

بررسی عوامل هواشناختی مؤثر بر تابآوری در مقابله با گردوخاک در منطقه خاورمیانه

ساویز صحت کاشانی^{۱*}، مهدی رهنما^۲، سارا کرمی^۳، عباس رنجبر^۴، سحر تاج‌بخش^۵

۱، ۲، ۳ و ۵- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی، تهران، ایران

۴- دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی، تهران، ایران

چکیده:

گردوخاک به عنوان یکی از آلاینده‌های طبیعی و متأثر از عوامل اقلیمی، طی مهر و موم‌های اخیر چالشی زیست‌محیطی در منطقه خاورمیانه می‌باشد که هزینه‌های سنگین ناشی از آن در حوزه‌های اجتماعی، اقتصادی و سلامت، به عنوان تهدیدی جدی در روند توسعه پایدار کشورها در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۹ با تعیین بسامد، مدت، شدت و تغییرات زمانی و مکانی رویدادهای گردوخاک با استفاده از شاخص توفان گردوخاک، دید افقی، عمق نوری هواویزها به همراه تعیین عوامل اقلیمی مؤثر بر پدیده گردوخاک با استفاده از شاخص وضعیت پوشش گیاهی در منطقه خاورمیانه شناخت بهتری از چشمه‌های گردوخاک به صورت ماهانه، فصلی و سالانه حاصل شده است که می‌تواند زمینه‌سازی برای آمادگی و تابآوری در برابر آن شده و در برنامه‌های عمل ملی و منطقه‌ای مقابله با پدیده گردوخاک به عنوان یکی از مخاطرات محیطی متأثر از رخدادهای فرین اقلیمی به کار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: شاخص توفان گردوخاک، تابآوری، خاورمیانه، دید افقی، عمق نوری هواویزها، شاخص وضعیت پوشش گیاهی

مقدمه

خاورمیانه دارای ترکیب پیچیده‌ای از چشمه‌های گردوخاک با منشأ طبیعی و بیابانی است (Ginoux et al., 2012). منطقه بین‌النهرین که با متوسط عمق نوری هواویزها بیش از ۰,۲ در بیش از ۲۰ درصد منطقه، به‌عنوان یکی از چشمه‌های شاخص گردوخاک از دهه ۱۹۸۰ شناخته شده است (Middleton, 1989). عوامل انسانی هم چون احداث سدهای عظیم بر روی رودهای منتهی به حوضه‌ی آبریز بین‌النهرین توسط کشورهای منطقه از دیگر عوامل تأثیرگذار بر این واقعه است (UNEP, 2010).

گردوخاک بر سامانه اقلیمی با تغییر شدت توفان‌های حاره‌ای و چرخندها (Evan et al, 2006) و تغییر در تعادل تابشی زمین از طریق تشدید خشکسالی تأثیرگذار است (Han et al., 2008; Highwood et al., 2014).

گردوخاک به صور مختلف، جنبه‌های سلامت و اقتصاد یک جامعه را مورد تهدید قرار می‌دهد. گردوخاک هواپرد در ایجاد و تشدید مشکلات در حوزه سلامت نقش دارد (WHO, 2013). قرارگرفتن در معرض ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر و ۲/۵ میکرومتر، منجر به مرگ زودهنگام ناشی از بیماری‌های قلبی- عروقی، مجاری تنفسی و سرطان ریه می‌شود. تنفس ذرات ریز گردوخاک، نه تنها افراد را در معرض خطر ناشی از ذرات معلق معدنی با منشأ بیابانی قرار می‌دهد، بلکه خطر ابتلا به بیماری‌های ناشی از همراهی این ذرات با ترکیبی از آلاینده‌ها، هاگ‌ها، قارچ‌ها و آلرژی‌زاهای بالقوه را بالا می‌برد (Kellogg et al., 2004; Smith et al., 2011).

گردوخاک بر جنبه‌های مختلف اقتصاد همچون حمل‌ونقل تأثیرگذار است. گردوخاک تأثیر مستقیم بر میزان دید افقی دارد، امری که ایمنی پروازها را مختل نموده و در نتیجه سبب لغو و یا دست‌کم تأخیر در پروازها می‌شود. زیان حاصل از لغو پروازها به دلیل کاهش دید افقی ناشی از پدیده گردوخاک در ایران، بیش از ۴ میلیون دلار در سال برآورد می‌شود (اکبری و تاجر، ۲۰۱۲). بررسی‌های صورت گرفته طی مهر و موم‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ در خصوص زیان اقتصادی ناشی از گردوخاک در ۱۱ استان کشور، حداقل

معادل ۴,۴ میلیارد دلار تخمین زده شده است (خالدی و حقیقت نژاد، ۲۰۱۵).

علاوه بر مسائل اقتصادی و سلامت، گردوخاک دارای پیامدهای اجتماعی نیز می‌باشد. گردوخاک مهاجرت ساکنان مناطق تحت تأثیر را در پی دارد، امری که سبب ایجاد و تشدید بحران‌های اجتماعی می‌شود. در این زمینه می‌توان به سیل مهاجرت از استان خوزستان به دلیل فراوانی رخداد گردوخاک اشاره کرد (www.MehrNews). از این رو بررسی نحوه و میزان تأثیر گردوخاک بر هریک از این حوزه‌ها به‌منظور کاهش آسیب‌ها و زیان‌های ناشی از این پدیده ضروری است.

شناخت کافی از منشأ شکل‌گیری، زمان وقوع، بسامد و شدت پدیده گردوخاک با استفاده از بررسی شاخص توفان گردوخاک، عمق نوری هواویزها و دید افقی به همراه تعیین عوامل اقلیمی مؤثر بر پدیده گردوخاک با استفاده از شاخص شرایط وضعیت پوشش گیاهی در منطقه خاورمیانه می‌تواند در کاهش خسارات و تابآوری در برابر آن مؤثر باشد. نتایج این پژوهش در طراحی نقشه راه و برنامه عمل به‌منظور رفع چالش‌های کشورهای متأثر از گردوخاک در منطقه و بهبود سیاست‌های هماهنگ‌کننده در سطح منطقه‌ای و همچنین ارائه راهکارهایی در چارچوب سیاست‌های توسعه پایدار یاری‌رسان است.

داده‌ها و روش کار

شاخص توفان گردوخاک

به‌منظور مطالعه بسامد و شدت پدیده گردوخاک در خاورمیانه شاخص توفان‌های گردوخاک (DSI)^۲ محاسبه شد. معادله DSI از دهه ۹۰ میلادی برای تعیین شدت و فرکانس توفان گردوخاک به کار گرفته شده است. شاخص DSI روشی مناسب برای پایش فرسایش بادی در مقیاس وسیع با استفاده از گزارش‌های هواشناسی است؛ که نمایه‌ای از بسامد و شدت توفان گردوخاک در منطقه را محاسبه می‌کند. این شاخص ترکیبی از سه نمایه روزهای توفانی با گردوخاک محلی (LDE)^۳، روزهای توفانی با گردوخاک

^۲ Dust Storm Index

^۳ Local Dust Events

کشورهای واقع در خاورمیانه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به توفان‌های گردوخاک محلی (شاخص LDE) وابسته است و توفان‌های گردوخاک متوسط و یا فرامرزی تأثیری کمتر بر روی این کشورها دارند.

عمق نوری هواویزها در محدوده ۵۵۰

نانومتر

به‌منظور تحلیل ضخامت نوری هواویزها در کشور، سنجنده MODIS^۶ به کار گرفته شده است. با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه سنجش‌ازدور، اندازه‌گیری آلاینده‌ها در شرایط طبیعی و در مقیاس طبیعی امکان‌پذیر است. در این زمینه کاهش قابل‌توجه در هزینه‌ها و نیروی انسانی در مقایسه با روش‌های زمینی حائز اهمیت است. ضخامت نوری هواویزها در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر سنجنده MODIS به‌عنوان یک پارامتر بی‌بعد، مستقیماً با غلظت ذرات معلق هوا ارتباط دارد و به‌عنوان معیاری مهم برای تشخیص هواویزهای موجود در جو در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش از محصولات سنجنده MODIS-Terra، (MOD08-M3v6) با تفکیک مکانی ۱ درجه و به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه استفاده شده است. عمق نوری یا ضخامت نوری هواویزها، پارامتری بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد و بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از هواویزها در مسیر عبور نور است (WMO, 2013). مقادیر بالای ضخامت نوری مبین انباشت بالای هواویزها در ستون جو و در نتیجه دید افقی کمتر است (Levy et al., 2010). محصول ضخامت نوری هواویزهای سنجنده MODIS از ترکیب دو الگوریتم آبی عمیق^۷ و هدف تیره^۸ و به ترتیب برای سطوح روشن و اراضی کشاورز (Shi et al., 2013) با هدف بررسی توزیع مکانی و تغییرات فصلی مقادیر عمق نوری هواویزها در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر در منطقه مورد مطالعه تولید می‌شود. الگوریتم هدف تیره به بازیابی داده‌های ضخامت نوری هواویزها بر روی اراضی کشاورزی تحت شرایط هوای

متوسط (MDS^۴) و روزهای توفانی با گردوخاک شدید (SDS^۵) است که بر مبنای تعداد دفعات ثبت کدهای هوای حاضر مرتبط با پدیده گردوخاک در ایستگاه‌های همدیدی محاسبه می‌شوند (McTanish and Tews, 2007). مقادیر سه نمایه بالا بر اساس کدهای گزارش‌شده از محل ایستگاه‌های همدیدی منتخب منطقه خاورمیانه بر اساس تعاریف زیر استخراج و محاسبه شد:

SDS: روزهای توفانی با گردوخاک شدید، مجموع مشاهدات کدهای گردوخاک ۳۳-۳۵
MDS: روزهای توفانی با گردوخاک متوسط، مجموع مشاهدات کدهای گردوخاک ۳۲ و ۹۸
LDE: روزهای با گردوخاک محلی، مجموع مشاهدات کدهای گردوخاک ۰۷ و ۰۹

در نهایت 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 همدیدی منتخب است که در آن‌ها رویداد گردوخاک در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۸ گزارش شده است. در این مطالعه مقدار شاخص DSI برای ایستگاه‌های مختلف در دوره زمانی مورد مطالعه به‌صورت ماهانه و سالانه محاسبه شد و در نهایت کل مقدار شاخص برای خاورمیانه نیز از مجموع شاخص‌های برآورد شده به‌صورت سالانه محاسبه شد. شکل ۱ الف میانگین شاخص DSI سالانه بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های همدیدی در دوره ۲۰۱۸ - ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد. نتایج مبین این موضوع است که تغییرات شاخص DSI در دوره ۱۰ ساله به‌طور کلی به دو بخش قابل تقسیم بندی است. از سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۵ روند تغییرات گردوخاک در منطقه خاورمیانه 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 نمایه‌ای جامع از روند تغییرات را در منطقه دربردارد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که شاخص DSI در بیشتر

^۶ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

^۷ deep blue

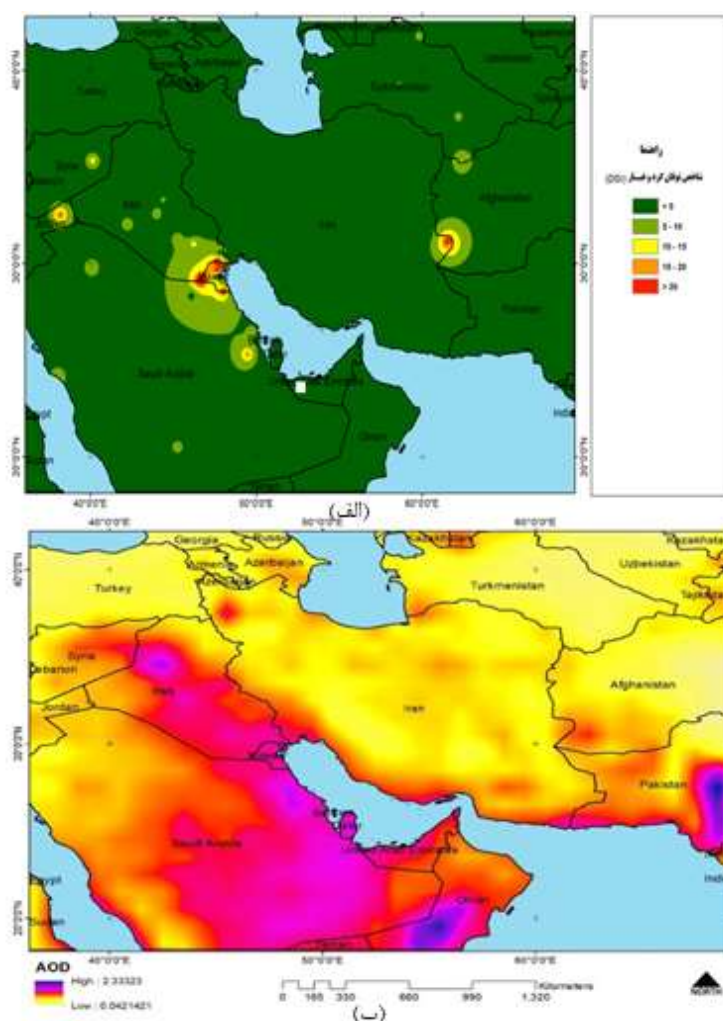
^۸ dark target

^۴ Moderate Dust Storms

^۵ Severe Dust Storms

تا ۲۰۱۸ را در منطقه نشان می‌دهند. تغییرات این پارامتر در فصول مختلف سال متأثر از الگوهای همدیدی، خرد و میان‌مقیاس مؤثر بر شکل‌گیری و فعال‌سازی کانون‌های گردوغبار در منطقه است. در ماه‌های سرد سال بیشینه مقادیر عمق نوری هواویزها در محدوده ۵۵۰ نانومتر با الگوی گردوغبار جبهه‌ای به‌ویژه در مناطق جنوب غرب و غرب کشور، بین‌النهرین، شرق سوریه و بیابان ربع الخالی عربستان همخوانی دارد.

صاف که در آن بازتاب سطحی در کانال‌های مرئی (۰/۴۷ و ۰/۶۵ میکرومتر) و فروسرخ نزدیک (۲/۱ میکرومتر) دارای مقادیر کمی است، می‌پردازد (Levy et al., 2010) این در حالی است که الگوریتم آبی عمیق (DB) داده‌های ضخامت نوری هواویزها بر روی سطوح روشن با در نظر گرفتن خواص سطوح تیره در کانال‌های آبی (۰/۴۱۲ و ۰/۴۷ میکرومتر) و جذب ضعیف گردوغبار در طول موج قرمز را بازیابی می‌کند (Hsu et al., 2004). میانگین مقادیر عمق نوری هواویزها در محدوده ۵۵۰ نانومتر طی سال‌های ۲۰۰۹



شکل ۱- میانگین شاخص DSI سالانه براساس اطلاعات ایستگاه‌های همدیدی (الف) و میانگین عمق نوری هواویزها در محدوده ۵۵۰ نانومتر (ب) در خاورمیانه در دوره ۲۰۱۸ - ۲۰۰۹

تعیین بسامد فصلی رخدادهای گردوخاک تأثیرگذار بر کشور در ۱۰ سال گذشته (۲۰۰۹-۲۰۱۸) مؤثر بر غرب و جنوب غرب، جنوب، جنوب شرق و شرق، شمال شرق و شمال غرب کشور

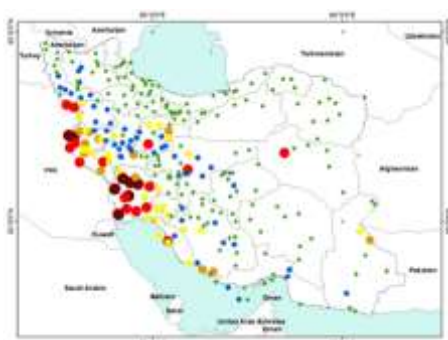
بر اساس داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های هواشناسی با گام زمانی ۳ ساعته بسامد رخداد پدیده گردوخاک در ۳۰۴ ایستگاه کشور طی مهر و موم‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ به دست آمد و بر اساس نقشه‌های ترسیم‌شده در مقیاس فصلی و سالانه و همچنین به تفکیک مناطق غرب و جنوب غرب، جنوب، جنوب شرق، شرق، شمال شرق، شمال غرب و مرکز کشور مورد تحلیل قرار گرفته است. شکل ۲ (الف تا د) بسامد رخداد گردوخاک با منشأ غیر محلی را طی فصول مختلف سال نشان می‌دهد. بر اساس گزارش فراوانی پدیده گردوخاک با منشأ 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 منشأ غیر محلی بوده؛ به‌طوری‌که فراوانی پدیده گردوخاک با منشأ غیر محلی و دید کمتر از ۵۰۰۰ متر در ایستگاه‌های کشاورزی اهواز، شادگان، بندر ماهشهر، امیدیه (آغا جاری)، شوشتر، مسجد سلیمان و ایذه، درود، قصر شیرین، بانه، سردشت و طبرستان بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ روز و در ایستگاه‌های آبان، بستان، اهواز و سرپل ذهاب بیش از ۱۵۰ روز است. سایر مناطق شامل نیمه شمال، شمال شرق، شرق (به استثناء طبرستان)، جنوب شرق، بخش‌هایی از مرکز و شمال غرب کشور فراوانی رخداد گردوخاک با منشأ غیر محلی کمتر از ۵۰ روز در فصل بهار است (شکل ۲. الف). در فصل تابستان الگوی مشابه فصل بهار بر تعداد روزهای گردوخاک 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 گردوخاک در نیمه غربی و جنوب غرب کشور در فصل تابستان نسبت به فصل بهار افزایش یافته؛ به‌طوری‌که در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، بستان، شوشتر، مسجد سلیمان، صفی‌آباد، قصر شیرین و

سرپل ذهاب به بیش از ۱۵۰ روز رسیده است که این موضوع در شکل (شکل ۲. ب) به‌خوبی نمایان است. در فصل پاییز بسامد روزهای گردوخاک با دید کمتر از ۵۰۰۰ متر در تمام مناطق کشور نسبت به فصل بهار و تابستان به‌شدت کاهش پیدا کرده است. با وجود روند رو به کاهش این پدیده در فصل پاییز، همچنان مناطق غرب و جنوب غرب کشور بیشتر تحت تأثیر گردوخاک با منشأ غیر محلی بوده؛ به‌طوری‌که تعداد روزهای گردوخاک با کاهش دید کمتر از ۵۰۰۰ متر 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 استثنای بخش‌های کوچکی از نیمه غربی، در سایر مناطق کشور تعداد روزهای گردوخاک با محدوده دید ذکر شده به کمتر از ۲۵ روز رسیده است (شکل ۲. ج). 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. تعداد روزهای گردوخاک با منشأ غیر محلی در مناطق ذکر شده 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 گردوخاک 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 (شکل ۲. د). بررسی بسامد رخداد گردوخاک در طی مهر و موم‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ میلادی نشان می‌دهد بیشترین و کمترین فراوانی رخداد گردوخاک با منشأ غیر محلی به ترتیب در مهر و موم‌های 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 مهر و موم‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با شدت بیشتری تحت تأثیر پدیده گردوخاک با منشأ غیر محلی بوده‌اند.

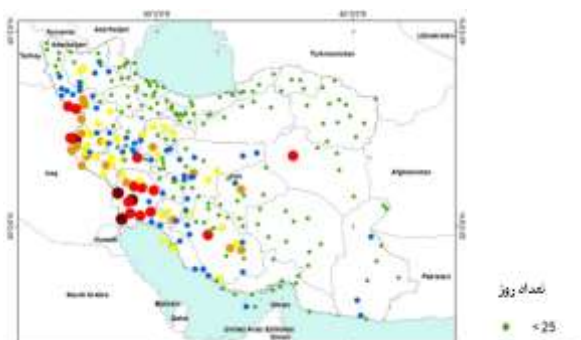
دید افقی

نواحی مزبور در محدوده دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر افزوده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۴ الف مشخص است، تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر به‌ویژه در سواحل مکران پاکستان به بیش از ۱۵۰ روز می‌رسد.

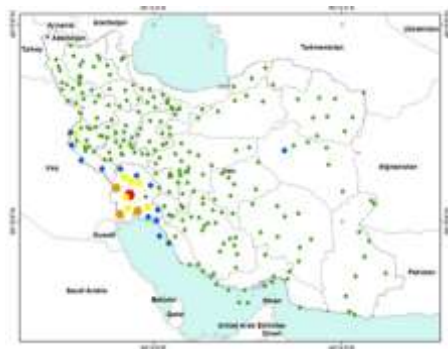
بر اساس شکل ۳ الف گزارش تعداد روزهای گردوخاک به همراه کاهش دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر طی بهار ۲۰۱۸-۲۰۰۹ میلادی در نیمه جنوبی کشور، بخش‌هایی از غرب، جنوب غرب و جنوب شرق کشور و نیز بخش‌های از شرق سوریه، حوزه رودخانه فصلی اردن، بین‌النهرین، نواحی مرکزی و شرقی و بیابان ربع الخالی عربستان، حوضه زهکشی هندوکش در افغانستان، بخش‌هایی از شمال و سواحل مکران پاکستان به بیش از ۷۰ روز در سال می‌رسد. این در حالی است که به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای بر وسعت



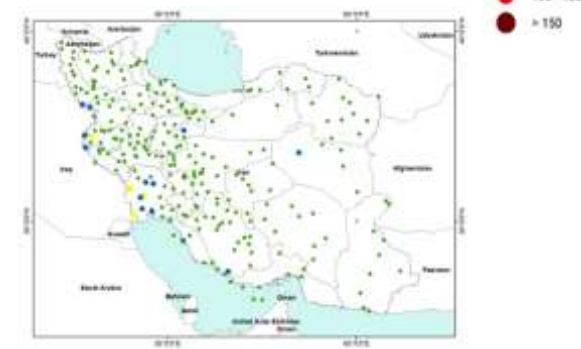
ب



الف



د



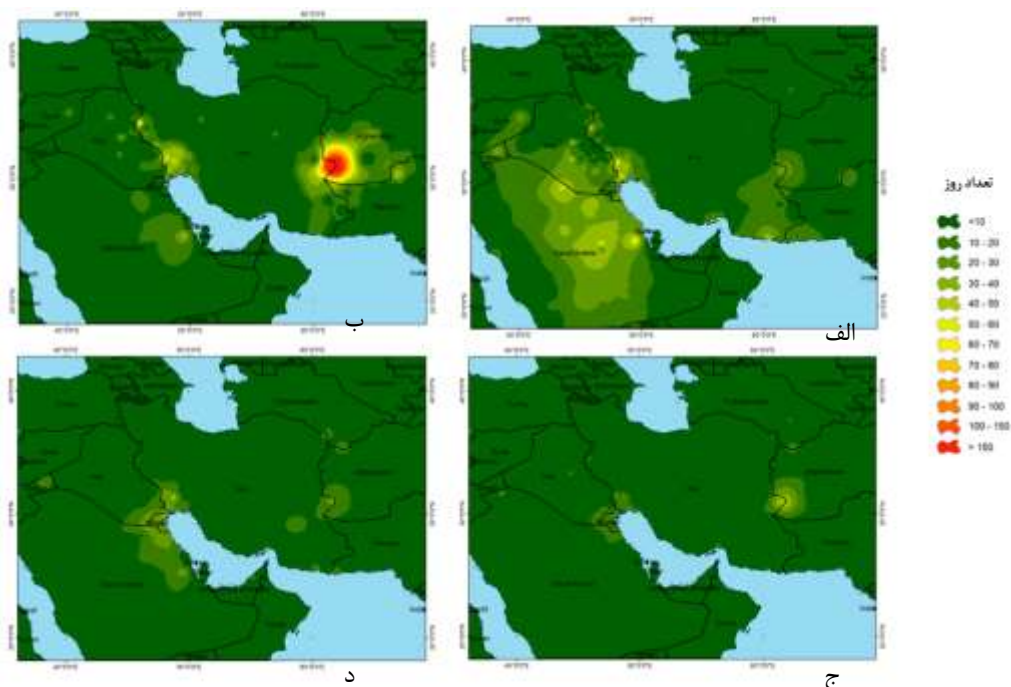
ج

شکل ۲ - بسامد رخداد پدیده گردوخاک با منشأ غیر محلی در سطح کشور با دید افقی کمتر از ۵۰۰ متر در فصل ب بهار (الف)، تابستان (ب)، پاییز (ج) و زمستان (د) ۲۰۰۹-۲۰۱۸ میلادی.

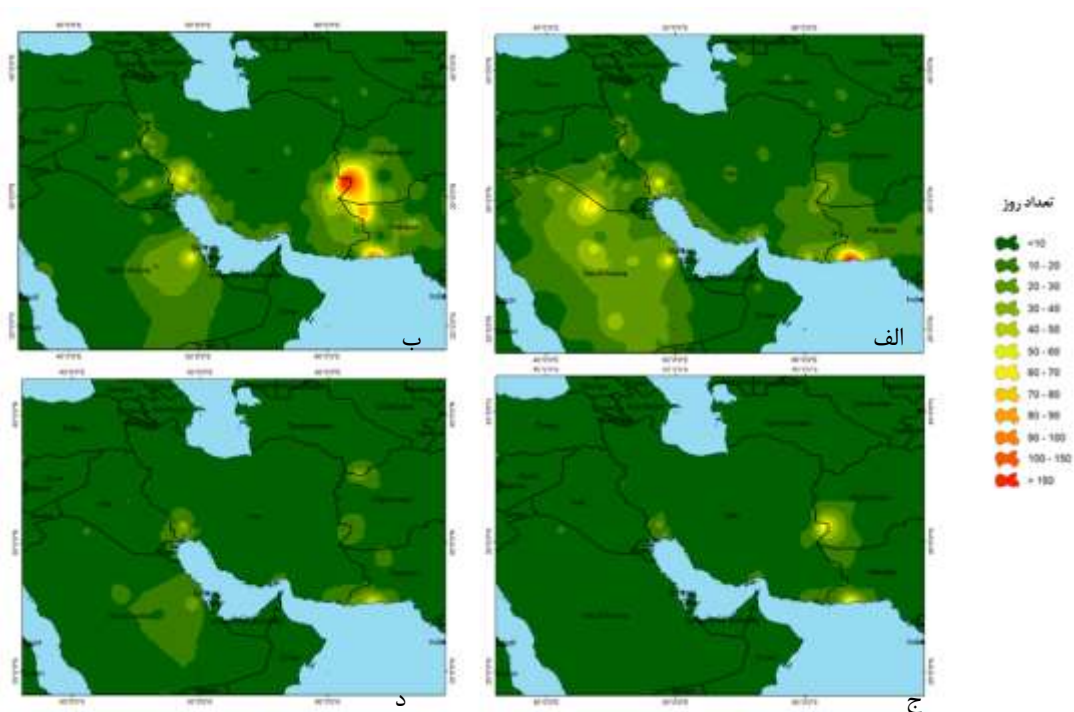
کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر دارند. این در حالی است که الگوی پراکنش تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در فصل تابستان مشابه محدوده دید کمتر از ۸۰۰ متر است با این تفاوت که تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در سواحل مکران و هامون مشکل پاکستان به بیش از ۱۵۰ روز

الگوی مشابه فصل بهار و البته با شدت بیشتر، بر تعداد روزهای گردوخاکی با کاهش دید کمتر از ۸۰۰ متر، حاکم است؛ به‌طوری‌که 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

می‌رسد که این موضوع در شکل‌های ۳.ب و ۴.ب به خوبی نمایان است.



شکل ۳- تعداد روزهای گزارش شده پدیده گردوخاک، همراه با توفان ماسه و یا گردوخاک معلق در هوا با دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر در فصل بهار (الف)، تابستان (ب)، پاییز (ج) و زمستان (د) ۲۰۱۸-۲۰۰۹ میلادی



شکل ۴- تعداد روزهای گزارش شده پدیده گردوخاک، همراه با توفان ماسه و یا گردوخاک معلق در هوا با دید افقی بین ۸۰۰ متر و ۱۵۰۰ متر در فصل بهار (الف)، تابستان (ب)، پاییز (ج) و زمستان (د) ۲۰۱۸-۲۰۰۹ میلادی

وضعیت سلامتی و سبزی‌نگی گیاه را نشان می‌دهد با پارامترهایی مانند بارش در ارتباط است. Kogan در سال ۱۸۸۱، به‌منظور برآورد اثرات آب‌وهوا بر پوشش گیاهی شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) را معرفی نمود. به این صورت که برای هر پیکسل در (هفته، دهه، ماه و یا سال) مقادیر ماکزیمم و مینیمم NDVI طولانی‌مدت را تعیین و در معادله VCI از آن استفاده نمود (رابطه ۲).

$$VCI = \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

در رابطه فوق NDVI max و NDVI min در طول دوره طولانی‌مدت (چند ماه یا چند سال) محاسبه می‌شوند و J نمایه ماه موردنظر است. به‌این‌ترتیب اگر VCI به صفر نزدیک شود نشان‌دهنده وجود یک خشکسالی شدید در آن ماه می‌باشد. مطالعات ثابت کرد شاخص VCI نسبت به شاخص NDVI، عملکرد بهتری در بررسی خشکسالی خصوصاً در مناطقی که از نظر جغرافیایی غیر همگون‌اند، ارائه می‌دهد.

شکل ۵(الف تا د) مقدار میانگین فصلی شاخص VCI را برای دوره ۲۰۰۹-۲۰۱۸ نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر شاخص در میانگین فصلی بلندمدت بهار بر روی کشورهای ترکیه، آذربایجان، روسیه، ارمنستان، گرجستان و بخش‌هایی از شمال ایران، افغانستان، پاکستان و بخش‌هایی از کشور اردن و همین‌طور ترکمنستان ملاحظه می‌شود. در مقابل نواحی شمالی عربستان (ربع الخالی) و بخش‌های عمده‌ای از عراق و سوریه کمترین مقدار شاخص را طی مهروموم‌های مختلف در فصل بهار دارا هستند (شکل ۵.الف). شکل‌ها همچنین نشان می‌دهند که غرب ایران و بخش‌هایی از شرق آن در فصل بهار نسبت به میانگین بلندمدت دیگر فصل‌ها مقادیر کمتری از شاخص VCI را دارا هستند.

در فصل تابستان تقریباً تمامی مناطق واقع در نقشه مقادیر VCI بالاتری نسبت به فصل بهار دارند که این تغییر بر روی مرکز ایران، همچنین کشورهای عربستان، سوریه و عراق چشمگیرتر است، به‌گونه‌ای که در مقایسه با فصل بهار بخش‌هایی از عربستان، عراق و سوریه تا بیش از ۴۰ واحد افزایش در مقدار شاخص VCI را نشان می‌دهند. این

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 شمال‌شرق عربستان گزارش شده‌اند، که در مقایسه با فصول بهار و به‌ویژه تابستان بشدت کاهش می‌یابد (شکل ۳.ج). شایان‌ذکر است در فصل پاییز تعداد روزهای گردوخاک، همراه با توفان ماسه و یا گردوخاک معلق در هوا که منجر به کاهش دید بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ متر شده‌اند، در نواحی یادشده و در مقایسه با محدوده دید افقی کمتر از ۸۰۰ متر به‌ویژه در سواحل مکران پاکستان افزایش می‌یابد (شکل ۴.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 ۳.د).

این در حالی است که 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 (شکل ۴.د).

تعیین میانگین فصلی شاخص وضعیت

پوشش گیاهی (VCI)^۹

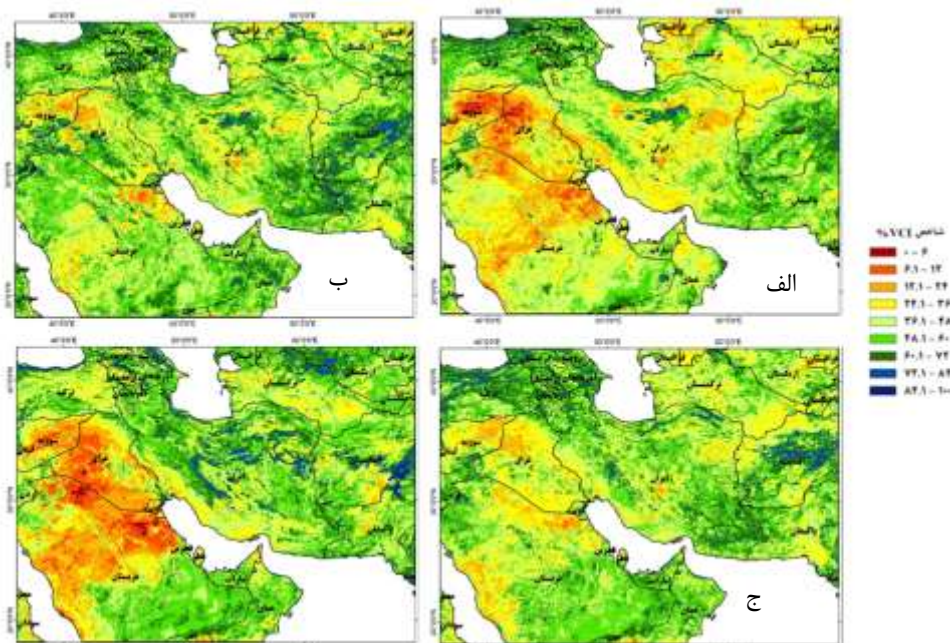
NDVI برای شناسایی تنش گیاهان و محصولات آسیب‌دیده بسیار موفق بوده است. از آنجاکه در مناطقی با پوشش زمینی ناهمگن تفاوت بین سطح و میزان پوشش گیاهی به منشأهای مختلف مانند نوع پوشش گیاهی، اقلیم، نوع خاک و نظیر آن بستگی دارد، عملکرد شاخص NDVI در مناطق ناهمگن با محدودیت‌هایی روبرو است. شاخص NDVI دارای دو مؤلفه اکولوژی و آب‌وهواست. برآورد اثرات آب‌وهوا بر پوشش گیاهی تنها پس از حذف اثرات مربوط به عوارض جغرافیایی مانند اقلیم، خاک، توپوگرافی و نظیر آن امکان‌پذیر است. مؤلفه آب و هوایی NDVI که

^۹Vegetation Condition Index

هرچند مقدار شاخص در این مناطق نسبت به فصل بهار همچنان افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد؛ اما بر روی ایران وضعیت شاخص در فصل پائیز تفاوت چندانی با فصل تابستان ندارد؛ هرچند مقایسه دو فصل پائیز و بهار نشان‌دهنده افزایش در مقدار شاخص VCI در فصل پائیز نسبت به بهار است (شکل ۵ج).

تفاوت البته بر روی بخش‌هایی از مرکز افغانستان و جنوب ترکیه نیز چشمگیر است. با این حال کشورهای واقع در شمال ایران، مانند گرجستان، ارمنستان، آذربایجان و روسیه به جز در برخی نقاط جزئی، تغییر چندانی را نسبت به فصل بهار نشان نمی‌دهند (شکل ۵ب).

در فصل پائیز کشورهای واقع در غرب و جنوب غرب خاورمیانه مانند عربستان، عراق و سوریه نسبت به فصل تابستان کاهش در مقدار شاخص VCI را نشان می‌دهند



شکل ۵- میانگین شاخص VCI در بهار (الف)، تابستان (ب)، پاییز (ج) و زمستان (د) در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸

در بخش‌هایی از غرب و جنوب غرب نیز این مقدار نسبت به دیگر فصل‌ها کاهش یافته است (شکل ۵د). جدول ۱ میانگین فصلی شاخص VCI طی سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۸ در کشورهای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر به رنگ قرمز تنش گیاهی را نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بررسی میانگین فصلی و سالانه مقادیر عمق نوری هواویزها در محدوده ۵۵۰ نانومتر طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ در منطقه خاورمیانه مبین این مطلب است که تغییرات این پارامتر در فصول مختلف سال متأثر از الگوهای همدیدی، خرد و میان‌مقیاس مؤثر بر شکل‌گیری و فعال‌سازی کانون‌های گردوخاک در منطقه است.

در فصل زمستان کشورهای همسایه شمال غربی ایران نسبت به دیگر فصل‌ها در میانگین (۲۰۰۹-۲۰۱۸) مقادیر کمتری از شاخص VCI را نشان می‌دهند. این شرایط همچنین برای کشورهای همسایه غربی و جنوب غربی ایران نیز برقرار است. با این تفاوت که در این فصل کاهش در مقدار شاخص برای این کشورها (عربستان، عراق و سوریه) قابل‌ملاحظه‌تر است. شرایط بر روی مناطق مختلف ایران در مقایسه با دیگر فصل‌ها متفاوت است. بدین معنی که در مناطقی از شمال، مرکز، شرق و غرب (مناطق مشخص‌شده با رنگ آبی بر روی نقشه) مقدار شاخص افزایش چشمگیری نسبت به دیگر فصل‌ها داشته است؛ درحالی‌که

جدول ۱- جدول میانگین فصلی شاخص VCI طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۹ در کشورهای منطقه مورد مطالعه

نام کشور	فصل بهار	فصل تابستان	فصل پاییز	فصل زمستان
اردن	52.30	58.15	54.06	28.88
ارمنستان	64.86	66.00	60.28	65.69
ازبکستان	38.15	39.47	47.46	71.30
افغانستان	63.1559	59.992	54.1452	73.2787
امارات	44.59	42.93	40.20	53.51
ایران	45.24	56.72	53.44	46.52
آذربایجان	57.00	76.58	64.33	59.80
بحرین	35.74	34.31	32.66	35.91
پاکستان	53.47	55.30	33.45	48.07
تاجیکستان	71.08	68.53	55.71	51.09
ترکمنستان	43.51	47.00	34.35	38.06
ترکیه	38.35	54.34	42.91	54.43
روسیه	54.15	58.50	73.89	62.92
سودان	38.77	36.66	31.35	30.80
سوریه	2.91	9.90	21.65	7.38
عراق	29.54	42.32	29.05	22.48
عربستان	17.28	32.42	40.22	18.85
عمان	38.49	61.78	52.81	53.16
قزاقستان	34.20	39.93	47.61	65.95
قطر	32.51	36.95	43.33	27.40
کویت	26.05	49.72	33.21	22.49
گرجستان	54.45	53.93	48.52	64.54
لبنان	33.16	59.12	45.54	60.86
مصر	26.16	40.38	43.09	26.10
هند	41.64	56.89	59.71	58.97
یمن	53.46	41.51	50.28	59.76

تدریجی مقادیر عمق نوری هواویزها به‌ویژه در مناطق غرب و جنوب غرب کشور می‌شود. از طرفی در نواحی ساحلی کشور به دلیل وجود ذرات نمک که دارای خصوصیات فیزیکی مشترک با ذرات گردوخاک هستند، منجر به افزایش مقادیر عمق نوری هواویزها در نوار ساحلی کشور در فصل گرم سال می‌گردند.

از طرفی در فصل گرم سال در مرز ایران و افغانستان شکل‌گیری گردوخاک با الگوی جت‌های ترازپایین^{۱۰} افزایش مقادیر عمق نوری هواویزها را در پی دارد. الگوی LLJ و کانالیزه شدن جریان‌ها تحت تأثیر شرایط زمین‌شناختی پیچیده^{۱۱} در نواحی جنوب‌شرق کشور از اواسط ماه مه تا اواخر ماه اوت افزایش مقادیر عمق نوری هواویزها را در این نواحی در پی خواهد داشت. در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و

در ماه‌های سرد سال بیشینه مقادیر عمق نوری هواویزها در محدوده ۵۵۰ نانومتر با الگوی گردوخاک جبهه‌ای به‌ویژه در مناطق جنوب غرب و غرب کشور، بین‌النهرین، شرق سوریه و بیابان ربع الخالی عربستان همخوانی دارد.

وزش بادهای جنوب شرقی بر فراز خلیج فارس ناشی از جبهه در مناطق جنوب غرب کشور، شرایط را برای فعال‌سازی کانون‌های داخلی موجود در جنوب‌شرق خوزستان فراهم می‌کند که این موضوع افزایش مقادیر عمق نوری هواویزها را در پی دارد. به‌تدریج و با نزدیک شدن به فصل گرم سال الگوی شکل‌گیری گردوخاک با وزش بادهای شمالی، شمال غربی و کانالیزه شدن میدان باد ناشی از واداشت زمین‌شناختی به‌ویژه در منطقه بین‌النهرین تقویت می‌شود. الگوی وزش بادهای تابستانه حاکم بر نواحی شرق سوریه، عراق و بیابان ربع الخالی عربستان منجر به افزایش

^{۱۰}Low Level Jets(LLJ)

^{۱۱}Gap wind

شدت فعالیت چشمه‌های گردوخاک با روند تغییرات شاخص وضعیت پوشش گیاهی در فصول مختلف سال قابل توجه است. بدین ترتیب، شناخت کافی از منشاء شکل‌گیری، زمان وقوع، بسامد و شدت پدیده گردوخاک با استفاده از بررسی شاخص توفان گردوخاک و دید افقی به همراه تعیین عوامل اقلیمی مؤثر بر پدیده گردوخاک با استفاده از شاخص شرایط وضعیت پوشش گیاهی در منطقه خاورمیانه می‌تواند در کاهش خسارات و تابآوری در برابر آن مؤثر باشد.

منابع

1. Ginoux, P., Prospero, J.M., Gill, T.E., Hsu, N.C. and Zhao, M., 2012: Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics* 50, 1–35.
2. Middleton, N.J., 1986a: The Geography of Dust Storms. DPhil thesis. University of Oxford, Oxford, UK.
3. United Nations Environment Programme (UNEP) 2010 annual report, 2011, www.unep.org/annualreport.
4. Evan, A.T., Dunion, J., Foley, J.A. et al., 2006: New evidence for the relationship between Atlantic tropical cyclone activity and African dust outbreaks. *Geophysical Research Letters* 33, L19813.
5. Han, Y., Dai, X., Fang, X., Chen, Y., and Kang, F., 2008: Dust aerosols: a possible accelerant for an increasingly arid climate in North China. *Journal of Arid Environments* 72, 1476–1489.
6. Highwood, E.J. and Ryder, C.L., 2014: Radiative effects of dust. In *Mineral Dust: A key Player in the Earth System* (ed. Knippertz, P. and Stuut, J.B.W.), Springer, pp.267–286.
7. WHO, 2013: Review of evidence on health aspects of air pollution; REVIHAAP Project, Technical Report; WHO Regional Office for Europe, Scherfigsvej 8, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark; 309 pp.
8. Kellogg, C.A., Griffin, D.W., Garrison, V.H., Peak, K.K., Royall, N., Smith, R.R. and Shinn, E.A., 2004: Characterization of aerosolized bacteria and fungi from desert dust events in Mali, West Africa. *Aerobiologia* 20, 99–110.
9. Smith, D.J., Griffin, D.W., McPeters, R.D., Ward, P.D. and Schuerger, A.C., 2011: نوامبر به تدریج از فعالیت و شکل‌گیری گردوخاک ناشی از کانالیزه شدن میدان باد در نواحی جنوب شرق و جنوب غرب کشور کاسته می‌شود. این در حالی است که افزایش مقادیر AOT برای حوزه دریاچه ارومیه در فصل پاییز قابل ملاحظه است.
10. Akbari, S. and Tajari, J., 2012: The Analysis of the Economic Damages of Dust Storms in Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, ۶(۱۰): ۳۹۵–۳۸۸.
11. Khaledi, K. and Haghighatnezhad, A., 2015: Studying the Effects of Dust on Iran's Economy. *Extensive Journal of Applied Sciences*, pp 125-136.
12. <https://www.mehrnews.com/news/-گردوخاک-باعث-ایجاد-سیل-مهاجرت-از-خوزستان-شده-است>
13. McTainsh, G., and K., Tews, 2007: Soil erosion by wind - Dust Storm Index (DSI): National Monitoring and Evaluation Framework, prepared for the National Land & Water Resources Audit, Canberra.
14. WMO No-1121 Technical report of Establishing a WMO Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System Regional Node for West Asia: Current Capabilities and Needs, 2013.
15. Levy, R.C., Remer, L.A., Kleidman, R.G., Mattoo, S., Ichoku, C., Kahn, R., Eck, T.F., 2010: Global evaluation of the collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 10399–10420.
16. Shi, Y., Zhang, J., Reid, J.S., Hyer, E.J., Hsu, N.C., 2013: Critical evaluation of the MODIS deep Blue aerosol optical depth product for data assimilation over North Africa. *Atmos. Meas. Tech.* 6 (949–969). <http://dx.doi.org/10.5194/amt-6-949-2013>.
17. Hsu, N.C., Tsay, S.-C., King, M.D., Herman, J. R., 2004: Aerosol properties over brightreflecting source regions. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42.