

تحلیل شاخص توفان گردو خاک (DSI)، بسامد رخدادهای گردو خاک و دید

افقی در منطقه غرب آسیا

مهدی رهنما^۱، ساوین صحت کاشانی^{۱*}، نوشین خدام^۲، سارا کرمی^۱، سحر تاجبخش^۱، عباس رنجبر^۳

۱- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته دکتری هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳- دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

چکیده

پدیده گردو خاک به‌عنوان یکی از مخاطرات جوی در بسیاری از کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان می‌تواند بر جنبه‌های مختلف زندگی انسانی از جمله سلامتی، زیست‌بوم، حمل‌ونقل، صنعت و انرژی آثار مخربی داشته باشد. کشور ایران در بخشی از کمربند گردو خاکی که از صحرای بزرگ آفریقا به غرب و مرکز آسیا کشیده شده، قرار گرفته است و هر ساله توفان‌های گردو خاک در مناطق مختلف کشور رخ داده که موجب بروز خسارات فراوان می‌شود. همچنین خشکسالی‌های اخیر سبب ایجاد کانون‌های داخلی گردو خاک در خاورمیانه و ایران و نیز تشدید فعالیت آن‌ها شده است. در این مقاله، به‌منظور بررسی الگوی زمانی و مکانی پدیده گردو خاک در خاورمیانه به تحلیل شاخص توفان گردو خاک^{*}، بسامد رخدادهای گردو خاک و کاهش دید افقی متأثر از رخدادهای گردو خاک در بازه زمانی ۲۰۰۹ الی ۲۰۱۸ پرداخته شده است. میانگین ماهانه، فصلی و سالانه DSI نشان داد که این شاخص در بیشتر کشورهای واقع در محدوده مورد مطالعه به‌شدت به توفان‌های گردو خاک محلی وابسته است و توفان‌های گردو خاک متوسط و یا فرامرزی تأثیر کمتری بر روی این کشورها دارند. بررسی بسامد رخدادهای گردو خاک نیز نشان می‌دهد که طی این دوره مطالعاتی، نیمه غرب و جنوب غرب کشور در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با شدت بیشتری تحت تأثیر پدیده گردو خاک با منشاء غیر محلی بوده‌اند. تعداد روزهای همراه با کاهش دید افقی بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر ناشی از گردو خاک در نواحی جنوبی کشور پاکستان، سواحل مکران، بخش‌های مرکزی و شرقی شبه‌جزیره عربستان و نیز در جنوب غربی ایران نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه از مقادیر بیشتری برخوردار بوده‌اند.

کلید واژه‌ها: دید افقی، شاخص توفان گردو خاک، گردو خاک

مقدمه

گردوخاک به عنوان یکی از آلاینده‌های طبیعی بر جنبه‌های مختلف زندگی انسانی از جمله سلامتی، زیست‌بوم، حمل‌ونقل، صنعت و انرژی تأثیرگذار است. شدت این تأثیرگذاری به‌گونه‌ای است که زندگی جوامع انسانی را دستخوش تغییر نموده و هزینه‌های اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی سنگینی را بر جامعه تحمیل می‌نماید. این هزینه‌های سنگین، به‌عنوان تهدیدی جدی در روند توسعه پایدار کشورها در نظر گرفته می‌شوند. منطقه غرب آسیا که کشور ما نیز در این ناحیه از جهان واقع شده است، پس از صحرای بزرگ آفریقا، دارای دومین چشمه‌های بزرگ گسیل‌کننده گردوخاک در جهان است. این منطقه بخشی از کمربند گردوخاکی است که از غرب صحرای بزرگ آفریقا به مرکز و غرب آسیا کشیده شده است. مجرای انتقال گردوخاک در این منطقه از جمهوری عربی سوریه آغاز و با همراهی کانون‌های گردوخاک قابل‌توجه موجود در عراق به‌وسیله یک جریان شمالی و با عبور بر فراز خلیج فارس تا کشور عمان ادامه پیدا می‌کند. همچنین در این منطقه، یک چشمه گردوخاک شدید نیز بر روی نواحی خالی از سکنه مرکزی عربستان سعودی وجود دارد که فعالیت آن، تشدید گردوخاک در منطقه را در پی دارد. فرارگرفتن کشور ما در این منطقه با چنین ابعاد بزرگی از چشمه‌های گردوخاک، شرایط ویژه‌ای ایجاد نموده که جنبه‌های مختلفی از اقتصاد، امنیت و سلامت کشور را مورد تهدید قرار داده است. از طرف دیگر روند افزایشی شدت، مدت و بسامد رخداد پدیده گردوخاک و همچنین به‌وجود آمدن تغییرات اقلیمی که سبب افزایش و تشدید این رخدادها در آینده خواهد شد، ضرورت توجه بیشتر به شناسایی چشمه‌های گردوخاک، شدت و زمان فعالیت آن‌ها را دوچندان می‌کند.

تشدید این پدیده در دهه‌های اخیر، مشکلات زیادی را برای مردم جهان ایجاد کرده است (شعاعی و همکاران، ۱۳۹۴). پدیده گردوخاک یکی از بلاهای طبیعی به شمار می‌رود که مانند سیل، زلزله، آتش‌فشان، خشکسالی و غیره، هرساله

زندگی تعداد زیادی از انسان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (میدلتون، ۲۰۱۹). در نیم‌کره شمالی کشورهایی که عمدتاً بر روی کمربند گردوخاک قرار دارند از این پدیده متأثر هستند. این کمربند از شمال آفریقا تا کشور چین کشیده شده است و منطقه خاورمیانه را در برمی‌گیرد (علیزاده و همکاران، ۲۰۱۵). بزرگ‌ترین منطقه تولیدکننده گردوخاک در نیم‌کره شمالی بیابان صحرا در قاره آفریقا است که سالانه گردوخاک زیادی (در حدود ۱۸۰ میلیون تن) را وارد جو زمین می‌کند (اشلسنگر و همکاران، ۲۰۰۶؛ برون‌دا، ۲۰۲۰). در قاره آسیا نیز ساکنین غرب این قاره به‌ویژه منطقه خاورمیانه با معضل توفان‌های خاک مواجه هستند. بیابان‌های کشور عراق، سوریه، عربستان و بحرین را می‌توان مهم‌ترین منابع تولیدکننده گردوخاک در خاورمیانه نامید. در سال‌های اخیر، وقوع درگیری‌های متعدد و بی‌ثباتی در کشورهای عراق و سوریه موجب افزایش خشکسالی و خشک شدن زمین‌های کشاورزی شده است. همچنین عدم کنترل و چاره‌اندیشی معضل افزایش پدیده گردوخاک، موجب افزایش توفان‌های گردوخاک در این مناطق و ورود این توفان‌ها به غرب و جنوب غرب ایران شده است. در شرق و جنوب‌شرق کشور (دشت سیستان و طبس) نیز منابع تولیدکننده ذرات گردوخاک وجود دارند که از منابع اصلی تولیدکننده گردوخاک در جهان محسوب می‌شوند. همچنین کویرهای مرکزی ایران را می‌توان از دیگر منابع تولیدکننده گردوخاک نامید (میری و همکاران، ۲۰۰۷). فرارگرفتن کشور ایران در منطقه خاورمیانه با چنین ابعاد بزرگی از چشمه‌های گسیل‌کننده گردوخاک، شرایط ویژه‌ای ایجاد نموده که جنبه‌های مختلفی از اقتصاد، امنیت و سلامت کشور را مورد تهدید قرار داده است. از جمله مطالعاتی که در زمینه شبیه‌سازی پدیده‌های گردوخاک در خردمقیاس صورت گرفته می‌توان به کار کرمی و همکاران (۲۰۱۷) در شبیه‌سازی توفان گردوخاک تهران در ۱۲ خرداد ۱۳۹۳ اشاره کرد. موقعیت جغرافیایی و شرایط طبیعی ایران، عامل وزش بادهای محلی است. اثرات بادهای محلی که با توجه به زمان

وزش و پهنه فعالیت آن دارای ویژگی‌های متفاوتی است، در برخی مناطق به دلیل تداوم و سرعت زیاد، نمایان و فعالیت‌های ساکنین منطقه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد؛ نمونه بارز آن در کشور دره لوت است. شرایط زمین‌شناختی موجود در اطراف دره لوت نقش بسزایی در گسترش جریان‌های کانالیزه ایفا می‌نماید. امکان این امر از طریق برهم‌کنش‌های بین‌وادی‌های زمین‌شناختی پیچیده و شرایط هواشناسی صورت می‌پذیرد. به‌علاوه فرارفت هوای سرد از عرض‌های شمالی و گرادیان فشار از عوامل تعیین‌کننده این شارش محسوب می‌شوند (صحت کاشانی و همکاران، ۲۰۰۹). در فصل تابستان استقرار سامانه‌های تابستانی منجر به ایجاد شیو فشاری شمالی - جنوبی در این منطقه می‌گردند. شب‌هنگام با توجه به سرمای شبانه و افزایش پایداری استاتیکی، شاهد کاهش متوسط جریان درون دره نسبت به شارش‌های روزانه خواهیم بود. وزش بادهای شدید با توجه به نیروی شیو فشاری موجود، رشد لایه‌مرزی به‌خصوص در طی ساعات بعدازظهر و درگیر شدن شارش با جریان‌های تراز بالا منجر به دریافت تکانه بیشتر و افزایش سرعت شارش شده که در ادامه توفان‌های گردوخاک شدید به مدت طولانی ۱۲۰ روز را در پی خواهد داشت (صحت کاشانی و همکاران، ۱۳۸۵). نواحی مختلفی در جهان تولیدکننده گردوخاک هستند؛ اما بزرگ‌ترین چشمه‌های تولیدکننده گردوخاک در جهان، ابتدا شمال آفریقا و سپس شرق آسیا هستند. شمال آفریقا حدود ۷۰۰ تریلیون تن در سال (لارنت، ۲۰۰۸) و شرق آسیا حدود ۲۵۰ تریلیون تن در سال (لارنت، ۲۰۰۶) گردوخاک تولید می‌کنند که حدود یک‌سوم تا نصف گردوخاک میزان گردوخاکی (بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ تریلیون تن در سال) هست که در سال روی سطح زمین نشست می‌کند (کک‌مور و همکاران، ۲۰۰۶). لازم به ذکر است در بررسی آلوده‌ترین شهرهای جهان بر اساس رتبه‌بندی سازمان جهانی بهداشت در سال ۲۰۱۶ شهر زابل، متأثر از توفان‌های گردوخاک شدید یادشده، به‌عنوان آلوده‌ترین شهر جهان شناخته شده است. چرخه زندگی گردوخاک، شامل

گسیل، انتقال و نشست آن به‌شدت با گردش‌های جوی و دینامیک اقلیم (کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۴؛ سالوادور و همکاران، ۲۰۱۴) در ارتباط است. علاوه‌براین، وجود رطوبت در جو که با ابرهای کومه‌ای همرفتی همراه است، سبب افزایش غلظت گردوخاک در لایه‌مرزی شده و افزایش در جو آزاد را به دنبال دارد (تاکمی و همکاران، ۲۰۰۶). ذرات گردوخاک معدنی نقش اساسی در تعادل تابشی جو و زمین به‌طور مستقیم توسط پراکنش و جذب مؤلفه‌های تابشی متفاوت در جو (طول‌موج کوتاه خورشیدی و طول‌موج بلند زمینی) دارند که به‌نوبه خود روی شارهای انرژی سطح زمین و ساختار لایه‌مرزی جو اثر می‌گذارند (میلر و همکاران، ۲۰۰۴). علاوه بر این، ذرات گردوخاک بر بودجه تابشی سطح زمین به‌طور نیمه‌مستقیم با تأثیر بر روی ابرناکی و به‌طور غیرمستقیم با تأثیر بر ویژگی‌های نوری ابر و طول عمر ابر اثرگذار هستند (هونگ و نه، ۲۰۰۶). به‌طور مثال، ذرات گردوخاک منجر به واداشت تابشی منفی شده که اثرات سرمایشی جو را به همراه دارد (مشایخی و همکاران، ۱۳۸۹). واداشت تابشی منطقه‌ای توسط گردوخاک معدنی یک عامل کلیدی در درک تغییرات اقلیم منطقه‌ای است. این اثرات یک‌طرفه نیستند و در واقع یک بازخورد بین ذرات گردوخاک در جو و اثرات منطقه‌ای و اقلیمی آن وجود دارد (اسپیرو و همکاران، ۲۰۱۳). کاهش تابش خورشیدی ورودی در زیر لایه‌های هواویز باعث می‌شود که دمای بیشینه سطح زمین کاهش پیدا کند و در نتیجه پایداری تراز زیرین جو افزایش یابد. افزایش پایداری منجر به کاهش سرعت بادهای سطحی شده و بنابراین مقدار گسیل گردوخاک از سطح را کمتر می‌کند. از طرف دیگر، شیو افقی دما در لبه‌های پلوم گردوخاک افزایش یافته که خود می‌تواند منجر به افزایش بادهای سطحی در آن مناطق شود. در طول شب ذرات گردوخاک مانند لایه ابر عمل می‌کند و دمای کمینه سطحی را با جذب و بازپخش تابش طول‌موج بلند افزایش می‌دهد که منجر به کاهش پایداری لایه‌مرزی شده و بنابراین شدت

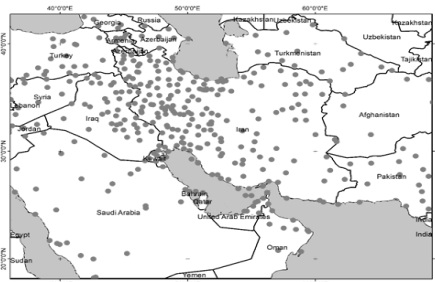
شده به صورت ماهانه، فصلی و سالانه میانگین‌گیری شده است. داده‌های مورد استفاده نیز از داده‌های دیدبانی شده ایستگاه‌های همدیدی استخراج شده است. در شکل ۱، محدوده مورد مطالعه و توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده نشان داده شده است که شامل کشورهای ایران، عراق، سوریه، ترکیه، ترکمنستان، تاجیکستان، ازبکستان، قزاقستان، ارمنستان، جمهوری آذربایجان، گرجستان، بخشی از روسیه، ترکمنستان، افغانستان، پاکستان، عمان، یمن، امارات متحده عربی، قطر، بحرین، عربستان سعودی و اردن است. تعداد قابل توجهی از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه، طی دهه‌های اخیر تأسیس و راه‌اندازی شده‌اند. به همین دلیل و با توجه به دوره‌های آماری متفاوت در ایستگاه‌های موجود و احتمال وجود برخی کاستی‌ها در داده‌های اندازه‌گیری شده به دلایل مختلف از جمله خرابی حسگرها، ممکن است در دوره‌های کوتاهی نبود داده و یا داده‌های مشکوک وجود داشته باشد.

بادهای سطحی و به دنبال آن گسیل گردوخاک را افزایش می‌دهد (رمی و همکاران، ۲۰۱۵). بی‌شک بارزسازی توفان‌های گردوخاک، پایش سمت و سرعت حرکت آن و برآورد غلظت آن می‌تواند در کاهش صدمات ناشی از آن نقش مهمی ایفا نماید. به‌منظور تفکیک آلاینده‌های معدنی از عوارض زمینی، به‌ویژه اراضی بیابان که بازتابش مشابه دارند و به‌عنوان یک چالش در نظر گرفته می‌گردد، تکیه بر رفتار طیفی ذرات گردوخاک و کاربرد ترکیبی دمای درخشندگی در طول موج‌های مرئی و فروسرخ گرمایی یاری‌رسان است (میلر، ۲۰۰۳؛ صحت کاشانی و همکاران، ۲۰۱۶). در این مقاله پدیده گردوخاک که یکی از مشکلات اصلی بسیاری از کشورها است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مقاله بررسی توفان‌های گردوخاک در ایران با منشاء غیرمحل به تفکیک تغییرات مکانی و تغییرات زمانی است.

مواد و روش‌ها

الف) داده‌های دیدبانی

به‌منظور مطالعه فراوانی رخداد‌های گردوخاک بازه زمانی ۱۰ ساله از سال ۲۰۰۹ الی ۲۰۱۸ انتخاب شده و داده‌های استفاده



● ایستگاه همدیدی

شکل ۱- توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده در این مطالعه

گردوخاک در ایستگاه‌های مختلف هواشناسی استفاده می‌شود. این کدها بسته به شدت و ماهیت پدیده ثبت و گزارش می‌شوند. در جدول کدهای مربوط به توفان‌های گردوخاک ارائه شده است.

مشاهدات پدیده‌های هواشناسی به فاصله ۳ ساعت یکبار در طول روز و در مجموع ۸ بار در شبانه‌روز ثبت می‌شود. در این مشاهدات پدیده‌های بصری وضع هوا بر اساس دستورالعمل سازمان جهانی هواشناسی در ۱۰۰ کد (۹۹-۰)، تعریف شده که به‌طور کلی ۱۱ کد از آن به‌منظور ثبت و گزارش پدیده

جدول ۲- مدل‌های اقلیمی جهانی مورد بررسی در این پژوهش جدول ۱ کدهای سازمان جهانی هواشناسی مرتبط با فرسایش بادی و پدیده‌های توفان‌های گردوخاک

کد	توضیحات
۰۶	مه ناشی از گردوخاک
۰۷	غبار یا شن برخاسته از زمین
۰۸	توفان گردوخاک
۰۹	توفان گردوخاک اتفاق افتاده در گذشته (اتفاق افتاده در یک ساعت قبل از مشاهده یا در ایستگاه)
۳۰	گردوخاک خفیف یا متوسط شن و ماسه همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر
۳۱	گردوخاک پایدار یا متوسط شن و ماسه همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر
۳۲	شروع یا افزایش گردوخاک خفیف یا متوسط شن و ماسه همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر
۳۳	توفان گردوخاک شدید همراه با کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر
۳۴	توفان گردوخاک پایدار شدید همراه با کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر
۳۵	شروع یا افزایش توفان گردوخاک شدید همراه با کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر
۹۸	رعدوبرق با گردوخاک و یا توفان شن و ماسه

ب) شاخص توفان گردوخاک (DSI)

به منظور مطالعه فراوانی و شدت پدیده گردوخاک از روش محاسبه شاخص توفان‌های گرد و خاک استفاده شد. معادله DSI از دهه ۹۰ میلادی برای تعیین شدت و فراوانی توفان گردوخاک به کار گرفته شده است. شاخص DSI روشی مناسب برای پایش فرسایش بادی در مقیاس وسیع با استفاده از سوابق هواشناسی است که نمایه‌ای از فراوانی و شدت توفان گردوخاک در منطقه را محاسبه می‌کند. این شاخص ترکیبی از سه نمایه روزهای توفانی با گردوخاک محلی^۱، روزهای توفانی با گردوخاک متوسط^۲ و روزهای توفانی با گردوخاک شدید^۳ است که بر مبنای تعداد دفعات ثبت کدهای پدیده گردوخاک در ایستگاه‌های همدیدی محاسبه می‌شوند. بر اساس محاسبات سازمان هواشناسی استرالیا معیار تعریف پدیده‌های توفان گردوخاک بر اساس میدان دید مشخص می‌شود. این مقدار برای توفان‌های گردوخاک متوسط، کمتر از ۱۰۰۰ متر و برای

دید افقی بیشترین مسافتی است که یک دیدبان می‌تواند اشیاء را با نور معمولی به خوبی تشخیص دهد. دید افقی در هوانوردی اهمیت فراوانی داشته و از آنجا که دید افقی بر اثر پدیده‌های مختلف و انواع توفان و انواع ریزش‌ها متغیر است، لازم است در هر ایستگاه هواشناسی برای تعیین دید افقی علائم و نقطه نشان‌های مشخص از قبیل ساختمان، تپه، کوه و ... تعیین و فاصله آن‌ها تا محل دیدبانی را دقیقاً معلوم کرد تا دیدبان بتواند با در نظر گرفتن فواصل این قبیل نقطه نشان‌ها دید افقی را تا سر حد امکان به طور دقیق گزارش نماید. برای اطلاع از دید افقی در بیشتر کشورها از دستگاه‌های الکترونیکی و برای اندازه‌گیری دید قائم از بالن‌های رنگی یا سفید کوچک می‌توان استفاده کرد (دستورالعمل کدها و روش‌های دیدبانی سازمان هواشناسی جهانی)، اما بررسی کلیه داده‌های اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده نشان داد که داده‌های مربوط به دید قائم در ایستگاه‌های همدیدی در کشور گزارش نمی‌شود. در این مقاله از داده‌های ثبت شده دید افقی در ایستگاه‌های همدیدی استفاده شده است.

² Moderate Dust Storms (MDS)

³ Severe Dust Storms (SDS)

¹ Local Dust Events (LDE)

توفان‌های شدید، کمتر از ۲۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه شاخص DSI از معادله ذیل استفاده شد:

$$DSi = \sum_{i=1}^n [(5 \times SDS) + MDS + (0.05 \times LDE)] \quad (1)$$

که در آن DSI شاخص توفان گردوخاک در n ایستگاه هم‌مدیدی منتخب است که در آن‌ها رویداد گردوخاک در یک بازه زمانی مشخص ضبط و مشاهده شده است. مدت زمان مورد نظر یک دوره نرمال، یک سال است اما می‌تواند چند ماه در یک سال هم باشد. SDS معرف روزهای توفانی با گردوخاک شدید (کدهای ۳۳-۳۵)، MDS روزهای توفانی با گردوخاک متوسط (کدهای ۳۰، ۳۲ و ۹۸) و LDE روزهای با گردوخاک محلی (کدهای ۰۷ و ۰۹) است.

در ادامه این مقاله، فراوانی پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی و دید کمتر از ۵۰۰۰ متر با استفاده از داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های هم‌مدیدی بدست آمده است. بنابراین الگویی از پراکنش رخدادهای گردوخاک در کشور تهیه شده است. همچنین کاهش دید افقی ناشی از رخداد گردوخاک به صورت ماهانه، فصلی و سالانه برای محدوده کمتر از ۸۰۰ متر و بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه تحلیل و بررسی شده است و مناطقی که دارای پتانسیل گسیل گردوخاک در منطقه هستند شناسایی شده‌اند.

نتایج

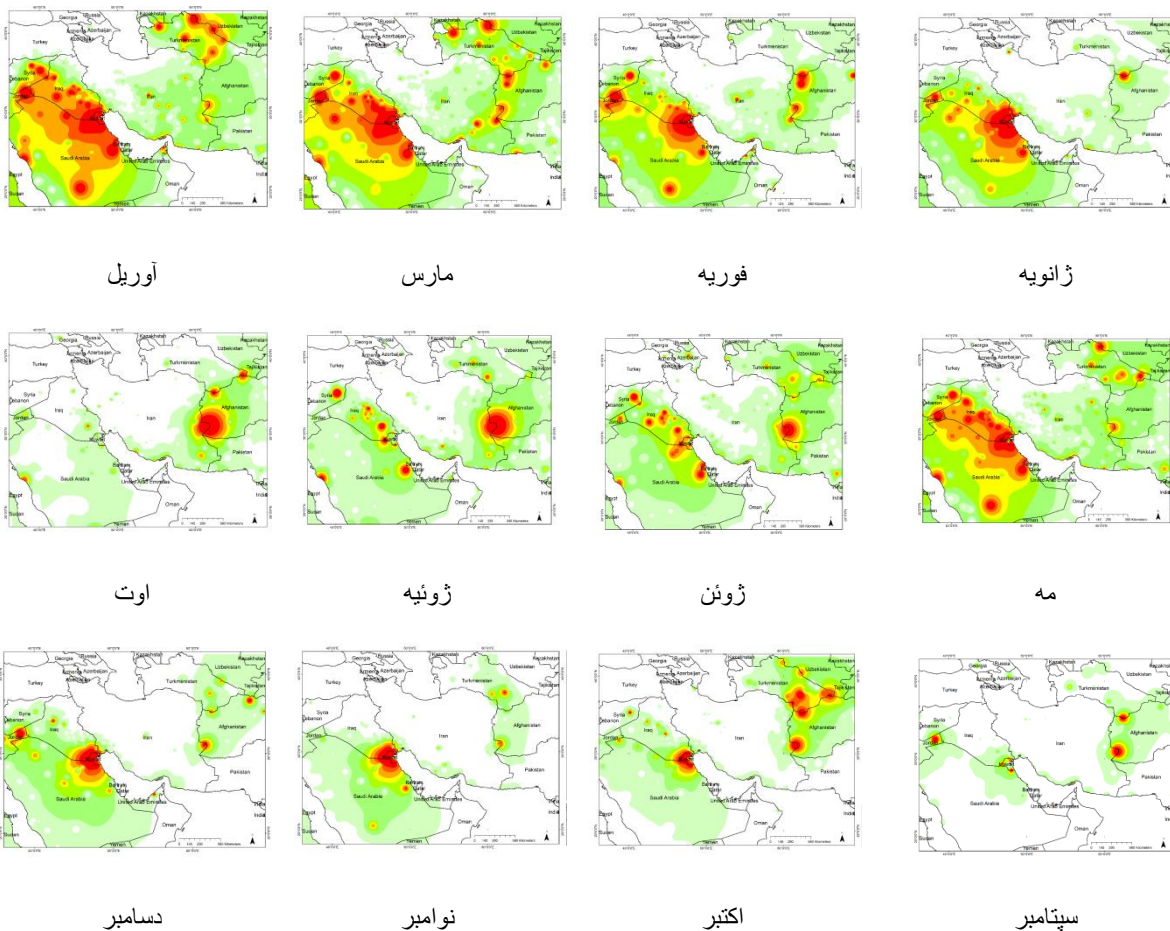
الف) تعیین تغییرات مکانی و زمانی وقوع توفان گردوخاک با منشاء خارجی مؤثر بر کشور

برای ایستگاه‌های مختلف DSI در این مطالعه مقدار شاخص

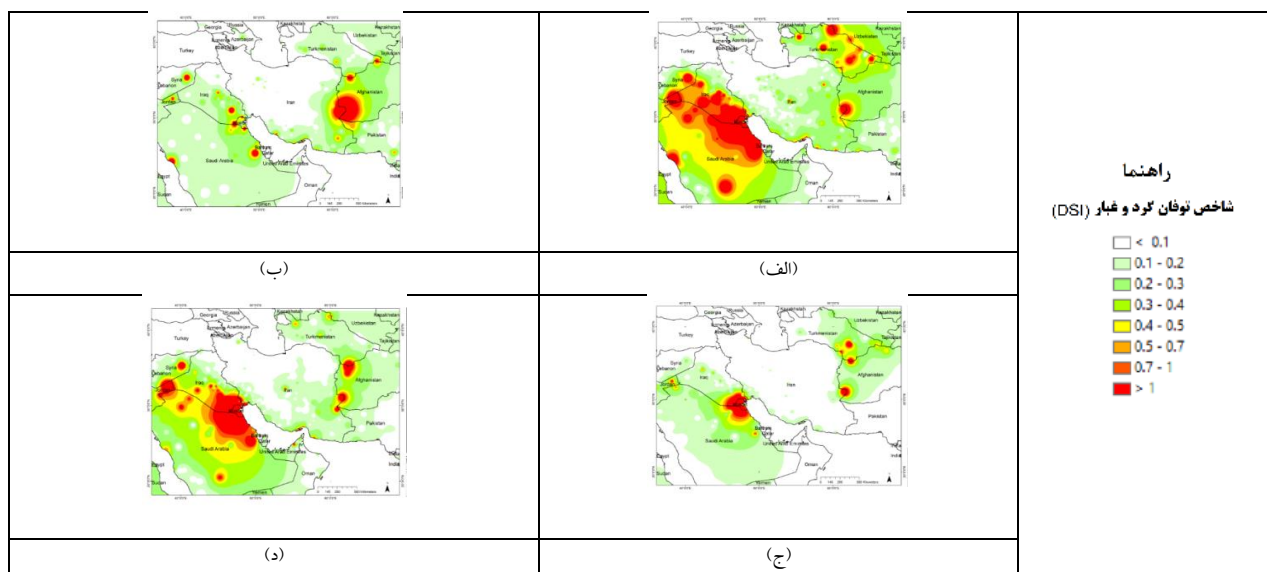


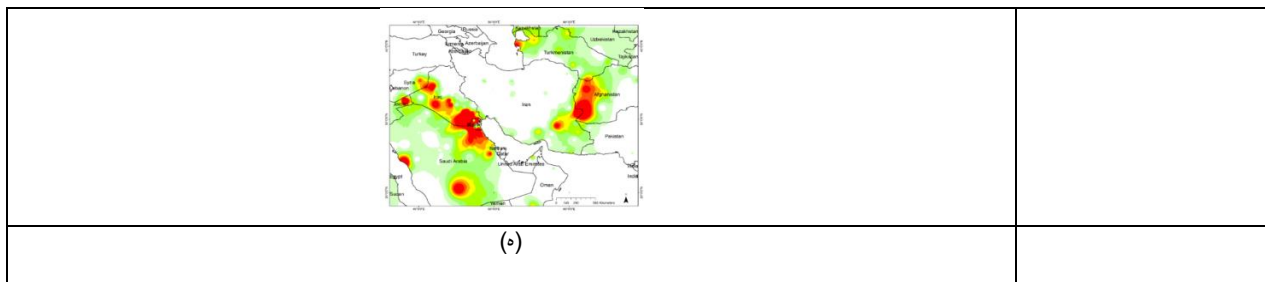
در دوره زمانی مورد مطالعه به صورت ماهانه (

شکل ۲)، فصلی و سالانه محاسبه شده و در نهایت مقدار این شاخص برای محدوده مورد مطالعه نیز از مجموع شاخص‌های برآورد شده به صورت سالانه محاسبه شد. در این مقاله فقط نقشه‌های فصلی میانگین شاخص DSI براساس اطلاعات دیدبانی ایستگاه‌های هم‌مدیدی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ ارائه شده است (شکل ۳ الف تا د). در فصل پاییز شدت و فراوانی رخدادهای گردوخاک در نیمه جنوبی عراق، شرق اردن و شمال شرقی عربستان بیشترین مقادیر را نشان می‌دهد؛ در حالی که در فصل تابستان در جنوب غربی افغانستان و شرق ایران متمرکز شده است. بررسی‌های سالانه نیز مطابق با شکل ۴ نشان داد که تغییرات شاخص DSI در دوره ۱۰ ساله به‌طور کلی به دو بخش قابل تقسیم‌بندی است. از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۵ روند تغییرات گردوخاک در کل محدوده مورد مطالعه با گذشت زمان افزایش داشته است؛ اما از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ این روند کاهشی بوده است. شاخص DSI با در نظر گرفتن هر دو مورد گردوخاک‌های محلی و منشاء‌های فرامرزی نمایه‌های جامع از روند تغییرات را در منطقه به دنبال دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص DSI در بیشتر کشورهای واقع در محدوده مورد مطالعه به شدت به توفان‌های گردوخاک محلی (شاخص LDE) وابسته است و توفان‌های گردوخاک متوسط و یا فرامرزی تأثیری کمتر بر روی این کشورها دارند.

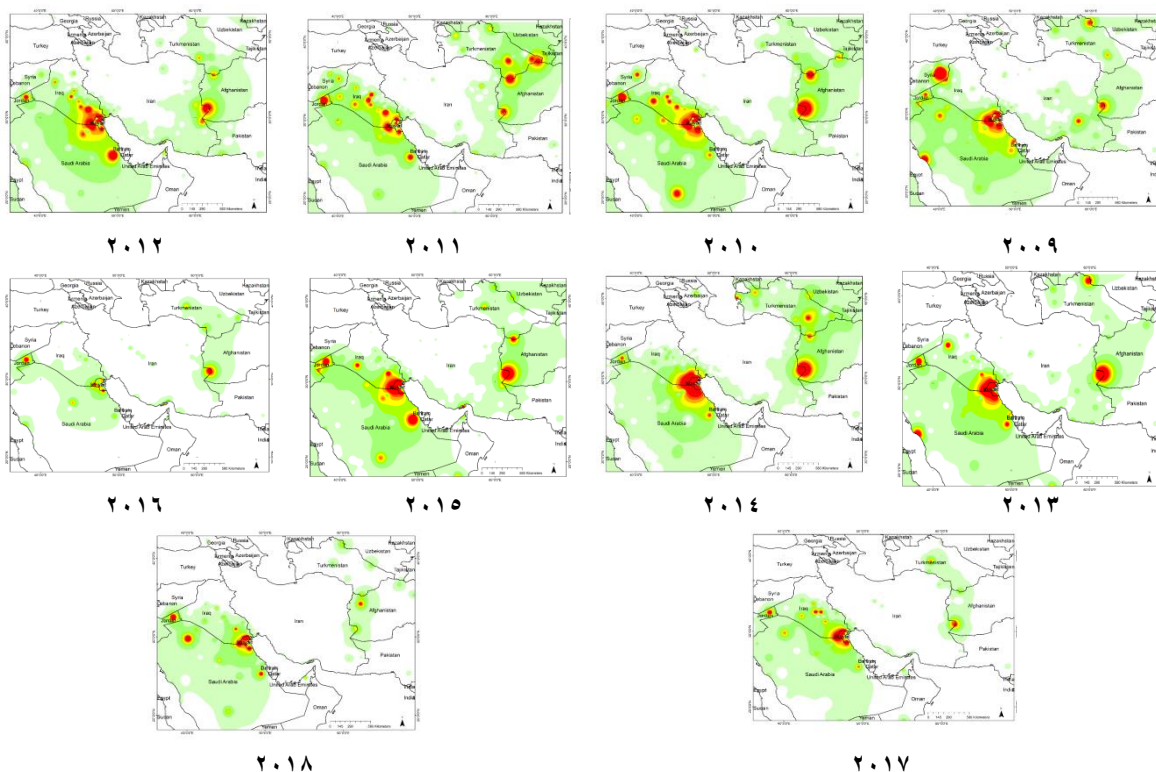


شکل ۲ میانگین شاخص DSI به تفکیک ماه براساس اطلاعات ایستگاه‌های همدیدی در دوره ۲۰۱۸ - ۲۰۰۹





شکل ۳ میانگین شاخص DSI فصل الف (بهار، ب) تابستان، ج) پاییز، د) زمستان و ه) سالانه براساس اطلاعات ایستگاه‌های همدیدی در دوره ۲۰۰۹ - ۲۰۱۸



شکل ۴ میانگین شاخص DSI به تفکیک سال براساس اطلاعات ایستگاه‌های همدیدی

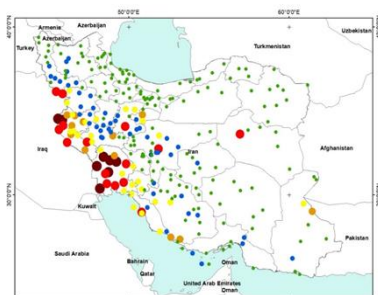
بندر ماهشهر، امیدیه (آغاچاری)، شوشتر، مسجدسلیمان و ایذه، درود، قصر شیرین، بانه، سردشت و طبرستان بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ روز و در ایستگاه‌های آبان، بستان، اهواز و سرپل ذهاب به بیش از ۱۵۰ روز رسیده است و سایر مناطق شامل نیمه شمال، شمال شرق، شرق (به استثناء طبرستان)، جنوب شرق، بخش‌هایی از مرکز و شمال غرب کشور فراوانی رخداد گردوخاک با منشاء غیر محلی به کمتر از ۵۰ روز در فصل بهار رسیده است. مطابق با شکل ۵ ب در فصل تابستان الگوی

ب) بسامد رخداد پدیده گردوخاک در مقیاس فصلی و سالانه

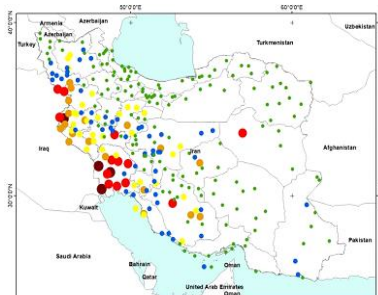
بر اساس گزارش فراوانی پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی و دید کمتر از ۵۰۰۰ متر در فصل بهار (شکل ۵ الف) مشخص شد که مناطق غرب و جنوب غرب کشور بیشتر از سایر مناطق تحت تأثیر پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی بوده؛ به طوری که در ایستگاه‌های کشاورزی اهواز، شادگان،

شرق و شمال شرق، جنوب و جنوب شرق، شمال غرب و مرکز تبعیت می‌نماید. تعداد روزهای گردوخاکی با منشاء غیر محلی در مناطق ذکرشده به کمتر از ۲۵ روز رسیده است. بسامد پدیده فوق با کاهش دید کمتر از ۵۰۰۰ متر با فراوانی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ روز در ایستگاه اهواز به چشم می‌خورد. همچنین تعداد روزهای گردوخاکی با این محدوده دید در نوار غربی استان‌های کرمانشاه، ایلام و بوشهر، شمال و شمال شرق استان خوزستان بین ۲۵ تا ۵۰ روز و در سایر نقاط استان خوزستان بین ۵۰ تا ۱۰۰ روز بوده است. بسامد رخداد گردوخاک در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ میلادی نیز موردبررسی قرار گرفت (شکل‌ها ارائه نشده است) در این دوره ۱۰ ساله، بیشترین و کمترین فراوانی رخداد گردوخاک با منشاء غیر محلی به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ با ۴۳۳۴ و ۷۵۳ روز در کل کشور رخ داده است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که طی این دوره ده‌ساله، نیمه غرب و جنوب غرب کشور در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با شدت بیشتری تحت تأثیر پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی بوده‌اند.

مشابه فصل بهار بر تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید کمتر از ۵۰۰۰ متر در شمال، جنوب و جنوب شرق، شرق و شمال شرق و مرکز کشور حاکم است؛ این در حالی است که تعداد روزهای گردوخاکی در نیمه غربی و جنوب غرب کشور در فصل تابستان نسبت به فصل بهار افزایش یافته؛ به‌طوری‌که در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، بستان، شوشتر، مسجدسلیمان، صفی‌آباد، قصر شیرین و سرپل ذهاب به بیش از ۱۵۰ روز رسیده است. در فصل پاییز بسامد روزهای گردوخاکی بادید کمتر از ۵۰۰۰ متر در تمام مناطق کشور نسبت به فصل بهار و تابستان به‌شدت کاهش پیدا کرده است. باوجود روند رو به کاهش این پدیده در فصل پاییز (شکل ۵ ج)، همچنان مناطق غرب و جنوب غرب کشور بیشتر تحت تأثیر گردوخاک با منشاء غیر محلی بوده؛ به‌طوری‌که در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، بستان در استان خوزستان و ایستگاه سرپل ذهاب در استان کرمانشاه بین ۵۰ تا ۷۵ روز گزارش شده است. شایان‌ذکر است در فصل پاییز به استثناء بخش‌های کوچکی از نیمه غربی، در سایر مناطق کشور تعداد روزهای گردوخاکی با محدوده دید ذکرشده به کمتر از ۲۵ روز رسیده است. با توجه به شکل ۵ د، روند فراوانی پدیده‌های مرتبط با گردوخاک در فصل زمستان از رژیم دیده‌شده در فصل پاییز و تقریباً با همان شدت در مناطق



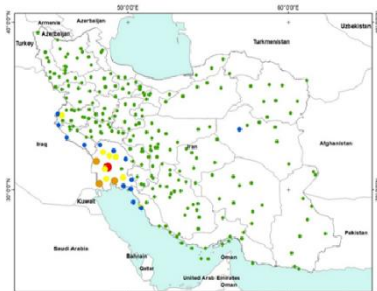
(ب)



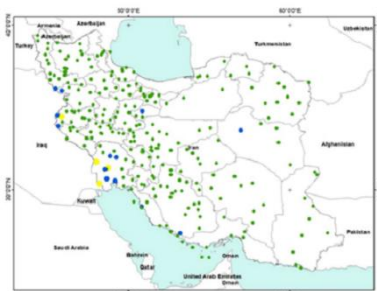
(ف)

راهنما

- < 25
- 25 - 50
- 50 - 75
- 75 - 100
- 100 - 150
- > 150



(د)



(ج)

شکل ۵ بسامد رخداد پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی در سطح کشور با دید افقی کمتر از ۵۰۰۰ متر در فصل الف (بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان (۲۰۰۹-۲۰۱۸)

شکل ۷ الف مشخص است، تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر به ویژه در سواحل مکران پاکستان به بیش از ۱۵۰ روز می‌رسد. در فصل تابستان (شکل ۶ ب) الگوی مشابه فصل بهار و البته با شدت بیشتر، بر تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر، حاکم است که ناشی از افزایش تندی باد و فعال شدن کانون‌های گردوخاک در مناطق مختلف در این فصل است؛ به طوری که در مقایسه با فصل بهار، مناطق بیشتری از غرب، جنوب غرب، جنوب شرق، شرق و مرکز کشور گزارش تعداد روزهای بیش از ۷۰ روز و در محدوده زابل و حوضه زهکشی هندوکش در افغانستان بیش از ۱۵۰ روز کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر دارند. این در حالی است که الگوی پراکنش تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در فصل تابستان مشابه محدوده دید کمتر از ۸۰۰ متر است (شکل ۷ ب) با این تفاوت که تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در سواحل مکران و هامون مشکل پاکستان به بیش از ۱۵۰ روز می‌رسد که این موضوع به خوبی نمایان است. در فصل پاییز تعداد روزهای گردوخاکی با دید کمتر از ۸۰۰ متر بین ۵۰ تا ۶۰ روز در بخش‌هایی از زابل و جنوب غرب کشور، منطقه بین‌النهرین و حوضه رودخانه فصلی اردن و شمال شرق عربستان گزارش شده‌اند (شکل ۶ ج) که با توجه به کاهش قابل توجه تندی باد در مقایسه با فصول بهار و به ویژه تابستان به شدت کاهش می‌یابد شایان ذکر است در فصل پاییز تعداد روزهای

ج) بررسی دید افقی در مناطق غبارناک داخلی با منشاء غیر محلی

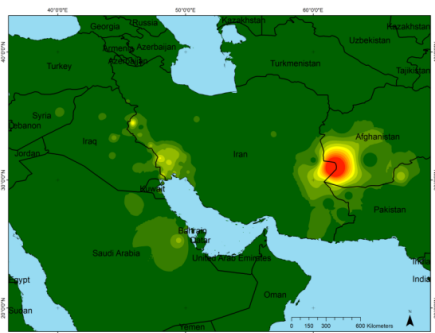
کاهش دید افقی ناشی از رخداد گردوخاک به صورت ماهانه، فصلی و سالانه برای محدوده کمتر از ۸۰۰ متر و بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در این بخش بررسی شده است. به طور کلی بیشترین کاهش دید در ماه مه در نواحی شرقی عربستان در نزدیک سواحل خلیج فارس، مناطق جنوبی کویت، همچنین در بخشی از شمال عربستان در مرز عراق و نیز نواحی مرکزی عراق و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه در نواحی شرقی عراق، غرب و جنوب غربی ایران و نیز در بخشی از شمال پاکستان در مرز افغانستان بین ۱۰ تا ۲۰ روز گردوخاکی در محدوده دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر گزارش شده است (شکل‌ها در مقاله نیامده است). بر اساس گزارش تعداد روزهای گردوخاک به همراه کاهش دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر طی فصل بهار ۱۳۹۷-۱۳۸۸ (۲۰۱۸-۲۰۰۹ میلادی) در نیمه جنوبی کشور، بخش‌هایی از غرب، جنوب غرب و جنوب شرق کشور و نیز بخش‌های از شرق سوریه، حوضه رودخانه فصلی اردن، بین‌النهرین، نواحی مرکزی و شرقی و بیابان ربع الخالی عربستان، حوضه زهکشی هندوکش در افغانستان، بخش‌هایی از شمال و سواحل مکران پاکستان به بیش از ۷۰ روز در سال می‌رسد (شکل ۶ الف). این در حالی است که به صورت قابل ملاحظه‌ای بر وسعت نواحی مزبور در محدوده دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر افزوده می‌شود. همان‌گونه که در

مکران بین ۶۰-۵۰ روز گردوخاکی در محدوده دید افقی ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر گزارش شده است (شکل‌ها در مقاله نیامده است).

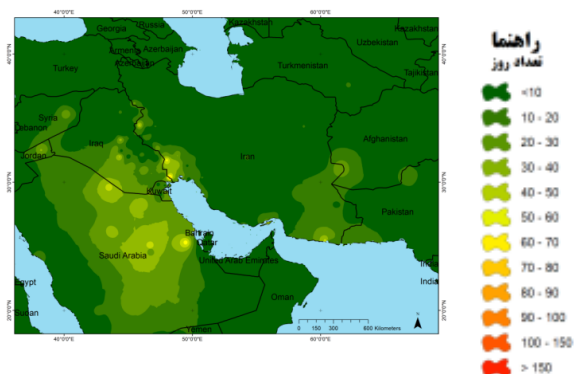
نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی الگوی مکانی و زمانی رخداد پدیده گردوخاک در کشور پرداخته شده است. به این منظور شاخص توفان گردوخاک، دید افقی به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه تحلیل شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که شاخص DSI روشی مناسب برای پایش فرسایش بادی در مقیاس وسیع با استفاده از سوابق هواشناسی است که نمایه‌ای از فراوانی و شدت توفان گردوخاک در منطقه را محاسبه می‌کند. این شاخص ترکیبی از سه نمایه روزهای توفانی با گردوخاک محلی، روزهای توفانی با گردوخاک متوسط و روزهای توفانی با گردوخاک شدید است که بر مبنای تعداد دفعات ثبت کدهای پدیده گردوخاک در ایستگاه‌های هم‌دید محاسبه می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تغییرات شاخص DSI از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۵ در کل محدوده مورد مطالعه با گذشت زمان افزایش پیدا کرده است؛ اما از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ این روند کاهشی بوده است.

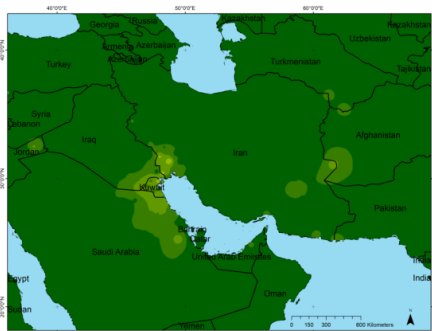
گردوخاک، همراه با توفان ماسه و یا گردوخاک معلق در هوا که منجر به کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر شده اند، در نواحی یادشده و در مقایسه با محدوده دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر به‌ویژه در سواحل مکران پاکستان افزایش می‌یابد (شکل ۷ ج). در فصل زمستان با توجه به شکل‌گیری سامانه‌های جبهه‌ای منجر به شکل‌گیری گردوخاک در نواحی جنوب غرب کشور، بیابان ربع الخالی عربستان، بین‌النهرین و نواحی حاشیه‌ای رودخانه فصلی اردن، تعداد روزهای دارای کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر طی زمستان ۱۳۹۷-۱۳۸۸ (۲۰۱۸-۲۰۰۹ میلادی) به حدود ۳۰ تا ۴۰ روز گزارش شده است (شکل ۶ د). این در حالی است که با توجه به شکل ۷ د، فراوانی تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در فصل زمستان علاوه بر مناطق مزبور در بخش‌هایی از حوضه زهکشی هندوکش در افغانستان و حدود ۳۰ روز و در سواحل مکران پاکستان در محدوده ۵۰ تا ۶۰ روز گزارش شده است. همچنین بررسی سالانه کاهش دید افقی ناشی از رخداد گردوخاک نشان داد که بیشترین کاهش دید در سال ۱۳۹۸ ثبت شده است به‌طوری‌که در نواحی شمالی عربستان در مرز عراق و نیز بخش‌های کوچکی از نواحی مرکزی و شرقی عراق در مرز ایران و جنوب غربی ایران بین ۱۰ تا ۲۰ روز و در جنوب غربی پاکستان در سواحل



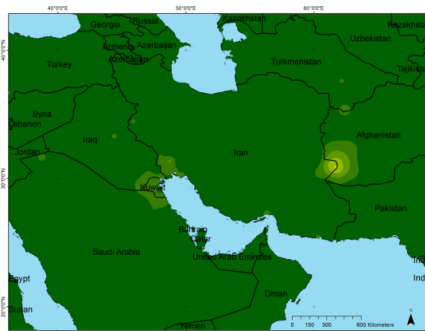
(ب)



(الف)

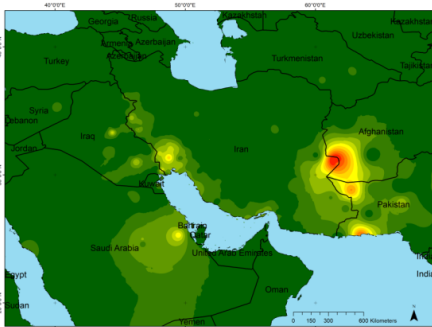


(د)

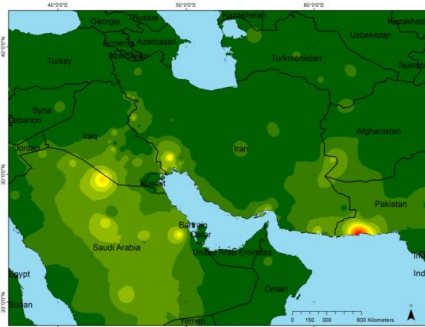


(ج)

شکل ۶ میانگین تعداد روزهای گزارش شده پدیده گردوخاک، همراه با توفان ماسه و یا گردوخاک معلق در هوا در محدوده مورد مطالعه با دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر در فصل الف (بهار، ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان ۱۳۸۸-۱۳۹۷ (۲۰۰۹-۲۰۱۸ میلادی)



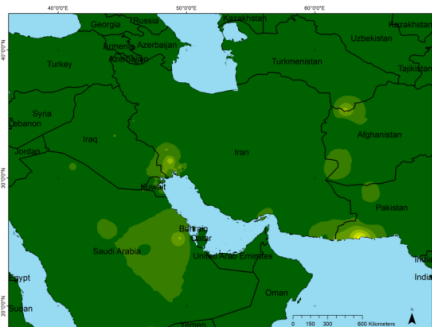
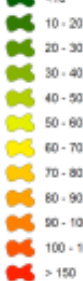
(ب)



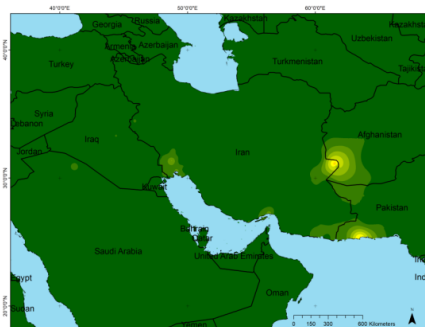
(الف)

راهنما

تعداد روز



(د)



(ج)

شکل ۷ میانگین تعداد روزهای گزارش شده پدیده گردوخاک، همراه با توفان ماسه و یا گردوخاک معلق در هوا در محدوده مورد مطالعه با دید افقی بین ۸۰۰ و ۱۵۰۰ متر در فصل الف (بهار، ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان ۱۳۸۸-۱۳۹۷ (۲۰۰۹-۲۰۱۸ میلادی)

را در منطقه به دنبال دارد. بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که شاخص DSI در بیشتر کشورهای واقع در

شاخص DSI با در نظر گرفتن هر دو مورد گردوخاک‌های محلی و منشاءهای فرامرزی نمایه‌های جامع از روند تغییرات

غربی ایران و شرق عربستان منجر به کاهش دید افقی به ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر شده است.

منابع

1. Alizadeh-Choobari, O, A Sturman, P Zavar-Reza, 2015: Global distribution of mineral dust and its impact on radiative fluxes as simulated by WRF-Chem. *Meteorology and Atmospheric Physics* 127 (6), 635-648.
2. Borunda, A., 2020: Saharan dust is bad for health. But it's also crucial to Earth's biology and climate. *Natinal geography, Science*.
3. Cakmur RV, Miller RL, Perlwitz J, Geogdzhayev IV, Ginoux P, Koch D, Kohfeld KE, Tegen I, Zender CS, 2006: Constraining the magnitude of the global dust cycle by minimizing the difference between a model and observations. *J Geophys Res* 111, D06207. doi:10.1029/2005JD005791.
4. Hong, S. Y. AND Noh Y., 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly weather review*, 134, 2318-2341.
5. Karami, S, A Ranjbar, A.R. Mohebalhojeh, M Moradi, 2017: A rare case of haboob in Tehran: Observational and numerical study. *Atmospheric Research*, DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.10.010.
6. Kaskaoutis, D. G., A., Rashki, E. E., Houssos, A., Mofidi, D., Goto, A., Bartzokas, P., Francois, and M., Legrand, 2014: Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. *Clim. Dyn.*, 45, 407-424.
7. Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, Léon JF, Mahowald NM, 2008: Modeling mineral dust emissions from the Sahara Desert using new surface properties and soil database. *J Geophys Res* 113, D14218. doi:10.1029/2007JD009484.
8. Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, Mei F, 2006: Modeling mineral dust emissions from Chinese and Mongolian deserts. *Glob Planet Change* 52:121-141.
9. McTainsh, G.H., Lynch, A.W. and Burgess, R.C., 1990: Wind erosion in eastern Australia. *Soil Research*, 28(2), pp.323-339.
10. Middleton, N., Tozer, P. and Tozer, B., 2019: Sand and dust storms: underrated

محدوده مورد مطالعه به شدت به توفان‌های گردوخاک محلی وابسته است و توفان‌های گردوخاک متوسط و یا فرامرزی تأثیر کمتری بر روی این کشورها دارند.

بر اساس گزارش فراوانی پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی و دید کمتر از ۵۰۰۰ متر در فصل بهار مشخص شد که مناطق غرب و جنوب غرب کشور بیشتر از بقیه مناطق تحت تأثیر پدیده گردوخاک با منشاء غیر محلی بوده و در فصل تابستان الگوی مشابه فصل بهار برای تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید مذکور در شمال، جنوب و جنوب شرق، شرق و شمال شرق و مرکز کشور حاکم است؛ این در حالی است که تعداد روزهای گردوخاکی در نیمه غربی و جنوب غرب کشور در فصل تابستان نسبت به فصل بهار است. در فصل پاییز بسامد روزهای گردوخاکی بادید کمتر از ۵۰۰۰ متر در تمام مناطق کشور نسبت به فصل بهار و تابستان به شدت کاهش پیدا کرده است. روند فراوانی پدیده‌های مرتبط با گردوخاک در فصل زمستان از رژیم دیده‌شده در فصل پاییز و تقریباً با همان شدت در مناطق شرق و شمال شرق، جنوب و جنوب شرق، شمال غرب و مرکز تبعیت می‌نماید.

در این مقاله بررسی میانگین ماهانه، فصلی و سالانه دید افقی نشان داد که در نواحی مرکزی و شرقی عربستان و جنوب غربی ایران بیش از ۶۰ روز همراه با گردوخاک منجر به کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر ثبت شده است، علاوه بر این مناطق در سواحل مکران در جنوب پاکستان و نیز در منطقه سیستان بیشترین تعداد روزهای گردوخاکی همراه با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر گزارش شده است. همچنین مشاهده شد در فصل تابستان با آغاز وزش بادهای ۱۲۰ روزه در ناحیه سیستان، بیش از ۱۰۰ روز گردوخاکی با کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر ثبت شده است. همچنین در این فصل علاوه بر منطقه سیستان رخدادهای گردوخاک در سواحل مکران، جنوب

- transport over a midlatitude desert area. *J. of Geophysical Research*, 111, D111203.
21. Zhang, Y.-C., W.B. Rossow, and P.W. Stackhouse, Jr., 2006: Comparison of different global information sources used in surface radiative flux calculation: Radiative properties of the near-surface atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 111, D13106, doi: 10.1029/2005JD006873.
 22. Shoaee, Z., A. Norowzi, 1397: Statistical study of dust events in Ilam province during the period of 2000-2000. 2nd international conference on Dust, Ilam.
 23. Sehatkashani, S., A.A. Bidokhti, A. Ranjbar, 1385: Numerical study of wind field in Lut valley using numerical simulation in warm and cold seasons. A thesis for Master degree, Department of Meteorology, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Science and Research Branch.
 24. Mashayekhi, R., P. Irannezhad, A.A. Bidokhti, 1389: The simulation of aerosols and its radiative forcing using the new coupled system of aerosol HAM model with the weather research and forecasting (WRF) model. *J. of the earth and space physics*, 36 (2), 91-107.
 - natural hazards. *Disasters*, 43(2), pp.390-409.
 11. Miller, R.L., I. Tegen, and J.P. Perlwitz, 2004: Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *J. Geophys. Res.*, 109, D04203, doi: 10.1029/2003JD004085.
 12. Miller, S. D., 2003: A consolidated technique for enhancing desert dust storms with MODIS. *Atmospheric Science*, VOL. 30, NO. 20, 2071, doi: 10.1029/2003GL018279.
 13. Miri, A., H. Ahmadi, A. Ghanbari, A. R. Moghaddamnia, 2007: Dust Storms Impacts on Air Pollution and Public Health under Hot and Dry Climate. *International Journal of energy and environmental engineering*, 1 (2), 101- 105.
 14. Rémy, S., A. Benedetti, A. Bozzo, T. Haiden, L. Jones, M. Razinger, J. Flemming, R. J. Engelen, V. H. Peuch, and J. N. Thepaut, 2015: Feedbacks of dust and boundary layer meteorology during a dust storm in the eastern Mediterranean. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 12909–12933.
 15. Salvador, P., S. Alonso-Pérez, J. Pey, B. Artíñano, J. J. de Bustos, A. Alastuey, and X. Querol, 2014: African dust outbreaks over the western Mediterranean Basin: 11-year characterization of atmospheric circulation patterns and dust source areas. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 6759–6775, 2014.
 16. Schlesinger, P., Y. Mamane, and I. Grishkan. 2006: Transport of microorganisms to Israel during Saharan dust events. *Aerobiologia* 22:259-273.
 17. SehatKashani, S., M. Salehi Barough, A.A. Bidokhti, A.Ranjbar, 2009: The Numerical Study of Low Level Jets Formation in South Eastern of Iran. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 4(10) 2010.
 18. Sehatkashani, S., M.Vazifedoust, Gh. Kamali, A.A. Bidokhti, 2016: Dust detection and AOT estimation using combined VIR and TIR satellite images in urban areas of Iran. *Sci. Iran. A* 23 (5), 1984–1993 2016.
 19. Spyrou, C., Kallos, G., Mitsakou, C., Athanasiadis, P., Kalogeri, C., and Iacono, M. J., 2013: Modeling the radiative effects of desert dust on weather and regional climate. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5489–5504, doi: 10.5194/acp-13-5489-2013.
 20. Takemi, T., M., Yasuni, J., Zhou, and L., Liu, 2006: Role of boundary layer and cumulus convection on dust emission and