



Research Article

Forecasting of aerosols in southwest Asia based on SSP scenarios of CMIP 6 modelsMahmood Ahmadi*¹ , Negar Mohamadi Mehr¹

1-Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 02 Jul 2023 Accepted: 18 Jan 2024

Extended Abstract

Introduction: Climate change has had irreversible effects on the planet Earth. The impacts of these changes are observable in all natural and human phenomena. One of the affected phenomena by climate change is dust storms. Besides their short-term and long-term effects, these storms significantly influence air quality on both local and global scales. In recent decades, the frequency of dust storms has increased due to climate variations and human activities, and it is predicted that this increasing trend will continue in the future. Investigating the effects of climate change on dust storms in Southwest Asia, as one of the most significant dust storm hotspots globally, holds great importance. The objective of this research is to examine the impacts of climate change and forecast dust storms in Southwest Asia using the GRDL-ESM4 model from the CMIP6 model ensemble under the optimistic scenario (SSP1.2.6) during the near-future period (2021-2060).

Materials and methods: Southwest Asia is located in the global desert belt. The intensification of climate change in this region has distinct impacts on the trends of dust storms, especially mineral dust storms. Therefore, this study focuses on forecasting dust storms in Southwest Asia using the CMIP6 model ensemble, specifically the GFDL-ESM4 model, under the optimistic scenario (SSP1-2.6). The research methodology involves initially using a 40-year historical period (1975-2014) to analyze dust storm anomalies. Then, the CMIP6 model ensemble, specifically the GRDL-ESM4 model, is utilized to examine the dust storm trends until the end of the present century. Furthermore, the optimistic scenario (SSP1-2.6) is employed for the near-future forecasting period (2021-2060).

Results and discussion: The results show that the maximum amount of dust storms occurs during the summer and spring seasons. In the summer season, the significant increase in temperature and decrease in precipitation contribute to the highest level of dust storms. The spring season exhibits a high level of dust storms compared to other seasons, with northern latitudes having more dust storms than southern latitudes. The minimum dust storm occurrence is observed during the autumn and winter seasons. Autumn is characterized by decreasing temperatures and increasing precipitation processes, leading to a reduction in dust storm frequency. In the winter season, the semi-Arabian Peninsula, especially the eastern regions, experiences the highest dust storm occurrence. In the spring season, the eastern part of the Arabian Peninsula, during the summer season, the southeastern regions of the Arabian Peninsula and southeastern Iran, and during the autumn season, the northern half of Arabia and eastern Iran have the highest frequency of dust storms. According to the optimistic scenario, the summer and spring seasons have the highest dust storm occurrence. Furthermore, it is evident that the intensity of dust storm trends will be higher in the southeastern regions of the Arabian Peninsula, the Makran coasts, the northern half of Iran, northern Arabia, and between the rivers compared to other areas.

Conclusion: In general, southern latitudes experience higher levels of dust storms compared to northern latitudes. The primary center of dust storms is located over the Arabian Peninsula in early winter, gradually shifting towards the eastern regions. During this season, the center of dust storms moves from eastern Arabia to southeastern parts of the Arabian Peninsula and southeastern Iran.

Keywords: Forecasting, Climate change, Southwest Asia, CMIP6, Aerosol.

Citation: Ahmadi, M. and Mohamadi Mehr, N., 2024. Forecasting of aerosols in southwest Asia based on SSP scenarios of CMIP 6 models, *Res. Earth. Sci.* 15(1), (131-141) DOI: 10.48308/esrj.2023.104050

* Corresponding author E-mail address: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir



پیش‌نگری هواویزهای جنوب غرب آسیا براساس سناریوهای SSP مدل‌های CMIP6

محمود احمدی*¹، نگار محمدی مهر¹

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۸

چکیده گسترده

مقدمه: تغییرات اقلیمی اثرات غیر قابل برگشتی بر روی کره زمین برجای گذاشته‌اند. اثرات این تغییرات بر تمامی پدیده‌های طبیعی و انسانی قابل مشاهده می‌باشد. یکی از پدیده‌های متأثر از تغییر اقلیم هواویزها می‌باشند. این پدیده علاوه بر تأثیرات کوتاه مدت و بلندمدت به صورت قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت هوا در مقیاس محلی و جهانی تأثیر می‌گذارد. در چند دهه اخیر، فراوانی طوفان‌های گرد و غبار به علت تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که روند افزایشی آن در آینده نیز ادامه داشته باشد. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر هواویزهای جنوب غرب آسیا، به عنوان یکی از مهم‌ترین کانون‌های هواویزی جهان اهمیت بسزایی دارد. هدف این پژوهش بررسی اثرات تغییر اقلیم و پیش‌نگری هواویزهای جنوب غرب آسیا با استفاده از پرونداد مدل GRDL-ESM4 از مجموعه مدل‌های CMIP6 تحت سناریوی خوشبینانه (SSP1.2.6) طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) است.

مواد و روش‌ها: جنوب غربی آسیا در کمربند بیابانی جهان قرار دارد. روند تشدید تغییر اقلیم در این منطقه بر روند هواویزها به ویژه هواویزهای گردوغبار معدنی تأثیرات متمایزی بر جای می‌گذارد. لذا در این پژوهش به پیش‌نگری هواویزها در جنوب غرب آسیا با مجموعه مدل‌های CMIP6 مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی خوش بینانه (SSP1-2.6) پرداخته شده است. روش تحقیق، ابتدا برای بی‌هنجاری هواویزها از یک دوره تاریخی ۴۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۷۵) استفاده شد. سپس برای بررسی روند هواویزها تا پایان قرن حاضر، از مجموعه مدل‌های CMIP6، مدل GRDL-ESM4 استفاده گردید. در ادامه سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) برای دوره پیش‌نگری آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) استفاده گردید.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد بیشینه مقدار هواویز در فصل‌های تابستان و بهار قرار دارد. مقدار هواویزها در فصل تابستان به علت افزایش محسوس دما و کاهش بارش به بیش‌ترین مقدار خود رسیده است. فصل بهار از مقدار هواویز بالایی بین فصول سال برخوردار است. در این فصل عرض‌های شمالی نسبت به عرض‌های جنوبی هواویز بیش‌تری دارند. کمینه آن در فصل‌های پاییز و زمستان قرار دارد. فصل پاییز با کاستی دما و افزایش فرآیندهای بارش همراه می‌باشد که همین مسئله سبب شده است که فراوانی هواویزها رو به کاهش رود. در فصل زمستان شبه جزیره عربستان به ویژه نواحی شرقی، در فصل بهار شرق شبه جزیره عربستان، در فصل تابستان جنوب شرق شبه جزیره عربستان و جنوب شرق ایران و در فصل پاییز نیمه شمالی عربستان و شرق ایران بیش‌ترین فراوانی هواویز را داشته‌اند. طبق سناریوی خوش‌بینانه فصل‌های تابستان و بهار بیش‌ترین مقدار هواویز را دارند. همچنین مشخص گردید که شدت روند هواویزها در مناطق جنوب شرق شبه جزیره عربستان، سواحل مکران، نیمه شمالی ایران، شمال عربستان و بین‌النهرین بیش‌تر از سایر مناطق خواهد بود.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی عرض‌های جنوبی از مقادیر هواویز بیش‌تری نسبت به عرض‌های شمالی برخوردارند. کانون اصلی هواویزها در اوایل زمستان بر روی شبه جزیره عربستان قرار دارد و رفته رفته این کانون به نواحی شرق عربستان محدود می‌شود. کانون هواویزها در این فصل از شرق عربستان به جنوب شرقی شبه جزیره عربستان و جنوب شرق ایران جابه جا شده است.

واژگان کلیدی: پیش‌نگری، تغییر اقلیم، جنوب غرب آسیا، مدل‌های CMIP6، هواویز.

استناد: احمدی، م. و محمدی مهر، ن. ۱۴۰۳. پیش‌نگری هواویزهای جنوب غرب آسیا براساس سناریوهای SSP مدل‌های CMIP6،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۵(۱)، (۱۳۱-۱۴۱)، DOI: 10.48308/esrj.2023.104050

مقدمه

فیزیکی و محاسباتی گوناگون برای پیش‌نگری اقلیم دهه های آینده کره زمین استفاده می‌شود. در آخرین گزارش IPCC از فاز ششم مدل تحت عنوان CMIP6 استفاده شده است. در مدل‌های اقلیمی فاز ششم (CMIP6) از تلفیق خط سیرهای اجتماعی- اقتصادی مشترک در کنار خط سیرهای نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تحلیل پس خورهای بین تغییرات اقلیمی و فاکتورهای اجتماعی - اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شد (Riahi et al, 2017). فرایندگرد و غبار از اواخر دهه ۱۹۸۰ در مدل‌های جهانی اقلیم برای شبیه‌سازی گرد و غبار گنجانده شده است (Shao et al, 2011). این مدل‌ها با دقت بالا، قابلیت‌های خاصی را در شبیه‌سازی فرآیندهای گرد و غبار در مقیاس جهانی نشان می‌دهند. با این حال، عدم قطعیت‌های قابل توجهی در شبیه‌سازی گرد و غبار به دلیل اندازه و شکل ذرات گرد و غبار و تفاوت‌های ساختاری مدل‌ها وجود دارد (Adebiyi and Kok, 2020). عدم قطعیت در شبیه‌سازی گرد و غبار پیامدهای مهمی برای بودجه تابش متوسط جهانی و بسیاری از فرآیندهای تحت‌تأثیر گرد و غبار (مانند ابرها) (Huang et al, 2014) دارد. همچنین گرد و غبارهای طبیعی به‌طور بالقوه سهم بیشتر (۷۵ درصد) (Ginoux et al, 2012) و در عین حال نامشخص در میزان آئروسول‌های جهانی در شکل‌دهی به تغییرات آب و هوایی آینده دارند. بنابراین، درک عملکرد شبیه‌سازی گرد و غبار در آخرین نسل مدل‌های آب و هوایی بسیار مهم است (Zhao et al, 2022). با توجه به عدم قطعیت‌های زیاد در نسل‌های قبلی مدل‌های آب و هوایی، ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 مهم است. به‌ویژه، این مدل‌ها چقدر فرآیندهای گرد و غبار را در مقایسه با یکدیگر و در مقایسه با مشاهدات قبلی شبیه‌سازی می‌کنند. با توجه به اینکه هواویزها نیز به‌طور مستقیم از تغییرات آب و هوایی تأثیر می‌پذیرند مطالعات مختلفی در این زمینه توسط پژوهشگران به انجام رسیده است. هارا و همکاران (Hara et al, 2006)، تغییرات طولانی مدت گرد و غبارهای آسیا و ارتباط آن با فاکتورهای اقلیمی طی دوره ۲۰۰۴-۱۹۷۲ مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روند روزهای گرد و غباری در نواحی بیابان گبی بین ۱۹۸۰-۱۹۹۷ روند کاهشی داشته و برای سال‌های اخیر ۲۰۰۰-۲۰۰۲ روند افزایشی داشته که کاهش روزهای گرد

امروزه پدیده تغییر اقلیم به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های جامعه بشری و مجامع علمی جهان به شمار می‌آید (Rolnick et al, 2022). این پدیده می‌تواند سیستم‌های مختلفی همچون منابع آب، محیط زیست، بهداشت، سلامتی و سایر جنبه‌های دیگر را تحت‌تأثیر قرار دهد. براساس گزارش ششم IPCC، دمای کره زمین در سال ۲۰۲۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰، ۱/۵ درجه سانتیگراد گرم‌تر شده است (IPCC, 2021). دمای بالای هوا، بارندگی کم، ضعیف بودن پوشش گیاهی و افزایش سرعت باد منجر به تغییرات زیست محیطی از جمله گسترش بیابان‌ها و افزایش گرد و غبار می‌شود (Yoshino, 2002) به گونه‌ای که پژوهشگران، فرآیندهای تغییر اقلیم و بیابان‌زایی را از عوامل تولید و تشدید کننده پدیده گرد و غبار می‌دانند (Heidary, 2015). افزایش دمای هوا، خشکسالی، تغییر در الگوی باد و توزیع بارندگی از عوامل اصلی تولید گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه خشک شناخته شده‌اند (Keramat et al, 2011). بنابراین مشاهده می‌گردد که شکل‌گیری پدیده گرد و غبار ارتباط نزدیکی با شرایط اقلیمی مانند بارندگی، دما و همچنین ویژگی‌های سطح زمین مانند پوشش گیاهی، بافت خاک و رطوبت خاک سطحی دارد تا جائیکه تغییر در متغیرهای اقلیمی در نتیجه تشدید تغییر اقلیم می‌تواند بر رویکرد هواویزها مؤثر واقع شود. این پدیده علاوه بر تأثیرات کوتاه مدت و بلندمدت به صورت قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت هوا در مقیاس محلی و جهانی تأثیر می‌گذارد. در چند دهه اخیر، فراوانی طوفان‌های گرد و غبار به علت تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که روند افزایشی آن در آینده نیز ادامه داشته باشد (Schweitzer et al, 2018). بررسی اثرات تغییر اقلیم به‌طور ویژه به خروجی مدل‌های اقلیمی وابسته است (Chen et al, 2019). این مدل‌ها از مناسب‌ترین روش‌ها برای مطالعه تغییرات اقلیم گذشته و ارزیابی اقلیم آینده هستند (Zhao et al, 2013) و قادرند سیستم اقلیمی را با لحاظ نمودن اکثر فرآیندها در مقیاس جهانی و یا قاره‌ای در مقیاس بزرگ، براساس سناریوهای اقلیمی شبیه‌سازی کنند (عباسی و همکاران، ۱۳۹۱). هم‌اکنون در مراکز بین‌المللی از مدل‌های متعددی با سناریوهای انتشار، طرحواره‌های

معلق در هوا در غرب آفریقا و سهم گرد و غبار و پوشش زمین را در تغییرات آب و هوایی آینده مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که گرم شدن هوا براساس سناریو RCP8.5 تا پایان قرن (۲۰۸۱-۲۱۰۰) در آفریقای غربی در محدوده ۴-۸ درجه سلیسوس نسبت به شرایط فعلی (۲۰۰۰-۱۹۸۱) می‌باشد؛ بر این اساس گرد و غبار در مناطق جنوبی منطقه مورد مطالعه بین ۵ تا ۲۰ درصد روندی افزایشی خواهد داشت. پاسخ منابع انتشار گرد و غبار به تغییرات آب و هوا و شبیه‌سازی دوره حاضر و آینده برای جنوب غربی ایران پژوهشی است که توسط لباب پور (Lababpour, 2020) با استفاده از سناریوهای انتشار RCP ۲/۶، ۴/۶، ۶ و ۸/۵ برای دوره ۲۰۵۰ تا ۲۰۷۰ مورد ارزیابی قرار داده شد. نتایج نشان داد منابع انتشار گرد و غبار (DES) اصلی عمدتاً با ترکیبی از دما، بارش و مدیریت استفاده از زمین هدایت می‌شوند و اثرات عامل‌های طبیعی با فعالیت‌های انسان‌شناسی قابل مقایسه است. افزایش پیش‌بینی شده DES ممکن است توفان‌های گرد و غبار را در آینده به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر کند، در نتیجه بر عملکرد اکوسیستم‌ها و همچنین سلامت انسان تأثیر می‌گذارد. رسولی و همکاران (۱۳۸۹) به تحلیل روند وقوع پدیده اقلیمی گرد و خاک در غرب کشور با استفاده از ۱۶ ایستگاه سینوپتیک در غرب ایران (۱۹ استان) و روش‌های آماری ناپارامتریک پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که با توجه به طبیعت ورودی، روش‌های آماری من - کندال کارایی مناسبی را برای تحلیل روند پدیده گرد و خاک دارد و مشخص گردید، توفان گرد و خاک غرب ایران از نظر تعداد روزهای گرد و خاک همگن نیست. حسینی قهفرخی (۱۳۹۰) با مطالعه نقش هواپیزها در تشکیل ابر و بارش در قسمت‌های مرکزی و جنوب ایران با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای طی دوره هفت ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ به این نتیجه رسید که همیشه در امتداد رشته کوه‌های زاگرس هواپیز وجود دارد. گودرزی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی توزیع زمانی و مکانی روزهای همراه با گرد و غبار در غرب و جنوب غرب ایران در بازه زمانی ۱۹۸۶-۲۰۰۸ پرداختند. آن‌ها اعلان کردند که تعداد روزهای همراه با گرد و غبار در ایستگاه‌های دهلران، اهواز و دزفول در بالاترین سطح قرار دارد و در جنوب استان‌های ایلام و خوزستان بحرانی‌ترین شرایط مشاهده شده است و از شمال به جنوب

و غباری گبی را در ارتباط با کاهش بادهای قوی در این منطقه دانستند. وانگ و فانگ (Wang and Fang, 2006) که در پژوهشی انتشار و جابه‌جایی گرد و غبار را از نظر آماری و سینوپتیکی در آسیای شرقی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند سیستم‌های سینوپتیکی که به سمت مناطق بیابانی شمال آسیا می‌وزند، اگر در سطح زمین بادهای با سرعت بیش‌تر از ۶ متر بر ثانیه ایجاد کنند ممکن است باعث گسترش توفان‌های گرد و غبار می‌شوند. کانگ و همکاران (Kang et al, 2015) اشاره کرد که روند وقوع پدیده گرد و غبار را در فلات تبت در دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۱۰ بررسی و دریافتند فراوانی گرد و غبار در این منطقه، از دهه ۱۹۷۰ روند کاهشی معناداری داشته که این کاهش در ارتباط با کاهش سرعت باد و افزایش پوشش گیاهی در منطقه بوده است. ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2016) اثرات تغییرات آب و هوایی را بر ذرات معلق گرد و غبار در شرق آسیا با استفاده از RegCM3 شبیه‌سازی کردند، نامبردگان با استفاده از مدل MIROC3 و سناریو A1B طی دو دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۱ و ۲۰۹۱-۲۰۰۰ گرد و غبار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد انتشار گرد و غبار و بار گرد و غبار در شرق آسیا به ترتیب افزایش ۲ تا ۱۴ درصدی دارد. در پژوهشی به پیش‌بینی میزان گرد و غبار آمریکا در اواخر قرن ۲۱ به دلیل تغییرات آب و هوایی توسط پو و جیناکس (Pu and Ginoux, 2017) پرداخته شد آن‌ها اعلان کردند که تغییرات فعالیت گرد و غبار در ایالات متحده در دهه اخیر عمدتاً با تغییرات بارش، عدم انسجام خاک و سرعت وزش بادهای سطحی همراه است؛ همچنین نتایج سناریو RCP8.5 برای دوره آینده نشان داد تغییرات آب و هوا باعث افزایش فعالیت گرد و غبار در دشت‌های بزرگ جنوبی از بهار تا پاییز در اواخر نیمه قرن بیست و یکم عمدتاً به دلیل کاهش بارندگی، کاهش زبری سطح و افزایش سرعت باد سطح خواهد شد. آیا مدل‌های آب و هوایی می‌توانند تغییرات دهه‌ای گرد و غبار در شرق آسیا را شبیه‌سازی کنند؟ عنوان پژوهشی است که وو و همکاران (Wu et al, 2018) به بررسی آن پرداختند؛ نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد هیچ یک از مدل‌ها نمی‌توانند کاهش مشاهده شده از فرکانس رخداد گرد و غبار را در طی سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۰۵ شرق آسیا نشان دهند. جی و همکاران (Ji et al, 2018) اثرات آب و هوایی بالقوه ذرات

به گستردگی و شدت طوفان‌های گرد و غبار در جنوب غرب آسیا طی سال‌های اخیر، به بررسی اثرات تغییرات آب و هوایی بر رویدادهای گرد و غباری با استفاده از مدل‌های CMIP6 می‌پردازد.

منطقه مورد مطالعه

جنوب غرب آسیا از بزرگ‌ترین مراکز تولید گرد و غبار در جهان به شمار می‌رود. این منطقه شامل چندین بیابان (بیابان عربی، بیابان ربع الخالی، بیابان شام، بیابان نافود، بیابان دهننا) و نواحی نیمه بیابانی (فلات ایران و دشت سیستان) است که عامل انتشار گرد و غبار چشم‌گیری می‌باشد. بر این اساس، مطالعه تغییرپذیری دقیق هواویزها در بلند مدت می‌تواند اطلاعات سودمندی در خصوص منشأ آن‌ها، وردایی زمانی- مکانی، واداشت‌های آب و هوایی و بازخورد آن در سامانه آب و هوا ارائه دهد.

منطقه، تعداد روزهای گرد و غباری افزایش می‌یابد. کرمی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی پدیده گرد و خاک و عوامل مؤثر بر آن در منطقه خاورمیانه با رویکرد لزوم انجام اقدامات کاهش‌ی تغییر اقلیم پرداختند. در این مطالعه پدیده گرد و خاک در منطقه خاورمیانه در دوره آماری ده ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸) از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. خروجی شار گرد و خاک مدل GOCAR نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر شار گرد و خاک از جنوب شرقی عربستان، جنوب شرقی عراق، منطقه‌های واقع در مرز دو کشور عراق و سوریه، مناطقی واقع در نیمه غربی ترکمنستان و بخش‌هایی از کشورهای قزاقستان و ازبکستان صورت می‌گیرد. مرور پژوهش‌های صورت گرفته نشان داد تاکنون در زمینه تاثیر تغییرات اقلیمی و پیش‌نگری هواویزها بر پایه مدل‌های CMIP6 پژوهش مستقلی در جنوب غرب آسیا انجام نشده است لذا این پژوهش با توجه



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه (غرب آسیا)

برای محاسبه، دوره پیش‌نگری از دوره تاریخی کسر گردید که بر این اساس بی‌هنجاری هواویزها در آینده محاسبه شد.

بحث و نتایج

در سده‌های اخیر روند اقلیم در مقایسه با مسیری که در گذشته طی کرده است، متفاوت می‌باشد که سبب ایجاد مبحث‌های تغییر اقلیمی شده است، در نتیجه هواویزها نیز به‌طور مستقیم از این تغییرات تأثیر می‌پذیرند. بررسی پراکنش زمانی - مکانی AOD برونداد مدل GFDL-ESM4 طی دوره تاریخی نشان داد، مقدار شاخص AOD

مواد و روش‌ها

داده‌های مدل‌های CMIP6 و روش تحلیل آنها

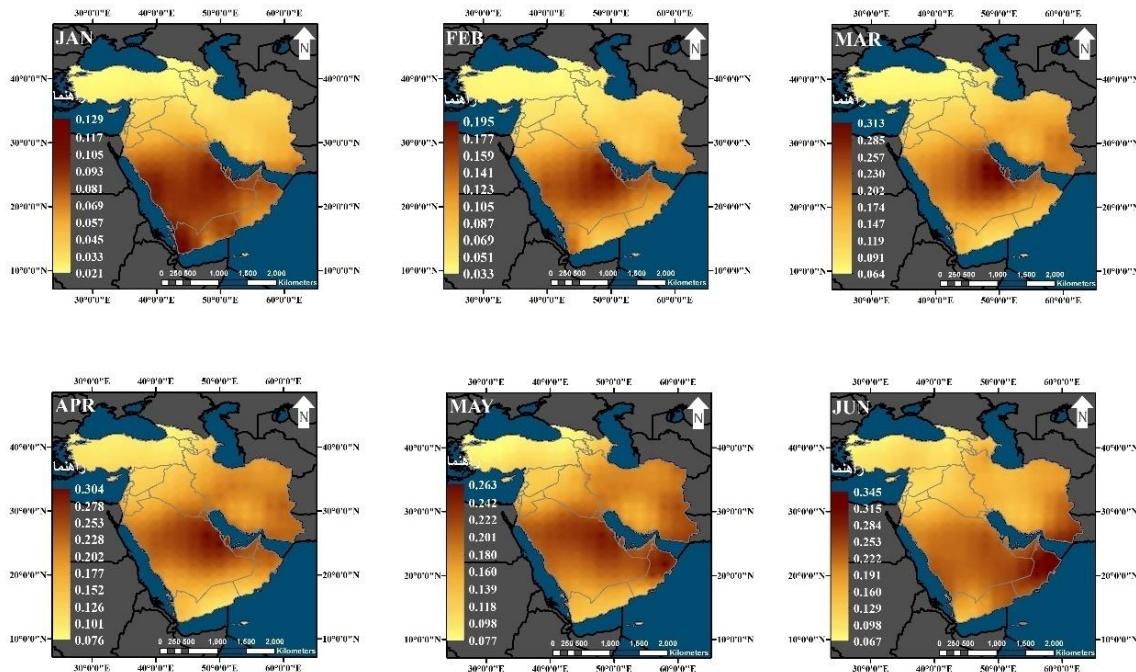
در این تحقیق برای نیل به اهداف مراحل ذیل دنبال گردید: الف) برای محاسبه بی‌هنجاری هواویزها از یک دوره تاریخی ۴۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۷۵) استفاده شده است.

ب) برای بررسی روند هواویزها (براساس مدل GFDL-ESM4) تا پایان قرن حاضر از آزمون ناپارامتریک من-کندل (MK) استفاده شده است.

ج) در ادامه سناریوی خوش‌بینانه (SSPI-2.6) برای دوره پیش‌نگری آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) استفاده گردید. طول دوره تاریخی و پیش‌نگری یکسان انتخاب شده است.

با عدد $۰/۰۶۷$ و بیشینه آن نیز در ماه ژوئن با عدد $۰/۳۴۵$ است. کانون هواویزها در این فصل از شرق عربستان به جنوب شرق شبه جزیره عربستان و جنوب شرق ایران جابه جا شده است. مناطقی که در عرض‌های شمالی هستند از هواویز کم تری برخوردار هستند که ناشی از دو علت است: (۱) دور بودن از کانون اصلی هواویز، (۲) این مناطق در طول سال از بارش بیش‌تری نسبت به عرض‌های جنوبی بهره‌مند می‌شود و همین سبب تثبیت خاک می‌شود و از سایش جلوگیری می‌شود. به‌طور کلی عرض‌های جنوبی هواویز بیش‌تری نسبت به عرض‌های شمالی دارند (شکل ۲).

در فصل زمستان بین کمینه $۰/۰۲۱$ در ماه ژانویه و بیشینه $۰/۳۱۳$ در ماه مارس در نوسان می‌باشد. با نزدیک شدن به دوره گرم سال بر مقدار هواویزها افزوده شده است. کانون اصلی هواویزها در اوایل زمستان بر روی شبه جزیره عربستان قرار دارد و رفته رفته این کانون به نواحی شرق عربستان محدود می‌شود. این منطقه جزء مناطق خشک جهان محسوب می‌شود و بیابان‌های بزرگی مانند بیابان ربع الخالی در این منطقه قرار دارد که منشا هواویزها به ویژه هواویزهای گرد و غباری می‌باشد. عرض‌های شمالی به سبب این که از کانون اصلی دور هستند، از هواویز کم‌تری برخوردارند. در فصل بهار کمینه شاخص AOD در ماه ژوئن



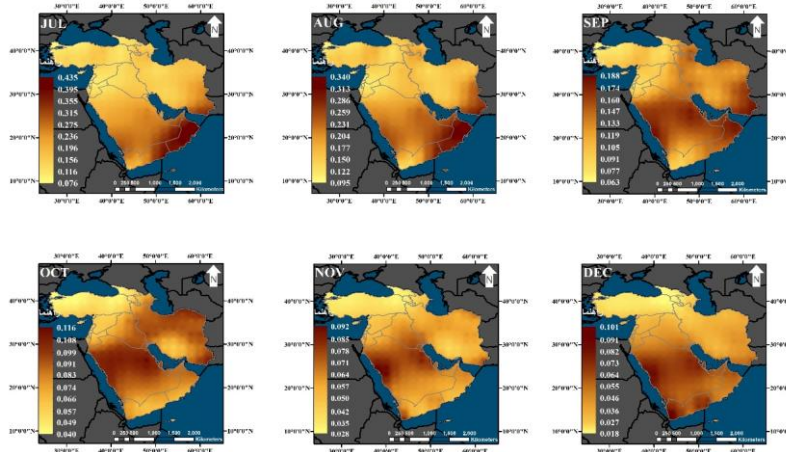
شکل ۲: پراکنش فضایی هواویزها براساس داده‌های تاریخی در فصل‌های زمستان و بهار

بیشینه این ماه مشاهده می‌شود، از پراکنندگی بالایی برخوردار است و علاوه بر شبه جزیره عربستان، جنوب شرق ایران و منطقه مرزی ایران و عراق را در بر گرفته است. در فصل پاییز کمینه شاخص AOD در ماه دسامبر با عدد $۰/۰۱۸$ و بیشینه آن در ماه اکتبر با عدد $۰/۱۱۶$ رقم خورده است. مقدار هواویزها در این فصل به حداقل مقدار خود می‌رسد و کم‌ترین مقدار آن در ماه نوامبر با بیشینه $۰/۰۹۲$ رقم خورده است. کانون هواویز در این فصل به نسبت فصول دیگر از پراکنندگی بالایی برخوردار است. در ماه اکتبر کانون

بیشینه هواویز در طول سال در تابستان اتفاق افتاده است، کمینه این ماه با $۰/۰۶۳$ در ماه سپتامبر و بیشینه آن با $۰/۴۳۵$ در ماه ژوئیه رخ داده است. حداکثر مقدار هواویز بین ماه‌های سال در ماه ژوئیه رخ داده است. این فصل در دوره خشک سال قرار دارد و به تبع کاستی رطوبت و افزایش دما سبب تقویت کانون‌های هواویزی می‌شود. کانون هواویز از جنوب شرق شبه جزیره عربستان به شبه جزیره عربستان و جنوب شرق ایران منتقل شده است. پراکنش مکانی در ماه سپتامبر با وجود کاهش محسوس که در

شامل می‌شود. همچنین به مثابه فصول دیگر عرض‌های شمالی از حداقل مقدار هواویز برخوردارند (شکل ۳).

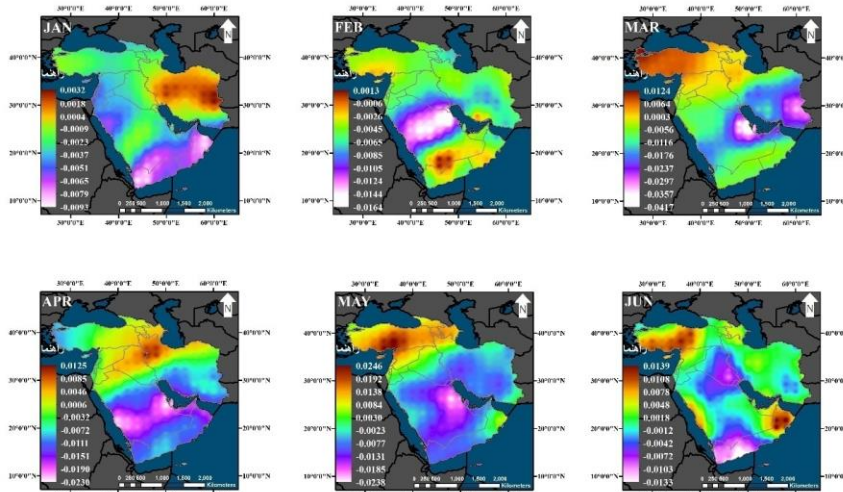
هواویزها بر نیمه شمالی عربستان و شرق ایران قرار دارد و در ماه نوامبر تنها قسمتهایی از شرق و غرب عربستان را در بر می‌گیرد. در ماه دسامبر علاوه بر عربستان یمن را نیز



شکل ۳: پراکنش فضایی هواویزها براساس داده‌های تاریخی در فصل‌های تابستان و پاییز

ایران شکل گرفته است. فصل بهار از مقدار هواویز بالایی بین فصول سال برخوردار است. در این فصل عرض‌های شمالی نسبت به عرض‌های جنوبی هواویز بیشتری دارند. کانون هواویزها در ماه آوریل با بیشینه ۰/۰۱۲۵ در شمال غرب ایران، در ماه مه با بیشینه ۰/۰۲۴۶ بر روی مرکز ترکیه و در ماه ژوئن با بیشینه ۰/۰۱۳۹ علاوه بر مرکز ترکیه بر جنوب شرقی شبه جزیره عربستان قرار دارد. کمینه شاخص AOD در ماه آوریل در مرکز بیابان عربستان، در ماه مه در شمال شرق عربستان و در ماه ژوئن در عمان و جنوب عراق شکل گرفته است (شکل ۴).

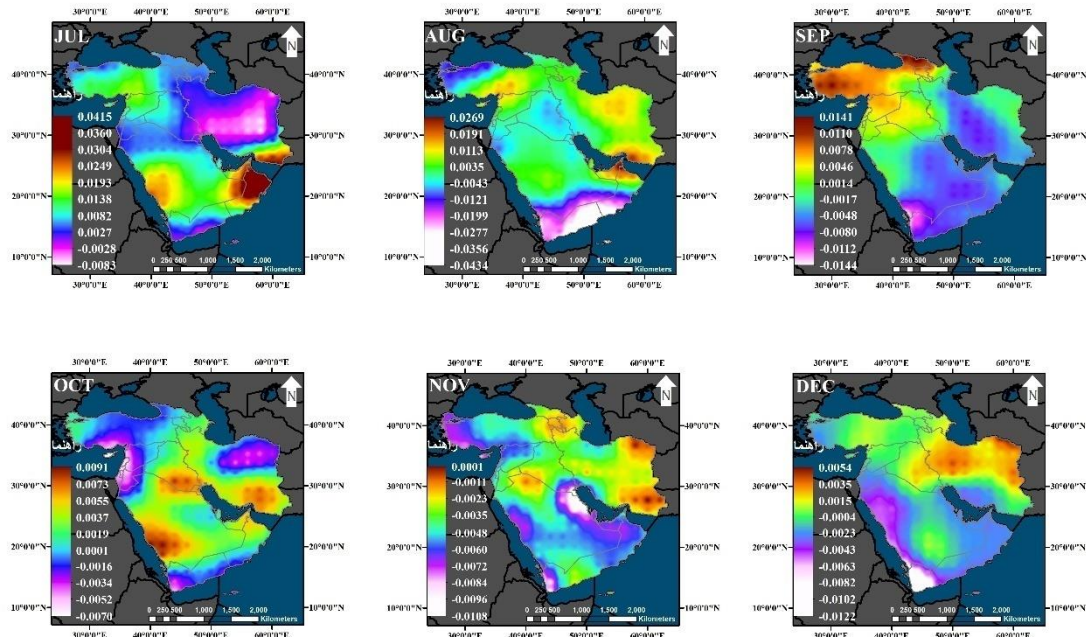
بررسی بی‌هنجاری زمانی-مکانی شاخص AOD برونداد مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی خوش بینانه ۱.۶-۲ در آینده نزدیک در فصل زمستان نشان داد، مقدار بیشینه هواویز در ماه‌های فصل زمستان بر روی مناطق مختلف قرار گرفته است، در ماه ژانویه با بیشینه ۰/۰۳۲ بر نیمه شمالی ایران، در ماه فوریه با بیشینه ۰/۰۰۱۳ بر روی بیابان رب الخالی، جنوب ترکیه و سواحل خلیج فارس و در ماه مارس با بیشینه ۰/۰۱۲۴ بر غرب ترکیه قرار دارد. همچنین کمینه آن نیز به ترتیب ماه‌های این فصل در بیابان ربع الخالی، شمال عربستان و شرق عربستان و جنوب شرق



شکل ۴: بی‌هنجاری عمق نوری هواویز براساس سناریوی SSP1-2.6 در فصل‌های زمستان و بهار در آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱).

دسامبر با عدد 0.122 و بیشینه در ماه اکتبر با عدد 0.091 رقم خورده است. کم‌ترین مقدار هواویز در این فصل در ماه نوامبر با بیشینه 0.001 می‌باشد. در این فصل کانون هواویز بر منطقه‌های متعددی قرار دارد. در ماه اکتبر در عرض‌های جنوبی یعنی در جنوب غرب عربستان، منطقه مرزی عراق، عربستان و کویت و جنوب شرق ایران، در ماه نوامبر این کانون به شرق ایران و منطقه مرزی عراق و عربستان و آذربایجان و ارمنستان جابه‌جا می‌شود. در ماه اکتبر کانون هواویز در نیمه شمالی ایران محدود می‌شود. مناطقی که از کم‌ترین پراکندگی هواویز برخوردار هستند، شامل شمال شرق ایران، جنوب و غرب ترکیه، غرب سوریه، اردن، غرب و شرق شبه جزیره عربستان می‌شود (شکل ۵).

مقدار هواویزها در فصل تابستان به علت افزایش محسوس دما و کاهش بارش به بیش‌ترین مقدار خود رسیده است. پراکندگی هواویزها در اوایل و اواسط این فصل بر روی جنوب شرق شبه جزیره عربستان و جنوب شرق ایران قرار دارد، اما در اواخر این فصل کانون هواویزها تغییر می‌کند و در عرض‌های شمالی یعنی بر روی غرب ترکیه و گرجستان قرار می‌گیرد. همچنین مناطق مرکزی ایران، جنوب شبه جزیره عربستان و جنوب غرب بیابان عربستان از کم‌ترین مقدار هواویز برخوردارند. کمینه آن در ماه اوت با عدد 0.434 و بیشینه آن در ماه ژوئیه با عدد 0.415 رقم خورده است. فصل پاییز با کاستی دما و افزایش فرآیندهای بارش همراه می‌باشد که همین مسئله سبب شده است که فراوانی هواویزها رو به کاهش رود. در این ماه کمینه در ماه



شکل ۵: بی‌هنجاری عمق نوری هواویز براساس سناریوی SSP1-2.6 در فصل‌های تابستان و پاییز در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰)

طی دوره تاریخی و تحت سناریوی اقلیمی مورد نظر منتج به یافته‌های جدیدی شده است که عبارتند از: (۱) براساس نتایج حاصل از بررسی پراکنش زمانی-مکانی AOD برونداد مدل GFDL-ESM4 طی دوره تاریخی (۱۹۷۵-۲۰۱۴) فصل‌های تابستان و بهار بیش‌ترین مقدار هواویز و فصل‌های پاییز و زمستان کم‌ترین مقدار هواویز را داشته‌اند. نتایج ما با پژوهش (Alam et al, 2014) و (Rabbani et al, 2023) که دریافتند مقدار هواویزها در

نتیجه‌گیری

جنوب غربی آسیا در کمربند بیابانی جهان قرار دارد. روند تشدید تغییر اقلیم در این منطقه بر روند هواویزها به ویژه هواویزهای گرد و غبار معدنی تأثیرات متمایزی بر جای می‌گذارد. لذا در این پژوهش به پیش‌نگری هواویزها در جنوب غرب آسیا با مجموعه مدل‌های CMIP6 مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی خوش بینانه (SSP1-2.6) پرداخته شده است. بررسی برونداد مدل GFDL-ESM4

۳) نتایج حاصل از بررسی بی‌هنجاری زمانی- مکانی AOD برونداد مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی خوش بینانه SSP1-2.6 در آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) نشان داد، در دوره‌های گرم سال ترکیه و جنوب شرق شبه جزیره عربستان بیش‌ترین مقدار هواویز و در دوره‌های سرد در فصل زمستان ایران، ترکیه و منطقه مرزی یمن و عربستان و در فصل پاییز نیمه شرقی ایران، منطقه مرزی عراق و عربستان و جنوب غرب عربستان بیش‌ترین مقدار هواویز را تجربه می‌کنند. اصغری و زینالی (۱۳۹۳) کمترین فراوانی رخداد گرد و غبار در ایران را متعلق به قسمت‌های شرقی ایران طی فصول تابستان و پاییز دانستند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

فصل بهار و تابستان در شبه جزیره عربستان، جنوب غربی پاکستان، عراق و ایران بیشتر است هم راستاست. همچنین درویشی بلورانی و همکاران (Darvishi Boloorani et al, 2021) در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که در جنوب غرب آسیا حداکثر هواویز در فصل تابستان و به دنبال آن بهار رخ می‌دهد، در حالی که پاییز و زمستان تقریباً شرایط مشابه و فراوانی کمتری دارند.

۲) در فصل زمستان شبه جزیره عربستان به ویژه نواحی شرقی، در فصل بهار شرق شبه جزیره عربستان، در فصل تابستان جنوب شرق شبه جزیره عربستان و جنوب شرق ایران و در فصل پاییز نیمه شمالی عربستان و شرق ایران بیش‌ترین فراوانی هواویز را داشته‌اند. در همین راستا، نتایج پژوهش زنگنه (۱۳۹۳) و قربانی و مدرس (۱۳۹۸) نشان داد بیشینه توفان‌های گرد و غبار ایران نیز در تابستان رخ داده و ایستگاه‌های واقع در جنوب و جنوب شرق ایران در فصل تابستان دارای بیشترین رخداد گرد و غبار هستند.

References

- Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T. and Subhan, F., 2014. Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia, *Remote sensing of environment*, v. 143, p. 216-227.
- Adebiyi, A.A. and Kok, J.F., 2020. Climate models miss most of the coarse dust in the atmosphere, *Science advances*, v. 6(15), p. 25-39.
- Asghari Sareskanrood, S. and Zeinali, B., 2014. Analyzing and Mapping of Dust Storms Seasonal Frequency over Iran for Hazards Reduction. *Environmental Management Hazards*, v. 1(2), p. 217-239. doi: 10.22059/jhsci.2014.53122 (in Persian).
- Chen, J., Brissette, F.P., Zhang, X.J., Chen, H., Guo, S. and Zhao, Y., 2019. Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology, *Climatic Change*, v. 153(3), p. 361-377.
- Darvishi Boloorani, A., Najafi, M.S., and Mirzaie, S., 2021. Role of land surface parameter change in dust emission and impacts of dust on climate in Southwest Asia, *Natural Hazards*, v. 109(1), p. 111-132.
- Goodarzi, M., Hoseini, A., Ahmadi, H., 2018. Assessing Temporal and Spatial Distribution of Dust Storm in the south and south west of Iran. *jwmseir* 2018, v. 11(39), p. 1-10, Doi: 20.1001.1.20089554.1396.11.39.9.7 (in Persian).
- Ghorbani, S., Moddress, R., 2019. Modelling the Relationship between the Frequency of Dust Storms and Climatic Variables in the Summer Time in Desert Areas of Iran. *jwss* 2019, v. 23 (3), p. 125-140 (in Persian).
- Ginoux, P., Prospero, J.M., Gill, T.E., Hsu, N.C. and 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*, v. 50(3), p. 1-21.
- Huang, J., Wang, T., Wang, W., Li, Z. and Yan, H., 2014. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119(19), p. 11-398.
- Heidary, P., 2015. Development of a model for extracting the optical depth of particles with high spatial resolution. Msc. Thesis, Sharif university of Technology, Tehran, Iran.
- Hara, Y., Uno, I. and Wang, Z., 2006. Long-term variation of Asian dust and related

- climate factors, *Atmospheric Environment*, v. 40(35), p. 6730-6740.
- IPCC. 2021. Climate change 2021 the physical science basis, AR6, Summary for policymakers.
- Ji, Z., Wang, G., Yu, M. and Pal, J.S., 2018. Potential climate effect of mineral aerosols over West Africa: Part II—contribution of dust and land cover to future climate change, *Climate dynamics*, v. 50(7-8), p. 2335-2353.
- Lababpour, A., 2020. The response of dust emission sources to climate change: Current and future simulation for southwest of Iran, *Science of The Total Environment*, v. 714, p. 136821.
- Malboosi, S., Babaeian, E., Babaeian, E., Abbasi, F., Asmari, M. and Mokhtari, L. 2012. Climate Change Assessment over Iran during Future Decades, Using Statistical Downscaling of ECHO-G Model. *Geographical Research*, v. 27(104), p. 205-230 (in Persian).
- Modeling the relationship between the frequency of dust storms and climatic variables of the summer season in the desert areas of Iran (in Persian).
- Pu, B. and Ginoux, P., 2017. Projection of American dustiness in the late 21 st century due to climate change, *Scientific reports*, v. 7(1), p. 1-10.
- Rezaei, M., Farajzadeh, M. and Kant, S., 2023. The observational evidence of association between types of aerosol mode-cloud-precipitation interaction over Iran. *Atmospheric Pollution Research*, v. 14(6), p. 101760 (in Persian).
- Rahnama, M., Sehat, S., Karami, S., Ranjbar, A. and Khoddam, N., 2023. Vegetation Cover Variation and Dust Frequency analysis over West of Asia. *Nivar*, v. 47(122-123), p. 17-36. doi: 10.30467/nivar.2023.395654.1245 (in Persian).
- Rasouli, A.A., Sari sarraf, B. and Mohammadi, G.H., 2011. long term trend analysis of observed dusty days in the west of iran, applying non-parametric statistics. *journal of physical geography*, v. 4(11), p. 1-16 (in Persian).
- Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. and Lutz, W., 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use and greenhouse gas emissions implications: an overview, *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153-168.
- Rolnick, D., Donti, P.L., Kaack, L.H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K. and Bengio, Y., 2022. Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 55(2), p. 1-96.
- Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H. and Yoon, S., 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science, *Aeolian Research*, v. 2(4), p. 181-204.
- Wu, C., Lin, Z., Liu, X., Li, Y., Lu, Z. and Wu, M., 2018. Can climate models reproduce the decadal change of dust aerosol in East Asia?. *Geophysical Research Letters*, v. 45(18), p. 9953-9962.
- Yoshino, M., 2002. Climatology of yellow sand (Asian sand, Asian dust or Kosa) in East Asia, *Journal of Science China Dearth*, v. 45(S), p. 59-70.
- Zhang, D.F., Gao, X.J., Zakey, A. and Giorgi, F., 2016. Effects of climate changes on dust aerosol over East Asia from RegCM3, *Advances in Climate Change Research*, v. 7(3), p. 145-153.
- Zhao, A., Ryder, C.L. and Wilcox, L.J., 2022. How well do the CMIP6 models simulate dust aerosols?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 22(3), p. 2095-2119.
- Zhao, L., Xu, J. and Powell, A., 2013. Discrepancies of surface temperature trends in the CMIP5 simulations and observations on the global and regional scales: *Clim Past Discuss*, v. 9, p. 6161-6178.
- Keramat, A., Marivani, B. and Samsami, M., 2011. Climatic change, drought and dust crisis in Iran, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, v. 5(9), p. 472-475.
- Schweitzer, M.D., Calzadilla, A.S., Salamo, O., Sharifi, A., Kumar, N., Holt, G. and Mirsaedi, M., 2018. Lung health in era of climate change and dust storms, *Environmental research*, v. 163, p. 36-42.
- Wang, W. and Fang, Z., 2006. Numerical simulation and synoptic analysis of dust emission and transport in East Asia. *Global and Planetary Change*, v. 52(1), p. 57-70.

Kang, L., Huang, J., Chen, S. and Wang, X., 2015. Long-Term Trends of Dust Events Over Tibetan Plateau during 1961–2010, *Atmospheric Environment*, v. 125, p. 188-198.

Rabbani, F. and Sharifikia, M., 2023. Prediction of sand and dust storms in West Asia under climate change scenario (RCPs), *Theoretical and Applied Climatology*, v. 151(1-2), p. 553-566