

Investigating the spatial distribution and trend of dust mass density in West Asia and its relationship with climate variables

Shler Katorani 1, Mahmoud Ahmadi *2, Abbasali Dadashi-Roudbari3

- 1- Ph. D student in Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran
- 2- Associate Professor of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran.
- 3- Postdoctoral Research Associate of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author: Mahmoud Ahmadi, E-Mail: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir

Introduction

Dust emission is considered one of the environmental hazards in arid and semi-arid regions. Understanding the effective variables in increasing dust mass density is very important for early warning and reducing the damages caused by it. One of the main and effective variables in the occurrence of dust is the geographical and climate characteristics of the origin areas and areas affected by this phenomenon. Feeding the great rivers of Mesopotamia, it has reduced soil moisture. Also, the wind component is one of the reasons for the increase in dust in these areas.

Materials and Methods

This study has examined West Asian dust from three perspectives spatial distribution, trends, and their relationship with climate variables. For this purpose, the Dust Column Mass Density (DUCMASS) variable output of the MERRA-2 dataset was used to investigate the spatial distribution of the dust mass density trend, and the AgERA5 dataset was used to investigate the seasonal and monthly changes of precipitation, wind speed, and temperature variables from 1981 to 2020. In this study, the modified Mann-Kendall (MMK) trend test method was used to investigate the trend of dust occurrence in the study area, and the Sen's slope estimator (SSE) test was used to investigate the slope of the trend and to better display the changes in dust mass density in the western region. Asia, the results of the SSE test have been examined on a decade scale

Results and Discussion

Investigating the possible climate drivers in the changes of dust mass density for different regions by calculating the correlation between the time series of dust mass density and the variables of temperature, precipitation, and wind speed has been investigated. The results showed that there is an inverse correlation between dust mass density and precipitation and a direct relationship between dust mass density and temperature and wind speed. The highest correlations between dust mass density and temperature have been calculated, and this value has reached 0.9 in the warm months of the year. On the other hand, the highest negative correlations have been calculated in the cold period of the year (winter and autumn seasons) between dust concentration and precipitation with a value of -0.7. The correlation coefficient between dust mass density and wind speed in the months of January to May and November to December is mostly above 0.6. This value shows a lower correlation in the summer season.

In most months of the year, dust mass density shows an increasing trend in most regions, from March to July, an increasing trend in active dust springs in Mesopotamia, the deserts of Iraq and Syria, the desert of Rub' Al Khali, Ad-Dahna and Al Nufud Al Kabir are observed in Arabia and Thar desert in Pakistan. This increasing trend starts cyclically from the beginning of spring and reaches its peak in June and July, and the intensity of the trend decreases from September and reaches its minimum value in December. The important point is that the cycle of changes in the monthly trend of dust mass density coincides with the cycle of changes in dust mass density. The northern parts of Iran and Turkey have the highest frequency among different months of the year with a decreasing trend of dust mass density. The increasing trend of dust mass density in the spring and summer seasons in Mesopotamia, the deserts of Iraq, Syria, and Yemen, the Sistan Plain, and the Thar desert in Pakistan and the southeast of Iran is significant at the level of 0.001.

Conclusions

The results showed that the seasonal changes in dust mass density show well the active sources of dust in the studied area. In the spring and summer seasons, the activity of the dust centers located in the west of the study area, including the Rub' al Khali, Ad-Dahna and Al Nufud Al Kabir deserts, Mesopotamia, the deserts of Iraq and Syria, on the dust load entering the west and southwest of Iran. It has an effect. The investigation showed that climate variables play a key role in the variability of dust mass density in the study area so the areas corresponding to the summer north wind and the ۱۲۰-day wind of Sistan have shown the highest dust mass density in annual variability. The correlation coefficient between dust mass density with temperature and direct wind speed and its correlation with negative precipitation have been obtained. The results showed that dust mass density has an increasing trend in most of the regions, so from March to August (spring and summer), the increasing trend of dust mass density is significant at the level of ۰.۰۵. The highest intensity of the increasing trend was observed in the spring and summer seasons in Mesopotamia, the deserts of Iraq, Syria, and Yemen, the Sistan Plain, and the Thar desert in Pakistan and southeast Iran.

Keywords: Dust trend, dust mass density, West Asia, MERRA-2 dataset.

بررسی پراکنش فضایی و روند غلظت گرد و خاک در غرب آسیا و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی

شلیر کاتورانی^۱، محمود احمدی^{۲*}، عباسعلی داداشی رودباری^۳

- ۱- دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- ۲- دانشیار اقلیم شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- ۳- پژوهشگر پسادکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*نویسنده مسئول: Ma_ahmadi@sbu.ac.ir

چکیده

گردو خاک یکی از شاخص‌های مهم تغییر اقلیم است. با این حال، پیوند بین گرد و خاک و اقلیم به دلیل بازخوردهای مستقیم و غیرمستقیم در سامانه زمین بسیار پیچیده است. این مطالعه پراکنش فضایی و روند گردو خاک‌های غرب آسیا و ارتباط آن‌ها را با متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد مورد بررسی قرار داده است. بدین منظور برای بررسی پراکنش فضایی روند غلظت گردو خاک از برون‌داد متغیر غلظت گردو خاک مجموعه داده MERRA-2 و برای بررسی متغیرهای اقلیمی، مجموعه داده AgERA5 استفاده شد. تغییرات فصلی غلظت گرد و خاک به خوبی چشمه‌های فعال گرد و خاک در منطقه مورد مطالعه را مشخص کرد. بررسی کارایی متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد نشان داده است مجموعه داده AgERA5 دما را با کارایی بالاتری نسبت به بارش و تندی باد در ایستگاه‌های نماینده پهنه‌های اقلیمی در غرب آسیا برآورد می‌کند. از بین سه متغیر مورد بررسی، تندی باد کارایی به نسبت کمتری را نسبت به دما و بارش نشان داده است. به‌طور کلی مجموعه داده AgERA5 دارای کارایی قابل قبولی در برآورد متغیرهای اقلیمی است و در مناطق فاقد داده از این مجموعه داده می‌توان به عنوان یک داده جایگزین استفاده کرد. نتایج نشان داد که متغیرهای اقلیمی نقش کلیدی را در تغییرپذیری غلظت گردو خاک در منطقه مورد مطالعه دارند، بطوریکه مناطق منطبق بر باد شمال تابستانه و باد ۱۲۰ روزه سیستان بالاترین غلظت گردو خاک سالانه را دارند. بالاترین ضریب همبستگی بین غلظت گردو خاک با دما در ماه‌های گرم سال به بیش از ۰/۸ و با تندی باد در ماه‌های ژانویه تا می و نوامبر تا دسامبر بیشتر از ۰/۶ و همبستگی آن با بارش در ماه‌های سرد سال ۰/۷ - محاسبه شده است. غلظت گرد و خاک روند افزایشی را در مناطق بیابانی ربع الخالی، النفود، الدهنا، بین النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه داشته به‌طوریکه از ماه‌های مارس تا اوت (بهار و تابستان) روند افزایشی غلظت گردو خاک در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار است. بالاترین شدت روند افزایشی در فصول بهار و تابستان در مناطق بین النهرین، بیابان‌های عراق، سوریه و یمن، دشت سیستان و بیابان تار در پاکستان و جنوب شرق ایران مشاهده شد.

کلمات کلیدی: روند گردو خاک؛ غلظت گرد و خاک؛ غرب آسیا؛ مجموعه داده MERRA-2.

یکی از مخاطرات طبیعی و رایج در سال های اخیر که به طور ویژه محیط های شهری و انسانی را آسیب پذیر کرده است، پدیده گرد و خاک می باشد که کنترل و مدیریت آن بسیار دشوار و هزینه بردار خواهد بود. یکی از عوامل اصلی و مؤثر در رخداد این پدیده، موقعیت جغرافیایی و ویژگی های اقلیمی مناطق مبدأ و مناطق متاثر از این پدیده است ([Soltani et al., 2021](#)). هر سال حدود ۲۰۰۰ تن گرد و خاک وارد جو می شود که ۷۵ درصد آن در خشکی و ۲۵ درصد آن در اقیانوس ها نهشت می کند ([Shao et al., 2011](#)). اگر چه گرد و خاک پدیده اقلیمی رایج در مناطق خشک و بیابانی است اما شواهد نشان می دهد که این پدیده در تمامی مناطق اقلیمی اتفاق می افتد ([Fallah Zazuli et al., 2014](#)). این پدیده به یکی از چالش های مهم زیست محیطی در سال های اخیر در منطقه خاورمیانه و به ویژه ایران تبدیل شده است ([Jafari et al., 2021](#)).

گردوخاک موجود در جو، می تواند دی اکسید کربن جوی ([Rushingabigwi et al., 2020](#))، ازن جوی ([Mukherjee et al., 2020](#))، بودجه تابشی جو ([Alam et al., 2010](#))، بهداشت و سلامت ([Goudie and Middleton, 2006](#)) و اقتصاد منطقه ([Alonso et al., 2020](#)) را تحت تاثیر قرار دهد و با تغییر مشخصات خرد فیزیک ابرها بر مقدار بارش اثر گذار باشد ([Li et al., 2016](#)).

متغیر های اقلیمی نقش بسزایی در مطالعات گرد و خاک دارند به طوری که کاهش بارش در دهه های گذشته به ویژه در خاورمیانه که منطقه ی تغذیه رود های بزرگ بین النهرین می باشد، رطوبت خاک را کاهش داده است. همچنین افزایش فراوانی عبور امواج کوتاه و سریع با مولفه ی باد مداری قوی از دلایل افزایش گرد و خاک در این مناطق شده است. پدیده گرد و خاک با تندی باد و فرسایش پذیری (یعنی شرایط سطح زمین) ارتباط مستقیم دارد ([Wu et al., 2020](#)) همچنین توپوگرافی متنوع و توزیع دما و بارش به شکل گیری شرایط برای ایجاد گرد و خاک کمک می کند ([Dar et al., 2022](#)). لذا بررسی توان رخداد گردوخاک با متغیر های اقلیمی می تواند نقش مهمی را در شناسایی این پدیده بخصوص در مناطق مستعد رخداد گردوخاک داشته باشد. مسئله اصلی این تحقیق بررسی غلظت گردوخاک و روند تغییرات آن طی چهار دهه گذشته است. همچنین نقش متغیر های اقلیمی به عنوان یکی از محرک های کلیدی گرد و خاک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

تحقیقات زیادی به بررسی نقش متغیر های اقلیمی در رخداد گرد و خاک پرداخته اند که این مطالعات در سطح جهانی بر اساس منطقه مورد مطالعه و نوع داده های مورد استفاده بسیار متنوع می باشند. در یک طبقه بندی اولیه مطالعات انجام شده را می توان به مطالعاتی که به بررسی ارتباط متغیر های اقلیمی شامل بارش، دما و تندی باد در ایجاد و نقش آن ها در افزایش گرد و خاک پرداخته اند تقسیم کردند. از این دست مطالعات می توان به پژوهش های انجام شده در چین ([Chen et al., 2021](#)); ایران ([Wu et al., 2020](#); [Middleton, 2019](#); [Dadashi-Roudbari & Ahmadi 2021](#); [Boroghani et al., 2021](#)); و پاکستان ([Jin et al., 2021](#); [Shi et al., 2021](#))؛ هند ([Jin et al., 2021](#); [Shi et al., 2021](#))؛ اشاره کرد. بیشتر این مطالعات روند افزایشی را برای گردوخاک گزارش کرده اند، همچنین نتایج این مطالعات نشان داده است که کاهش بارش، افزایش تندی باد، افزایش دما، افزایش تبخیر-تعرق با افزایش گرد و خاک رابطه معنی داری داشته است.

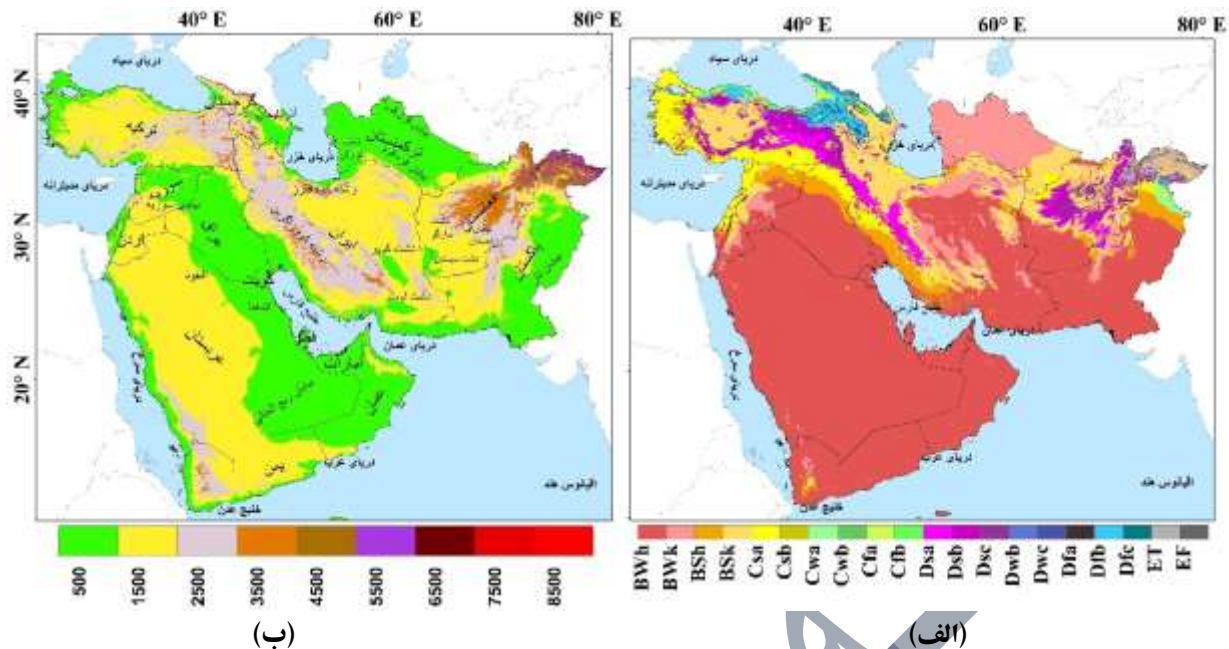
در گروه دیگر از مطالعات انجام شده که بر مبنای داده می‌توان آن‌ها را تقسیم بندی کرد می‌توان به پژوهش‌های انجام شده با استفاده از داده‌های بازتحلیل ([Hersbach et al., 2020](#) ; [Middleton et al., 2021](#))، محصولات سنجش از دور ([Caido et al., 2022](#) ; [Sun et al., 2022](#) ; [Sujitha et al., 2022](#)) و داده‌های ایستگاهی ([Middleton et al., 2021](#) ; [Sarkar et al., 2019](#)) اشاره کرد. این مطالعات کارایی محصولات سنجش از دور و بازتحلیل را در برابر داده‌های مشاهداتی برای مطالعه گردوخاک مورد تایید قرار داد و نشان دادند که کاربری داده‌های نامبرده می‌تواند در شناخت بهتر این پدیده در سطح جهانی کمک کند.

آسیا و بخصوص غرب آسیا به دلیل وجود بیابان‌های بزرگ، پس از آفریقا دومین منبع بزرگ گرد و خاک در جهان است ([Jin et al., 2021](#)) با توجه به اینکه عوامل زیادی بر الگوهای زمانی-مکانی گرد و خاک تأثیر می‌گذارند، اهمیت نسبی این عوامل برای انتشار گرد و خاک در سراسر خاورمیانه تا آسیای جنوبی به خوبی مستند نشده است. لذا این مطالعه اهمیت نسبی این عوامل را برای بررسی تغییرات فصلی و ماهانه انتشار گرد و خاک در غرب آسیا و بخش‌هایی از آسیای جنوبی و مرکزی مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این تحقیق دستاوردهای زیادی را زمینه مطالعات گردوخاک در غرب آسیا خواهد داشت. همچنین این مطالعه با بررسی متغیرهای اقلیمی و ارتباط آن با غلظت گردوخاک می‌تواند سهم نسبی متغیرهای اقلیمی را در رخداد و انتشار این پدیده نشان دهد.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشورهای واقع در غرب آسیا و همچنین پاکستان و افغانستان از آسیای جنوبی و ترکمنستان از آسیای مرکزی است (شکل ۱). با انتخاب این مناطق بهتر می‌توان به بررسی چشمه‌های گرد و خاک موثر بر ایران بحث کرد. این منطقه دارای بیابان‌های وسیعی شامل بیابان تار، دشت مارگو، دشت لوت، دشت کویر، بیابان قره قوم، دشت سیستان، بیابان قزل قوم، ربع الخالی، بیابان سوریه و النفوذ است. منطقه مورد مطالعه از نظر توپوگرافی بسیار پیچیده است این امر باعث شده تا از نظر پهنه‌های اقلیمی نیز غرب آسیا دارای تنوع زیادی باشد. با این حال در بخش‌های وسیعی از غرب آسیا اقلیم بیابانی گرم (Bwh) حکم فرماست (شرح کامل هر یک از پهنه‌های اقلیمی در جدول ۱ ارائه شده است). افزایش چشمگیر رخداد گردوخاک در سال‌های اخیر در این منطقه به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک، وجود بیابان‌های وسیع، سدسازی‌های گسترده در بالادست و خشک شدن مسیر رودها در پایین دست و تغییرات گسترده کاربری اراضی است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ الف) پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر و ب) مدل رقومی ارتفاعی (DEM)
 Figure 1. Location of the study; a) Köppen-Geiger climate classification and b) digital elevation model (DEM)

جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر برای منطقه مورد مطالعه

Table 1. Köppen-Geiger climate classification for the study area

نوع اقلیم	توضیحات نوع اقلیم
BWh	اقلیم بیابانی گرم
BSk	اقلیم استپ یا نیمه خشک با بیابان های سرد
BWk	اقلیم بیابانی سرد
Csa	اقلیم گرم معتدل با تابستان خشک و بسیار گرم
BSh	اقلیم استپ یا نیمه خشک با بیابان های گرم
Dsb	اقلیم برفی با تابستان های خشک و گرم
Dsa	اقلیم برفی با تابستان های خشک و بسیار گرم
Dfb	اقلیم برفی بسیار مرطوب با تابستان گرم
Dsc	اقلیم برفی با تابستان های تابستان های خشک و خنک و زمستان سرد
ET	اقلیم تندرا
Cfa	اقلیم گرم معتدل بسیار مرطوب با تابستان بسیار گرم
Dfc	اقلیم برفی بسیار مرطوب با تابستان خنک و زمستان سرد
Csb	اقلیم گرم معتدل با تابستان خشک و گرم
Cfb	اقلیم گرم معتدل بسیار مرطوب با تابستان گرم
Cwa	اقلیم گرم معتدل با زمستان خشک و تابستان بسیار گرم
Dfa	اقلیم برفی بسیار مرطوب با تابستان بسیار گرم
EF	اقلیم یخبندان
Dwb	اقلیم برفی با زمستان های خشک و تابستان گرم
Dwc	اقلیم برفی با زمستان های خشک و سرد و تابستان خنک
Cwb	اقلیم گرم معتدل با زمستان خشک و تابستان گرم

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

منطقه غرب آسیا دارای بیابان‌های وسیع و همچنین رشته‌کوه‌های بزرگ و پیچیده‌ای است این دو مشخصه جغرافیایی به همراه سال‌ها جنگ در کشورهای همانند عراق، سوریه و یمن باعث شده است تا این منطقه از جهان داده‌های مشاهده‌ای مناسبی در اختیار نداشته باشد. وجود داده‌های اقلیمی بلند مدت و عدم قطعیت پایین نقش کلیدی را در پژوهش‌های علوم جوی دارد. در این تحقیق از دو گروه داده‌های MERRA-2 و AgERA5 برای بررسی غلظت گردوخاک و همچنین بررسی نقش متغیرهای اقلیمی بر رخداد گردوخاک استفاده شده است.

داده‌های مشاهده‌ای (ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی ایران)

داده‌های مشاهده‌ای کنترل کیفی شده در پژوهش‌های مرتبط با علوم جوی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در این تحقیق به دلیل عدم دسترسی به داده‌های ایستگاهی کشورهای مورد بررسی در غرب آسیا برای درستی سنجی متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد از هفت ایستگاه هواشناسی همدیدی ایران (یزد، مشهد، شیراز، تبریز، بابلسر، رشت و شهرکرد) به ترتیب عنوان نماینده اقلیمی پهنه‌های BWh, BSk, BSh, BSk, Csa, Cfa و Dsa استفاده شده است. از داده‌های این هفت ایستگاه در مقیاس سالانه برای سه متغیر دما، بارش و تندی باد طی دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است.

مجموعه داده بازتحلیل AgERA5

مجموعه داده‌های بازتحلیل ECMWF یکی از مهمترین داده‌های در دسترس در سطح جهانی می‌باشد که مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد. مطابق تحقیقات انجام شده، مقدار خطای این مجموعه داده در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای در بسیاری از نقاط جهان بسیار پایین است (Bell et al., 2021). کارایی این مجموعه داده برای متغیرهای مختلف اقلیمی همانند بارش (Asadi Rahim-Begi et al., 2022) و دما (Heydari et al., 2023) در ایران نیز مورد تایید قرار گرفته است. نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است که از این داده می‌توان به عنوان جایگزین در مناطق فاقد داده به عنوان داده مشاهده‌ای استفاده کرد. مجموعه داده ERA5 پنجمین محصول بازتحلیل جوی جهانی مرکز ECMWF است که به دنبال نسخه‌های قبلی شامل ERA۱۵، ERA۴۰ و ERA-Interim ارائه شده است (Hersbach et al., 2020). این مجموعه داده برآوردهای ساعتی متغیرهای جوی را با تفکیک افقی ۳۱ کیلومتر ارائه می‌دهد. سامانه داده‌گواهی ERA5 بر اساس داده‌های مختلف ماهواره‌ای، ایستگاهی، برون‌داد مدل، داده‌های جو بالا و بویه‌هایی دریایی است ترکیب این داده‌ها به همراه مدل‌سازی-های پیشرفته باعث شده است تا عدم قطعیت این مجموعه داده بسیار پایین باشد (Jiao et al., 2021).

در این مطالعه از مجموعه داده AgERA5 برای بررسی تغییرات فصلی و ماهانه متغیرهای بارش، تندی باد و دما از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. مزیت به کارگیری مجموعه داده‌های AgERA5 نسبت به داده‌های ERA5-LAND و نسخه معمولی ERA5 در این است که مجموعه داده‌های AgERA5 نسبت به داده‌های اولیه ERA5 تفکیک افقی بالاتری (حدوداً ۱۰ کیلومتر) برخوردار است (yu et al., 2021). در این مجموعه داده تصحیحات مختلفی از جمله برهمکنش دریا-خشکی، تصحیحات توپوگرافی و کاربری اراضی انجام شده است در نتیجه عدم قطعیت به دلیل تصحیحات انجام شده در فیزیک مدل و تفکیک افقی تا حد زیادی کاهش یافته است (Brown et al., 2023).

مجموعه داده MERRA-2

در این پژوهش جهت بررسی تغییرات غلظت گرد و خاک و همچنین آشکارسازی چشمه‌های فعال گردو خاک در منطقه مورد مطالعه از محصول¹ (DUCMASS) در مقیاس ماهانه استفاده شد. این محصول یکی از محصولات مجموعه داده بازتخلیل MERRA-2 با تفکیک افقی 0.5×0.625 درجه قوسی است. مجموعه داده MERRA-2 یک داده باز تحلیل بلندمدت جوی است که از سال ۱۹۸۰ ناسا با ترکیب نسخه ۵ مدل (GEOS) برای ایجاد مجموعه داده‌های جوی در مقیاس بزرگ تولید نموده است (Liu et al., 2022). این مجموعه داده اولین بانک داده بازتخلیل جهانی بلندمدت مبتنی بر مشاهدات ماهواره و برونداد مدل است. مجموعه داده فعلی دومین بازنگری ناسا از MERRA است که بر اساس داده‌های ماهواره‌ای (MISR، MODIS و AVHRR) و AERONET تولید شده است (koster et al., 2016). همانطور که گفته شد در این تحقیق از متغیر غلظت گردو خاک استفاده شده است. از آنجاییکه متغیر اندازه‌گیری شده ایی در کشور برای این غلظت گرد و خاک وجود ندارد، لذا امکان درستی سنجی محصول DUCMASS وجود ندارد. با این حال، از آنجاییکه این محصول از داده‌های ماهواره‌های MISR، MODIS و AVHRR و داده‌های اندازه‌گیری شده AERONET در ایستگاه‌های زمینی استفاده می‌کند، دارای عدم قطعیت پایینی خواهد بود. از طرف دیگر درستی سنجی متغیر PM2.5 از مجموعه داده MERRA-2 در ایران نشان داده است که این مجموعه داده در برآورد ذرات معلق دارای کارایی قابل قبولی است (Dadashi-Roudbari et al., 2020).

۲-۳. بررسی روند رخداد گرد و خاک با استفاده از روش من کندال تصحیح شده

در پژوهش حاضر برای بررسی روند رخداد گرد و خاک در منطقه مورد مطالعه از روش من کندال تصحیح شده (MMK) و جهت بررسی شیب روند از آزمون سنس (SSE) استفاده شده است. آزمون من کندال (MK) یک آزمون ناپارامتریک جهت بررسی روند است. آزمون من-کندال تصحیح شده برای جلوگیری از تاثیر خودهمبستگی سری زمانی داده‌ها یک ضریب تصحیح بر اساس اندازه نمونه موثر (ESS) به محاسبات واریانس اضافه می‌کند (Hamed et al., 1998). برای محاسبه روند داده‌های اقلیمی آزمون من کندال تصحیح شده نسبت به آزمون من کندال کلاسیک قابل اعتمادتر است (Daufresne et al., 2009). روش ناپارامتریک سنس جهت برآورد نمودن شیب واقعی یک روند در یک سری زمانی است که بزرگی روند را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای نمایش بهتر تغییرات غلظت گردو خاک در منطقه غرب آسیا نتایج آزمون سنس در مقیاس دهه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل (۴) به همراه سطح معنی‌داری در سطح 0.05 ارائه شده است.

۲-۴. درستی سنجی متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های نماینده پهنه‌های اقلیمی

درستی سنجی متغیرهای اقلیمی برای درک وضعیت اقلیم گذشته و همچنین آینده بسیار مهم است. در این تحقیق برای بررسی نقش متغیرهای اقلیمی در رخداد گردو خاک در منطقه غرب آسیا از سه متغیر دما، تندی باد و بارش استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد از نظر جغرافیایی یک منطقه وسیع است و داده‌های مشاهداتی برای سایر کشورها به دلایل بسیاری زیادی همانند فقدان داده اندازه‌گیری، طول دوره آماری ناکافی و در نهایت مسائل سیاسی و... در دسترس نمی‌باشد. برای این منظور، جهت درستی سنجی سه متغیر نامبرده از مجموعه داده AgERA5 هفت پهنه

¹ Dust Column Mass Density

اقلیمی غالب در منطقه غرب آسیا شناسایی و سپس از هر پهنه اقلیمی یک ایستگاه به عنوان نماینده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی ایران انتخاب و درستی سنجی با استفاده از سه سنجه کارایی کلینگ-گوپتا (KGE)، ضریب توافق (d) و ضریب همبستگی (r) انجام شد. روابط آماری این سه سنجه در جدول (۲) ارائه شده است. همبستگی، مقدار ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. این روش یک مقدار واحد بین -۱ و ۱ ارائه می‌دهد، که در آن -۱ نشان‌دهنده همبستگی منفی کامل، +۱ نشان‌دهنده همبستگی مثبت کامل و ۰ بیانگر نبود ارتباط خطی است. در ارزیابی کارایی مدل یا مجموعه داده‌های بازتحلیل و یا حتی داده‌های ماهواره‌ای برای متغیرهای اقلیمی، شاخص توافق ویلموت (d) ابزاری ارزشمند ارائه می‌کند. این سنجه مقدار توافق بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی را ارزیابی می‌کند و دامنه آن از ۰ (عدم توافق) تا ۱ (تطابق کامل) است. شاخص d هم تفاوت در میانگین و هم تغییرات را در نظر می‌گیرد و در مقایسه با روش‌هایی که فقط بر همبستگی تمرکز می‌کنند، ارزیابی جامع‌تری ارائه می‌دهد (Willmott, 1984). سنجه کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) با تجزیه کارایی مدل به سه جنبه کلیدی: همبستگی، تغییرات و اریبی، محدودیت‌های سنجه‌های همانند نش-ساتکلیف (NSE) را برطرف می‌کند. سنجه KGE از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و هرچه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده توافق بهتر بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی است (Knoben et al., 2019).

جدول ۲. سنجه‌های آماری مورد استفاده شده در پژوهش برای درستی سنجی
Table 2. Statistical metrics used in the research for evaluation

روش محاسبه	سنجه آماری
$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$	کارایی کلینگ-گوپتا
$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (sim'_i + obs'_i)^2} \right]$	ضریب توافق
$r = \frac{(sim_i - \bar{sim})(obs_i - \bar{obs})}{\sqrt{\sum (sim_i - \bar{sim})^2 \sum (obs_i - \bar{obs})^2}}$	ضریب همبستگی

در روابط بالا sim_i مقدار برآورد شده، obs_i مقدار مشاهداتی (ایستگاه‌های همدیدی) و n تعداد کل داده‌ها را نشان می‌دهد. sim'_i تفاضل داده برآورد شده و میانگین کل داده‌های sim_i در جامعه آماری است و obs'_i تفاضل داده مشاهداتی و میانگین کل داده‌های obs_i در جامعه آماری است.

۳. بحث

متغیرهای اقلیمی تغییرپذیری زیادی را در پهنه‌های اقلیمی مختلف دارند. در این تحقیق با توجه به در دسترس بودن داده‌های اقلیمی مشاهداتی ایران یک درستی سنجی از برون‌داد مجموعه داده AgERA5 برای سه متغیر بارش، تندی باد و دما برای

هفت پهنه اقلیمی غالب و اصلی در منطقه غرب آسیا انجام شده است. نتایج درستی سنجی برای هفت پهنه اقلیمی نماینده در غرب آسیا نشان داده است از بین سه متغیر مورد بررسی مجموعه داده AgERA5 دما را بهتر از بارش و تندی باد برآورد می کند. بطوریکه ضریب همبستگی و ضریب توافق به دست آمده برای دما در سطح پهنه های اقلیمی نماینده به ترتیب بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۷ و ۰/۷۳ تا ۰/۹۳ محاسبه شده است (جدول ۳). مقدار سنجه KGE نیز در ایستگاه های مورد بررسی بیش تر از ۰/۶۲ بوده است و برای بیشتر ایستگاه ها این مقدار بالاتر از ۰/۸ است که نشان دهنده کارایی بالای مجموعه داده AgERA5 در برآورد دما در این پهنه های اقلیمی است. متغیر بارش نیز کارایی خوبی را در پهنه های اقلیمی نماینده داشته است. بطوریکه مقدار همبستگی این متغیر بین ۰/۶۸ تا ۰/۹۱ محاسبه شده است. نتیجه ضریب توافق نیز نتایج به دست آمده توسط همبستگی را تایید می نماید. از بین سه متغیر مورد بررسی مجموعه داده AgERA5 تندی باد را نسبت به دو متغیر بارش و دمای هوا با دقت کمتری برآورد کرده است. بطوریکه مقدار ضریب همبستگی به دست آمده بین ۰/۴۸ تا ۰/۷۲ به دست آمده است. مقدار سنجه KGE نیز در تمامی ایستگاه های نماینده مورد بررسی ۰/۴ محاسبه شده است (جدول ۳). بطور کلی مجموعه داده AgERA5 در برآورد متغیرهای اقلیمی دارای کارایی قابل قبولی است و می توان از نتایج آن در مناطق فاقد داده همانند بخش های بزرگی از غرب آسیا، آسیای جنوبی و آسیای مرکزی به عنوان مکمل یا جایگزین داده های مشاهداتی استفاده کرد.

جدول ۳. درستی سنجی مجموعه داده AgERA5 در برآورد متغیرهای اقلیمی بارش، دما و تندی باد در پهنه های اقلیمی

Table 3. Evaluation of AgERA5 dataset in estimating climate variables of precipitation, temperature and wind speed in climate zones

بارش				
ایستگاه	نماینده پهنه اقلیمی	همبستگی	ضریب توافق	KGE
یزد	BWh	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۶۹
مشهد	BWk	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۶۸
شیراز	BSh	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۸۲
تبریز	BSk	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۴۴
بابلسر	Csa	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۵۹
رشت	Cfa	۰/۷۵	۰/۸۴	۰/۶۵
شهرکرد	Dsa	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۵۷
دما				
ایستگاه	نماینده پهنه اقلیمی	همبستگی	ضریب توافق	KGE
یزد	BWh	۰/۹۷	۰/۸۱	۰/۸۵
مشهد	BWk	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۴
شیراز	BSh	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۸۱
تبریز	BSk	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۷۶
بابلسر	Csa	۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۸۳
رشت	Cfa	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۶۲
شهرکرد	Dsa	۰/۸۷	۰/۶۹	۰/۶۵
تندی باد				
ایستگاه	نماینده پهنه اقلیمی	همبستگی	ضریب توافق	KGE

۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۴۸	BWh	یزد
۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۵۹	BWk	مشهد
۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۵۸	BSh	شیراز
۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۷۲	BSk	تبریز
۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۵۲	Csa	بابلسر
۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۵۱	Cfa	رشت
۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۶۲	Dsa	شهرکرد

بررسی تغییرات ماهانه غلظت گرد و خاک حاصل از برون داد MERRA-2 طی دوره زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ نشان داد که رخداد گردوخاک تابع فصل بوده و مقادیر آن بسته به فصل، طول و عرض جغرافیایی و اقلیم حاکم در منطقه مورد مطالعه تغییرات زیادی را از خود نشان می دهد (شکل ۲). در غرب آسیا هسته های بیشینه گرد و خاک از ماه مارس پدیدار می شوند و در ماه های ژوئیه (۱/۱۰ گرم بر مترمربع) و اوت (۱/۲۵ گرم بر مترمربع) با میانگین بلند مدت به بیشینه مقدار خود در طول سال می رسند. در ماه های گرم سال بیشینه غلظت گرد و خاک در منطقه بین النهرین و بیابان ربع الخالی و الدهنا و النفود در عربستان و مناطق بیابانی سوریه و عمان به دلیل کاهش بارش، افزایش دما و تندی باد و فعال شدن چشمه های گرد و خاک مشاهده می شود. این نتیجه در توافق با یافته های پیشین (Dadashi-Roudbari, A.2020) از اقلیم شناسی رخداد گردوخاک در منطقه است. غلظت گردوخاک در منطقه رابطه معکوسی را به عرض جغرافیایی نشان می دهد بطوریکه در بالاتر از مدار ۳۵ درجه شمالی از غلظت گردوخاک به مقدار قابل توجهی کاسته خواهد شد. البته باید توجه داشت که استثنای در این زمینه در آسیای مرکزی واقع در بیابان قزل قوم، قره قوم، بستر خشکیده آرال قوم و قره بغاز در ترکمنستان دیده می شود. این مقدار از غلظت بالای گردوخاک در حوالی مدار ۴۰ درجه شمالی شاید دور از انتظار باشد اما به دلیل دست کاری بشر در بستر رودها و تغییر کاربری اراضی این مناطق به چشمه های فعال گرد و خاک تبدیل شده اند و سالانه مقادیر بالایی از گرد و خاک را به سمت شمال شرق ایران و کلانشهر مشهد ترابرد می کنند (Zarrin et al., 2021).

در فصول گرم سال در عرض های پایین به دلیل وجود مناطق وسیع بیابانی شامل بیابان ربع الخالی، النفود و الدهنا در عربستان و بین النهرین و مناطق بیابانی عراق و سوریه مقادیر قابل توجهی از گرد و خاک را شاهد هستیم که هسته های بیشینه آن در بهار در جنوب و غرب منطقه مورد مطالعه شکل گرفته و استان های غربی و جنوب غرب ایران شامل ایلام، کردستان و خوزستان را به شدت تحت تاثیر قرار می دهند. وجود رشته کوه های زاگرس به عنوان سدی مانع از ترابرد گرد و خاک به فلات مرکزی ایران شده است و این مسئله نقش توپوگرافی را در کاهش گرد و خاک در منطقه مورد مطالعه به خوبی نشان می دهد و در مقابل دستکاری بشر در تغییر بستر رودها و خشک شدن دریاچه ها و تغییر کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک حاکم بر آن، جریانات غربی و وجود بیابان های عظیم از عوامل تشدید گرد و خاک در منطقه مورد مطالعه می باشد.

غلظت گردوخاک در راستای طول جغرافیایی نیز تغییرات زیادی را نشان می دهد بطوریکه هرچه از مدار ۲۰ درجه شرقی به مدار ۸۰ درجه شرقی پیش برویم از غلظت گرد و خاک کاسته می شود اما وجود دو کانون فعال گرد و خاک شامل بیابان تار در پاکستان و دشت مارگو در افغانستان این نظم کاهشی را بر هم می زند و در این مناطق مقادیر قابل توجهی از گرد و خاک مشاهده می شود که استان های شرقی و جنوب شرق ایران را تحت تاثیر قرار می دهند و در دوره گرم سال مقادیر قابل توجهی از گرد و خاک را به شرق و جنوب شرق ایران ترابرد می کنند.

همانطور که در پهنه بندی اقلیمی کوپن گایگر نشان داده شد (شکل ۱) غرب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه و مناطق مرکزی، جنوب و جنوب شرق ایران اقلیم بیابانی گرم (BWh) دارد این مناطق از اوایل بهار با افزایش دما و تندی باد و کاهش بارش مواجه می‌شوند که با کاهش رطوبت خاک از ماه‌های مارس چشمه‌های فعال گرد و خاک شروع به فعالیت کرده و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه شدت پیدا می‌کنند و گرد و خاک قابل توجهی را به سمت غرب ایران ترابرد می‌کنند و به سمت عرض‌های پایین مناطق شرقی گسترش می‌یابد. در مقابل در دوره سرد سال در ماه‌های دسامبر و ژانویه با کاهش دما و افزایش بارش و رطوبت خاک فعالیت چشمه‌های گرد و خاک کاهش می‌یابد (مقادیر همبستگی نزدیک ۰/۷- (شکل ۳)).

بررسی تغییرات ماهانه متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تندی باد حاصل از داده‌های AgERA5 در منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) نشان می‌دهد که این سه متغیر اقلیمی دارای تغییرپذیری بسیاری زیادی در منطقه مورد مطالعه هستند. در کشورهای عراق، عربستان، سوریه، عمان و یمن و مناطق مرکزی، جنوب و جنوب شرق ایران که دارای اقلیم بیابانی گرم است از اواخر بهار هسته‌های بیشینه در منطقه آشکار شده و دما در ماه‌های ژانویه تا اوت نزدیک به ۴۰ درجه سلسیوس می‌رسد (۳۹/۹۳ درجه سلسیوس). بیشینه مقادیر دما در دوره گرم سال بخصوص در بین النهرین، دشت لوت، بیابان ربع الخالی، الدهنا، دشت سیستان به شکل مناطق قابل توجهی نمایان شده است. در مقابل کمینه دما مناطق کوهستانی و مناطق دارای پوشش گیاهی انبوه همانند شمال ایران و شمال ترکیه به شکل چشم گیری کمتر از سایر مناطق است که این امر نقش مهم تاثیر توپوگرافی و پوشش گیاهی را در تعدیل دما به خوبی نشان می‌دهد.

مقایسه هسته‌های بیشینه (شکل ۲-ب) با بیشینه غلظت گردوخاک نشان می‌دهد که مناطقی با دمای هوای بالا مقدار غلظت گردوخاک بالایی نیز دارند. این نتیجه در وهله نخست می‌تواند ناشی از کاهش قابل توجه رطوبت خاک در مناطق نامبرده باشد که جریان‌ات هوا به راحتی باعث جابجایی آن می‌شود. از سوی دیگر افزایش دما در فصول گرم سال، اقلیم بیابانی خشک و نیمه خشک در عراق و عربستان، بخش‌هایی از سوریه و اردن و مناطق جنوب شرقی ایران و جنوب غربی کشور پاکستان گرادیان فشار بین مناطق با دمای کمتر و مناطقی با دمای بیشتر، شرایط را برای صعود هوا در سطح زمین فراهم می‌کند که شرایط را برای ترابرد ذرات گردوخاک فراهم می‌کند.

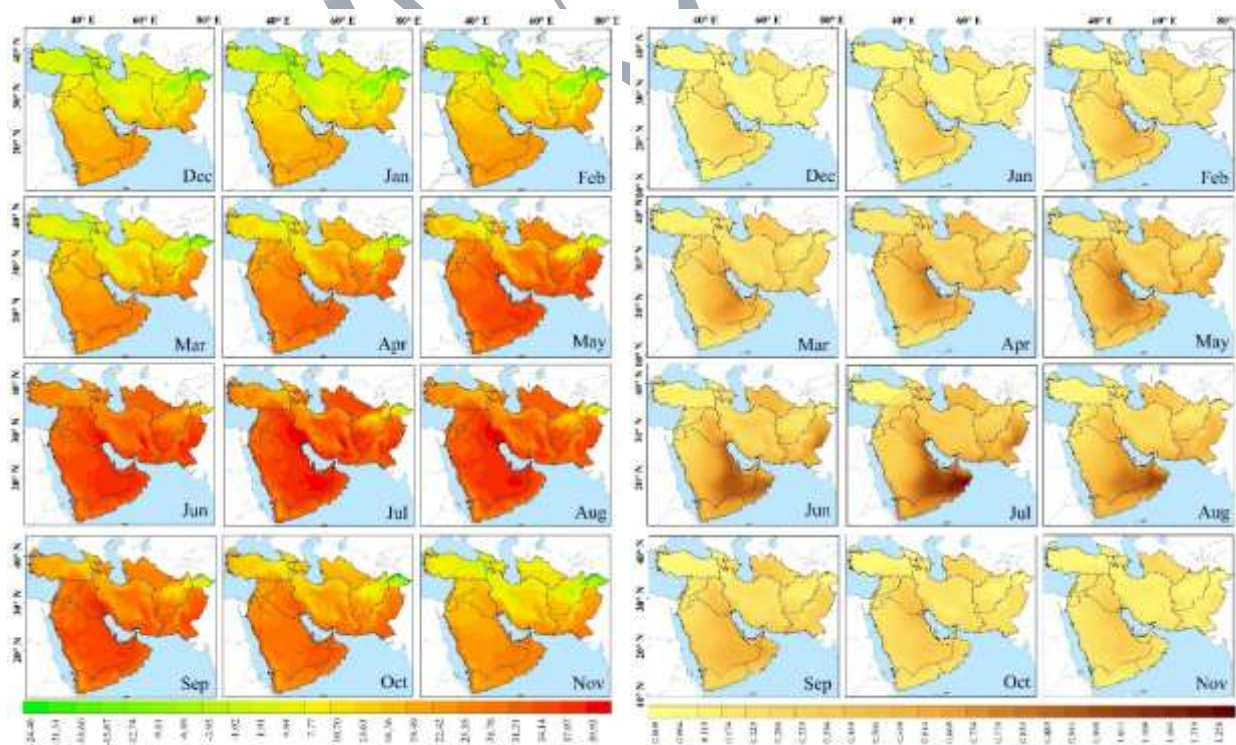
بارش در منطقه غرب آسیا دارای بردایی بسیار زیادی در طول جغرافیایی است. بطوریکه بیشینه هسته‌های بارشی بر فراز کشور ترکیه، کشورهای حوضه قفقاز، سواحل جنوبی دریای خزر و رشته کوه زاگرس با مقادیر ماهانه بیش از ۳۵۰ میلی‌متر بر اساس برون‌داد مجموعه داده AgERA5 دیده می‌شود (شکل ۲-ج). بیشینه بارش مطابق با انتظار در ماه‌های سرد سال و در غرب و شمال غرب منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است و مقادیر بالای بارش‌های ثبت شده در ماه‌های ژوئیه و اوت در مناطق شرقی پاکستان مربوط به بارش‌های موسمی تابستانه است. سواحل جنوبی دریای خزر نیز در ماه‌های مختلف سال مقادیر بالایی از بارش را نشان می‌دهند که این مقدار در فصل پاییز بیش از سایر فصول است. از ماه دسامبر تا مارس غرب و شمال غرب ایران به دلیل توپوگرافی و وجود رشته کوه‌های زاگرس مقادیر بالای بارش را نشان می‌دهند. مقایسه پهنه‌های بارشی با غلظت گردوخاک به روشنی نشان دهنده رابطه معکوس بین این دو متغیر در منطقه مورد مطالعه است که نتایج آن در نقشه همبستگی ارائه شده در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

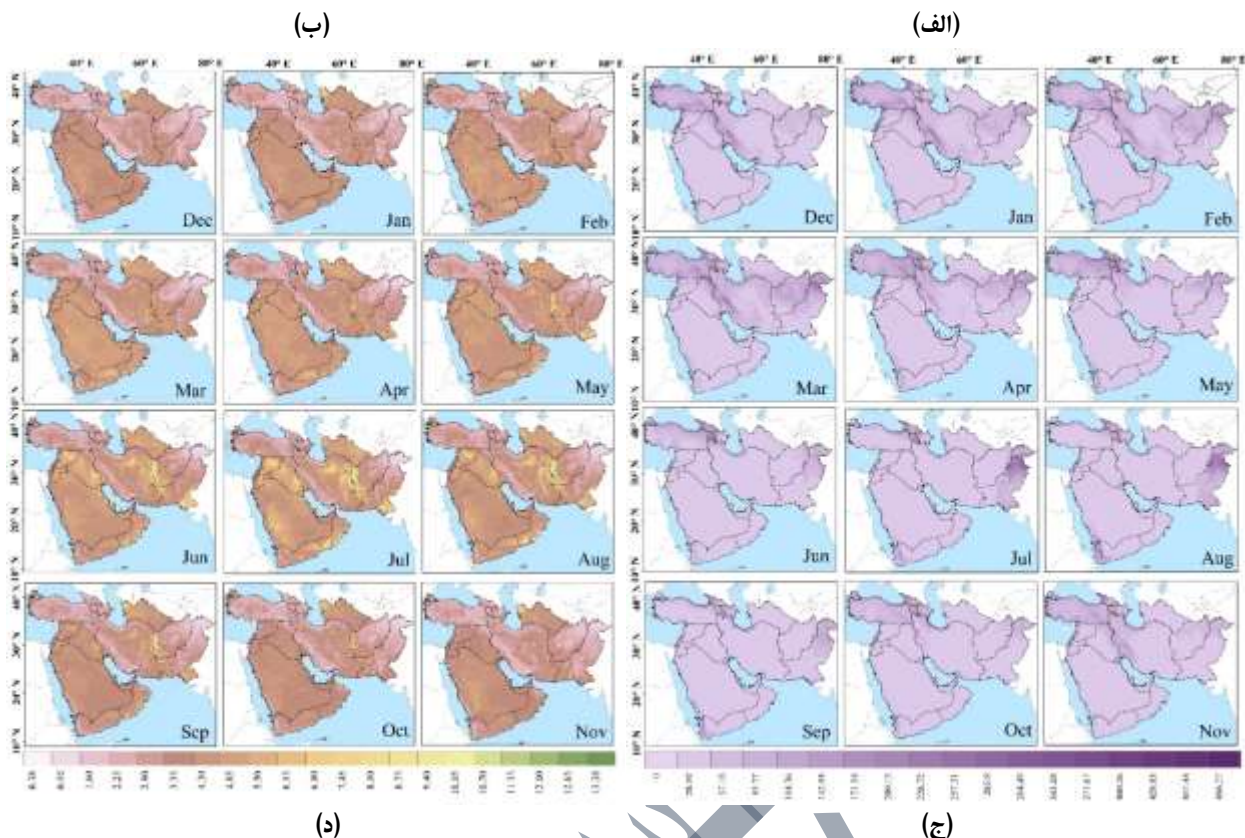
مناطق وسیعی در غرب و جنوب غرب و جنوب منطقه مورد مطالعه در کشورهای عربستان، عراق، یمن و عمان مقادیر پایینی از بارش را در طول سال دارند به طوری که مقدار متوسط سالانه بارش در عربستان (۸۴/۰۱ میلی‌متر)، عراق (۲۲۴/۸۹ میلی

متر)، یمن (۱۷۱/۴۶ میلی متر) و عمان (۵۰/۰۱ میلی متر) می باشد که یکی از دلایل اصلی افزایش غلظت گرد و خاک در این مناطق می باشد چرا که کاهش بارش باعث کاهش رطوبت خاک و آسیب پذیری آن در مقابل فرسایش بادی می شود و ذرات بیشتری را جهت ترابرد در دسترس باد قرار می دهد.

بررسی تغییرات ماهانه تندی باد نشان داد که این متغیر تابع فصل بوده و در ماه های ژوئن تا اوت در فصل بهار مقادیر بیشینه میانگین بلند مدت را با مقادیر ۱۱/۳ متر بر ثانیه و ۱۳/۳ متر بر ثانیه نشان می دهند. به دلیل تفکیک افقی بالای داده های AgERA5 دو منطقه ای بسیار مهم در غرب آسیا توسط این داده ها آشکار شده است. همانطور که در شکل (۲-د) دیده می شود هسته های بیشینه تندی باد در ماه های می تا نوامبر در شرق ایران در مرز کشور افغانستان دیده می شود. این مقادیر از تندی باد در منطقه به دلیل باد ۱۲۰ روزه سیستان است که باعث افزایش غلظت گردو خاک در دشت سیستان و بخصوص منطقه زابل می شود.

منطقه بیشینه بعدی با تندی باد در فصل تابستان بر فراز منطقه بین النهرین تا کشور کویت و بخش های شمال شرقی کشور عربستان دیده می شود، به طوری که میانگین تندی باد برای این منطقه در فصل تابستان ۵/۳۰ متر بر ثانیه می باشد این کانون بیشینه از تندی باد به دلیل باد شمال تابستانه است که غلظت گردو خاک را در طول فصل تابستان بر فراز بین النهرین، کشور کویت و بخش هایی از جنوب غرب به شکل قابل توجهی افزایش می دهد. بطور کلی تندی باد با افزایش عرض جغرافیایی کاهش می یابد. در بخش های شمالی کشور ترکیه و ایران و بخش های بزرگی از شمال شرق کشورهای افغانستان و پاکستان که تندی باد کمینه دارند مقدار غلظت گردو خاک نیز به شکل قابل توجهی کاهش یافته است که نشان دهنده رابطه مستقیم این دو متغیر است (شکل ۳).





شکل ۲. پراکنش فضایی ماهانه؛ الف) غلظت گردو خاک (واحد: گرم بر مترمربع)، ب) دما (واحد: درجه سلسیوس)، ج) بارش (واحد: میلی متر)، د) تندی باد (واحد: متر بر ثانیه)، طی دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۲۰

Figure 2. Monthly spatial distribution; a) Dust column mass density (unit: g/m^2), b) temperature (unit: $^{\circ}C$), c) precipitation (unit: mm), d) wind speed (unit: m/s), during the 1981-2020

بررسی محرک‌های احتمالی اقلیمی در تغییرات غلظت گرد و خاک برای مناطق مختلف با محاسبه همبستگی بین سری‌های زمانی غلظت گرد و خاک و متغیرهای دما، بارش و تندی باد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد بین غلظت گردو خاک و بارش همبستگی معکوس و بین غلظت گردو خاک با دما و تندی باد رابطه مستقیم وجود دارد. بالاترین همبستگی-ها بین غلظت گردو خاک و دما محاسبه شده است که این مقدار در ماه‌های گرم سال به $0/8$ نیز رسیده است. در مقابل بالاترین همبستگی‌های منفی نیز در دوره سرد سال (فصول زمستان و پاییز) بین غلظت گردو خاک و بارش با مقدار $0/7$ - محاسبه شده است. ضریب همبستگی بین غلظت گردو خاک و تندی باد در ماه‌های ژانویه تا می و نوامبر تا دسامبر عمدتاً بالای $0/6$ است این مقدار در فصل تابستان همبستگی کمتری را نشان می‌دهد (شکل ۳).

	Dust.jan	Dust.feb	Dust.mar	Dust.apr	Dust.may	Dust.jun	Dust.jul	Dust.aug	Dust.sep	Dust.oct	Dust.nov	Dust.dec
pr-jan	-0.50	-0.50	-0.49	-0.47	-0.55	-0.60	-0.56	-0.59	-0.62	-0.51	-0.47	-0.49
pr-feb	-0.55	-0.54	-0.53	-0.53	-0.60	-0.60	-0.55	-0.59	-0.65	-0.57	-0.53	-0.55
pr-mar	-0.56	-0.55	-0.54	-0.54	-0.60	-0.59	-0.54	-0.58	-0.64	-0.58	-0.53	-0.55
pr-apr	-0.56	-0.57	-0.57	-0.59	-0.63	-0.59	-0.56	-0.58	-0.64	-0.60	-0.54	-0.55
pr-may	-0.53	-0.54	-0.55	-0.58	-0.61	-0.54	-0.50	-0.53	-0.60	-0.60	-0.53	-0.52
pr-jun	-0.44	-0.44	-0.44	-0.47	-0.48	-0.38	-0.34	-0.38	-0.46	-0.50	-0.45	-0.44
pr-jul	-0.30	-0.28	-0.27	-0.27	-0.23	-0.11	-0.09	-0.14	-0.22	-0.29	-0.32	-0.32
pr-aug	-0.28	-0.26	-0.26	-0.26	-0.21	-0.08	-0.05	-0.11	-0.18	-0.27	-0.30	-0.30
pr-sep	-0.34	-0.33	-0.34	-0.35	-0.33	-0.23	-0.20	-0.24	-0.30	-0.35	-0.34	-0.34
pr-oct	-0.45	-0.47	-0.48	-0.49	-0.53	-0.49	-0.45	-0.48	-0.52	-0.49	-0.43	-0.44
pr-nov	-0.44	-0.45	-0.45	-0.43	-0.51	-0.56	-0.53	-0.55	-0.57	-0.44	-0.38	-0.41
pr-dec	-0.46	-0.47	-0.46	-0.45	-0.53	-0.58	-0.54	-0.57	-0.60	-0.48	-0.43	-0.45
Wind-jan	0.56	0.54	0.53	0.53	0.54	0.46	0.37	0.44	0.55	0.58	0.60	0.59
Wind-feb	0.58	0.56	0.55	0.56	0.56	0.48	0.41	0.46	0.57	0.60	0.61	0.60
Wind-mar	0.58	0.57	0.55	0.56	0.57	0.50	0.42	0.48	0.58	0.60	0.61	0.60
Wind-apr	0.56	0.54	0.54	0.57	0.58	0.49	0.41	0.47	0.57	0.61	0.60	0.58
Wind-may	0.48	0.48	0.48	0.53	0.54	0.45	0.39	0.43	0.51	0.55	0.52	0.50
Wind-jun	0.44	0.43	0.44	0.51	0.51	0.39	0.33	0.35	0.44	0.53	0.50	0.46
Wind-jul	0.38	0.37	0.36	0.41	0.43	0.35	0.29	0.31	0.39	0.45	0.42	0.40
Wind-aug	0.36	0.35	0.35	0.39	0.41	0.33	0.28	0.30	0.37	0.43	0.41	0.38
Wind-sep	0.39	0.38	0.38	0.43	0.43	0.35	0.30	0.33	0.41	0.47	0.44	0.42
Wind-oct	0.45	0.44	0.43	0.46	0.46	0.38	0.31	0.36	0.48	0.52	0.52	0.49
Wind-nov	0.55	0.53	0.51	0.52	0.53	0.44	0.35	0.42	0.55	0.58	0.61	0.59
Wind-dec	0.56	0.54	0.52	0.52	0.53	0.45	0.37	0.43	0.55	0.58	0.60	0.60
Tas-jan	0.65	0.65	0.63	0.59	0.69	0.77	0.75	0.78	0.79	0.64	0.55	0.61
Tas-feb	0.66	0.66	0.65	0.61	0.71	0.78	0.76	0.79	0.80	0.65	0.57	0.62
Tas-mar	0.68	0.69	0.68	0.65	0.75	0.80	0.78	0.80	0.81	0.68	0.60	0.65
Tas-apr	0.70	0.71	0.72	0.70	0.78	0.80	0.78	0.80	0.82	0.72	0.63	0.67
Tas-may	0.73	0.74	0.75	0.75	0.81	0.79	0.76	0.78	0.82	0.76	0.68	0.70
Tas-jun	0.71	0.73	0.74	0.76	0.80	0.74	0.70	0.73	0.79	0.78	0.70	0.70
Tas-jul	0.73	0.74	0.75	0.77	0.79	0.69	0.65	0.68	0.76	0.80	0.74	0.73
Tas-aug	0.75	0.75	0.76	0.78	0.79	0.69	0.64	0.68	0.77	0.81	0.75	0.75
Tas-sep	0.73	0.73	0.74	0.75	0.79	0.72	0.68	0.71	0.79	0.78	0.71	0.72
Tas-oct	0.70	0.70	0.70	0.71	0.77	0.74	0.72	0.74	0.79	0.73	0.65	0.68
Tas-nov	0.67	0.67	0.67	0.64	0.73	0.77	0.76	0.78	0.79	0.67	0.58	0.64
Tas-dec	0.65	0.64	0.63	0.59	0.69	0.76	0.75	0.78	0.78	0.63	0.55	0.61

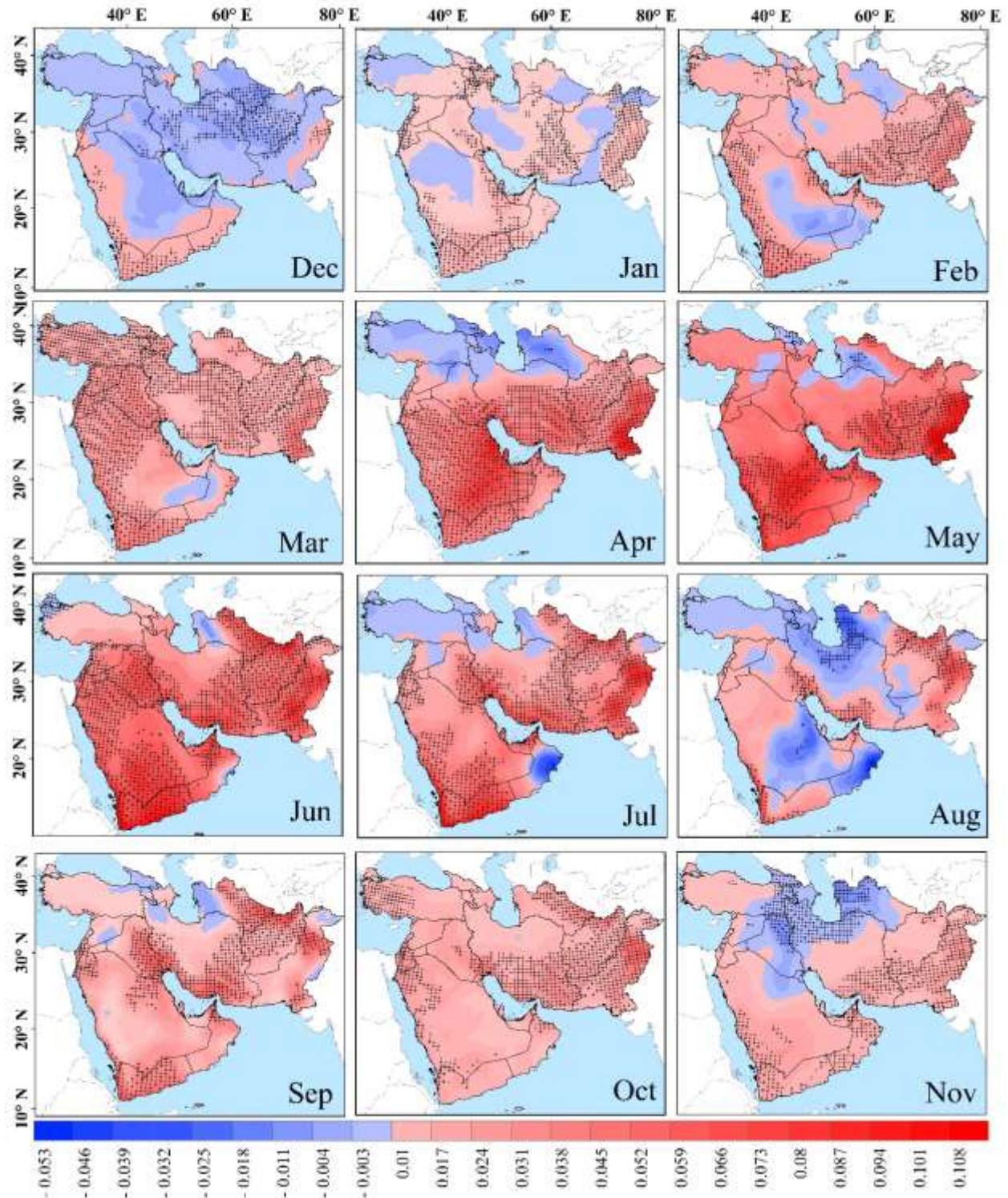
شکل ۳. ضریب همبستگی بدون تاخیر و تاخیرهای ۱ ماهه تا ۱۲ ماهه بین غلظت گردو خاک (DUCMASS) ماهانه با متغیرهای اقلیمی بارش (Pr)، تند باد (Wind) و دما (Tas)

Figure 3. Correlation coefficient between monthly dust mass density with climate variables of precipitation (Pr), wind speed (Wind) and temperature (Tas).

روند غلظت گرد و خاک در چهار دهه گذشته (۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) برای مقادیر ماهانه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴). در بیش‌تر ماه‌های سال غلظت گرد و خاک روند افزایشی را در غالب مناطق نشان می‌دهد، از ماه‌های مارس تا ژوئیه روند افزایشی در چشمه‌های فعال گرد و خاک در بین‌النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه، بیابان ربع‌الخالی، الدهنا و النفود در عربستان و بیابان تار در پاکستان مشاهده می‌شود. این روند افزایشی به صورت چرخه‌ای از اوایل بهار شروع می‌شود و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه به اوج می‌رسد و از ماه سپتامبر شدت روند کاهش می‌یابد و در ماه دسامبر به حداقل مقدار خود می‌رسد. نکته حائز اهمیت این است که چرخه تغییرات روند ماهانه غلظت گرد و خاک با چرخه تغییرات غلظت گرد و خاک منطبق می‌باشد. بخش‌های شمالی ایران و کشور ترکیه بالاترین فراوانی را در بین ماه‌های مختلف سال با روند کاهشی غلظت

گردو خاک دارند. روند افزایشی غلظت گردو خاک در فصول بهار و تابستان در مناطق بین النهرین، بیابان‌های عراق، سوریه و یمن، دشت سیستان و بیابان تار در پاکستان و جنوب شرق ایران در سطح $0/05$ معنی‌دار است (شکل ۴). بررسی روند غلظت گردو خاک نشان داده است که روند افزایشی در هشت ماه از سال در منطقه بین‌النهرین دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح $0/05$ است. این روند افزایشی در منطقه یاد شده برای غرب و جنوب غرب ایران یک تهدید جدی است. در نقطه مقابل غلظت گردو خاک در شمال شرقی ایران بر فراز ترکمنستان دارای روند کاهشی در هشت ماه از سال است. با این حال روند این متغیر در ماه‌های سرد سال همانند اکتبر، ژانویه و فوریه دارای روند افزایشی است. این روند در ماه ژانویه در منطقه شمال شرقی ایران دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح $0/05$ است. این روند افزایشی می‌تواند در تغییرات مقدار بار ورودی ذرات گردو خاک به شهرهای شمال شرقی ایران از جمله کلانشهر مشهد نقش داشته باشد. یکی از کانون‌های بار و روند افزایشی بیشینه معنی‌دار در منطقه غرب آسیا؛ در جنوب شرقی ایران و بخش‌های غربی کشورهای افغانستان و پاکستان است، بطوریکه دما در این منطقه روند افزایشی معنی‌دار را در سطح $0/05$ برای غلظت گردو خاک نشان داده است (شکل ۴). پس از این منطقه سواحل خلیج فارس و بخصوص جنوب غربی ایران با هفت ماه از سال با روند افزایشی معنی‌دار در غلظت گردو خاک بیشینه روند افزایشی این متغیر را نشان داده‌اند.

بیشینه روند افزایشی غلظت گردو خاک $0/1$ گرم/مترمربع/دهه در ماه‌های آوریل تا اوت به‌دست آمده است و کمینه شدت روند نیز با مقدار $0/05$ گرم/مترمربع/دهه عمدتاً در ماه‌های سرد سال دیده می‌شود. روند کاهشی معنی‌دار در سطح $0/05$ همچنین در دوره گرم سال نیز در ماه‌های آوریل، ژوئیه و اوت نیز قابل مشاهده است. بیشینه گستره روند کاهشی در منطقه غرب آسیا در ماه دسامبر و بیشینه گستره روند افزایشی در ماه اکتبر دیده می‌شود. به رغم اینکه این دو به‌ترتیب بیشینه گسترده روند کاهشی و افزایشی را نشان داده‌اند اما بیشینه شدت روند را در اختیار ندارند. بطوریکه بیشینه شدت روند افزایشی هم از نظر گستره جغرافیایی و هم شدت در ماه می دیده می‌شود. برای روند کاهشی نیز بیشینه گستره و شدت روند کاهشی در ماه اوت به‌دست آمده است (شکل ۴).



شکل ۴: روند غلظت گرد و خاک ماهانه در بازه زمانی ۱۹۸۱-۲۰۲۰ بر اساس برونداد مجموعه داده MERRA-2. مناطق همراه با هاشور در نقشه معنی‌داری روند را در سطح ۰/۰۵ بر اساس روش من-کندال تصحیح شده نشان می‌دهند (واحد: گرم/مترمربع/دهه).
 Figure 4: Monthly dust mass density trends in the 1981-2020 based on the MERRA-2 dataset. Areas with hatches in the map show significant trends at the 0.05 level based on the modified Mann-Kendall test (unit: $\text{g/m}^2/\text{decade}$).

۴. نتیجه گیری

انتشار گرد و خاک به عنوان یکی از مخاطرات محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می‌رود. درک عوامل موثر در افزایش غلظت گرد و خاک برای هشدار اولیه و کاهش آسیب‌های ناشی از آن بسیار مهم است. عوامل زیادی بر الگوهای فضایی و زمانی غلظت گرد و خاک تأثیر می‌گذارند این تحقیق به بررسی نقش متغیرهای اصلی اقلیمی همانند دما، بارش و تندی باد در تغییرات غلظت گردو خاک در منطقه غرب آسیا پرداخته است. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح زیر است:

- نتایج نشان داد در ماه‌های سرد سال و بخصوص فصل زمستان، غلظت گرد و خاک به دلیل اینکه خاک هنوز مرطوب است و به عنوان عامل باز دارنده مانع از ترا برد گرد خاک می‌شود تغییرات چندانی ندارد. این در حالی است که در تابستان غلظت گرد و خاک به دلیل افزایش دما، افزایش تندی باد، کاهش بارش و به تبع آن کاهش رطوبت خاک افزایش می‌یابد.

- تغییرات ماهانه غلظت گرد و خاک بر اساس برون داد MERRA-2 نشان داد در ماه ژوئیه مساحت زیادی از منطقه مورد مطالعه در پهنه اقلیمی بیابانی گرم و خشک (BWh) مقادیر بالای گردو خاک را در منطقه مورد مطالعه دارند.
- بیشینه غلظت گرد و خاک در فصول بهار و تابستان به دلیل کاهش بارش، افزایش دما و تندی باد و کمبود پوشش گیاهی و اقلیم بیابانی خشک آن شرایط را برای افزایش غلظت گرد و خاک مهیا نموده است.

- تغییرات ماهانه متغیر بارش نشان داد غلظت گرد و خاک با بارش رابطه معکوس دارد. البته این رابطه معکوس برای چشمه‌های گرد و خاک صادق است و در مناطقی مانند غرب و جنوب غرب ایران با وجود بارش‌های مناسب شاهد افزایش غلظت گرد و خاک می‌باشیم که این نکته تأثیر چشمه‌های برون مرزی را در ترا برد گرد و خاک به این مناطق نشان می‌دهد همین نکته در شرق پاکستان هم مشاهده می‌شود که با وجود مقادیر بالای بارش شاهد مقادیر بالایی از غلظت گرد و خاک نیز هستیم که علت آن وجود چشمه فعال گرد و خاک مربوط به بیابان تار و وجود شهرهای پر جمعیت پیشاور، راولپندی، ژوب، لاهور، مولتان، خان، روهری و کراچی می‌باشد (Alam et al., 2010).

- تغییرات میانگین بلندمدت متغیر دما نشان می‌دهد غلظت گرد و خاک با دما رابطه مستقیم دارد و چشمه‌های فعال گرد و خاک در عراق (منطقه میانرود یا بین النهرین)، مناطق بیابانی کشور عربستان (بیابان ربع الخالی، الدهنا، النفود)، پاکستان (بیابان تار)، ترکمنستان (بیابان قزل قوم، قره قوم، بستر خشکیده آرال قوم و قره بغاز) دارای بیشینه دما می‌باشند. البته موارد استثنا همچون دشت لوت در ایران با وجود دمای بالا، گرد و خاک پایینی دارد. چرا که رشته کوه‌های زاگرس همانند سد مانع از ترا برد گرد و خاک به این منطقه شده است.

- در فصل تابستان تندی باد در منطقه مورد مطالعه افزایش چشمگیری دارد که باعث افزایش غلظت گرد و خاک از چشمه‌های بین النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه به سمت استان‌های غربی ایران می‌باشد. از سوی دیگر در ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی بالا تندی باد به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که این امر به همراه مقدار پوشش گیاهی بالایی این مناطق و دوری از چشمه‌های گردو خاک فعال در غرب آسیا باعث شده است تا این مناطق مقدار غلظت گردو خاک پایینی را داشته باشند.

- بررسی ضرایب همبستگی بدون تاخیر و با تاخیر نشان داده است که بین متغیرهای اقلیمی تندی باد و دما با غلظت گردوخاک در غرب آسیا رابطه مستقیم وجود دارد در مقابل بین غلظت گردوخاک و بارش همبستگی منفی دیده می‌شود. بالاترین ضرایب همبستگی مستقیم بین غلظت گردوخاک و دما به‌دست آمده است و بالاترین ضریب همبستگی معکوس نیز بین غلظت گردوخاک و بارش بخصوص در ماه‌های سرد سال محاسبه شده است.
- بررسی روند غلظت گردوخاک ماهانه نشان داده است که مقدار این متغیر در اکثر ماه‌های سال در مناطقی با گردوخاک بالا همانند بین النهرین، جنوب‌غربی ایران، جنوب و جنوب شرقی ایران دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است.

منابع

1. Alam, K., Iqbal, M. J., Blaschke, T., Qureshi, S., & Khan, G. (2010). Monitoring spatio-temporal variations in aerosols and aerosol–cloud interactions over Pakistan using MODIS data. *Advances in Space Research*, 46(9), 1162-1176. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.025>
2. Alonso-Montesinos, J., Martínez, F. R., Polo, J., Martín-Chivelet, N., & Batlles, F. J. (2020). Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production. *Energies*, 13(23), 6376. <https://doi.org/10.3390/en13236376>
3. Asadi Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Seasonal Distribution Analysis of Extreme Precipitation in Iran using AgERA5 dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2723-2737. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.333263.669118>
4. Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., ... & Thépaut, J. N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186-4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>.
5. boroghani, M., moradi, H., Zangane Asadi, M., & Pourhashemi, S. (2019). Evaluation of the role of drought in frequency of dust in Khorasan Razavi province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 109-121. doi: 10.22034/jest.2019.10464. (In Persian).
6. Brown, D., de Sousa, K., & van Etten, J. (2023). ag5Tools: An R package for downloading and extracting agrometeorological data from the AgERA5 database. *SoftwareX*, 21, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101267>.
7. Caído, N. G., Ong, P. M., Rempillo, O., Galvez, M. C., & Vallar, E. (2022). Spatiotemporal analysis of MODIS aerosol optical depth data in the Philippines from 2010 to 2020. *Atmosphere*, 13(6), 939. <https://doi.org/10.3390/atmos13060939>
8. Chen, S., Liu, J., Wang, X., Zhao, S., Chen, J., Qiang, M., ... & Chen, F. (2021). Holocene dust storm variations over northern China: transition from a natural forcing to an anthropogenic forcing. *Science Bulletin*, 66(24), 2516-2527. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.08.008>
9. Dadashi-Roudbari, A. (2020). Analysis of spatiotemporal variations of vertical and horizontal patterns of aerosols and evaluation of its Climate feedback in Iran, Ph.D. Thesis Urban Climatology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (In Persian).
10. Dadashi-Roudbari, A., Ahmadi, M., & Shakiba, A. (2020). Seasonal Study of dust deposition and fine particles (PM 2.5) in Iran Using MERRA-2 data. *Iranian Journal of Geophysics (IJG)*, 13(4), 43-59.
11. Dadashi-Roudbari, A., & Ahmadi, M. (2021). An assessment of change point and trend of diurnal variation of dust storms in Iran: a multi-instrumental approach from in situ, multi-satellite, and

- reanalysis dust product. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1523-1544. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00825-x>
12. Dar, M. A., Ahmed, R., Latif, M., & Azam, M. (2022). Climatology of dust storm frequency and its association with temperature and precipitation patterns over Pakistan. *Natural Hazards*, 110(1), 655-677. <https://doi.org/10.1002/joc.5019>
 13. Daufresne, M., Lengfellner, K., & Sommer, U. (2009). Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31), 12788-12793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902080106>
 14. Fallah Zazuli, M., Vafaeinezhad, A., Kheirkhah Zarkesh, M. M., & Ahmadi Dehka, F. (2014). Source routing of dust haze phenomenon in the west and southwest of Iran and its synoptic analysis by using remote sensing and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 5(4), 61-78. (In Persian).
 15. Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Science & Business Media.
 16. Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
 17. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
 18. Heydari, A., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Investigating the performance of the deterministic and probabilistic versions (multi-member ensemble) of the ERA5 dataset in estimating Iran's temperature. *Researches in Earth Sciences*, 14(4), 1-20. (In Persian).
 19. Jafari, M., Mesbahzadeh, T., Masoudi, R., Zehtabian, G., & Amouei Torkmahalleh, M. (2021). Dust storm surveying and detection using remote sensing data, wind tracing, and atmospheric thermodynamic conditions (case study: Isfahan Province, Iran). *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14, 1301-1311. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01021-x>.
 20. Jiao, D., Xu, N., Yang, F., & Xu, K. (2021). Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Scientific Reports*, 11(1), 17956. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97432-y>
 21. Jin, Q., Wei, J., Lau, W. K., Pu, B., & Wang, C. (2021). Interactions of Asian mineral dust with Indian summer monsoon: Recent advances and challenges. *Earth-Science Reviews*, 215, 103562. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103562>
 22. Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
 23. Koster, R. D., McCarty, W., Coy, L., Gelaro, R., Huang, A., Merkova, D. ... & Wargan, K. (2016). MERRA-2 input observations: Summary and assessment.
 24. Li, Z., Lau, W. M., Ramanathan, V., Wu, G., Ding, Y., Manoj, M. G., ... & Brasseur, G. P. (2016). Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics*, 54(4), 866-929. <https://doi.org/10.1002/2015RG000500>
 25. Liu, C., Yin, Z., He, Y., & Wang, L. (2022). Climatology of dust aerosols over the Jiangnan Plain revealed with space-borne instruments and MERRA-2 reanalysis data during 2006–2021. *Remote Sensing*, 14(17), 4414. <https://doi.org/10.3390/rs14174414>

26. Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, 9(6), 261. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060261>
27. Middleton, N., Kashani, S. S., Attarchi, S., Rahnama, M., & Mosalman, S. T. (2021). Synoptic causes and socio-economic consequences of a severe dust storm in the Middle East. *Atmosphere*, 12(11), 1435. <https://doi.org/10.3390/atmos12111435>
28. Mukherjee, T., Vinoj, V., Midya, S. K., & Adhikary, B. (2020). Aerosol radiative impact on surface ozone during a heavy dust and biomass burning event over South Asia. *Atmospheric Environment*, 223, 117201. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117201>
29. Rushingabigwi, G., Nsengiyumva, P., Sibomana, L., Twizere, C., & Kalisa, W. (2020). Analysis of the atmospheric dust in Africa: The breathable dust's fine particulate matter PM_{2.5} in correlation with carbon monoxide. *Atmospheric Environment*, 224, 117319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117319>
30. Sarkar, S., Chauhan, A., Kumar, R., & Singh, R. P. (2019). Impact of deadly dust storms (May 2018) on air quality, meteorological, and atmospheric parameters over the northern parts of India. *GeoHealth*, 3(3), 67-80. <https://doi.org/10.1029/2018GH000170>
31. Shao, Y., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., ... & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4), 181-204. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>
32. Shi, L., Zhang, J., Yao, F., Zhang, D., & Guo, H. (2021). Drivers to dust emissions over dust belt from 1980 to 2018 and their variation in two global warming phases. *Science of The Total Environment*, 767, 144860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144860>
33. Soltani, M. J., Motamedvaziri, B., Noroozi, A. A., Ahmadi, H., & Mosaffaei, J. (2021). Identifying and prioritizing the factors affecting the creation of dust in Hendijan City and providing management solutions by DPSIR framework. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 269-282. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352406.1848>
34. Sujitha, P. R., Santra, P., Bera, A. K., Verma, M. K., & Rao, S. S. (2022). Detecting dust loads in the atmosphere over Thar desert by using MODIS and INSAT-3D data. *Aeolian Research*, 57, 100814. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100814>
35. Sun, J., Ding, K., Lai, Z., & Huang, H. (2022). Global and Regional Variations and Main Drivers of Aerosol Loadings over Land during 1980–2018. *Remote Sensing*, 14(4), 859. <https://doi.org/10.3390/rs14040859>
36. Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2021). Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101080. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101080>
37. Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. *Spatial statistics and models*, 443-460. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23
38. Wu, J., Kurosaki, Y., & Du, C. (2020). Evaluation of climatic and anthropogenic impacts on dust erodibility: A case study in Xilingol Grassland, China. *Sustainability*, 12(2), 629. <https://doi.org/10.3390/su12020629>
39. Yu, C. Li, Z. and Blewitt, G. (2021). Global comparisons of ERA5 and the operational HRES tropospheric delay and water vapor products with GPS and MODIS. *Earth and Space Science*, 8(5), e2020EA001417. <https://doi.org/10.1029/2020EA001417>
40. Zarrin, A., Salehabadi, N., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2022). Investigation of Seasonal dust in northeastern Iran and numerical simulation of extreme dust events using WRF-

نسخه خطی
پایان
انتشار