



آشکارسازی کانون‌های فرامرزی انتشار گرد و غبار شمال شرق ایران

علیرضا راشکی^۱

سعید جاهدی پور^۲

سجاد طالقانی^۳

درجه مقاله: علمی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

^۱. دکتری تخصصی، دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی؛ دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران. a.rashki@um.ac.ir

^۲. دکتری تخصصی، مدرس دانشگاه جامع علمی کاربردی؛ کارشناس ارشد اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی، ایران.

^۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی؛ گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

چکیده

شمال شرق ایران و به‌خصوص استان خراسان رضوی تحت تأثیر اثرات منفی گرد و غبار فرامرزی است. گرد و غبار در این مناطق فعالیت‌های اقتصادی و سلامت هزاران نفر را تحت تأثیر خود قرار داده است. بیابان‌های آسیای مرکزی به‌خصوص ترکمنستان، ازبکستان، قزاقستان و حتی افغانستان منشأ گرد و غبار شمال شرق ایران است. برای کنترل این پدیده، اطلاع دقیق از سرچشمه و مسیرهای انتقال گرد و غبارها اهمیت حیاتی دارد. در این مقاله با تجزیه و تحلیل رویکرد چند مقیاسی داده‌های زمینی، هواشناسی و ماهواره‌ای، فهرستی با وضوح بالا از منابع گرد و غبار در این مناطق ارائه و منابع گرد و غبار شناسایی شده دخیل در گرد و غبار استان خراسان رضوی مورد بحث قرار گرفته است. برای این رویکرد: (۱) عمق نوری آئروسول آبی عمیق برای بررسی فراوانی وقوع (حضور) و توزیع مکانی-زمانی کانون‌های گرد و غبار (۲) الگوریتم بارزسازی گرد و غبار (*BADI*) و (۳) تصاویر ترکیبی *MSG Seviri* برای به دست آوردن نقاط برداشت گرد و غبار استفاده شده، که در آن نقاط منشأ گرد و غبار با تجزیه و تحلیل بصری شناسایی شده است (۴) برای ردیابی گرد و غبار از مدل‌های هیسپلیت استفاده شده است. تجزیه و تحلیل روزهای گرد و غباری در ایستگاه هواشناسی سرخس نشان داد که حدود ۶۵ درصد گرد و غبار این منطقه با همراهی منشأ خارجی به وقوع می‌پیوندد. تجزیه و تحلیل‌ها چندین منبع فعال گرد و غبار را نشان می‌دهد. هر چند صحرای قره قوم نقش فعال تری در تامین گرد و غبار استان خراسان رضوی دارد اما فعال‌ترین آن‌ها در صحرای تازه تشکیل شده آرال قوم (بخش خشک شده دریاچه آرال) است. مناطقی در شرق دریای خزر و امتداد آن در صحرای قره قوم به‌خصوص در محدوده مرزی با ایران نیز بخشی از گرد و غبار استان خراسان رضوی را فراهم می‌کنند.

• واژگان کلیدی

گرد و غبار، منشأ گرد و غبار، شاخص‌های گرد و غبار، عمق نوری ذرات معلق، استان خراسان رضوی.

گرد و غبار معدنی بادی جزء کلیدی سیستم آب‌وهوایی است و منبع طبیعی مهم ذرات اتمسفر را نشان می‌دهد (گودی، ۱۹۸۳). هر ساله، میلیون‌ها تن گرد و غبار از سطح مناطق خشک و نیمه خشک به اتمسفر منتشر می‌شوند که آن را به مهم‌ترین آئروسول اتمسفر از نظر جرم تبدیل می‌کند (Knippertz, 2014). ذرات غبار اتمسفر نه تنها از طریق جذب و پراکندگی تابش خورشیدی، بلکه با تغییر خواص نوری ابرها و سطوح برف و یخی که روی آن‌ها رسوب می‌کنند، به‌طور قابل توجهی بر تعادل انرژی سیستم زمین تأثیر می‌گذارد (شن و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، گرد و غبار اتمسفر به‌عنوان یک آلاینده مضر هوا در نظر گرفته می‌شود که باعث بیماری‌های تنفسی و ریوی می‌شود (ایندویتو و همکاران، ۲۰۱۲). کاهش دید ناشی از رویدادهای گرد و غبار نیز تأثیر اقتصادی قابل توجهی را بر ترافیک هوایی، حمل‌ونقل جاده‌ای و نظایر آن‌ها دارد (Knippertz, 2014). افزایش فراوانی رخداد گرد و غبار در سال‌های اخیر به تغییرات سرعت باد و رطوبت سطح مرتبط بوده‌است که بسته به میزان گرم شدن سطح زمین و بادهای شدید محلی تا ارتفاع ۳۰۰۰ متری و بالاتر کشیده می‌شوند (Ebrahimi-Khusfi et al., 2020, 2021; Li et al., 2019; Karami et al., 2021; Nobakht et al., 2021; Rashki et al., 2019). شرقی ایران و غرب افغانستان با بادهایی قوی در سطح زمین که چهارماه در سال طول می‌کشند و سرعت آن‌ها گاه‌آهاً به ۲۸ متر بر ثانیه می‌رسند، شناخته می‌شود (McMahon, 1906; Middelton, 1986)، منطقه‌ای کلیدی که حاصل تقابل جبهه هوای سرد کوهستان و آب‌وهوای گرم و خشک بیابان است (Kaskaoutis et al., 2019). برای نمونه، باد ۱۲۰ روزه از اواسط ماه می شروع و تا اواسط سپتامبر ادامه دارد. از ماه ژوئن تا سپتامبر شرق ایران تحت تأثیر باد قوی شمالی لوار (۲۰ متر بر ثانیه) است (Alizadeh Choobari et al., 2014; Kaskaoutis et al., 2019; Rashki et al., 2018b). شدت این باد با تغییرات گرادیان^۱ فشار بین دریای خزر و ارتفاعات هندوکش در ارتباط است (Kaskaoutis et al., 2016, 2017, 2018b; Alizadeh-Choobari et al., 2014; Hamidianpour et al., 2021). در مطالعات مختلف بر نقش این گرادیان فشار و اهمیت آن در ایجاد بادهای قوی ۱۲۰ روزه معمول در نیمه شرقی ایران و غرب افغانستان تأکید شده است. این مطالعات نشان داد که قدرت بادهای ۱۲۰ روزه از اواسط می تا

^۱. Gradient

اواسط سپتامبر وقتی اتفاق می‌افتد که سیستم پرفشاری بر روی ارتفاعات هندوکش در ترکیب با سیستم کم‌فشار حرارتی مستقر بر روی بیابان‌های شرق ایران و غرب افغانستان که یک گرادیان فشار قوی را ایجاد کنند، سرعت می‌گیرد که تحت تأثیر کانالیزه شدن اُروگرافیکی و خشکی سطح زمین بر روی منطقه شدت بیشتری می‌گیرند.

بیابان‌های کشورهای ترکمنستان، ازبکستان و افغانستان منبع اصلی گرد و غبار شمال شرق ایران و به خصوص استان خراسان رضوی هستند، جایی که فعالیت اقتصادی و سلامت هزاران نفر تحت تأثیر طوفان‌های گرد و غبار قرار گرفته است (باغی و همکاران، ۱۴۰۰، اورلوفسکی و همکاران، ۲۰۰۵). بیش از ۷۵ درصد از این قلمرو دشت‌های بیابانی است که از بیابان‌های شنی تا سنگی، نمکی و تارسی متغیر است (لوئیس، ۲۰۰۳). فراوانی انتشار گرد و غبار، طوفان‌های گرد و غبار و انتقال گرد و غبار از بیابان‌های این منطقه در دهه‌های گذشته به دلیل بیابان‌زایی گسترده در کشورهای آسیای میانه از جمله قزاقستان، ازبکستان و ترکمنستان و افغانستان افزایش یافته است. گرچه اهمیت این مناطق انتشار گرد و غبار در مطالعات گرد و غبار در مقیاس جهانی برجسته شده است (مانند گودی، ۱۹۸۳؛ میدلتون و همکاران، ۱۹۸۶؛ هرمان و همکاران، ۱۹۹۷؛ پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ژینوکس و همکاران، ۲۰۱۲؛ چوباری و همکاران، ۲۰۱۴، نوبخت و همکاران، ۲۰۲۰)، اما تنها چند مطالعه توزیع فضایی و زمانی منابع گرد و غبار ورودی به خراسان رضوی را با جزئیات بررسی کرده‌اند (به‌عنوان مثال راشکی و همکاران، ۲۰۱۹؛ کرمی و همکاران، ۲۰۲۰؛ محمدپور و همکاران و همکاران، ۲۰۲۲). بیشتر این مطالعات بر روی سوابق ایستگاه‌های هواشناسی به‌عنوان منبع اولیه داده‌ها برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی طوفان‌های گرد و غبار (ایندویتو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ایسانوا و همکاران، ۲۰۱۴) و نرخ رسوب گرد و غبار (گرول و همکاران، ۲۰۱۳) و تصاویر ماهواره‌ای (راشکی و همکاران، ۲۰۱۹؛ میری و همکاران، ۲۰۱۷) تکیه داشته‌اند. هم‌چنین به خاطر کمبود ایستگاه‌های هواشناسی، عدم دسترسی به بسیاری از مناطق و مشکلات در سازماندهی نمونه برداری مستمر با مشکل مواجه می‌شدند.

پهنه‌بندی دقیق از منابع فعال در تولید گرد و غبار اولین قدم در درک محرک‌های انتشار غبار است که بخش کلیدی در چرخه غبار به حساب می‌آید (شائو و همکاران، ۲۰۱۱). شناسایی توزیع مکانی و زمانی این منابع گرد و غبار توصیف دقیق‌تری از سطوح انتشار گرد و غبار و ژئومورفولوژی آن‌ها را ارائه می‌دهد که می‌تواند نتایج مدل‌های گرد و غبار را بهبود ببخشد

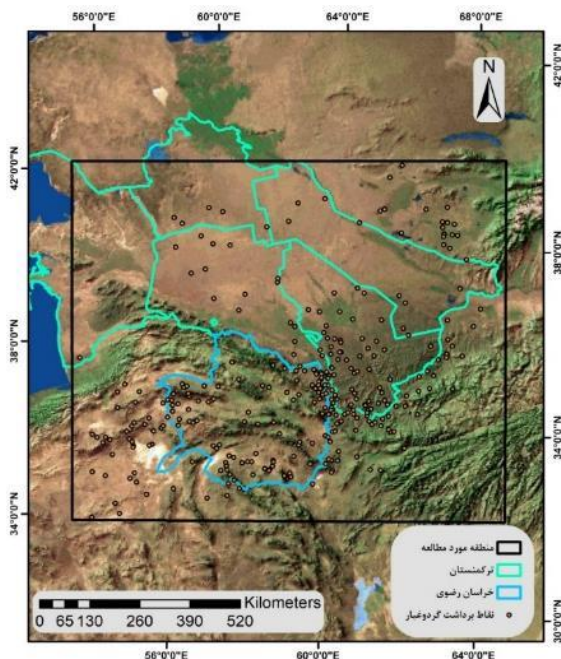
(پاراجولی و همکاران، ۲۰۱۷). چرا که مطالعات قبلی نشان داده‌اند که اطلاعات نادرست در مورد ویژگی‌های فضایی منابع غبار می‌تواند منجر به سوگیری‌های بزرگ در بار تخمینی گرد و غبار شود (Raupach et al., 2004; Shao, 2004) به‌ویژه در آسیای مرکزی، جایی که مطالعات اندکی صورت گرفته است. بنابر مطالبی که در بالا اشاره شد، تغییر اقلیم و نتایج حاصل از آن که به صورت خشک‌سالی‌های پیاپی نمود پیدا می‌کند و هم‌گام با تغییرات کاربری به‌ویژه در مناطق حساس به فرسایش، موجب می‌شود همه ساله مقادیر زیادی گرد و غبار از صحاری آسیای مرکزی به مناطق مختلف نیمه شرقی ایران منتقل شود. این موضوع ایران را در جهات جغرافیایی مختلف به یک بستر گرد و غبار قابل ملاحظه تبدیل می‌کند. بنابراین، شرایط فوق‌العاده خشک در داخل ایران و منابع عمده بیرونی گرد و غبار ذکر شده در بالا با هم تلفیق شده و موجب می‌شود که شمال شرق تا مرکز و جنوب کشور تحت تأثیر آئروسول‌های معدنی و گرد و غبارهای بیابانی از هر طرف قرار گیرد. برای کنترل این پدیده، شناسایی سرچشمه و مسیرهای انتقال گرد و غبارها اهمیت حیاتی دارد. این مقاله با تجزیه و تحلیل داده‌های زمینی، هواشناسی و ماهواره‌ای، پراکنش منابع گرد و غبار در شمال شرق ایران را نشان می‌دهد. برای این رویکرد: بدین منظور عمق نوری آئروسول‌ها برای بررسی فراوانی وقوع (حضور) و توزیع مکانی-زمانی کانون‌های گرد و غبار. (۲) الگوریتم بارزسازی گرد و غبار (BADI) (۳) تصاویر ترکیبی MSG Seviri برای به‌دست آوردن نقاط برداشت گرد و غبار استفاده شده است، که در آن منابع نقطه‌های گرد و غبار با تجزیه و تحلیل بصری شناسایی شده‌است (۴) برای ردیابی گرد و غبار از مدل‌های همسپلیت استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه محدوده جغرافیایی استان خراسان رضوی به طرف شمال و تا شرق دریای خزر را در برمی‌گیرد و از جنوب به مرز استان محدود می‌شود. منطقه مورد مطالعه اقلیم نیمه‌خشک و خشک سرد دارد (شکل ۱). گرد و غبارهای شمال شرق از دو جهت داخلی در مرکز ایران و بیابان‌های آسیای مرکزی از جمله آرال و قره‌قوم نشأت می‌گیرند. بدین ترتیب که با فاز مثبت گرد و غبار مقدار زیادی در داخل کشور ترکمنستان و بر روی بیابان قره‌قوم ناشی از سامانه‌های جوی شکل گرفته‌است که با روانه شدن بادهای سطحی بر روی مناطق خشک آسیای مرکزی هم‌زمان با حرکت بادهای ساعت گرد الگوهای جوی، با عبور از منطقه خشک سرخس به‌طور فزاینده‌ای هسته‌های گرد و غبار را در فصل بهار و تابستان بر روی

خراسان رضوی شکل می‌دهد. هم‌چنین در کنار بیابان قره‌قوم در ترکمنستان بادهای غربی در برخی موارد در اثر عبور از دشت کویر موجب افزایش مقدار گرد و غبار در نیمه جنوبی منطقه شمال‌شرق (لبه غربی منطقه شمال‌شرق) و در شرق دشت کویر می‌شود.

شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و نقاط شروع انتشار گرد و غبار

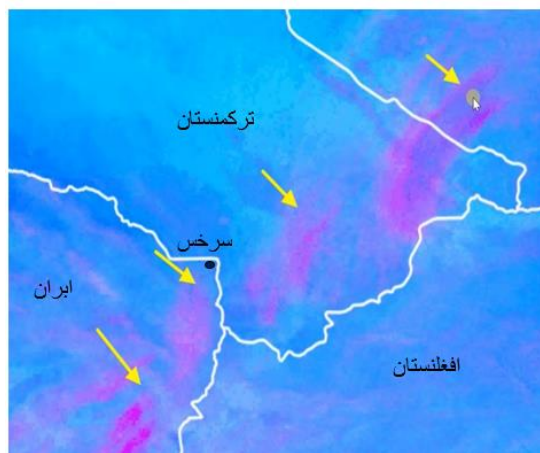


منبع: اصلاح شده از: <http://www.heritageinstitute.com/zoroastrianism/maps/centralasia.htm>

روش کار: تصاویر به‌دست‌آمده توسط Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) روی سری ماهواره‌های زمین‌آهنگ نسل دوم (MSG) به‌طور گسترده برای بررسی مکانیسم تولید و انتقال غبار استفاده می‌شود (به عنوان مثال، لیو و همکاران، ۲۰۰۶؛ Schepanski و همکاران، ۲۰۰۹). ماهواره MSG هر ۱۵ دقیقه با وضوح فضایی ۳×۳ کیلومتر در نادیر (بر فراز صحارا) و ۷×۵ در خارج از نادیر (در خاورمیانه) اندازه‌گیری می‌کند. منابع آئروسول معدنی را می‌توان با استفاده از یک شاخص گرد و غبار کیفی استنباط کرد که بر اساس دمای روشنایی سه کانال IR مختلف (۸.۷ میکرومتر، ۱۰.۸ میکرومتر و ۱۲.۰ میکرومتر) بازیابی شده‌است (Schepanski et al., 2007). این رویکرد سه طیفی همان‌طور که توسط آکرمن (۱۹۹۷) پیشنهاد شده‌است، از اختلاف

دمای روشنایی دو کانال طول موج مجاور هر دو در پنجره اتمسفر (طول موجی است که در آن عبور از اتمسفر در بالاترین میزان و بنابراین جو نسبتاً شفاف است) استفاده می‌کند. این اختلاف دما با افزایش گرد و غبار افزایش یافته و به صورت رنگ صورتی در ترکیب RGB مشتق شده ظاهر می‌شود، وضوح زمانی بالای SEVIRI اجازه می‌دهد تا حرکت توده‌های گرد و غبار به جلو یا عقب در طول زمان ردیابی شوند. علاوه بر این، وضوح فضایی نسبتاً بالای SEVIRI امکان تجزیه و تحلیل جامع فرآیندهای گرد و غبار را فراهم می‌کند. گرد و غبار اتمسفر را می‌توان با استفاده از این کانال‌های طول موج توسط MSG در طول روز و شب در وضوح زمانی و مکانی بالا تشخیص داد. داده‌های این ماهواره به صورت ساعتی برای سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ برای هر روز و برای ۶ سال تهیه شد. تمامی این تصاویر به صورت بصری چک گردید و با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی کنترل گردید. از میان آن‌ها، تصاویری که همراه با وقوع گرد و غبار است تفکیک گردید. تمامی تصاویر حاوی گرد و غبار رتورفرنس شدند و نقاط برداشت گرد و غبار، ساعت برداشت گرد و غبار و تداوم و جهت حرکت گرد و غبار و مناطق تحت تأثیر مشخص شدند تا در مرحله بعدی تجزیه تحلیل‌های مشخص شده بر روی آن‌ها مشخص شود (شکل ۲).

شکل ۲- ترکیب RGB گرد و غبار SEVIRI در ۴ مرداد ۱۴۰۰ (۲۶ ژوئن ۲۰۲۱) در کشور ترکمنستان و ایران در ساعت ۱۰ صبح. گرد و غبار با رنگ صورتی و با فلش زرد رنگ مشخص شده است



منبع:

https://sds-was.aemet.es/archive/images/EUMETSAT-ME/20210726/MET8_RGBDust_MiddleEast_202107260700.gif

تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس^۱

طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS) یکی از پرکاربردترین و موفق‌ترین حس‌گرها برای شناسایی منابع گرد و غبار است (مانند Miller, ۲۰۰۳؛ Hsu و همکاران، ۲۰۰۶؛ Bullard و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ginoux و همکاران، ۲۰۱۲)؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳). ابزار MODIS بخشی از ماموریت سیستم مشاهده زمین ناسا (EOS) است. MODIS به ترتیب در دسامبر ۱۹۹۹ و می ۲۰۰۲ روی فضاپیماهای Terra و Aqua پرتاب شد. این حس‌گر تابش را در ۳۶ باند طیفی باریک بین ۰.۴ تا ۱۴.۴ میکرومتر اندازه‌گیری می‌کند. همه باندهای مادون قرمز با وضوح مکانی ۱ کیلومتری، هم‌چنین باندهای مادون قرمز مرئی و موج کوتاه در وضوح‌های مکانی ۵۰۰ متر (باند های ۳-۷) یا ۲۵۰ متر (باند ۱ و ۲) در دسترس هستند. در مدارهای هم‌زمان با خورشید، Terra و Aqua به ترتیب ۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰ زمان تقاطع محلی استوایی را ارائه می‌دهند (Justice et al., 2002).

تکنیک‌های افزایش غبار چندطیفی با استفاده از اندازه‌گیری‌های رادیومتر ماهواره‌ای در باندهای مادون قرمز مرئی/انعکاسی (۰.۴-۱.۶ میکرومتر)، موج کوتاه/مادون قرمز (۲-۵ میکرومتر)، و مادون قرمز حرارتی (۸-۱۲ میکرومتر) به‌طور گسترده در مطالعات گرد و غبار از جمله رویداد گرد و غبار استفاده شده‌است. فرکانس (به عنوان مثال Schepanski و همکاران، ۲۰۰۷) و نقشه‌برداری دقیق از منابع غبار برای استفاده در پیش‌بینی طوفان گرد و غبار در مقیاس متوسط (به عنوان مثال Walker et al., 2009). اگرچه آئروسول معدنی گاهی اوقات در تصاویر قابل مشاهده MODIS (به ویژه در اقیانوس تاریک) قابل تشخیص است، اما تشخیص آن در خشکی می‌تواند دشوار باشد؛ زیرا گرد و غبار می‌تواند بازتابی مشابه با سطوح روشن بیابان که از آن منشأ می‌گیرد، داشته باشد (Levy et al., 2007). علاوه بر این، تشخیص گرد و غبار از ابر، نمک دریا و آلودگی‌های انسانی اغلب دشوار است. گرد و غبار معدنی رفتار انتشاری و انتقالی متفاوتی را در محدوده طول موج چندگانه مادون قرمز حرارتی (TIR) نشان می‌دهد. از این رو، تعداد زیادی از مطالعات از روش‌های مبتنی بر اختلاف دمایی روشنایی (BTD) در دو یا سه محدوده طول موج برای تقویت نمایش گرد و غبار در تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرده‌اند (مانند Tanré و همکاران، ۱۹۹۱؛ Ackerman, ۱۹۹۷؛ Schepanski et al., ۲۰۰۷). روش‌های مبتنی بر BTD بر اساس تفاوت دما بین سطح زمین و گرد و غبار موجود در جو که خنک‌تر از سطح

¹ MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

زمین است و اساساً تحت تأثیر جذب سایر گازهای جوی قرار نمی‌گیرد، به کار می‌روند (پارک و همکاران، ۲۰۱۴). با این حال، محدودیت‌های متعددی در ارتباط با این تکنیک‌ها وجود دارد از جمله: (۱) روش‌های مرسوم BTD اغلب نمی‌توانند بین گرد و غبار و سیروس نازک تمایز قائل شوند، (۲) روش فرورسرخ فرورسرد با نیاز به انتشار دقیق سطح پس‌زمینه (به ویژه در ۸.۵ میکرومتر) مانع می‌شود و (۳) روش کاهش کنتراست باند قابل مشاهده در پس‌زمینه‌های روشن بیابانی کاربرد محدودی دارد (مال امیری و همکاران، ۱۳۹۹).

شاخص عمق نوری ذرات مودیس^۱

هسو و همکاران (۲۰۰۴) الگوریتم "Deep Blue AOD" را با هدف به‌دست آوردن خواص جامع ضخامت نوری آئروسول و توان آنگستروم با استفاده از باندهای باریک متعدد در قسمت نزدیک به UV از طیف طول موج (۴۱۲ و ۴۹۰ نانومتر برای SeaWiFS؛ ۴۱۲ و ۴۷۰ نانومتر برای MODIS) توسعه داد. این الگوریتم برای ابزار MODIS که روی Aqua و Terra قرار دارد. در نتیجه استفاده از طول موج مرئی در بخش DB، از وابستگی بین ارتفاع لایه آئروسول و شدت AOT (به عنوان مثال الگوریتم OMI AI برای طول موج‌های UV) اجتناب می‌شود. مقایسه مقادیر توان DB AOD و Angstrom با اندازه‌گیری مستقیم در پنج سایت مختلف AERONET در چین و مغولستان در طول آزمایش ACE-Asia، نشان داده‌است که این الگوریتم می‌تواند AOD با کیفیت بالا را بر روی سطح بازتابی بیابان ارائه دهد و قادر به جداسازی ذرات ریز از ذرات درشت، حتی برای محیط‌هایی با ذرات مخلوط آئروسول است. توزیع اندازه آئروسول یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن است. در الگوریتم آبی عمیق، فرض بر این است که بازتاب سطح در مناطق بیابانی در طول موج‌های آبی کم است، جایی که آئروسول غبار بازتاب بیشتری دارد (Hsu et al., 2004). با این حال، بازتاب گرد و غبار بسته به ویژگی‌های شیمیایی آن متغیر (بدوک و همکاران، ۲۰۰۹). محصولات MODIS به‌صورت رایگان در سطوح مختلف پردازش در دسترس هستند. محصول روزانه MODIS در مرکز پرواز فضایی گودارد ناسا پردازش می‌شود که دسترسی به محصولات سطح ۱، ۲ و ۳ MODIS را از طریق وب‌سایت بایگانی و توزیع جو سطح ۱ ناسا (LAADS) فراهم می‌کند. این محصولات را می‌توان از طریق رابط وب LADS

¹ MODIS Deep Blue AOD (M-DB AOD)

ftp LADS یا مستقیماً از مخزن (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)
دانلود کرد. (<ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)

در این مطالعه، به منظور بررسی توزیع مکانی و زمانی منابع گرد و غبار در استان خراسان رضوی و اطراف آن، دو نوع محصول MODIS مورد استفاده قرار گرفت: (۱) محصول آئروسول MODIS L2 (MOD04) در وضوح فضایی (حدود ۱۰ کیلومتر) و (۲) تابش کالیبره شده MODIS L1B (MOD02) در وضوح فضایی (0.01°) (حدود ۱ کیلومتر). مجموعه داده اول برای شناسایی کانون‌های گرد و غبار در بیابان‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود، و مجموعه داده دوم برای تولید تصاویر روزانه MODIS DEP به منظور تعیین دقیق منابع نقطه گرد و غبار استفاده می‌شود.

شاخص بهبود یافته دمای روشنایی گرد و غبار^۱ BTDI

روش دیگر که بر روی تصاویر ماهواره‌ای MODIS صورت می‌گیرد، روش BTDI است. شاخص بهبود یافته دمای روشنایی گرد و غبار (BADI) برای پایش طوفان گرد و غبار با استفاده از ترکیب دمای روشنایی سه باند تصاویر ODIS: باند ۲۰ (۳/۸۴-۳/۶۶ میکرومتر)، باند ۳۱ (۱۱/۲۸-۱۰/۷۸ میکرومتر) و باند ۳۱ (۱۱/۷۷-۱۲/۲۷ میکرومتر) استفاده می‌شود. این روش تشخیص، نه تنها قادر است به طور مؤثر محل هسته‌های اصلی طوفان‌های گرد و غبار را شناسایی کند، بلکه می‌تواند گرد و غبار را از زمین‌های لخت و ابرها تشخیص دهد (Tsolmon et al. 2008).

مدل HYSPLIT^۲

یکی از مدل‌های پرکاربرد برای مطالعه مسیرهای انتقال و انتشار گرد و غبار است. این مدل توسط مرکز تحقیقات جوّی نوا (ARL^۳) طراحی شده است. این مدل سامانه تلفیق یافته‌ای است که برای محاسبه و شبیه‌سازی انتشار، مسیر حرکت و ته‌نشینی آئروسول‌های جوی و مخصوصاً ذرات گرد و غبار طراحی شده است (Draxler, R., et al., 2009; Draxler and Hess 1997). در مطالعات زیادی از مدل مذکور برای شبیه‌سازی انتقال گرد و غبار از خاستگاه تا منطقه رسوب‌گذاری استفاده شده است (Prasad et al., 2010). این مدل بر اساس مدل لاگرانژ (مکانیک سیالات) پی-

^۱ Brightness Temperature Difference Index

^۲ Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

^۳ Air Resources Laboratory

ریزی شده‌است و در برگیرنده روابط و معادلات متعدد برای محاسبه پارامترهای مختلف موثر در شبیه سازی انتقال آئروسول‌ها می باشد.

تشخیص نقاط برداشت گرد و غبار

برای شناسایی و مکان یابی مناطق تولید گرد و غبار در مناطق مورد مطالعه، ۲۰ سال تصاویر روزانه مودیس و ۵ سال تصاویر مدئوست به صورت بصری بررسی شد. دو تصویر از مودیس برای هر روز از روگذرهای Terra و Aqua به ترتیب در حدود ساعت ۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰ به وقت محلی تولید شد. اختلاف زمانی تقریباً ۳ ساعته بین دو روگذر ماهواره‌ای، بررسی ایجاد توده‌های گرد و غبار مجزا بین دو عکس فوری و تعیین محل منابع نقطه‌های در لبه مخالف هر ستون گرد و غبار را امکان پذیر کرد. همراه با بازرسی بصری ستون‌های گرد و غبار در تصاویر مودیس که منجر به شناسایی منابع نقطه گرد و غبار می‌شود، چندین مجموعه داده کمکی به منظور هم‌بستگی متقابل و تأیید این مشاهدات و ثبت منابع نقطه‌های با درجه اطمینان بالا مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات تکمیلی شامل موارد زیر است:

(۱) شاخص عمق نوری ذرات (AOD)؛ (۲) سرعت باد؛ (۳) مدل رقومی ارتفاع؛ (۴) تصاویر ماهواره‌ایی با وضوح بالا.

برای اولین مورد و برای تأیید وجود غبار در جو و همچنین ایجاد نقشه نقاط حضور گرد و غبار ما از مشاهدات MODIS eDB AOD استفاده کرده‌ایم. اگرچه محصولات AOD با وضوح فضایی ~ ۱۰ کیلومتر لزوماً محل منابع نقطه گرد و غبار را نشان نمی‌دهند، بنابراین می توان از آن‌ها برای محدود کردن جستجوی منابع غبار در یک منطقه وسیع استفاده کرد. اطلاعات مربوط به باد سطحی از مجموعه داده‌های تحلیل مجدد ERA-Interim به دست آمد (دی و همکاران، ۲۰۱۱). باد در ارتفاع ۱۰ متری، با قدرت تفکیک زمانی ۶ ساعت، برای تولید میدان‌های باد در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. برای بازسازی میدان باد در زمان عبور ماهواره‌های تا حد امکان، داده‌های دو مرحله زمانی ۶ ساعته (6:00 UTC و ۱۲:۰۰ UTC) به طور موقت تا ساعت ۸:۰۰ UTC درون‌یابی شدند. علاوه بر این، مدل ارتفاع دیجیتال جهانی GTOPO30 برای بررسی توپوگرافی منطقه منبع گرد و غبار (داده‌های موجود از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده) استفاده شد. با استفاده از این مجموعه داده، نقشه‌های برجسته سایه دار با وضوح فضایی ~ ۱ کیلومتر برای برجسته کردن ویژگی‌های توپوگرافی در منطقه تولید شد. برای بررسی ویژگی‌های

سطحی با وضوح بسیار بالا، نقشه پایه (World Imagery (www.esri.com)، مجموعه‌های از تصاویر نوری ماهواره‌های با وضوح بالا در وضوح چند متر از Landsat، Worldview GeoEye، SPOT و از ماهواره IKONOS استفاده شد. این مجموعه از طریق ArcGIS® نسخه ۱۰.۱ قابل دسترسی است. کامپوزیت‌های سالانه Landsat 5 و Landsat 7+ ETM نیز از کاتالوگ موتور گوگل ارث انجین (<https://earthengine.google.com/>) Google Earth به دست آمد.

تعیین مناطق پر حضور (فراوانی حضور) گرد و غبار (Dust Hotspot Detection)

مطالعات میدانی قبلی و مطالعات سنجش از دور نشان داده‌اند که منابع گرد و غبار در مناطق وسیع همگن نیستند و در واقع بخش عمده‌ای از عرضه جهانی گرد و غبار از مناطق نسبتاً کوچک (در مقایسه با اندازه بیابان‌ها) اما به‌طور مداوم در تولید گرد و غبار فعال است که به نام نقاط داغ گرد و غبار یا پر حضور گرد و غبار ذکر می‌شوند (Gillette, 1999; Knippertz et al, 2010). و (Rashki et al, 2021). داده‌های AOD تخمین محتوای آئروسول را در ستون اتمسفر امکان‌پذیر می‌کنند. توان آنگستروم، تخمینی از پارامتر اندازه آئروسول برای ستون جو، هم‌چنین می‌تواند از طریق تغییرات طیفی AOD به دست آید (Hsu et al., 2013). توان آنگستروم وابستگی AOD به طول موج را توصیف می‌کند و در مطالعات اندازه ذرات آئروسول و برای جداسازی گرد و غبار از سایر ذرات معلق در جو در تصاویر نوری ماهواره‌ای استفاده شده است (به عنوان مثال Torres et al., 1998; Ginoux et al., 2010). برای تولید تصاویر شبکه‌بندی روزانه، مجموعه‌های از اسکریپت‌های پایتون برای استخراج طوفان‌های گرد و غبار انتخابی از هر روز MODIS، بازپخش آن‌ها به سیستم مختصات جغرافیایی و در نهایت تولید موزاییک‌های شطرنجی روزانه که کل منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند، توسعه داده شد. سه طوفان گرد و غبار از هر گرانول MOD04 استخراج شد AOD¹ eDB:، نمای آنگستروم و آلبیدو پراکندگی منفرد SDS. استخراج شده در یک شبکه جغرافیایی با فاصله ۰.۱° (~ ۱۰ کیلومتر) در جهت طول و عرض جغرافیایی درون‌یابی شد.

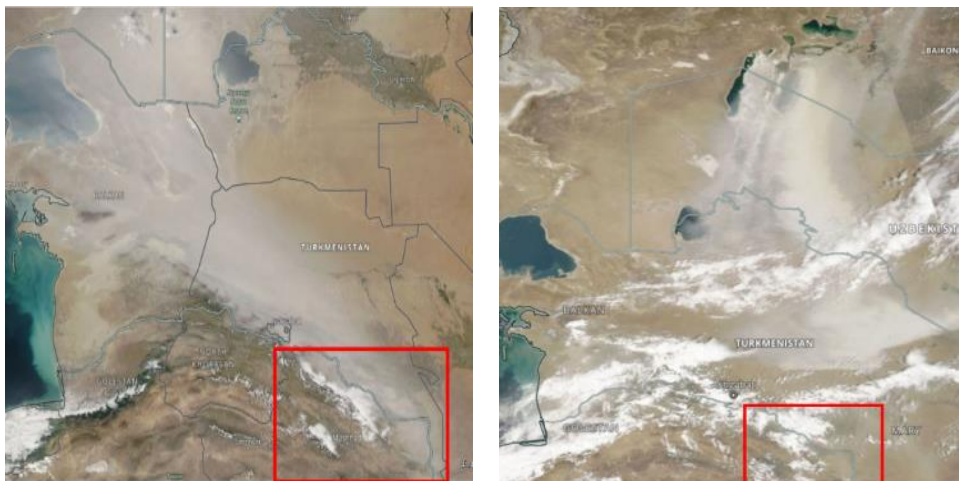
نتایج و بحث

شکل ۳ تصاویر رنگی (RGB) سنجنده Aqua MODIS را در طول طوفان‌های گرد و غبار مورد بررسی در ۲۷-۲۸ می ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. در ۲۷ مه ۲۰۱۸، یک طوفان گرد و غبار شدید

¹. Enhanced Deep Blue

از پلایاهای خشک شده در جنوب دریای آرال (صحرای آرال قوم) سرچشمه گرفت و به سمت جنوب منتقل شد و بخش بزرگی از آسیای مرکزی را تحت تأثیر قرار داد. ستون غبار غلیظ یک تغییر به سمت شرق را نشان می‌دهد که دره‌های بین رشته کوه‌های پامیر و تیان شان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین به شکل‌گیری رسوبات لس کمک می‌کند، همان‌طور که مطالعات اخیر نشان داده‌است (Li et al., 2019; Lu et al., 2020). در ۲۸ می، گرد و غبار غلیظی در سواحل شرقی دریای خزر مشاهده می‌شود که بیشتر منطقه قره بوگاز گل، غرب و کویر مرکزی قره قوم را می‌پوشاند، در حالی که حضور گرد و غبار بر فراز آرال قوم نیز دیده می‌شود. لی و سوکولیک (۲۰۱۸b) تغییرات سالانه انتشار گرد و غبار را در آسیای مرکزی بررسی کردند و بیش‌ترین فراوانی را در بهار و قوی‌ترین شدت را در تابستان گزارش کردند، در حالی که در شرق آرال‌کوم، فعالیت گرد و غبار نیز در پاییز بالا بود. بنابراین، این رویداد یک مورد ایده آل برای مطالعه ارتباط احتمالی بین این دو طوفان گرد و غبار و بررسی الگوهای گردش جوئی مرتبط با آنها است.

شکل ۳- تصاویر رنگی (RGB) Aqua MODIS برای رویدادهای گرد و غبار در ۲۷ می ۲۰۱۸ (۶ خرداد ۱۳۹۷) (طوفان‌های گرد و غبار آرال قوم و قره قوم). - : تصاویر رنگی Aqua MODIS برای رویدادهای گرد و غبار در ۲۸ می ۲۰۱۸ (۷ خرداد ۱۳۹۷) (طوفان‌های گرد و غبار آرال قوم و قره قوم)



مسیرهای توده هوای ۷۲ ساعته به دست آمده از مدل HYSPLIT در ۵۰۰ متر AGL مناطقی را نشان می‌دهد (شکل ۴) که مستقیماً تحت تأثیر طوفان‌های گرد و غبار قرار گرفته‌اند. از آن‌جایی که انتشار گرد و غبار منطقه وسیعی را در منبع پوشش می‌دهد، ما رویکرد ماتریسی را در اجرای HYSPLIT انتخاب کردیم تا شواهدی از مناطق آسیب دیده داشته باشیم. در طوفان شدید گرد و غبار آرال قوم در ۲۷ می (۶ خرداد ۱۳۹۷)، خروجی‌های HYSPLIT حاکی از آن بود که بادهای غالب از جهت شمالی بوده، بنابراین توده‌های گرد و غبار به شدت بخش‌های جنوبی آسیای مرکزی را تحت تأثیر قرار داده و به شرق ایران وارد شده است (شکل ۵).

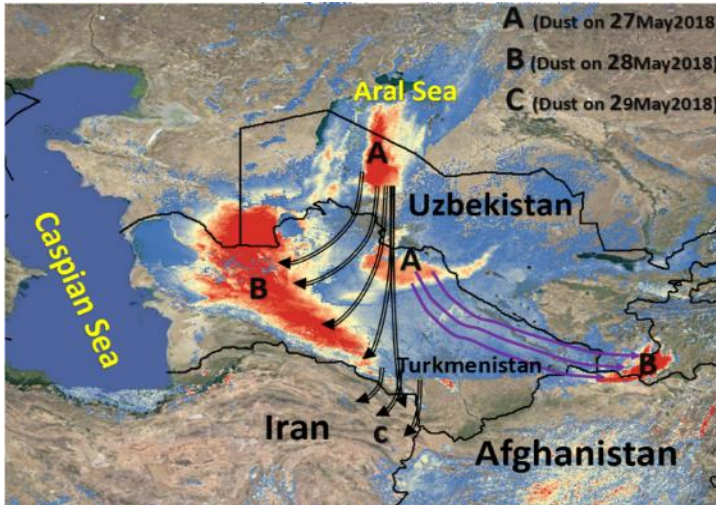
نتایج نشان می‌دهد که در فصل بهار و تابستان، شرق ایران و شمال غرب افغانستان به شدت تحت تأثیر طوفان‌های گرد و غباری که منشأ آن ترکمنستان است، قرار می‌گیرد. در حالی که رویدادهای کمی از دریای آرال به این مناطق می‌رسد. صحرای قره قوم در ترکمنستان منبع اصلی طوفان‌های گرد و غبار است که شمال شرق ایران و شمال افغانستان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. باد لوار (یا ۱۲۰ روزه) نقش عمده‌ای در انتشار گرد و غبار، شدت و انتقال دوربرد آن دارد، در حالی که شرایط هواشناسی و به‌ویژه تغییر فشار سطحی دریای خزر نیز از عوامل تعیین کننده برای گرد و غبار درون فصلی و سالیانه است. از آن جایی که بخش بزرگی از طوفان‌های گرد و غبار تولید شده از بسترهای خشک شده منشأ می‌گیرند (شکل ۵)، چندین رویداد گرد و غبار به‌عنوان نمک حاوی چندین عنصر سمی که برای سلامتی انسان خطرناک هستند، مشخص می‌شوند. مطالعات موردی با انتشار بیش از حد گرد و غبار از نقطه نظر هواشناسی و کیفیت هوا مورد بررسی قرار می‌گیرد، در حالی که توده‌های گرد و غبار معمولاً در ارتفاع ۳ کیلومتری هنگام سفر بر فراز شمال شرق ایران و شمال افغانستان می‌رسند، جایی که توپوگرافی ناهموار ممکن است شدت و مسیر آن‌ها را تغییر دهد.

شکل ۴- ماتریس مسیر ۳ روزه رو به جلو از مدل HYSPLIT برای توده‌های هوا در ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین هم‌زمان با ثبت رؤیت از و کویر آرالکم سرچشمه گرفته‌است.



منبع: Karami et al, 2021

شکل ۵- پانل بالا: طوفان گرد و غبار از دریای آرال توسط الگوریتم BADI در ۲۷ مه ۲۰۱۸ (A) بر ترکمنستان (B) و بخش‌های شرقی ایران (C) شناسایی شد.

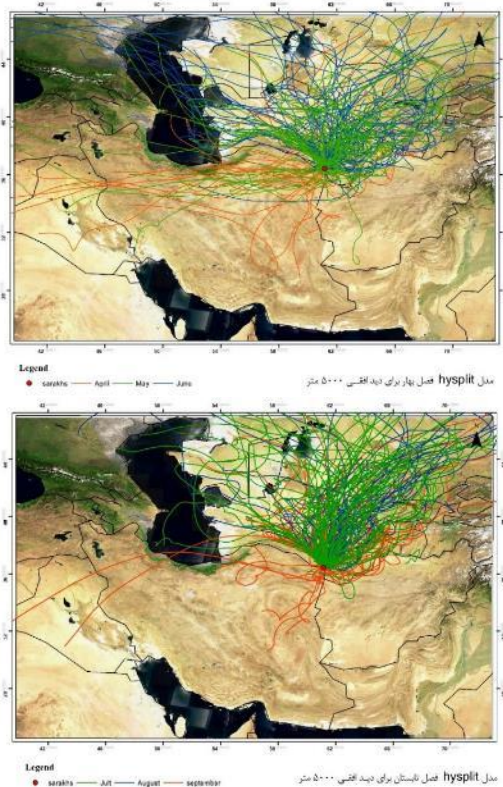


منبع: Rashki et al, 2019

مسیر انتقال گرد و غبار به استان خراسان رضوی

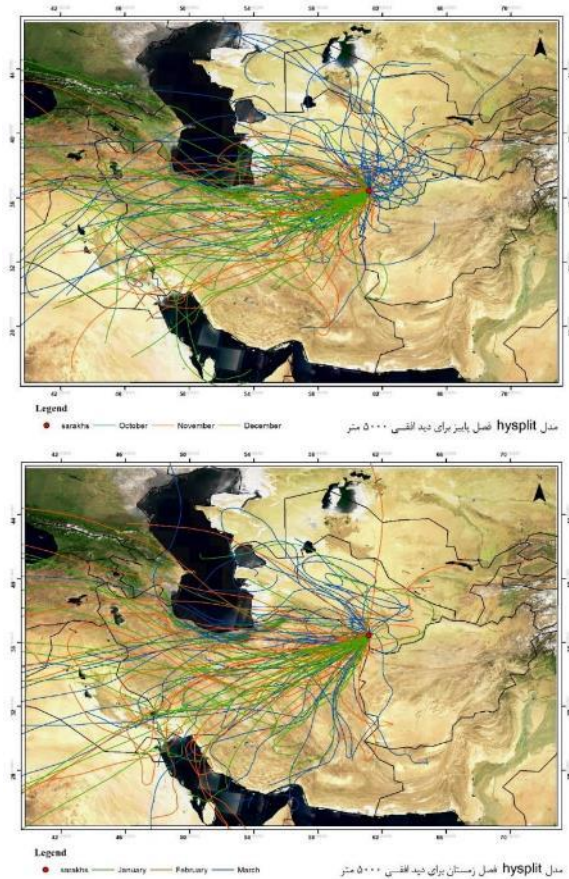
بررسی حرکت ذرات گرد و غبار برای تعیین مناطق ایجاد گرد و غبار بسیار حائز اهمیت است. جهت بررسی منابع گرد و غبار از مدل HYSPLIT استفاده شد. مدل مذکور امکان ردیابی پس-گرد ذرات گرد و غبار تا ۲۴ ساعت قبل از وقوع پدیده گرد و غبار فراهم نموده است. داده‌های مورد استفاده از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۶ در یک بازه زمانی ۴۶ ساله از سازمان هواشناسی کشور دریافت و مدل براساس دید افقی ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ متر به تفکیک فصل اجرا شد که خروجی‌های آن در شکل های (۶،۷،۸) آمده است.

شکل ۶- مدل HYSPLIT فصل بهار و تابستان برای دید افقی ۵۰۰۰ متر



منبع: نگارنده

شکل ۷- مدل HYSPLIT فصل پاییز و زمستان برای دید افقی ۵۰۰۰ متر



منبع: نگارنده

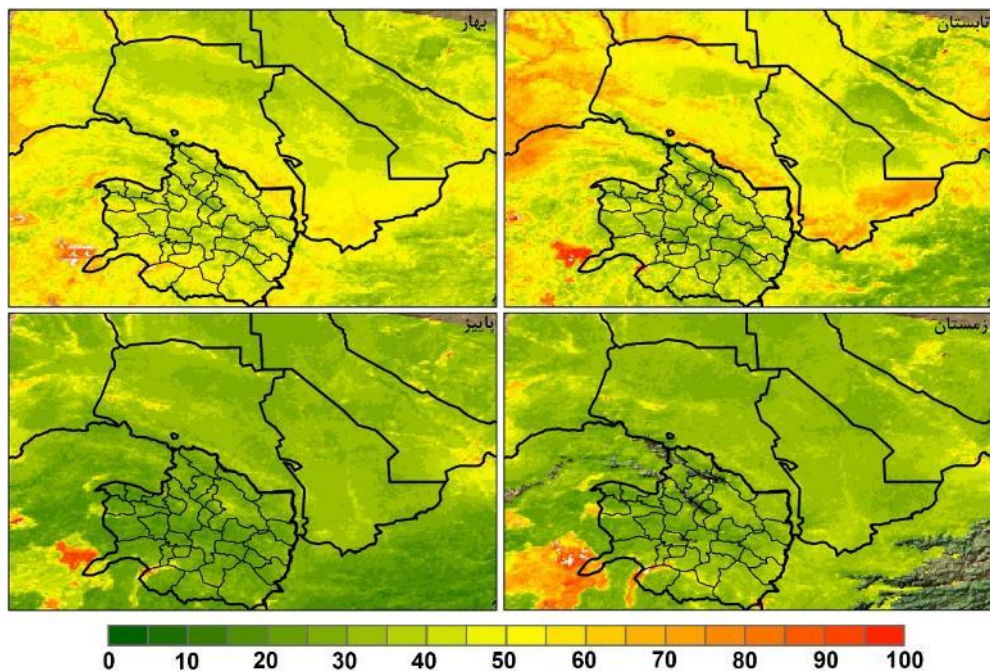
همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بخش عمده انتشارات ذرات گرد و غبار در فصل بهار برای دید ۱۰۰۰ متر از شمال غرب، شمال، شمال شرقی، شرق و بخش کوچکی از محدوده جنوب و جنوب غربی به سرخس وارد می‌شوند. در فصل تابستان این ذرات از شمال و در پاییز بخش عمده آن از غرب و جنوب غربی و شمال غرب و به میزان کمتر از شمال شرقی و در زمستان جهت جریان ورودی از غرب و جنوب غرب است. برای دید افقی ۵۰۰۰ متر در فصل بهار بخش عمده جریانات ورودی از بخش‌های شمالی و در ماه آوریل بخش کوچکی از آن‌ها از سمت غرب به سرخس رسیده‌اند، در تابستان این ذرات از قسمت‌های شمالی و در پاییز در ماه اکتبر

بخش عمده جریانات شمالی است و در نوامبر و دسامبر جهت آن به غرب و جنوب غربی تغییر می‌کند. در زمستان نیز بخش عمده آن از جنوب غرب و به میزان کمتر از شمال غرب و غرب به منطقه وارد شده است. برای دید افقی ۵۰۰۰ متر در فصل بهار اکثر جریانات از بخش‌های شمال و شمال شرق و بخش کمتری نیز از غرب و جنوب غربی، در تابستان عمده جریانات شمال و شمال شرقی و تنها بخش کوچکی در ماه سپتامبر از نواحی غرب و جنوب غربی به منطقه وارد شده، در فصل پاییز جریان ورودی اکثراً از بخش‌های غربی شمال غربی و جنوب غربی و میزان کمتری از شمال و شمال شرق، در زمستان نیز شمال غرب، غرب و جنوب غرب است.

فراوانی حضور گرد و غبار

تجزیه و تحلیل توزیع فراوانی حضور شناسایی منابع گرد و غبار فعال در منطقه مورد مطالعه و الگوی فصلی انتشار گرد و غبار آن‌ها نشان می‌دهد که وجود کانون‌های فعال گرد و غبار از سواحل شرقی دریای خزر تا آرال کوم پخش می‌شوند. بیابان در قزاقستان (شکل ۸)، با مناطقی که فراوانی حضور بالاتر از ۸۰٪ در شمال غربی دریای آرال می‌رسد. کویر تازه تشکیل شده آرال قوم در وسط این منطقه قرار دارد. در نتیجه انحراف آب از رودخانه‌های آمودریا و سیردریا برای آبیاری در چهار دهه گذشته، ورودی به دریای آرال به طور قابل توجهی کاهش یافته و منجر به از دست رفتن تقریباً ۷۴.۳ درصد از سطح دریاچه و ۹۰ درصد از دریاچه شده‌است. حجم آب که منجر به تشکیل آرالکوم شد (ایندویتو و همکاران، ۲۰۱۲؛ گرول و همکاران، ۲۰۱۳). Aralkum به‌عنوان منبع بسیار فعال گرد و غبار توسط چندین مطالعه گزارش شده‌است (Wiggs et al., 2003; Groll et al., 2013). بیش‌ترین فراوانی حضور در این منطقه در ماه‌های تابستان و به میزان کمتر در بهار مشاهده شد. در حالی که فعالیت گرد و غبار در این منطقه در پاییز و زمستان کاهش می‌یابد، نقاط داغ فعال در برخی مناطق، به ویژه در دلتای رودخانه اترک و بخش‌های غربی Karakum (شکل ۸)، که در آن فراوانی حضور بیشتر از ۴۰٪ است، باقی می‌ماند. یکی از منابعی که در تحلیل‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌است، دره آمودریا در شمال افغانستان بود که به نظر می‌رسد در طول سال فعال باقی می‌ماند. در بررسی سابقه تحقیق مربوط به ویژگی‌های منابع گرد و غبار در این منطقه مطالعات بسیار کمی منتشر شده‌است (به عنوان مثال اسمیرنوف و همکاران، ۱۹۹۳).

شکل ۸- توزیع مکانی و فصلی فراوانی حضور گرد و غبار برای $DOD > 0.2$



منبع: نگارنده

برای بررسی بین تغییرات سالانه بارگیری گرد و غبار بر روی کانون‌های گرد و غبار شناسایی شده، میانگین مقدار AOD خام (نه DOD) در مناطق با فراوانی حضور بالاتر از ۴۰٪ بررسی شده است. سه منطقه فعال برای بررسی تغییرات AOD، شامل (A) منطقه آرالکوم و پیش آرال، (B) بیابان قزل‌قوم و قزه قوم انتخاب شدند. منطقه پیش آرال کمربندی از مناطق منشأ گرد و غبار فعال است که از فلات Ustyurt در غرب تا صحراهای Betpak-Dala و Muyunkum در قسمت شرقی منطقه آرال امتداد دارد. در طول دوره زمانی مورد مطالعه، به‌ویژه در فصل تابستان، میانگین AOD افزایش ثابتی داشته است. همان‌طور که توسط Micklin (۲۰۰۷) نشان داده شده است، می‌توان به افزایش انتشار گرد و غبار از منابع در این منطقه در نتیجه خشک شدن مداوم دریای آرال و مناطق اطراف آن نسبت داد. میانگین AOD نسبت به Aralkum و Pre-Aral به‌طور کلی در فصول تابستان و بهار بالاتر بوده و در بهار ۲۰۱۴ به حدود ۰.۵ می‌رسد. انحرافات استاندارد مشاهدات AOD نیز در این فصول در مقایسه با پاییز و زمستان در این مناطق

بالتر است. اغلب پوشیده از برف و پوشش مکرر ابر در پاییز و زمستان منجر به تعداد کمتر مشاهدات و انحراف معیار نسبتاً کمتر می‌شود. روند افزایشی به‌طور ناچیز در میانگین مشاهدات AOD بر روی نقاط داغ گرد و غبار فعال ($FO > 40$) در بیابان‌های Karakum و Kyzylkum یافت شد. همانطور که در شکل ۹ ارائه شده‌است، یک تغییر سالانه کمی بیشتر برای مقادیر میانگین AOD در این منطقه مشاهده شد. به‌طور خاص، کاهش نسبتاً شدیدی در سال ۲۰۱۰ مشاهده شد و به‌دنبال آن افزایش در سال ۲۰۱۱ برای تمام فصول به جز زمستان مشاهده شد. از نظر بزرگی مشاهدات AOD تفاوت معنی‌داری بین میانگین AOD فصول غبارآلود (بهار/تابستان) و غیر غبارآلود (پاییز/زمستان) وجود ندارد.

تعیین مناطق برداشت گرد و غبار

نقشه‌های کانون گرد و غبار به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی محصولات روزانه MODIS AOD ارائه شده ما را قادر ساخت تا بینش خوبی از توزیع مکانی و فصلی انتشار گرد و غبار در منطقه داشته باشیم، اما جزئیاتی در مورد مکان دقیق منابع گرد و غبار را نمی‌توان بدین طریق به‌دست آورد. نقشه‌های قبلی مناطق حضور گرد و غباری را نشان می‌دهد که ممکن است خود منشأ گرد و غبار نباشند. اطلاعات دقیق در مورد مکان دقیق منابع نقطه ای گرد و غبار یک پیش نیاز کلیدی برای نسبت دادن ویژگی‌های سطحی منابع گرد و غبار، به‌ویژه در چشم‌انداز ناهمگن پلاهای بیابان‌های منطقه مورد مطالعه است. در این جا نتایج تشخیص منبع برداشت گرد و غبار، با استفاده از روش توصیف شده ارائه می‌شود. هدف از بررسی توده‌های گرد و غبار در تصاویر MODIS DEP تعیین محل دقیق منابع نقطه‌های گرد و غبار (DPS) به منظور ارائه بینشی روشن به ویژگی‌های مکانی و زمانی انتشار گرد و غبار، ویژگی‌های سطحی و کنترل‌های هواشناسی انتشار گرد و غبار در بخش‌هایی از آسیای مرکزی است. برای دستیابی به این هدف، دو تصویر MODIS DEP برای هر روز از ماهواره‌های Terra و Aqua تولید شد که طی یک دوره زمانی ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ به دست آمد. مکان دقیق هر DPS (در صورت قابلیت تشخیص)، و همچنین شرایط هواشناسی در زمان و مکان انتشار گرد و غبار، تجزیه و تحلیل پایگاه داده DPS یک فرصت منحصر به فرد را برای ایجاد فهرست دقیق منابع انتشار گرد و غبار در این منطقه در اختیار ما قرار داد. برای این کار منابع گرد و غبار را در مقیاس زیر حوضه تعیین

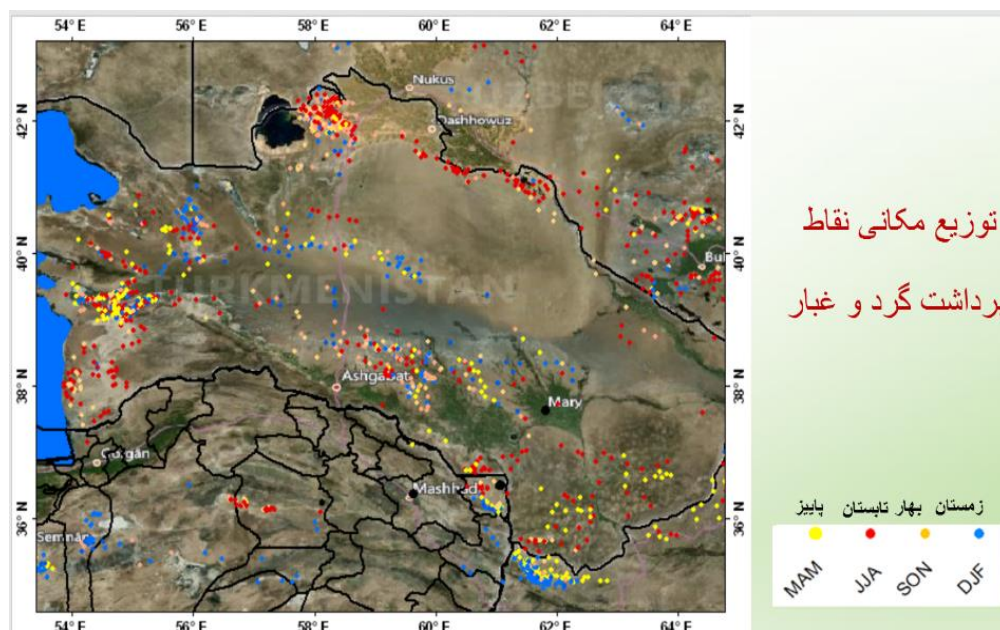
می‌شود، و تنوع زمانی فعالیت آن‌ها، ویژگی‌های سطح مناطق منبع، و شرایط سینوپتیک برای انتشار گرد و غبار بررسی می‌شود.

توزیع مکانی و زمانی منابع نقطه ای گرد و غبار

شکل ۹ توزیع مکانی نقاط برداشت را نشان می‌دهد که در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۱ و در محدوده مناطق انتشار منابع ردوغبار شناخته شده، گروه‌بندی و شناسایی شده‌اند. اولین نتیجه مهمی که از بازرسی کلی این نقشه به دست می‌آید، این است که ارتباط واضحی بین سیستم‌های اصلی رودخانه و غلظت نقاط برداشت وجود دارد. یک مورد خاص بیابان قره قوم و قیزیل قوم است که در آن‌ها غلظت‌های بالای نقاط برداشت در دشت‌های آبرفتی آمودریا و سیردریا مشهود است. دشت سیلابی منطقه علیا آمودریا در شمال افغانستان، نمونه قابل توجه دیگری از پیوند قوی بین سیستم‌های رودخانه‌ای و انتشار گرد و غبار است.

علاوه بر دشت‌های سیلابی رودخانه‌های اصلی، دریاچه‌های خشک شده و زودگذر نیز منبع بسیار فعال گرد و غبار در منطقه به نظر می‌رسد. تعداد بالایی از نقاط در دریاچه آرال قوم و دریاچه ساریگامیش (Sarygamysh) واقع در شمال کویر قره‌قوم مشخص شده‌است، جایی که وجود رسوبات آبرفتی نهشته شده، همراه با خشک‌سالی‌های مکرر و بادهای شدید، این مناطق را برای انتشار گرد و غبار مساعد می‌کند. الگوی متمایز دیگری در منطقه پیش آرال مشاهده می‌شود که به صورت کمربندی از فرورفتگی خزر در غرب از طریق فلات Ustyurt تا صحرای Betpak Dala در شرق امتداد یافته است.

شکل ۹- توزیع نقاط برداشت گرد و غبار در بخش‌هایی از آسیای مرکزی، ۲۰۰۰-۲۰۲۱. مخفف‌های منطقه عبارتند از: Ustyurt Plateau (US)، بیابان Betpak Dala (BD)، آرال قوم (AK)، قزل‌قوم (KZ)، قره قوم (KK)، بالادست آمودریا (UA) پس‌زمینه نقش برجسته ارتفاعی منطقه می‌باشد (بروز شده با ... و همکاران، ۲۰۱۹)



منبع: نگارنده و Nobakht et al, 2019

برای بررسی بیشتر توزیع مکانی نقاط برداشت شناسایی شده، تعداد روزهای با نقاط ثبت شده را بر روی یک شبکه ۱ درجه که منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد، محاسبه شد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که فعال‌ترین منابع در قسمت شرقی و جنوبی دریاچه خشک شده آرال و سپس سواحل شرقی دریای خزر و بخش‌های شمال افغانستان در نزدیکی استان فاریاب و غرب قندوز قرار گرفته است که میانگین تعداد روزهای گرد و غباری در آن به ۳۰ تا ۴۰ روز در سال می‌رسد. بیش‌ترین تعداد روزهای با انتشار گرد و غبار در صحرای آرال قوم رخ داده است به‌طور میانگین بیش از ۲۵ روز گرد و غبار در سال در این منطقه ثبت شده است. در منطقه سرخس و قره قوم نیز تعداد ۱۰ تا ۲۰ روز گرد و غبار به ثبت رسیده است.

منطقه آرال قوم با بیش از ۳۰ روز گرد و غبار در بخش مرکزی بستر دریاچه خشک شده است. کف دریاچه آرال سابق یک بیابان ساخته شده توسط انسان شناخته شده است که در حال تبدیل شدن به منبع غالب طوفان‌های گرد و غبار و نمک در منطقه است. انتشار فزاینده گرد و غبار از سواحل دریای آرال سابق در چندین مطالعه گزارش شده است (به عنوان مثال Indoitu et al., 2012). تعداد کمتر اما هم‌چنان قابل توجهی از روزهای گرد و غباری در جنوب

غربی آرال قوم، جایی که منابع فعال در امتداد کانال رودخانه خشک Uzboy گسترش دارند، ثبت شده‌است. رودخانه خشک اوزبوی زمانی از دریاچه ساریگامیش به سمت دریای خزر می‌رفت و آب اضافی را از دریای آرال و شاخه‌های غربی رود آمودریا به سواحل شرقی دریای خزر می‌برد (ولپچکو و همکاران، ۲۰۰۲). این کانال ۷۵۰ کیلومتری حداقل ۸۰۰ سال است که خشک شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص شده‌است، تعداد قابل توجهی از روزهای غبارآلود در دلتای این رودخانه خشک شده مشاهده شده است.

منطقه آمودریای علیا در شمال افغانستان یکی دیگر از مناطق منبع گرد و غبار بسیار فعال است که تعداد زیادی طغیان گرد و غبار را تجربه کرده‌است که اطلاعات بسیار کمی در مورد آن در دسترس است (به عنوان مثال، میدلتون، ۱۹۸۶). مطالعات میدانی بسیار کمی در این بخش از شمال افغانستان به دلیل بی‌ثباتی سیاسی طولانی مدت در این کشور انجام شده است. علاوه‌بر آن، بسیاری از مطالعات در مورد انتشار گرد و غبار در آسیای مرکزی عمدتاً بر کشورهای آسیای مرکزی اتحاد جماهیر شوروی سابق یعنی ترکمنستان، ازبکستان، تاجیکستان، قرقیزستان و قزاقستان متمرکز شده‌است (به عنوان مثال، Lioubimtseva et al., 2005; Lioubimtseva et al., همکاران، ۲۰۰۹؛ گروول و همکاران، ۲۰۱۳؛ شن و همکاران، ۲۰۱۶). میانگین روزهای گرد و غباری در این منطقه نزدیک به ۳۰ روز در سال می‌رسد. مناطق منبع گرد و غبار با بین ۱۰ تا ۲۰ روز گرد و غبار در سال نیز در منطقه پیش آرال شناسایی شد که از فرورفتگی خزر به کویر بتپاک-دالا گسترش یافته است (شکل ۱۰).

توزیع مکانی و زمانی انتشار گرد و غبار با تجزیه و تحلیل میانگین تعداد روزهای گرد و غبار در هر فصل و به‌عنوان درصدی از تعداد کل روزهای گرد و غبار سالانه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ این آمار را برای هر فصل نشان می‌دهد. اکثر مناطق منبع گرد و غبار در فصل بهار فعال هستند، به‌ویژه فراوانی روزهای گرد و غبار در آرال قوم و شرق دریای خزر، دو منطقه فعال منطقه مورد مطالعه، در فصل بهار به حداکثر خود می‌رسد. بیشتر انتشار گرد و غبار از منابع آرال قوم تا دریای خزر در فصل بهار ثبت شده‌است. اوج انتشار گرد و غبار در بیابان‌های قره قوم و قیزیلکوم در تابستان و اوایل پاییز رخ می‌دهد. برای برخی از مناطق این بیابان‌ها ۸۰ درصد از کل روزهای دارای انتشار گرد و غبار در تابستان ثبت شده‌است. بیش‌ترین سهم فصلی انتشار گرد و غبار در منطقه پره آرال نیز در تابستان ثبت شده است.

اگرچه برخی از مناطق منبع به‌عنوان مثال آرال قوم و آمودریای علیا هنوز در طول پاییز به-ویژه در ماه مهر فعال می‌مانند، اما شدت کلی انتشار گرد و غبار در این فصل کاهش می‌یابد؛ زیرا بارش در آبان-آذر افزایش پیدا می‌کند (آیزن و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین انتشار گرد و غبار به‌طور مشخص در طول فصل زمستان به‌ویژه در عرض جغرافیایی بالاتر به دلیل پوشش مداوم برف در طول ماه‌های سرد سال کاهش می‌یابد.

در مجموع، اکثر بخش‌های منطقه مورد مطالعه در تابستان بیش‌ترین فعالیت گرد و غبار را تجربه می‌کند. این مناطق شامل صحرای آمودریا علیا، فلات Ustyurt، کویر Betpak Dala، قره قوم و قیزیل قوم می‌شود. تنها مورد استثنا در مناطق غربی آرال قوم است، جایی که فعالیت گرد و غبار در بهار به اوج خود می‌رسد اما در تابستان نیز فعال باقی می‌ماند.

به غیر از کویر آرال قوم، حداکثر تعداد روزهای گرد و غبار در تمام مناطق منشأ در بخش غربی منطقه مورد مطالعه ما در ژوئن (خرداد) تا سپتامبر (شهریور) رخ می‌دهد. این مکانیسم متفاوتی را برای توده گرد و غبار در آرالکوم در مقایسه با سایر مناطق نشان می‌دهد. اگرچه تابستان فصل غالب از نظر انتشار گرد و غبار است اما ماه‌هایی که در آن حداکثر روزهای گرد و غبار ثبت شده در مناطق مختلف متفاوت است. انتشار گرد و غبار در منطقه آمودریای علیا در ماه ژوئن (خرداد) به اوج خود می‌رسد، در حالی که ماه‌های اوج در قیزیل قوم و قره قوم در اوت (مرداد) و سپتامبر (شهریور) است. فعالیت‌های گرد و غبار در این مناطق به‌طور قابل توجهی در ماه‌های سرد، بین نوامبر (آبان) و فوریه (دی)، ضعیف می‌شود. منطقه مورد مطالعه یک منطقه وسیع با مناظر و آب‌وهوای متنوع است، بنابراین فعالیت‌های گرد و غبار در مقیاس سالانه و بین سالانه بسیار متغیر است. برای بررسی بیشتر تغییرات بین سالانه و درون سالانه در انتشار گرد و غبار، کنترل‌های سینوسی انتشار غبار و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منابع غبار، منابع اصلی گرد و غبار منطقه به چهار منطقه دسته‌بندی شد. این دسته بندی بر اساس موقعیت جغرافیایی و شباهت الگوی فصلی انتشار گرد و غبار انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است، هر دو بیابان قره قوم و قزل‌قوم انتشار فصلی گرد و غبار مشابهی را نشان می‌دهند و با هم قسمت اصلی حوضه دریای آرال را تشکیل می‌دهند. از این‌رو، برای هدف تجزیه‌وتحلیل، آن‌ها به‌عنوان یک منطقه در نظر گرفته می‌شوند. همچنین کمربند منابع فعال گرد و غبار که از فلات Ustyurt تا صحرای Betpak Dala کشیده شده‌است، به-عنوان منطقه منبع پیش آرال در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه گیری

نتایج تشخیص نقاط گرد و غبار با استفاده از MODIS AOD را ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل فراوانی وقوع از $DOD > 0.2$ چندین کانون فعال گرد و غبار را در منطقه مورد مطالعه نشان داد. به طور خاص، بخش‌های شرقی آرال به عنوان کانون اصلی گرد و غبار با بیشترین فعالیت در ماه‌های بهار مشخص شد. در طول تابستان کانون گرد و غبار با FO بالا (۶۰-۸۰٪) در منطقه بین سواحل شرقی دریای خزر تا سمت شرقی آرال قوم مشخص شد. بالاترین FO در این منطقه مربوط به صحرای سنگی فلات Ustyurt در ضلع غربی آرالکوم و هم‌چنین مناطق پیش آرال است. تغییرات بین سالانه AOD در مناطقی با FO بالاتر از ۴۰٪ افزایش ثابتی در میانگین AOD در مناطق Pre-Aral, Aralkum, Karakum-Kyzylkum نشان می‌دهد. ارتباط واضحی بین سیستم‌های رودخانه‌ای و غلظت نقاط برداشت گرد و غبار وجود دارد. همین‌الگو در Karakum-Kyzylkum، باتراکم بالای برداشت گرد و غبار مشاهده شده در امتداد دشت‌های رودخانه‌ای رودخانه‌های آمودریا و سیردریا آشکار بود. تعداد زیادی از مناطق برداشت نیز با مخروط‌های اصلی منطقه مانند مخروط‌هایی که در خروجی رودخانه‌های مرغاب، تدژن و بلخ تشکیل شده‌اند، مرتبط هستند. بررسی تغییرات ماهانه در تعداد روزهای گرد و غبار باعث شده‌است تا منابع اصلی گرد و غبار را در چهار منطقه منبع گرد و غبار دسته بندی شود. پس از آن، دو جنبه از تشکیل طوفان گرد و غبار از جمله ویژگی‌های سطح زمین و درون سالانه در انتشار گرد و غبار، و کنترل سینوپتیک در انتشار گرد و غبار و جهت باد توده‌های گرد و غبار در این مناطق مورد بررسی قرار گرفته‌است. آرال قوم به یکی از مهم‌ترین منابع گرد و غبار در آسیای مرکزی تبدیل شده‌است. با انتقال گرد و غبار غالب به سمت مناطق پرجمعیت غرب آسیا و منطقه خزر و شمال شرق ایران، انتشار گرد و غبار از این منطقه به‌طور بالقوه می‌تواند نه تنها بر اکوسیستم بلکه بر سلامت انسان تأثیر بگذارد. مدل‌سازی دقیق انتقال گرد و غبار از این منطقه مورد نیاز است و دانش مکان‌های منبع غبار ورودی مهمی برای مطالعات مدل‌سازی آینده خواهد بود.

افزایش قابل توجهی در انتشار گرد و غبار از آرال قوم در طول دوره زمانی مطالعه مشاهده شده است. این افزایش از تجزیه و تحلیل مشاهدات AOD و نقاط برداشت مشهود است. روند افزایشی کمتر قابل توجهی نیز در منطقه Karakum-Kyzylkum مشاهده شده‌است. چگالی بسیار بالایی از نقاط برداشت در منطقه آرالکوم و آمودریای بالایی در مقایسه با سایر مناطق منبع گرد و غبار مشخص شده‌است. منطقه آمودریای علیا، از مناطق فعال گرد و غبار است. نزدیک به

۸۰ درصد از منابع گرد و غبار در این منطقه با تخریب شدید پوشش گیاهی است. یک تغییر متمایز در مکان کانون‌های گرد و غبار به دست آمده از تجزیه و تحلیل فراوانی حضور مشاهدات AOD، در مقایسه با مکان رکوردهای برداشت مشاهده شده است. جایی که غلظت گرد و غبار بالاترین است، که لزوماً نقاط منابع تولید گرد و غبار نیست. این تغییر در مناطق منبعی که تحت تأثیر رژیم‌های باد شدید قرار دارند (مانند آرال قوم) بیشتر قابل توجه است. از نظر اقلیم شناسی انتشار گرد و غبار، مشخص شد که رویدادهای گرد و غبار ارتباط نزدیکی با تشکیل الگوهای دوقطبی قوی با شیب شدید بین ناهنجاری‌های فشار بالا و ناهنجاری‌های فشار پایین بر روی مناطق منبع گرد و غبار دارد. هر چند این مطالعه مناطق اصلی انتشار گرد و غبار را شناسایی کرده است ولی هر منطقه به تحلیل عمیق تری برای شناسایی بیشتر نیاز دارد و می‌تواند تمرکز یک پروژه تحقیقاتی بیشتر باشد که شامل توصیف دقیق تر ویژگی‌های سطح زمین، شرایط هواشناسی از طریق مشاهدات ابزاری مبتنی بر زمین، و مدل‌سازی انتقال گرد و غبار از منطقه باشد.

تجزیه و تحلیل دقیق منطقه‌ای می‌تواند بهبود در مدیریت زمین به ویژه در مناطقی که گرد و غبار از منابع ایجاد شده از طریق فعالیت‌های انسانی نشأت می‌گیرد، را فراهم کند. این مطالعه فقط به انتقال گرد و غبار از مناطق منبع شناسایی شده پرداخته است. تجزیه و تحلیل دقیق تر، شامل مطالعات مدل‌سازی تأثیر دامنه اثر، مورد نیاز است. مناطق رسوب گرد و غبار نیز باید با تمرکز ویژه بر روی مناطق مسکونی و کشاورزی نیز مورد بررسی قرار گیرند که علاوه بر تأثیر بر سلامتی، محصولات را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به اینکه بخش اعظم برداشت گرد و غبار در کشور ترکمنستان و ایران، در حوضه آبریز قره‌قوم به صورت مشترک در شرق و شمال خراسان رضوی و ترکمنستان قرار دارد حوضه-ایی که در حال حاضر یکی از پیچیده‌ترین مسائل محیط زیستی را در بین دو کشور ایجاد کرده است؛ از جمله این مسائل، انتشار گرد و غباری است که به شدت دو کشور و حتی کشورهای افغانستان و پاکستان را تحت تأثیر قرار داده است. از طرفی دیگر، مسائل و مشکلات محیط زیستی و گرد و غبار ناشی از خشک شده دریاچه آرال نیز باعث شده است که کشور ترکمنستان و ایران و به خصوص استان خراسان رضوی تحت تأثیر قرار گیرد. در حالی که هنوز تحقیقات علمی و فنی جامعی در مورد شناخت و حل این مسائل صورت نگرفته است. در کنار این مسائل، اشتراکات و مبادلات فرهنگی و تجاری بین شهرهای مرزی ایران و ترکمنستان، مشترک بودن حوزه آب‌خیزهای مرزی و رویشگاه‌های طبیعی و زیست‌گاه‌های جانوری مشترک و فاصله نزدیک

مرکز ترکمنستان تا ایران به‌خصوص خراسان رضوی که امکان رفت‌وآمد محققان و مسؤلان ذی-ربط را تسهیل می‌کند، فرصت ارتباط بیشتر را در این زمینه فراهم کرده است و از طرفی، وجود مراکز علمی بزرگ در شمال شرق ایران، تشکیل گروه‌های همکاری مشترک جهت انجام تحقیقات علمی و همکاری های فنی در زمینه موضوعات مشترک و یافتن راه‌کار برای رفع مشکلات محیط‌زیستی فی‌مابین ضروری می‌باشد. تهیه سند همکاری های علمی و فنی محیط زیستی بین دو کشور از ضرورات برای رفع مشکل برداشت و کنترل گرد و غبار است. بنابراین وجود یک دیپلماسی فعال بین دو کشور برای حل این مسائل محیط زیستی اجتناب ناپذیر است.

منابع و مأخذ

- Alizadeh-Choobari O., Zawar-Reza, P., Sturman, A (2014), "The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin", *Atmos. Res.* 143, 328–341.
- Alizadeh-Choobari, O., Ghafarian, P., Owlad, E (2016), "Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations". *Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.4479>.
- Anokhin, G.G., Antokhin, P.N., Arshinov, M.Yu., Barsuk, V.E., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Kozlov, V.S., Morozov, M.V., Panchenko, M.V., Penner, I.E., Pestunov, D.A., Sikov, G.P., Simonenkov, D.V., Sinityn, D.S., Tolmachev, G.N., Filipov, D.V., Fofonov, A.V., Chernov, D.G., Shamanaev, V.S., & Shmargunov, V.P (2011), "OPTIK Tu-134 aircraft laboratory". *Atmospheric and Oceanic Optics*, 24(9), 805–816.
- Antokhin, P. N., Arshinov, M. Yu., Belan, B. D., Davydov, D. K., Zhidovkin, E. V., Ivlev, G. A., Kozlov, A. V., Kozlov, V. S., Panchenko, M. V., Penner, I. E., Pestunov, D. A., Simonenkov, D. V., Tolmachev, G. N., Fofonov, A. V., Shamanaev, V. S., & Shmargunov, V. P (2012), "Optik-É AN-30 aircraft laboratory for studies of atmospheric composition". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(1), 64–75. <https://doi.org/10.1175/2011JTECHA1427.1>
- Antokhin, P.N., Arshinova, V. G., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Ivlev, G.A., Fofonov, A.V., Kozlov, A.V., Paris, J.-D., Nedelec, P., Rasskazchikova, T.M., Savkin, D.E., Simonenkov, D.V., Sklyadneva, T.K., & Tolmachev, G.N (2018), "Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(4), 2285–2297. <https://doi.org/10.1002/2017JD026825>.
- Arangeldyev A, Zhumashov AP (1992), "Peculiarities of relief formation and development in the Karakum. Karakum Desert and Thar Desert". *Ylym, Ashgabat*
- Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Voronetskaya, N.G., Davydov, D.K., Dyachkova, A.V., Ivlev, G.A., Kozlov, A.S., Pevneva, G. S., Simonenkov, D.V., Tolmachev, G.N., & Fofonov, A.V (2019), "Joint study of inorganic and hydrocarbon

components of tropospheric aerosol in the atmosphere over the boreal area of the south of Western Siberia by using the "Optik" Tupolev-134 aircraft laboratory". Proceedings of SPIE, 112087X. <https://doi.org/10.1117/12.2540817>

- Babaev AG, Zonn IS, Drozdov NN, Freikin ZG (1986) Deserts. Mysl, Moscow
- Banks, J. R., Schepanski, K., Heinold, B., Hünerbein, A., & Brindley, H. E (2018), "The influence of dust optical properties on the colour of simulated MSG-SEVIRI Desert Dust infrared imagery". Atmospheric Chemistry and Physics, 18(13), 9681–9703. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9681-2018>
- Belan, B.D., Balin, Yu.S., Banakh, V.A., Belov, V.V., Kozlov, V.S., Nevzorov, A.V., Odintsov, S.L., Panchenko, M.V., & Romanovskii, O.A (2018), "Development of Remote and Contact Techniques for Monitoring the Atmospheric Composition, Structure, and Dynamics". Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016". Springer Nature, 679–691. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_71
- Belan, B.D., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Rasskazchikova, T.M., Simonenkov, D.V., & Tolmachev, G.N (2018), "Typisation of the chemical composition of the tropospheric aerosol of the south of Western Siberia by the air mass". Proceedings of SPIE, 108338J. <https://doi.org/10.1117/12.2504604>.
- Belan, B.D., Rasskazchikova, T.M., Simonenkov, D.V., & Tolmachev, G.N (2015), "The chemical and disperse composition of atmospheric aerosol in different layers of the troposphere background area of south of Western Siberia and its seasonal features on result of airborne sounding by Tupolev-134 "Optik"". Proceedings of SPIE, 96804J. <https://doi.org/10.1117/12.2205883>
- Belan, B.D., Rasskazchikova, T.M., Simonenkov, D.V., Tolmachev, G.N., & Fofonov, A.V (2016), "Chemical composition of atmospheric aerosols over background areas of the southern part of Western Siberia observed during the IAO Complex Atmospheric Radiation Experiment carried out in December 2015". Proceedings of SPIE, 1003549. <https://doi.org/10.1117/12.2249244>
- Cao, H., Amiraslani, F., Liu, J., Na, Zhou (2015a), "Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets". Sci. Total Environ. 502, 224–235.
- Das, P. K., Dutta, D., Sharma, J. R. and Dadhwal, V. K (2016), "Trends and behaviour of meteorological drought (1901–2008) over Indian region using standardized precipitation–evapotranspiration index". International journal of climatology, 36(2), 909-916.
- Ebrahimi-Khusfi, Z., Soleimani, S.M (2021), "Recent changes in physical properties of the land surface and their effects on dust events in different climatic regions of Iran". Arab. J. Geosci. 14, 287, 107499, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06664-9>.
- Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Mirakbari, M (2020), "Evaluation of machine learning models for predicting the temporal variations of dust storm index in arid regions of Iran". Atmos. Poll. Res., <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.029>.
- El-Kenawy, A. M., Al Buloshi, A., Al-Awadhi, T., Al Nasiri, N., Navarro-Serrano, F., Alhatrushi, S. and Vicente-Serrano, S. M (2020), "Evidence for intensification of meteorological droughts in Oman over the past four decades". Atmospheric Research, 246, 105126.
- Gaetani M, Pasqui M (2012), "Synoptic patterns associated with extreme dust events in the Mediterranean Basin". Reg. Environ. Change 14: 1847–1860, doi: 10.1007/s10113-012-0386-2.

- Ghadami, M., Razi, T., Amini, M., Modarres, R (2020), “Regionalization of drought severity–duration index across Iran”, *Natural Hazards* <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04103-8>.
- Gillette, D. A. (1999). “A qualitative geophysical explanation for ‘hot spot’ dust emitting source regions”. *Contributions to atmospheric physics*, 72.
- Gorchakov, G.I., Koprov, B.M., & Shukurov, K.A (2003), “Arid submicron aerosol transport by vortices. *Izvestiya*”, *Atmospheric and Oceanic Physics*, (5), 596–608. https://www.researchgate.net/publication/287056137_Arid_submicron_aerosol_transport_by_vortices
- Gorchakov, G.I., Koprov, B.M., & Shukurov, K.A (2004), “Wind effect on aerosol transport from the underlying surface. *Izvestiya*”, *Atmospheric and Oceanic Physics*, (6), 759–775. https://www.researchgate.net/publication/286981084_Wind_effect_on_aerosol_transport_from_the_underlying_surface/stats
- Goudie, A., Middleton, N. (Eds.), 2006. *Desert Dust in the Global System*. Springer
- Hamidianpour, M, AmirJahanshahi, SM., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., Nastos, P. G (2021), “Climatology of the Sistan Levant wind: Atmospheric dynamics driving its onset, duration and withdrawal”, *Atmospheric Research*, Volume 260, 1 October 2021, 105711
- Hennen, M., Chappell, A., Webb, N., Schepanski, K., Baddock, M., Eckardt, F., ... & von Holdt, J (2022), “Evaluating dust emission model performance using dichotomous satellite observations of dust emission”. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1-28.
- Huneus, N., M. Schulz, Y. Balkanski, J. Griesfeller, J. Prospero, S. Kinne, S. Bauer, O. Boucher, M. Chin, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, A. Grini, L. Horowitz, D. Koch, M. C. Krol, W. Landing, X. Liu, N. Mahowald, R. Miller, J.-J. Morcrette, G. Myhre, J. Penner, J. Perlwitz, P. Stier, T. Takemura, and C. S. Zender (2011), “Global dust model intercomparison in AeroCom phase I”, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7781–7816, doi:10.5194/acp-11-7781-2011.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, E. F. Vermote, E. Masuoka, R. E. Wolfe, N. Saleous, D. P. Roy & J. T. Morisette (2002), “An overview of MODIS Land data processing and product status”. *Remote sensing of environment* 83.3-15
- Karami, S., Hamzeh, H.N., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., Alam, K., Ranjbar, A (2021), “Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: The case of Aral Sea and Sistan Basin”, *Aeolian Research*, Vol 50, March 2021, 100679; <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100679>.
- Kasianov KS (1976), *Dynamics of soil wind erosion processes*. Nauka, Moscow
- Kaskaoutis, D. G., Francis, D., Rashki, A., Chaboureaud, J.P., Umesh, D.C., (2019). “Atmospheric Dynamics from Synoptic to Local Scale During an Intense Frontal Dust Storm over the Sistan Basin in Winter 2019”, *Geosciences*, 9, 453; doi:10.3390/geosciences9100453.
- Kaskaoutis, D.G., Houssos, E.E., Minvielle, F., Rashki, A., Chiapello, I., Dumka, U.C., Legrand, M (2018b), “Long-term variability and trends in the Caspian Sea – Hindu Kush Index: influence on atmospheric circulation patterns, temperature and rainfall over the Middle East and southwest Asia”. *Glob. Planet. Change* 169, 16–33.
- Kaskaoutis, D.G., Houssos, E.E., Rashki, A., Francois, P., Legrand, M., Goto, D., Bartzokas A., Kambezidis H.D., Takemura T (2016), “The Caspian Sea – Hindu

Kush Index (CasHKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia". *Glob. Planet. Change* 137, 10–23.

- Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Houssos, E.E., Legrand, M., Francois, P., Bartzokas, A., H. D. Kambezidis, Dumka U. C., Goto D., Takemura T (2017), "Assessment of changes in atmospheric dynamics and dust activity over southwest Asia using the Caspian Sea – Hindu Kush Index". *Intern. J. Climat.* 37 (Suppl. 1), 1013–1034.
- Kirsta VT (1992), Water resources of the Karakum Desert. In *Karakum Desert and Thar Desert*. Ylym, Ashgabat
- Knippertz, P., & Todd, M. C. (2010). "The central west Saharan dust hot spot and its relation to African easterly waves and extratropical disturbances". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D12).
- Kutiel, H., Furman, H (2003), "Dust storms in the Middle East: sources of origin and their temporal characteristics". *Indoor Built Environ.* 12 (6), 419–426. <http://dx.doi.org/10.1177/1420326X03037110>.
- Li, Y., Song, Y., Kaskaoutis, D.G., Chen, X., Mamadjanov, Y., Tan, L (2019), "Atmospheric dust dynamics in southern Central Asia: Implications for buildup of Tajikistan loess sediments". *Atmos. Res.* 229, 74-85.
- Lin, X. Wang, S., Zhou, Y., Wang, F., Li, W. and W. Liu (2015), "Regionalization and Spatiotemporal Variation of Drought in China Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (1961–2013)", *Advances in Meteorology*, 1-18.
- Mahowald, N.M.; Engelstaedter, S.; Luo, C.; Sealy, A.; Artaxo, P.; Benitez-Nelson, C.; Bonnet, S.; Chen, Y.; Chuang, P.Y.; Cohen, D.D.; et al (2009), "Atmospheric iron deposition: Global distribution, variability, and human perturbations". *Ann. Rev. Mar. Sci.* 1, 245–278.
- Mansoori, J (1995), Islamic Republic of Iran. In: Scott, D.A. (Ed.), *A Directory of Wetlands in the Middle East* (available from <http://www.earthspace.org/rl/es15056/scd01h.html>).
- Mao K.B., Y. Ma, L. Xia, Wendy Y. Chen, X.Y. Shen, T.J. He, T.R. Xu (2014), "Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data", *Atmospheric Environment* 94 (2014) 680-686
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Martin-Vide, J., Bech, J. and Rodrigo, F. S (2018), "Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012". *Atmospheric Research*, 200, 153-168.
- McMahon, H (1906), "Recent survey and exploration in Seistan". *Geogr. J.* 28, 209–228.
- Middleton, N.J (1986), "A geography of dust storms over southwest Asia". *J. Climatol.* 6, 183–196.
- Miller, R. L., J. Perlwitz, and I. Tegen (2004), "Modeling Arabian dust mobilization during the 41 Asian summer monsoon: The effect of prescribed versus calculated SST", *Geophys. Res. Lett.*, 31,L22214.
- Mohammadpour, K., Sciortino, M., Kaskaoutis, D.G (2021b), "Classification of weather clusters over the Middle East associated with high atmospheric dust-AODs in West Iran", *Atmospheric Research*, 22, 105682; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105682>.
- Mohammadpour, K., Sciortino, M., Saligheh, M., Razinei, T., Darvishi Boloorani, A (2021), "Spatiotemporal regionalization of atmospheric dust based on multivariate analysis of MACC model over Iran", *Atmospheric Research*, 249,105322; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105322>.

- Mona L, Amodeo A, Pandolfi M, Pappalardo G (2006), "Saharan dust intrusions in the Mediterranean area: Three years of Raman lidar measurements". *J. Geophys. Res.* 111: D16203, doi: 10.1029/2005JD006569.
- Nabavi Seyed Omid, Leopold Haimberger, Cyrus Samimi (2017), "Sensitivity of WRF-chem predictions to dust source function specification in West Asia", *Aeolian Research* 24 (2017) 115–131; <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.005>.
- Najafi, M.S., Khoshakhllagh, F., Zamanzadeh, S.M., Shirazi, M.H., Samadi, M., Hajikhani, S (2014), "Characteristics of TSP loads during the Middle East springtime dust storm (MESDS) in Western Iran". *Arab. J. Geosci.* 7 (12), 5367–5381
- Nobakht, M (2018), *Characterisation of dust sources in Central Asia using remote sensing* (Doctoral dissertation, University of Reading).
- Nobakht, M., Shahgedanova, M., & White, K (2015), "High resolution mapping of dust sources in Central Asia using MODIS imagery". *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 7567).
- Nobakht, M., Shahgedanova, M., & White, K (2017), "A new dust source map of Central Asia derived from MODIS Terra/Aqua data using dust enhancement techniques". *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 5641).
- Nobakht, M., Shahgedanova, M., & White, K (2019), "New inventory of dust sources in Central Asia derived from the daily MODIS imagery". *E3S Web Conferences* (Vol. 99). EDP Sciences
- Nobakht, M., Shahgedanova, M., & White, K (2021), "New inventory of dust emission sources in Central Asia and Northwestern China derived From MODIS imagery using dust enhancement technique". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4), e2020JD033382. <https://doi.org/10.1029/2020JD033382>.
- Notaro, M., Yu, Y., Kalashnikova, O.V (2015), "Regime shift in Arabian dust activity, triggered by persistent Fertile Crescent drought". *J. Geophys. Res.* 120. <https://doi.org/10.1002/2015JD023855>.
- Orlovsky N., Orlovsky L., Durdyev A (2005), "Dust storms in Turkmenistan". *J. Arid Environ.* 60 (1), 83–97.
- Orlovsky NS (1992), *Climatic resources of the Karakum*. In: *Karakum Desert and Thar Desert*. Ylym, Ashgabat
- Orlovsky, N. S., Orlovsky, L., Indoitu, R (2013), "Severe dust storms in Central Asia". *Arid Ecosystems*, 3(4), 227–234. <https://doi.org/10.1134/S2079096113040082>
- Petrov MP (1973), *Deserts of the world*. Nauka, Leningrad (in Russian)
- Prospero, J. M., P. Ginoux, O. Torres, S. E. Nicholson, and T. E. Gill (2002), "Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product". *Rev. Geophys.*, 40, 1002, doi:10.1029/2000RG000095.
- Prospero, J.M (1999), "Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality". *J. Geophys. Res.* 104 (D13), 15917–15927.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. (2019). "Assessment of the dust sources over Central and Southwest Asia with emphasis on the Sistan dust storms". *E3S Web of Conferences* (Vol. 99, p. 01002). EDP Sciences.

- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Mofidi, A., Minvielle, F., Chiapello, I., Legrand, M., Dumka, U.C., Francois, P (2019), "Effects of Monsoon, Shamal and Levar winds on dust accumulation over the Arabian Sea during summer – The July 2016 case", *Aeolian Research* 36 (2019) 27–44; <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.11.002>
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Sepehr, A (2018), "Statistical evaluation of the dust events at selected stations in southwest Asia: from the Caspian Sea to the Arabian sea". *Catena* 165, 590–603. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.011>.
- Rashki, A., Middleton, N.J., Goudie, A.S (2021), "Dust storms in Iran – Distribution, causes, frequencies and impacts", *Aeolian Research*, 48 (2021) 100655; <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100655>.
- Sabetghadam, S., Alizadeh, O., Khoshsima, M., Pierleoni, A (2021), "Aerosol properties, trends and classification of key types over the Middle East from satellite-derived atmospheric optical data", *Atmospheric Environment* 246 (2021) 118100; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118100>
- Tsolmon, Renchin, Lkhamjav Ochirkhuyag & Troy Sternberg (2008), "Monitoring the source of trans-national dust storms in north east Asia". *International Journal of Digital Earth* 1.119-29
- Zonn, Igor S., and Paltamet E. Esenov (2012), "The Karakum Desert", In *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan*, pp. 23-37. Springer, Berlin, Heidelberg.