Golestan University

Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 26, Summer 2026

Historical Changes and Future Projections of Radiative Flux and Surface Energy Balance Over Iran

Abbasali Dadashi-Roudbari[*1]

1 Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: a-dadashi@um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2026-2-12
Accepted: 2026-4-22

Keywords:
Downward shortwave radiation
Downward longwave radiation
multi-model ensemble
CMIP6 project
SSP scenarios

ABSTRACT

Surface downwelling shortwave radiation (RSDS) and surface downwelling longwave radiation (RLDS) are fundamental drivers of the surface energy balance and the broader hydrological cycle. Recognizing their pivotal role, this study investigates surface radiative flux dynamics across the arid and semi-arid landscapes of Iran. The investigation is grounded in data from Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). To mitigate structural uncertainties, a Multi-Model Ensemble Mean (MMEM) was constructed using five optimally selected models. Projections of these radiative components were evaluated across three future periods (near-, mid-, and far-future) extending to 2100, utilizing Shared Socioeconomic Pathways (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) relative to a historical baseline (1990–2014). Subsequent data analysis employed bilinear interpolation and spatial anomaly calculations. Findings indicate that during the historical period, the radiative variables exhibited an inverse spatial gradient. In future periods, RLDS shows a consistent upward trend in both scenarios, driven by tropospheric warming and water vapor feedback mechanisms. Notably, under SSP5-8.5, by the end of the century, southern coastal regions are projected to experience a substantial increase of 30–50 W m□². Conversely, RSDS exhibits primarily diminishing or fluctuating trends; however, positive anomalies were observed within the Central Plateau, a pattern attributed to the region's inherent aridity. Consequently, the aggregate outcome of these shifts is the dominance of intensifying longwave radiation over variations in shortwave irradiance. The study demonstrates that this resulting radiative imbalance precipitates an enhanced positive surface net energy balance and exacerbates potential evapotranspiration, posing a severe threat to Iran's water resources. Furthermore, the analysis reveals that low-lying coastal zones exhibit the highest thermodynamic sensitivity, whereas the Zagros and Alborz highlands play a pivotal role in modulating these radiative changes. The projections generated here offer immediate, practical value for strategic infrastructure planning. Specifically, these findings can directly inform the site selection, expansion, and efficiency forecasting of solar power facilities, while providing a critical scientific foundation for overhauling climate-responsive design standards and optimizing building energy management protocols.

Cite this article: Dadashi-Roudbari A.A. (2026). Historical changes and Future Projections of Radiative Flux and Surface Energy Balance Over Iran. Journal of the Climate Change research, 7 (26), 1-16.

©The author(s)

Publisher: Golestan University
DOI: 10.30488/ccr.2026.575657.1324

نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی

فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال هفتم/ شماره مسلسل بیست و ششم/ تابستان ۱۴۰۵ / صفحات: ۱۶-۱

تغییرات تاریخی و پیش‌نگری شار تابشی و توازن انرژی سطح زمین در ایران

عباسعلی داداشی رودباری[1*]

[1] استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: a-dadashi@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲

واژه‌های کلیدی:
تابش موج کوتاه فرودی
تابش موج بلند فرودی
چند مدلی همادی
پروژه CMIP6
سناریوهای SSP

چکیده

با توجه به نقش کلیدی تابش‌های فرودی موج کوتاه (rsds) و بلند (rlds) در بیلان انرژی سطحی و چرخه هیدرولوژی، این پژوهش با هدف بررسی واداشت تابشی در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران انجام شد. این تحقیق بر اساس تحلیل داده‌های پروژه CMIP6 انجام شد. به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ساختاری، یک میانگین همادی چندمدلی (MMEM) از پنج مدل منتخب ایجاد شد. تغییرات تابشی در سه دوره آینده (نزدیک، میانی و دور) تا سال ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی اجتماعی-اقتصادی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) مورد بررسی قرار گرفت. سپس داده‌ها با استفاده از روش درون‌یابی دوخطی و محاسبه بی‌هنجاری تحلیل شدند. نتایج نشان داد که طی دوره تاریخی متغیرهای واداشت تابشی دارای گرادیان معکوس هستند. در دوره‌های آتی، rlds در هر دو سناریو روندی افزایشی دارد که ناشی از گرمایش تروپوسری و بازخورد بخار آب است؛ به‌طوری‌که در SSP5-8.5 و در پایان قرن، نواحی ساحلی جنوب افزایش چشمگیر ۳۰ تا ۵۰ وات بر مترمربع را نشان داده است. در مقابل، rsds رفتاری عمدتاً کاهشی یا نوسانی دارد. با این حال rsds در فلات مرکزی به دلیل خشکی ذاتی، بی‌هنجاری مثبت را نشان داده است. این نتایج نشان دهنده غلبه افزایش تابش موج بلند بر تغییرات تابش خورشیدی است. بر این اساس ناترازی تابشی منجر به مثبت شدن بیلان خالص انرژی و تشدید تبخیر-تعرق می‌شود که تهدیدی جدی برای منابع آب ایران محسوب می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که نواحی پست ساحلی بیشترین حساسیت ترمودینامیکی و ارتفاعات زاگرس و البرز نقش تعدیل‌کننده دارند. یافته‌های این مطالعه، می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های راهبردی جهت مکان‌یابی، توسعه و ارزیابی راندمان نیروگاه‌های خورشیدی و جهت اصلاح استانداردهای طراحی اقلیمی و مدیریت انرژی ساختمان‌ها به‌طور مستقیم مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

استناد: داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۵). تغییرات تاریخی و پیش‌نگری شار تابشی و توازن انرژی سطح زمین در ایران. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۶)، ۱۶-۱.

DOI: 10.30488/ccr.2026.575657.1324

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.

مقدمه

بیلان انرژی در مقیاس سیاره‌ای و مرز مشترک جو و سطح زمین، به‌عنوان واداشت کلیدی در سامانه اقلیمی، نقشی غیرقابل انکار در پویایی فرآیندهای ترمودینامیکی و توزیع انرژی زمین ایفا می‌کند (Qin et al., 2020). از منظر فیزیکی، این توازن از طریق مدل مفهومی $N = F + \lambda\Delta T$ قابل تبیین است؛ معادله‌ای که در آن N معادل شار تابشی خالص فرودی، F بیانگر واداشت تابشی مؤثر و ΔT نشان‌دهنده نوسانات دمای هوای سطحی است (Dai et al., 2026). در این چارچوب پیچیده، برهم‌کنش شارهای تابشی، به‌ویژه تابش فرودی موج کوتاه سطح ($rsds$[1]) و تابش فرودی موج بلند سطح ($rlds$[2])، مولفه‌های کلیدی بیلان حرارتی را شکل می‌دهند. تغییرات این مؤلفه‌های کلیدی تحت تأثیر گرمایش جهانی، پیامدهای عمیقی بر چرخه‌های هیدرولوژیک، رخدادهای فرین اقلیمی و مدیریت منابع در مقیاس منطقه‌ای به همراه دارد (Hu et al., 2023; Wang et al., 2026b).

پیچیدگی پاسخ اقلیم به واداشت‌های تابشی صرفاً به میانگین گرمایش جهانی محدود نمی‌شود. ادبیات علمی نوین نشان می‌دهد که توزیع ناهمگن واداشت‌ها، الگوی فضایی تغییرات دمای سطح و ساختار قائم این واداشت‌ها، بازخوردهای اقلیمی را به‌شدت کنترل می‌کنند (Zhou et al., 2023; Dai et al., 2026). علاوه بر این، تغییرات پایداری تروپوسفر و دینامیک ابرها، از طریق اثر تابشی ابرها (CRE)، مقادیر $rsds$ و $rlds$ را دستخوش تغییراتی ساختاری می‌سازد (Wilson Kemsley et al., 2024). اگرچه پیشرفت‌های چشمگیری در پایش این متغیرها از طریق سنجش از دور و مشاهدات ماهواره‌ای حاصل شده است (Cesana et al., 2024)، اما همچنان عدم قطعیت‌های زیادی وجود دارد که ضرورت اتکا به شبیه‌سازی‌های اقلیمی را دوچندان می‌کند (Wendisch et al., 2023).

برای پیش‌نگری دقیق این تغییرات تابشی، مدل‌های گردش کلی (GCMs) به‌عنوان معتبرترین ابزارهای علمی شناخته می‌شوند. در این راستا، فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده ($CMIP6$) با ارتقا تفکیک افقی (Eyring et al., 2016) و پروتکل‌های ارزیابی بازخوردهای تابشی توسعه یافته است (Bloch-Johnson et al., 2024). با این وجود، شبیه‌سازی مؤلفه‌های $rsds$ و $rlds$ در مناطق دارای توپوگرافی پیچیده همواره با چالش پارامترسازی فیزیکی روبه‌رو است (Wang et al., 2025). اتکا به یک مدل واحد در پیش‌نگری‌های اقلیمی اغلب به نادیده گرفتن خطاهای ساختاری و نقض قانون بقای انرژی منجر می‌شود. از این‌رو، بهره‌گیری از رویکرد میانگین همادی چندمدلی ($MMEM$) به‌عنوان یک ضرورت روش‌شناختی برای فیلتر کردن عدم قطعیت‌های ذاتی و دستیابی به برآوردهای سازگار با واقعیت فیزیکی جو تثبیت شده است (Zhang et al., 2019; Wang et al., 2026a).

در حالی که تمرکز بسیاری از ارزیابی‌های تابشی بر عرض‌های جغرافیایی بالا و عدم تقارن نیمکره‌ای معطوف بوده است (Lubin et al., 2026; Zhou et al., 2025)، یک شکاف تحقیقاتی در خصوص تحلیل توازن انرژی در مناطقی با اقلیم‌های خشک و شکننده وجود دارد. ایران، با توجه به موقعیت خاص جغرافیایی و تنوع توپوگرافیک خود، در برابر تغییرات الگوهای تابشی و واداشت‌های قائم به‌شدت آسیب‌پذیر است. تغییرات بیلان تابشی در این پهنه، مستقیماً امنیت منابع آب، نرخ تبخیر-تعرق و زیرساخت‌های انرژی خورشیدی را تهدید می‌کند. بنابراین، درک این مسئله که پاسخ شار تابشی و توازن انرژی سطح زمین در ایران نسبت به تغییر اقلیم چگونه است؟ برای تدوین استراتژی‌های کلان سازگاری اقلیمی، امری کاملاً حیاتی و گریزناپذیر است.

درک دقیق توازن انرژی سطح زمین، به عنوان موتور محرک سامانه اقلیم، مستلزم شناخت عمیق مؤلفه‌های تابشی، به‌ویژه تابش موج کوتاه فرودی سطح ($rsds$) و تابش موج بلند فرودی سطح ($rlds$)

[1] Surface Downwelling Shortwave Radiation (rsds)
[2] Surface Downwelling Longwave Radiation (rlds)

است. در کشوری مانند ایران با تنوع توپوگرافی پیچیده و پتانسیل بالای انرژی خورشیدی، تحلیل این مؤلفه‌ها برای تدوین استراتژی‌های سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم حیاتی است. با گذر مدل‌ها از نسل پنجم (CMIP5) به نسل ششم (CMIP6)، پارادایم‌های پژوهشی از برآوردهای کلی به سمت تحلیل‌های دقیق‌تر با تمرکز بر عدم قطعیت‌های ناشی از ابرها، هواویزها، الگوی قائم واداشت‌ها و توپوگرافی پیچیده تغییر جهت داده‌اند. بر این اساس، پیشینه پژوهش را می‌توان در سه دسته دینامیک تابش موج کوتاه فرودی، تابش موج بلند فرودی و چالش‌های توپوگرافی و توازن جامع انرژی سطح مورد بررسی قرار داد.

تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین، متغیر کلیدی در مطالعات تغییر اقلیم و برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر است. Wild et al., (2015) با بررسی ۳۹ مدل CMIP5 دریافتند که اگرچه مدل‌ها در پیش‌نگری دمایی توافق دارند، اما در شبیه‌سازی تابش خورشیدی و پوشش ابر دچار واگرایی هستند. انطباق مدل‌های گردش کلی (GCM) با مدل‌های اقلیم منطقه‌ای (RCM) نیز همواره چالش‌برانگیز بوده است؛ به‌طوری‌که Bartók et al., (2017) تناقض آشکاری را بین پیش‌نگری افزایش تابش (Brightening) در GCMها و کاهش آن (Dimming) در RCMها گزارش کردند. در همین راستا، Gutiérrez et al., (2020) اثبات کردند که نادیده گرفتن تکامل زمانی ذرات معلق در برخی مدل‌های منطقه‌ای عامل اصلی این خطا بوده است.

با ارائه نسل ششم مدل‌ها (CMIP6)، تحلیل‌ها عمق فیزیکی بیشتری یافتند. بطوریکه Song et al., (2025) نشان دادند که کاهش جهانی تابش سطحی ناشی از اثرات ترکیبی گازهای گلخانه‌ای و هواویزهای انسانی بوده و سناریوهای کم‌انتشار (مانند SSP1-2.6) می‌توانند آینده‌ای با تابش بیشتر را رقم بزنند. در همین راستا و با نگاهی به پیچیدگی‌های واداشت تابشی، Dai et al., (2026) ثابت کردند که ساختار قائم واداشت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ به‌گونه‌ای که واداشت در ارتفاعات بالاتر به دلیل بازخوردهای منفی ابر، گرمایش جهانی کمتری ایجاد می‌کند. این مسئله به ویژه در ارزیابی اثرات عواملی چون ابرهای سیروس مشهود است، بطوریکه Bickel et al., (2025) نشان دادند واداشت تابشی مؤثر این ابرها تنها حدود ۵۵ درصد واداشت ناشی از CO_2 است و تأثیر کمتری بر تغییرات دمای سطح دارد.

در زمینه کاربردی، مطالعات متعددی پتانسیل فتوولتائیک را بررسی کرده‌اند. Hou et al., (2021) برای اروپا هم‌افزایی مثبتی بین کاهش انتشار و تولید برق خورشیدی پیش‌نگری کردند، در حالی که Dutta et al. (2022) کاهش این پتانسیل در آسیا گزارش دادند. Chen et al. (2024) نیز نشان دادند گرمایش جهانی با وجود کاهش کارایی پنل‌ها در دمای بالا، می‌تواند با حذف روزهای بسیار ابری نوسانات را تعدیل کند. با این حال، غلبه بر خطاهای مدل‌سازی در مناطق پیچیده نیازمند مقیاس‌کاهی است؛ همان‌طور که Bhawar & Jadhav (2025) نشان دادند بدون تصحیح اریبی، برآورد پتانسیل خورشیدی با خطای بالا همراه است.

تابش موج بلند فرودی ($rlds$) به عنوان نماینده اصلی اثر گلخانه‌ای، نقش مکملی در بیلان انرژی دارد. ارزیابی‌های Xu et al. (2021) و Xu et al. (2022) بر روی مدل‌های CMIP6 نشان داد که اگرچه اریبی‌ها نسبت به نسل قبل کاهش یافته، اما همچنان در مناطق کوهستانی خطاهای قابل‌توجهی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین شکاف‌ها، ناتوانی مدل‌هایی با تفکیک پایین در شبیه‌سازی مناطق پیچیده است. Gu et al., (2024) نشان دادند که نادیده گرفتن اثرات تابشی زیر-شبکه‌ای ناهمواری‌ها، منجر به کم‌برآوردی شدید $rlds$در فلات تبت می‌شود.

این حساسیت به توپوگرافی و الگوهای گردش جوی، در پژوهش‌های جدیدتر با وضوح بیشتری تبیین شده است. Wang et al. (2026a) با بررسی تاوه غرب تبت (WTV) اثبات کردند که الگوهای گردش منطقه‌ای از طریق واداشت تابشی ابر (CRF)، شار $rsds$و متغیرهای حرارتی سطح را به شدت تعدیل می‌کنند. به موازات آن، در عرض‌های جغرافیایی بالا

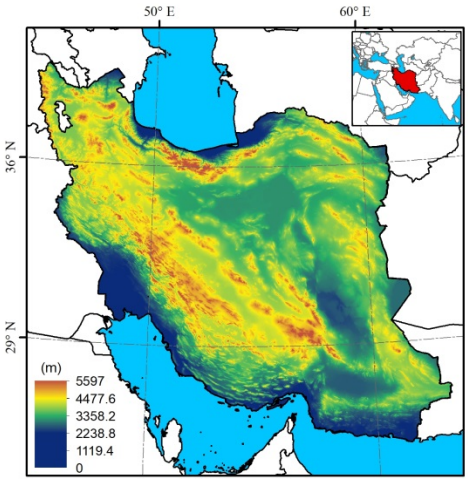
نیز Lubin et al. (2026) نشان دادند کـه تغییـرات در الگوهای گردش بـزرگ‌مقیـاس (ماننـد رودخانـه‌هـای جوی)، مسیر آب مـایع ابرهـا را تغییـر داده و موجـب کاهش تابش خالص در اواخـر تابسـتان قطـب شـمال شده است. این یافته‌ها اهمیت تلفیق دینامیـک جـوی با توپوگرافی محلی را بـرای منـاطق کوهسـتانی ایـران دوچندان می‌کند.

با وجود پیشرفت در تفکیـک مؤلفـه‌هـای تابشـی، دستیابی به مجموعه داده‌هایی که اصل بقای انـرژی را در سطح حفظ کننـد، همـواره چالشـی اساسـی بـوده است. Wang et al. (2026b) با توسعه مـدل CoSEB، نخسـتین مجموعـه داده جهـانی مبتنـی بـر داده‌هـای مشاهداتی (۲۰۲۰–۲۰۰۰) را ارائـه کردنـد کـه در آن خطای عدم توازن تابشی و انرژی به صفر رسیده اسـت ($RIR = 0$ و $EIR = 0$). این مدل با تلفیـق داده‌هـای سنجش از دور و یادگیری ماشین، توانسته است دقـت برآورد شارهایی نظیر تابش خالص (Rn)، شـار گرمـای نهان (LE) و شار گرمای محسوس (H) را ارتقا دهد.

مرور منابع نشان می‌دهد که درک اقلیم‌شناسـی از واداشت تابشی از برآوردهای ساده خطی فراتـر رفتـه و نیازمند تحلیل بـرهم‌کـنش‌هـای پیچیـده و غیرخطـی میان هواویزهـا، بخـار آب و توپـوگرافی اسـت. اگرچـه CMIP6 در شبیه‌سازی تابش‌های فرودی مـوج کوتـاه ($rsds$) و مـوج بلنـد ($rlds$) پیشـرفت قابـل تـوجهی داشته‌اند، اما در مناطقی با توپوگرافی پیچیده، استفاده از روش‌هـای ارزیـابی دقیـق و رویکردهـای همـادی همچنان یک ضرورت اجتنـاب‌ناپـذیر اسـت. بـا وجـود اهمیت حیاتی توازن انرژی سطحی در اقلـیم خشـک و نیمـه‌خشـک ایـران کـه بـه شـدت بـا چـالش‌هـای هیـدرولوژیک و بحـران منـابع آب مواجـه اسـت، یـک شکاف مطالعاتی عمیق در ادبیات پژوهشـی کشـور بـه چشم مـی‌خـورد کـه ضـرورت ایـن تحقیـق را آشـکار می‌سازد؛ به طوری که تاکنون فقدان یک مطالعه جامع که به پیش‌نگری توأمان شارهای تابشی بر اساس ایـن مدل‌های گردش کلی بپـردازد، کـاملاً مشـهود بـوده و همین عدم شناخت از نـاترازی تابشـی، ارزیـابی سـایر متغیرهای اقلیمی همانند پتانسیل تبخیـر-تعـرق را بـا عدم‌قطعیت‌های جدی مواجه می‌سازد. در پاسخ به این نیاز علمی، نوآوری و وجه افتراق اصلی این تحقیق کـه باعث ارجحیت آن نسـبت بـه مطالعـات پیشـین شـده است، در اتخـاذ یـک رویکـرد یکپارچـه بـرای بررسـی هـم‌زمـان $rsds$ و $rlds$ جهـت ارزیـابی جـامع بـیلان خالص انرژی، کاهش عـدم‌قطعیـت‌هـای سـاختاری از طریق ایجاد میـانگین همـادی چندمـدلی (MMEM) تحـت سـناریوهای جدیـد و همچنـین تبیـین دقیـق سـازوکارهای فیزیکـی و ترمودینـامیکی نظیـر اثـر گرمـایش تروپوسـفری، بـازخورد بخـار آب در نـواحی ساحلی و نقش تعدیل‌کنندگی ارتفاعـات نهفتـه اسـت. بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش، ارزیـابی و بازتولیـد شارهای تابشی، شناسایی علل فیزیکی محرک آن‌هـا و ارائه چشم‌اندازی قابل‌اتکا از بیلان انرژی سطحی بـرای مدیریت پیامدهای تغییر اقلیم در ایران است.

داده و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه: منطقـه مـورد مطالعـه در ایـن پژوهش کشور ایـران اسـت کـه بـه دلیـل توپـوگرافی پیچیـده و منـاطق وسـیع کوهسـتانی، جغرافیـایی چالش‌برانگیز اما ضروری برای ارزیابی شارهای تابشـی محسوب می‌شود (شکل ۱). ناهمواری‌های سـطحی در کشور تأثیرات زیادی بر توزیع مکـانی و زمـانی تـابش موج بلند فـرودی (rlds) دارنـد. از ایـن‌رو، انجـام ایـن تحقیـق در مقیـاس ایـران نـه‌تنهـا پاسـخی بـه خـلأ مطالعاتی موجود، بلکه گـامی ضـروری جهـت کـاهش عدم قطعیت‌ها و ارائه پیش‌نگری‌هـای قابـل‌اتکـا بـرای مدیریت منابع آب و انرژی است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ایران

داده‌های تحقیق

پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اثرات میان‌بخشی (ISIMIP[1]): در این پژوهش از داده‌های مدل‌های گردش کلی جهت بررسی وضعیت دوره تاریخی پیش‌نگری آینده، بر مبنای پروتکل فاز سوم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اثرات میان‌بخشی (ISIMIP3b) استفاده شد. این پروتکل با فراهم آوردن مجموعه‌ای منسجم از داده‌ها، ارزیابی دقیق اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و سیستم‌های وابسته را میسر می‌سازد. داده‌های پایه اقلیمی مورد نیاز، موسوم به وداشت‌های مرتبط با اقلیم (CRFs)، مستقیماً از خروجی‌های شبیه‌سازی فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) استخراج شده‌اند (Frieler et al., 2025). در این تحقیق دو متغیر کلیدی بیلان تابشی شامل تابش موج بلند فرودی سطح (rlds) و تابش موج کوتاه فرودی سطح (rsds) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های ساختاری در پیش‌نگری‌های اقلیمی، از داده‌های پنج GCM منتخب شامل مدل‌های GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی استفاده شد. انتخاب این پنج مدل بر اساس معیارهای سه‌گانه پروژه ISIMIP صورت پذیرفته است. نخستین معیار، قابلیت مدل‌ها در پوشش طیف وسیعی از آینده‌های محتمل بوده است تا اطمینان حاصل شود که عدم قطعیت‌های موجود از سناریوها در تحلیل‌ها لحاظ می‌شود. دومین معیار، در دسترس بودن شبیه‌سازی‌های مدل با متغیرهای ضروری برای مدل‌سازی اثرات، به‌ویژه متغیرهای rlds و rsds بوده است. معیار سوم و کلیدی، توانایی این مدل‌ها در ارائه شبیه‌سازی خط پایه طولانی‌مدت برای شرایط پیش از انقلاب صنعتی است؛ چرا که وجود این داده‌ها برای برآورد دقیق رخدادهای اقلیمی فرین ضروری است (Frieler et al., 2025). متغیرهای rlds و rsds، تحت فرآیندهای دقیق تصحیح اریبی قرار گرفته تا اریبی آن‌ها نسبت به مشاهدات به حداقل رسیده و برای پیش‌نگری مناسب باشند.

شایان ذکر است که با توجه به محدودیت‌های موجود در شبکه پایش زمینی و فقدان داده‌های اندازه‌گیری شده برای دو متغیر کلیدی تابش موج بلند فرودی (rlds) و تابش موج کوتاه فرودی (rsds) در کشور، این پژوهش منحصراً بر پایه داده‌های خروجی مدل انجام شده است. با این حال، درستی و قابلیت اطمینان این داده‌ها از آنجا ناشی می‌شود که خروجی‌های پروژه ISIMIP3b تحت فرآیندهای بسیار دقیق و پیشرفته تصحیح اریبی قرار گرفته‌اند. اعمال این روش‌ها سبب شده است که خطاهای سیستماتیک مدل‌ها به شدت کاهش یافته و داده‌های نهایی از

[1] The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)

اریبی بسیار پایینی برخوردار باشند (Frieler et al., 2025). این ویژگی باعث شده است که از این داده‌ها به عنوان جایگزینی معتبر و کارآمد در مناطق فاقد داده‌های مشاهداتی استفاده شود.

روش تحقیق

این پژوهش بر پایه تحلیل داده‌های شبیه‌سازی شده از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) انجام شده است تا تغییرات آتی مؤلفه‌های تابشی، به‌ویژه دو متغیر تابش موج کوتاه فرودی (rsds) و تابش موج بلند فرودی (rlds) را مورد ارزیابی قرار دهد. متغیر rsds به عنوان متغیر کلیدی، دربرگیرنده مجموع مؤلفه‌های مستقیم و پراکنده تابش خورشیدی ورودی است. ارزیابی تغییرات آینده تحت دو سناریو اجتماعی-اقتصادی (SSP) انجام شد تا طیفی از شرایط محتمل آینده را پوشش دهند. سناریوی SSP2-4.5به‌عنوان سناریوی میانه با واداشت تابشی ۴/۵ وات بر متر مربع است. این سناریو رشد اقتصادی متعادل و الگوهای میانه کاربری اراضی را منعکس می‌کند که انتظار می‌رود منجر به تغییراتی با شیب کمتری درrsds گردد. سناریوی SSP5-8.5 به عنوان انتشار بالا که با واداشت تابشی ۸/۵ وات بر متر مربع تا سال ۲۱۰۰ مشخص می‌شود، مشابه سناریو RCP8.5بوده و نمایانگر آینده‌ای مبتنی بر رشد سریع اقتصادی و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی است.

به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ساختاری موجود در مدل‌های منفرد و ارائه پیش‌نگری‌های قابل‌اطمینان‌تر، یک چند مدلی بر اساس میانگین همادی (MMEM[1]) از پنج مدل منتخب تولید شد. در انتخاب اعضای مدل، از هر مدل تنها یک عضو (عضو نخست r1i1p1f1) استفاده شده است. این تصمیم بر این واقعیت علمی استوار است که عدم قطعیت و پراکندگی بین‌مدلی[2] به مراتب بزرگتر از پراکندگی درون‌عضوی[3] است؛ لذا افزودن اعضای بیشتر تأثیر معناداری بر نتایج نهایی نخواهد داشت (Lehner et al. 2020). دوره زمانی تاریخی در این تحقیق ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و دوره پیش‌نگری سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت دو سناریو حدواسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) انتخاب شده است. برای تحلیل دقیق‌تر وضعیت دو متغیر مورد بررسی در کشور بی‌هنجاری برای دوره‌ها و سناریوهای مورد بررسی محاسبه و برای دورن‌یابی نیز از روش استاندارد درون‌یابی دوخطی[4] استفاده شد. بر این اساس داده‌ها به تفکیک افقی ۰/۱ درجه قوسی برای نمایش بهتر توزیع فضایی تبدیل شدند. این روش یکی از رویکردهای پذیرفته‌شده و متداول در پردازش داده‌های اقلیمی محسوب می‌شود (Sharmila et al., 2015).

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های حاصل از شبیه‌سازی تاریخی چندمدلی همادی CMIP6 ناهمگنی‌های قابل‌توجهی را در توزیع مکانی مؤلفه‌های بیلان تابشی سطح در پهنه ایران آشکار می‌سازد. بررسی میانگین‌های فضایی نشان‌دهنده یک گرادیان معکوس میان دو متغیر تابش موج بلند فرودی ($rlds$) و تابش موج کوتاه فرودی ($rsds$) است که تحت کنترل توپوگرافی پیچیده و رژیم‌های رطوبتی جوی قرار دارد. این یافته‌ها در زمینه تاثیر ساختارهای فضایی و ارتفاعی بر پاسخ‌های بیلان تابشی سطح، نتایج مطالعه Dai et al., (2026) را تایید می‌کند و همچنین همسو با پژوهش Wang et al., (2026a) نشان می‌دهد که چگونه شرایط رطوبتی و پوشش ابر، گرادیان و تضاد قابل‌توجهی در مؤلفه‌های تابش فرودی ایجاد می‌کند.

در خصوص تابش موج بلند فرودی ($rlds$)، مقادیر بیشینه در بازه ۳۰۰ تا ۳۵۰ وات بر متر مربع (W/m^2) در سواحل جنوبی (خلیج فارس و دریای عمان) و نواحی شمال غربی مشاهده می‌شود. این الگوی توزیع مکانی، همبستگی مستقیمی با شار

[1] Multi-Model Ensemble Mean (MMEM)
[2] Inter-model spread
[3] Inter-ensemble spread
[4] Bilinear Interpolation

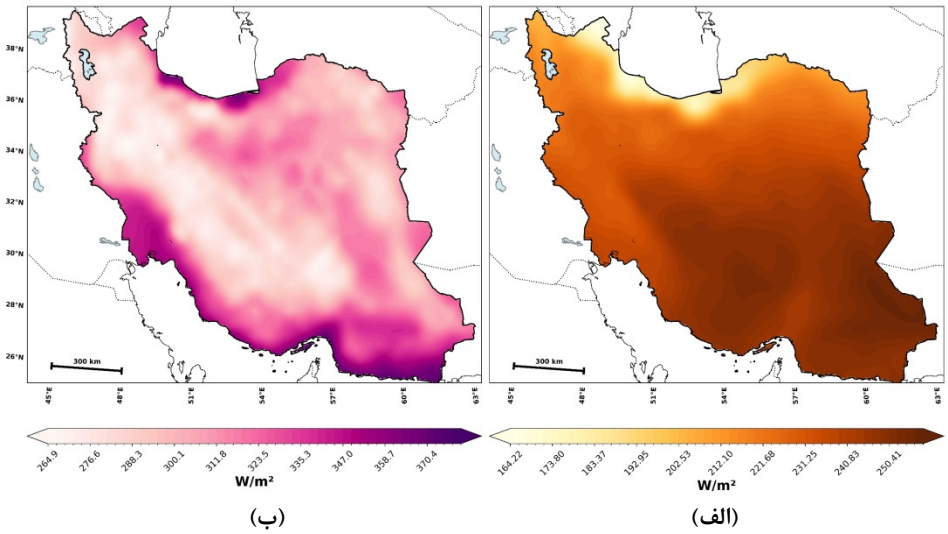
رطوبت جوی و دمای مؤثر جو (T_{atm}) دارد که مطابق با رابطه استفان-بولتزمن برای گسیلندگی جوی ($RLDS \approx \epsilon\sigma T_{atm}^4$) قابل تفسیر است. این ارتباط مستقیم میان شار رطوبت جوی و افزایش تابش موج بلند، همسو با و در تایید نتایج Lubin et al., (2026) است که نشان دادند انتقال رطوبت، شار آب جوی و گرمایش تروپوسفر پایینی نقش پیشران و محرک اصلی را در افزایش شار تابش موج بلند فرودی ایفا می‌کنند.

در مقابل، هسته مرکزی فلات ایران و دشت کویر، با نمایش مقادیر کمینه در دامنه ۲۰۰ تا ۲۵۰ وات بر متر مربع، بیانگر یک محیط شفاف و خشک با گسیلندگی پایین جوی است (شکل ۲). این سازوکار که در آن محیط‌های خشک و آسمان‌های صاف با پوشش ابری حداقل، منجر به کاهش تابش موج بلند و تغییر الگوی بیلان تابشی سطح می‌شوند، با یافته‌های Wang et al. (2026a) در خصوص فرآیندهای تابشی آسمان شفاف و تاثیر آن بر اقلیم سطح به خوبی مطابقت دارد.

در تحلیل تابش موج کوتاه فرودی ($rsds$)، نقش واداشت‌های کوهساری و بار هواویزها به عنوان عوامل کنترل‌کننده اصلی نمود پیدا می‌کند. نواحی مرتفع شمالی و غربی (رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس با ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر)، مقادیر کمتری از تابش خورشیدی را در بازه ۱۵۰ تا ۲۰۰ وات بر متر مربع دریافت می‌کنند. این کاهش شار تابشی، ناشی از دو سازوکار هم‌افزا است. نخست، ابرپوششی ناشی از صعود مکانیکی هوا و دوم، تضعیف تابش توسط هواویزهای ناشی از گردوخاک بیابانی با منشأ منطقه‌ای که می‌تواند ضریب خاموشی را افزایش داده و شار ورودی را کاهش دهد. در تضاد با نواحی کوهستانی، پهنه‌های کم‌ارتفاع جنوب شرقی (سیستان و مکران) و بخش‌های مرکزی، بیشینه مقادیر $rsds$ را در بازه ۲۵۰ تا ۳۰۰ وات بر متر مربع نشان داده‌اند. این کانون ناشی از آسمان صاف، عرض جغرافیایی پایین‌تر (نزدیکی به استوا) و کاهش ابرناکی است.

بررسی نسبت‌های تابشی ($rsds/rlds$) گذار فاز اقلیمی از رژیم‌های رطوبت‌محور به خشکی‌محور را تایید می‌کند. این نسبت در سواحل جنوبی حدود ۰/۸ وات بر متر مربع محاسبه شده است که نشان‌دهنده غلبه تابش موج بلند و اثر گلخانه‌ای بخار آب است، در حالی که در فلات مرکزی این نسبت به حدود ۱/۲ وات بر متر مربع می‌رسد که حاکی از تسلط تابش خورشیدی و بازخورد سپیدای سطحی در محیط‌های نیمه‌بیابانی است. بررسی دقیق‌تر در مقیاس‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که اثر عرض جغرافیایی منجر به کاهش هر دو شاخص تابشی به مقدار ۵ تا ۱۰ وات بر متر مربع به ازای هر ۵ درجه افزایش عرض جغرافیایی می‌شود، اما نقش ارتفاع در مدولاسیون $rsds$ روشن‌تر است؛ به طوری که در ارتفاعات زاگرس، به ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع، کاهشی معادل ۱۰ درصد در تابش دریافتی رخ می‌دهد (شکل ۲).

توزیع منطقه‌ای دو متغیر کلیدی واداشت تابشی در پهنه‌های اقلیمی ایران، ناهمگونی‌های منطقه‌ای را نشان می‌دهد. در پهنه خزری و دامنه شمالی البرز، ترکیب ابرناکی بالا و رطوبت خزری، $rlds$ متوسط (۲۲۰-۲۸۰ W/m^2) و $rsds$ پایین را رقم زده است. در شمال غرب و زاگرس شمالی، ادغام سامانه‌های مرطوب و اثر کوهستان، مقادیر بالای $rlds$ (تا ۳۲۰ W/m^2) و مقادیر متوسط تا پایین $rsds$ را ایجاد کرده است. در پهنه جنوب غربی و خلیج فارس، همگرایی رطوبت بالا و زاویه تابش عمودتر، منجر به ثبت بالاترین بیشینه $rlds$ (۳۲۰-۳۵۰ W/m^2) و مقادیر متوسط $rsds$ شده است (شکل ۲). در نهایت، پهنه جنوب شرقی به دلیل دوری از منابع آلودگی غربی و قرارگیری در موقعیت مکانی پایین‌تر، بالاترین پتانسیل تابش خورشیدی ($rsds$ تا ۳۰۰ W/m^2) را همزمان با $rlds$ قابل توجه ناشی از جریان‌های موسمی نشان می‌دهد. این توزیع پیچیده تابشی پیامدهای هیدرولوژیکی عمیقی برای نرخ تبخیر-تعرق و بیلان انرژی سطحی در دهه‌های آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم خواهد داشت.

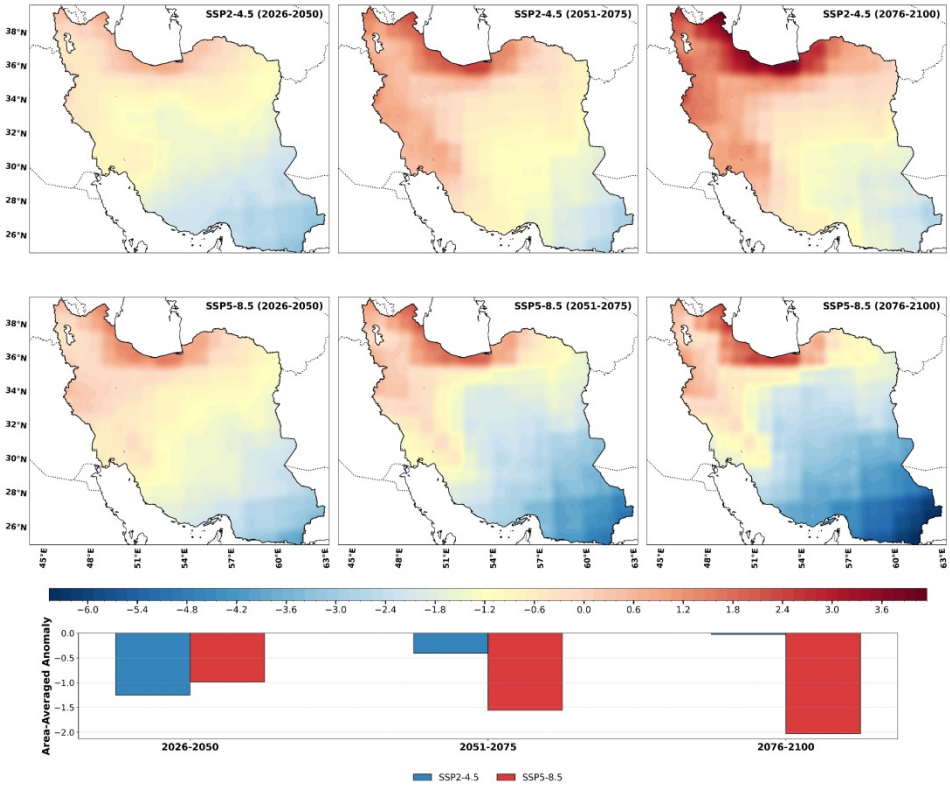


شکل ۲. اقلیم‌شناسی شارهای تابشی فرودی سطح در ایران بر اساس چند مدلی همادی طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰). الف) تابش موج بلند فرودی $(rlds)$ و ب) تابش موج کوتاه فرودی $(rsds)$ نشان می‌دهند. (واحد: وات بر متر مربع (Wm^{-2})).

تحلیل بی‌هنجاری تابش موج کوتاه فرودی (rsds): تحلیل فضایی-زمانی بی‌هنجاری تابش موج کوتاه فرودی (rsds) در ایران، بیانگر تغییرات قابل‌توجهی در بودجه انرژی تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) است. بررسی چند مدلی همادی CMIP6 نشان می‌دهد که روند غالب در بیش‌تر پهنه‌های ایران افزایشی است، هرچند ناهمگنی‌های منطقه‌ای ناشی از توپوگرافی و دینامیک‌های محلی جوی، الگوهای متمایزی را در نواحی ساحلی و کوهستانی ایجاد کرده‌اند. شدت این بی‌هنجاری‌ها تابعی مستقیم از سناریوی انتشار و دوره زمانی است. در مقیاس کلی، الگوهای زمانی حاکی از یک شیب افزایشی در دریافت انرژی خورشیدی است. در دوره آینده نزدیک، بی‌هنجاری‌های مثبت در نواحی داخلی و شرقی بین ۱+ تا ۳+ وات بر مترمربع در نوسان است که این امر ناشی از کاهش احتمالی پوشش ابر و تغییرات در رژیم رطوبتی جو می‌باشد (شکل ۳). با گذار به دوره‌های آینده میانی و دور، واگرایی میان سناریوها آشکارتر می‌شود؛ در حالی که تحت سناریوی میانه (SSP2-4.5) بی‌هنجاری‌ها با روندی ملایم به ۲+ تا ۴+ وات بر مترمربع می‌رسند، سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) جهش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در این سناریو، به دلیل گرمایش شدیدتر جو و کاهش رطوبت نسبی، مقادیر بی‌هنجاری در نواحی شرق و جنوب کشور به اوج خود، یعنی بازه ۴+ تا ۶+ وات بر مترمربع، می‌رسد که نشان‌دهنده تغییرات اساسی در بیلان تابشی کشور است.

تحلیل منطقه‌ای نشان‌دهنده تقابل شدید میان نواحی داخلی خشک و نوار ساحلی شمالی است. سواحل جنوبی دریای خزر به عنوان یک استثنای اقلیمی، در تمامی دوره‌ها و سناریوها بی‌هنجاری‌های منفی (۲- تا ۴- وات بر مترمربع) را تجربه می‌کنند. این پدیده را می‌توان به تشدید چرخه محلی تبخیر-تراکم و افزایش ابرناکی ناشی از رطوبت دریا در یک جو گرم‌تر نسبت داد که موجب تضعیف تابش ورودی می‌شود؛ الگویی که در انتهای قرن تحت SSP5-8.5 به بیشترین حد تضعیف (۴- وات بر مترمربع) می‌رسد (شکل ۳). در نقطه مقابل، سواحل خلیج‌فارس و دریای عمان تحت تأثیر شرایط پایدار جوی در عرض‌های جنب‌حاره‌ای و کاهش پوشش ابر، بی‌هنجاری‌های مثبت زیادی را نشان می‌دهند. بیشترین مقدار افزایش تابش فرودی در دشت‌های مرکزی و کویرهای شرقی (مانند دشت کویر و لوت) مشاهده می‌شود. در این نواحی، خشکی شدید ذاتی، کاهش بخار آب قابل بارش که منجر به کمترین تضعیف تابش می‌شود و

افزایش سپیدایی سطحی ناشی از خشکیدگی خاک، هم‌افزایی کرده و بی‌هنجاری‌های مثبت را به بیشینه مقدار خود می‌رسانند.

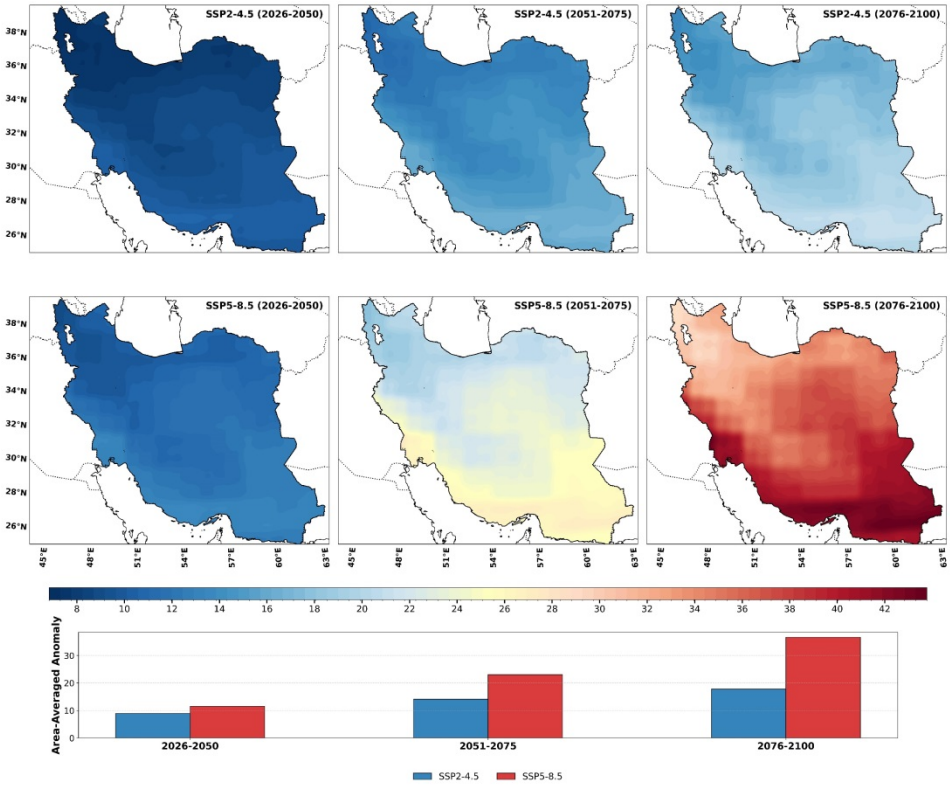


شکل ۳. توزیع فضایی بی‌هنجاری‌های پیش‌نگری‌شده برای تابش موج کوتاه فرودی (rsds) در ایران بر اساس چندی مدلی همادی CMIP6. (واحد: وات بر متر مربع (Wm^{-2}))

تحلیل بی‌هنجاری تابش موج بلند فرودی (rlds): تحلیل چندمدلی CMIP6، تابش موج بلند فرودی (rlds) که تابعی مستقیم از دمای جو و گسیل‌مندی آن می‌باشد ($RLDS \approx \epsilon\sigma T_{atm}^4$)، در هر دو سناریوی واداشت تابشی حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) روندی افزایشی را نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهد؛ این افزایش به دلیل گرمایش تروپوسری و افزایش بخار آب در جو است. در سناریوی SSP2-4.5 و طی دوره آینده نزدیک، توزیع مکانی بی‌هنجاری‌های مثبت تابشی عمدتاً بر پهنه‌های شمالی (نواحی خزر و البرز)، شمال غرب (آذربایجان) و سواحل جنوبی (خلیج فارس) متمرکز است که مقادیری در بازه ۱۰+ تا ۲۰+ وات بر متر مربع را نشان می‌دهند. با این حال، ناهمگونی آشکاری در پاسخ‌دهی مناطق مرتفع مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که در ارتفاعات البرز و زاگرس، به دلیل سازوکارهای بازخورد ابر و پدیده تاریکی (Dimming) وابسته به ارتفاع، نرخ افزایش تابش تعدیل شده و گرادیانی کاهشی معادل تقریبی ۱۰ درصد به ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع را نشان می‌دهد (شکل ۴). در دوره میانی تحت همین سناریو، الگوی مکانی تغییر یافته و یکنواختی بیشتری در فلات مرکزی (دشت کویر و لوت) با بی‌هنجاری‌های ۲۰+ تا ۳۰+ وات بر متر مربع دیده می‌شود، در حالی که ناحیه جنوب شرق (سیستان و مکران) افزایشی ملایم‌تر (حدود ۱۵+ وات بر متر مربع) را تجربه می‌کند. در نهایت، در دوره آینده دور، بیشینه بی‌هنجاری‌ها به نواحی شرقی و عرض‌های پایین جغرافیایی (۲۵ تا ۳۲ درجه شمالی) منتقل شده و در سواحل دریای عمان به اوج ۳۰+ تا ۴۰+ وات بر متر مربع می‌رسد؛ هرچند پایداری شرایط خشک‌تر در

ارتفاعات زاگرس جنوبی منجر به کاهش نسبی شدت این تغییرات در آن مناطق می‌شود.

بررسی سناریوی مبتنی بر توسعه سوخت‌های فسیلی (SSP5-8.5) حاکی از تشدید قابل توجه واداشت‌های تابشی است. در دوره نزدیک، جنوب غرب و مرکز ایران بی‌هنجاری‌های قابل توجهی در بازه ۲۰+ تا ۴۰+ وات بر متر مربع را نشان می‌دهند که بیانگر تقویت رطوبت انتقالی از اقیانوس هند است، هرچند کمینه این تغییرات همچنان در ارتفاعات شمال شرقی البرز (ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر) مشاهده می‌شود. در دوره میانی، اگرچه فلات مرکزی و شمال کشور مقادیر مثبتی تا ۲۰ وات بر متر مربع را حفظ می‌کنند، اما کانون‌های اصلی تغییر به سواحل خلیج فارس و مکران منتقل شده و مقادیر تابش فرودی به ۳۰+ تا ۵۰+ وات بر متر مربع می‌رسد که به شدت متأثر از مؤلفه‌های طول جغرافیایی و ارتفاع پایین منطقه است (شکل ۴).



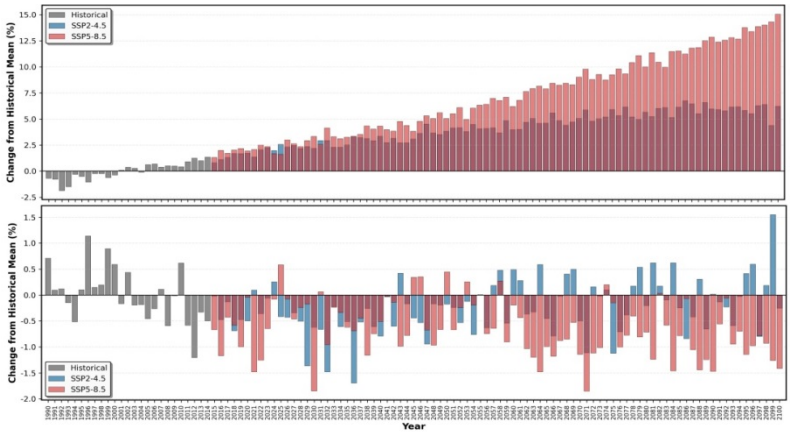
شکل ۴. توزیع فضایی بی‌هنجاری‌های پیش‌نگری‌شده برای تابش موج بلند فرودی (rlds) در ایران براساس چندی مدلی همادی CMIP6. (واحد: وات بر متر مربع (Wm^{-2})).

تحلیل سری زمانی مؤلفه‌های تابشی تحت چند مدلی همادی CMIP : تحلیل دو متغیر کلیدی تابش موج بلند فرودی ($rlds$) و تابش موج کوتاه فرودی ($rsds$) در قیاس با دوره تاریخی، بیانگر تغییرات کلیدی در رژیم تابشی کشور تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است. در این راستا، متغیر $rlds$ در هر دو سناریو روند افزایشی پیوسته‌ای را در متوسط پهنه‌ای کشور نشان می‌دهد (شکل ۵). این روند افزایشی، همبستگی مستقیمی با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و متعاقب آن گرمایش تروپوسفر دارد که منجر به حبس حرارتی بیشتر در لایه‌های زیرین جو، افزایش ظرفیت نگهداری بخار آب (به‌عنوان مؤثرترین گاز گلخانه‌ای طبیعی) و تغییر در ضریب گسیلندگی می‌گردد. این سازوکار، در تایید نتایج به‌دست‌آمده توسط Lubin et al., (2026) است که اثبات نمودند گرمایش تروپوسفر زیرین همراه با افزایش محتوای رطوبتی جو، پیشران‌های اصلی در افزایش شار خالص تابش موج بلند سطح محسوب

می‌شوند. همچنین نقش تغییرات پروفیل قائم حرارتی جو در این فرآیند، همسو با یافته‌های Dai et al., (2026) در زمینه تاثیر الگوهای قائم و پایداری تروپوسفر بر بازخوردهای تابشی است.

بررسی دقیق سری‌های زمانی نشان می‌دهد که تحت سناریوی SSP2-4.5، متوسط پهنه‌ای متغیر $rlds$ در دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب با افزایش ۲/۹ درصد، ۴/۶ درصد و ۵/۸ درصد همراه خواهد بود. این در حالی است که در سناریوی SSP5-8.5، تغییرات به طور قابل‌توجهی تشدید شده و مقادیر افزایش به ترتیب به ۳/۹ درصد، ۷/۶ درصد و در نهایت ۱۲ درصد در انتهای قرن می‌رسد. این افزایش فزاینده در سناریوی SSP5-8.5، ناشی از سطوح بالاتر دی‌اکسید کربن و متان است که چرخه‌های هیدرولوژیکی و بازخوردهای مثبت تابشی را به شدت تقویت می‌کند. مقایسه این نتایج با مشاهدات جهانی که نرخ افزایشی حدود ۰/۶۴ وات بر مترمربع در هر دهه را گزارش کرده‌اند (Tian et al, 2023)، حاکی از آسیب‌پذیری ساختاری و به مراتب بیشتر ایران نسبت به میانگین‌های جهانی است. تحلیل سازوکارهای فیزیکی حاکم نشان می‌دهد که ذخیره حرارتی جو، به‌ویژه در لایه‌های پایینی، نقش پیشران را در نوسانات فصلی $rlds$ ایفا می‌کند (شکل ۵). در سوی دیگر معادله بیلان تابشی، متغیر $rsds$ رفتاری متفاوت و عمدتاً کاهشی را نشان می‌دهد؛ روندی که به‌ویژه در نواحی جنوبی و شرقی ایران مشهود است. این کاهش نشان‌دهنده افزایش ابرناکی و جذب بیشتر تابش خورشیدی توسط بخار آب موجود در جو است. نتایج این تحقیق در زمینه تاثیر افزایش رطوبت و تغییرات دینامیک ابر بر افت تابش موج کوتاه، یافته‌های Wang et al. (2026a) را تایید می‌کند که نشان دادند واداشت تابشی ابر (CRF) چگونه نقش غالبی در تعدیل و کاهش تابش موج کوتاه فرودی (DSW) ایفا می‌کند. اگرچه کاهش هواویزها در آینده می‌تواند به صورت موضعی منجر به افزایش شفافیت جو و تابش ورودی شود، اما در سناریوهای مبتنی بر سوخت فسیلی، اثرات غالب گرمایش جهانی از طریق بارگذاری رطوبتی، موجب تضعیف $rsds$ می‌شود؛ فرآیندی که دقیقاً مطابق با سازوکارهای توصیف‌شده در مطالعه Lubin et al. (2026) برای کاهش تابش موج کوتاه تابستانه است.

بر اساس برآوردهای کمی پژوهش حاضر در سناریوی SSP2-4.5، میانگین پهنه‌ای $rsds$ در سه دوره زمانی مذکور به‌ترتیب ۰/۵ درصد، ۰/۲ درصد و ۰/۰۱ درصد کاهش می‌یابد که بیانگر رسیدن سیستم به یک توازن نسبی در اواخر قرن است. اما تحت سناریوی SSP5-8.5، این روند کاهشی تداوم یافته و مقادیر منفی ۰/۵ درصد، ۰/۷ درصد و ۰/۹ درصد پیش‌نگری می‌شود (شکل ۵). این کاهش در تابش ورودی خورشیدی، مستقیماً ناشی از کاهش سهم تابش آسمان صاف به دلیل تشدید بارگذاری رطوبتی جو در یک اقلیم گرم‌تر است.



شکل ۵. درصد تغییرات سری زمانی تابش موج بلند فرودی (rlds) و تابش موج کوتاه فرودی(rsds) در متوسط پهنه‌ای ایران تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) (واحد: درصد)

نتیجه‌گیری

توزیع منطقه‌ای دو متغیر کلیدی واداشت تابشی، یعنی تابش موج بلند فرودی ($rlds$) و تابش موج کوتاه فرودی ($rsds$)، در پهنه‌های اقلیمی ایران، ناهمگونی‌های قابل توجهی را نشان داده است. این ناهمگونی منطقه‌ای، تأییدکننده‌ی الگوهای فضایی جهانی شارش‌های تابشی سطح زمین است که توسط Wang et al. (2026b) با استفاده از مجموعه داده‌های CoSEB شناسایی شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که این توزیع پیچیده در ایران به طور مستقیم توسط گرادیان‌های رطوبت، ابرناکی و توپوگرافی کنترل می‌شود. در پهنه خزری و دامنه شمالی البرز، ترکیب ابرناکی بالا و رطوبت خزری، $rlds$ متوسط ($220 - 280\ \mathrm{W/m^2}$) و $rsds$ پایین را رقم زده است. این ارتباط معکوس بین ابرناکی و $rsds$، با یافته‌های Wang et al. (2026a) در فلات تبت همخوانی دارد که نشان دادند واداشت تابشی ابر (CRF) عامل اصلی تغییرات تابش موج کوتاه فرودی است.

در شمال غرب و زاگرس شمالی، ادغام سامانه‌های مرطوب مدیترانه‌ای و اثر کوهستان، مقادیر بالای $rlds$ (تا $320\ \mathrm{W/m^2}$) و مقادیر متوسط تا پایین $rsds$ را ایجاد کرده است. در پهنه جنوب غربی و خلیج فارس، همگرایی رطوبت بالا و زاویه تابش عمودتر، منجر به ثبت بالاترین بیشینه $rlds$ ($320 - 350\ \mathrm{W/m^2}$) و مقادیر متوسط $rsds$ شده است. این افزایش $rlds$ در مناطق مرطوب، پدیده‌ای است که در مناطق دیگر جهان نیز مشاهده شده است؛ به عنوان مثال، Lubin et al., (2026) نشان دادند که افزایش بخار آب (PWV) در قطب شمال منجر به روندهای افزایشی مشابهی در شار خالص موج بلند می‌شود. در نهایت، پهنه جنوب شرقی بالاترین پتانسیل تابش خورشیدی ($rsds$ تا $300\ \mathrm{W/m^2}$) را همزمان با $rlds$ قابل توجه ناشی از جریان‌های موسمی را نشان می‌دهد.

بطور کلی نتایج این تحقیق برای کشورهایی با اقلیم‌های مشابه قابل تعمیم است. دلیل این امر آن است که سازوکارهای فیزیکی شناسایی‌شده در این مطالعه مانند تأثیر ابر بر $rsds$، تأثیر بخار آب بر $rlds$ و نقش تعدیل‌کننده توپوگرافی فرآیندهای بنیادین در بیلان انرژی سطح زمین هستند که در مقیاس جهانی عمل می‌کنند. تأیید این فرآیندها در مطالعاتی از مناطق کاملاً متفاوت مانند فلات تبت (Wang et al., 2026a) و قطب شمال (Lubin et al., 2026)، نشان‌دهنده عمومیت این یافته‌ها برای سایر مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و دارای توپوگرافی پیچیده است.

مقایسه تطبیقی سناریوها و دوره‌های زمانی نشان می‌دهد که شدت بی‌هنجاری‌های $rlds$ تابعی از زمان و سناریو است، به‌گونه‌ای که سناریوی SSP5-8.5 در نواحی جنوبی، شدتی بین ۱/۵ تا ۲ برابر سناریوی SSP2-4.5 دارد. همچنین مقایسه آماری $rsds$ نشان می‌دهد که تحت همین سناریو در دوره آینده دور، این نواحی افزایشی معادل ۵ تا ۶ وات بر مترمربع را تجربه خواهند کرد. این پاسخ متفاوت سامانه اقلیمی به سناریوهای مختلف واداشت، یک نمونه منطقه‌ای از مفهومی است که در مقیاس جهانی توسط Bickel et al., (2025) تحت عنوان کارایی واداشت‌های مختلف بررسی شده است؛ بدین معنا که پاسخ دمای سطحی لزوماً با مقدار واداشت تابشی اولیه تناسب خطی ندارد. تحلیل‌های آماری $rlds$ نشان می‌دهد که اگرچه مناطق مرطوب جنوبی به لحاظ بیشینه مطلق، بیشترین افزایش تابش را دارند (با مقادیر تاریخی $320 - 350\ \mathrm{W/m^2}$)، اما مناطق مرکزی ایران با اقلیم غالب خشک و مقادیر کمتر ($200 - 250\ \mathrm{W/m^2}$)، بیشینه بی‌هنجاری نسبی را در دوره‌های آتی تجربه خواهند کرد. این یافته بر اهمیت شرایط اولیه و پس‌زمینه اقلیمی در تعیین حساسیت منطقه‌ای به گرمایش جهانی تأکید دارد، اصلی که با نتایج Dai et al., (2026) همسو است. آن‌ها نشان دادند که ساختار قائم و افقی واداشت تابشی می‌تواند به طور قابل توجهی بازخوردهای اقلیمی و الگوی گرمایش سطحی را تغییر دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که گرادیان افقی اقلیم (خشک در مقابل مرطوب) نیز نقش مشابهی در تعدیل پاسخ تابشی ایفا می‌کند.

نقش تعدیل‌کننده توپوگرافی در تمامی دوره‌ها مشهود است. ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر در البرز و زاگرس به دلیل کاهش $rlds$ پایه و پوشش ابر، کمترین مقدار افزایش $rlds$ (حدود 10+تا 20+وات بر متر مربع) را نشان می‌دهند، در حالی که پهنه‌های ساحلی و فلات‌های کم‌ارتفاع بیشترین حساسیت ترمودینامیکی را به گرمایش جو دارند. این یافته در توافق کامل با مطالعات انجام شده در دیگر مناطق کوهستانی جهان مانند فلات تبت است (Wang et al., 2026a)، که بر نقش حیاتی ارتفاعات در شکل‌دهی به بیلان انرژی سطحی تأکید می‌کنند.

در مجموع، پیش‌نگری‌ها نشان‌دهنده یک روند افزایشی خطی در میانگین انرژی دریافتی سطح است، به طوری که اختلاف میانگین سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده دور نسبت به SSP5-8.5 کاملاً معنادار است. این روند افزایشی در بیلان انرژی سطحی، که پیامدهای قابل‌توجهی برای خشکسالی و تبخیر-تعرق در ایران خواهد داشت، یک نمود منطقه‌ای از پدیده عدم توازن تابشی جهانی است که مطالعات متعددی به دنبال کمی‌سازی دقیق آن در مقیاس‌های مختلف هستند (Wang et al., 2026b; Lubin et al., 2026).

برآیند کلی تغییرات دو مؤلفه $rlds$ و $rsds$ نشان‌دهنده بر هم خوردن توازن تابشی سطح به نفع گرمایش بیشتر است؛ چرا که افزایش قابل‌ملاحظه $rlds$ بر کاهش جزئی $rsds$ غلبه کرده و بیلان خالص انرژی را مثبت می‌کند. این ناترازی تابشی، پتانسیل تبخیر سطحی را تغییر داده و می‌تواند تنش‌های آبی را در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران تشدید نماید. هم‌راستایی نوسانات فصلی مشاهده‌شده با تغییرات ذخیره حرارتی جو، به‌ویژه پیک‌های زمستانی و پاییزه، تأییدکننده نقش مسلط بازخوردهای گرمایی در سناریوهای مقیاس‌بندی شده است. در نهایت، داده‌ها نشان می‌دهند که اگرچه نوسانات $rlds$ در خشکی‌ها توسط لایه مرزی تعدیل می‌شود، اما شدت تغییرات پیش‌نگری‌شده در سناریوی SSP5-8.5 از ظرفیت سامانه اقلیمی ایران فراتر رفته و ضرورت توجه به پیش‌فرض‌های سناریوهای حدواسط مانند SSP2-4.5 را برجسته می‌سازد.

با وجود نتایج به دست آمده، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه است. نخستین محدودیت به عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌های گردش کلی در شبیه‌سازی دقیق خردفیزیک ابرها و اثرات توپوگرافی پیچیده ایران بر بیلان تابشی برمی‌گردد. دومین محدودیت، فقدان شبکه داده‌های مشاهداتی مستقیم (مانند برج‌های شارسنجی یا ایستگاه‌های دقیق تابش‌سنجی) در پهنه‌های مختلف اقلیمی ایران است که ارزیابی و واسنجی دقیق خروجی مدل‌ها را با چالش مواجه می‌کند. علاوه بر این، در این مطالعه نقش بازخوردهای پویای ناشی از تغییرات کاربری اراضی و همچنین اثر مجزای هواویزها (به‌ویژه طوفان‌های گرد و غبار که در اقلیم ایران شایع است) بر متغیرهای $rsds$ و $rlds$ به صورت تفکیک‌شده مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا پیشنهاد ایجاد و توسعه ایستگاه‌های اندازه‌گیری شارهای تابشی در اقلیم‌های نماینده ایران و ترکیب این داده‌های میدانی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تولید مجموعه داده‌های تابشی دقیق‌تر و بومی‌سازی‌شده و لحاظ کردن بازخوردهای هواویزها و کاربری اراضی برای مطالعات آینده ارائه می‌شود. انجام مطالعات حساسیت‌سنجی برای تفکیک سهم واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای از واداشت‌های ناشی از هواویزها و تغییرات پوشش گیاهی از این نظر دارای اهمیت است تا نقش دقیق هر عامل در برهم‌خوردن بیلان انرژی سطح در ایران مشخص شود.

منابع

1. Bartók, B., Wild, M., Folini, D., Lüthi, D., Kotlarski, S., Schär, C., ... & Imecs, Z. (2017). Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. Climate dynamics, 49(7), 2665-2683.

2. Bickel, M., Ponater, M., Burkhardt, U., Righi, M., Hendricks, J., & Jöckel, P. (2025). Contrail cirrus climate impact: From radiative forcing to surface temperature change. *Journal of Climate*, *38*, 1895–1912.
3. Bloch-Johnson, J., Rugenstein, M. A. A., Alessi, M. J., Proistosescu, C., Zhao, M., Zhang, B., … & Gregory, J. M. (2024). The Green's function model intercomparison project (GFMIP) protocol. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 16(2), e2023MS003700.
4. Cesana, G. V., Pierpaoli, O., Ottaviani, M., Vu, L., Jin, Z., & Silber, I. (2024). The correlation between Arctic sea ice, cloud phase and radiation using A-Train satellites. Atmospheric Chemistry and Physics, 24, 7899–7909.
5. Chen, X., Mao, H., Cheng, N., Ma, L., Tian, Z., Luo, Y., ... & Fan, J. (2024). Climate change impacts on global photovoltaic variability. Applied Energy, 374, 124087.
6. Dai, A.-Z., Gregory, J., & Ceppi, P. (2026). Understanding the climate response to different vertical patterns of radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, *53*, e2025GL119138.
7. Dutta, R., Chanda, K., & Maity, R. (2022). Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis. Renewable Energy, 188, 819-829.
8. 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.
9. Frieler, K., Lange, S., Schewe, J., Mengel, M., Treu, S., Otto, C., ... & Lengaigne, M. (2025). Scenario set-up and the new CMIP6-based climate-related forcings provided within the third round of the Inter-Sectoral Model Intercomparison Project (ISIMIP3b, group I and II). EGUsphere, 2025, 1-70.
10. Gu, C., Huang, A., Li, X., & Wu, Y. (2024). The surface downward longwave radiation of the CMIP6 HighResMIP in East Asia offline corrected by the three-dimensional sub-grid terrain longwave radiative effect scheme. Environmental Research Communications, 6(10), 101011.
11. Gutiérrez, C., Somot, S., Nabat, P., Mallet, M., Corre, L., Van Meijgaard, E., ... & Gaertner, M. Á. (2020). Future evolution of surface solar radiation and photovoltaic potential in Europe: investigating the role of aerosols. Environmental Research Letters, 15(3), 034035.
12. Hou, X., Wild, M., Folini, D. S., Kazadzis, S., & Wohland, J. (2021). Climate change impacts on solar power generation and its spatial variability in Europe based on CMIP6. Earth System Dynamics Discussions, 2021, 1-24.
13. Hu, R., Zhang, J., Chen, L., Ma, Q., Chen, Z., Wu, S., et al. (2023). Strengthened connections between Arctic sea ice and thermal conditions over the Tibetan Plateau in may after the 2000s. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128(20), e2023JD039122.
14. Jadhav, A. V., & Bhawar, R. L. (2025). Future changes in surface solar radiation over India: A bias-corrected and downscaled assessment of CMIP6 projections for renewable energy planning. Energy and Climate Change, 100213.
15. Lehner, F., Deser, C., Maher, N., Marotzke, J., Fischer, E. M., Brunner, L., ... & Hawkins, E. (2020). Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics*, *11*(2), 491-508.
16. Lubin, D., Zou, X., Mülmenstädt, J., Vogelmann, A., Cadeddu, M., & Zhang, D. (2026). Surface radiation trends at North Slope of Alaska influenced by large-scale circulation and atmospheric rivers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *26*, 295–311.
17. Qin, B., Cao, B., Li, H., Bian, Z., Hu, T., Du, Y., ... & Liu, Q. (2020). Evaluation of six high-spatial resolution clear-sky surface upward longwave radiation estimation methods with MODIS. Remote Sensing, 12(11), 1834.
18. Sharmila, S., Joseph, S., Sahai, A. K., Abhilash, S., & Chattopadhyay, R. (2015). Future projection of Indian summer monsoon variability under climate change scenario: An assessment from CMIP5 climate models. *Global and Planetary Change*, *124*, 62-78.
19. Song, F., Mao, Y., Liu, S., Wu, L., Dong, L., Su, H., ... & Wild, M. (2025). A long-term decline in downward surface solar radiation. National Science Review, 12(3), nwaf007.

20. Wang, J., Li, X.-F., Wang, J., Lai, X., Yang, S., Forsythe, N., & Fowler, H. J. (2025). Evaluation of reanalyzed surface air temperature over the western Tibetan Plateau. Atmospheric Research, 329, 108454.
21. Wang, J., Li, X.-F., Wang, J., Yang, S., & Fowler, H. J. (2026a). Radiative forcing of Western Tibetan Vortex on surface air temperature in spring. *Geophysical Research Letters*, *53*, e2025GL119603.
22. Wang, J., Tang, R., Liu, M., & Li, Z.-L. (2026b). Energy-conservation datasets of global land surface radiation and heat fluxes from 2000–2020 generated by CoSEB. *Earth System Science Data*, *18*, 443–463.
23. Wendisch, M., Brückner, M., Crewell, S., Ehrlich, A., Notholt, J., Lüpkes, C., … & Zeppenfeld, S. (2023). Atmospheric and surface processes, and feedback mechanisms determining Arctic amplification. Bulletin of the American Meteorological Society, 104(1), E208–E242.
24. Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., & Müller, B. (2015). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. Solar Energy, 116, 12-24.
25. Wilson Kemsley, S., Ceppi, P., Andersen, H., Cermak, J., Stier, P., & Nowack, P. (2024). A systematic evaluation of high-cloud controlling factors. Atmospheric Chemistry and Physics, 24(14), 8295-8316.
26. Xu, J., Zhang, X., Feng, C., Yang, S., Guan, S., Jia, K., ... & Zhao, X. (2021). Evaluation of surface upward longwave radiation in the CMIP6 models with ground and satellite observations. Remote Sensing, 13(21), 4464.
27. Xu, J., Zhang, X., Zhang, W., Hou, N., Feng, C., Yang, S., ... & Liang, S. (2022). Assessment of surface downward longwave radiation in CMIP6 with comparison to observations and CMIP5. Atmospheric Research, 270, 106056.
28. Zhang, H., Chu, P. S., He, L., & Unger, D. (2019). Improving the CPC's ENSO forecasts using Bayesian model averaging. Climate Dynamics, 53(5), 3373-3385.
29. Zhou, C., Wang, M., Zelinka, M. D., Liu, Y., Dong, Y., & Armour, K. C. (2023). Explaining forcing efficacy with pattern effect and state dependence. Geophysical Research Letters, 50(3), e2022GL101700.