

شناسایی چشمه‌های گردوخاک در ایران بر پایه محصولات ماهواره‌ای

آذر زرین^{۱*} و عباسعلی داداشی رودباری^۲

^۱ دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸)

چکیده

هدف از این تحقیق شناسایی چشمه‌های اصلی رخدادهای گردوخاک در ایران و بررسی تغییرات آن است. برای بررسی پراکنش زمانی-مکانی رخدادها، گردوخاک در بلندمدت از داده‌های روزانه عمق نوری هواویز (AOD) سنجنده MODIS و روزهای همراه با گردوخاک ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی (۲۰۰۱-۲۰۲۰) استفاده شد. سه آستانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ از فراوانی رخداد (FoO) هواویزها برای شناسایی چشمه‌های گردوخاک، بررسی شد. رشته کوه‌های البرز و پهنه خزری در شمال کشور به دلیل بارش و رطوبت زیاد خاک کمینه مقدار AOD را دارند. در مقابل مناطقی با مقادیر بیش‌تر AOD عمدتاً در جنوب شرق، جنوب و جنوب غربی کشور با مقادیر بیش‌تر از ۰/۴ دیده می‌شوند. بطور کلی در مناطق نامبرده میانگین سالانه AOD از متوسط پهنه‌ای کشور بیش‌تر است. مقادیر بیش‌تر AOD در مناطق جنوبی و شرقی با بارش کم، پوشش گیاهی تنک و رخداد مکرر طوفان گردوخاک در ارتباط است. بررسی روند گردوخاک ایستگاهی و شاخص‌های AOD و FoO نشان داد که این پدیده در غرب، شمال‌غرب و شمال شرقی ایران دارای روند افزایشی است بطوریکه در این مناطق رخداد گردوخاک بیش از ۴ روز/دهه افزایش یافته است. در مقابل در جنوب شرقی ایران و بخش‌های جنوبی دشت کویر دارای روند کاهشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ است. بررسی تغییرات کاربری اراضی نشان داده است افزایش سطح آب دریاچه هامون و چاه نیمه‌ها در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۰۱ یکی از دلایل اصلی کاهش رخداد گردوخاک در این منطقه بوده است. بررسی FoO در سه آستانه مورد بررسی نشان داد که ایران دارای بازده چشمه گردوخاک اصلی داخلی است. مناطق اصلی در شرق، جنوب و جنوب‌غربی کشور واقع شده‌اند. چشمه‌های گردوخاک اصلی ایران عمدتاً دارای رطوبت خاک کمتر از ۲۰ درصد و بارش حدود ۱۰۰ میلی‌متر در سال هستند. همچنین شاخص پوشش گیاهی در این مناطق عمدتاً فقدان پوشش گیاهی را نشان می‌دهد.

کلید واژه: چشمه گردوخاک، عمق نوری هواویز (AOD)، فراوانی رخداد (FoO)، سنجنده MODIS، ایران.

۱ مقدمه

چشمه‌های گردو خاک مناطقی خشک و فاقد پوشش گیاهی هستند که به دلیل شرایط خاص اقلیمی و توپوگرافی، مستعد تولید و پخش ذرات ریز گردو خاک در جو هستند (رحمتی و همکاران، ۲۰۲۰). این مناطق معمولاً دارای خاک‌های سبک و شنی بوده و در اثر وزش بادهای شدید، ذرات خاک از سطح جدا شده و به صورت معلق در هوا قرار می‌گیرند. چشمه‌های گردو خاک اغلب در مناطق بیابانی، نیمه‌بیابانی و خشک قرار دارند و می‌توانند تأثیرات مخربی بر سلامت انسان، محیط زیست و اقتصاد داشته باشند. عوامل مختلفی مانند خشکسالی، کاهش پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی و مدیریت نادرست منابع آب می‌توانند در تشدید فعالیت چشمه‌های گردو خاک نقش داشته باشند. شناسایی دقیق این چشمه‌ها و اجرای اقدامات مدیریتی مناسب برای کنترل و کاهش اثرات سوء گردو خاک، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای شناسایی چشمه‌های گردو خاک روش‌ها و شاخص‌های مختلفی پیشنهاد شده است که بررسی رخدادهای هواویزها (AOD) با آستانه‌های مختلف آن (جینوکس و همکاران، ۲۰۱۰) یکی روش‌های موثر و کاربردی است.

شاخص AOD یک عدد بدون بعد در بازه صفر و یک است؛ اما ممکن است در شرایط خاص بالاتر یک نیز برود. مقدار AOD کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده آسمان کاملاً صاف است، در حالی که مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده شرایط مه آلودتر با حضور بیشتر هواویزهایی مانند گردو خاک، دود و آلاینده‌های صنعتی است (گاریگس و همکاران، ۲۰۲۲). مقادیر بیش‌تر AOD می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت پایین هوا باشد که ممکن است بر سلامت انسان تأثیر گذاشته، سامانه اقلیم را تحت تأثیر قرار داده و حتی دریافت انرژی خورشیدی را کاهش دهد (اک و همکاران، ۱۹۹۹). بر این اساس AOD یک شاخص کلیدی از کیفیت هوا و سلامت است. از طریق پایش مداوم این شاخص، محققان

می‌توانند دینامیک پیچیده هواویزها و پیامدهای گسترده آن‌ها بر محیط زیست و جامعه را بهتر درک کنند (هولبن و همکاران، ۱۹۹۸). با پیشرفت فناوری، دقت و تفکیک مکانی اندازه‌گیری‌های AOD بهبود یافته و درک روشن‌تری از کیفیت هوا و برهمکنش سامانه اقلیم به دست آمده است.

ذرات معلق تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی، ویژگی‌های سطحی، تراکم جمعیت، نزدیکی به منابع آلودگی و شرایط هواشناسی قرار می‌گیرند که منجر به تفاوت‌های زیادی در غلظت، اندازه ذرات، مورفولوژی، ترکیب شیمیایی و ویژگی آن‌ها می‌شود (چه و همکاران، ۲۰۱۹). بر همین اساس، تحلیل تغییرات بین‌سالانه AOD در مقیاس منطقه‌ای برای ارتقاء دانش ما در مورد پیامدهای اقلیمی و محیط زیستی هواویزها ضروری است. چنین سطحی از بررسی هواویزها همچنین کمک می‌کند تا نقش ذرات طبیعی و ذرات ناشی از فعالیت‌های انسانی را بهتر تشخیص داد. هر چند که بررسی AOD بسیار مهم است اما بررسی فراوانی رخدادهای (FoO) آن در سطوح مختلف بار ذرات معلق، برای شناسایی منابع اصلی گردو خاک بسیار مهمتر است. فراوانی آستانه‌های مختلف هواویزها و تغییرات آن‌ها به روشنی می‌تواند کیفیت هوا را نشان دهد.

ماهواره‌ها نمای کلی از پراکنش هواویزها در سراسر جهان ارائه می‌دهند. محصولات ماهواره‌ای مختلفی برای پایش AOD در دسترس هستند. از جمله این سنجنده‌ها می‌توان به سنجنده MODIS که روی ماهواره‌های Terra و Aqua یا سنجنده VIIRS که بر روی ماهواره‌های S-NPP و NOAA-20 نصب شده اشاره کرد (گاریگس و همکاران، ۲۰۲۲). سنجنده MISR که بر روی ماهواره Terra قرار دارد نیز محصولات مرتبط با هواویزها و بخصوص AOD را در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌دهد. داده‌های AOD تنها توسط محصولات ماهواره‌ای ارائه

۲۰۲۳). در پژوهشی، محصول MODIS-DB و مجموعه داده بازتحلیل MERRA-2 با امکان بررسی AOD، الگوهای توزیع فصلی گردوخاک در استرالیا را بازنمایی کرده و نشان داده‌اند که MODIS-DB دارای کارایی بیش‌تری است (چه و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، تحقیقات مختلفی محصولات AOD مربوط به MODIS را در مورد پایش ذرات معلق و مدل‌سازی اقلیم بررسی نموده و کارایی این محصولات را برای شناسایی منابع گردوخاک تایید کرده‌اند (ساموئل و همکاران، ۲۰۲۳).

ایران یکی از مناطق خشک و نیمه خشک جهان با بارش کم، پوشش گیاهی تنک و پراکنده و بادهای محلی شدید همانند باد ۱۲۰ روزه سیستان است. سطح زمین در مناطق خشک این کشور به شدت در برابر فرسایش بادی آسیب پذیر است که منجر به انتشار گردوخاک زیادی می‌شود. این ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی باعث شده است تا محیط زیست ایران بسیار شکننده باشد و انتشار مکرر گردوخاک تهدیدی بسیار بزرگ برای کشور به شمار می‌رود.

بررسی منابع مرتبط با گردوخاک نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در ایران را می‌توان به چهار گروه کلی تقسیم‌بندی کرد. گروه اول شامل مطالعاتی است که به بررسی تغییرات زمانی-مکانی این پدیده بر اساس داده‌های ایستگاهی پرداخته‌اند (انصاری قوجقار و همکاران، ۱۳۹۹؛ جنت‌رستمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ یوسفی مبرهن و همکاران، ۱۴۰۳). نتایج کلی این مطالعات نشان می‌دهد که رخداد گردوخاک در بیش‌تر مناطق ایران طی چند دهه اخیر روند افزایشی داشته است. گروه دوم مطالعاتی را در بر می‌گیرد که محصولات ماهواره‌ای را برای پایش گردوخاک مورد استفاده قرار داده‌اند (فاریابی و همکاران، ۱۳۹۸؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۹؛ کاتورانی و همکاران، ۱۴۰۳). این مطالعات ضمن تایید کارایی محصولات ماهواره‌ای و به‌طور خاص سنجنده MODIS

نمی‌شوند؛ بلکه مجموعه داده‌های بازتحلیل بسیاری از جمله مجموعه داده MERRA-2 و سرویس پایش جوی کوپرنیک (CAMS) نیز این داده‌ها را در مقیاس ساعتی تا ماهانه در اختیار کاربران قرار می‌دهند.

گردوخاک تقریباً ۲۵ درصد از کل هواویزها را تشکیل می‌دهد (اسکرینس، ۲۰۱۴). هواویزهایی با منشا گردوخاک بیابانی دارای قدرت جذب بسیار زیادی هستند و مستقیماً بر توازن تابشی تأثیر گذاشته و همچنین سرعت ذوب برف سطحی را تسریع می‌کنند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱). منابع جهانی گردوخاک به طور گسترده پراکنده شده‌اند و عمدتاً مناطق خشک و نیمه خشک مانند صحرای بزرگ آفریقا، آسیای مرکزی، خاورمیانه، آمریکای شمالی و استرالیا را شامل می‌شوند و صدها میلیون تن گردوخاک را به جو ترابرد می‌کنند. در مناطق خشک (همانند ایران) خاک سطحی سست و پوشش گیاهی تنک بستر مناسبی برای تشکیل گردوخاک فراهم می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۲۱). این شرایط در بخش‌های بزرگی از ایران از شرق تا غرب کشور را فرا گرفته و به طور بالقوه این مناطق را می‌توان به عنوان منابع گردوخاک معرفی کرد.

مطالعات متعددی با استفاده از مشاهدات زمینی، محصولات ماهواره‌ای و مدل‌سازی عددی تغییرات زمانی-مکانی AOD در مقیاس‌های جهانی تا منطقه‌ای را بررسی کرده‌اند. بسیاری از این مطالعات کارایی محصولات AOD سنجنده MODIS را در سطح جهانی گزارش کرده‌اند (تاو و همکاران، ۲۰۱۵؛ بل و لیو، ۲۰۱۶؛ شی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰؛ رودکه و همکاران، ۲۰۲۳). الگوریتم‌های مختلفی مانند Deep Blue (DB) و Dark Target (DT) و الگوریتم ترکیبی (DB/DT) برای بررسی AOD با هم مقایسه شده‌اند که نشان دهنده‌ی وجود تفاوت‌هایی در دقت و قابلیت‌های بکارگیری این محصولات است. با این حال محصول ترکیبی (DB-DT) دارای کارایی قابل بیش‌تری است (هوانگ و همکاران،

شناسایی و پایش دقیق منابع انتشار گردو خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی به حفظ امنیت زیست محیطی ایران کمک می‌کند. این تحقیق با استفاده از داده‌های بلندمدت MODIS پراکنش زمانی-مکانی عمق نوری هواپیزهای دو دهه گذشته ایران را مورد بررسی قرار داده و برای شناسایی دقیق تر منابع انتشار گردو خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی فراوانی رخداد این پدیده را نیز مورد بررسی قرار داده است. در نهایت نقش متغیرهای اقلیمی و بیوفیزیکی در شکل‌گیری و پراکنش رخداد چشمه‌های گردو خاک در پهنه کشور مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

۱-۲ داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، ایران به عنوان یک کشور با اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. به دلیل وجود رشته کوه‌های زاگرس در غرب و البرز در شمال، تفاوت اقلیمی مشهودی در کشور حاکم است (شکل ۱). مناطق خشک (دشت کویر و دشت لوت) و بسترهای خشکیده دریاچه‌ها (همانند هامون) و تالاب‌های داخلی (همانند گاوخونی) به طور گسترده‌ای در کشور پراکنده شده‌اند که به دلیل فراوانی نهشته‌های رسوبی در طی زمان به چشمه‌های بالقوه گردو خاک تبدیل شده‌اند (برزو و همکاران، ۱۴۰۰).

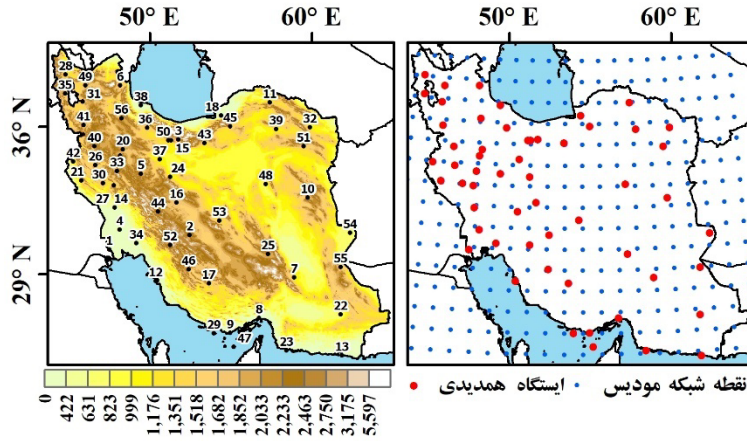
۳ داده‌های مورد استفاده

۱-۳ روزهای همراه با رخداد گردو خاک

روزهای همراه با رخداد گردو خاک در ایران بر اساس داده‌های ۵۶ ایستگاه هواشناسی همدیدی طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). داده‌های این ایستگاه‌ها پیش از بکارگیری کنترل کیفی شدند؛ بطوریکه ایستگاه‌هایی که داده گمشده طولانی و داده پرت داشتند از

نشان دادند که رخداد گردو خاک در ایران روندی افزایشی دارد که در تایید نتایج به دست آمده از گروه نخست است. گروه سوم مطالعاتی را در بر می‌گیرد که از مدل‌ها برای بازتولید الگوهای گردو خاک و سازوکار آن استفاده کرده‌اند (نبی بید هندی و همکاران، ۱۴۰۰؛ پيله وران و همکاران، ۱۴۰۱؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۱؛ مبارک حسن و همکاران، ۱۴۰۲؛ نیک فال و همکاران، ۱۴۰۳). این مطالعات بطور کلی کارایی مدل‌هایی نظیر HYSPLIT (نبی بید هندی و همکاران، ۱۴۰۰)، WRF (زرین و همکاران، ۱۴۰۱) و RegCM4 (مبارک حسن و همکاران، ۱۴۰۲) در مقیاس منطقه‌ای را تایید و به بررسی چشمه‌های گردو خاک و مسیرهای ترابرد آن به کشور پرداخته‌اند. گروه چهارم شامل آن دسته از مطالعاتی می‌شود که بطور مشخص به بررسی چشمه‌های گردو خاک در ایران پرداخته‌اند. بطوریکه برزو و همکاران (۱۴۰۰) نشان داده‌اند که مناطق جنوبی و جنوب شرقی ایران، بخش‌هایی از استان‌های مرکزی و شرقی، و همچنین مناطق همجوار مانند عراق و سوریه، پتانسیل بالایی برای تولید گردو خاک دارند. تحقیقات مختلی همانند نیک فال و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌های عددی مسیرهای انتقال گردو خاک از این مناطق به سمت ایران را شناسایی کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که در فصول گرم سال، به ویژه در اواخر بهار و تابستان، شدت تولید و انتقال گردو خاک به اوج خود می‌رسد. همچنین، برخی مطالعات به بررسی فعالیت چشمه‌های گردو خاک در مناطق خاصی از ایران مانند استان ایلام (صحت کاشانی و همکاران، ۱۴۰۱) و تهران (احمدی و همکاران، ۱۴۰۳) پرداخته‌اند و تأثیر چشمه‌های گردو خاک را بر مناطق مورد بررسی نشان داده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع گردو خاک و تأثیرات منفی آن بر سلامت انسان و محیط زیست، مطالعات بیشتری در این زمینه ضروری است تا بتوان راهکارهای مناسب برای کاهش اثرات مخرب این پدیده ارائه داد.

بررسی کنار گذاشته شدند. جهت استخراج روزهای همراه کدهای پدیده هوای حاضر ۰۶ تا ۰۹، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸ در گزارشات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی استفاده شد. با رخداد گردوخاک (یک روز نیز در گرفته شده است) از



ایستگاه	کد	ایستگاه	کد	ایستگاه	کد	ایستگاه	کد
آبادان	۱۳	چابهار	۲۵	کرمان	۳۷	قم	۴۹
آباده	۱۴	دزفول	۲۶	کرمانشاه	۳۸	رشت	۵۰
آبعلی	۱۵	دوشان تپه	۲۷	خرم اباد	۳۹	سبزوار	۵۱
اهواز	۱۶	اصفهان	۲۸	خوی	۴۰	سنندج	۵۲
اراک	۱۷	فسا	۲۹	جزیره کیش	۴۱	سقز	۵۳
اردبیل	۱۸	گرگان	۳۰	کوهدشت	۴۲	سرپل ذهاب	۵۴
بم	۱۹	همدان	۳۱	مراغه	۴۳	سمنان	۵۵
بندر عباس	۲۰	همدان-نوره	۳۲	مشهد	۴۴	شهرکرد	۵۶
بندر لنگه	۲۱	ایلام	۳۳	نهاوند	۴۵	شاهرود	
بیرجند	۲۲	ایرانشهر	۳۴	امیدیه	۴۶	شیراز	
بجنورد	۲۳	جاسک	۳۵	ارومیه	۴۷	جزیره سیری	
بوشهر	۲۴	کاشان	۳۶	قزوین	۴۸	طیس	

(الف) (ب)

شکل ۱. الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه مدل رقمی ارتفاع (DEM) و ایستگاه‌های همدیدی برای بررسی رخداد گردوخاک. ب) نقطه

شبکه‌های ۱ درجه قوسی سنجنده MODIS.

جدول ۱. کدهای پدیده هوای حاضر مرتبط با رخداد گردوخاک مورد استفاده در تحقیق.

کد پدیده	توصیف
۰۶	گردوخاک معلق در هوا که در اثر طوفان شن و خاک نقاط خارج از ایستگاه به ایستگاه آمده است.
۰۷	گردوخاک یا شنی که به وسیله باد در ایستگاه و یا نزدیکی آن در ساعت دیدبانی بلند شده است.
۰۸	گردباد(گردبادهای تکامل یافته در ایستگاه و یا اطراف آن)
۰۹	طوفان گردوخاک در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه
۳۰	طوفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۱	طوفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییر نکرده است.
۳۲	طوفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است.
۳۳	طوفان شدید، گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۴	طوفان شدید گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییر نکرده است.
۳۵	طوفان شدید گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است.
۹۸	رعدوبرق توام با طوفان گردوخاک و یا طوفان شن در وقت دیدبانی

۲-۳ داده‌های عمق نوری هواویز (AOD)

برای بررسی عمق نوری هواویزها در این تحقیق از داده‌های محصول MOD08_D3 از آخرین نسخه محصولات سنجنده MODIS موسوم به محصول ۶/۱ استفاده شد. محصول MOD08 یک محصول روزانه جوی شبکه‌ای سنجنده MODIS از ماهواره Terra است. این محصول شامل میانگین مقادیر روزانه بر روی شبکه ۱ درجه قوسی برای متغیرهای جوی مرتبط با ویژگی‌های هواویزها، ازن، بخار آب جوی، ویژگی‌های نوری و فیزیکی ابرها و شاخص‌های پایداری جو است. این محصول همچنین برای هر متغیر، انحراف معیار، میانگین وزنی کنترل کیفی و سایر مشخصه‌های آماری را ارائه می‌دهد (هوبانکس و همکاران، ۲۰۱۵). در این تحقیق از داده‌های عمق نوری هواویز (AOD_{550nm}) محصول ترکیبی DB/DT با تفکیک افقی یک درجه قوسی برای دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ در مقیاس روزانه استفاده شده است. الگوریتم DT برای برآورد و تحلیل هواویزها در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم توسعه داده شده است (لیوی و همکاران، ۲۰۱۳). درحالی‌که الگوریتم DB برای سطوح روشن همانند بیابان‌ها توسعه داده شده است (سیر و همکاران، ۲۰۱۴).

۳-۳ داده‌های پوشش گیاهی سنجنده MODIS

شاخص‌های پوشش گیاهی برای پایش جهانی وضعیت پوشش گیاهی و تغییرات پوشش اراضی کاربردهای بسیاری دارند. این داده‌ها را می‌توان به عنوان داده ورودی برای مدل‌سازی فرآیندهای زیست محیطی، بیولوژیکی، هیدرولوژیکی و همچنین مطالعات اقلیمی در سطح جهانی و منطقه‌ای به کار برد (دیدان، ۲۰۲۱). در این تحقیق از داده‌های ماهانه شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته (EVI) سنجنده MODIS ماهواره Terra (محصول MOD13A3) با تفکیک افقی یک کیلومتر از نسخه ۶/۱ استفاده شده است. دلیل به کارگیری شاخص EVI به حداقل رساندن

تغییرات پس زمینه تاج پوشش گیاهی از یک سو و حساسیت بیش‌تر این شاخص در شرایط پوشش گیاهی انبوه (همانند مناطق خزری و ارسباران) است. شاخص EVI از باند آبی برای حذف آلودگی باقیمانده جوی ناشی از دود و ابرها استفاده می‌کند. محصولات EVI سنجنده MODIS از بازتابش سطحی که برای پراکندگی مولکولی، جذب ازن و هواویزها تصحیح شده‌اند، محاسبه می‌شوند که از این نظر دارای دقت بیش‌تری نسبت به شاخص‌هایی همانند NDVI و سایر محصولات مشابه هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

۴-۳ داده‌های رطوبت خاک چند ماهواره‌ای (SMAP)

به منظور بررسی رطوبت خاک سطحی از مجموعه داده رطوبت خاک چند ماهواره‌ای (SMAP) ارائه شده توسط برنامه رصد زمین اتحادیه اروپا موسوم به کوپرنیکوس (Copernicus) استفاده شد. این مجموعه داده، برآوردهایی از رطوبت سطحی خاک در سراسر کره زمین را بر اساس مجموعه بزرگی از سنجنده‌های ماهواره‌ای ارائه می‌دهد. این برآوردها بر مبنای روش‌شناسی توسعه‌یافته برنامه تغییر اقلیم آژانس فضایی اروپا ارائه شده است. این مجموعه داده در دو نسخه CDR و ICDR ارائه شده است. در این تحقیق از داده‌های نسخه مجموعه داده‌های اقلیمی (CDR) استفاده شده است. هدف از CDR دستیابی به داده‌های بلند مدت و کنترل کیفی شده است که برای تشخیص وردایی اقلیم و تغییر اقلیم مناسب است (گروبر و همکاران، ۲۰۲۰). در مقابل ICDR دسترسی با تأخیر زمانی کم به داده‌های جاری را فراهم می‌کند که غالباً کنترل کیفی نشده‌اند. تفکیک افقی این داده‌ها ۰/۲۵ درجه قوسی و دوره زمانی آن ۱۹۷۸ تا به امروز است که در این تحقیق همگام با داده‌های AOD دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ انتخاب شده است.

۳-۵ مجموعه داده همادی - وزنی چندمنبعی اقلیمی (MSWX)

مجموعه داده همادی - وزنی چندمنبعی اقلیمی (MSWX)، مجموعه‌ای شامل داده‌های نزدیک به سطح زمین با پوشش جهانی و تفکیک افقی ۰/۱ درجه قوسی است. این مجموعه داده بر مبنای داده‌های ERA5 توسط مرکز GloH20 با انجام روش‌های مقیاس‌کاهی آماری و تصحیح آریبی با استفاده از داده‌های اقلیمی از مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، محصولات ماهواره‌ای و یا خروجی‌های مدل توسعه یافته است. این مجموعه داده ترکیبی از داده‌های بازتحلیل، ماهواره‌ای و ایستگاهی را در ورودی داده‌های خود دارد و از مجموعه داده‌هایی مانند ERA5، CHELSA، ERA5، GDAS، FLUXNET، CRU TS، GEFS، GHCN-D، GSOD و ISD استفاده می‌کند (بک و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق از داده‌های بارش و تندی باد این مجموعه داده با تفکیک افقی ۰/۱ درجه قوسی برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است.

۴ روش تحقیق

در این پژوهش، برای شناسایی و بررسی روند تغییرات کانون‌های گردوخاک، از روش فراوانی رخداد بر روی محصولات سنجش از دور استفاده شده است. با تعیین آستانه‌های مختلف برای AOD، مناطقی با فراوانی بیش‌تر هواویزها به عنوان کانون‌های بالقوه گردوخاک شناسایی شدند. سپس، با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون و تعیین (R^2) ، ارتباط بین AOD و رخداد پدیده گردوخاک بررسی شد. همچنین، برای بررسی روند تغییرات زمانی AOD و رخداد گردوخاک، از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال تصحیح شده (MMK) و برآوردگر شیب سن (SSE) استفاده شده است. به این ترتیب، با ترکیب روش‌های آماری و محصولات سنجش از دور، امکان مطالعه دقیق‌تر و جامع‌تر پدیده گردوخاک فراهم شده است. در ادامه شرح هر یک از روش‌های بکار گرفته شده ارائه شده است.

۵ روش فراوانی رخداد (FoO) هواویزها

بررسی فراوانی رخداد (FoO) هواویزها، روشی است که برای شناسایی کانون‌های گردوخاک بکار می‌رود (Prospero, 2002). داده‌های پایه برای این روش، داده‌های سنجش از دور هستند. مناطق با رخداد بیش‌تر هواویز اغلب به عنوان کانون‌های گردوخاک طبقه‌بندی می‌شوند. لذا در این تحقیق برای آشکارسازی چشمه‌های فعال هواویزها و تفکیک آن‌ها از چشمه‌های کمتر فعال از روش فراوانی رخداد (Frequency of Occurrence (FoO)) استفاده شد. به‌طور کلی مقادیر AOD برابر با ۰/۸ تا ۰/۹ به عنوان مقدار بیش‌تر هواویزها در نظر گرفته می‌شود (تائو و همکاران، ۲۰۲۰) که برای شناسایی کانون‌های گرد خاک استفاده می‌شوند. در این تحقیق از آستانه‌های AOD (۰/۲۵، ۰/۵ و ۱) پیشنهادی جینوکس و همکاران (۲۰۱۰) به منظور شناسایی کانون‌های گردوخاک استفاده شد. روش FoO

۳-۶ کاربری اراضی ماهواره Sentinel-2

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی تنک است و طوفان‌های گردوخاک به‌طور مکرر رخ می‌دهند، انسان‌ها با تغییر کاربری و پوشش زمین به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر شکل‌گیری و تشدید گردوخاک تأثیر می‌گذارند. بنابراین، مطالعه رابطه بین انواع کاربری/پوشش زمین و فعالیت‌های گردوخاک می‌تواند تا حدودی منجر به توضیح علل تشکیل گردوخاک شود. از آنجاییکه کاربری اراضی دارای تغییرات بسیار زیادی است در این تحقیق از داده‌های کاربری اراضی ماهواره Sentinel-2 با تفکیک افقی ۱۰ متر استفاده شده است. داده‌های کاربری اراضی برای سال ۲۰۲۰ میلادی (آخرین سال مورد بررسی در این تحقیق) است.

را نشان نمی‌دهد (حامد و راثو، ۱۹۹۸). برای این منظور برای بررسی بزرگی روند از آزمون Sen استفاده شده است. آزمون شیب Sen بزرگی روند مقادیر AOD و رخداد گردوخاک در واحد زمان (سال) را محاسبه می‌کند.

۸ نتایج و بحث

رابطه بین عمق نوری هواویزها (AOD) و فراوانی روزهای همراه با رخداد گردوخاک در ایران

شکل (۲) نمودار پراکنش عمق نوری هواویزها (AOD) و رخداد گردوخاک در ایران را نشان می‌دهد. هر نقطه روی نمودار نشان‌دهنده یک جفت داده برای یک مکان و زمان خاص است. ضریب همبستگی بین دو سری داده ۰/۶ است که نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین AOD و رخداد گردوخاک است. همبستگی مثبت به این معنی است که مقادیر AOD بیش‌تر تمایل به همزمانی با تعداد بیشتری از رخدادهای گردوخاک را دارند. سطح معنی‌داری کمتر از آستانه ۰/۰۵ است. این مقدار از p-value از نظر آماری معنی‌دار است که نشان‌دهنده ارتباط معنی‌دار بین AOD و رخداد گردوخاک در ایران است. شایان ذکر است که، شاخص AOD در کل ستون جو است. این شاخص نه تنها ذرات معلق در سطح نزدیک به زمین مانند هواویزها و گردوخاک را شامل می‌شود، بلکه ذرات منتقل شده از مناطق دیگر و موجود در سطوح بالاتر جو را نیز در بر می‌گیرد. به همین دلیل، برای کاهش تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت و به دست آوردن تصویری دقیق‌تر از روندهای بلندمدت، از میانگین زمانی طولانی‌مدت AOD استفاده می‌شود. این رویکرد به ما امکان می‌دهد تا کانون‌های اصلی تولید گردوخاک و تغییرات زمانی آن‌ها را با دقت بیشتری شناسایی و تحلیل نماییم.

ذرات گردوخاک بیابانی برخاسته از مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از اجزای اصلی هواویزهای جوی هستند. هنگامی که طوفان‌های گردوخاک رخ می‌دهند، مقادیر

برای رخدادی که مقدار AOD از یک آستانه معین بیش‌تر می‌رود تعریف می‌شود. مقدار این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ درصد در تغییر است و مقادیر نزدیک به ۱۰۰ فعالیت‌های بیشتر هواویزها در آن آستانه را نشان می‌دهد که می‌توان به عنوان یک کانون بالقوه گردوخاک تشخیص داد.

۶ ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین (R^2)

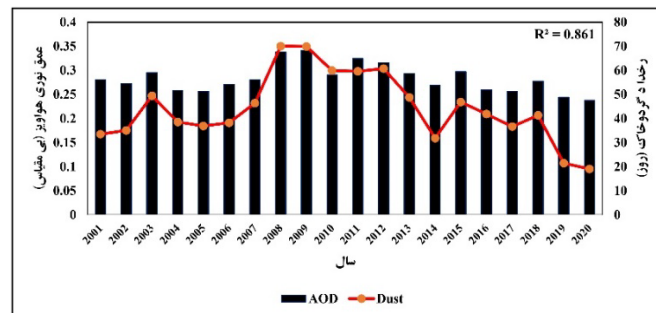
ضریب همبستگی پیرسون (r) بین سری‌های زمانی AOD و فراوانی روزهای همراه با رخداد گردوخاک در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. مقدار r بین -۱ تا +۱ است. همبستگی مثبت قوی (نزدیک به +۱) نشان می‌دهد که مقادیر AOD بیش‌تر تمایل به همزمانی با پدیده‌های گردوخاک دارند، در حالی که همبستگی منفی قوی (نزدیک به -۱) برعکس آن را نشان می‌دهد. مقدار نزدیک به صفر نشان‌دهنده نبود رابطه خطی است. ضریب تعیین (R^2) نشان‌دهنده تناسب تغییرات رخداد پدیده گردوخاک است که توسط تغییرات AOD توضیح داده می‌شود. این روش بین صفر تا ۱ متغیر است و مقادیر بیش‌تر نشان‌دهنده ارتباط قوی‌تر بین AOD و پدیده گردوخاک است.

۷ آزمون روند و معنی‌داری آن

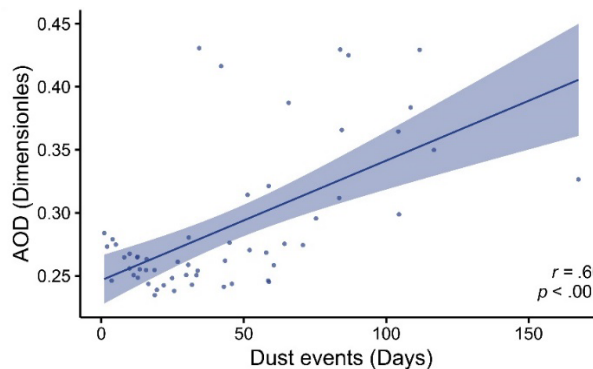
این مطالعه از دو روش ناپارامتری من-کندال تصحیح شده (MMK) و برآوردگر شیب سن (SSE) برای تشخیص روند عمق‌نوری هواویزها (AOD) و رخداد گردوخاک استفاده کرده است. از آزمون MMK برای بررسی روند سری‌های زمانی داده‌های AOD و رخداد گردوخاک سالانه استفاده شد. این آزمون ناپارامتری وجود یک روند یکنواخت صعودی یا نزولی را در طول زمان ارزیابی می‌کند. آماره آزمون Z و p-value مرتبط با آن، معنی‌دار بودن روند را نشان می‌دهد. معنی‌داری آزمون روند در این تحقیق در سطح ۰/۰۵ بررسی شده است. آزمون MMK نوع روند را نشان می‌دهد، در حالیکه شدت و مقدار روند

گردوخاک در ایران را برای متوسط پهنه‌ای کشور در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R^2) بین این دو سری داده در متوسط پهنه‌ای کشور ۰/۸۶ است که نشان‌دهنده ارتباط مثبت قوی بین AOD و رخداد گردوخاک است. مقدار R^2 نزدیک به ۱ نشان‌دهنده قدرت تبیین قوی است. در این مورد، ۸۶ درصد از واریانس متوسط پهنه‌ای AOD را می‌توان با تغییرات در رخداد گردوخاک توضیح داد. در مجموع، نمودار ترکیبی با ضریب تعیین (R^2) بالا و p-value معنی‌دار نشان‌دهنده ارتباط قوی بین AOD و رخداد گردوخاک در ایران است.

قابل توجهی از ذرات گردوخاک را به جو منتقل می‌کنند که باعث افزایش AOD می‌شود. این امر همبستگی مثبت مشاهده شده بین AOD و رخداد گردوخاک را توضیح می‌دهد. مقادیر AOD اندازه‌گیری شده توسط MODIS با دوره‌هایی با رخداد گردوخاک بیشتر مطابقت دارد. زیرا ذرات گردوخاک تابش خورشیدی ورودی را پراکنده و جذب می‌کنند. شایان ذکر است در حالی که گردوخاک بیابانی یکی از عوامل اصلی AOD در ایران است، عوامل دیگری مانند دود ناشی از آتش‌سوزی‌ها یا هواپیزهای انسانی (مثلاً آلودگی) نیز می‌توانند بر مقادیر AOD تأثیر بگذارند. شکل (۲-ب) رابطه بین AOD و رخداد



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) سری زمانی متوسط پهنه‌ای عمق نوری هواپیزها (AOD) با رخداد گردوخاک در ایران؛ ب) نمودار پراکنش رابطه بین رخداد گردوخاک در ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی با AOD در ایران.

بررسی میانگین سالانه عمق نوری هواپیزها (AOD) که از سنجنده MODIS استخراج شده است؛ نشان می‌دهد که این شاخص در مقیاس منطقه‌ای در ایران دارای تغییرات قابل

۹ اقلیم شناسی و روند عمق نوری هواپیزها (AOD) و رخداد گردوخاک در ایران

تشدید می‌کند. در چنین شرایطی ذرات خاک سست و خشک به راحتی توسط بادهای شدید بلند شده و به تشکیل طوفان‌های گردو خاک منجر می‌شود. همچنین دریاچه‌های فصلی شرایط ایده‌آلی برای فرسایش بادی فراهم می‌کنند. بستر رودخانه‌های فصلی نیز پتانسیل تبدیل شدن به منابع فعال گردو خاک را دارند. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی مانند چرای دام می‌تواند انتشار گردو خاک را نسبت به خشکسالی حساس‌تر کند و بدین ترتیب، کاربری اراضی را بیشتر به انباشت گردو خاک و تأثیر آن بر محیط زیست پیوند دهد.

بررسی روند AOD بر اساس داده‌های سنجنده MODIS طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که AOD در غرب، شمال‌غرب، شمال شرق و جنوب غربی کشور دارای روند افزایشی است. بیشینه روند افزایشی AOD در اطراف دریاچه ارومیه با ۰/۱۱ به ازای هر دهه دیده می‌شود. روند کاهشی AOD در جنوب شرقی کشور، بخش‌های جنوبی دشت کویر و بخش غربی استان فارس دیده می‌شود. روند AOD در مناطق نامبرده کاهش معنی‌داری را در سطح ۰/۰۵ نشان می‌دهد. بیشینه روند کاهشی AOD در مقیاس سالانه در جنوب شرقی کشور از دشت سیستان تا دشتیاری تا سواحل مکران دیده می‌شود. بررسی روند رخداد گردو خاک در ایستگاه‌های همدیدی نتایج به دست آمده توسط AOD سنجنده MODIS را تایید می‌کند. بطوریکه بیشینه روند افزایشی رخداد گردو خاک در غرب و شمال غربی ایران دیده می‌شود. روزهای همراه با گردو خاک در غرب ایران با ۴/۴۳ روز/دهه بیشینه روند افزایشی را نشان می‌دهد. روزهای همراه با گردو خاک در توافق با داده‌های AOD سنجنده MODIS روند افزایشی را نشان می‌دهد. بطوریکه روزهای همراه با پدیده گردو خاک ۱/۵ تا ۱/۸ روز/دهه روند افزایشی داشته‌اند.

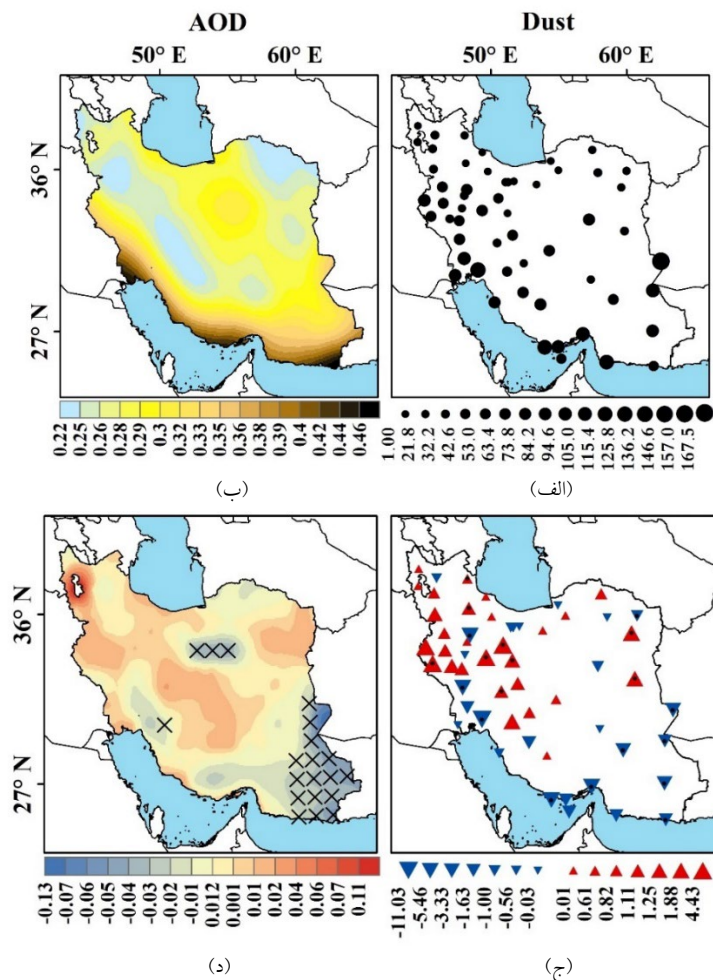
روند کاهشی گردو خاک نیز در جنوب شرقی ایران قابل مشاهده است. بطوریکه به ازای هر دهه رخداد گردو خاک

توجهی است (شکل ۳). مقادیر بیش‌تر AOD در مناطق جنوبی (۰/۴۶) نشان‌دهنده فراوانی بیشتر هواویزها است که می‌تواند از منابع مختلفی از جمله گردو خاک بیابانی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ناشی شود. جینوکس و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی جهانی فراوانی رخداد AOD به این نتیجه رسیدند که رخدادهای مکرر گردو خاک در میانرود و منطقه ساحلی جنوب ایران در تمام فصول، شرق ازبکستان و ترکمنستان و حوضه سند-گنگ در فصل پیش از مونسون رخ می‌دهند. موقعیت جغرافیایی خاص جنوب غربی کشور و نزدیکی آن به مناطقی همچون تالاب هورالعظیم و میانرود، آن را به یک منطقه‌ی بالقوه چشمه گردو خاک تبدیل کرده است. در تایید نتایج به دست آمده، تحلیل داده‌های ماهواره‌ای توسط پروسپرو و همکاران (۲۰۰۲) نشان داد که بیش‌تر منابع اصلی گردو خاک در مناطق خشک و در فرورفتگی‌های توپوگرافی قرار دارند و بیش‌تر این مناطق با رسوبات آبرفتی ضخیم در اثر سیلاب‌های دوره‌ای در دوران چهارم و هولوسن تشکیل شده‌اند.

شکل (۳-الف)، توزیع رخدادهای گردو خاک را که توسط ایستگاه‌های هواشناسی در سراسر ایران ثبت شده است، نشان می‌دهد. اندازه دایره‌ها نشان‌دهنده فراوانی رخداد گردو خاک در هر ایستگاه در طول سال است. دایره‌های بزرگ‌تر (بیشینه ۱۶۷/۵ روز در ایستگاه زابل) نشان‌دهنده مناطقی با رخداد گردو خاک بیشتر هستند. موقعیت جغرافیایی ایران نقش مهمی در فعالیت گردو خاک آن ایفا می‌کند. چند دلیل کلیدی وجود دارد که رخداد گردو خاک در برخی مناطق ایران همانند جنوب شرق، جنوب و جنوب‌غرب دارای فراوانی قابل توجهی است. یکی از مهم‌ترین این دلایل، اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران است. بخش قابل توجهی از مساحت ایران در مناطق اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. این مناطق بارش کم و بادهای شدیدی دارند که بیابان‌زایی و فرسایش خاک را

در این تحقیق روند افزایشی داشته است. با مقایسه بصری دو شکل (۳-الف و ۳-ب) می‌توان انتظار داشت که همبستگی فضایی قابل توجهی بین توزیع AOD و مناطقی با بیشینه رخداد گردوخاک وجود دارد که پیش‌تر توسط نمودار پراکنش و نمودار ترکیبی نشان داده شد. مناطقی با مقادیر AOD بیش‌تر (سمت چپ) با مناطقی با تعداد بیشتر رخداد گردوخاک (دایره‌های بزرگ‌تر در سمت راست) مطابقت دارند. این ارتباط فضایی از این فرضیه حمایت می‌کند که هواویزهای گردوخاک سهم عمده‌ای در AOD این مناطق دارند.

در این منطقه بین ۵ تا ۱۱ روز روند کاهشی را نشان داده است. روند افزایشی گردوخاک در شمال‌شرقی ایران در تربت حیدریه و بیرجند دیده می‌شود. در دامنه‌های پشت به باد زاگرس نیز گردوخاک روند افزایشی نشان می‌دهد که در تایید نتایج به دست آمده از بررسی AOD سنجنده MODIS است. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد همزمانی تغییرات گردوخاک و AOD در ایران بیانگر آن است که سهم قابل توجهی از هواویزهای موجود در جو ایران شامل هواویزهای گردوخاک بیابانی هستند. بطور کلی رخداد گردوخاک در ۵۱/۷۸ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۳. میانگین عمق نوری هواویزها (AOD) بر اساس داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Terra با الگوریتم ترکیبی DB/DT برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ (ب)، میانگین رخداد گردوخاک طی دوره مذکور با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی (الف)، روند شاخص AOD (د) و رخداد گردوخاک با استفاده از آزمون من-کندال تصحیح شده (MMK) (ج)، روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ در شکل سمت چپ با ضربدر و در شکل سمت راست با دایره سیاه رنگ مشخص شده است.

۱۰ فراوانی رخداد (FoO) هواویزها و روند آن در ایران

شکل (۴) توزیع فضایی فراوانی رخداد (FoO) عمق نوری هواویزها (AOD) را در ایران نشان می‌دهد. واحد نقشه درصد است و مقادیر FoO بیش تر برای آستانه‌های ۰/۵ و ۱ نشان‌دهنده منبع احتمالی گردو خاک است. مقادیر FoO پایین تر (رنگ‌های آبی) نشان‌دهنده مناطقی هستند که AOD برای بخش بزرگی از دوره زمانی (احتمالاً چندین سال) زیر آستانه‌های تعیین شده (۰/۵، ۰/۲۵ و ۱) باقی مانده است. این امر نشان می‌دهد که هواویزهای گردو خاک در این مناطق کمتر رایج هستند. در مقابل مقادیر FoO بیش تر (رنگ‌های قهوه‌ای) نشان‌دهنده مناطقی هستند که AOD به طور مکرر از آستانه‌ها عبور کرده است. این نشان‌دهنده رخداد بیشتر هواویزهای گردو خاک و نشان‌دهنده چشمه بالقوه گرد و خاک در این مناطق است. همانطور که گفته شد طوفان‌های گردو خاک می‌توانند با ترابرد مقادیر زیادی ذرات گردو خاک به جو، AOD را به طور قابل توجهی افزایش دهند. نقشه FoO توزیع فضایی فعالیت گردو خاک در ایران را منعکس می‌کند. مناطقی که به عنوان چشمه گردو خاک طبقه‌بندی می‌شوند (FoO برای آستانه‌های ۰/۵ و ۰/۱) به طور بالقوه تحت تأثیر انتشار گردو خاک از منابع محلی (مانند بیابان‌ها) یا ترابرد دوربرد هواویزهای گردو خاک از مناطق همسایه قرار می‌گیرند. پیش تر در تحقیقات متعددی به این مناطق اشاره شده است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مبارک حسن و همکاران، ۱۴۰۰؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۱؛ کاتورانی و همکاران، ۱۴۰۳) که نتایج به دست آمده در این تحقیق نتایج پیشین در خصوص چشمه‌های گردو خاک ایران (همانند برزو و همکاران، ۱۴۰۰؛ نیک فال و همکاران، ۱۴۰۱؛ احندی و همکاران، ۱۴۰۳) را تایید می‌نماید. مناطقی با FoO بیش تر در قسمت‌های شرق، جنوب شرق، جنوب و جنوب غربی ایران متمرکز شده‌اند. این مناطق نشان‌دهنده منابع اصلی

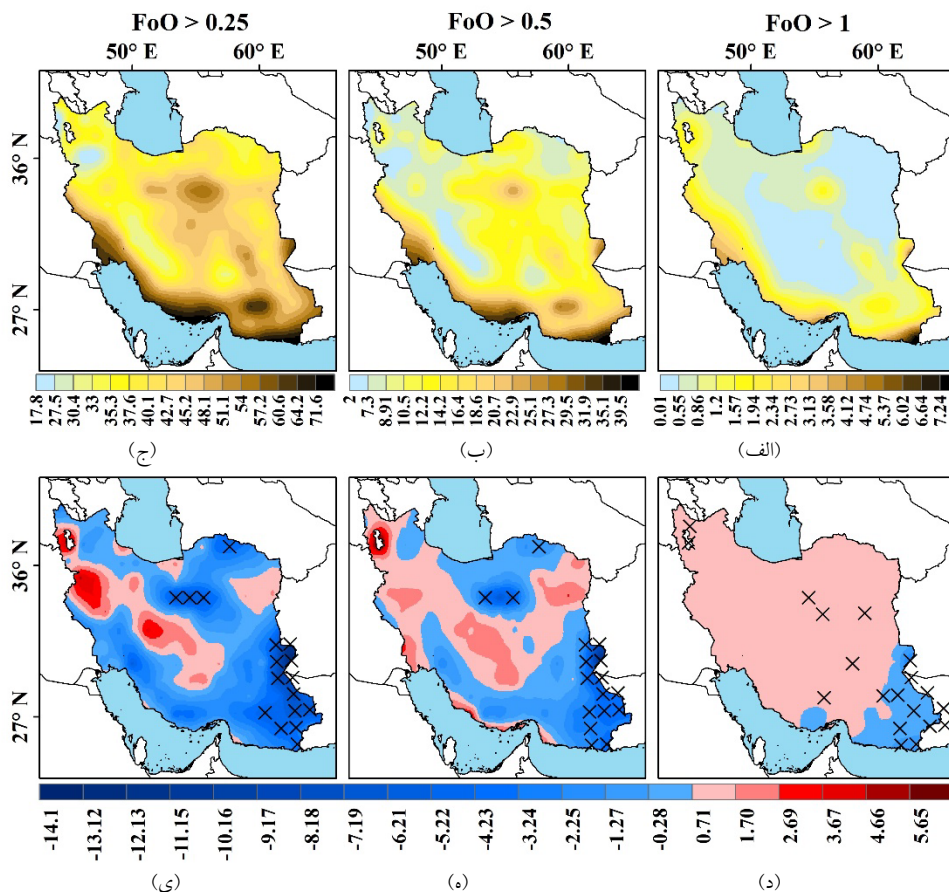
گردو خاک یا مناطقی هستند که به طور قابل توجهی تحت تأثیر ترابرد گردو خاک قرار دارند.

پراکنش فضایی سالانه FoO برای سه آستانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ در شکل (۴) نشان داده شده است. بطور کلی فراوانی رخداد هواویزها در کشور، در مناطق جنوبی از سواحل مکران در جنوب شرق تا سواحل خلیج فارس در جنوب غربی ایران بیشینه است. بیش ترین فراوانی رخداد در منطقه ساحلی مکران در دشتیاری در جنوب شرقی ترین نقطه کشور است. این منطقه با آستانه $FoO > 0.25$ فراوانی ۷۰ درصد، آستانه $FoO > 0.5$ فراوانی ۳۹ درصد و آستانه $FoO > 1$ فراوانی ۷ درصد را نشان می‌دهد. فراوانی رخداد هواویزها در دشت سیستان، هامون جازموریان، استان‌های هرمزگان و بوشهر در جنوب ایران، جنوب غرب و مناطق داخلی در دشت لوت و دشت کویر برای آستانه بیش تر از ۰/۲۵ عمدتاً فراوانی بیش از ۴۰ درصد را نشان می‌دهد. همین مناطق با آستانه بیش تر از ۰/۵ نیز فراوانی بیش تر از ۲۰ درصد نشان داده‌اند. فراوانی رخداد هواویزها با آستانه بیش از ۱ در مقیاس روزانه در چهار منطقه جغرافیایی از کشور نمود آشکاری دارد. بطوریکه دشت سیستان، دشتیاری در سیستان و بلوچستان واقع در جنوب شرقی کشور، مناطق جنوبی کشور در بوشهر و هرمزگان و جنوب غربی کشور در دشت خوزستان مقدار FoO بین حداقل ۳/۱۳ درصد و حداکثر ۷/۲۴ درصد در تغییر است.

روند فراوانی رخداد (FoO) هواویزها در هر سه آستانه مورد بررسی در جنوب شرقی ایران همگام با مقدار AOD و رخداد گردو خاک روند کاهشی داشته است. این روند در سطح ۰/۰۵ معنی دار است. روند آستانه‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ نتایج جالبی را نشان داده است. بطوریکه در اطراف دریاچه ارومیه چشمه‌های گردو خاک جدیدی در ایران به وجود آمده است. این چشمه گردو خاک حتی برای آستانه ۱ نیز در سطح ۰/۰۵ معنی دار است. بطور کلی فراوانی AOD، FoO و روزهای همراه با گردو خاک در شمال غربی ایران

این دریاچه منجر به بیرون آمدن بخش‌های وسیعی از بستر آن شده است. این سطوح در مواجهه با باد، به منابع اصلی توفان‌های نمکی تبدیل شده‌اند که مسائل جدی زیست محیطی و بهداشتی را برای مناطق اطراف ایجاد کرده‌اند. روند شاخص FoO در غرب ایران نیز روند افزایشی زیادی را نشان داده است. منطقه سوم که شاخص FoO در آن دارای روند افزایشی در هر سه آستانه مورد بررسی است شمال شرقی ایران از بیرجند تا سرخس است. این منطقه در سال‌های اخیر رخدادهای گردوخاک قابل توجهی را نشان داده است. شاخص FoO در سواحل بوشهر بخصوص در آستانه ۰/۵ دارای روند افزایشی است.

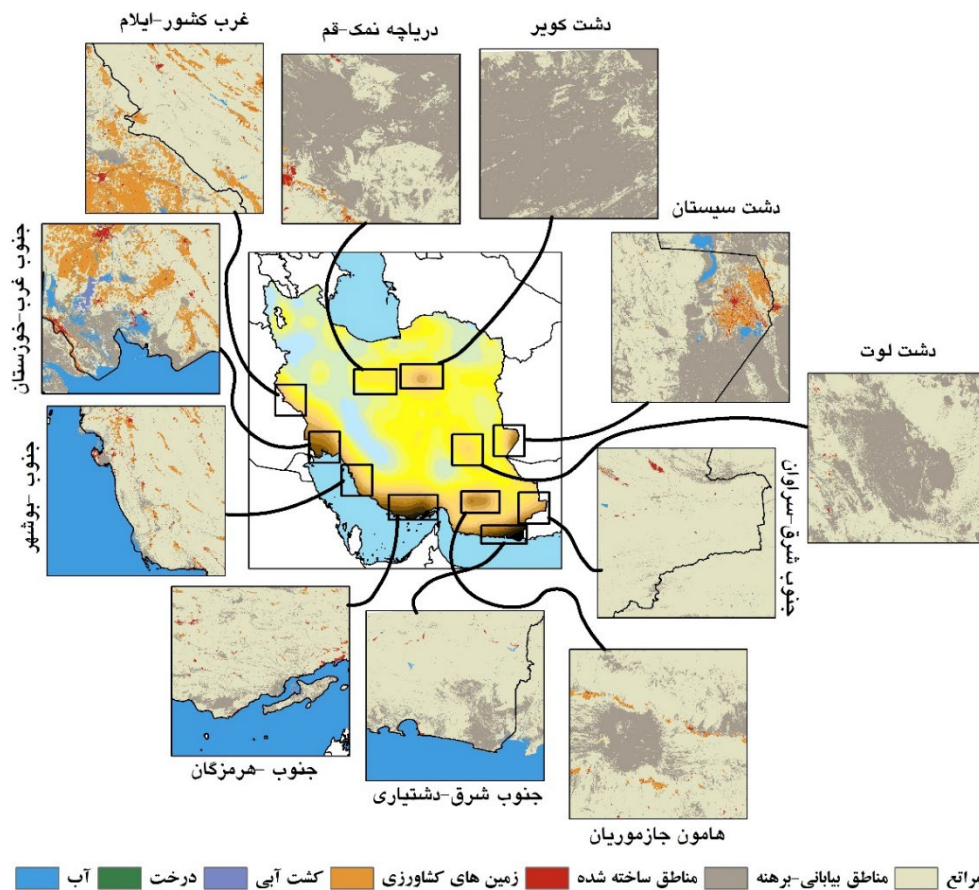
ناشی از فعالیت‌های انسانی (خشک شدن دریاچه ارومیه) است. اما مقدار زیاد سه شاخص نامبرده در جنوب شرقی را می‌توان تا حد زیادی ناشی از عوامل طبیعی دانست. مطالعات عزیزاده گوارچین و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده است که بین عمق نوری هواویزها (AOD) و تغییرات سطح آب دریاچه ارومیه، رابطه‌ای معکوس وجود دارد. بطوریکه با کاهش سطح آب دریاچه، مقدار AOD افزایش یافته که نشان می‌دهد بستر خشک شده دریاچه ارومیه، به عنوان منبع جدید گردوخاک و افزایش AOD در شمال غرب ایران است. در همین راستا آبادی و همکاران (۲۰۲۴) نیز به نقش قابل توجه خشک شدن دریاچه در افزایش تولید گردوخاک در شمال غرب اشاره کرده‌اند. خشک شدن



شکل ۴. فراوانی رخداد (FoO) هواویزها در سه آستانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ در مقیاس سالانه طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ در ایران (الف، ب، ج). روند فراوانی رخداد (FoO) هواویزها با سه آستانه نامبرده (د، ه، و) (مناطق مشخص شده با ضربدر دارای روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ هستند).

بیوفیزیکی مرتبط با خاک و پوشش سطحی در این مناطق ضعیف است و لذا انتشار گردوخاک دائمی است. بادهای شدید و تغییرات مکرر در انواع پوشش زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی بخصوص آنچه که در چاه نیمه‌های سیستان در جنوب شرقی و هورالعظیم در جنوب غربی شاهد آن هستیم، این مناطق را به منابع اصلی گردوخاک در کشور تبدیل کرده است. همانطور که تغییرات AOD و رخداد گردوخاک برای غرب کشور نشان داد پوشش گیاهی بیشتر، مقاومت مواد سطحی در برابر فرسایش بادی را تقویت می‌کند. بنابراین، با افزایش پوشش گیاهی، فراوانی رخداد گردوخاک به سرعت کاهش می‌یابد.

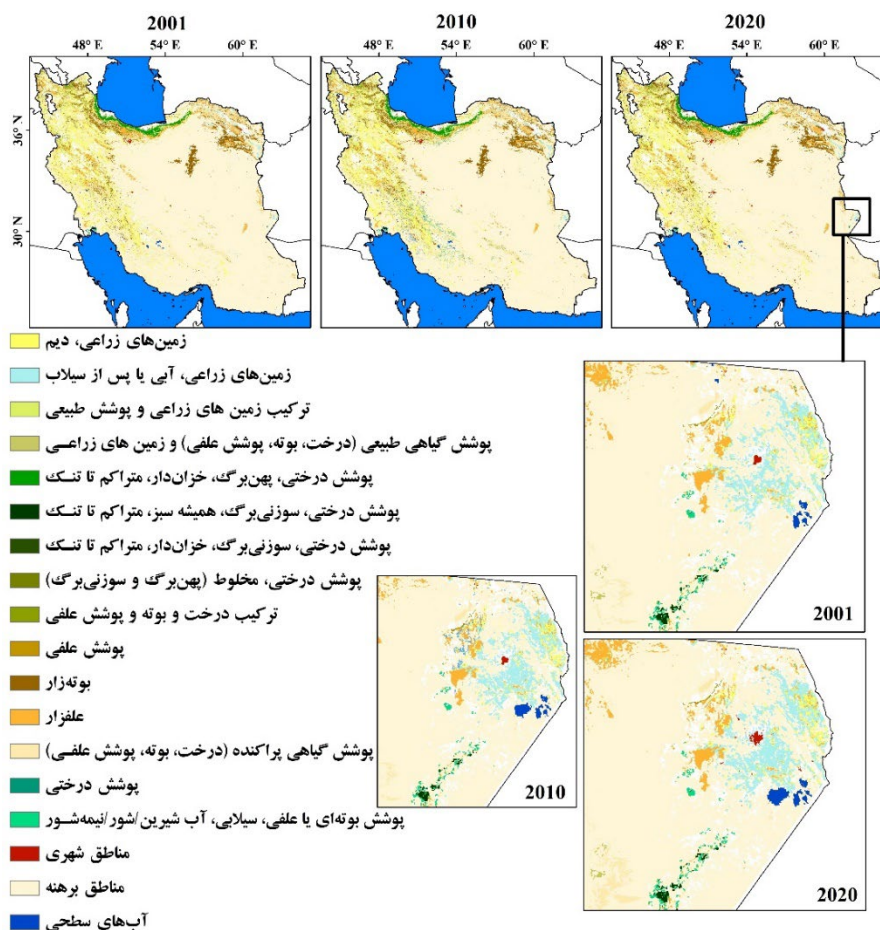
بر اساس توزیع فراوانی رخداد هواویزها (FoO) در آستانه‌های مختلف با داده‌های روزانه الگوریتم ترکیبی DB/DT یازده چشمه گردوخاک اصلی در ایران شناسایی می‌شود. این یازده چشمه عبارتند از ۱- دریاچه نمک-قم، ۲- دشت کویر، ۳- دشت سیستان، ۴- دشت لوت، ۵- جنوب شرق-سراوان، ۶- هامون جازموریان، ۷- جنوب شرق-دشتیاری، ۸- جنوب-هرمزگان، ۹- جنوب-بوشهر، ۱۰- جنوب غرب-خوزستان و ۱۱- غرب-ایلام. منابع گردوخاک عمدتاً در جنوب شرق کشور (دشتیاری)، هامون جازموریان، دشت سیستان، استان‌های جنوبی بوشهر و هرمزگان و جنوب غربی کشور توزیع شده‌اند. تغییرات



شکل ۵. موقعیت چشمه‌های یازده گانه اصلی گردوخاک در ایران بر پایه روش فراوانی رخداد (FoO) هواویزها در سه آستانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ در مقیاس سالانه (نقشه میانی صرفاً جهت نمایش بصری است و آستانه ۰/۵ را نشان می‌دهد). کاربری اراضی نشان داده شده برای سال ۲۰۲۰ میلادی و بر اساس داده‌های ماهواره Sentinel-2 است.

گستره پهنه‌های آبی در چاه نیمه‌های سیستان در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۰ افزایش داشته است. افزایش مناطق آبی رنگ در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۱ نیز مشهود است. همچنین زمین‌های کشاورزی آبی نیز در سال ۲۰۲۰ نسبت به ۲۰۱۰ . ۲۰۰۱ افزایش داشته است. همچنین پهنه‌هایی که کاربری اراضی در آن نسبت سال پیشین تغییر داشته است در شکل (۸) برای سه سال نمونه ارائه شده است. به همین ترتیب تغییرات پوشش گیاهی و رطوبت خاک نیز برای این سال‌ها تهیه و نتایج در شکل (۸) ارائه شده است که نشان دهنده افزایش رطوبت خاک و پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰ است.

بررسی تغییرات کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که روند کاهش رخداد گردو خاک در منطقه سیستان در سال‌های منتهی به ۲۰۲۰ عمدتاً به دلیل افزایش بارش در ایران در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بوده است. این افزایش بارش منجر به افزایش سطح آب دریاچه هامون و چاه نیمه‌ها شده که به عنوان کانون اصلی تولید گردو خاک در منطقه شناخته می‌شوند (شکل ۶). علاوه بر این، افزایش سطح زیر کشت محصولات آبی در این سال‌ها نیز به کاهش سطح مناطق خشک و نمکی و در نتیجه کاهش تولید گردو خاک کمک شایانی کرده است. همانطور که در شکل (۶) نیز نشان داده شده است،

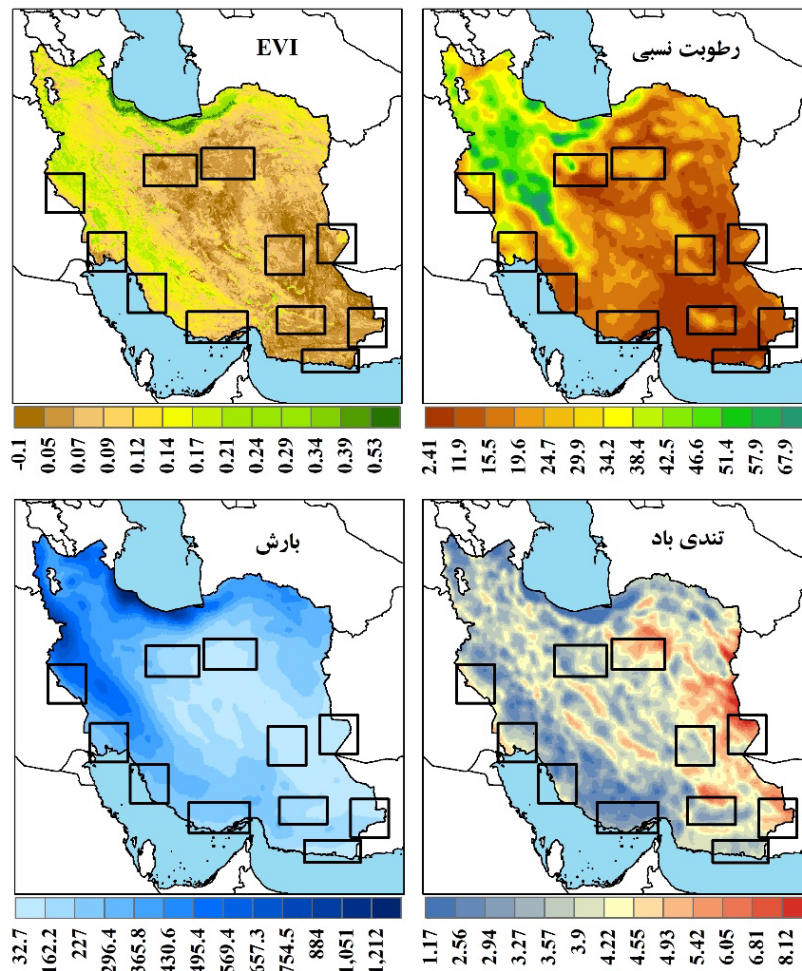


شکل ۶. تغییرات کاربری اراضی در ایران طی سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰. منطقه سیستان به عنوان نمونه در پتل‌ها جداگانه برای سال‌های مورد بررسی بزرگتر ارائه شدند.

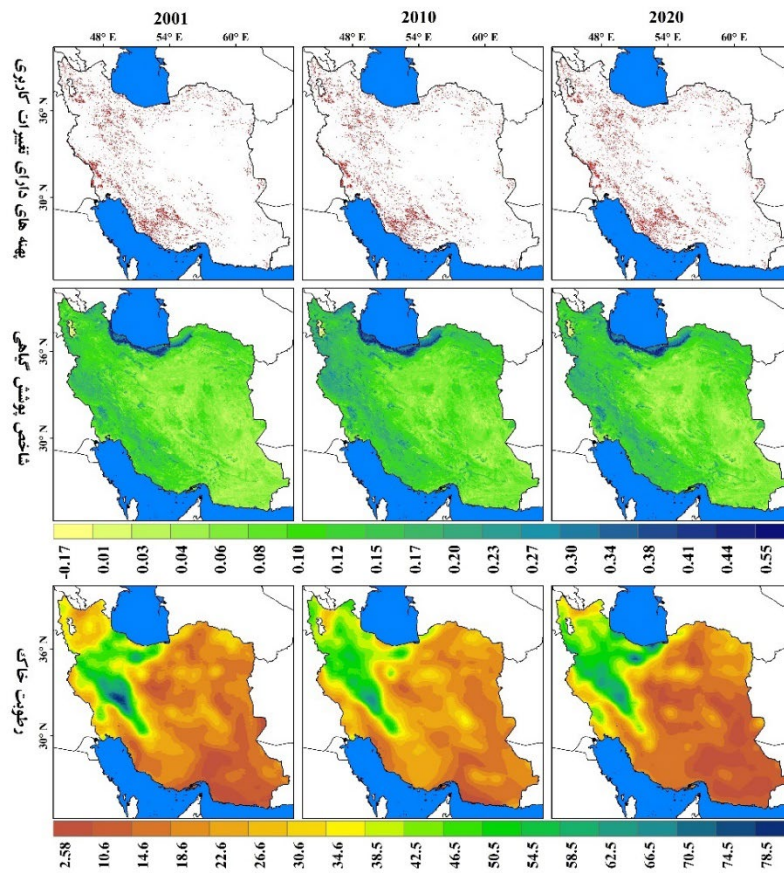
۱۱ ویژگی‌های بیوفیزیکی و اقلیمی چشمه‌های گردوخاک شناسایی شده در ایران

برای بررسی دقیق‌تر چشمه‌های گردوخاک اصلی شناسایی شده در ایران، ویژگی‌های مهم بیوفیزیکی مرتبط با خاک همانند رطوبت خاک، پوشش گیاهی و ویژگی‌های اقلیمی موثر بر رخداد گردوخاک همانند بارش و تندی باد بررسی و نتایج در شکل (۷) ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که مناطقی با فعالیت بیشتر تر رخداد گردوخاک و چشمه‌های شناسایی شده در ایران عمدتاً دارای پوشش گیاهی بسیار تنک هستند. بطوریکه بر اساس شاخص

پوشش گیاهی EVI مقدار شاخص در این مناطق کمتر از ۰/۰۵ است. رطوبت خاک نقش کلیدی را در رخداد گردوخاک دارد. بر اساس داده‌های چند ماهواره‌ای (SMAP) مورد بررسی، متوسط رطوبت خاک سالانه برای مناطق دارای رخداد گردوخاک کمتر از ۲۰ درصد است. حتی این مقدار برای مناطق جنوب شرقی ایران به کمتر از ۱۰ درصد نیز می‌رسد. لذا می‌توان اذعان داشت که چشمه‌های گردوخاک اصلی در ایران در متوسط سالانه رطوبت خاک کمتر از ۲۰ درصد را دارند. بارش نقش مهمی در تثبیت خاک، رشد پوشش گیاهی و رطوبت خاک دارد.



شکل ۷. شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی (EVI) سنجنده MODIS ماهواره Terra؛ داده‌های رطوبت خاک چند ماهواره‌ای (SMAP)؛ بارش و تندی باد مجموعه داده همادی - وزنی چندمنبعی اقلیمی (MSWX) برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰. مناطق مشخص شده به شکل جعبه چشمه‌های یازده‌گانه شناسایی شده هستند و نام هر منطقه در شکل ۵ آمده است.



شکل ۸. پهنه‌های دارای تغییرات کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی EVI و رطوبت خاک برای سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰.

سه سال ۲۰۰۱، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ در شکل (۸) ارائه شده است. در این شکل مشخص است که رطوبت خاک و پوشش گیاهی در سال ۲۰۲۰ برای نمونه در منطقه سیستان به طور قابل توجهی افزایش داشته است که این امر منجر به روند کاهشی رخداد گردوخاک در منطقه یاد شده است.

۱۲ نتیجه‌گیری

هواویزها به طور مستقیم بر توازن انرژی سامانه جو زمین و به طور غیرمستقیم بر ویژگی‌های میکروفیزیکی ابرها و فرآیند بارش تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق بر اساس داده‌های حاصل از محصولات سنجنش از دور، پراکنش زمانی-مکانی چشمه گردوخاک در ایران مطالعه شده و عواملی که بر ذرات معلق گردوخاک تأثیر می‌گذارند

اقلیم‌شناسی بارش سالانه در ایران نشان می‌دهد که بارش در مناطق اصلی رخداد گردوخاک در ایران عمدتاً کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال است. متغیر دیگری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است تندی باد است. تندی باد در شرق ایران از دیزباد در خراسان رضوی تا پیشین در سیستان و بلوچستان بیشینه است. همچنین در بخش‌های بزرگی از دشت کویر و شمال جازمویان نیز میانگین سالانه تندی باد بیش از ۵ متر/ثانیه است. همچنین تندی باد در مرز استان خوزستان با کشور عراق نیز نسبت به مناطق مجاور بیشینه است. منطقه بعدی که تندی باد در آن بیشینه است مرزهای غربی کشور در استان ایلام است. این منطقه با تندی باد زیاد، بارش کم و رطوبت خاک پایین به یکی از چشمه‌های اصلی گردوخاک داخلی کشور تبدیل شده است. تغییرات متغیرهای اقلیمی و پوشش گیاهی در

مورد بحث قرار گرفت. مهم‌ترین یافته‌های تحقیق به شرح زیر است:

بین AOD و رخداد گردوخاک در ایران ارتباط معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ وجود دارد. این رابطه به دلیل وجود ذرات گردوخاک در جو در طول رخداد گردوخاک است که به طور موثر AOD را افزایش می‌دهد. داده‌های AOD حاصل از محصول ترکیبی MODIS DB/DT همبستگی قوی با گزارش‌های گردوخاک در ایستگاه‌های هواشناسی کشور دارند که از دقت مناسبی برخوردارند.

مقدار AOD در کشور دارای اختلافات منطقه‌ای مشهودی است. بیش‌ترین مقادیر AOD در ایران در سواحل جنوب شرقی، هامون جازموریان، دشت سیستان، سواحل جنوبی در بوشهر و هرمزگان و جنوب غربی کشور مشاهده می‌شود. در مقیاس سالانه مناطق وسیعی از چشمه گردوخاک در کشور وجود دارد و میانگین فراوانی سالانه فعالیت‌های گردوخاک بیش از ۴۴ روز (بر اساس داده‌های ۵۶ ایستگاه در دسترس طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) است. میانگین سالانه تعداد روزهای همراه با گردوخاک در منطقه زاابل با ۱۶۷/۵ روز در بیش‌ترین مقدار است.

منابع طبیعی گردوخاک عمدتاً در مناطق بیابانی دشت سیستان، هامون جازموریان، جنوب شرق در سواحل مکران، سواحل خلیج فارس و غرب کشور توزیع شده‌اند. منابع گردوخاک ناشی از فعالیت‌های انسانی عمدتاً اراضی زراعی دیم رها شده، تالاب و دریاچه‌های داخلی خشک شده به دلیل انحراف مسیر رودها، سدسازی و حفر چاه‌ها است که به مرور زمان با تغییرات مکرر همراه بوده است.

با محاسبه فراوانی رخداد هواویزها یازده چشمه گردوخاک اصلی در کشور شناسایی شد. این یازده چشمه عبارتند از ۱- دریاچه نمک-قم، ۲- دشت کویر، ۳- دشت سیستان، ۴- دشت لوت، ۵- جنوب شرق-سراوان، ۶- هامون جازموریان، ۷- جنوب شرق-دشتیاری، ۸- جنوب-

هرمزگان، ۹- جنوب-بوشهر، ۱۰- جنوب غرب-خوزستان و ۱۱- غرب-ایلام.

چشمه‌های گردوخاک اصلی در ایران هر چند که از نظر جغرافیایی تفاوت‌های زیادی دارند اما از نظر بیوفیزیکی و اقلیمی ویژگی‌های مشترکی را دارند. مناطقی با رخداد بیش‌تر گردوخاک در ایران بر اساس شاخص EVI عمدتاً پوشش گیاهی کمتر از ۰/۱ و رطوبت خاک کمتر از ۲۰ درصد را دارند. مقدار بارش در این مناطق کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و متوسط سالانه تنیدی باد بیش از ۵ متر بر ثانیه است.

ارتباط میان گردوخاک و کاربری اراضی قابل توجه و چندوجهی است. برای نمونه، مطالعه‌ای در استان کرمانشاه نشان داد که منابع گردوخاک عمدتاً در مناطقی با تغییر کاربری اراضی، به ویژه در مناطقی که مراتع به زمین‌های کشاورزی تبدیل شده‌اند، ایجاد می‌شوند (احمدی مولوردی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این جلی و زارع چاهوکی (۲۰۲۲) نشان دادند که تغییرات در کاربری و پوشش اراضی در ایران مرکزی منجر به فشارهای محیط زیستی شده که در نهایت منجر به جدا شدن و انتشار ذرات گردوخاک شده است. این مطالعه نشان داد که بیش‌ترین مقدار انتشار گردوخاک در اراضی شوره‌زار، مناطق نمکی و زمین‌های برهنه است. به طور کلی، درک رابطه بین گردوخاک و کاربری اراضی برای مدیریت و کنترل گردوخاک در مناطق شناسایی شده و همچنین برای کاهش اثرات زیست محیطی و بهداشتی توفان‌های گردوخاک ضروری است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران (INSF) تحت عنوان طرح پژوهشی پیش‌نگری رخدادهای گرد و غبار در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم و بازخوردهای زیست محیطی آن با کد ۹۹۰۱۸۹۸۴ به انجام رسیده است.

ارتباط آن با خشک‌سالی در دامنه‌ی جنوبی البرز: مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۲(۴۳)، ۱۹-۴۰. زرین، آ، صالح‌آبادی، ن، مفیدی، ع، داداشی رودباری، ع، ۱۴۰۱، بررسی فصلی گردو خاک در شمال شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخداد‌های گردو خاک فرین با مدل WRF-CHEM، فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۲)، ۴۴۰-۴۲۱.

صحت کاشانی، س، رهنما، م، کرمی، س، رنجبر سعادت آبادی، ع، خدام، ن، ۱۴۰۱، بررسی عوامل محیطی مؤثر بر فعال‌سازی چشمه‌های گردو خاک در استان ایلام: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴(۳)، ۴۰۳-۴۲۷.

فاریابی، آ، متین فر، ح، علوی پناه، ک، نوروزی، ع، ۱۳۹۸، شناسایی گرد و غبار در نواحی غرب و جنوب غرب ایران بر مبنای الگوریتم سنجه DAI و داده‌های طیفی سنجنده مودیس: فصلنامه علوم محیطی، ۱۷(۳)، ۱۶۲-۱۵۱.

کاتورانی، ش، احمدی، م، داداشی رودباری، ع، ۱۴۰۳، بررسی هواویزها و آستانه‌های آن در غرب آسیا و ارتباط آن با پوشش گیاهی: فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۲)، ۴۹۸-۴۸۱.

مبارک حسن، ا، رنجبر سعادت آبادی، ع، فتاحی، ا، نوری، ف، ۱۴۰۰، بررسی ویژگی‌های رخداد پدیده گردو خاک خراسان بزرگ در دوره گرم سال و شبیه‌سازی مسیر آن توسط مدل HYSPLIT (دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۰): پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۲)، ۲۶۸-۲۴۹.

مبارک حسن، ا، فتاحی، ا، رنجبر سعادت آبادی، ع، حسین حمزه، ن، ۱۴۰۲، بررسی توانایی مدل RegCM در شبیه‌سازی گردو خاک تابستانی خراسان بزرگ: نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۳(۷۱)، ۵۹-۳۹.

بدینوسیله، نویسندگان از حمایت‌های ارزشمند این صندوق که امکان انجام این تحقیق را فراهم نمود، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

احمدی، ر، ا، عزیززاده، ا، ثابت قدم، س، ۱۴۰۳، چشمه‌های موثر بر وقوع گردو خاک در منطقه تهران با کاربری داده‌های MERRA-2: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۸(۴)، ۳۷-۲۱.

احمدی، م، شکیبیا، ع، داداشی رودباری، ع، ۱۳۹۸، بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مؤلفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری هواویزهای فصلی ایران: فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۱)، ۲۱۱-۲۳۳.

امیری، م، سلیمانی، س، سلطانی تفرشی، ف، ۱۳۹۹، استخراج گردو غبار از تصاویر ماهواره‌ای MODIS با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی: نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۲(۱)، ۳۷-۵۴.

انصاری قوجقار، م، پورغلام آمیجی، م، عراقی نژاد، ش، ۱۳۹۹، بررسی رابطه بین خشک‌سالی و روند فراوانی طوفان‌های گردو غبار در غرب و جنوب غرب کشور: تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۱)، ۲۸۳۹-۲۸۵۲.

برزو، ف، ذوالفقاری، ح، معصوم پور سماکوش، ج، صحرائی، ج، ۱۴۰۰، تحلیل فضایی طوفان‌های گردو غباری در ایران براساس ویژگی‌های آب‌وهوایی و پوشش گیاهی: جغرافیا و پایداری محیط، ۱۱(۱)، ۱-۲۳.

پيله وران، ر، راستگو، ز، کرمی، س، مرادپور، ب، ۱۴۰۱، بارزسازی گردو خاک با روش‌های سنجش از دور و مدل‌های عددی: فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۴)، ۵۳-۸۰.

جنت‌رستمی، م، رحیمی، م، کابلی، ح، ۱۴۰۰، تحلیل روند تغییرات شاخص گردو غبار (DSI) و ارزیابی

- Villaume, S., Bidlot, J.-R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N., 2021, The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186-4227.
- Belle, J. H., & Liu, Y., 2016, Evaluation of aqua modis collection 6 aod parameters for air quality research over the continental united states: *Remote Sensing*, 8(10), 815.
- Che, H., Gui, K., Xia, X., Wang, Y., Holben, B. N., Goloub, P., ... & Zhang, X., 2019, Large contribution of meteorological factors to inter-decadal changes in regional aerosol optical depth: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(16), 10497-10523.
- Che, Y., Yu, B., & Parsons, K., 2023, May, Seasonal dust aerosol optical depth patterns using MODIS Deepblue aerosol product and MERRA-2 aerosol reanalysis: In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-16295).
- Chen, X., Ding, J., Liu, J., Wang, J., Ge, X., Wang, R., & Zuo, H., 2021, Validation and comparison of high-resolution MAIAC aerosol products over Central Asia: *Atmospheric Environment*, 251, 118273.
- Didan, K., 2021, MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center: Accessed 2024-07-15 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.061>
- Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., ... & Kinne, S., 1999, Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24), 31333-31349.
- Garrigues, S., Chimot, J., Ades, M., Inness, A., Flemming, J., Kipling, Z., ... & Agustí-Panareda, A., 2022, Monitoring multiple satellite aerosol optical depth (AOD) products within the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) data assimilation system: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(22), 14657-14692.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M., 2012, Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products: *Reviews of Geophysics*, 50(3).
- نیبی بید هندی، غ.، جوانمرد، س.، زهتابیان، غ.، موسوی، م.، ۱۴۰۰، کاربرد مدل های WRF-Chem و HYSPLIT در بررسی کانون و مسیر گرد و غبار (مورد مطالعه: طوفان گرد و غبار سپتامبر ۲۰۱۵ در کلانشهر تهران): نشریه هواشناسی و علوم جو، ۴(۱)، ۳۰-۴۴.
- نیک فال، ا.، رنجبر سعادت آبادی، ع.، تاج بخش مسلمان، س.، مرادی، م.، ۱۴۰۱، اصلاح و ارزیابی چشمه های گرد و خاک ناشی از فرسایش بادی در مدل WRF/Chem در غرب آسیا: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۶(۲)، ۲۴-۱.
- نیک فال، ا.، کرمی، س.، رنجبر سعادت آبادی، ع.، صحت کاشانی، س.، ۱۳۹۶، قابلیت های مدل عددی Chem-WRF در برآورد غلظت گرد و خاک (مطالعه موردی طوفان گرد و خاک تهران): فصلنامه علوم محیطی، ۱۵(۱)، ۱۲۶-۱۱۵.
- یوسفی میرهن، ا.، خالقی، ع.، ۱۴۰۳، واکاوی روند تغییرات شاخص گرد و غبار (DSI) و ارتباط آن با وضعیت خشکسالی هواشناسی در اقلیم خشک کشور (مطالعه موردی: استان سمنان): فصلنامه علوم محیطی، ۲۲(۲)، ۳۰۴-۲۸۹.
- Abadi, A. R. S., Shukurov, K. A., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Opp, C., Shukurova, L. M., & Ghasabi, Z., 2024, Dust Events over the Urmia Lake Basin, NW Iran, in 2009–2022 and Their Potential Sources: *Remote Sensing*, 16(13), 2384.
- Ahmadi-Molaverdi, M., Jabbari, I., & Fathnia, A., 2021, Relationship Between Land Use Changes and the Production of Dust Sources in Kermanshah Province, Iran: *Chinese Geographical Science*, 31, 1057-1069.
- Alizade Govarchin, Y., Unal, A., Baykara, M., 2020, Impacts of drying up of Urmia Lake, the second largest hypersaline lake in the world, on particulate matter concentration in the northwestern Iran: 19th Annual CMAS Conference, Chapel Hill, NC, October 26-28, 2020.
- Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C.,

- Gruber, A., De Lannoy, G., Albergel, C., Al-Yaari, A., Brocca, L., Calvet, J. C., ... & Wagner, W., 2020, Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors?: *Remote sensing of environment*, 244, 111806.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R., 1998, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data: *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I. A., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., ... & Smirnov, A., 1998, AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization: *Remote sensing of environment*, 66(1), 1-16.
- Huang, F., Ma, W., Wang, S., Feng, C., Kong, X., & Liu, H., 2023, Analysis and validation of the aerosol optical depth of MODIS products in Gansu Province: Northwest China. *Remote Sensing*, 15(12), 2972.
- Hubanks, P. A. U. L., Platnick, S. T. E. V. E. N., King, M. I. C. H. A. E. L., & Ridgway, B. I. L. L., 2015, MODIS Atmosphere L3 gridded product algorithm theoretical basis document (atbd) & users guide: ATBD reference number ATBD-MOD-30, NASA, 125, 585.
- Jebali, A., & Zare Chahouki, A., 2022 Impact of the land-use/cover on the dust emission using meteorological data and satellite imagery: *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(8), 7763-7776.
- Levy, H., Horowitz, L. W., Schwarzkopf, M. D., Ming, Y., Golaz, J. C., Naik, V., & Ramaswamy, V., 2013, The roles of aerosol direct and indirect effects in past and future climate change: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4521-4532.
- Li, Y., Shi, G., & Sun, Z., 2020, Evaluation and improvement of MODIS aerosol optical depth products over China: *Atmospheric Environment*, 223, 117251.
- Liu, J., Ding, J., Rexiding, M., Li, X., Zhang, J., Ran, S., ... & Ge, X., 2021, Characteristics of dust aerosols and identification of dust sources in Xinjiang, China: *Atmospheric Environment*, 262, 118651.
- Rahmati, O., Mohammadi, F., Ghiasi, S. S., Tiefenbacher, J., Moghaddam, D. D., Coulon, F., ... & Bui, D. T., 2020, Identifying sources of dust aerosol using a new framework based on remote sensing and modelling. *Science of The Total Environment*, 737, 139508.
- Rudke, A. P., Martins, J. A., Martins, L. D., Vieira, C. L. Z., Li, L., da Silva, C. F. A., ... & de Almeida Albuquerque, T. T., 2023, Evaluation and comparison of MODIS aerosol optical depth retrieval algorithms over Brazil: *Atmospheric Environment*, 314, 120130.
- Samuel, C., Kumar, R. P., & Gautam, S., 2023, Review of retrieval of aerosol optical depth to estimate particle concentration and its challenges based on spatiotemporal relationships by various spectroradiometer models: *Geological Journal*, 58(12), 4403-4416.
- Samuel, C., Kumar, R. P., & Gautam, S., 2023, Review of retrieval of aerosol optical depth to estimate particle concentration and its challenges based on spatiotemporal relationships by various spectroradiometer models: *Geological Journal*, 58(12), 4403-4416.
- 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.
- Shi, H., Xiao, Z., Zhan, X., Ma, H., & Tian, X., 2019, Evaluation of MODIS and two reanalysis aerosol optical depth products over AERONET sites: *Atmospheric Research*, 220, 75-80.
- Srekanth, V., 2014, Dust aerosol height estimation: a synergetic approach using passive remote sensing and modelling: *Atmospheric Environment*, 90, 16-22.
- Tao, M., Chen, L., Wang, Z., Tao, J., Che, H., Wang, X., & Wang, Y., 2015, Comparison and evaluation of the MODIS Collection 6 aerosol data in China: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(14), 6992-7005.
- Tao, M., Wang, J., Li, R., Chen, L., Xu, X., Wang, L., ... & Xiang, J., 2020, Characterization of aerosol type over East Asia by 4.4 km MISR product: first insight and general performance: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13), e2019JD031909.
- Zhang, J., Xiao, J., Tong, X., Zhang, J., Li, J., Liu, P., ... & Meng, P., 2024, Comparing the performance of phenocam GCC, MODIS GCC, and MODIS EVI for retrieving vegetation phenology and estimating gross primary production: *Ecological Indicators*, 166, 112251.

Identification of dust sources in Iran based on satellite products

Azar Zarrin^{1*} and Abbasali Dadashi-Roudbari²

¹ Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: 16 August 2024, Accepted: 18 November 2024)

Summary

The objective of this research is to identify the primary sources of dust storms in Iran and to investigate their temporal and spatial changes. To examine the long-term spatiotemporal distribution of dust storm events, daily Aerosol Optical Depth (AOD) data from the MODIS sensor and dust storm days from synoptic meteorological stations (2001-2020) were used. Aerosols, as mentioned, are fine particles suspended in the Earth's atmosphere. To study these particles, an index called Aerosol Optical Depth (AOD) has been developed. The AOD index is defined as the integral of the extinction coefficient of atmospheric particulate matter over the entire atmospheric column. To investigate the climate conditions during these events, MSWX data was used, and for better analysis of soil moisture and vegetation cover, multi-satellite data and the MODIS sensor were employed, respectively. The frequency of occurrence (FoO) of aerosols is a method used to identify dust sources. The basic data for this method is remote sensing data. Areas with high aerosol occurrence are often classified as dust sources. Therefore, in this research, the frequency of occurrence (FoO) method was used to detect active aerosol sources and differentiate them from less active sources. Generally, AOD values of 0.8 to 0.9 are considered as high aerosol values and are used to identify dust sources. In this study, the AOD thresholds (0.25, 0.5, and 1) proposed by Ginoux et al. (2010) were used to identify dust sources. The spatial distribution analysis of AOD showed that there are significant differences between the south and north of Iran. The Alborz mountain range and the Caspian Sea basin in the north of the country have the lowest AOD values due to high precipitation and soil moisture. In contrast, areas with high AOD values are mainly observed in the southeast, south, and southwest of the country. In general, the annual average AOD in these areas is higher than the country's average. High AOD values in the southern and eastern regions are associated with low precipitation, sparse vegetation cover, and frequent dust storms. The trend analysis of station dust storms and AOD and FoO indices showed that this phenomenon has an increasing trend in the west, northwest, and northeast of Iran. In contrast, it has a significant decreasing trend at the 0.05 level in southeastern Iran and southern parts of the Kaver desert. The FoO analysis at three investigated thresholds showed that Iran has eleven main internal dust sources. The main areas are located in the east, south, and southwest of the country. The main dust sources in Iran generally have soil moisture less than 20% and precipitation of about 100 mm per year. Also, the EVI vegetation index in these areas mainly shows a lack of vegetation cover, and wind speed is maximum in these areas.

Keywords: Dust storm source, aerosol optical depth (AOD), frequency of occurrence (FoO), MODIS sensor, Iran