temperature indices for different socioeconomic scenarios and time periods. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 75(3), ES24009. <https://doi.org/10.1071/ES24009>