

Response of Dust Occurrences to Global Warming in Northeastern Iran Using MAIAC Satellite Observations and CMIP6-HighResMIP Simulations

Abbasali Dadashi-Roudbari 

1. Corresponding Author, 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 Article

Article history:
Received 25 April 2026
Received in revised form
31 May 2026
Accepted 6 June 2026
Available online 15 June
2026

Keywords:
aerosol optical depth
(AOD),
CMIP6-HighResMIP
models,
dust storms,
MAIAC algorithm,
northeast of Iran

ABSTRACT

Objective: Northeastern Iran is acutely vulnerable to environmental hazards, a vulnerability largely driven by persistent droughts and widespread land-use changes. Despite this deep-seated ecological sensitivity, the development of robust risk management and hazard mitigation strategies has been severely hindered by a distinct lack of predictive dust simulations. Addressing this critical shortfall, the present study is designed to elucidate exactly how regional dust occurrences respond to global warming. By doing so, we provide a rigorous assessment of future dust emission trajectories under shifting climate conditions.

Methodology: Fundamentally, this research leverages the synergy between remote sensing observations and climate projections derived from the CMIP6-HighResMIP. To effectively monitor and extract aerosol optical depth (AOD) dynamics, we processed the MAIAC satellite product at a fine horizontal resolution of 1,000 meters, spanning the 2001–2025 period. Evaluating the intensity of dust source activities alongside the classification of particulate concentrations required a robust statistical approach. To achieve this, an event frequency index was computed across three distinct thresholds: $AOD \geq 0.25$, $AOD \geq 0.50$, and $AOD \geq 1.0$. Projecting future dust aerosol occurrences for the 2026–2050 period involved extracting simulation data from the CNRM-CM6-1 model outputs, which are governed by the HighResMIP protocol at a 50-km horizontal resolution. Ultimately, to capture internal variability, a multi-member ensemble was generated utilizing three independent realizations of this model.

Results: Topographic gradients and proximity to the transboundary Karakum hotspots directly govern the structural heterogeneity of aerosols across the northeast of Iran. Long-term observational data reveal that the aerosol optical depth (AOD) fluctuates between 0.05 and 0.43. The eastern maxima cores, recording historical values from 0.23 to 0.43, are currently experiencing positive upward trends of up to 0.12 per decade. In stark contrast, mountainous terrain acts as an aerodynamic shield that effectively suppresses these concentrations to a significantly lower range of 0.05 to 0.14. Background event frequencies within the eastern cores are 22.7% to 38.7%. When extreme storm thresholds are breached, aerosol generation across the central zones abruptly ceases, confining particle production strictly to the eastern border focal points at a peak of 14%. Historical multi-member ensemble simulations estimate a narrower mean AOD bracket of 0.13 to 0.21, with a dampening effect primarily driven by sub-grid smoothing artifacts. The future projection shows a substantial amplification in aerosol loading along the northeastern corridor, at a rate of between 27.7% and 30.64%. Conversely, anticipated growth throughout the western sectors remains heavily marginalized, restricted to a mere 1.33% to 4.27%.

Conclusions: According to the results, the increasing trend of aerosol optical depth (AOD) is fundamentally rooted in thermodynamic shifts, driven by soil moisture depletion and a depressed threshold for wind friction velocity. As aerosols accumulate, their resulting thermal loading disrupts the radiative equilibrium between the surface and the atmosphere. This dynamic cools the ground while simultaneously warming the upper atmosphere. The static stability induced by such a temperature inversion ultimately stifles convective precipitation. To preserve the resilience of regional food security against these cascading impacts, policy frameworks must prioritize climate adaptation strategies anchored in integrated soil and water management. Parallel to these domestic efforts, proactive environmental diplomacy remains essential to mitigate and stabilize transboundary dust emission hotspots.

Cite this article: Dadashi-Roudbari, A. (2026). Response of Dust Occurrences to Global Warming in Northeastern Iran Using MAIAC Satellite Observations and CMIP6-HighResMIP Simulations. *Journal of Environmental Studies*, 52 (1), 127-147. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.412890.1008688>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/jes.2026.412890.1008688>

Introduction

Driven predominantly by anthropogenic activities, global warming and broader climate change have fundamentally altered atmospheric and environmental conditions on a planetary scale. Such shifts manifest most acutely in arid and semi-arid environments. Within these vulnerable zones, a complex interplay of rising temperatures, shifting precipitation regimes, and altered wind dynamics continuously dictates the frequency and severity of dust events. Constituting roughly half of the tropospheric aerosol mass burden, dust particulate matter stands as a critical atmospheric pollutant that substantially modifies Earth system dynamics. Beyond simply absorbing and scattering solar radiation, these suspended particles function as cloud condensation nuclei (CCN), thereby fundamentally restructuring cloud optical properties and the broader Earth-atmosphere energy budget. Despite being acutely susceptible to environmental degradation, recurrent droughts, and extensive land-use modifications, northeastern Iran—particularly the Khorasan Razavi province—suffers from a notable research gap regarding the precise projection of future dust occurrences. There is a conspicuous absence of comprehensive literature capable of meaningfully bridging high-resolution observational data with advanced climate simulations across this complex topography. Deciphering exactly how atmospheric dust dynamics respond to climate shifts in this locale remains indispensable for formulating robust risk management and hazard mitigation frameworks.

Motivated by this critical imperative, the current research sets out to resolve a pivotal question: How will dust events across northeastern Iran respond to global warming? To investigate this, aerosol optical depth (AOD) dynamics were first assessed over a historical period (2001–2025) using advanced MAIAC satellite retrievals at a fine spatial resolution of 1000 meters. Following this historical evaluation, future simulation (2026–2050) were projected utilizing state-of-the-art CMIP6-HighResMIP simulations. To rigorously quantify and categorize the severity of these events, we applied a standardized threshold-based frequency of occurrence (FOO) methodology. Under this analytical framework, values of $AOD \geq 0.25$ denote weak events or baseline background pollution. Readings of $AOD \geq 0.5$ signify moderate episodes that noticeably degrade horizontal visibility, whereas $AOD \geq 1.0$ serves as the benchmark for severe and extreme dust storms.

Method

Methodologically, this study is anchored in the strategic synergy between empirical remote sensing observations and predictive outputs from the CMIP6-HighResMIP project. To accurately monitor and retrieve aerosol optical depth (AOD) dynamics, high-resolution MAIAC satellite products—mapped to a fine 1000-m spatial grid—were processed over a historical period extending from 2001 to 2025. The intensity of dust source activation and the subsequent categorization of particulate mass concentrations were rigorously quantified using the frequency of occurrence (FOO) metric. This classification was executed across three distinct severity thresholds: $AOD \geq 0.25$, $AOD \geq 0.50$, and $AOD \geq 1.0$. Shifting to future projections (2026–2050), the study extracted simulated atmospheric dust aerosol data from the CNRM-CM6-1 model, which operates within the broader CMIP6-HighResMIP protocol at a 50-km horizontal resolution. Recognizing the inherent uncertainties that typically accompany standalone climate modeling, we constructed a robust multi-member ensemble. By integrating three fully independent realization runs of the CNRM-CM6-1 model, this ensemble approach systematically constrains predictive variance and ensures greater reliability in simulating the future dust event trajectories.

Results

The spatial distribution of aerosol optical depth (AOD) across northeastern Iran is characterized by severe heterogeneity, a pattern largely governed by steep topographic gradients and intricate atmospheric dynamics. Extracted via the MAIAC algorithm, the long-term mean AOD for the historical baseline (2001–2025) fluctuates within a range of 0.05 to 0.43. Zones of maximum aerosol loading, exhibiting values between 0.23 and 0.43, are heavily concentrated along the eastern and southeastern territorial strips, encompassing the Sarakhs, Saleh Abad, Torbat-e Jam, Taybad, and Khaf counties. This localized intensification is a direct consequence of the region's geographical proximity to major transboundary dust hubs namely, the Karakum Desert and the arid plains of Afghanistan. When coupled with the dominant Levar (120-day) wind transport corridors, these conditions maximize the emissive potential of particulate matter from desiccated playa beds. Consequently, atmospheric loads in these areas persistently hover around the baseline pollution threshold ($AOD \geq 0.25$), demonstrating a substantial propensity to rapidly escalate into moderate dust episodes ($AOD \geq 0.5$).

The CMIP6-HighResMIP simulation for 2026–2050 indicates a ubiquitous, relative increase in AOD across the entire study area, with positive shifts ranging from 1.33 to 30.64% relative to historical levels. The climate system's most aggressive response to global warming is anticipated in the region's extreme northeast, where aerosol loading is projected to leap from 27.7 to 30.64%. Adjacent geographical zones will also endure substantial surges: the east-northeast belt is modeled to experience increases from 21.9 to 27.7%, while the broader eastern and southeastern sectors will face escalations of 15 to 21.9%. In stark contrast, the western and central domains demonstrate the lowest sensitivity to future climate shifts, with anticipated variances oscillating between 1.33 and 10.1%. Within the innermost central core, these projected increments are constrained to a mere 1.33 to 4.27%.

Underpinning these alarming future trends is the overarching exacerbation of regional desertification. Driven primarily by severe soil moisture depletion, the critical wind velocity threshold required to initiate aeolian erosion is drastically lowered. Concurrently, fundamental shifts in atmospheric circulation mechanisms inherently enhance the regional capacity to transport particles from transboundary dust sources particularly across higher northern latitudes thereby triggering and sustaining highly potent positive feedback loops.

Conclusions

According to the results, the increasing trend of the AOD index is fundamentally rooted in thermodynamic alterations, which are primarily triggered by depleted soil moisture and a lowered wind friction velocity threshold. As airborne particulate concentrations intensify, the resultant thermal loading heavily disrupts the surface-atmosphere radiative equilibrium. This dynamic induces notable cooling at the surface while simultaneously warming the upper atmospheric strata. Engineered by such thermal inversions, the ensuing static stability actively suppresses convective precipitation mechanisms. Ultimately, this self-reinforcing positive feedback threatens to place the region's agricultural ecosystems under severe, unrelenting environmental stress.

Author Contributions

Abbasali Dadashi-Roudbari designed the research and conducted the data analysis, and wrote the paper.

Data Availability Statement

The model output data from CMIP6-HighResMIP were downloaded from <https://esgf-node.llnl.gov>, and the MAIAC data were obtained from <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/maiac>.

Acknowledgements

I acknowledge the World Climate Research Programme, which, through its Working Group on Coupled Modelling, coordinated and promoted CMIP6. I thank the climate modelling groups for producing and making available their model output, the Earth System Grid Federation (ESGF) for archiving the data and providing access, and the multiple funding agencies who support CMIP6 and ESGF. I also thank the developers of the Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) algorithm.

Ethical Considerations

The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط‌شناسی

شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

پاسخ رخدادهای گردوخاک به گرمایش جهانی در پهنه شمال شرق ایران با بهره‌گیری مشاهدات ماهواره‌های MAIAC و شبیه‌سازی CMIP6-HighResMIP

عباسعلی داداشی رودباری^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: a-dadashi@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

چکیده

هدف: شمال شرق ایران به واسطه خشکسالی‌های متوالی و تغییر کاربری اراضی، آسیب‌پذیری شدیدی در برابر مخاطرات محیطی دارد. علیرغم این حساسیت بوم‌شناختی، فقدان شبیه‌سازی‌های آینده گردوخاک، تدوین راهبردهای کاهش مخاطره و مدیریت ریسک را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است. در پاسخ به این ضرورت، پژوهش حاضر با هدف تبیین پاسخ رخدادهای گردوخاک به پدیده گرمایش جهانی در این پهنه انجام شده تا این انتشار رخداد گردوخاک تحت شرایط تغییر اقلیم به‌طور دقیق ارزیابی شود.

روش پژوهش: این پژوهش بر پایه هم‌افزایی داده‌های سنجش از دور و برون‌دادهای چارچوب پروژه CMIP6-HighResMIP استوار است. جهت پایش و استخراج عمق نوری هواویزها (AOD)، محصول ماهواره‌های MAIAC با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ مورد پردازش قرار گرفت. شدت فعالیت چشمه‌های گردوخاک و طبقه‌بندی غلظت ذرات، از طریق محاسبه شاخص فراوانی رخداد تحت سه آستانه $AOD \geq 0.25$ ، $AOD \geq 0.50$ و $AOD \geq 1.0$ پیاده‌سازی شد. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط آینده (۲۰۲۶-۲۰۵۰) رخدادهای هواویز گردوخاک از خروجی مدل CNRM-CM6-1 تحت پروژه CMIP6-HighResMIP با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر استخراج شد. سپس، یک همادی چند عضوی متکی بر سه گونه اجرای مستقل این مدل تولید شد.

نتایج: ناهمگنی ساختاری هواویزها در شمال شرق ایران مستقیماً از گرادبان‌های توپوگرافیک و مجاورت با کانون‌های برون‌مرزی قره‌قوم تبعیت می‌کند. میانگین بلندمدت مشاهداتی شاخص AOD بین ۰/۰۵ تا ۰/۴۳ نوسان دارد. هسته‌های بیشینه شرقی با ثبت مقادیر ۰/۲۳ تا ۰/۴۳، روندهای مثبت افزایشی تا سقف ۰/۱۲ در دهه را تجربه می‌کنند؛ در حالی که سپر آبرودینامیک کوهستان این مقادیر را به ۰/۰۵ تا ۰/۱۴ کاهش داده است. فراوانی رخدادهای پس‌زمینه در کانون‌های شرقی بین ۲۲/۷ تا ۳۸/۷ درصد است. آستانه طوفان‌های فرین، تولید هواویز در مناطق مرکزی را متوقف کرده و به کانون‌های مرزی شرق با بیشینه ۱۴ درصد محدود می‌سازد. برون‌داد تاریخی همادی چند عضوی میانگین شاخص AOD را بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۱ برآورد کرده که ناشی از هموارسازی زیرشبکه‌ای است. پیش‌نگری آتی افزایش بار هواویزها در نوار شمال شرقی را با نرخ ۲۷/۷ تا ۳۰/۶۴ درصد نشان می‌دهد در حالی که این افزایش در بخش‌های غربی به ۱/۳۳ تا ۴/۲۷ درصد محدود می‌ماند.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این تحقیق، روند افزایش شاخص AOD ریشه در تغییرات ترمودینامیکی ناشی از افت رطوبت خاک و کاهش آستانه سرعت اصطکاکی باد دارد. بارگذاری حرارتی ناشی از تراکم هواویزها، تراز تابشی سطح- جو را با القای سرمای سطحی و گرمایش لایه‌های فوقانی تغییر می‌دهد. پایداری استاتیک حاصل از این وارونگی، بارش‌های همرفتی را سرکوب می‌کند. بر این اساس، تدوین راهبردهای سازگاری اقلیمی در مدیریت یکپارچه منابع آب و خاک و اتخاذ دیپلماسی فعال محیط‌زیستی جهت تثبیت کانون‌های برون‌مرزی، به‌منظور حفظ تاب‌آوری امنیت غذایی منطقه پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها:

شمال شرق ایران،
طوفان‌های گردوخاک،
عمق نوری هواویزها (AOD)،
الگوریتم MAIAC،
مدل‌های CMIP6-
HighResMIP

استناد: داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۵). پاسخ رخداد گردوخاک به گرمایش جهانی در پهنه شمال شرق ایران با بهره‌گیری مشاهدات ماهواره‌های MAIAC و شبیه‌سازی CMIP6-HighResMIP. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۲(۱)، ۱۲۷-۱۴۷. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.412890.1008688>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، که عمدتاً حاصل فعالیت‌های انسانی است، تغییرات قابل توجهی در شرایط جوی و محیطی در مقیاس سیاره‌ای ایجاد کرده است (Jones et al., 2022). این تغییرات در مناطق خشک و نیمه‌خشک نمود آشکارتری یافته‌اند؛ جایی که برهم‌کنش پیچیده میان افزایش دما، تغییرات الگوهای بارشی و دینامیک باد، به‌طور پیوسته فراوانی و شدت رخدادهای گردو خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هواویزهای گردو خاک به‌عنوان یکی از مهمترین آلاینده‌های جوی، حدود ۵۰ درصد از بار جرمی هواویزها در تروپوسفر را به خود اختصاص داده و کارایی سامانه زمین را به‌طور چشمگیری تغییر می‌دهند (Mahowald et al., 2010). این ذرات معلق از طریق جذب و پراکنش تابش خورشیدی و همچنین ایفای نقش به‌عنوان هسته‌های تراکم ابر^۱ (CCN)، ویژگی‌های نوری ابرها و بیلان انرژی زمین- جو را به‌طور اساسی دستخوش تغییر می‌کنند (Boucher et al., 2013; Samset, 2022).

چرخه گردو خاک شامل سه فرآیند اصلی انتشار، ترابرد و نهشت است که هر یک وابستگی شدیدی به شرایط هواشناسی نظیر بارش، رطوبت خاک، تندی باد سطحی و اختلاط آشوبناک جو دارند (Csavina et al., 2014; Munkhtsetseg et al., 2016). نهشت این ذرات پیامدهای گسترده‌ای به همراه دارد؛ از تغییر سپیدایی برف و یخ گرفته تا انتقال عناصر معدنی حیاتی (نظیر آهن) به اقیانوس‌ها که در تبادل دی‌اکسید کربن (CO₂) نقش دارند (Rodríguez et al., 2023). افزون بر این، طوفان‌های شدید گردو خاک با کاهش دید افقی (Middleton, 2017)، انتقال پاتوژن‌های تهدیدکننده سلامت عمومی (Goudie, 2014) و کاهش بازدهی محصولات زراعی (Burney & Ramanathan, 2014)، تهدیدی جدی برای جوامع و زیرساخت‌ها محسوب می‌شوند. با توجه به این که انتشار سالانه گردو خاک در سطح جهانی بین ۱۰۰۰ تا ۲۱۵۰ تراگرم متغیر است و بخش عمده‌ای از آن از مناطق خشک آسیا نشأت می‌گیرد (Tanaka & Chiba, 2006)، درک دقیق رفتار فضایی-زمانی عمق نوری هواویزها^۲ (AOD) امری انکارناپذیر است.

علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر در پایش و مدل‌سازی سامانه زمین، شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای مرتبط با هواویزها در فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده^۳ (CMIP6) با عدم قطعیت‌هایی همراه است (Zhao et al., 2022; Fiedler et al., 2023). این عدم قطعیت عمدتاً ناشی از ساده‌سازی توپوگرافی و تفکیک افقی پایین مدل‌ها است لذا شبیه‌سازی‌ها با تفکیک افقی بالا^۴ (HighResMIP) را به یک ضرورت علمی تبدیل کرده است (Aryal & Evans, 2021). در این میان، الگوریتم پیشرفته^۵ MAIAC با ارائه داده‌های AOD با تفکیک بالای ۱۰۰۰ متر، تحولی کلیدی در پایش ویژگی‌های هواویزها ایجاد کرده است.

پهنه شمال شرق ایران و به‌طور مشخص استان خراسان رضوی، به‌عنوان یکی از مناطق به‌شدت آسیب‌پذیر در برابر تغییرات محیطی، خشکسالی‌های متوالی و تغییرات کاربری اراضی، با شکاف تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی آینده رخدادهای گردو خاک روبه‌رو است. فقدان مطالعات جامعی که پیوند معناداری میان داده‌های مشاهداتی با تفکیک بالا و شبیه‌سازی‌های پیشرفته اقلیمی در این توپوگرافی پیچیده برقرار کنند، کاملاً محسوس است. درک این که چگونه رخدادهای گردو خاک به تغییر اقلیم در این منطقه پاسخ می‌دهند، برای تدوین راهبردهای کاهش مخاطرات و مدیریت ریسک حیاتی است. در پاسخ به این ضرورت حیاتی، پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این سوال کلیدی طراحی شده است که: پاسخ رخداد گردو خاک به گرمایش جهانی در پهنه شمال شرق ایران چگونه است؟

برای دستیابی به این هدف و شناخت دقیق وضعیت چشمه‌های گردو خاک، ابتدا تغییرات زمانی- مکانی متغیر AOD طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ بر پایه مشاهدات پیشرفته ماهواره‌ای MAIAC با تفکیک افقی بالا ارزیابی شد. در گام بعدی و به‌منظور درستی‌سنجی برونادهای CMIP6-HighResMIP، با توجه به این که دوره تاریخی در چارچوب CMIP6 در سال ۲۰۱۴ خاتمه می‌یابد، زیربازه‌ای منطبق با فاز تاریخی مدل (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴) از داده‌های ماهواره‌ای MAIAC استخراج و به‌عنوان مرجع درستی‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. سپس، پیش‌نگری تغییرات برای دوره آتی (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰) با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های CMIP6-HighResMIP انجام شد. لازم به ذکر است

1. Cloud condensation nuclei
2. Aerosol optical depth
3. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
4. The High Resolution Model Intercomparison Project
5. Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC)

که مدل‌های HighResMIP، برخلاف رویکردهای متداول، سناریومینا (SSP-based) نیستند و از پروتکل‌های واداشتی مشخصی برای بررسی تأثیر تفکیک‌پذیری بالا بر تغییر اقلیم بهره می‌برند. به منظور طبقه‌بندی کمی و دقیق شدت رخدادهای هواویزهای گردوخاک در دوره مشاهداتی، از رویکرد استاندارد فراوانی رخدادهای (FOO) مبتنی بر آستانه‌گذاری استفاده شد؛ به گونه‌ای که آستانه $AOD \geq 0.25$ معرف رخدادهای ضعیف یا پس‌زمینه آلودگی، $AOD \geq 0.5$ نشان‌دهنده رخدادهای متوسط با قابلیت کاهش دید افقی و $AOD \geq 1.0$ شاخص طوفان‌های شدید و فرین در نظر گرفته شده‌اند. با این وجود، از آنجایی که مدل‌های مجموعه CMIP6-HighResMIP فاقد خروجی با گام زمانی روزانه برای متغیر AOD هستند، محاسبه شاخص فراوانی رخدادهای دوره آینده انجام نشد.

پیشینه تحقیق

درک دقیق پاسخ رخدادهای گردوخاک به گرمایش جهانی در مناطق حساس اقلیمی مانند شمال شرق ایران، نیازمند تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک بالا و شبیه‌سازی اقلیمی آینده است. اگرچه پیشرفت‌های دو دهه اخیر، شناخت ما از چرخه جهانی گردوخاک را دگرگون کرده است، اما چالش‌های زیادی در تعیین آستانه‌های رخدادهای عمق نوری هواویزها و کاهش عدم قطعیت مدل‌ها همچنان پابرجاست. در ادامه، پیشینه پژوهش بسته به هدف تحقیق در دو محور مشاهدات ماهواره‌ای و پایش عمق نوری هواویزها و شبیه‌سازی رخدادهای گردوخاک در بستر تغییر اقلیم بررسی می‌شود.

گروه نخست پژوهش‌های بررسی شده در این تحقیق به مشاهدات ماهواره‌ای و پایش عمق نوری هواویزها اختصاص دارد. در گذشته، بازیابی اطلاعات هواویزها بر فراز سطوح درخشان مانند بیابان‌های غرب آسیا با خطای بالایی همراه بود. برای رفع این چالش در پژوهشی الگوریتم MAIAC توسعه داده شد که با استفاده از تابع توزیع بازتابش دوسویه^۱ (BRDF) و فیلتر نویزهای سطحی، امکان بازیابی AOD را با تفکیک ۱۰۰۰ متر فراهم کرد (Lyapustin et al., 2011, 2012). ارزیابی‌های این الگوریتم نشان‌دهنده برتری این محصول بود؛ به طوری که Superczynski et al., (2017) در آمریکای شمالی و Mhawish et al., (2019) در جنوب آسیا نشان دادند که محصول MAIAC از نظر دقت و پوشش مکانی کارایی بسیار بهتری از الگوریتم‌های پیشین دارد. با این حال، هر دو پژوهش به یک عدم قطعیت برای مطالعات گردوخاک اشاره کردند که این الگوریتم در زوایای پراکنش بزرگ و بر فراز سطوح بسیار درخشان، تمایل به کم‌برآوردی در مقادیر هواویز گردوخاک‌های غلیظ دارد.

گروه دوم از مطالعات بررسی شده به پیش‌نگری با مدل‌های CMIP6 پرداختند که نشان می‌دهد پاسخ چرخه‌های گردوخاک به گرمایش جهانی به شدت غیرخطی و تابع دینامیک‌های منطقه‌ای است. در مقیاس جهانی، Zhao et al., (2023) نشان دادند که تحت سناریوهای مختلف مسیرهای اقتصادی-اجتماعی مشترک^۲ (SSPs)، انتشار گردوخاک تا پایان قرن بیست‌ویکم رفتارهای متضادی (افزایش در شمال آفریقا و کاهش در شرق آسیا) نشان خواهد داد. با این وجود، خروجی‌های خام مدل‌ها با خطا همراه‌اند؛ چنان که Liu et al., (2024) ثابت کردند مدل‌های CMIP6 بار کسر جرمی گردوخاک را بین ۷ تا ۲۱ درصد کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کنند و اعمال روش‌های تصحیح آریبی می‌تواند عدم قطعیت مدل‌ها را به شدت کاهش دهد. پیچیدگی‌های درون‌مدلی^۳ در مطالعات Toolan et al., (2025) روی نیز برجسته شد. این پژوهش‌ها نشان دادند که ضعف در انتشار و برهم‌کنش پیچیده هواویز-بارش می‌تواند باعث شود که یک منطقه تحت سناریوهای با انتشار بالا، در کوتاه‌مدت با افزایش گردوخاک و در بلندمدت با روندی معکوس مواجه شود. در مرتبط‌ترین مطالعه با اقلیم شمال شرق ایران، Gan et al., (2026) پیش‌نگری کردند که آسیای مرکزی تحت سناریوی SSP5-8.5 تا پایان قرن با افزایش ۹۴/۹ درصدی انتشار گردوخاک مواجه خواهد شد که تغییرات شدیدی در تابش‌های سطحی (تا -20 Wm^{-2}) و نرخ گرمایش جوی ایجاد می‌کند.

پژوهش‌های مختلفی در ایران عمق نوری هواویزها و گردوخاک را مطالعه کردند. از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط فرهادی‌پور و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد که با شبیه‌سازی رخدادهای گردوخاک غرب و جنوب غرب نشان دادند که ذرات گرد و

1. Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)
2. Shared Socioeconomic Pathways
3. Intermodal Diversity

خاک در سقف جو و سطح زمین دارای اثرهای سرمایشی، اما در میانه جو دارای اثر گرمایشی هستند. در پی درک این بازخوردهای پیچیده تابشی، ضرورت شناسایی مسیرهای کلان انتقال هواویزها در مقیاس منطقه‌ای مطرح شد. در همین راستا، رضائی و فرج‌زاده (۱۴۰۴) با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده MODIS نشان دادند که ۵۸ درصد از دالان‌های جوی گردوخاک در خاورمیانه و شمال آفریقا، اقلیم ایران را به‌ویژه در مناطق جنوب‌غربی تحت تأثیر قرار می‌دهند. متعاقباً، تمرکز مطالعات از پایش صرف مسیرها، به سمت منشأیابی و مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های نوین و داده‌های بازتحلیل تغییر یافت. به عنوان نمونه، احمدی و همکاران (۱۴۰۳) با کاربست داده‌های MERRA-2، نقش توأمان چشمه‌های داخلی مانند دشت کویر و خارجی همانند غرب خاورمیانه را در نوسانات فصلی غلظت جرمی گردوخاک تهران نشان دادند. در همین راستا خدایار و همکاران (۱۴۰۴) نشان دادند که تلفیق AOD با متغیرهای هواشناسی از طریق مدل‌های یادگیری ماشین، دقت تخمین غلظت ذرات PM_{10} را به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همگام با این پیشرفت‌های روش‌شناختی در تحلیل‌های جوی، محققان به نقش حیاتی تغییرات سطح زمین و خشکسالی نیز توجه ویژه‌ای داشتند؛ چنانکه درگایان و همکاران (۱۴۰۴) ارتباطی معکوس و قوی میان کاهش مساحت آبی تالاب‌های هامون و تشدید طوفان‌های گردوخاک در دشت سیستان را گزارش کردند و به طور مشابه، خان‌سالاری و همکاران (۱۴۰۲) تأثیرپذیری مستقیم استان گلستان را از خیزش گردوخاک در بیابان‌های ترکمنستان تحت شرایط خاص همدیدی اثبات نمودند. در نهایت، به رغم مطالعات ارزشمندی که در ایران انجام شده است، اما این مطالعات صرفاً به بررسی رخداد گردوخاک در گذشته، تغییرات زمانی-مکانی آن و بررسی بازخوردهای تابشی و محلی آن پرداخته‌اند؛ لذا یک شکاف عمیق علمی در زمینه پاسخ رخداد گردوخاک به گرمایش جهانی در پهنه شمال شرق ایران با بهره‌گیری از مدل‌های تفکیک افقی بالا به چشم می‌خورد که بررسی دقیق چالش‌ها و فرصت‌های سازگاری در این عرصه را برای تحقیقات آتی به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل می‌کند.

داده و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در پهنه جغرافیایی استان خراسان رضوی واقع در شمال شرق ایران انجام پذیرفته است. گستردگی استان، بستر مناسبی برای تنوع اقلیمی فراهم آورده است. تحلیل مدل رقومی ارتفاعی^۱ (DEM) حاکی از ناهمگنی چشمگیر توپوگرافیک در این پهنه است؛ به‌گونه‌ای که تراز ارتفاعی از کمینه ۲۳۳ متر تا بیشینه ۳۳۱۰ متر نسبت به سطح دریا تغییر می‌کند (شکل ۱-ب). این گرادیان شدید ارتفاعی (حدود ۳۰۰۰ متر) منجر به شکل‌گیری خرداقلیم‌های متمایزی، از شرایط نیمه‌خشک در دشت‌ها تا اقلیم سرد کوهستانی در ارتفاعات شده است. از منظر ریخت‌شناسی زمین، نوار شمالی و بخش‌های مرکزی استان از جمله قله برف‌گیر رشته‌کوه‌های بینالود و هزارمسجد با امتداد شمال‌غربی به جنوب‌شرقی کمربندهای مرتفعی را تشکیل می‌دهند که در شکل‌گیری اقلیمی محلی نقش بارزی دارند. در مقابل، پهنه‌های پست‌تر عمدتاً در حاشیه‌های مرزی شمال شرق نظیر شهرستان سرخس، بخش‌های غربی و همچنین دشت‌های جنوبی و جنوب‌غربی گسترش یافته‌اند (شکل ۱-الف).

داده‌های تحقیق

به منظور پایش دقیق و شبیه‌سازی آینده پاسخ رخدادهای گردوخاک به گرمایش جهانی، این مطالعه بر تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک بالا MAIAC و خروجی‌های CMIP6-HighResMIP استوار است. جهت استخراج مقادیر متغیر عمق نوری هواویزها و پایش دقیق چشمه‌های محلی و ترابرد منطقه‌ای، از الگوریتم پیشرفته ماهواره‌ای MAIAC با تفکیک افقی بسیار بالای یک کیلومتر استفاده شد. ابتدا، داده‌های MAIAC برای بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ استخراج شدند که این بازه منحصراً به عنوان دوره مشاهداتی برای تحلیل تغییرات گذشته و حال رخدادهای گردوخاک مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعد، با توجه به این که فاز تاریخی (historical) در چارچوب استاندارد CMIP6 در پایان سال ۲۰۱۴ خاتمه می‌یابد، ارزیابی و مقایسه برون‌داد مدل با مشاهدات ماهواره‌ای جهت درستی‌سنجی مدل، صرفاً در بازه

پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده با تفکیک بالا (HighResMIP)

پروژه HighResMIP در چارچوب پروژه CMIP6 با هدف ارزیابی ساختارمند اثر افزایش تفکیک افقی بر خروجی مدل‌های گردش کلی^۱ (GCMs) طراحی شده است؛ رویکردی ساختاری که مقیاس مکانی را به یک متغیر مستقل آزمایشی تبدیل می‌کند تا منشأ فیزیکی آریبی‌های شبیه‌سازی شده در بازنمایی گردش‌های بزرگ‌مقیاس جوی-اقیانوسی و رخداد‌های فرین به‌دقت بررسی شود. ساختار آزمایش‌ها در HighResMIP به سه سطح تقسیم شده است. سطح اول (Tier 1) شامل شبیه‌سازی‌های AMIP^۲ یا حالت فقط جو است. سطح دوم (Tier 2) به شبیه‌سازی‌های جفت‌شده جو-اقیانوس اختصاص دارد و سطح سوم (Tier 3) نیز امتداد Tier 1 برای دوره‌های آینده است. این سازمان‌دهی سه‌سطحی، امکان آن را فراهم می‌کند که هم پاسخ مدل در سامانه‌های غیرجفت‌شده بررسی شود و هم رفتار آن در شرایط جفت‌شدگی کامل جو-اقیانوس آزمون شود (Haarsma et al., 2016).

دامنه زمانی کلی آزمایش‌های HighResMIP بازه ۱۹۵۰ تا ۲۰۵۰ را پوشش می‌دهد و در برخی مولفه‌های خاص امکان امتداد آن تا ۲۱۰۰ نیز پیش‌بینی شده است. در Tier 1، یک شبیه‌سازی AMIP به طول ۶۴ سال برای دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ با واداشتی تاریخی اجرا می‌شود. سپس در Tier 3 همین چارچوب فقط جو برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ و برای ۲۰۵۱ تا ۲۱۰۰ به‌صورت اختیاری ادامه می‌یابد. این پیوستگی زمانی، داده‌ای فراهم می‌کند که در آن می‌توان رفتار مدل را از دوره تاریخی به دوره آینده دنبال کرد، بدون آن که منطق طراحی آزمایش مربوطه دچار گسست زمانی شود. در Tier 2، که برای شبیه‌سازی‌های جفت‌شده طراحی شده (مورد استفاده در این تحقیق)، ساختار زمانی دقیق‌تر است. نخست یکپارچه‌سازی ۵۰ ساله از شرایط آغازین سال ۱۹۵۰ در شرایط دهه ۱۹۵۰ انجام می‌شود. سپس شبیه‌سازی به دو شاخه ۱۰۰ ساله تفکیک می‌شود. یک شاخه با واداشت ثابت سال ۱۹۵۰ به‌عنوان اجرای کنترل و شاخه دیگر با واداشت‌های تاریخی تا سال ۲۰۱۴ و پس از آن مدل برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ اجرا می‌شود. بر این اساس، دوره شبیه‌سازی جفت‌شده نیز عملاً بازه ۱۹۵۰ تا ۲۰۵۰ را در بر می‌گیرد. این نوع طراحی، امکان تفکیک پاسخ ناشی از واداشت بیرونی از رانش‌های درونی مدل را افزایش می‌دهد و مبنایی روشن برای مقایسه اجرای تاریخی و آینده فراهم می‌آورد (Haarsma et al., 2016).

واداشت‌های مورد استفاده در پروژه HighResMIP به‌روشنی مشخص شده‌اند. برای دوره تاریخی، همان واداشت‌های به‌کار رفته در دوره تاریخی CMIP6 استفاده می‌شود. برای دوره آینده، غلظت گازهای گلخانه‌ای و هواویزها بر پایه یک سناریوی انتشار از مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک، اعمال می‌گردد. در مورد هواویزها، هر مدل از اقلیم‌شناسی پس‌زمینه غلظت هواویز خاص خود استفاده می‌کند و بر روی آن یک واداشت زمانی متغیر و یکنواخت انسان‌ساخت از طریق روش MACv2-SP افزوده می‌شود؛ روشی که بر پایه خواص نوری هواویز و تغییر کسری در شعاع مؤثر قطرات ابر عمل می‌کند تا بازنمایی سازگارتری از واداشت هواویز فراهم شود (Stevens et al., 2017). در مجموع، این مجموعه تنظیمات نشان می‌دهد که داده‌های HighResMIP با یک روش واداشتی استاندارد شده اما کنترل‌شده تولید شده‌اند؛ روشی که برای مقایسه مستقیم نقش تفکیک افقی در شبیه‌سازی اقلیم تاریخی و آینده مناسب است (Haarsma et al., 2016).

به‌منظور برآورد پاسخ آینده سامانه اقلیم و پیامدهای آن بر رخداد‌های گردوخاک در شمال شرق ایران، داده‌های ماهانه عمق نوری هواویز در طول موج ۵۵۰ نانومتر (od550) از مدل جفت‌شده اقیانوس-جو CNRM-CM6-1 با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر برای سه گونه اجرای r1ilp1f3 و r1ilp1f2 r1ilp1f1 برای دوره تاریخی (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) و آینده نزدیک (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰) دانلود شد. شایان ذکر است که مدل‌های HighResMIP همان‌طور که پیش‌تر گفته شد سناریو مبنا نیستند و تا میانه قرن را بر اساس واداشت‌های شرایط گازهای گلخانه‌ای نزدیک به شرایط فعلی را شبیه‌سازی می‌کنند، در بر می‌گیرد. این سامانه با بهره‌گیری از شبکه گوسی T127 و ماژول دینامیکی جوی Arpege 6.3 مجهز به ۹۱ تراز قائم، در کنار یکپارچه‌سازی ماژول‌های سطح زمین (Surfex 8.0c) و اقیانوس (Nemo 3.6)، ظرفیت بالایی برای بازتولید پویایی ساختارهای منطقه‌ای فراهم می‌آورد؛ در حالی که میدان‌های غلظت هواویز آن مستقیماً از طریق طرح‌واره فیزیکی TACTIC_v2 تولید می‌شوند.

پروژه HighResMIP مجموعه‌ای از پیشرفته‌ترین مدل‌های گردش کلی همانند EC-Earth، HadGEM3، MPI-ESM و CNRM-

1. General Circulation Models
2. Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)

CM6-1 را با هدف کاهش خطاهای سیستماتیک و بهبود شبیه‌سازی پدیده‌های مقیاس منطقه‌ای گرد هم آورده است. با این وجود، انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی رخدادهای هواویزها نیازمند دسترسی به متغیرهای AOD است که تمامی مراکز مدل‌سازی آن را در خروجی‌های نهایی خود ارائه نکرده‌اند. بررسی‌های پایگاه داده ESGF نشان داد که تمامی مدل‌های مشارکت‌یافته، خروجی مربوط به متغیر کلیدی *od550_AERmon* (عمق نوری هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر در مقیاس ماهانه) را تولید و یا در دسترس عموم قرار نداده‌اند. از آنجا که این متغیر، شاخص اصلی در سنجش و شبیه‌سازی شدت رخدادهای گردوخاک محسوب می‌شود، عدم وجود آن در خروجی بسیاری از مدل‌ها، دایره انتخاب را به شدت محدود ساخت. در این میان، مدل CNRM-CM6-1 (توسعه‌یافته در مرکز CERFACS فرانسه)، یکی از معدود مدل‌هایی بود که متغیر *od550_AERmon* را به طور کامل برای گونه‌های اجرای مختلف در پایگاه ESGF منتشر کرده بود (تا زمان نگارش این تحقیق)، بنابراین، انتخاب مدل CNRM-CM6-1 برای این پژوهش، یک انتخاب آگاهانه و اجتناب‌ناپذیر بوده است.

روش تحقیق

در این پژوهش، برای بررسی پاسخ رخدادهای گردوخاک به گرمایش جهانی، یک چارچوب روش‌شناسی چندمرحله‌ای تدوین شد. در گام نخست، اقلیم‌شناسی سالانه متغیر عمق نوری هواویزها بر پایه داده‌های مشاهداتی با تفکیک بالای محصول ماهواره‌ای MAIAC استخراج شد تا هسته‌های اصلی هواویزها در پهنه مورد مطالعه با دقت بالایی تبیین شود. پس از تثبیت الگوی اقلیمی پایه، در گام دوم و به منظور شناسایی کانون‌های فعال گردوخاک و طبقه‌بندی شدت رخدادهای، روش استاندارد و کمی فراوانی رخدادهای FOO با رویکرد آستانه‌گذاری به کار گرفته شد. در این مرحله، مقادیر AOD بر اساس آستانه‌های سه‌گانه و استاندارد بین‌المللی فیلتر شدند تا طیف رخدادهای ضعیف تا طوفان‌های فرین تفکیک و ارزیابی شوند. در نهایت، جهت شبیه‌سازی شرایط آبی رخدادهای هواویزها تحت تأثیر گرمایش جهانی، از خروجی‌های پیشرفته پروژه HighResMIP استفاده شد. بدین منظور، یک چند عضوی همادی از مدل CNRM-CM6-1 با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر برای سه‌گونه اجرا ساخته شد.

فراوانی رخدادهای FOO با رویکرد آستانه‌گذاری

برای شناسایی کانون‌های فعال گردوخاک و تفکیک شدت طوفان‌ها، از روش استاندارد فراوانی رخدادهای FOO با رویکرد آستانه‌گذاری استفاده شد (Ginoux et al., 2012). الگوریتم محاسبه FOO برای عمق نوری هواویزها بر اساس رابطه (۱) تبیین می‌شود.

$$FOO = \left(\frac{N(AOD \geq \tau)}{N_{Total}} \right) \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، FOO نمایانگر درصد فراوانی رخدادهای گردوخاک، $N(AOD \geq \tau)$ بیانگر تعداد روزهایی است که مقدار AOD از آستانه مشخص شده (τ) بیشتر یا مساوی بوده، و N_{Total} نشان‌دهنده کل روزهای دارای داده معتبر (نقطه‌شبه‌های فاقد پوشش ابر) در دوره مورد بررسی می‌باشد. مقادیر این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ درصد متغیر است. جهت طبقه‌بندی شدت رخدادهای، بر اساس استانداردهای بین‌المللی هواویزها، سه آستانه کلیدی (τ) به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت. آستانه $AOD \geq 0.25$ معادل با رخدادهای ضعیف گردوخاک یا پس‌زمینه آلودگی جوی (Mild Dust / Background)، آستانه $AOD \geq 0.5$ معرف رخدادهای متوسط تا شدید گردوخاک که منجر به کاهش دید افقی می‌شوند (Moderate Dust) و آستانه $AOD \geq 1.0$ نشان‌دهنده طوفان‌های گردوخاک شدید و فرین (Severe/Extreme Dust Storms) که پیامدهای مخربی بر سلامت انسان و زیرساخت‌های حمل‌ونقل دارند، می‌باشد. همچنین، برای محاسبه روند تغییرات خطی، آزمون ناپارامتری شیب سن (Sen's Slope) مورد استفاده قرار گرفت (Sen, 1968). در این روش، ابتدا مجموعه‌ای از شیب‌های خطی برای تمامی جفت داده‌ها محاسبه می‌شود و شیب نهایی سن (b_{Sen}) از طریق محاسبه میانگین تمامی شیب‌های به‌دست آمده برآورد می‌شود.

تولید همادی چند عضوی از مدل CNRM-CM6-1 مشارکت یافته در CMIP6-HighResMIP

همان‌طور که گفته شد در این تحقیق اجرای تاریخی و آینده‌نگر (highres-future) در قالب سه گونه اجرای مستقل شامل r1i1p1f1، r1i1p1f2 و r1i1p1f3 دانلود شده است. پس از دانلود و پیش‌پردازش‌های اولیه شامل ماسک کردن با منطقه مورد مطالعه یک چند عضوی همادی از CNRM-CM6-1 تولید شد. بهره‌گیری از این همادی چند عضوی درون خانواده‌ای، راهبردی ریاضی برای تفکیک سیگنال‌های ناشی از گرمایش جهانی از تغییرپذیری درونی سامانه اقلیم به‌شمار می‌رود. استخراج میانگین همادی از این اجراهای مستقل، اثر نوسانات بین‌سالانه تا دهه‌ای و آشفتگی‌های درونی هر عضو منفرد مدل را تضعیف کرده و آشکارسازی روندهای پایدار و الگوهای مکانی دقیق را تضمین می‌کند. در نقطه مقابل، پراکندگی موجود میان گونه‌های اجرا بازتابی شفاف از دامنه پاسخ‌های محتمل مدل به شرایط اولیه و تفاوت در واداشتهاست. تحلیل میانگین همادی اعضای مدل چارچوبی جامع برای ارزیابی استحکام آماری و حساسیت سامانه اقلیم ارائه می‌دهد (Haarsma et al., 2016) که در تحلیل تغییرات آینده فراوانی، شدت و توزیع مکانی رخداد هواویزهای گردوخاک منطقه‌ای تحت تأثیر گرمایش جهانی، نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند.

ارزیابی کارایی عمق نوری هواویزهای مدل CNRM-CM6-1 با بهره‌گیری از نمودار تیلور

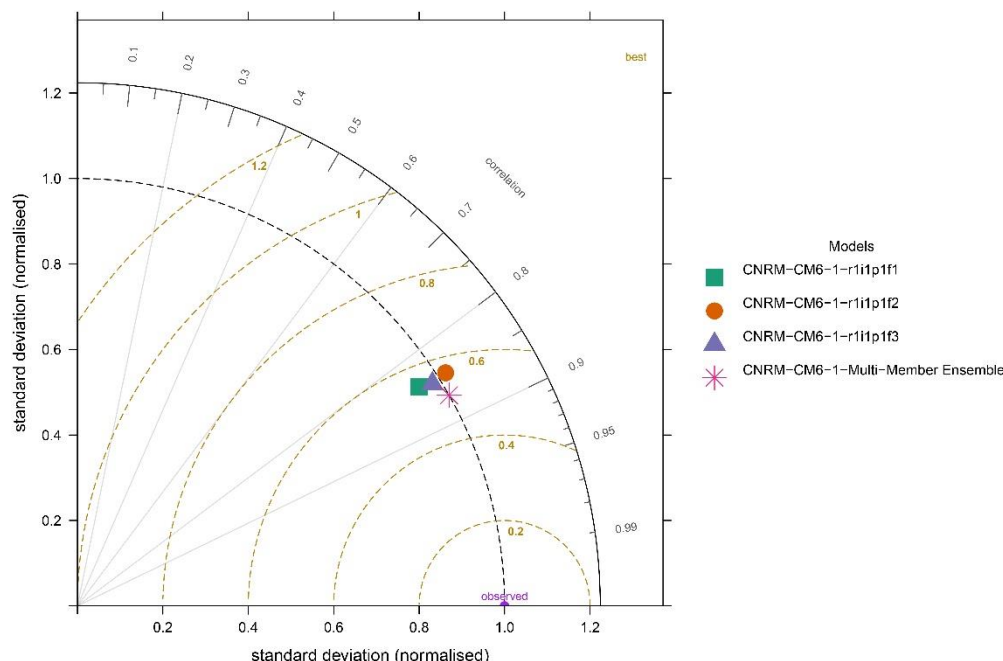
کارایی شبیه‌سازی‌های مدل CNRM-CM6-1 در قیاس با MAIAC با استفاده از نمودار تیلور (Taylor, 2001) انجام شد. این ابزار تحلیلی، ارزیابی هم‌زمان سه آماره کلیدی شامل ضریب همبستگی (R)، انحراف معیار (σ) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) را در یک فضای دوبعدی میسر می‌سازد. مبنای هندسی این نمودار بر قانون کسینوس‌ها استوار است که ارتباط ریاضی میان این سه سنجه را فرمول‌بندی می‌کند. جهت امکان‌پذیری مقایسه گونه‌های مختلف اجرایی مدل و چند عضوی همادی، داده‌ها از طریق تقسیم انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده و RMSE بر انحراف معیار مشاهدات، نرمال‌سازی شدند. در این فضای نرمال‌شده، نقطه مشاهداتی در فاصله واحد (۱) از مبدأ، روی محور افقی (محور x) قرار می‌گیرد و فاصله شعاعی هر نقطه مدل از نقطه مشاهدات، بیانگر مقدار خطای آن است.

نتایج

ارزیابی کارایی مدل CNRM-CM6-1 و گونه‌های اجرای آن در شبیه‌سازی AOD شمال شرق ایران

ارزیابی گونه‌های اجرای مدل CNRM-CM6-1 در بازتولید عمق نوری هواویزها (AOD) در شمال شرق ایران، انطباق بالایی را با الگوریتم MAIAC نشان می‌دهد. ضرایب همبستگی برای تمامی اعضا در بازه ۰/۸۳ تا ۰/۸۶ متغیر است. این تطابق، حاکی از دقت پارامترسازی فیزیکی مدل در شناسایی کانون‌های اصلی انتشار گردوخاک است (شکل ۲). بررسی تغییرپذیری دامنه نوسانات مشخص می‌سازد که اعضای r1i1p1f1 و r1i1p1f3 با ثبت انحراف معیار نرمال‌شده در محدوده ۰/۹ و ۰/۹۵ تغییرات AOD را با کاهش جزئی نسبت به MAIAC برآورد می‌کنند. گونه اجرای r1i1p1f2 با انحراف معیاری فراتر از یک، نوسانات را بیش از مشاهدات ماهواره‌ای MAIAC شبیه‌سازی می‌کند. تجمع مقادیر انحراف معیار اعضا در مجاورت مرجع یک، پایداری دینامیکی مدل در تفکیک‌پذیری‌های بالا را در پارامترسازی فرآیندهای مرتبط با هواویزها تایید می‌کند.

تفاوت در رفتار نوسانی اعضای منفرد، به‌کارگیری رویکرد همادی را ضروری می‌سازد. همادی چندعضوی با ثبت ضریب همبستگی ۰/۸۸، بالاترین درجه تطابق مکانی را با داده‌های مرجع برقرار می‌سازد و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) را به کمینه مطلق خود در بازه ۰/۴۵ تا ۰/۵ کاهش می‌دهد. انحراف معیار نرمال‌شده خروجی همادی بر مقدار یک، منطبق است (شکل ۲). این همگرایی ساختاری، نمایانگر کمینه‌سازی خطاهای سیستماتیک و تصادفی در شبیه‌سازی آستانه‌های AOD و بازتولید دامنه نوسانات آن است. دقت بالای رویکرد همادی در بازتولید توزیع فضایی هواویزها، پیامد مستقیم فیلتر شدن سیگنال‌های تغییرپذیری اقلیمی درونی^۱ است.



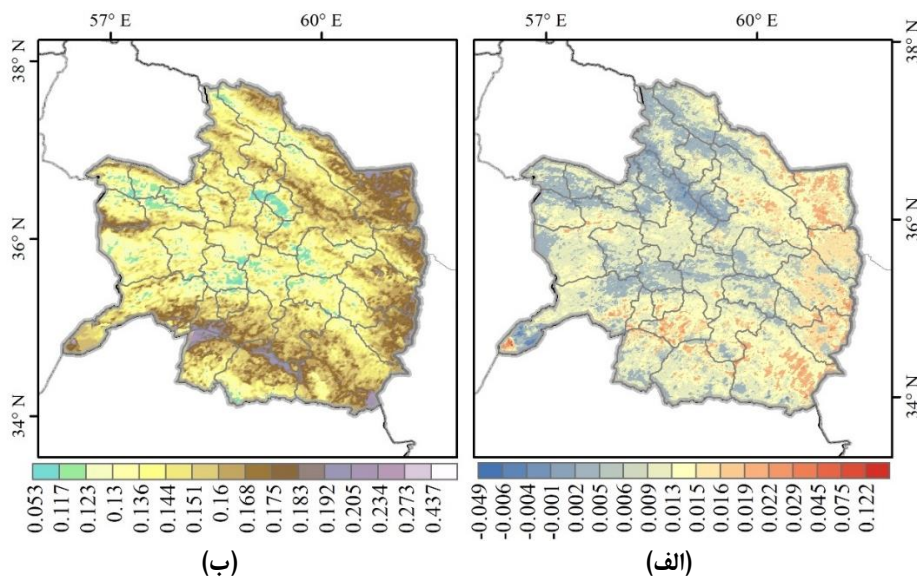
شکل ۲. نمودار تیلور جهت ارزیابی کارایی گونه‌های اجرا و همادی چند عضوی مدل CNRM-CM6-1 (از پروژه CMIP6-HighResMIP) در شبیه‌سازی AOD طی دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۱. نقطه مرجع (Observed) بر اساس داده‌های مشاهداتی ماهواره‌ای MAIAC تعیین شده است. اشکال هندسی نشان‌دهنده گونه‌های اجراهای مستقل مدل (r1i1p1f1 و r1i1p1f2) بوده و ستاره نمایانگر همادی چند عضوی (Multi-Member Ensemble) است که بهترین تطابق آماری را با مشاهدات MAIAC نشان می‌دهد.

اقلیم‌شناسی و روند هواویزها و باز خورد های تابشی گردوخاک در شمال شرق ایران: تحلیل مشاهدات ماهواره‌ای MAIAC با تفکیک بالا

ساختار فضایی عمق نوری هواویزها (AOD) در پهنه شمال شرق ایران از یک ناهمگنی شدید متأثر از گرادبان‌های توپوگرافیک و دینامیک جوی تبعیت می‌کند. میانگین بلندمدت شاخص AOD مستخرج از الگوریتم MAIAC برای بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵، در دامنه‌ای بین ۰/۰۵ تا ۰/۴۳ نوسان دارد. هسته‌های بیشینه هواویزها با مقادیر ۰/۲۳ تا ۰/۴۳ به‌طور متمرکز در نوار شرقی و جنوب شرقی شامل سرخس، صالح‌آباد، تربت‌جام، تایباد و خواف استقرار یافته‌اند. این الگو محصول مستقیم مجاورت با کانون‌های برون مرزی قره‌قوم و دشت‌های خشک افغانستان در تلفیق با دالان‌های انتقال بادهای ۱۲۰ روزه است که پتانسیل انتشار ذرات را از بستر پلایاهای خشک به حداکثر می‌رساند. مقادیر این نواحی به‌طور پیوسته در آستانه رخدادهای پس‌زمینه ($AOD \geq 0.25$) قرار داشته و ظرفیت بالایی برای گذار به رخدادهای متوسط ($AOD \geq 0.5$) نشان می‌دهند. کمینه بار هواویزها در گستره ۰/۰۵ تا ۰/۱۴ بر کمر بند کوهستانی بینالود و هزارمسجد در نواحی شمالی و مرکزی منطبق است (شکل ۳-ب). این ناهموازی‌ها به‌عنوان یک سپر آیرودینامیک عمل کرده و انتقال افقی توده‌های گردوخاک را مسدود می‌سازند؛ فرآیندی که در ترکیب با رطوبت سطحی بالاتر، مقادیر AOD را در شهرستان‌هایی نظیر درگز، قوچان و نیشابور به کمینه ممکن تقلیل داده است.

روند زمانی شاخص AOD تقریباً در سه دهه گذشته، پهنه‌های بحرانی را از مناطق بدون رخداد گردوخاک پایدار اثبات می‌کند. شیب تغییرات این متغیر در بازه مورد مطالعه از ۰/۰۴- تا ۰/۱۲ در دهه متغیر است. پهنه‌های شرقی و جنوبی استان درگیر روندهای مثبت در دامنه ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ هستند که در کانون‌های بحرانی سرخس، تایباد و بجستان به مقادیر ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱۲ می‌رسد. افت رطوبت خاک ناشی از نوسانات منفی بارش و افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل در اثر گرمایش سطحی، آستانه سرعت اصطکاکی باد را کاهش داده است. این تغییرات ترمودینامیکی، چسبندگی ذرات رسوبی در دشت‌های آبرفتی را تضعیف کرده و شار قائم گردوخاک را تشدید می‌کند. نواحی

شمالی و مرکزی استان، روندهای منفی و خنثی را عمدتاً در بازه قابل چشم‌پوشی $-0/006$ تا $-0/001$ تا بیشینه $-0/04$ تجربه کرده‌اند که بازتابی از کاهش ترابرد دوربرد ذرات در ترازهای میانی جو و پایداری نسبی پوشش سطحی در اقلیم‌های کوهپایه‌ای است (شکل ۳-الف). هم‌پوشانی مکانی بیشینه‌های بلندمدت AOD و روندهای مثبت در نوار مرزی شرق، یک چرخه بازخورد تابشی قدرتمند را در سامانه اقلیمی منطقه تغذیه می‌کند. افزایش غلظت ذرات گردوخاک بیابانی با ایجاد واداشت تابشی، پراکنش تشعشعات موج کوتاه را به همراه داشته که منتج به سرمایش سطحی و گرمایش هم‌زمان در ترازهای زیرین جو می‌شود. این دوقطبی حرارتی، پایداری استاتیک جو را به شدت افزایش داده و سازوکار بارش‌های همرفتی را سرکوب می‌کند. استمرار این پس‌خور هیدروکلیماتیک، محیط‌های خشک جنوب‌شرق را بیش از پیش مستعد فرسایش بادی کرده و احتمال گذار سیستم از وضعیت پس‌زمینه ($AOD \geq 0.25$) به سمت طوفان‌های فرین ($AOD \geq 1.0$) را در سناریوهای گرمایش جهانی، به‌ویژه در افق آینده، به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد.



شکل ۳. توزیع فضایی و روند زمانی شاخص عمق نوری هواویزها (AOD) در پهنه شمال شرق ایران (استان خراسان رضوی) برای بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ با استفاده از خروجی الگوریتم MAIAC. الف) الگوی میانگین بلندمدت شاخص AOD را نشان می‌دهد. ب) شیب روند تغییرات شاخص AOD را نشان می‌دهد و توزیع مکانی کانون‌های تشدید شونده انتشار گردوخاک را متمایز می‌سازد.

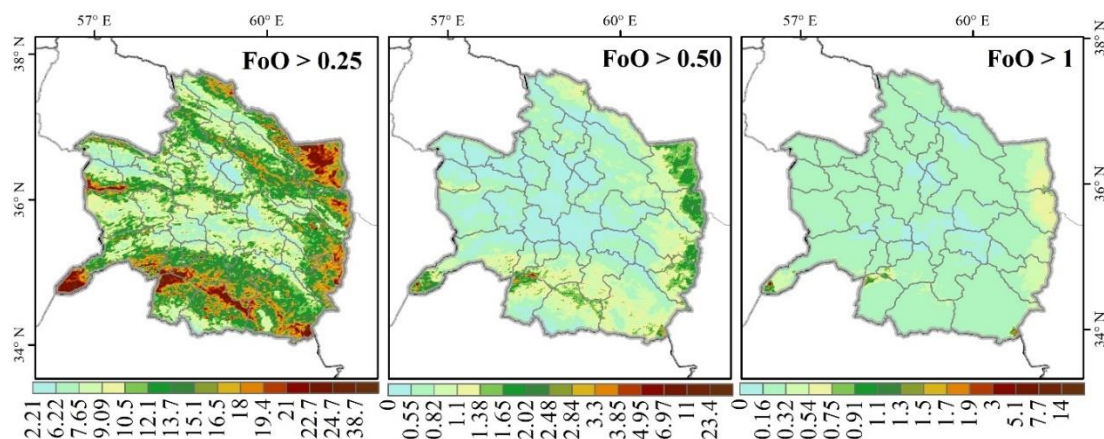
دینامیک فضایی و رژیم عمق نوری هواویزها: تکنیک کانون‌های ساختاری و فرین طوفان‌های گردوخاک

تحلیل فضایی فراوانی رخداد عمق نوری هواویزها بر پایه مشاهدات ماهواره‌ای MAIAC، گرادیان‌های به‌شدت ناهمگنی را در پهنه شمال شرق ایران آشکار می‌سازد. در رژیم پایه آلودگی و رخداد‌های ضعیف گردوخاک با آستانه $AOD \geq 0.25$ ، دامنه شاخص بین ۲/۲۱ تا ۳۸/۷ درصد نوسان می‌کند. توزیع مکانی این آستانه بیانگر یک کمربند فعال شرقی، جنوب‌شرقی و جنوبی است که مقادیر بیشینه آن در شهرستان‌های سرخس، تایباد، خواف، باخرز، تربت‌جام، صالح‌آباد، بجنستان و گناباد تمرکز یافته و در هسته‌های بحرانی به ۲۲/۷ تا ۳۸/۷ درصد می‌رسد. درجات پایین‌تری از این سیگنال در حاشیه غربی پهنه مورد مطالعه، شامل سبزوار، داورزن، جوبین و جغتای ثبت شده است. بخش‌های مرکزی و شمال‌مرکزی با ثبت مقادیر ۲/۲۱ تا ۱۲/۱ درصد در کلاس‌های کمینه قرار می‌گیرند (شکل ۴). این الگوی فضایی مستقیماً تابعی از توزیع دشت‌های آبرفتی خشک، خاک‌های لسی و سیلتی، بسترهای نیمه‌تبخیری و مجاورت با کریدورهای بادی غرب افغانستان و شرق ایران است.

نمود آشکار اثر کانون‌های ماندگار رسوبی در آستانه متوسط $AOD \geq 0.50$ با انقباض شدید فضایی پهنه‌های درگیر نمایان می‌شود. فیلتر کردن رخداد‌های پس‌زمینه با این آستانه، هسته‌های موقت را در مناطق مرکزی و غربی حذف کرده و $F00$ را در این گستره‌ها به نزدیکی صفر کاهش می‌دهد. پایداری سیگنال در نوار شرقی نشان‌دهنده یک رفتار ساختاری است که در آن رخداد‌های متوسط تا شدید

به‌طور سیستماتیک در سرخس، تایباد، خواف و باخرز با فراوانی ۶/۹۷ تا ۱۱ درصد و در هسته‌های متمرکزتر بین ۱۷ تا ۲۳/۴ درصد تکرار می‌شود (شکل ۴). دینامیک این انباشت هواویز، برآیندی از سلطه بادهای شرقی و جنوب‌شرقی، جریانات جوی و توسعه لایه مرزی در فصول گرم است که ماندگاری ذرات معلق را در ستون جو تضمین می‌کند.

غربالگری AOD در فاز فرین رخدادهایی با آستانه $AOD \geq 1.0$ ، ماهیت به‌شدت نامتقارن رژیم هواویزهای منطقه را اثبات می‌کند. در این رژیم بحرانی، دامنه کلی شاخص به ۱۴ درصد محدود شده و سطح وسیعی از پهنه مرکزی شامل مشهد، چناران، گلپه‌هار، بینالود، نیشابور، خوشاب و فیروزه با ثبت فراوانی ۰/۵۴ تا ۰/۷۵ درصد عملاً از مناطق مولد طوفان‌های شدید گردوخاک خارج می‌شوند. هسته‌های قطعی گردوخاک فرین منحصراً در سرخس، خواف، تایباد، باخرز و با شدتی کمتر در تربت‌جام استقرار دارند. فراوانی رخداد در این کانون‌های فعال به بازه‌های ۱/۹ تا ۳ درصد و ۵/۱ تا ۷/۷ درصد و در کانون‌های بیشینه تا ۱۴ درصد می‌رسد. این آمار نشان‌دهنده شرایط طوفان شدید در حدود یک‌بیستم تا یک‌هفتم بازه زمانی ۲۵ ساله است. مجاورت با سطوح فعال فرسایش بادی و فرارفت پیاپی زبانه‌های غلیظ فرامرزی، عامل اصلی تغذیه‌کننده این هسته‌های فرین به شمار می‌روند. همپوشانی مکانی و پایداری سیگنال در این سه آستانه، یک طبقه‌بندی قطعی از پتانسیل خطر فرسایش بادی و توزیع کانون‌های گردوخاک ارائه می‌دهد. گروه نخست، متشکل از سرخس، خواف، تایباد و باخرز به‌عنوان کانون‌های بحرانی و دائمی و گروه دوم شامل تربت‌جام، صالح‌آباد، بجستان و گناباد در جایگاه هسته‌های ثانویه شناسایی می‌شوند (شکل ۴). این تقارن مکانی با گرادیان‌های خشکی اقلیمی، ضعف پوشش گیاهی، رهاشدگی اراضی زراعی، افت رطوبت سطحی خاک و فقدان موانع کوهساری همخوانی کامل دارد. فعالیت مستمر این کانون‌ها بودجه تابشی سطح، توازن انرژی، کارایی فتوسنتزی اکوسیستم‌های نیمه‌خشک و کیفیت جوی را به‌شدت دگرگون کرده و آنها را به منابع اصلی تغییر بازخوردهای اقلیم محلی تبدیل کرده است.



شکل ۴. توزیع مکانی فراوانی رخداد عمق نوری هواویزها طی دوره آماری بر پایه محصول مشاهداتی MAIAC با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر در پهنه شمال شرق ایران. الگوهای فضایی بر مبنای سه کلاس‌بندی شدت رخداد شامل آستانه $AOD \geq 0.25$ (رژیم پس‌زمینه و رخداد‌های ضعیف)، آستانه $AOD \geq 0.50$ (تراکم متوسط تا شدید هواویزها) و آستانه $AOD \geq 1.0$ (طوفان‌های فرین و بحرانی گردوخاک) گروه‌بندی شده‌اند.

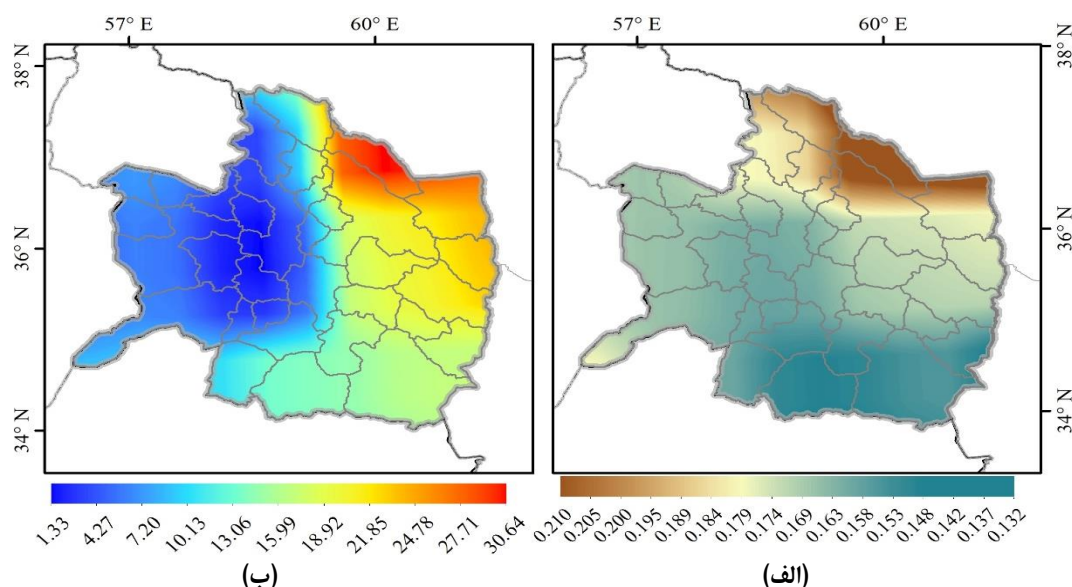
شبیه‌سازی آینده عمق نوری هواویزها تحت گرمایش جهانی با شبیه‌سازی‌های CMIP6-HighResMIP در شمال شرق ایران

شبیه‌سازی دوره تاریخی خروجی CMIP6-HighResMIP طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴، عمق نوری هواویزها را در گستره فضایی شمال شرق ایران در دامنه ۰/۱۳ تا ۰/۲۱ برآورد می‌کند. هسته بیشینه بار هواویزها با مقادیر ۰/۲۰ تا ۰/۲۱ نوار پیوسته‌ای در بخش‌های شمال شرقی تشکیل می‌دهد و پهنه میانی با مقادیر ۰/۱۸ تا ۰/۲۰ مرزهای شرقی را پوشش می‌دهد. مقادیر کمینه در محدوده ۰/۱۳ تا ۰/۱۵، با گسترش جزئی تا ۰/۱۶، در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی متمرکز هستند. خروجی شبیه‌سازی شده با کاهش بیشینه‌های مشاهداتی از ۰/۴۳ به ۰/۲۱

و هم‌زمان افزایش سطح پایه پس‌زمینه ($AOD \geq 0.25$)، کنتراست مکانی توزیع هواویزها و شدت رخداد‌های فرین را تعدیل کرده است (شکل ۵-الف).

هموارسازی زیرشبکه‌ای^۱ در برونداد همادی CMIP6-HighResMIP، ماهیت فیزیکی رخداد‌های فرین شرقی را در مقیاس محلی مخدوش می‌کند. کانون‌های فعال گردوخاک در دشت‌های پایاب و بستر خشک تالاب‌های مرزی، مساحتی به مراتب کمتر از سلول محاسباتی مدل دارند. فرآیند میانگین‌گیری مکانی-زمانی، رخداد‌های متوسط تا شدید ($AOD \geq 0.5$) و طوفان‌های فرین ($AOD \geq 1.0$) را در سطح شبکه پراکنده کرده و به مقادیر بالا-متوسط کاهش می‌دهد. ساده‌سازی عوارض توپوگرافیک و میدان باد در شبیه‌سازی‌ها، اثر کانالیزه شدن جریان‌های سطحی ناشی از باد‌های غربی-شمال غربی در مناطق شرقی را تضعیف می‌کند. به‌طور کلی ارزیابی مدل در پارامترسازی رطوبت خاک، پوشش گیاهی و آستانه سرعت باد اصطفاک‌ی، نرخ انتشار ذرات در کانون‌های شرقی را کمتر از پتانسیل فیزیکی واقعی برآورد می‌کند.

پیش‌نگری‌های CMIP6-HighResMIP برای دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰، تغییرات نسبی AOD را در تمام گستره منطقه با مقادیر مثبت در دامنه ۱/۳۳ تا ۳۰/۶۴ درصد نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهد. بیشینه پاسخ سامانه اقلیمی به گرمایش جهانی در شمال شرق منطقه با نرخ جهش ۲۷/۷ تا ۳۰/۶۴ درصد رخ خواهد داد. کمربند شرق-شمال شرق افزایشی در محدوده ۲۱/۹ تا ۲۷/۷ درصد و بخش‌های شرقی و جنوب شرقی افزایشی در بازه ۱۵ تا ۲۱/۹ درصد را تجربه می‌کنند. کمترین حساسیت به تغییرات آینده در بخش‌های غربی و مرکزی با نوسان ۱/۳۳ تا ۱۰/۱ درصد شبیه‌سازی شده است که در هسته مرکزی این مقادیر به حداقل ۱/۳۳ تا ۴/۲۷ درصد می‌رسد (شکل ۵-ب). تشدید بیابان‌زایی ناشی از افت رطوبت خاک، آستانه سرعت باد لازم برای آغاز فرسایش بادی را به شدت کاهش می‌دهد. تغییر در سازوکار گردش‌های جوی، ظرفیت حمل ذرات از چشمه‌های گردوخاک فرامرزی به ویژه در عرض‌های شمالی را تقویت کرده و چرخه‌های بازخورد مثبت ایجاد می‌کند.



شکل ۵. توزیع فضایی عمق نوری هواویزها (AOD) و پاسخ اقلیمی آن به گرمایش جهانی در بهمنه شمال شرق ایران بر اساس خروجی CMIP6-HighResMIP (الف) اقلیم‌شناسی شاخص AOD طی دوره تاریخی (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴). (ب) تغییرات نسبی AOD (بر حسب درصد) را برای دوره شبیه‌سازی آینده (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) شبیه‌سازی می‌کند.

بارگذاری حرارتی ناشی از افزایش AOD در جو متراکم آینده، تراز تابشی سطح-جو را دگرگون می‌سازد. کاهش تابش موج کوتاه دریافتی، با ایجاد یک سرمایش موضعی در سطح و گرمایش لایه‌های فوقانی، گرادیان‌های دمایی را تغییر داده و پایداری جو را دچار اختلال

1. Sub-grid smoothing

می‌کند. فراوانی بالای رخدادهای فرین گردوخاک ($AOD \geq 1.0$) در نواحی شرقی و افزایش تا سقف ۳۰ درصد در دهه‌های آتی (شکل ۵-ب)، غلظت ذرات معلق را فراتر از ظرفیت انطباق بیولوژیک انسان برده و شعاع دید افقی را به شکل بحرانی کاهش می‌دهد. تغییرات فیزیکی شیمیایی خاک ناشی از نهشت خشک هواویزها، بهره‌وری بوم‌نظام‌های کشاورزی و مرتعی شرق منطقه را تهدید می‌کند.

بحث

ساختار فضایی عمق نوری هواویزها در پهنه شمال شرق ایران یک ناهمگنی شدید متأثر از گرادیان‌های توپوگرافیک و دینامیک جوی را بازتاب می‌دهد. داده‌های محصول ماهواره‌ای مشاهداتی MAIAC گستره‌ای از نوسانات این متغیر را در دامنه ۰/۰۵ تا ۰/۴۳ برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ نشان داده است. هسته‌های بیشینه متمرکز در نوار شرقی و جنوب شرقی با ثبت مقادیر ۰/۲۳ تا ۰/۴۳، نقش دالان‌های انتقال بادهای ۱۲۰ روزه و مجاورت با کانون‌های برون‌مرزی قره‌قوم را در ظرفیت انتشار ذرات گردوخاک بیابانی را برجسته می‌سازند. کمربند کوهستانی شمالی و مرکزی با عملکردی مشابه یک سپر آبرودینامیک، ترابرد افقی توده‌ها را مسدود کرده و مقادیر شاخص را به کمینه ۰/۰۵ تا ۰/۱۴ کاهش داده است. روند تغییرات زمانی در سه دهه اخیر بین ۰/۰۴- تا ۰/۱۲ در دهه متغیر است. روندهای مثبت ۰/۰۴ تا ۰/۱۲ در کانون‌های شرقی محصول افت رطوبت خاک و تضعیف چسبندگی ذرات رسوبی تحت تاثیر گرمایش سطحی است. ثبات الگوهای جغرافیایی کانون‌های انتشار همراه با روندهای افزایشی، ارزیابی‌های سونگ و ژینگ (۲۰۲۵) مبنی بر پایداری فضایی مناطق مستعد گردوخاک در سناریوهای مختلف و نتایج لیو و همکاران (۲۰۲۴) در خصوص تداوم رشد بار هواویزها در محدوده‌های جغرافیایی خاص در آینده را تایید می‌کند (Liu et al., 2024).

فراوانی رخدادهای پهنه‌های بحرانی را همگام با افزایش آستانه‌ها اثبات می‌کند. رژیم پس‌زمینه با آستانه $AOD \geq 0.25$ دامنه‌ای از ۲/۲۱ تا ۳۸/۷ درصد را به ویژه در کمربند شرقی و جنوبی پوشش می‌دهد. اعمال فیلتر $AOD \geq 0.50$ ، گستره رخدادهای در هسته‌های متمرکز به ۱۷ تا ۲۳/۴ درصد محدود ساخته و نواحی غربی را عملاً از چرخه خارج کرده است. فاز فرین با آستانه $AOD \geq 1.0$ یک الگوی کاملاً نامتقارن را نمایان کرده و رخدادهای منحصراً در کانون‌های بحرانی نظیر سرخس، تایباد و خواف با فراوانی ۱/۹ تا ۱۴ درصد محدود می‌نماید. این تطابق مکانی میان گرادیان‌های خشکی، مجاورت با سطوح فعال فرسایش بادی و فرارفت زبانه‌های غلیظ فرامرزی، یافته‌های توالان و همکاران (۲۰۲۵) را در زمینه نقش محوری تفاوت در مناطق انتشار ذرات و الگوهای پیچیده گردش جوی بر ناهمگنی شدید توزیع هواویزها تایید می‌نماید (Toolan et al., 2025).

برآورد دوره تاریخی (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴) بر پایه خروجی همادی چند عضوی مدل CMIP6-HighResMIP دامنه شاخص AOD را بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۱ محدود کرده است. هموارسازی زیرشبکه‌ای در برونداد چند مدلی همادی، قله‌های مشاهداتی ۰/۴۳ را به ۰/۲۱ کاهش داده و ماهیت فیزیکی رخدادهای فرین شرقی را در مقیاس محلی کاهش می‌دهد. ارزیابی مدل در پارامترسازی رطوبت خاک، میدان باد و ویژگی‌های توپوگرافیک، نرخ انتشار در کانون‌های شرقی را بسیار کمتر از پتانسیل فیزیکی واقعی شبیه‌سازی کرده است. ناتوانی شبیه‌سازها در بازتولید توزیع مکانی طوفان‌های فرین و خطاهای ناشی از طرحواره‌های فیزیکی، مستقیماً نتایج توالان و همکاران (۲۰۲۵) و گن و همکاران (۲۰۲۶) در خصوص عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌های CMIP6 در بازنمایی فرآیندهای چرخه گردوخاک را اثبات می‌کند (Toolan et al., 2025; Gan et al., 2026).

پاسخ سامانه اقلیمی شمال شرق ایران به گرمایش جهانی در شبیه‌سازی آینده نزدیک (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰)، تغییرات نسبی شاخص AOD را با روندهای افزایشی ۱/۳۳ تا ۳۰/۶۴ درصد همراه می‌سازد. نوار شمال شرقی با افزایش ۲۷/۷ تا ۳۰/۶۴ درصدی، بالاترین حساسیت را به تشدید بیابان‌زایی و کاهش آستانه سرعت باد اصطکاکی نشان می‌دهد. بر اساس سازوکارهای پیشنهادی در مطالعات پیشین، بارگذاری حرارتی ناشی از تراکم فزاینده ذرات می‌تواند تراز تابشی سطح- جو را تحت تاثیر قرار دهد. پراکنش تشعشعات موج کوتاه توسط این ذرات، احتمال شکل‌گیری دو قطبی حرارتی (سرمايش سطحی و گرمایش فوقانی) را در پی داشته باشد که این شرایط به لحاظ تئوری، پتانسیل سرکوب سازوکار بارش‌های همرفتی را داراست. اگرچه متغیرهایی نظیر تابش، بارش و رطوبت خاک در مطالعه حاضر مستقیماً تحلیل نشده‌اند، اما روندهای مشاهده شده در این پژوهش با فرض وابستگی فیزیکی انتشار و نهشت گردوخاک به تغییرات میدان‌های هواشناسی

منطقه‌ای و فعال‌سازی احتمالی چرخه‌های بازخورد مثبت خشکی - جو هم‌خوانی دارد. این مفروضات با پیش‌نگری‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۳) در زمینه افزایش انتشار ذرات گردو خاک بیابانی از چشمه‌های اصلی در اقلیم گرم آینده و نقش واداشت‌های تابشی آنها کاملاً همسو می‌باشد (Zhao et al., 2023).

نتیجه‌گیری

سامانه گردو خاک در شمال شرق ایران ساختاری به‌شدت ناهمگن و متمرکز دارد. تحلیل داده‌های مشاهداتی ماهواره‌ای نشان می‌دهد بیشترین بار هواویزی و قوی‌ترین روندهای افزایشی شاخص عمق نوری هواویزها (AOD) در نوار شرقی و جنوب شرقی منطقه متمرکز است. پهنه‌های دربرگیرنده سرخس، تایباد، خواف، باخرز، صالح‌آباد و تربت‌جام هسته‌های اصلی انتشار و نهشت گردو خاک را تشکیل می‌دهند. نواحی شمالی و مرکزی، شامل کمربندهای کوهستانی و کوهپایه‌ای، کمینه‌های هواویزهای گردو خاک و روندهای ضعیف یا منفی را در همین بازه زمانی تجربه کرده‌اند. تفکیک ساختاری این کانون‌ها از پهنه‌های گذرا نیازمند ارزیابی فراوانی رخدادها (FOO) بر پایه آستانه‌های شدت است. رخدادهای پس‌زمینه و ضعیف ($AOD \geq 0.25$) گستره فضایی وسیعی را در منطقه پوشش می‌دهند. رخدادهای متوسط تا شدید ($AOD \geq 0.50$) و طوفان‌های گردو خاک فرین ($AOD \geq 1.0$) منحصراً به چند کانون مشخص در نوار شرقی و جنوب شرقی محدود می‌شوند.

بازنمایی کانون‌های رخداد گردو خاک فرین محلی در شبیه‌سازی‌های اقلیمی با محدودیت‌هایی روبه‌رو است به طوری که ارزیابی برون‌داد دوره تاریخی CMIP6-HighResMIP نشان می‌دهد که مدل با وجود درک الگوی توزیع AOD، بیشینه‌های مشاهداتی را به طور محسوسی کاهش داده و رخدادهای موضعی شدید را در سطح شبکه هموار می‌سازد. تغییر رفتار سامانه اقلیمی فشار مستقیمی بر بوم‌نظام‌های نیمه‌خشک و خشک شرق منطقه وارد می‌کند. افزایش مقادیر AOD تداوم رخدادهای فرین، توازن تابشی سطح، پایداری جو، کیفیت هوا، نرخ نهشت خشک و کارکرد اکوسیستم‌های زراعی و مرتعی را دستخوش تغییر می‌کند. تقاطع بالاترین بار هواویزی کنونی با مستعدترین مناطق برای تشدید آینده در کانون‌های شرقی، شکنندگی محیطی را تشدید کرده و ظرفیت تاب‌آوری سامانه‌های طبیعی و انسانی را تضعیف می‌کند.

مدیریت محیط‌زیستی در این پهنه نیازمند گذار از الگوهای یکپارچه به رهیافت‌های کانون‌محور است. هسته‌های پیرامونی سرخس، خواف، تایباد و باخرز، به‌عنوان مولدهای اصلی بازتولید گردو خاک، بالاترین اولویت را ایجاب می‌کنند. ادغام مشاهدات ماهواره‌ای MAIAC با برون‌داد مدل‌های HighResMIP برای شناسایی دقیق این پهنه‌های بحرانی و کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های آینده الزامی است. مدیریت گردو خاک در شمال شرق ایران یک مؤلفه ساختاری در راهبرد سازگاری با گرمایش جهانی است و مستلزم سیاست‌گذاری آینده‌نگر، فضا‌محور و مبتنی بر شواهد کمی در تقاطع کانون‌های با بار فعلی هواویزهای گردو خاک بالا و استعداد تشدید آن در آینده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید وی است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: عباسعلی داداشی رودباری تهیه گزارش پژوهش: عباسعلی داداش رودباری تحلیل داده‌ها: عباسعلی داداش رودباری

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش حمایت مالی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

نویسنده بر خود لازم می‌داند از داوران محترم برای بررسی دقیق، نظرات سازنده و پیشنهادات ارزشمندشان که نقش بسزایی در ارتقا و بهبود کیفیت این مقاله داشت، صمیمانه سپاسگزاری نماید.

منابع

- احمدی، رامین؛ علیزاده، امید و ثابت قدم، سمانه (۱۴۰۳). چشمه‌های موثر بر وقوع گردوخاک در منطقه تهران با کاربست داده‌های MERRA-2. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۸ (۴)، ۲۱-۳۷. <https://doi.org/10.30499/ijg.2024.425042.1552>
- خان سالاری، سکینه؛ مجیدی داشلی برون، عثمان؛ نیکزادفر، مریم، و ملاعرازی، عبدالجبار (۱۴۰۲). تغییرات زمانی و مکانی گردوخاک در استان گلستان با استفاده از عمق نوری هواویزها و تأثیرپذیری این استان از بیابان‌های ترکمنستان. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۹ (۲)، ۵۱۷-۵۴۰. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462>
- خدایار، فاطمه؛ انصاری، محمد رضا؛ حجتی، سعید، و خدایار، الهام (۱۴۰۴). مقایسه الگوریتم‌های یادگیری ماشین به منظور تخمین غلظت ذرات PM10 با استفاده از شاخص AOD و برخی پارامترهای هواشناسی. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۱)، ۱۲۷-۱۵۰. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381356.669783>
- درگاهیان، فاطمه؛ موسیوند، یوسف، و چراغی، کتابون (۱۴۰۴). تغییرات مساحت تالاب‌های هامون و نقش آن در رخداد طوفان‌های گرد و غبار در دشت سیستان. *محیط‌شناسی*، ۵۱ (۴)، ۴۵۳-۴۷۲. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.406010.1008652>
- رضائی، محمد، و فرج‌زاده، منوچهر (۱۴۰۴). تحلیل تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک خاورمیانه و شمال آفریقا بر آب‌وهوای ایران. *فیزیک زمین و فضا*، ۵۱ (۱)، ۲۶۷-۲۸۷. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385133.1007643>
- فرهادی‌پور، سعید؛ آزادی، مجید؛ علی اکبری بیدختی، عباسعلی؛ علیزاده چوبری، امید، و سیاری، حبیب‌الله (۱۳۹۶). توفان‌های خاک در منطقه غرب و جنوب غرب ایران و تأثیر آنها بر شارهای تابشی: مطالعه موردی. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۱ (۳)، ۷۵-۸۹. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080336.1396.11.3.6.2>

References

- Ahmadi, R., Alizadeh, O., & Sabetghadam, S. (2024). Identification of sources of dust that influence Tehran using the MERRA-2 data. *Iranian Journal of Geophysics*, 18(4), 21-37. <https://doi.org/10.30499/ijg.2024.425042.1552> [in Persian]
- Aryal, Y. N., & Evans, S. (2021). Global Dust Variability Explained by Drought Sensitivity in CMIP6 Models. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(9), e2021JF006073. <https://doi.org/10.1029/2021JF006073>
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U. and Rasch, P. (2013). Clouds and aerosols. 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. 571-657). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>
- Burney, J., & Ramanathan, V. (2014). Recent climate and air pollution impacts on Indian agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(46), 16319–16324. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317275111>
- Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A. Y., Sáez, A. E., & Betterton, E. A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, 487, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.138>
- Dargahian, F., Mousivand, Y., & Cheraghi, K. (2026). Changes in the Area of the Hamoun Wetlands and Their Role in Dust Storm Occurrences in the Sistan Plain. *Journal of Environmental Studies*, 51(4), 453-472. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.406010.1008652> [in Persian]
- Farhadipour, S., Azadi, M., Aliakbari Bidokhti, A., Alizadeh Choobari, O., & Sayari, H. A. (2017). Dust storms in west and southwest Iran and their impact on radiation fluxes: A case study. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(3), 75-89. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080336.1396.11.3.6.2> [in Persian]
- Fiedler, S., Van Noije, T., Smith, C. J., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Kirkevåg, A., ... & Schulz, M. (2023). Historical changes and reasons for model differences in anthropogenic aerosol forcing in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104848. <https://doi.org/10.1029/2023GL104848>
- Gan, Y., Zhang, Z., Chu, W., Ding, J., & Ren, Y. (2026). Assessment and prediction of dust emissions, deposition and radiation forcing in Central Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 26, 3881–3900. <https://doi.org/10.5194/acp-26-3881-2026>
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3).
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International*, 63, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>
- Haarsma, R. J., Roberts, M. J., Vidale, P. L., Senior, C. A., Bellucci, A., Bao, Q., Chang, P., Corti, S., Fučkar, N. S., Guemas, V., Von Hardenberg, J., Hazeleger, W., Kodama, C., Koenig, T., Leung, L. R., Lu, J., Luo, J.-J., Mao, J., Mizielinski, M. S., ... & Von Storch, J.-S. (2016). High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 4185–4208. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4185-2016>
- Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A., J., P., Burton, C., Betts, R., A., Van Der Werf, G. R., Stich, S., Canadell, J. G., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S. H., & Le Quéré, C. (2022). Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 60(3), e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- Khansalari, S., Majidi Dashli Brun, O., Nikzadfar, M., & Mollaarazi, A. (2023). Temporal and spatial changes of dust in Golestan province using AOD (Aerosol Optical Depth) and the affectability of this province from the deserts of Turkmenistan. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 517-540. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462> [in Persian]
- Khodayar, F., Ansari, M., Hojati, S. & Khodayar, E. (2025). Comparing machine learning algorithms for estimating PM10 particle concentration using AOD and selected meteorological parameters. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1), 127-150. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.381356.669783> [in Persian]
- Liu, J., Wang, X., Wu, D., Wei, H., Li, Y., & Ji, M. (2024). Historical footprints and future projections of global dust burden from bias-corrected CMIP6 models. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00550-9>
- Lyapustin, A. I., Wang, Y., Laszlo, I., Hilker, T., Hall, F. G., Sellers, P. J., Tucker, C. J., & Korkin, S. V. (2012). Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, 127, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.002>
- Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S., & Huang, D. (2018). MODIS Collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 5741–5765. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5741-2018>

- Lyapustin, A., Wang, Y., Laszlo, I., Kahn, R., Korkin, S., Remer, L., Levy, R., & Reid, J. S. (2011). Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 116, Article D03211. <https://doi.org/10.1029/2010JD014986>
- Mahowald, N. M., Kloster, S., Engelstaedter, S., Moore, J. K., Mukhopadhyay, S., McConnell, J. R., ... & Zender, C. S. (2010). Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22), 10875–10893. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10875-2010>
- Mhawish, A., Banerjee, T., Sorek-Hamer, M., Lyapustin, A., Broday, D. M., & Chatfield, R. (2019). Comparison and evaluation of MODIS Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) aerosol product over South Asia. *Remote Sensing of Environment*, 224, 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.033>
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*, 24, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Munkhtsetseg, E., Shinoda, M., Gillies, J. A., Kimura, R., King, J., & Nikolich, G. (2016). Relationships between soil moisture and dust emissions in a bare sandy soil of Mongolia. *Particuology*, 28, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.03.001>
- Rezaei, M., & Farajzadeh, M. (2025). Analysis of the effect of atmospheric dust corridors in the Middle East and North Africa on Iran's climate. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 267-287. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385133.1007643> [in Persian]
- Rodríguez, S., Riera, R., Fonteneau, A., Alonso-Pérez, S., & López-Darias, J. (2023). African desert dust influences migrations and fisheries of the Atlantic skipjack-tuna. *Atmospheric Environment*, 312, 120022.
- Samset, B. H. (2022). How cleaner air changes the climate. *Science*, 376(6593), 573-574. (Referenced conceptually in text via Samset et al., 2018/2022 mechanism).
- Sen, P.K. (1968), Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379–1389.
- Stevens, B., Fiedler, S., Kinne, S., Peters, K., Rast, S., Müsse, J., ... & Mauritsen, T. (2017). MACv2-SP: A parameterization of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect for use in CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 433-452. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-433-2017>
- Superczynski, S. D., Kondragunta, S., & Lyapustin, A. I. (2017). Evaluation of the multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC) aerosol algorithm through intercomparison with VIIRS aerosol products and AERONET. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 3005–3022. <https://doi.org/10.1002/2016JD025720>
- Tanaka, T. Y., & Chiba, M. (2006). A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.002>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Toolan, C. A., Amooli, J. A., Wilcox, L. J., Samset, B. H., Turner, A. G., & Westervelt, D. M. (2025). Strong intermodel differences and biases in CMIP6 simulations of PM2.5, aerosol optical depth, and precipitation over Africa. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 10523–10557. <https://doi.org/10.5194/acp-25-10523-2025>
- Zhao, A., Ryder, C. L., & Wilcox, L. J. (2022). How well do the CMIP6 models simulate dust aerosols?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(3), 2095–2119. <https://doi.org/10.5194/acp-22-2095-2022>
- Zhao, Y., Yue, X., Cao, Y., Zhu, J., Tian, C., Zhou, H., Chen, Y., Hu, Y., Fu, W., & Zhao, X. (2023). Multi-model ensemble projection of the global dust cycle by the end of 21st century using the Coupled Model Intercomparison Project version 6 data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 7823–7838. <https://doi.org/10.5194/acp-23-7823-2023>