

Investigating aerosol optical depth and their thresholds in West Asia and their relationship with vegetation

Katorani, Sh.¹  | Ahmadi, M.¹   | Dadashi-Roudbari, A. A.² 

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

2. Department of Geography, Faculty of Dr. Ali Shariati Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

(Received: 26 Aug 2023, Revised: 25 Oct 2023, Accepted: 9 Jan 2024, Published online: 6 July 2024)

Summary

Dust is a common meteorological phenomenon in arid and semi-arid regions of the world, which is caused by natural or human factors. The frequency and intensity of dust have increased in the last two decades. Identifying the active sources of dust is the first step in dealing with it and reducing its harmful consequences. For this purpose, two indices of aerosol optical depth (AOD) and the normalized difference vegetation index (NDVI) from the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) sensor of the Terra satellite have been used for the last two decades (2001-2021). To investigate dust events in the study area, the frequency of occurrence of aerosol optical depth (FoO) was investigated with three thresholds of 0.3, 0.5, and 1. The maximum AOD values are related to the spring and summer seasons. Regions with an aerosol optical depth of more than 1 are only limited to the warm period of the year and the areas of Mesopotamia region, Arabian deserts, desert areas of Syria, Dasht-e Margo and Dasht-e Sistan, and eastern Pakistan. The nationwide dust that covers wide areas in Saudi Arabia and the Persian Gulf countries and the west and southwest of Iran are mostly more than 0.5 in terms of AOD values. In general, six hotspots of dust can be identified based on the values of the AOD and FoO index for the West Asian region. These six regions are 1- Thar desert in Pakistan, 2- Rub' al Khali, Ad-Dahna, Al Nufud Al Kabirdesert in Saudi Arabia, 3- the Syrian desert, 4- the Desert regions of Iraq and especially the Mesopotamia region, 5- Dry and desert regions of Oman, 6- Dasht-e Margo and Dasht-e Sistan (in Afghanistan and Iran). These dust hotspots are found in arid, desert, and hot climate regions (BWh). The only effective hotspots in northeastern Iran are located in the arid, desert, and cold climate region (BWk) in Turkmenistan. In general, dust hotspots have an inverse relationship with vegetation, although this relationship is more for spring hotspots. Regardless of the determining role of surface characteristics in the occurrence of dust, two meteorological phenomena, the summer Shamal wind and the wind of 120 days of Sistan, have a determining role in the formation of hotspots with higher AOD values of 0.5 and 1. The area-averaged time series of MOD04 product values show that the value of AOD is increasing. Also, the results showed that the increase in AOD values from the 2010s onwards shows an upward trend compared to that of the 2000s. The dry bed of lakes and alluvial sources (Mesopotamia), human activities on the one hand, and the occurrence of drought and climate change, on the other hand, are directly related to the extent and intensity of dust events in West Asia.

Keywords: Aerosol, AOD thresholds, FoO, West Asia.

Cite this article: Katorani, Sh., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2024). Investigating aerosol optical depth and their thresholds in West Asia and their relationship with vegetation. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 481-498. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.364171.1007554>

E-mail: (1) sh.katorani99@gmail.com (2) a-dadashi@um.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.364171.1007554>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

بررسی هواویزها و آستانه‌های آن در غرب آسیا و ارتباط آن با پوشش گیاهی

شلیبر کاتورانی^۱ | محمود احمدی^۱ | عباسعلی داداشی رودباری^۲

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۶/۴، بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۴/۱۶)

چکیده

گردوخاک پدیده هواشناسی رایج در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که در اثر عوامل طبیعی یا انسانی ایجاد می‌شود. شناسایی چشمه‌های فعال گردوخاک نخستین گام برای مقابله با آن و کاهش پیامدهای مخرب آن است. برای این منظور از دو شاخص عمق نوری هواویزها (AOD) و اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) از سنجنده MODIS ماهواره Terra برای دو دهه گذشته (۲۰۲۰-۲۰۱۰) استفاده شده است. برای بررسی چشمه‌های فعال هواویز در منطقه مورد مطالعه درصد فراوانی آستانه‌های هواویزها با سه آستانه ۰/۳، ۰/۵ و ۱ مورد بررسی قرار گرفت. بیشینه مقادیر AOD مربوط به فصول بهار و تابستان است. به‌طور کلی شش کانون اصلی هواویزها بر اساس مقادیر AOD و شاخص FoO برای منطقه غرب آسیا قابل تشخیص است. این کانون‌های هواویز در پهنه اقلیمی بیابانی گرم‌و‌خشک (BWh) دیده می‌شوند. تنها کانون هواویز مؤثر در شمال شرقی ایران در پهنه اقلیمی بیابانی خشک و سرد (BWk) در کشور ترکمنستان قرار دارد. بررسی ماتریس ضریب همبستگی هواویزها با پوشش گیاهی نشان از رابطه معکوس دارد، البته این رابطه بیشتر برای چشمه‌های هواویزها صادق است. فارغ از نقش تعیین کننده ویژگی‌های سطحی در رخداد هواویزها، دو پدیده هواشناسی همانند باد شمال تابستانه و باد ۱۲۰ روزه سیستان در تشکیل کانون‌هایی با مقادیر AOD بالاتر ۰/۵ و ۱ نقش تعیین کننده‌ای دارند.

واژه‌های کلیدی: هواویز، آستانه‌های AOD، FoO، غرب آسیا.

۱. مقدمه

زیست و سلامت انسان دارد (گودی، ۲۰۰۹) و باعث خساراتی همچون از بین رفتن زمین‌های کشاورزی و بیابان‌زایی (کوروساکی و همکاران، ۲۰۲۲)، اختلال در سامانه‌های حمل‌ونقل زمینی، هوایی و تصادفات جاده‌ای (الشیدی و همکاران، ۲۰۲۲)، افزایش بیماری‌های تنفسی (فن و همکاران، ۲۰۲۰)، اختلال در نظام آموزشی و اداری می‌شود.

اغتشاشات جوی، تندی باد، خاک برهنه و خشک از عوامل افزایش فروانی هواویزها به شمار می‌روند (می و همکاران، ۲۰۰۸). معمولاً گردوخاک در مناطق خشک عرض‌های میانی، مناطق حاره و جنب حاره، با میانگین بارش سالانه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد (ایندویتو و

گردوخاک یکی از پدیده‌های رایج و غالب جو در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۷). تغییرات زمانی-مکانی این متغیر به عوامل مختلف جوی و محیطی بستگی دارد (شائو و همکاران، ۲۰۱۳). هواویزهای موجود در جو، بودجه تابشی جو (عالم و همکاران، ۲۰۱۰)، دی‌اکسید کربن جوی (روشینگ‌بیگویی و همکاران، ۲۰۲۰)، ازن جوی (موکهرجی و همکاران، ۲۰۲۰)، اقتصاد منطقه (آلونسو-مونتسینوس، ۲۰۲۰)، بهداشت و سلامت (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶) را تحت تأثیر قرار داده و با تغییر مشخصات خرد فیزیک ابرها به‌طور غیرمستقیم بر مقدار بارش اثر می‌گذارد (لی و همکاران، ۲۰۱۶). گردوخاک پیامدهای متعددی بر محیط

سری‌های زمانی طولانی فعالیت‌های هواویزها در سطح جهانی تبدیل شده است که در این تحقیق مبنای اصلی مطالعه در جنوب غرب آسیا است.

بررسی و مطالعات انجام شده از گردوخاک نشان می‌دهد که این مطالعات در سطح جهانی بر اساس منطقه مورد مطالعه، نوع داده، متغیرها و روش‌های مورد استفاده بسیار متنوع می‌باشند بنابراین در یک طبقه‌بندی مطالعات انجام شده را می‌توان به مطالعاتی که به بررسی ارتباط پوشش سطح زمین با گردوخاک پرداختند (فن و همکاران، ۲۰۱۴؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۸) و تحقیقاتی که تغییرات زمانی-فضایی هواویزها و رخداد‌های گردوخاک را بررسی کرده‌اند (ایندویتو و همکاران، ۲۰۰۹؛ کائیدو و همکاران، ۲۰۲۲؛ سان و همکاران، ۲۰۲۲؛ علی و همکاران، ۲۰۲۲) اشاره کرد. بیشتر این مطالعات روند افزایشی را برای کدهای دیدبانی گردوخاک و همچنین هواویزها در مناطق مورد مطالعه خود گزارش کرده‌اند. همچنین نتایج این مطالعات نشان داده است همبستگی منفی معنی‌داری بین شاخص‌های پوشش گیاهی در فصول گرم سال وجود دارد به طوری که کاهش پوشش گیاهی با افزایش هواویزها در هر فصل در ارتباط است.

بر اساس نوع داده‌های مورد استفاده مطالعات انجام شده در حوزه گردوخاک را می‌توان به مطالعات مبتنی بر ۱- محصولات سنجش از دور (عالم و همکاران، ۲۰۱۰؛ داداشی رودباری و احمدی، ۲۰۲۱؛ کائیدو و همکاران، ۲۰۲۲؛ سان و همکاران، ۲۰۲۲؛ سوچیتا و همکاران، ۲۰۲۲) ۲- داده‌های ایستگاهی (چن و همکاران، ۲۰۱۹b؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰) ۳- داده‌های بازتحلیل (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ جکیکاس و همکاران، ۲۰۲۱) طبقه‌بندی کرد، در بسیاری از این مطالعات از داده‌های AOD سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra و Aqua (MYD04, MOD04) استفاده شده است و کارایی این محصولات را در سطح جهانی برای پایش هواویزها تأیید کرده‌اند.

غرب آسیا در کمربند جهانی گردوخاک واقع شده است

همکاران ۲۰۱۲). به طور کلی بارش و پوشش گیاهی با تثبیت خاک بر فعالیت، شدت و ضعف گردوخاک تراپردیده به جو نقش آفرینی می‌کنند (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶). لذا شناخت دقیق چشمه‌های فعال و بررسی ویژگی‌های سطحی همانند پوشش گیاهی می‌تواند نقش مهمی را در مهار و کنترل این پدیده مخرب داشته باشد.

غرب آسیا با اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک در جهان به‌عنوان یکی از کانون‌های گردوخاک شناخته می‌شود. این منطقه در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار گرفته است. وجود بیابان‌های وسیع در منطقه مانند بیابان ربع‌الخالی، منطقه میان‌رود در کشور عراق، دشت لوت و کویر در ایران و صحرای سوریه، خشک شدن دریاچه‌ها و کاهش سطح آب رودهای منطقه (کرمی و همکاران، ۲۰۲۱)، کاهش بارش (کریمین و همکاران، ۲۰۱۳)، اغتشاشات جوی (گنو و همکاران، ۲۰۱۲) فعالیت‌های انسانی، فعالیت‌های صنعتی و توسعه شهرها (چن و همکاران، ۲۰۱۹a) منجر به روند افزایشی گردوخاک در این منطقه شده است. بنابراین شناسایی کانون‌های اصلی هواویزها که نقش مهمی را در بار ورودی ذرات به به کشور دارند و بررسی تغییرات آن در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌تواند برای کاهش زیان‌های اقتصادی و آسیب‌های انسانی ناشی از فعالیت‌های گردوخاک، شناخت سازوکارهای آن، مدل‌سازی و پیش‌بینی آن مورد استفاده قرار گیرد.

برای تشخیص هواویزها لازم است تا از داده‌های با طول آماری کافی و کیفیت بالا استفاده کرد. یکی از این داده‌ها، محصولات سنجش از دور هستند. با این حال پیش از استفاده از محصولات سنجش از دور در مناطق خشک و نیمه‌خشکی همچون غرب آسیا باید سه شرط را در نظر گرفت: ۱) تفکیک زمانی مناسب؛ ۲) تفکیک طیفی زیاد برای جداسازی هواویزها از ابرها و پس‌زمینه بیابان و ۳) سری‌زمانی بلندمدت و بدون شکاف (Gap) در پوشش زمانی-مکانی داده‌ها (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲)؛ بر اساس این شرایط، محصولات هواویز سنجنده MODIS در مقیاس روزانه به یک مجموعه داده ضروری برای مطالعه

ارتباط آن با پوشش گیاهی در مقیاس زمانی ماهانه است. استفاده از AOD لزوماً به معنای یک معیار تشخیص گردوخاک نیست و حد آستانه است که احتمال وجود گردوخاک را تأیید می‌کند. لذا در این تحقیق نیز با در نظر گرفتن این اصل مهم به بررسی آستانه‌های AOD و درصد فراوانی آنها پرداخته شده است. نتایج این تحقیق دارای کاربردهای بسیاری در حوزه‌های مختلف علوم جوی، منابع آب، کشاورزی و حمل‌ونقل است.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش غرب آسیا می‌باشد، اما از آنجایی که تمرکز اصلی این پژوهش بار هواویزهای رسیده به ایران و چشمه‌های مؤثر بر کشور است دو کشور پاکستان و افغانستان از آسیای جنوبی و ترکمنستان از آسیای مرکزی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است تا بهتر بتوان نسبت به بررسی چشمه‌های مؤثر در مناطق شرقی ایران نیز بحث کرد (شکل ۱). این منطقه شامل چندین بیابان شامل ربع‌الخالی، بیابان تار، دشت سیستان، دشت مارگو، دشت لوت، دشت کویر، بیابان قره‌قوم، بیابان قزل‌قوم، بیابان سوریه و النفوذ است (شکل ۱-ج و ۱-د) که باعث ترابرد گردوخاک چشم‌گیری می‌شوند.

با توجه به این که روش طبقه‌بندی کوپن-گایگر بر این اساس استوار است که گیاهان بومی هر منطقه بهترین نمایه برای تعیین اقلیم آن منطقه هستند و مرز بین مناطق اقلیمی مختلف را می‌توان با استفاده از محدوده‌های زیستی گیاهان مختلف مشخص کرد (تروارتا، ۱۹۸۰) بنابراین طبقه‌بندی اقلیمی منطقه مورد مطالعه با روش کوپن-گایگر نشان می‌دهد این منطقه وردایی اقلیمی زیادی را به دلیل توپوگرافی پیچیده خود دارد و در بخش‌های وسیعی از جنوب غربی آسیا اقلیم بیابانی گرم (Bwh) حکم فرماست، مناطقی از جنوب غرب ایران، شمال عراق و سوریه اقلیم استپ یا نیمه‌خشک با بیابان‌های گرم (Bsh) دارد (شکل ۱-الف). همانند اقلیم پیچیده، این منطقه توپوگرافی بسیار

و این پدیده مخرب به یک موضوع تحقیقاتی ویژه در این منطقه تبدیل شده، به طوری که مطالعات مختلفی به بررسی آن پرداخته‌اند. از مطالعات پیشگام در این منطقه می‌توان به تحقیق میدلتون (۱۹۸۶) اشاره کرد که جغرافیای طوفان‌های گردوخاک در جنوب غربی آسیا را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسید که طوفان‌های گردوخاک در این منطقه عمدتاً در ماه‌های فصل خشک بهار و تابستان رخ می‌دهد. پس از گذشت نزدیک به چهار دهه از این تحقیق تا امروز مطالعات مختلفی همانند حمیدی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی همدیدی طوفان‌های گردوخاک خاورمیانه، عالم و همکاران (۲۰۱۴) که به بررسی ویژگی‌های هواویزهای خاورمیانه و غرب آسیا و نبوی و همکاران (۲۰۱۶) که به اقلیم‌شناسی هواویزهای در منطقه غرب آسیا پرداختند، اشاره کرد. در سال‌های اخیر نیز مطالعاتی همانند داداشی رودباری (۱۳۹۹) به بررسی تغییرات زمانی-مکانی و الگوهای قائم و افقی هواویزها در ایران پرداختند و ویژگی‌های این پدیده را مورد بررسی قرار داده‌اند. از سوی دیگر مطالعاتی همچون پاپی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی ویژگی‌های طوفان گردوخاک در خاورمیانه به این نتیجه رسیدند که شرایط طبیعی و خشکسالی به‌طور فعال در کاهش منابع آبی که منجر به تشکیل چشمه‌های گردوخاک در خاورمیانه شده، نقش دارند.

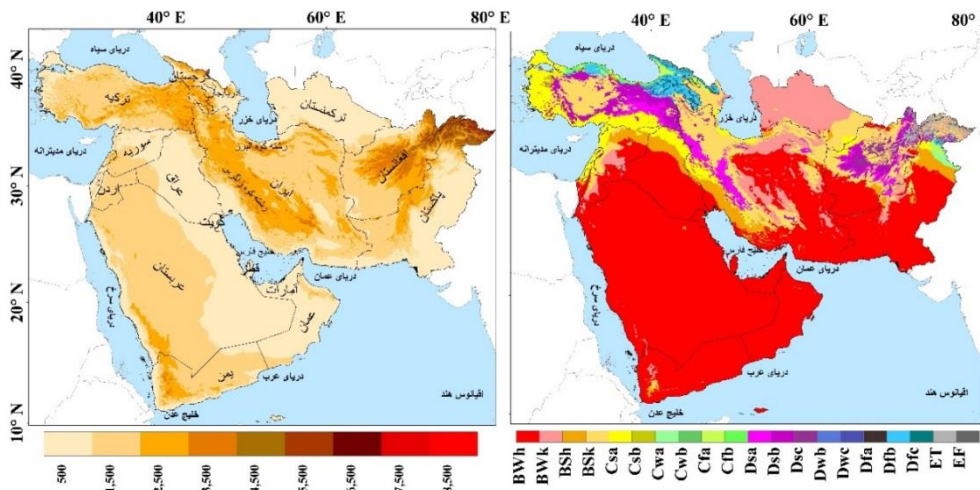
با وجود مطالعات بسیاری که در سطح جهانی پرداخته شده است اما با توجه به این که غرب آسیا در کمربند گردوخاک جهانی قرار دارد و یک منطقه بزرگ جمعیتی، استراتژیکی با داشتن بیابان‌های وسیع و خشک و نیمه‌خشک، ریسک بالایی برای رخداد گردوخاک دارد و سال‌های اخیر نیز با مشکلات بسیاری در این زمینه روبه‌رو بوده است، بنابراین شناخت دقیق از ویژگی‌های مختلف گردوخاک در این منطقه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در برنامه‌های مدیریتی مربوط به کنترل و سپس مهار چشمه‌های گردوخاک فعال این منطقه وسیع داشته باشد. لذا هدف از پژوهش حاضر، شناسایی فراوانی هواویزها در منطقه بر اساس آستانه هواویزها و بررسی

است. یکی از پرکاربردترین سنجنده‌ها در حوزه علوم جو، سنجنده MODIS می‌باشد که بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua که به ترتیب در تاریخ ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می سال ۲۰۰۲ پرتاب شده‌اند، قرار گرفته است. زمان عبور ماهواره Terra ساعت ۱۰:۳۰ صبح و شب و ماهواره Aqua ساعت ۱:۳۰ شب و روز از خط استوا است. پهنای نوار تصویربرداری این سنجنده ۲۳۳۰ کیلومتر است و هر یک الی دو روز تصویر کاملی از سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی تهیه می‌کند. سنجنده MODIS در ۲ باند طیفی (باند ۱ و ۲) تصاویری با تفکیک افقی ۲۵۰ متر، در ۴ باند طیفی (باندهای ۳ تا ۷) با تفکیک افقی ۵۰۰ متر و در ۲۹ باند (باندهای ۸ تا ۳۶) تصاویری با تفکیک افقی ۱ کیلومتر برداشت می‌کند (کیو و همکاران، ۲۰۰۶).

پیچیده‌ای را نیز دارد به طوری که از ارتفاعات بیش از ۷۰۰۰ متر در نواح افغانستان و شمال پاکستان گرفته تا مناطق پست و کم ارتفاع بین‌النهرین در تغییر است (شکل ۱-ب). قراردادن کشورهای منطقه مورد مطالعه در کمربند گردوخاک جهانی، اقلیم خشک و نیمه‌خشک آن، وجود بیابان‌های وسیع و خاک فرسایش یافته، شرایط مساعد محیطی را برای رخداد گردوخاک در این منطقه ایجاد کرده است.

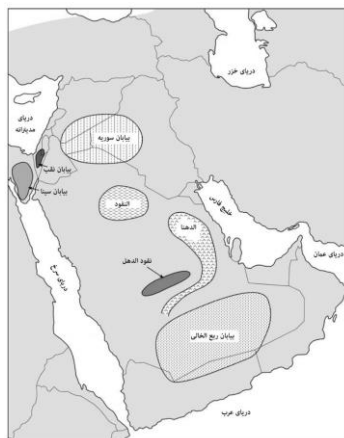
۲-۲. داده‌های مورد استفاده

با پیشرفت روز افزون فناوری سنجنش از دور و به کمک محصولات ماهواره‌ای پایش و آشکارسازی کانون‌های گردوخاک برای مناطقی با مقایس بزرگ امکان پذیر شده

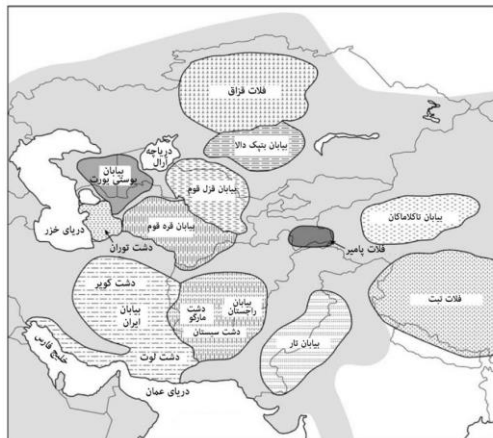


(ب)

(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ الف) پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر؛ ب) مدل رقومی ارتفاعی (DEM)؛ د) بیابان‌های شرقی و شمال شرقی ایران (منبع: مارس، ۲۰۱۷)، د) بیابان‌های غربی و جنوب غربی ایران (منبع: وارنر، ۲۰۰۹).

۱-۲-۲. محصولات مورد استفاده سنجنده MODIS ماهواره Terra

عمق نوری هواویزها (AOD)، برآوردی از مقدار کاهش نور خورشید در ستونی از جو توسط ذرات معلق که به علت جذب یا پراکنش نور اتفاق می‌افتد و به‌عنوان کلیدی‌ترین متغیر برای بررسی هواویزها و ویژگی‌های آن به کار می‌رود (مائو و همکاران، ۲۰۱۴). هواویزهای جوی ذرات ریز جامد و مایع هستند که در هوا معلق هستند و از چند نانومتر تا چند ده میکرومتر متغیر هستند (وی و همکاران، ۲۰۲۰). هواویزها از طریق فرایندهای طبیعی مختلف (مانند نمک دریا، گردوخاک بیابانی و آتشفشان) و فرایندهای انسانی شامل احتراق سوخت‌های فسیلی، فرایندهای شهری/صنعتی و سوزاندن زیست‌توده وارد جو می‌شوند. این ذرات با پراکندگی یا جذب تابش خورشیدی بر دما، فیزیک ابرها، دید افقی و بسیاری دیگر از متغیرهای اقلیمی تأثیر می‌گذارند (سیر و همکاران، ۲۰۱۴). هواویزها همچنین می‌توانند در ایجاد یا تشدید بیماری‌های تنفسی و قلبی عروقی نقش داشته باشند (منگ و لو، ۲۰۰۷). در این پژوهش از محصول ترکیبی DB و DT برای بررسی عمق نوری هواویزها (AOD) استفاده شده است. الگوریتم DT برای مطالعه و بازیابی هواویزها در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم توسعه داده شد (لیوی و همکاران، ۲۰۱۳). درحالی‌که الگوریتم DB برای بازیابی هواویزها در سطوح روشن همانند بیابان‌ها توسعه داده شده است (سیر و همکاران، ۲۰۱۴). علت انتخاب الگوریتم ترکیبی به دلیل پیچیدگی توپوگرافی قابل توجه در منطقه مورد مطالعه از یک سو و تنوع زیاد کاربری زمین/پوشش زمین (LULC) بوده است. عمق نوری هواویز مورد بررسی در این تحقیق AOD_{550nm} با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ است. علت انتخاب طول موج ۵۰۰ نانومتر به این دلیل است که این طول موج در میانه محدوده مرئی قرار دارد. این محدوده طیفی اوج طیف خورشیدی که اثر بیشینه تابشی را دارد نشان می‌دهد (فلوتسی و همکاران، ۲۰۱۶).

شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) یک شاخص پرکاربرد برای پایش جهانی شرایط پوشش گیاهی است که از آن در پژوهش‌های بی‌شماری در سطح جهانی استفاده شده است. از این شاخص برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه در مقیاس ماهانه استفاده شده است. برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی از محصول ماهانه MOD13A3 از محصولات مجموعه ۶/۱ سنجنده MODIS ماهواره Terra با تفکیک افقی یک کیلومتر استفاده شده است. این محصول با کمک میانگین وزن دار از سری داده‌های روزانه سنجنده MODIS، مجموعه داده‌های ماهانه را تولید می‌کند.

۳-۲. شیوه پژوهش

برای آشکارسازی چشمه‌های فعال هواویزها و تفکیک آنها از چشمه‌های ضعیف‌تر هواویز از روش فراوانی رخداد (Frequency of Occurrence) FoO استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده در سطح جهانی نشان می‌دهد که مقادیر AOD برابر با ۰/۸ تا ۰/۹ به‌عنوان مقدار بالای هواویزها در نظر گرفته می‌شوند (مائو و همکاران، ۲۰۲۰) که برای شناسایی کانون‌های گرد خاک فعال استفاده می‌شوند. لذا در این تحقیق بر اساس آستانه‌های پیشنهادی جهانی نقشه درصد فراوانی رخداد گردوخاک بر اساس آستانه‌ها تهیه شد. در این روش بر اساس آستانه‌های پیشنهادی جینوکس و کریستینا (۲۰۱۰) با به‌منظور شناسایی کانون‌های گردوخاک فعال، مقادیر AOD از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ در سه آستانه (۰/۳، ۰/۵ و ۱) در منطقه مورد مطالعه برای هر نقطه شبکه برای هر آستانه تهیه شد. شایان ذکر است که صرفاً استفاده از AOD معیار تشخیص گردوخاک نیست و حد آستانه است که احتمال وجود گردوخاک را تأیید می‌کند. این روش با شناسایی مقادیر AOD بالاتر از یک آستانه معین کار می‌کند، در واقع FoO برای تعداد دفعاتی که مقدار AOD یک نقطه شبکه بیشتر از یک آستانه معین است تعریف می‌شود. در این روش بدون توجه به فعالیت سوزاندن زیست‌توده در مناطق

۱۳۹۹). بیشینه مقدار هواویزها در بهار در جنوب و غرب منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود که در تابستان به سمت شرق منطقه مورد مطالعه و پاکستان کشیده می‌شود. در همین راستا عزیزی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی منابع تأمین‌کننده گردو خاک‌های این منطقه از ایران، منطقه‌ی مرزی بین سوریه و عراق و مسیر شمال غرب-جنوب شرق به ترتیب منشأ و مسیر اصلی ورود گردو خاک به مناطق غربی دانسته‌اند. افزایش دما در فصول گرم سال، اقلیم بیابانی خشک و نیمه‌خشک در عراق و عربستان و بخش‌هایی از سوریه و اردن، 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 هواویزهای گردو خاک به ایران را فراهم می‌کند. نقش عوامل هواشناسی در افزایش بار هواویزهای غرب و جنوب غرب ایران توسط پژوهش‌های مختلفی همانند مفیدی و زرین (۲۰۲۲) نیز تأیید شده است.

عرض جغرافیایی و هواویزها رابطه معکوسی را نشان می‌دهند. به طوری که با افزایش عرض جغرافیایی مقدار AOD کاهش می‌یابد. در عرض‌های جغرافیایی پایین به دلیل وجود بیابان‌های عربستان (ربع‌الخالی، الدهنا، النفوذ) مقادیر بالایی از AOD در فصول گرم سال مشاهده می‌شود در عرض‌های بالاتر و حوالی منطقه بین‌النهرین در عراق و سوریه نیز مقدار شاخص قابل توجهی کماکان مشاهده می‌شود اما از عرض ۳۶ درجه شمالی به بالا تقریباً هیچ هواویزی مشاهده نمی‌شود. در این خصوص می‌توان به نقش عامل توپوگرافی و فاصله از چشمه‌های گردو خاک و همچنین وجود بارش بیشتر و پوشش گیاهی در عرض‌های جغرافیایی بالا مانع گسیل هواویزهایی از نوع گردو خاک می‌شود. اشاره کرد. وجود رشته کوه‌های بلند به عنوان عامل بازدارنده ترابرد هواویزها هم در عرض‌های بالاتر و هم به صورت پراکنده در منطقه مورد مطالعه اشاره کرد. البته استثناهایی نیز وجود دارد که می‌توان به کشور ترکمنستان اشاره کرد که در عرض جغرافیایی حدود ۴۰ درجه هواویز قابل توجهی را به مناطق پایین دست و شمال شرقی ایران ترابرد می‌کند به طوری که

خشک و نیمه‌خشک، مقادیر بیشتر FoO نشان‌دهنده فعالیت‌های شدید و مکرر هواویزها است (دانیالی و کریمی، ۲۰۱۹). فعالیت‌های بیشتر هواویزها می‌تواند به عنوان یک نشانگر کلیدی در مطالعات مربوط به گردو خاک مورد بررسی قرار گیرد. لذا همان‌طور که در هدف تحقیق نیز اشاره شده است یک منطقه با مقدار هواویز زیاد لزوماً به معنای یک چشمه گردو خاک نمی‌باشد.

برای بررسی کمی ارتباط بین NDVI و AOD_{500mm} در منطقه غرب آسیا از روش ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. از آنجایی که ارتباط بین این دو شاخص می‌تواند هم بدون تأخیر زمانی و با تأخیر زمانی مورد توجه باشد، لذا در این تحقیق از روش ماتریس ضریب همبستگی (Correlation matrix) استفاده شده است. ماتریس همبستگی یک ماتریس مربع و متقارن ($K \times K$) است که ورودی ij همبستگی بین ستون‌های i و j از X است. مقادیر بزرگ در این ماتریس نشان‌دهنده هم خطی (Collinearity) بین متغیرهای مورد بررسی است.

۳. نتایج و بحث

بررسی اقلیم‌شناسی ماهانه AOD سنجنده MODIS ماهواره Terra از برون داد ترکیبی الگوریتم‌های DB و DT طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان داد که تغییرات هواویزها در منطقه غرب آسیا و همچنین آسیای مرکزی (کشور ترکمنستان) و آسیای جنوبی (دو کشور افغانستان و پاکستان) به شدت تابع فصل بوده و مقدار آن بسته به منطقه جغرافیایی و فصل تغییرات زیادی را نشان می‌دهد (شکل ۲).

هسته‌های بیشینه هواویزها در ماه‌های مارس تا آگوست (فصول بهار و تابستان) با میانگین بلندمدت ۰/۴ و ۰/۵ رخ داده است. بیشینه مقادیر AOD در دوره گرم سال به خصوص در بین‌النهرین که به شکل یک کانون قابل توجه در شکل ۲ نشان داده شده است، به دلیل کاهش بارش و کاهش رطوبت خاک است (داداشی رودباری،

مشکلات زیادی برای کلان‌شهر مشهد در سال‌های اخیر ایجاد کرده است که می‌توان به گردوخاک مرداد ۱۴۰۲ در این شهر مهم در شمال‌شرقی ایران اشاره کرد.

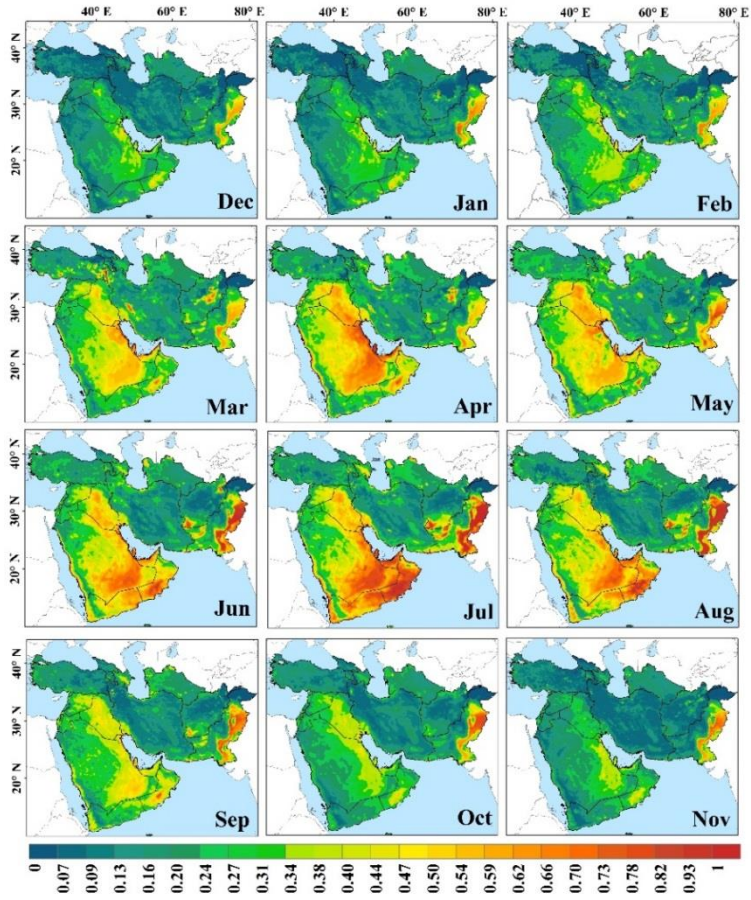
شایان ذکر است به دلیل جریانات غربی هوا در منطقه مورد مطالعه و وجود بیابان‌های خشک وسیع و دستکاری‌های بشر در تغییر بستر رودها و خشک شدن دریاچه‌ها باعث می‌شود مناطقی که بین مدار ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی قرار می‌گیرند در دالانی از ترابرد هواویزها قرار گیرند و بار هواویز قابل توجهی را در طول سال و به‌خصوص در دوره گرم سال داشته باشند.

بررسی منطقه‌ای AOD در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد با جود دشت لوت و دشت کویر در ایران مرکزی، اما AOD بالایی در این مناطق دیده نمی‌شود، یکی از دلایل این امر وجود رشته کوه‌های زاگرس و توپوگرافی خاص منطقه در اطراف این دشت‌ها می‌باشد که مانند سدی مانع از ترابرد هواویزهای رسیده از کشورهای عربستان و عراق و سوریه به سمت ایران مرکزی می‌شود در حالی هواویزهای ترابرد شده، استان‌های واقع در غرب و جنوب‌غرب ایران مانند کردستان، کرمانشاه، ایلام و خوزستان را به شدت تحت تأثیر قرار داده است و حجم بالای بار هواویزهای ترابرد شده به این استان‌ها مشکلات زیادی را به همراه داشته است. شایان ذکر است که بخش‌هایی از دشت لوت و دشت کویر به دلیل بافت خاک به‌عنوان چشمه هواویزها فعال نیستند، ولی مناطقی از آنها خود به‌عنوان چشمه فعال هواویزها فعالیت می‌کنند.

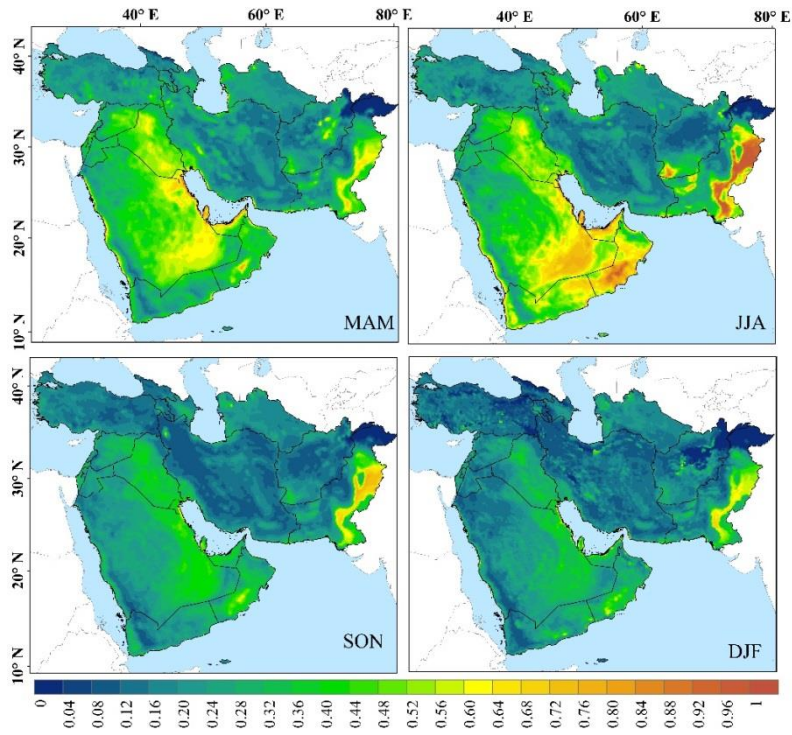
با توجه به پهنه‌بندی اقلیمی کوپن گایگر که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، کشورهای عراق، عربستان، سوریه، عمان و یمن و مناطق مرکزی، جنوب و جنوب‌شرق ایران اقلیم بیابانی گرم (BWh) دارند در این مناطق از اوایل بهار با کاهش بارش خاک رطوبت خود را به شکل قابل توجهی

از دست می‌دهد. به طوری که در ماه مارس کانون‌های قوی هواویزها در غرب و جنوب‌غرب منطقه مورد مطالعه (بین‌النهرین، بیابان‌های سوریه و ربع الخای و الدهنا و النفوذ) تشکیل می‌شود و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه شدت پیدا کرده و به سمت عرض‌های پایین و مناطق شرقی گسترش می‌یابد و رفته‌رفته در دوره سرد سال در ماه‌های دسامبر و ژانویه با افزایش بارش‌ها و افزایش رطوبت خاک این کانون‌ها ضعیف می‌شوند و مجدد با شروع دوره گرم سال این چرخه ادامه می‌یابد. از منظر اقلیمی می‌توان ادعان داشت که تمامی کانون‌های هواویز فعال در منطقه غرب آسیا و حتی آسیای جنوبی در پهنه بیابانی خشک و بسیار گرم (BWh) قرار گرفته‌اند. اما هواویزهای رسیده به شمال‌شرقی ایران دارای اقلیم متفاوتی هستند به طوری که کشور ترکمنستان همان‌طور که در شکل ۱ نیز دیده می‌شود دارای پهنه اقلیمی بیابانی خشک و سرد (BWk) است.

کانون‌های فعال هواویزها در شرق منطقه مورد مطالعه همانند به بیابان تار در پاکستان و دشت مارگو در افغانستان دیده می‌شوند. بار هواویز ورودی از این دو منطقه جنوب‌شرق ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در دوره گرم سال مقدار هواویز قابل توجهی را به شرق و جنوب‌شرق ایران ترابرد می‌کنند. همچنین همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد در بیابان‌های قره‌قوم و قزل‌قوم و بسترهای خشکیده آرال‌قوم و قره‌بازار در ترکمنستان در فصول بهار و تابستان و حتی پاییز مقدار هواویزها افزایش می‌یابد و شمال شرق ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند به طوری که بستر خشکیده دریاچه آرال که امروزه با عنوان بیابان آرال قوم شناخته می‌شود، در اوایل قرن ۲۱ به مهم‌ترین منبع هواویزها در آسیای مرکزی تبدیل شده است (ایندویتو و همکاران، ۲۰۱۲؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۱).



(الف)



(ب)

شکل ۲. پراکنش فضایی عمق نوری هواویزها (AOD) مبتنی بر الگوریتم ترکیبی DB و DT سنجنده MODIS ماهواره Terra در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰. (الف) پراکنش فضایی ماهانه و (ب) پراکنش فضایی فصلی.

بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر (شکل ۱) بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم بیابانی گرم و خشک (BWh) است و کشورهای عربستان، عراق، یمن، عمان و شرق و جنوب شرق و جنوب ایران و پاکستان را در بر گرفته است سپس اقلیم نیمه‌بیابانی خشک و سرد (BSk) و اقلیم بیابانی خشک و سرد (BWk) در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته است. بنابراین با توجه به طبقه‌بندی اقلیمی منطقه مورد مطالعه و بر اساس تغییرات ماهانه شاخص NDVI (شکل ۳) فقر پوشش گیاهی در این ناحیه متأثر از پایین بودن بارش سالانه، دمای بالا، تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) بالا و خشکی زیاد در فصل رویش است.

بیشینه گسترش سطحی پوشش گیاهی در فصل بهار به دلیل همزمانی با فصل رشد در ماه‌های مارس تا آوریل مشاهده می‌شود و تغییرات شاخص NDVI از ۰/۲- تا ۰/۹ در نوسان است. به گونه‌ای که مقادیر بیشینه NDVI در فصل بهار به صورت کمربند سبز رنگ در شمال ترکیه و محدوده قابل توجهی در گرجستان و آذربایجان و شمال ایران و غرب و جنوب غرب پاکستان را بر گرفته است و به صورت لکه‌های پراکنده‌ای در عراق، ترکمنستان و افغانستان مشاهده می‌شود، سپس از ماه ژوئن تا آگوست از مقدار و گستره پوشش گیاهی کاسته می‌شود و طی ماه‌های سپتامبر تا فوریه به کمترین مقدار خود می‌رسد.

پراکنش فضایی پوشش گیاهی با طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر همخوانی بالایی دارد. مقایسه بین شکل ۲ و ۳ تغییرات شاخص NDVI با تغییرات شاخص AOD یک رابطه معکوس قوی را نشان می‌دهند (ضریب همبستگی به دست آمده در ماه مارس بین NDVI و AOD بیش از ۰/۸۰- است). به طوری که مناطق فاقد پوشش گیاهی دارای بیشینه مقدار AOD هستند. البته باید به نکته مهمی توجه داشت که در تمامی مناطق این رابطه صادق نیست. برای مثال دشت لوت یا دشت کویر در ایران پوشش گیاهی بسیار پایینی دارند و یا عملاً فاقد پوشش گیاهی هستند اما در مقابل AOD پایینی نیز دارند. یا در غرب ایران هر چند که پوشش گیاهی خوبی در طی فصل بهار در این مناطق

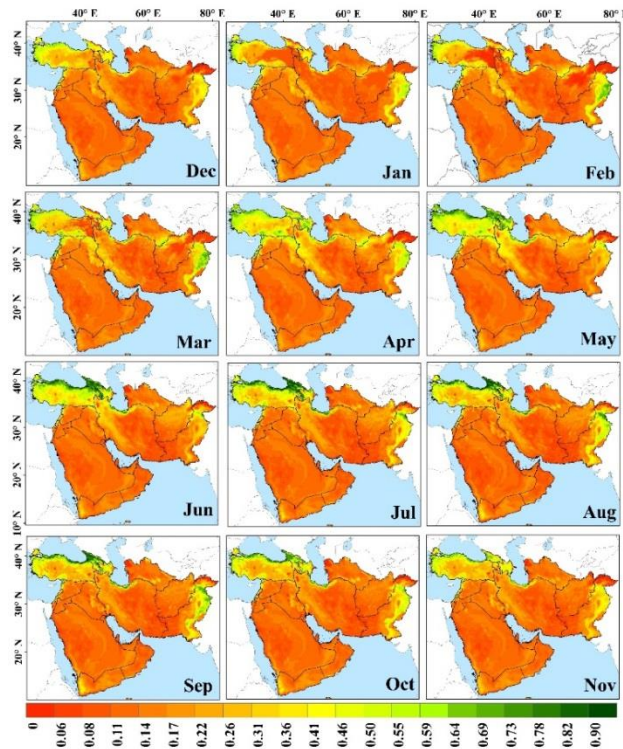
وجود دارد اما هواویز بالایی نیز در این مناطق دیده می‌شود که از سایر مناطق به این منطقه تراپرد می‌شوند. ارتباط بین پوشش گیاهی با هواویزها یا روشن است، به طوری که در ماتریس همبستگی ارائه شده در شکل ۴ نیز این نتیجه مهم داده شده است. اما این ارتباط را باید با تأخیر در نظر گرفت (مثلاً پوشش گیاهی ماه قبل با گردوخاک‌های ماه بعد) و از سوی دیگر این ارتباط در تمام فصول و برای تمامی مناطق صادق نمی‌باشد. برای مثال ضریب همبستگی به دست آمده بر اساس ماتریس همبستگی (شکل ۴) برای NDVI ماه می و AOD ماه بعدی آن یعنی ماه ژوئن نشان‌دهنده رابطه ۰/۷- بوده است. این نتیجه به روشنی نشان می‌دهد که هر چند که پوشش گیاهی و هواویزها می‌توانند همبستگی بدون تأخیر در یک ماه یا فصل به خصوص داشته باشند، اما این ارتباط می‌تواند با تأخیر نیز برای این پدیده صادق باشد. شایان ذکر است فقدان پوشش گیاهی به تنهایی نمی‌تواند دلیلی برای مقدار بالای هواویزها باشد و عوامل بسیاری همانند نوع خاک، سنگ بستر، وجود جریان هوا و عوامل هواشناسی، خاک‌شناسی و زمین‌شناسی بسیاری در این زمینه نقش دارند.

تغییرات ماهانه مقادیر NDVI به این دلیل است که در فصول زمستان و پاییز با خزان جنگل‌های پهن برگ و کاهش مقدار کلرفیل و سبزیگی گیاهان مقدار انعکاس پوشش گیاهی کاهش می‌یابد و در پی آن مقادیر NDVI نیز کم می‌شود. شایان ذکر است جنگل‌ها اگر از نوع درختان سوزنی برگ همیشه سبز باشند شاخص NDVI با تغییر فصل کمتر دستخوش تغییر می‌شود و در ماه‌های متفاوت مقادیر نسبتاً ثابتی را نشان می‌دهند. تعداد نقطه شبکه‌های دارای کمینه مقادیر NDVI (مقادیر بین ۰/۰۵ تا ۰/۱) در فصول پاییز و تابستان افزایش می‌یابد که در شکل ۳ با طیف رنگی از قرمز تا زرد مشخص شده است.

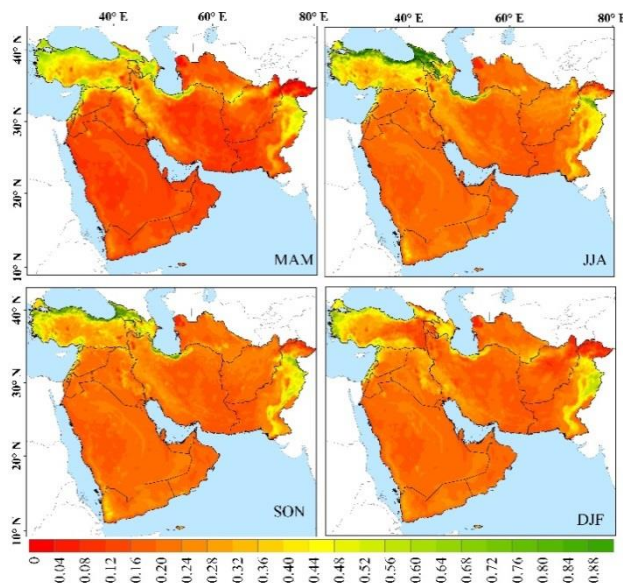
در فصل بهار، افزایش دما موجب ذوب خاک یخ‌زده و برف می‌شود که فرسایش خاک سطحی را به همراه دارد و خاک‌های سست را به راحتی به پایین دست منتقل می‌کنند.

کم و دمای بالا) باعث افزایش هواویزها به‌ویژه در فصول انتقالی سال می‌شود. این نتیجه پیش‌تر توسط داداشی‌رودباری (۱۳۹۹) نیز گزارش شده است. به‌طور کلی کاهش مقادیر NDVI با مناطقی با AOD بالا منطبق می‌باشد و رابطه معکوسی بین NDVI و AOD را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر در این فصل جو ناپایدار است که باعث شکل‌گیری بادهایی با تندی و شدت زیاد می‌شود. لذا هم‌زمانی شرایط اقلیمی دمای بالا، بارش کم و افزایش تبخیر نقش مهمی را در افزایش هواویزها دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت پوشش گیاهی ضعیف همراه با متغیرهای اقلیمی (تندی زیاد باد، ناپایداری شدید، بارش



(الف)



(ب)

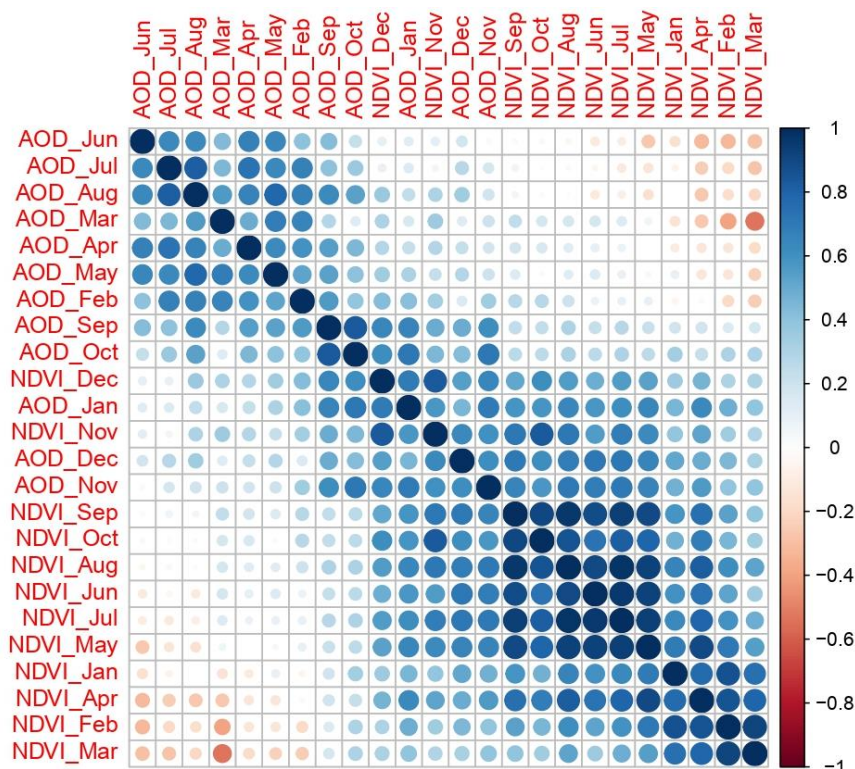
شکل ۳. پراکنش فضایی ماهانه شاخص پوشش گیاهی NDVI سنجنده MODIS ماهواره Terra در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱؛ (الف) ماهانه؛ (ب) فصلی.

تهیه شد (شکل ۴). همان طور که گفته شد، آستانه‌های بالا عمدتاً بیش از ۰/۹ به عنوان گردوخاک در نظر گرفته می‌شوند). نتایج نشان داد تغییرپذیری فصلی هواویزها در جنوب غرب آسیا بالاست. همچنین بهار بیشینه و پاییز کمینه میانگین AOD را به خود اختصاص داده است. در بهار شرایط خشک و تندی باد نسبتاً قوی ناشی از ناپایداری بیشتر جو و خشکی سطح موجب افزایش هواویزها می‌شود.

با بررسی درصد آستانه‌های هواویزها با استفاده از سه آستانه نامبرده شش کانون اصلی هواویزها برای فصول بهار و تابستان مشخص شد که شامل ۱-بیابان تار در پاکستان ۲-بیابان ربع‌الخالی، الدهنا، النفوذ در عربستان ۳- بیابان سوریه ۴-مناطق بیابانی عراق (به‌ویژه بین‌النهرین) ۵- مناطق خشک و بیابانی عمان ۶-دشت مارگو و دشت سیستان.

برای بررسی کمی ارتباط شاخص پوشش گیاهی و AOD بدون و با تأخیر ماهانه ماتریس ضریب همبستگی دو متغیر ترسیم شده است (شکل ۴). به‌طور کلی بین دو متغیر AOD و شاخص پوشش گیاهی همبستگی معکوس وجود دارد و با افزایش پوشش گیاهی مقادیر AOD کاهش می‌یابد. در این شکل دایره‌های هر چه بزرگتر باشد نشان‌دهنده رابطه قوی بین دو متغیر می‌باشد و هر چه دایره‌ها کوچک‌تر باشد رابطه بین دو متغیر ضعیف‌تر می‌باشد. همان‌طور که ضرایب همبستگی ماهانه بین دو متغیر AOD و NDVI نشان می‌دهند، همبستگی این دو متغیر با تأخیر ۳ ماهه و فصلی قوی‌تر می‌شود. برای مثال AOD ژوئن با NDVI آوریل رابطه بسیار منفی (۰/۸-) را نشان می‌دهد.

نقشه درصد فراوانی رخداد گردوخاک بر اساس سه آستانه برای فراوانی‌های با مقدار بیشتر از ۰/۳ و ۰/۵ و ۱



شکل ۴. ماتریس ضریب همبستگی بین شاخص اختلاف بهنجار شده پوشش گیاهی (NDVI) و عمق نوری هواویزها (AOD).

جنوب شرقی ایران در دشت سیستان نیز باد ۱۲۰ روزه سیستان همین نقش در افزایش AOD با آستانه ۰/۵ و بیشتر را دارد. علیزاده چوبری و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی نقش باد ۱۲۰ روزه سیستان در رخداد های گردو خاک جنوب شرقی ایران نشان دادند که جت تراز پایین شبانه (LLJ) در ماه ژولای با میانگن تندی باد ۲۰ متر بر ثانیه باعث رخداد گردو خاک های بسیار شدید در منطقه جنوب شرقی ایران می شود. از نظر اقلیمی دو پدیده باد شمال تابستانه و باد ۱۲۰ روزه سیستان در طول شبانه روز تفاوت زیادی در تشکیل گردو خاک دارند. به طوری که باد شمال تابستانه اغلب در طول روز قوی است و باعث افزایش قابل توجه AOD در طول روز در این مناطق می شود. اما برعکس در منطقه جنوب شرق ایران به دلیل نقش آفرینی جت تراز پایین شبانه (LLJ) دشت سیستان در طول شب مقادیر بالایی از AOD را دارد. این نتیجه پیش تر توسط داداشی رودباری (۱۳۹۹) نیز گزارش شده است. با توجه به این که ماهواره Terra در طول روز از منطقه ایران گذر می کند، لذا گردو خاک های در طول شب بر AOD به دست آمده از ماهواره اثر نمی گذارد. شاید همین امر سبب شده که در جنوب شرقی ایران مقادیر AOD کمتری داشته باشد.

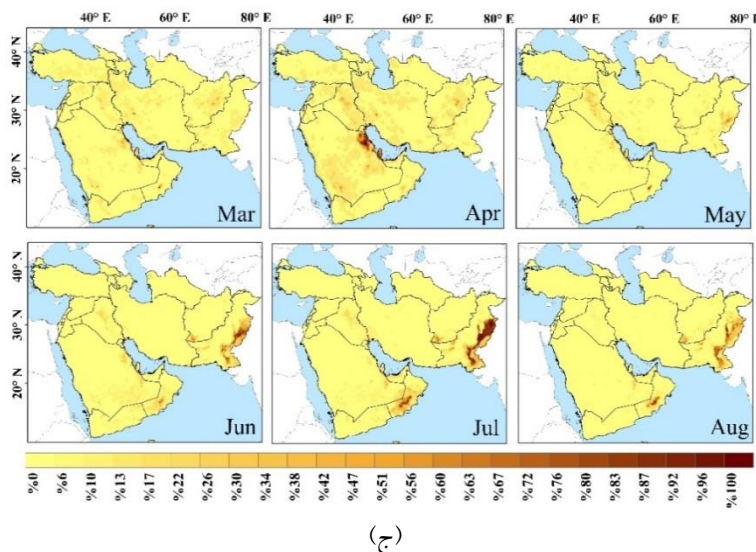
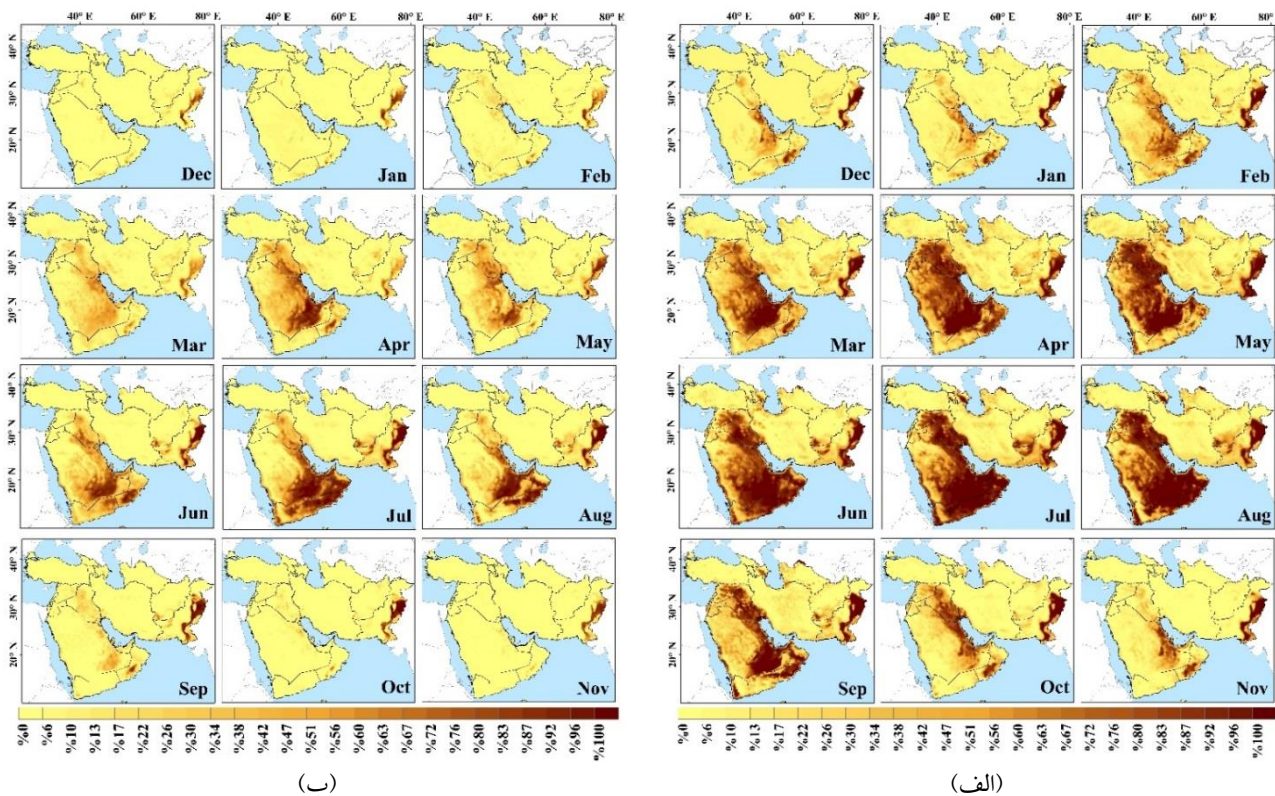
کانون های هواویز با فراوانی رخداد بیشتر از ۱ فقط در فصول بهار و تابستان مشاهده شد و در فصول پاییز و زمستان هیچ کانونی مشاهده نشد (نقشه های مربوط به ماه های سرد سال برای کاهش حجم مقاله حذف شده اند). کانون های اصلی هواویزها که در فصول بهار و تابستان مشاهده شده اند توسط تحقیقات مختلفی گزارش شده است. میدلتون (۱۹۸۶) با بررسی طوفان های گردو خاک جنوب غرب آسیا نشان داد که طوفان های گردو خاک عمدتاً در ماه های فصل خشک بهار و تابستان رخ می دهد. در همین راستا عزیزی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده های ایستگاهی نشان دادند که ماه های ژوئیه، مه و ژوئن بیشترین و ماه دسامبر کمترین رخداد گردو خاک را در مناطق غربی ایران دارند. بررسی عمق نوری ذرات گردو خاک (DOD) ساعتی در ایران که با استفاده از

شکل ۴ به ترتیب تغییرات ماهانه آستانه های AOD بیش از ۰/۳، ۰/۵ و ۱ را نشان می دهد. بر اساس آستانه ۰/۳ ابتدا لکه های کوچکی در فصل زمستان تشکیل و کم کم از لحاظ وسعت و گستره سطحی افزایش می یابد به طوری که در فصول بهار و تابستان بیشترین مناطق درگیر با مقادیر بالای AOD را شاهد هستیم. در فصل بهار مناطق وسیعی از عربستان (بیابان ربع الخالی، الدهنا، النفوذ) عراق (منطقه بین النهرین) و پاکستان (بیابان تار) و در فصل تابستان علاوه به مناطق فوق الذکر در عرض های پایین (۱۵ و ۱۰ درجه) مناطق بیابانی کشورهای عمان، قطر و یمن و امارت نیز تبدیل به کانون های فعال هواویزها در منطقه جنوب غرب آسیا می شوند. در فصل پاییز دوباره روند کاهشی را هم از نظر گستره درگیر و هم از نظر شدت شاهد هستیم. به طوری که کمینه مقدار AOD و کمترین پهنه های کانونی هواویز در ماه های نوامبر تا دسامبر به دست آمده است. همچنین تعداد و گستره های پهنه های کانونی هواویز نسبت به نقشه های ترسیم شده برای آستانه ۰/۳ به شدت کاهش یافته است و این مسئله نشان می دهد هواویزهای سراسری که پهنه های وسیعی را در غرب آسیا درگیر می کنند از لحاظ مقدار AOD بیشتر از ۰/۵ می باشند و پهنه های کمتری از مناطق واقع در جنوب غرب آسیا با هواویزهایی با آستانه بیشتر از ۱ در دو دهه اخیر مواجه بوده اند.

مقادیر بالای AOD با دو آستانه ۰/۵ و ۱ برای دوره گرم سال در غرب ایران و به خصوص بر فراز کشور عراق و کویت و در جنوب شرق ایران در دشت سیستان نقش دو پدیده جوی مهم را در افزایش این متغیر نشان می دهد. بررسی دقیق AOD با آستانه ۰/۵ و بیشتر نشان می دهد که از ماه آوریل مقدار AOD قابل توجهی در باریکه میانرود (بین النهرین) بر فراز کشور عراق تا کشور کویت کشیده شده است که می توان به روشنی به نقش باد شمال تابستانه در مقدار بالای AOD در این مناطق اشاره کرد. مفیدی و زرین (۲۰۲۲) ضمن تأیید نقش باد شمال تابستانه در رخداد های گردو خاک خاورمیانه، سازوکار حاکم بر تشکیل آن را تشریح کردند. در نقطه مقابل درست در

توسط دانیالی و کریمی (۲۰۱۹) برای الگوهای گردوخاک بر فراز بین‌النهرین و تأثیر آن بر استان خوزستان را نیز تأیید می‌کند. بررسی این نتایج و مقایسه آنها با چشمه‌های به‌دست آمده با تحقیق حاضر با روشی نشان می‌دهد که سنجنده MODIS به‌درستی توانسته است چشمه‌های فعال هواپرها را در منطقه غرب آسیا آشکار سازد.

مجموعه داده MACC توسط داداشی رودباری و احمدی (۲۰۲۱) انجام شد، نشان داد که مناطق غربی، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی ایران بالاترین مقادیر DOD دارند که نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با استفاده از نتایج داداشی رودباری و احمدی (۲۰۲۱) را تأیید می‌کند. کانون‌هایی اصلی به‌دست آمده از آستانه‌های مختلف AOD در جنوب‌غربی ایران نتایج به‌دست آمده



شکل ۵. درصد فراوانی آستانه‌های AOD. الف) فراوانی AOD بیشتر از ۰/۳؛ ب) الف) فراوانی AOD بیشتر از ۰/۵ و ج) فراوانی AOD بیشتر

۴. نتیجه گیری

ثبت شده است که علت این رخداد را عالم و همکاران (۲۰۱۰) به دلیل وجود بیابان تار و هشت شهر پرجمعیت همانند پیشاور، راولپندی، ژوب، لاهور، مولتان، خان، روهری و کراچی دانسته‌اند. آنها اذعان داشته‌اند که AOD مقادیر بالایی را نشان می‌دهد چرا که این شهرها مناطق وسیعی را پوشش می‌دهند و پرجمعیت هستند و به دلیل تغییرات شدید کاربری اراضی و رژیم‌های متنوع جوی به نوبه خود بر بار هواویزها ورودی در منطقه تأثیر می‌گذارند و مقادیر بالای AOD را همزمان با مقادیر بالای NDVI را سبب می‌شوند.

فراوانی مقادیر هواویزها برای سه آستانه پیشنهادی (۰/۳، ۰/۵ و ۱) توسط جینوکس و کریستینا (۲۰۱۰) برای شناسایی کانون‌های فعال گردو خاک در منطقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد: ۱- پهنه‌هایی با عمق نوری هواویز بیشتر از ۱ تنها محدود به دوره گرم سال و مناطق میانرود، بیابان‌های عربستان، مناطق بیابانی سوریه، دشت سیستان و دشت مارگو و شرق پاکستان است؛ ۲- هواویزهای سراسری که پهنه‌های وسیعی را در عربستان و کشورهای حاشیه خلیج فارس و غرب و جنوب غرب ایران را درگیر می‌کنند از لحاظ مقدار AOD عمدتاً بیشتر از ۰/۵ هستند؛ ۳- با توجه به تحلیل فراوانی رخداد هواویزها در غرب آسیا شش کانون فعال به شرح زیر شناسایی شد: ۱- بیابان تار در پاکستان، ۲- بیابان ربع الخالی، الدهنا، النفوذ در عربستان، ۳- بیابان سوریه، ۴- مناطق بیابانی عراق و به‌ویژه منطقه میانرود ۵- مناطق خشک و بیابانی عمان ۶- دشت مارگو جستانو دشت سیستان (در افغانستان و ایران). این کانون‌ها نتایج به‌دست آمده توسط میدلتون (۱۹۸۶)، داداشی‌رودباری و (۱۳۹۹)، دانیالی و و کریمی (۲۰۱۹) و داداشی‌رودباری و احمدی (۲۰۲۱) را برای چشمه‌های گردو خاک مؤثر بر ایران تأیید می‌کند.

مراجع

احمدی، م.؛ شکیب، ع. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۸).

پراکنش فضایی ماهانه عمق نوری هواویزها (AOD) بر اساس الگوریتم ترکیبی DB و DT نشان داد: ۱- مساحت زیادی از منطقه مورد مطالعه دارای بیشینه مقادیر AOD بیشتر از ۰/۴ می‌باشند؛ ۲- کانون‌های این پدیده در عرض‌های جغرافیایی ۱۰ تا ۲۵ درجه و در مناطق بیابانی کشور عربستان (بیابان ربع الخالی، الدهنا، النفوذ)، عراق (منطقه میانرود یا بین‌النهرین) و پاکستان (بیابان تار) رخ داده است؛ ۳- بیشترین تغییرات افزایشی AOD مربوط به فصول بهار و تابستان بوده که با توجه به نوع اقلیم بیابانی گرم و خشک (BWh) آن چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نمی‌باشد. به‌طور کلی در این پهنه اقلیمی بارش اغلب کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال است و به دلیل دمای زیاد و خشکی قابل توجه خاک در روزهای زیادی از سال و فقدان پوشش گیاهی در نتیجه چنین شرایطی برای افزایش AOD مهیا شده است.

تغییرات زمانی- مکانی شاخص پوشش گیاهی NDVI نشان داد با AOD ارتباط معکوس دارد و مناطقی با مقادیر هواویز بالا بر عرصه‌های فاقد پوشش گیاهی و بیابان‌های عرض‌های ۱۰ تا ۳۵ درجه منطبق است. این رابطه بیشتر برای چشمه‌های اصلی هواویز در غرب آسیا صادق است. به‌طوری که دشت لوت و دشت کویر با مقادیر بسیار پایین پوشش گیاهی (در بسیاری از مناطق فاقد پوشش گیاهی) هواویز چندانی ندارند. همان‌طور که گفته شد رابطه معکوس بین پوشش گیاهی و هواویزها بیشتر برای چشمه‌های آن صادق است و در مناطق نهشت هواویزها این رابطه نمی‌تواند چندان مورد بحث قرار گیرد. به‌طوری که در فصل بهار در غرب ایران پوشش گیاهی بر اساس شاخص NDVI زیاد است و به‌همین ترتیب AOD نیز قابل توجه است. این نتیجه مهم نشان می‌دهد که بیشتر بار هواویزهای رسیده به مرزهای غربی ایران از چشمه‌های برون مرزی به این منطقه ترابرد می‌شوند. همین رابطه در شرق پاکستان نیز دیده می‌شود. به‌طوری که با وجود بالا بودن مقادیر شاخص NDVI برای AOD هم مقادیر بالایی

- زرین، آ.؛ صالح آبادی، ن.، مفیدی، ع. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۱). بررسی فصلی گردو خاک در شمال شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخدادهای گردو خاک فرین با مدل WRF-CHEM. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۸(۲)، ۴۲۱-۴۴۰.
- عزیزی، ق.؛ میری، م. و نبوی، س. ا. (۱۳۹۱). ردیابی پدیده گرد و غبار در نیمه‌غربی ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۳(۷)، ۶۳-۸۱.
- 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.
- Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T., & Subhan, F. (2014). Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia. *Remote sensing of environment*, 143, 216-227.
- Alizadeh Choobari, O. A., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Atmospheric Research*, 138, 152-165.
- Ali, M.A., Bilal, M., Wang, Y., Qiu, Z., Nichol, J.E., Mhawish, A., de Leeuw, G., Zhang, Y., Shahid, S., Almazroui, M., & Islam, M.N (2022). Spatiotemporal changes in aerosols over Bangladesh using 18 years of MODIS and reanalysis data. *Journal of Environmental Management*, 315, 115097.
- 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.
- Al-Shidi, H. K., Al-Reasi, H. A., & Sulaiman, H. (2022). Heavy metals levels in road dust from Muscat, Oman: relationship with traffic volumes, and ecological and health risk assessments. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(2), 264-276.
- Caido, 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.
- Chen, S., Jiang, N., Huang, J., Zang, Z., Guan, X., Ma, X., Luo, Y., Li, J., Zhang, X., & Zhang, Y. (2019a). Estimations of indirect and direct anthropogenic dust emission at the global scale. *Atmospheric environment*, 200, 50-60.
- Chen, T., Bao, A., Jiapaer, G., Guo, H., Zheng, G., Jiang, L., Chang, C., & Tuerhanjiang, L., (2019b). Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015. *Science of the Total Environment*, 653, 1311-1325.
- Creamean, J.M., Suski, K.J., Rosenfeld, D., Cazorla, A., DeMott, P.J., Sullivan, R.C., White, A.B., Ralph, F.M., Minnis, P., Comstock, J.M., & Tomlinson, J.M. (2013). Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the western US. *Science*, 339(6127), 1572-1578.
- 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.
- Daniali, M., & Karimi, N. (2019). Spatiotemporal analysis of dust patterns over Mesopotamia and their impact on Khuzestan province, Iran. *Natural Hazards*, 97(1), 259-281.
- Fan, B., Guo, L., Li, N., Chen, J., Lin, H., Zhang, X., Shen, M., Rao, Y., Wang, C., & Ma, L. (2014). Earlier vegetation green-up has reduced spring dust storms. *Scientific reports*, 4(1), 6749.
- Fan, Y., Xu, W., Wang, Y., Wang, Y., Yu, S., & Ye, Q. (2020). Association of occupational dust exposure with combined chronic obstructive pulmonary disease and pneumoconiosis: a cross-sectional study in China. *BMJ Open*, 10(9), e038874.
- Floutsi, A. A., Korras-Carraca, M. B., Matsoukas, C., Hatzianastassiou, N., & Biskos, G. (2016). Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002-2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data. *Science of the Total Environment*, 551, 292-303.
- Gao, T., Han, J., Wang, Y., Pei, H., & Lu, S. (2012). Impacts of climate abnormality on remarkable dust storm increase of the Hunshdak Sandy Lands in northern China

- during 2001–2008. *Meteorological Applications*, 19(3), 265-278.
- Ginoux P, G. D., Christina Hsu N. (2010). Identification of anthropogenic and natural dust sources using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) deep blue level 2 data. *Geophys Res Atmosphere*, 115(5), 1–10.
- Gkikas, A., Proestakis, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Di Tomaso, E., Tsekeri, A., Marinou, E., Hatzianastassiou, N., & Pérez García-Pando, C. (2021). ModIs Dust AeroSol (MIDAS): a global fine-resolution dust optical depth data set. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 309-334.
- Goudie, A. S. (2009). Dust storms: recent developments. *J Environ Manage*, 90(1), 89-94 .
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). Desert dust in the global system. Springer Science & Business Media.
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of atmospheric sciences*, 49, 279-286.
- Huang, J., Li, Y., Fu, C., Chen, F., Fu, Q., Dai, A., Shinoda, M., Ma, Z., Guo, W., Li, Z., & Zhang, L. (2017). Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719-778.
- Indoitu, R., Orlovsky, L., & Orlovsky, N. (2009). Dust storms in Middle Asia: Spatial and temporal variations. *Ecosystems and Sustainable Development*, 7(122), 353-364.
- Indoitu, R., Orlovsky, L., & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85, 62-70 .
- Karami, S., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., Alam, K., & Ranjbar, A. (2021). Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: The case of Aral Sea and Sistan Basin. *Aeolian Research*, 50, 100679.
- Kurosaki, Y., Kinugasa, T., Nyamtseren, M., Liu, S., & Otani, S. (2022). Impacts of aeolian desertification and dust storms on ecosystems, economic development, and human health. In *Combating Aeolian Desertification in Northeast Asia* (pp. 129-158). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Levy, R. C., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remer, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F. and Hsu, N. C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11), 2989.
- Li, J., Garshick, E., Al-Hemoud, A., Huang, S., & Koutrakis, P. (2020). Impacts of meteorology and vegetation on surface dust concentrations in Middle Eastern countries. *Science of the total environment*, 712, 136597.
- Li, Z., Lau, W.M., Ramanathan, V., Wu, G., Ding, Y., Manoj, M.G., Liu, J., Qian, Y., Li, J., Zhou, T., & Fan, J. (2016). Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics*, 54(4), 866-929.
- Mao, K. B., Ma, Y., Xia, L., Chen, W. Y., Shen, X. Y., He, T. J., & Xu, T. R. (2014). Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data. *Atmospheric Environment*, 94, 680-686
- Mares, M. A. (2017). *Encyclopedia of deserts*. University of Oklahoma Press.
- Mei, D., Xiushan, L., Lin, S., & Ping, W. A. N. G. (2008). A dust-storm process dynamic monitoring with multi-temporal MODIS data. The International Archives of the Photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 965-970.
- Meng, Z., & Lu, B. (2007). Dust events as a risk factor for daily hospitalization for respiratory and cardiovascular diseases in Minqin, China. *Atmospheric environment*, 41(33), 7048-7058.
- Middleton, N. J. (1986). A geography of dust storms in South-west Asia. *Journal of Climatology*, 6(2), 183-196.
- Mofidi, A., & Zarrin, A. (2022). On the existence of summer Shamal wind induced by the Zagros Mountains in the Middle East. *Geophysical Research Letters*, 49(18), e2022GL100151.
- 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.
- Nabavi, S. O., Haimberger, L., & Samimi, C. (2016). Climatology of dust distribution over West Asia from homogenized remote sensing data. *Aeolian Research*, 21, 93-107.
- Papi, R., Attarchi, S., Darvishi Boloorani, A., & Neysani Samany, N. (2022). Characterization of hydrologic sand and dust storm sources in the Middle East. *Sustainability*, 14(22), 1-17.
- Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M., & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486.
- 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 PM2.5 in correlation with carbon monoxide. *Atmospheric Environment*, 224, 117319 .
- Sayer, A. M., Munchak, L. A., Hsu, N. C., Levy, R. C., Bettenhausen, C., & Jeong, M. J. (2014). MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and “merged” data sets, and

- usage recommendations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24), 13-965.
- Shao, Y., Klose, M., & Wyrwoll, K. H. (2013). Recent global dust trend and connections to climate forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11-107.
- 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.
- 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 .
- Tao, M., Li, R., Wang, L., Lan, F., Wang, Z., Tao, J., Chen, L. (2020). A critical view of long-term AVHRR aerosol data record in China: Retrieval frequency and heavy pollution. *Atmospheric Environment*, 223, 117246 .
- Wang, W., Samat, A., Abuduwaili, J., Ge, Y., De Maeyer, P., & Van de Voorde, T. (2022). Temporal characterization of sand and dust storm activity and its climatic and terrestrial drivers in the Aral Sea region. *Atmospheric Research*, 275, 106242 .
- Warner, T. T. (2009). *Desert meteorology*. Cambridge University Press.
- Wei, X., Chang, N. B., Bai, K., & Gao, W. (2020). Satellite remote sensing of aerosol optical depth: Advances, challenges, and perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(16), 1640-1725.
- Yang, L., Mukherjee, S., Pandithurai, G., Waghmare, V., & Safai, P. D. (2019). Influence of dust and sea-salt sandwich effect on precipitation chemistry over the Western Ghats during summer monsoon. *Scientific Reports*, 9(1), 19171.
- Zhang, X.X., Claiborn, C., Lei, J.Q., Vaughan, J., Wu, S.X., Li, S.Y., Liu, L.Y., Wang, Z.F., Wang, Y.D., Huang, S.Y., & Zhou, J. (2020). Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability. *Atmospheric Environment*, 238, 117734.