

بررسی و تحلیل جامع رخداد توفان‌های گردوغبار شدید در نیمه شرقی ایران با استفاده از مدل‌های عددی، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی

زهرا یارمرادی، دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
بهروز نصیری^۱، دانشیار گروه اقلیم شناسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
غلام حسن محمدی، کارشناس هواشناسی، آذربایجان شرقی، تبریز، ایران
مصطفی کریمپور، استادیار گروه اقلیم شناسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

توفان گردوغبار یکی از معضلات زیست‌محیطی است که اثرات مخربی بر روی سلامتی انسان، کیفیت هوا و اقتصاد کشورهای جهان می‌گذارد. هدف از این تحقیق تحلیل هم‌دید و شناسایی منشأ گردوغبارهای وارد شده به شرق ایران و ردیابی مسیر حرکت آن‌ها می‌باشد. ابتدا با استفاده از داده‌های دید افقی، تصاویر ماهواره‌ای، شاخص گردوغبار مربوط به ماهواره OMPS و شاخص عمق نوری آئروسول‌ها (AOD)، توفان‌های گردوغبار شرق ایران طی دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. سپس داده‌های فشار، سمت و سرعت باد و ارتفاع ژئوپتانسیل و جریان‌های جتی در سطوح مختلف جوی از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های هواشناسی (ECMWF) با قدرت تفکیک مکانی 0.25×0.25 دریافت شد. در نهایت برای مشخص کردن منشأ شکل‌گیری توفان از مدل HYSPLITE استفاده شد. نتایج نشان داد که ۴۶/۶۷ درصد از توفان‌های منطقه به صورت محلی و ۳۳/۳۳ درصد به صورت انتقال یافته از محل دیگر می‌باشند و ۲۰ درصد نیز به صورت هم‌زمان رخ داده است. نتایج حاصل از مطالعات ماهواره‌ای نشان داد که توفان‌های انتقال یافته معمولاً در جنوب عراق و مرکز عربستان شکل گرفته و سپس به سمت منطقه مورد مطالعه انتقال یافته است که با نتایج حاصل از مدل مقایسه و صحت‌سنجی شد. بررسی‌های هم‌دید این نوع توفان‌ها نیز نشان داد که منشأ سینوپتیکی آن‌ها، باد شمال می‌باشد که در اکثر موارد همگرایی جت استریم جنب‌حاره و قطبی، شرایط مطلوبی برای رخداد توفان‌های شدید گردوغبار فراهم آورده است. نتایج توفان‌های شکل گرفته در خود محل نیز نشان داد که عامل توفان ناشی از گرادبان شدید فشاری، سیکلون و دخالت جریان‌های رودباد است.

کلمات کلیدی: مدل عددی، گردوغبار، HYSPLI، AOD.

مقدمه

رویداد توفان‌های گردوغباری به پدیده‌هایی گفته می‌شود که باعث ایجاد، حمل و نقل و رسوبگذاری گردوغبار در محیط به‌وسیله فرآیندهای بادی شود. این پدیده تحت تاثیر تعامل سیستم اتمسفر-زمین بوده و اغلب در نتیجه سرعت بالای باد، خاک عریان و خشک و شرایط آب و هوایی خشک ایجاد می‌شود (می^۱ و همکاران، ۲۰۰۸؛ میدلتون^۲ و کانگ^۳، ۲۰۱۷؛ میدلتون ۱۹۸۶) و می‌تواند باعث خالی شدن مناطق مسکونی و آسیب‌های جدی بر سلامت انسان (گادی^۴، ۲۰۰۹) و همچنین انتقال و ته‌نشست رسوبات شود (یانگ^۵ و همکاران، ۲۰۰۱). توفان‌های گردوغباری در بین شدیدترین مشکلات محیطی مناطق مشخصی از جهان هستند (مستاینش و پیتابالدو^۶، ۱۹۸۷). این پدیده اغلب با بادهای قوی و آشفته همراه با کاهش قدرت دید (کم‌تر از ۲۰۰ متر) بر مناطق بیابانی و خاک‌های سست و خشک می‌وزد (میدلتون و کانگ، ۲۰۱۷). آن‌ها می‌توانند مقادیر زیادی از ذرات گردوغبار را وارد هوا کرده و تا هزاران کیلومتر دورتر حمل کنند (زوالجودی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳؛ شائو و دونگ^۸، ۲۰۰۶). شدت و شکل‌گیری توفان‌های شن و گردوغبار تحت کنترل سه عامل از جمله بادهای شدید، مواد سطحی سست و مستعد فرسایش بادی و شرایط جوی ناپایدار می‌باشد (ایکسو^۹، ۲۰۰۶؛ ناتساداری^{۱۰}، ۲۰۰۲). این توفان‌ها در ردیف بزرگترین مشکلات جدی محیطی در نواحی مشخصی از جهان هستند و رخداد آن‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک از فراوانی بالاتری برخوردارند (اریموتو^{۱۱}، ۲۰۰۰). که همه ساله خسارات

¹ Mei

² Middleton

³ Middleton and Kang

⁴ Goudie

⁵ Yang

⁶ McTainsh and Pitbaldo

⁷ Zoljoodi

⁸ Shao & Dong

⁹ Xu

¹⁰ Natsagdari

¹¹ Arimoto

جبران ناپذیری را به مزارع، تاسیسات، جاده‌ها، ترافیک و حمل و نقل وارد نموده و با آلوده کردن هوا باعث بروز مشکلات تنفسی می‌شود (لشکری، ۲۰۰۸). به دلیل موقعیت جغرافیایی ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، این کشور مکرراً در معرض سیستم‌های گرد و غبار محلی و سینوپتیک قرار می‌گیرد (گادی، ۱۹۸۳؛ گادی و میدلتون، ۱۹۹۲؛ واشینگتن^۱ و همکاران، ۲۰۰۳؛ انگلستاالت^۲ و همکاران، ۲۰۰۶، کاسکاتیس^۳، ۲۰۱۰). در ایران چاله‌های مرکزی بیشترین تعداد روزهای گردوغباری را دارند، به طوری که در مناطق وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فراوانی وقوع روزهای مذکور به بیش از ۱۵۰ روز در سال می‌رسد (علیجانی و رئیس‌پور، ۲۰۱۱). توفان‌های ماسه و گرد و خاک نه تنها در ایران، بلکه در سایر کشورهای آسیایی، آفریقایی و آمریکایی موجب خسارات مالی و جانی فراوانی می‌شوند (لین^۴، ۲۰۰۲). بیشتر توفان‌های گردوغبار در آسیای مرکزی و قزاقستان در دوره گرم سال روی می‌دهد (رامانوف^۵، ۲۰۰۱). مناطق کوچکی که به منزله یک حوضه توپوگرافی کم ارتفاع همراه با دریاچه‌های خشک شده (حوضه هامون) در مرزهای ایران، افغانستان و پاکستان تشکیل شده‌اند، نقش قابل توجهی در تولید و انتشار گردوغبار دارند (آلام^۶ و همکاران، ۲۰۱۱). تصاویر مادیس کاربردهای فراوانی در بحث گردوغبار دارند و تاکنون مقالات فراوانی درباره کاربرد این تصاویر در شناسایی منابع و تحلیل مسیرهای حرکتی توفان‌های گردوغباری به چاپ رسیده است. سنجنده MODIS^۷، اطلاعات خود را از ماهواره ترا و آکوا دریافت می‌کند که این تصاویر عمق اپتیکی را در تمام سطح کره زمین در مدت زمان ۱ تا ۲ روز به دست می‌دهند و هرچه این عمق کمتر باشد مقدار گردوغبار در جو بیشتر است. از پارامترهای مهم در بررسی

¹ Washington

² Engelstaedter

³ Kaskaoutis

⁴ Lin

⁵ Romanoff

⁶ Alam

⁷ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

هوایزهای ناشی از گردوغبار، عمق اپتیکی هواویز (AOD^۱) است. به طور خلاصه می‌توان عمق اپتیکی کمتر از ۰/۱ را به عنوان شاخص آسمان صاف و بدون گردوغبار و شفاف با حداکثر قابلیت دید به کار برد در حالی که عمق اپتیکی ۴ نشان دهنده حضور حجم متراکمی از هوایزها است که مانع از رسیدن نور خورشید به سطح زمین می‌شوند (اشرفی و همکاران، ۲۰۱۲). یکی از مشکلات اساسی در بررسی آلودگی مانند گردوغبار تعیین کمی رابطه بین کیفیت هوا و چشمه آلودگی است. شناسایی چشمه آلودگی اولین گام در فرآیند تعیین استراتژی موثر بر کنترل آلودگی است. روش‌های مختلفی مانند سنجش از دور، بررسی نقشه‌های هواشناسی، همدیدی، روش‌های عددی و غیره برای این منظور به کار گرفته می‌شود. یکی از راه‌های یافتن منابع آلودگی استفاده از مسیر انتقال جریان هوا است. در این حالت مسیرهای برگشت از نقطه گیرنده می‌تواند محل چشمه را مشخص کند (پتزولد^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). این روش برای نشان دادن نحوه پخش آلودگی و تعیین چشمه بسیار به کار گرفته شده است (روسویو^۳، ۲۰۰۴). خطای محاسبه مسیر به طور معمول حدود ۲۰ درصد است (استول^۴، ۱۹۹۸) که این خطا را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از مسیرها کاهش داد. مدل‌های پخش انتقال ذرات را از چشمه تا مکان نمونه‌گیری توصیف می‌کنند. با استفاده از مدل‌های مشابه می‌توان مکان هوای نمونه‌گیری را به صورت برگشت در زمان محاسبه کرد (دراکسلر و هس، ۱۹۹۸). بنابراین دینامیک باد نقش اساسی در انتقال و پخش ذرات بازی می‌کند (سالازر و همکاران^۵، ۱۹۹۴). روش محاسبه این مدل ترکیبی میان دیدگاه‌های اویلری (مجموع غلظت ذرات در هر شبکه در طول مسیر حرکت تعیین می‌شود) و لاگرانژی (غلظت ذرات برای هر شبکه با استفاده از پخش و انتقال ذرات انجام می‌شود) است و به همین دلیل مدل HYSPLITE^۶ را مدلی دوگانه می‌نامند

^۱ Aerosol optical depth

^۲ Petzold

^۳ Rousseau

^۴ Stohl

^۵ Salazar

^۶ Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

(دراکسلر و هس^۱، ۱۹۹۸). رضازاده و همکاران (۲۰۱۳) کلیماتولوژی توفان‌های گردوغبار خاورمیانه را با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۳ مطالعه کردند. نتایج نشان داد که توزیع جغرافیایی، منابع احتمالی و الگوهای باد منجر به وقوع چهار نوع مختلف گردوغبار از جمله گردوغبار معلق، وزش غباری، توفان گردوغبار و توفان گردوغبار شدید در منطقه می‌شود. این مناطق شامل سودان، بخش‌هایی از عربستان، عراق، پاکستان و بخش‌هایی از ایران و افغانستان است. بیشترین فراوانی توفان‌های گردوغبار معلق در سودان، بیشترین فراوانی وزش غباری و توفان‌های گردوغبار در ایران و افغانستان با جهت شمال-شمال غربی که به بادهای ۱۲۰ روزه موسومند، رخ می‌دهد و بیشترین غلظت میانگین توفان‌های گردوغبار در منطقه پاکستان می‌باشد. منابع گردوغبار در فصل زمستان در قسمت‌های غربی منطقه خاورمیانه و در تابستان به سمت شرق تغییر جهت می‌دهند. حمیدی (۲۰۱۹) توفان‌های گردوغبار جبهه‌ای در جنوب غرب آسیا را با استفاده از شاخص AOD و داده‌های جوی NCEP-NCAR مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که در فصل‌هایی غیر از تابستان، تقابل سیستم پرفشار جنوب شرقی شبه‌جزیره عربستان و مناطق همسایه با سیستم‌های کم‌فشار در شرق دریای مدیترانه و اطراف آن، مولد توفان‌های گردوغبار در دشت‌های آبرفتی دجله و فرات می‌باشند. همچنین جنوب عراق، کویت و استان خوزستان در ایران، غرب و جنوب غربی ایران و شمال شرقی عربستان سعودی، بیشتر از مناطق دیگر خاورمیانه تحت تاثیر توفان گرد و غبار قرار داشته‌اند. مطالعات نشان داده است که شدیدترین گرد و غبار گرد و غبار در ماه مارس و آوریل رخ داده است.

(منگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۹) به مدلسازی سه بعدی توزیع ذرات گردوغبار بر روی حوضه تاریخیم در شمال غرب چین پرداختند. آن‌ها یک نمونه توفان گردوغبار شدید در فصل بهار طی سال ۲۰۱۵ را با استفاده از مدل WRF-Chem شبیه‌سازی کردند.

¹ Draxler and Hess

² Meng

براساس داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، برای توزیع عمودی گردوغبار در سطح بیابان تاریم، ضخامت لایه مرزی با ارتفاع بیش از ۳ تا ۵ کیلومتر شناسایی شد. محمدی و همکاران (۲۰۱۵) به ردیابی منابع گردوغبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT طی دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۵ پرداختند. نتایج نشان داد یکی از سیستم‌های فشاری موثر در وقوع گردوغبار و تعیین مسیر آن‌ها پرفشار عربستان و کم‌فشار شمال ایران می‌باشد. مطالعه مسیرهای انتقال ذرات از خروجی مدل نشان داد که به طور کلی منابع اصلی غبار بر روی تهران در عرض‌های ۲۵ تا ۳۷ درجه شمالی، محدوده‌ای در حدفاصل عربستان، عراق و سوریه می‌باشد. بررسی ارتفاعی ذرات انتشار یافته در سه سطح ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری برای ۴۸ ساعت قبل از توفان نشان داد که ذرات گردوغبار در لایه‌های بالایی به سمت ایران جریان پیدا کرده و در سطوح پایین‌تری به تهران رسیده است. محمدپور پنجاه و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های عددی WRF و HYSPLIT به شناسایی چشمه‌های توفان‌های گردوغبار ۵ تا ۸ جولای ۲۰۰۹ پرداختند. نتایج نشان داد که اغلب مسیرهای به دست آمده، از مناطق شمالی و مرکزی عراق و سوریه گذشته و منشا توفان گردوغبار ذکر شده، مناطق کویری و خشک شمال عراق و سوریه است. این نتایج بیانگر این است که مدل‌های عددی ذکر شده توانایی پیش‌بینی توفان‌های گردوغبار را دارند. حسینی و رستمی (۲۰۱۸) به واکاوی پدیده گردوغبار در جنوب شرق کشور با استفاده از مدل HYSPLIT و تصاویر ماهواره طی یک دوره آماری سی ساله پرداختند. نتایج نشان داد که کمترین میزان گردوغبار در ماه دسامبر است. دریاچه خشک شده هامون، بیابان‌های افغانستان، حاشیه‌های جنوبی و شرقی لوت، بیابان ربع الخالی، مناطق مرکزی و شمال شرقی عربستان و جنوب عراق منابع اصلی گردوغبار منطقه هستند. نتایج حاصل از مطالعات همدیدی نیز نشان داد که در دوره گرم سال کم‌فشار موسمی و کم‌فشار جنوب شرق ایران با هم تلفیق شده و در نهایت در تقابل با پرفشار شمال ایران و خزر سبب شیو فشار و افزایش سرعت باد در جنوب شرق ایران می‌شود که با توجه

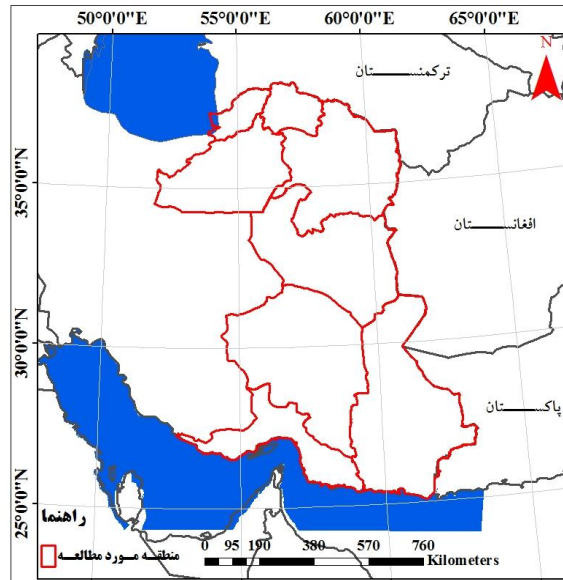
به نبود رطوبت و خشکی منطقه سبب شکل‌گیری هسته گردوغبار می‌گردد. در فصل سرد نیز وجود ناوه عمیق بر روی مدیترانه در تراز میانی و پیرو آن ایجاد همگرایی سطحی سبب ناپایداری شدید و صعود هوا از روی عراق و عربستان می‌شود. با توجه به گسترش وقوع گردوغبار در سال‌های آتی، خشکسالی و تغییرات اقلیمی و بوجود آمدن پهنه‌های بیابانی نوظهور، مطالعه این پدیده امری مهم تلقی شده و باید با استفاده از تحقیقات علمی در جهت شناخت عوامل موثر بر رخداد این پدیده و مناطق منشا ورود گردوغبار گام برداریم. هدف اصلی این پژوهش شناسایی چشمه‌ها و ردیابی مسیر ورود گردوغبار به شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT، تصاویر ماهواره و تحلیل‌های همدیدی می‌باشد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه نیمه شرقی ایران، شامل استان‌های خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی، سمنان، گلستان، سیستان بلوچستان، کرمان و هرمزگان می‌باشد. این منطقه، بین مدار جغرافیایی ۲۵ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۲ درجه تا ۶۳ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت سرزمین مورد پژوهش را نشان می‌دهد.

در این پژوهش با استفاده از داده‌های کد پدیده و دید افقی از سازمان هواشناسی به ارزیابی توفان‌های گسترده و شدید فصل زمستان و بهار طی دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ در نیمه شرقی ایران پرداخته شد. طبق دستور العمل سازمان هواشناسی جهانی روز همراه با گردوغبار به روزی گفته می‌شود که حداقل در یکی از ۸ سینوپ گزارش شده از ایستگاه هواشناسی یکی از کدهای مربوط به گردوغبار (شامل کدهای ۰۶، ۰۷، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸) در گروه هوای حاضر گزارش شده باشد (محمدی، ۲۰۱۵).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

با توجه به نظریه گادی و میدلتون (۱۹۹۲) در ارتباط با توفان‌های گردوغبار، زمانی که دید افقی در ایستگاه‌ها به کمتر از ۲۰۰ متر تقلیل یابد، توفان‌های شدید گردوغبار رخ می‌دهد. بر این اساس ۱۵ مورد توفان گردوغبار در فصل زمستان و بهار شناسایی و الگوهای همدیدی آن‌ها استخراج شد (جدول ۱). سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای باند مرئی MODIS و شاخص عمق اپتیکی نوری آئروسول‌ها (AOD^1) و شاخص (AI^2) مربوط به ماهواره $OMPS^3$ ، هسته مرکزی شکل‌گیری گردوغبار، نحوه حرکت و غلظت و تمرکز گردوغبار در تمامی موارد رخدادهای گردوغبار تأیید و بدست آمد. شاخص عمق نوری آئروسول (AOD)، محصول سنجنده مودیس برای ماهواره Terra و Aqa، یکی از پارامترهای مهم در مطالعه گردوغبار می‌باشد که میزان یا شدت تمایل

¹Aerosol optical depth

² Aerosol Index

³ Ozone Mapping and Profiler Suite

آئروسول‌ها برای جلوگیری از انتقال نور است. هر چه ذرات معلق در جوّ افزایش یابند میزان AOD نیز افزایش می‌یابد. AOD بالا نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی از جذب و پراکندگی تابش در جوّ صورت گرفته است و AOD پایین نیز بیانگر حضور ذرات معلق با غلظت پایین، شفافیت بالای جوّ و افزایش انتقال تابش است (کوکانواسکی^۱، ۲۰۰۸). در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های هواشناسی بُرد متوسط (ECMWF^۲) با قدرت تفکیک مکانی 0.25×0.25 نقشه‌های فشار هوا در سطح دریا (SLP)، دما، سمت و سرعت باد و ارتفاع ژئوپتانسیلی در سطوح ۸۵۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ و جریان‌های جتی با نرم‌افزار Grads ترسیم شدند و با بررسی آن‌ها، عامل همدیدی توفان‌ها مشخص گردید. برای هر مورد توفان، نقشه‌های همدیدی در سطوح مختلف جوّی، تصاویر ماهواره‌ای و مدل تهیه و بررسی شد. با توجه به کثرت نقشه‌ها و جهت جلوگیری از زیاده‌گویی و اطاله کلام یک نمونه گردوغبار به صورت جامع در مقاله آورده شد و بقیه موارد نیز به صورت مختصر شرح داده شد. در نهایت با استفاده از مدل HYSPLIT مسیر حرکت ذرات و منشا آن‌ها در دو سطح ۵۰۰ و ۱۵۰۰ متری برای ۴۸ ساعت قبل از توفان ردیابی شد. در مدل مذکور از داده‌های هواشناسی تحلیل شده GDAS^۳ به صورت ۰/۵ درجه استفاده شد. علاوه بر داده‌های هواشناسی، زمان شروع، مختصات جغرافیایی نقاط آغاز، زمان کل اجرا، جهت حرکت پسرو^۴ و یا پیشرو^۵، تراز بالای مدل (ترازی که بالاتر از آن، ارتفاع در محاسبات حذف خواهد شد) و چگونگی حرکت عمودی در مدل وارد گردید. مدل برای تمامی موارد اجرا گردید و خروجی مدل با نقشه‌های همدیدی و تصاویر ماهواره مقایسه شد. در نهایت براساس کدهای مربوط به پدیده گردوغبار،

¹ Kokhanovsky

² European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

³ Global Data Assimilation System

⁴ Backward

⁵ Forward

تصاویر ماهواره، نقشه‌های همدیدی و مدل، توفان‌های شکل گرفته در خود محل و انتقال یافته از محلی دیگر مشخص شد. در تمامی موارد خروجی مدل با دقت بسیار زیادی توانست منشا شکل‌گیری و نحوه انتشار توفان‌ها را پیش‌بینی نماید.

جدول ۱- تاریخ وقوع توفان‌های گردوغبار در شرق ایران

ردیف	زمان رخداد	ردیف	زمان رخداد	ردیف	زمان رخداد
۱	۲۰۱۸/۳/۲۳-۲۴	۶	۲۰۱۷/۳/۱۶-۱۷	۱۱	۲۰۱۴/۳/۹-۱۰
۲	۲۰۱۸/۴/۳۰	۷	۲۰۱۶/۲/۹	۱۲	۲۰۱۳/۳/۲۰-۲۱
۳	۲۰۱۸/۵/۱۶	۸	۲۰۱۵/۴/۱-۳	۱۳	۲۰۱۲/۳/۲-۶
۴	۲۰۱۷/۲/۱۳-۱۸	۹	۲۰۱۵/۳/۲۳-۲۴	۱۴	۲۰۱۱/۴/۱۳-۱۵
۵	۲۰۱۷/۴/۴-۶	۱۰	۲۰۱۴/۴/۲-۵	۱۵	۲۰۱۰/۳/۲۷-۲۹

بحث

با بررسی کدهای مربوط به پدیده گردوغبار، دید افقی، تصاویر ماهواره و نقشه‌های همدیدی، توفان‌های مربوط به دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ طی دو فصل بهار و زمستان بررسی شد. نتایج نشان داد که ۶۶/۶۷ درصد از توفان‌های منطقه به صورت محلی و ۳۳/۳۳ درصد به صورت انتقال یافته از محل دیگر می‌باشند و ۲۰ درصد نیز به صورت محلی و انتقالی رخ داده است. در زیر به بررسی هر یک از توفان‌ها پرداخته می‌شود:

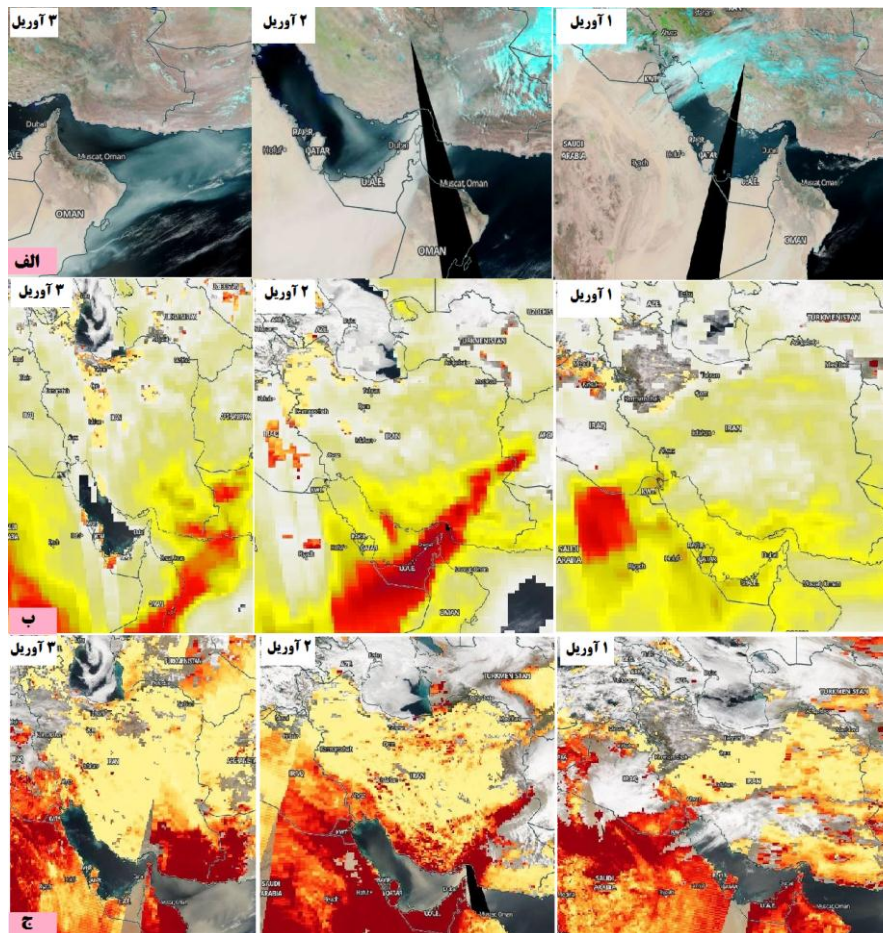
بررسی توفان گردوغبار ۲۰۱۵/۴/۱-۳

شدت و گستردگی توفان گردوغبار ۱ تا ۳ آوریل ۲۰۱۵ به قدری بود که در نیمی از ایستگاه‌های منطقه بخصوص خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان و منطقه جازموربان احساس شد. بنابراین با بررسی داده‌های مربوط به دید افقی در این روز مشخص شد که در نیمی از ایستگاه‌های منطقه، دید افقی به کمتر از ۵۰ متر تقلیل یافته است که این امر خود به لزوم مطالعه و پیگیری منشأ این توفان افزود. شکل (۲) شکل‌گیری و منشأ ورود گردوغبار را با استفاده از تصاویر بانند مرئی مادیس، شاخص گردوغبار (AI)

مربوط به ماهواره OMPS و عمق اپتیکی نوری غلظت گردوغبار سطحی (AOD) را به منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر بانند مرئی، روز قبل از توفان (ا آوریل)، هسته گردوغبار در جنوب عراق و شمال شبه‌جزیره عربستان شکل گرفته است که در روز ۲ آوریل ۲۰۱۵، مرکز و جنوب شرق عربستان، امارات، سواحل عمان، جنوب ایران و جنوب شرق را در بر گرفته است. و در روز ۳ آوریل به سمت جنوب شرق ایران، پاکستان و شمال هند گسترش یافته است (شکل ۲ الف). تصاویر حاصل از شاخص (AI) (شکل ۲ ب) و عمق اپتیکی و غلظت گردوغبار سطحی (AOD) (شکل ۲ ج) نیز نتایج حاصل از توفان گردوغبار شکل گرفته در بانند مرئی را تأیید می‌کنند و نشان می‌دهند که در این روز گردوغبار در جنوب عراق و مرکز و جنوب شرق شبه‌جزیره عربستان شکل گرفته و با حرکت توده حامل گردوغبار به سمت ایستگاه‌های جنوب شرقی غلظت سطحی و عمق اپتیکی در منطقه جنوب شرق نیز بالا می‌رود. همچنین غلظت گردوغبار در ایستگاه‌های جنوب و جنوب شرقی ایران، پاکستان و افغانستان بسیار بالاست که با توجه به مسیر حرکت ابرها در نقشه نیز جهت حرکت باد کاملاً مشخص است که از جنوب عراق و شمال عربستان به سمت جنوب شرق ایران و سپس افغانستان در حال حرکت است. بنابراین تصاویر عمق اپتیکی نیز توفان مذکور و شدت آن را برای نیمه شرقی ایران تأیید می‌کند که باتنایج حمیدی و همکاران (۲۰۱۷) و حسینی و رستمی (۱۳۹۷) در ارتباط با منشأیابی توفان‌های گردوغبار همسو می‌باشد.

شرایط سینوپتیکی توفان‌های گردوغبار بر اساس داده‌های مرکز پیش‌بینی هواشناسی میان مقیاس اروپایی ارزیابی شد. شکل (۳) جریان باد را در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برای روزهای ۳۱ مارس تا ۳ آوریل نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود دو جریان جت استریم بر روی نقشه کاملاً مشخص است؛ جت استریم قطبی در موقعیت جغرافیایی ۴۵ تا ۵۵ درجه شمالی و ۱۵ تا ۲۵ درجه شرقی و جت استریم جنب حاره در موقعیت ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی که به طور

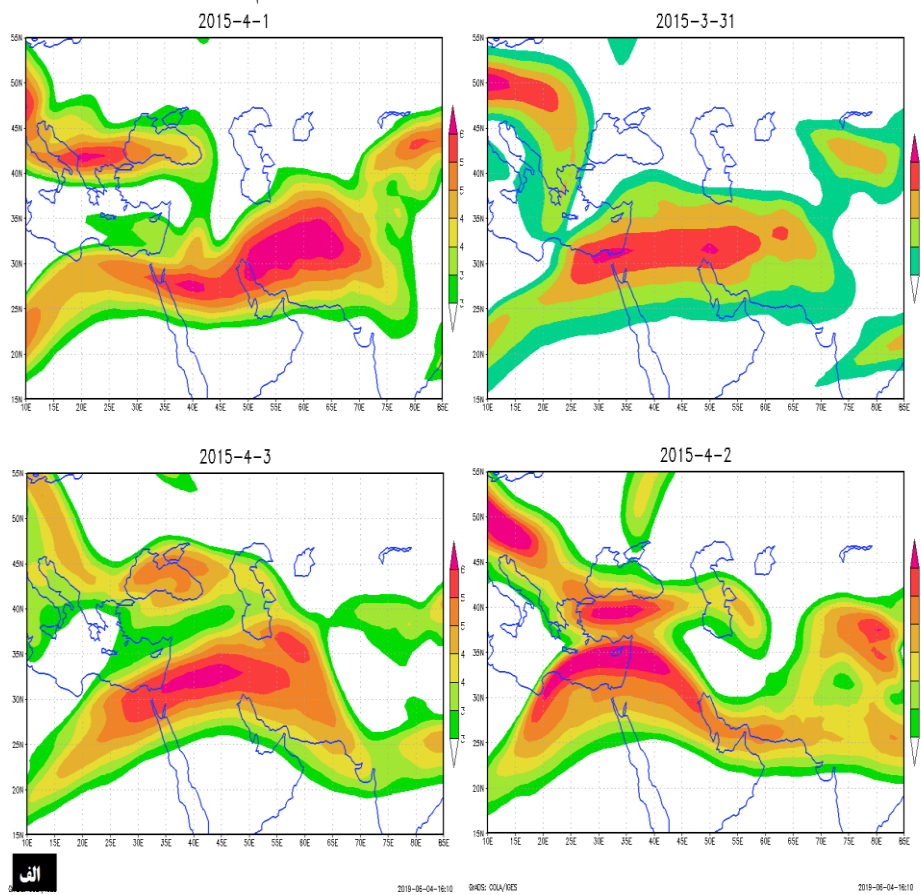
قابل توجهی در روز ۳۱ مارس ۲۰۱۵ از هم مجزا هستند. در روز بعد (۱ آوریل ۲۰۱۵) جت قطبی به سمت عرض‌های پایین پیشروی کرده و در قسمت‌های شمالی و شرق مدیترانه با هم همگرا شده و تشکیل یک جت گسترده و عظیم داده‌اند (روز ۲ آوریل).

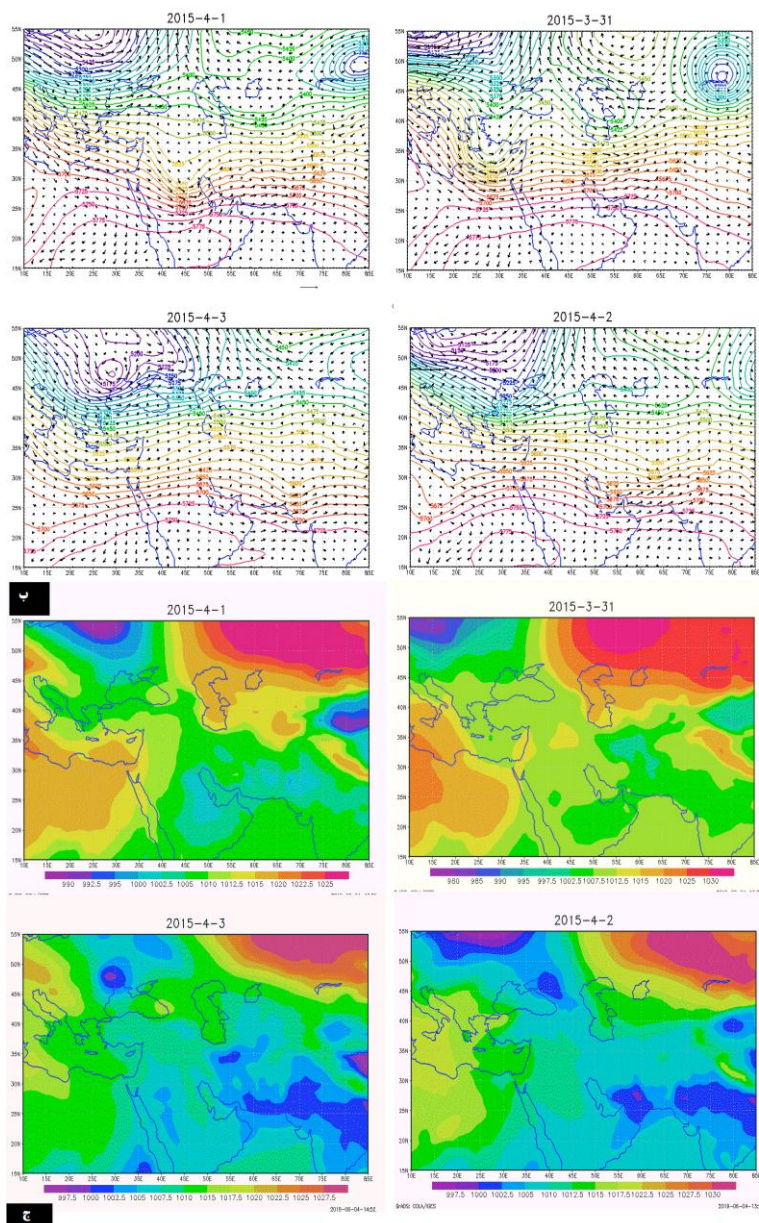


شکل ۲ - تصاویر ردیف اول (الف) مربوط باند مرئی MODIS (Tera)، تصاویر ردیف دوم (ب) مربوط به شاخص AI مربوط به ماهواره OMPS به رنگ زرد و تصاویر ردیف سوم (ج) مربوط به شاخص AOD به رنگ قرمز (شدت و غلظت گردوغبار) MODIS برای روزهای ۱ تا ۳ آوریل ۲۰۱۵

این همگرایی باعث تشدید بادهایی با سرعت بیش از ۷۰ متر بر ثانیه در سطوح بالا و تشدید جریانات سطح زیرین و جبهه‌زایی شده است و در روز ۳ آوریل این همگرایی به تدریج ضعیف شده است (شکل ۳ الف). نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به همراه جریان باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در شکل (۳ ب) نمایش داده شده است. وجود ناوه عمیق قطبی بر روی شرق مدیترانه و شمال آفریقا و زبان‌های پرارتفاع جنب حاره آזור در مرکز عربستان و جنوب ایران در روز ۳۱ مارس کاملاً مشهود است. این ناوه در روزهای بعد به سمت شرق جابجا شده و مرکز آن بر روی عربستان و عراق واقع شده که این امر موجب عقب نشینی زبان‌های پرفشار جنب حاره آזור به سمت جنوب عربستان و عرض‌های پایین‌تر شده است در نتیجه این عوامل باعث ایجاد جریانات شدید جنوب و جنوب غربی به سمت شرق کشور شده است که با همگرایی جریانات دو جت در تراز بالا، جریانات افقی و عمودی شدت می‌یابند که در صورت فعالیت در مناطق مستعد تولید گردوغبار، شرایط را برای انتقال آن در مسافت‌های طولانی مهیا می‌سازد (روز ۱ آوریل ۲۰۱۶). در روزهای بعد نیز همچنان این جریانات برقرار است. در نقشه‌های فشار تراز دریا (شکل ۳ ج) برای روز ۳۱ مارس ۲۰۱۵، هسته کم‌فشار نسبتاً ضعیفی در شمال هند، شرق ایران و جنوب عربستان شکل گرفته است. هسته کم‌فشار دیگری نیز در عرض ۶۰ درجه شمالی در شمال مدیترانه وجود دارد. در مقابل هسته پرفشار سیبری در شمال خزر و هسته پرفشار آזור بر روی شمال آفریقا و غرب اروپا مستقر است. در روزهای بعد، این مراکز پرفشار عقب نشینی کرده تا جایی که مرکز کم‌فشار هند گسترش و شدت قابل ملاحظه‌ای یافته و با کم‌فشار عرض‌های ۶۰ درجه همگرا شده تا جایی که کل ایران و منطقه مورد مطالعه زیر نفوذ کم‌فشار قرار گرفته است. قرارگیری جنوب و منطقه مورد مطالعه در قسمت شرقی ناوه، سبب شکل‌گیری همگرایی و تشدید مراکز کم‌فشار در این مناطق شده به گونه‌ای که وجود این کم‌فشار موجب تشدید جریانات سیکلونی در

منطقه شده است. در نتیجه وجود این شرایط بخصوص همگرایی دو جریان جت تراز بالایی، شرایط مطلوبی برای ایجاد توفان گردوغبار در کشور فراهم آورد.

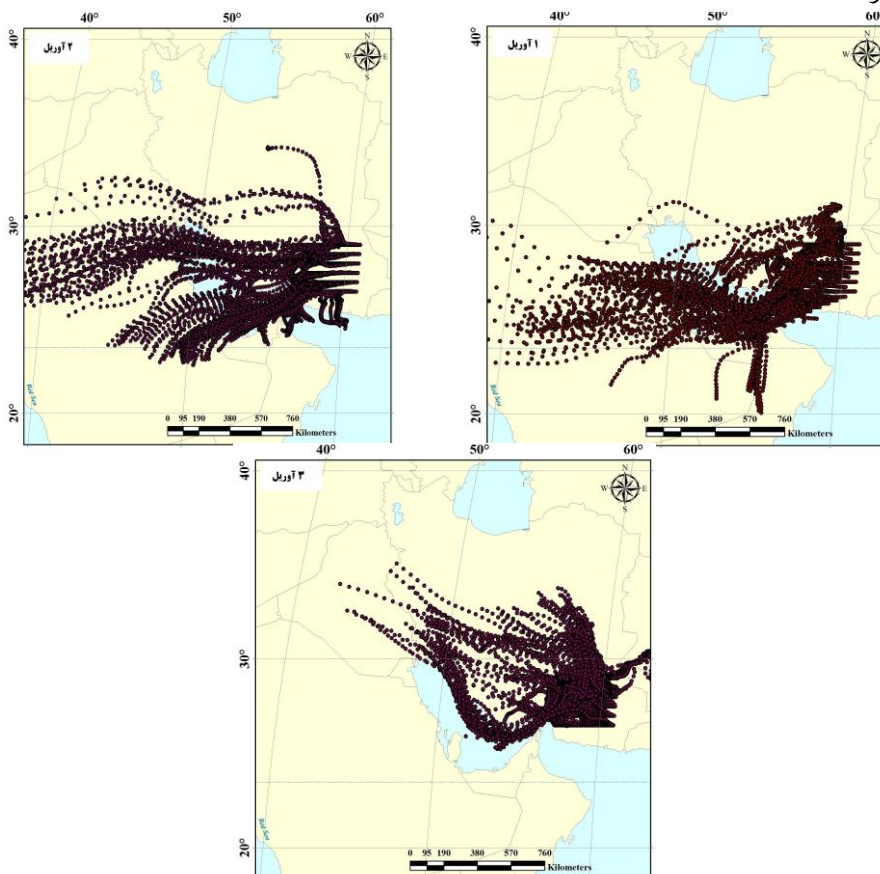




شکل ۳ - الف جریان باد در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برای روزهای ۳۱ مارس تا ۱ آوریل ۲۰۱۵، ب نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به همراه جریان باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای روزهای ۳۱ مارس تا ۱ آوریل ۲۰۱۵، ج نقشه فشار تراز دریا برای روزهای ۳۱ مارس تا ۱ آوریل ۲۰۱۵

خروجی مدل HYSPLITE

با توجه به شکل (۴) خروجی‌های مدل HYSPLIT به صورت ماتریس شبکه‌ای برای تمامی رخدادهای مورد نظر در جدول (۱) ارائه گردید. ذرات در سطوح ۱۵۰۰ و ۵۰۰ متری از سطح زمین در حد فاصل زمانی ۴۸ ساعت قبل از توفان به روش پسگرد ردیابی شدند. همانطور که ملاحظه می‌شود جریان‌ات ورودی به منطقه، از مناطق باپتانسیل بالا، جنوب و مرکز عراق، مرکز و جنوب شرق عربستان منشأ گرفته‌اند. در تمامی موارد خروجی‌های مدل با نقشه‌های همدیدی و تصاویر ماهواره‌ای مطابقت دارد.



شکل ۴- فراوانی خروجی مدل HYSPLIT و مسیر رو به عقب انتقال گردوغبار برای ۴۸ ساعت قبل از توفان

بررسی همدیدی رخداد توفان‌های گردوغبار در شرق ایران

به دلیل ازدیاد نقشه‌ها، تصاویر و مدل‌های مربوطه، نتایج تمامی توفان‌های گردوغبار ذکر شده در جدول (۱) به صورت خلاصه در زیر شرح داده شده است:

با توجه به تصاویر ماهواره در روز ۲۴-۲۳/۳/۲۰۱۸ توفان در نیمه شمالی منطقه در خراسان شمالی و بر روی ترکمنستان شکل گرفته است. در این روز گرادیان فشار بین دو سامانه کم فشار با فشار مرکزی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بر روی خزر و پرفشار سیبری در شرق ایران موجب تشدید سرعت باد و ایجاد توفان شده است. در روز ۳۰/۴/۲۰۱۸ توفان در نیمه شرقی ایران بخصوص کویر لوت شکل گرفته است. گرادیان فشار در سطح زمین بین پرفشار در شمال خزر و کم فشار بر روی پاکستان و افغانستان موجب شکل‌گیری باد در سطح زمین شده است. زبانه پرارتفاع جنب حاره در تراز میانی جو وجود دارد که قسمت غربی آن بر روی منطقه توفانی قرار گرفته است. در این روز هسته رودباد جنب حاره و جبهه قطبی نیز بر باد سطح زمین اثر گذاشته است. در روز ۱۶/۵/۲۰۱۸ عامل توفان وجود یک مرکز کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۰۶ هکتوپاسکال در جنوب شرق ایران و قرارگیری یال شرقی ناوه بر روی منطقه موجب تشدید ناپایداری و توفان گردوغبار در منطقه شده است. هسته رودباد در تراز فوقانی نیز بر باد سطح زمین اثر گذاشته و موجب ناپایداری هر چه بیشتر آن شده است. عامل ایجاد توفان در روز ۱۸-۱۳/۲/۲۰۱۷ سیکلون سطح زمین و ناپایداری جلوی ناوه بر روی منطقه به همراه مشارکت هسته رودباد می‌باشد. در روز ۶-۴/۴/۲۰۱۷ گرادیان فشار در مرزهای شرقی ایران بین پرفشار شمال خزر و کم‌فشار در جنوب شرق ایران موجب ایجاد بادهای پرسرعت و هسته‌های گردوغبار شده است. در این روز هسته رودباد نیز در تشدید توفان مشارکت داشته است. در روز ۱۷-۱۶/۳/۲۰۱۷ توفان از شبه جزیره عربستان در امتداد جریانات تراز فوقانی هسته رودباد و جلوه ناوه به جنوب و جنوب شرق ایران انتقال یافته است. در روز ۹/۲/۲۰۱۶ عامل ایجاد توفان برخورد هسته رودباد با سطح زمین می‌باشد. در روز

۲۴-۲۳/۳/۲۰۱۵ وجود سیکلون در شرق ایران به همراه جریانات جلوی ناوه و هسته رودباد عامل توفان در منطقه است. انتقال از سمت شبه جزیره عربستان نیز به سمت منطقه صورت گرفته است. در روز ۵-۲/۴/۲۰۱۴ سیکلون سطح زمین و ناپایداری‌های جلوی ناوه با مشارکت هسته رودباد در ایجاد و تشدید توفان موثر عمل نموده است. در روز ۱۰-۹/۳/۲۰۱۴ ورود زبانه پرفشار سیبری به سمت شرق ایران و ریزش هوای سرد از عرض‌های بالا موجب گرادیان شدید فشار و دما در منطقه شده است که مجموع این عوامل موجب ایجاد باد و شتید سرعت آن و توفان گردوخاک شده است. جریانات تراز فوقانی نیز در انتقال توفان تاثیرگذار بوده است. در روز ۲۱-۲۰/۳/۲۰۱۳ سیکلون در جنوب ایران به همراه جریانات جلوی ناوه و مشارکت هسته رودباد عامل ایجاد توفان است. در روز ۶-۲/۳/۲۰۱۲ وجود سیکلون در شرق ایران و وجود ناپایداری‌های جلوه ناوه بر روی منطقه و برخورد هسته رودباد با سطح زمین عامل توفان است. در روز ۱۵-۱۳/۴/۲۰۱۱ توفان ابتدا بر روی عراق شکل گرفته و در روزهای بعد با همراهی جریانات تراز میانی و هسته رودباد به مرکز ایران انتقال یافته است. در روز ۲۹-۲۷/۳/۲۰۱۰ برخورد هسته رودباد با سطح زمین و انتقال در امتداد جریانات تراز فوقانی در ایجاد و تشدید توفان دخالت داشته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش گردوغبارهای شدید در نیمه شرقی ایران طی فصل بهار و زمستان با استفاده از مدل‌های عددی، تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌های گردوغبار، نقشه‌های همدیدی و داده‌های ایستگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که ۶۷/۶ درصد از توفان‌های منطقه به صورت محلی و ۳۳/۳۳ درصد به صورت انتقال یافته از محل دیگر می‌باشند و ۲۰ درصد نیز به صورت همزمان رخ داده است. نتایج حاصل از مطالعات ماهواره‌ای نشان داد که توفان‌های انتقال یافته معمولاً در جنوب عراق و مرکز عربستان شکل گرفته و سپس به سمت منطقه مورد مطالعه انتقال یافته است که با نتایج حاصل

از مدل مقایسه و صحت‌سنجی شد. بررسی‌های همدیدی این نوع توفان‌ها نیز نشان داد که منشأ سینوپتیکی آن‌ها، باد شمال می‌باشد که در اکثر موارد همگرایی جت استریم جنب‌حاره و قطبی، شرایط مطلوبی برای رخداد توفان‌های شدید گردوغبار فراهم آورده است و نقش گسترده‌ای در شکل‌گیری جریانات سطحی شدید ایفا کرده است. نتایج توفان‌های شکل گرفته در خود محل نیز نشان داد که عامل توفان‌های شدید منطقه ناشی از گرادیان شدید فشاری، سیکلون و دخالت جریانات رودباد در منطقه است. نتایج حاصل از مدل HYSPLIT نیز با نتایج حاصل از تصاویر ماهواره مطابقت داشت که این امر با نتایج گادی و میدلتون (۱۹۹۲)، حسینی و رستمی (۲۰۱۸) و استول (۱۹۹۸) در ارتباط با ردیابی مسیرهای گردوغبار و منشأ آن‌ها مطابقت دارد. طبق بررسی‌های همدیدی، قرارگیری یک سیستم کم‌فشار به صورت پایدار در مرکز و شرق ایران و اندرکنش آن با مراکز پرفشار مستقر در شمال آفریقا، احتمال انتشار گردوغبار و انتقال آن به صورت پایدار به سمت مرکز و شرق ایران بشدت افزایش می‌یابد. همچنین ناوه تراز میانی بر روی شرق مدیترانه به همراه همگرایی دو جریان جت استریم باعث تشدید بادهای سطحی در محل همگرایی و واگرایی تراز زیرین جو شده است و در نتیجه عامل رخداد توفان گردوغبار ۱ تا ۳ آوریل ۲۰۱۵، ساختار باد شمال می‌باشد. منشأ همدیدی به وجود آورنده توفان شمال مناطق واچرخند^۱های توسعه یافته از شمال آفریقا و دریای مدیترانه و مناطق کم‌فشار موسمی توسعه یافته بر روی جنوب و جنوب شرقی شبه جزیره عربی و جنوب ایران (به همراه تراف مونسون بر روی عراق و جنوب ایران) می‌باشد که در عمل این سیستم پرفشار و کم‌فشار، منطقه همگرایی را در امتداد شمال عربستان و مرکز تا جنوب عراق به وجود می‌آورد که این منطقه همگرایی و جریان‌های به وجود آمده توسط آن، با گذر از میان رشته کوه‌های زاگرس در غرب ایران و مناطق مرتفع غرب عربستان شدت و شتاب می‌یابد و باعث به وجود آمدن بادهایی با سرعت بالا در امتداد جنوب عراق، غرب خوزستان، کویت، شمال غربی و

^۱ AntiSyclone

جنوب غربی خلیج فارس و شرق عربستان می‌گردد که باعث انتقال منطقه‌ای گردوغبار می‌شود (ویلکرسون، ۱۹۹۱؛ حمیدی و همکاران، ۲۰۱۷؛ حمیدی و همکاران، ۲۰۱۴). در تمامی موارد نتایج مدل با مطالعات همدیدی و ماهواره ای مقایسه و تایید گردیده است.

منابع

1. Alam, K., Qureshi, S., & Blaschke, T. (2011) . Monitoring Spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. *Atmos. Environ*, 45, 4641–4651.
2. Aljani, B., & Raispour, K. (2011). Statistical Synoptical analysis of Sand Storms in SE Iran (Study Case: Region of Sistan). *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 5, 132-107, (in Farsi).
3. Arimoto, R. (2002). Relationships to source, troposphere chemistry, transport and deposition. *Earth science*, 30.
4. Ashrafi, Kh., Shafiepour Motlagh, M., & Aslamand, A. (2012). Investigation of Dust Storm Routes on Iran Using Numerical Modeling and Satellite Imaging. *Environmental Science and Engineering*, 0, 3-12, (in Farsi).
5. Bayat, A., Masoumi, A., & Kholesifard, H.R. (2010). Retrieval of atmospheric optical parameters from ground-based sun-photometer measurements for Zanjan, Iran. *Atmos. Measur. Techn. Discuss.* 3, 2633–2649.
6. Draxler, R. & Hess, G.D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.
7. Engelstaedter S., Washington R., & Tegen I. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth Science Review*, 79, 73 –100, doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.004.
8. Goudie, A.S. (2009). Dust storms: Recent Developments. *Journal of Environmental Management*, 90, 89 – 94.
9. Goudie, A.S. (1983). Dust storms in space and time. *Prog. Phys. Geogr.* 7, 502–530.
10. Goudie, A.S., Middleton, N.J. (1992). The changing frequency of dust storms through time. *Climate Change*, 20, 197–223.
11. Hamidi, M. (2019). Atmospheric Investigation of Frontal Dust Storms in Southwest Asia. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 55, 177–193. doi:10.1007/s13143-018-0083-2.

12. Hamidi, M., Kavianpour, M.R., & Shao, Y. (2014). Numerical simulation of dust events in the Middle East. *Aeolian Res.* 37, 59–70
13. Hamidi, M., Kavianpour, M.R., & Shao, Y. (2017). A quantitative evaluation of the 3-8 July 2009 Shamal dust storm. *Aeolian Res.* 24, 133–143.
14. Kaskaoutis, D.G., Kalapureddy, M.C.R., Krishna Moorthy, K., Devara, P.C.S., Nastos, P.T., Kosmopoulos, P.G., & Kambezidis, H.D. (2010). Heterogeneity in premonsoon aerosol types over the Arabian Sea deduced from shipboard measurements of spectral AODs. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 4893–4908.
15. Kim, D., Chin, M., Yu, H., Eck, T.F., Sinyuk, A., Smirnov, A., & Holben, B.N. (2011). Dust optical properties over North Africa and Arabian Peninsula derived from the AERONET dataset. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 11, 20181–20201.
16. Lashkari, H. (2008). Synoptic analysis of the incidental cold wave in Iran. *Natural Geography Research*, 66, 18 - 1. (in Farsi)
17. Lin, G. (2002). dust storm in the 1930 and sand storm in 1999 in the USA, *Global Alarm; dust and sand storm from the world dry lands.* 160-170.
18. Maghrabi, A., Alharbi, B., & Tapper, N. (2011). Impact of the March 2009 dust event in Saudi Arabia on aerosol optical properties, meteorological parameters, sky temperature and emissivity. *Atmos. Environ.* 45, 2164–2173.
19. McTainish, G.H., & Pitbaldo, J.R. (1987). Dust storms and related phenomena measured from meteorological records in Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 415–424
20. Mei, D., Xiushan, L., Lin, S., & Ping, W. (2008). A Dust Storm Process Dynamic Monitoring with Multi-Temporal MODIS data, *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sens Spatial Info Sci*, 37, 965-970
21. Menga, L., Yanga, X., Zhaob, T., Hea, Q., Lua, H., Mamtimina, A., Huoa, W., Yanga, F., & Liu, Ch. (2019). Modeling study on three-dimensional distribution of dust aerosols during a dust storm over the Tarim Basin, Northwest China, *Atmospheric Research*, 218, 285–295.
22. Middleton, N. J. (1986). A geography of dust storms in South-West Asia. *Journal of Climatology*, 6(2), 183–196.
23. Middleton, N.J., & Goudie, A.S. (2001). Saharan dust: sources and trajectories. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 26, 165–181.
24. Middleton, N.J., & U. Kang. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9, 1053. doi.org/10.3390/su9061053.
25. Middleton, N.J. (1986). Dust storms in the Middle East. *J. Arid Environ.* 10, 83–96.
26. Mohammadi, F., Kamali, S., & Eskandari, M. (2015). Tracing Dust Sources in Different Atmosphere Levels of Tehran Using Hybrid Single-

- Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) Model, *Geography and Environmental Hazards*, 16, 39-54 (in Farsi).
27. Mohammadi, G.H. (2015). Analysis of Atmospheric Mechanisms in Dust Transport over West of Iran., Ph.D, Tabriz University, p 142, (in Farsi).
28. Mohammadpour Penchah, M. R., Memarian, M. H., & Mirrokni, S. M. (2016). Modeling and Analysis of Dust Storms of Yazd Province Using Numerical Models. *Geography and Environmental Hazards*, 3(12), 67 – 83, (in Farsi).
29. Natsagdari, L.D., & Jugder, Y.S. (2002). Analysis of dust storms observed. Mongolia during, 12, 1937-1999.
30. Petzold, A., Rasp, K., Weinzierl, B., Esselborn, M., Hamburger, T. & Dornbrack, A. (2009). Saharan dust absorption and refractive index from aircraft-based observation during SAMUM2006. *Tellus*, 61, 118–130.
31. Prospero, J.M., Blades, E., Naidu, R., Mathison, G., Thani, H., & Lavoie, M.C. (2008). Relationship between African dusts carried in the Atlantic trade winds and surges in pediatric asthma attendances in the Caribbean. *Int. J. Biometeorol*, 52, 823–832.
32. Rezazadeh, M., Irannejad, P., Shao, Y. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research* 10, 103-109.
33. Romanoff, B. (1961), Dust storms in Gobi an Zone of Mongolia, The First PRC- Mongolia Workshop on climate change in arid and semi - arid Region over the Central Asia, pp : 21.
34. Rostami, D., & Hosseini, S. A. (2018). Analysis and Tracking Dust Phenomenon in South and Southeast of Iran by using HYSPPLIT Model and the Principles of Remote Sensing. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5, 103-119 (in Farsi).
35. Rousseau, D.D., Duzer, D., Etienne, J.L., Cambon, G., Jolly, D., Ferrier, J. & Schevin, P. (2004). Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *Journal of Geophysical Research*, 109.
36. Salazar, C., Alvarez, C., Silva, H.A. & Dorantes, C. (1994). Radioactivity in air around nuclear facilities in Mexico. *Environmental International*, 20, 747-756.
37. Shao, Y., & Dong, C.H. (2006). A review on East Asian Dust storm Climate, Modeling and monitoring. *Global and Planetary Change*, 52, 1-22.
38. Smirnov, A., Holben, B.N., Dubovic, O., O'Neill, N.T., Eck, T.F., Westphal, D.L., Goroth, A.K., Pietras, C., & Slutsker, I. (2002). Atmospheric aerosol optical properties in the Persian Gulf. *J. Atmos. Sci*, 59, 620–634.
39. Stohl, A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories - a review and bibliography. *Atmospheric Environment*. 32, 947-966.

40. Washington, R., Todd, M.C., Middleton, N.J., Goudie, A.S. (2003). Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations. *Ann. Assoc. Am. Geogr*, 93, 297–313.
41. Wilkerson, W.D. (1991). Dust and Sand Forecasting In Iraq and Adjoining Countries, AWS/TN—91.001, Air Weather Service, Scott Air Force Base, IL, 72 pp. [Available from, USAF Environmental Technical Application Center, Scott Air Force Base, IL 62225 - 5008].
42. Xu, X., Levy, J. K., Zhaohui, L., & Hong, Ch. (2006). An investigation of sand–dust storm events and land surface characteristics in China using NOAA NDVI data, *Global and Planetary Change*, 52 , 182–196.
43. Yang, Y., Squires, V., & Lu, Q. (2001). Global alarm: dust and sandstorms from the world's drylands. *United Nations Convention to Combat Desertification*, Bangkok, 345.
44. Zoljoodi, M., Didevarasl, A., & Saadatabadi, AR. (2013). Dust events in the western parts of Iran and the relationship with drought expansion over the dust-source areas in Iraq and Syria. *Atmos Clim Sci*, 03, 321–36.

A comprehensive study of severe dust storms in the eastern part of Iran using numerical modeling, satellite imagery and observation data

Zahra Yarmoradi, Ph.D. in Climatology, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Behrooz Nasiri*, Associate Professor, Department of Climatology, Lorestan University, Iran

Gholam Hassan Mohammadi, Meteorological Expert of East Azarbaijan, Tabriz, Iran

Mostafa Karampour, Assistant Professor, Department of Climatology, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 26-10-2019

Accepted: 03-12-2019

Abstract

Dust storms are one of the environmental problems that affect human health, air quality and the economies of the countries of the world on a large scale. The purpose of this study is the identification of the source of dust entering the east of Iran and tracking its route. Initially, using horizontal visibility data, satellite imagery, Dust Aerosol Index related to the OMPS, and AOD, the dust storms detected from 2000 until 2018 were examined. Then, the pressure data, wind direction, wind speed, geopotential heights and jet streams at various atmospheric levels were obtained from the European Meteorological Center (ECMWF) with a spatial resolution of $0.25^* 0.25$. Finally, the HYSPLTE model was used to determine the origin of the storm formation. The results showed that 46.67% of the region's dust storms were local, 33.33% were transmitted, and 20% occurred concurrently. The satellite studies of the transmitted dust storms showed that they formed in southern Iraq and central Saudi Arabia and then moved to the studied area, which was compared with the results of the model. Synoptic studies also showed the synoptic origin of the storms and their being structured by northern winds, where jet streams and polar jet streams converge to provide favorable conditions for dust storms. The study of the storms formed at the site indicated that severe storms in the area could be due to the pressure gradient, cyclones and jet stream interference in the area.

Keyword: Numerical modeling, Dust storm, HYSPLI, AOD.

*Corresponding Author Email: Nasiri.b@lu.ac.ir