

## تحلیل اقلیمی و بررسی طوفان‌های گرد و غبار در خراسان رضوی

محسن عراقی زاده - دانشجوی دکتری دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران  
سیدابوالفضل مسعودیان\* - استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

### چکیده

در این پژوهش به تحلیل آماری رخداد طوفان‌های گرد و غبار با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی همدیدی خراسان رضوی پرداخته شد. بر اساس دستورالعمل سازمان جهانی هواشناسی، هرگاه در ایستگاهی سرعت باد از ۳۰ نات بیشتر شود و دید افقی به علت پدیده گرد و غبار به کمتر از یک کیلومتر برسد، طوفان گرد و غبار گزارش می‌شود. کدهای ۳۰ تا ۳۵ مربوط به طوفان گرد و غبار یا شن معرفی می‌شود. در این تحقیق، نخست فراوانی رخداد طوفان‌های گرد و غبار در ایستگاه‌های همدیدی خراسان رضوی طی سال‌های ۱۳۳۱-۱۳۹۸ بررسی شد. سپس، به صورت موردی به بررسی رخداد طوفان گرد و غبار در مشهد به علت ایجاد وضعیت بحرانی در این کلان‌شهر در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵ برای بررسی مسیر ورودی این طوفان‌ها پرداخته شد. بررسی تصاویر ماهواره مودیس و تحلیلی الگوی گرد و غبار و همچنین ردیابی بسته‌های هوا حامل ذرات گرد و غبار با استفاده از مدل HYSPLIT با روش پسگرد و پیشگرد در ایستگاه مشهد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی شمال شرق کشور انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در سطح استان مرتبط با سبزواری با ۱۳۶ طوفان ملایم و ۷۹ طوفان شدید و شهرهای سرخس و گناباد در رتبه‌های بعدی بوده‌اند. با ردیابی و آشکارسازی پدیده طوفان گرد و غبار به صورت موردی مشاهده شد که این پدیده نخست بر روی ترکمنستان شکل می‌گیرد و با نفوذ به مرزهای شرقی کشور شهر مشهد را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

واژگان کلیدی: پدیده گرد و غبار، شمال شرق ایران، MODIS HYSPLIT

### مقدمه

ذرات گرد و غبار تحت تأثیر عوامل گوناگون از جمله شرایط جوی (باد، بارش، و دما)، مشخصات سطح زمین (توپوگرافی، رطوبت سطح زمین، زبری، و پوشش گیاهی)، ویژگی‌های خاک (بافت، تراکم، و ترکیب)، و کاربری اراضی (کشاورزی) وارد جو می‌شوند. ذره‌های گرد و غبار از سطح خاک، صخره‌ها، گدازه‌های آتش‌فشانی، یا آلودگی‌های زیست‌محیطی وارد جو می‌شوند و می‌توانند به کاهش تبخیر، کاهش دمای سطح زمین، و تأثیر بر فرایند بارش منجر شوند (میلر و همکاران، ۲۰۰۴). حضور ذره‌های گرد و غبار در جو در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت تأثیرهای متفاوتی در کیفیت هوا، ویژگی‌های خرد فیزیک ابر، مشخصه‌های نوری جو، بودجه تابشی جو، سپیدایی سطحی، و سلامت انسان‌ها داشته باشد. این اثرها می‌تواند بر سامانه اقلیمی منطقه‌ای یا جهانی مؤثر باشند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۰؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

منابع انتشار ذرات گرد و غبار به دو دسته تقسیم می‌شود: طبیعی و انسانی (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴). مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان در عرض‌های ۱۱ تا ۲۴ درجه شمالی و جنوبی منابع طبیعی انتشار گرد و غبارند. درواقع، بیابان‌ها چشمه اصلی گرد و غبارند. در کمربند بیابانی، در شرایط ناپایدار و خشک و همراه با باد گرد و غبار رخ می‌دهد (اردبیلی، ۱۳۸۹). تغییر ساختار جوی، که به ناپایداری منجر می‌شود، همراه با کمبود رطوبت و وزش بادهای

شدید در منطقه بیابانی از جمله مهم‌ترین شرایط برای شکل‌گیری طوفان گرد و غبارند. دیگر عامل تولید گرد و غبار منابع انسانی است. این منابع شامل دخالت انسان در تنوع سطح زمین، تغییرات کاربری زمین از طریق کشاورزی، جنگل‌زدایی، چرای بیش از حد، و مدیریت ضعیف منابع آبی مانند ایجاد سدهای متعدد است (رمضانی و جعفری، ۱۳۸۹). طی سال‌های اخیر هر دو منابع طبیعی و انسانی تغییراتی داشته‌اند؛ به طوری که تداوم خشک‌سالی، کاهش بارش، کاهش رطوبت خاک، و در نتیجه کاهش پوشش گیاهی و همچنین فعالیت‌های انسانی به گسترش بیابان‌ها منجر شده و بر غلظت ذرات معلق، تداوم، و گسترش آن در کشور افزوده شده است.

مناطق مختلف ایران به دلیل واقع شدن در منطقه خشک و نیمه‌خشک و نیز با توجه به ساختار سطحی، عبور سامانه‌های همدیدی مختلف، مجاورت با بیابان‌ها و چشمه‌های مهم گرد و غبار، در طی سال تحت تأثیر این طوفان‌ها قرار می‌گیرند. شدت، تداوم، گسترش عمودی، زمان، مسیر انتقال، و چشمه‌های گرد و غبار در مناطق مختلف ایران مشابه نیست. مشکلات و معضلات ناشی از گرد و غبار به ویژه در مناطقی از ایران که در مجاورت منابع تولیدکننده گرد و غبارند بیشتر است. با توجه به اندازه و نوع ذره، زمان رخداد، گسترش عمودی و انتقال افقی گرد و غبار تأثیر آن در مناطق مختلف یکسان نیست. بنابراین، شناسایی تغییرات مکانی و زمانی گرد و غبار اهمیت ویژه‌ای در پیش‌آگاهی و کاهش خطرها و مدیریت صحیح دارد. رخداد این پدیده در ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک با دو بیابان بزرگ (لوت و کویر) و نزدیکی به بیابان گرم عربستان، جنوب عراق، سوریه، صحرا و بیابان سرد قره‌قوم در شمال شرق طبیعی است. فراگیر شدن پدیده طوفان گرد و غبار و افزایش فراوانی رخداد آن در بخش‌های مختلف کشور نگرانی‌هایی درباره پیامدهای زیست‌محیطی و نیز اقتصادی-اجتماعی ایجاد کرده است.

ذرات جامد و مایع معلق در هوا را هواویز می‌گویند. ذره‌های گرد و غبار ذره‌های ریزی هستند که می‌توانند تابش خورشید و تابش زمین را جذب، بازتاب، یا پراکنده نمایند و به این ترتیب در اقلیم یک منطقه مؤثر باشند. هوای پاک و بدون آلودگی یکی از حیاتی‌ترین نیازهای انسان است و گرد و غبار یکی از منابع آلوده‌کننده آن به‌شمار می‌رود.

به‌منظور درک بهتر شرایط منطقه‌ای از طوفان‌های گرد و غبار و روند جابه‌جایی آن‌ها تحقیق‌های فراوانی انجام شده است که چشمه‌های اصلی و فرعی گرد و غبار را مبتنی بر ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های ماهواره‌ای تعیین می‌نمایند. مطالعه چرخه زندگی گرد و غبار، جابه‌جایی، و برهم‌کنش آن‌ها با سامانه اقلیم توسط مدل‌های عددی اقلیم توسط محققان در سرتاسر جهان انجام شده است (نبات و همکاران، ۲۰۱۲؛ زکی و همکاران، ۲۰۰۶؛ شائو و همکاران، ۲۰۰۳؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹). فناوری سنجش از دور در شناسایی چشمه گرد و غبار و مشخصه‌های آن نقش ویژه‌ای دارد. بخش عمده‌ای از تحقیق‌ها در ارتباط با گرد و غبار و ویژگی‌های آن توسط داده‌های حاصل از سنجنده‌های ماهواره مانند MODIS، TOMS، و MISR انجام شده است (الام و همکاران، ۲۰۱۱؛ کاسکوئیس و همکاران، ۲۰۱۲). بر همین اساس، بیشترین غلظت AOD در پاکستان در فصل تابستان و کمترین در فصل زمستان به‌دست آمد (الام و همکاران، ۲۰۱۱). همین نتیجه در بررسی AOD بر روی هند نیز به‌دست آمد (پراساد و همکاران، ۲۰۰۷). در یونان نیز پیش‌فصلی ذره‌های معلق جوی توسط AOD محصول MODIS کمترین مقدار ۰/۲ را در زمستان و بیشترین ۰/۴۵ را در فصل تابستان نشان داد (کاسکوئیس و همکاران، ۲۰۱۲). واکاوی و ردیابی پدیده گرد و غبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش از دور توسط رستمی و حسینی (۱۳۹۷) انجام شد. بدین منظور، از ترکیب تحلیل‌های آماری، همدیدی، و سنجش از دور و تصاویر MODIS و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی بهره گرفته شد. نتایج حاصل شده نشان داد ماه‌های ژوئن، جولای، اوت، و می به‌ترتیب از نظر فراوانی بیشترین رخداد و ماه دسامبر کمترین رخداد گرد و غبار را دارند و دریاچه خشک‌شده هامون، بیابان‌های افغانستان، حاشیه‌های جنوبی و شرقی

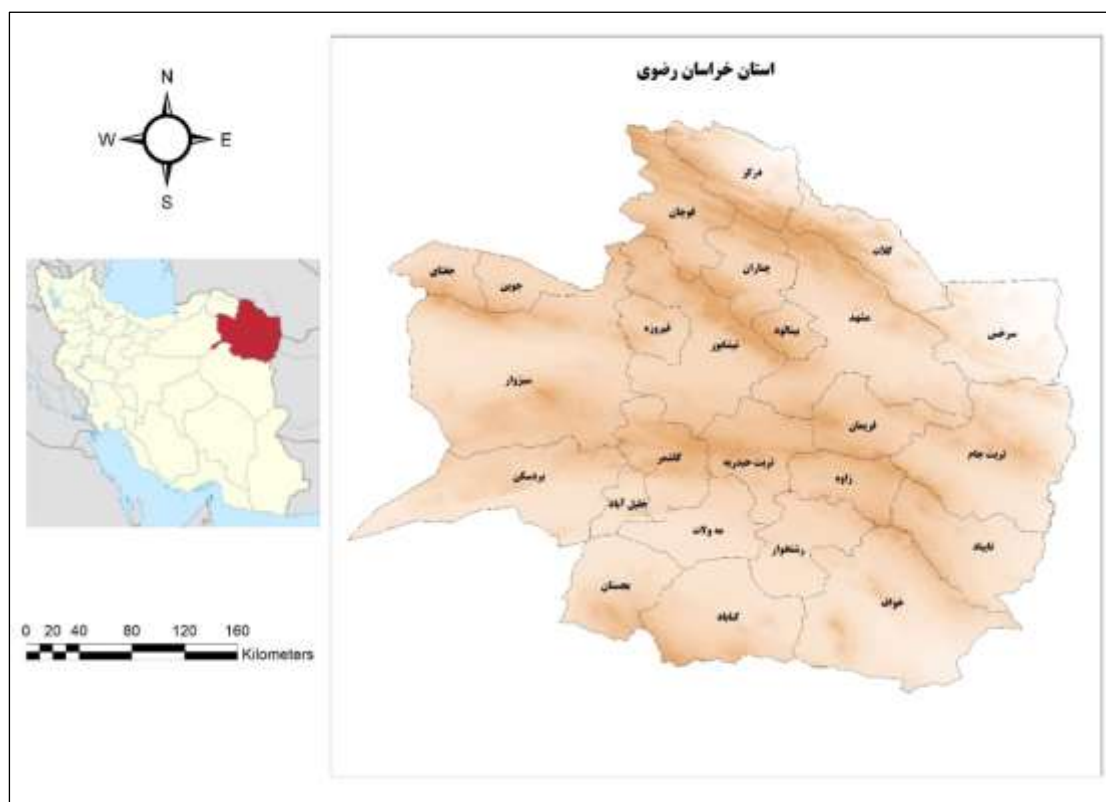
لوت، بیابان ربع‌الخالی، مناطق مرکزی و شمال شرقی عربستان و جنوب عراق منابع اصلی و مولد گرد و غبار منطقه مورد مطالعه است. بروغنی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی نقش خشک‌سالی بر فراوانی وقوع گرد و غبار در استان خراسان رضوی پرداخته‌اند. در این تحقیق از شاخص SPI برای محاسبه خشک‌سالی استفاده شد. داده‌های مربوط به بارش از سال ۱۹۸۰-۲۰۱۰ و داده‌های مربوط به گرد و غبار از سال ۲۰۰۴-۲۰۱۰ تحلیل شد. سپس، پهنه‌بندی گرد و غبار و خشک‌سالی در دوره آماری مشترک (۲۰۰۴-۲۰۱۰) با استفاده از روش کریجینگ در نرم‌افزار rcGIS صورت گرفت. نتایج پهنه‌بندی تعداد وقوع طوفان گرد و غبار و خشک‌سالی حاکی از آن است که در سال ۲۰۰۸ بیشترین تعداد وقوع طوفان گرد و غبار (۲۲۶ واقعه گرد و غبار) رخ داده و خشک‌سالی شدید در سطح استان بوده است. همچنین، در سال ۲۰۰۵ کمترین تعداد وقوع گرد و غبار (۸۵ واقعه گرد و غبار) رخ داده و شرایط ترسالی در سطح استان حاکم بوده است.

مطالعه‌ای در حیدرآباد هند ضریب همبستگی ۰/۷ را بین AOD و مقادیر زمینی نشان می‌دهد. بررسی توزیع زمانی و مکانی طوفان‌های گرد و غبار در غرب ایران نشان داد که بیشترین میزان AOD در این منطقه در ماه ژوئیه است (نامداری و همکاران، ۲۰۱۶). کرمی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی همدیدی و شبیه‌سازی دو طوفان هم‌زمان گردوخاک در مناطق شرق و شمال شرقی ایران پرداختند. در این مطالعه، دو طوفان هم‌زمان (۲۷ تا ۲۹ مه ۲۰۱۸) بررسی شده که در آن دید افقی در استان‌های شرق و شمال شرقی به‌شدت کاهش یافته است. بررسی تصاویر سنجنده مودیس بر روی ماهواره ترا برون‌داد مدل‌های HYSPLIT و BSC-DREAM نشان داد که کانون طوفان شمالی نواحی اطراف دریاچه آرال و مناطق شمال کشور ترکمنستان است و کانون طوفان جنوبی اطراف دریاچه هامون در مرز بین ایران و افغانستان است. شبیه‌سازی این پدیده با مدل BSC-DREAM نشان داد که مدل الگوی گردوخاک در منطقه نحوه گسیل و انتشار ذرات گردوخاک را به‌خوبی نشان داده است. همچنین، خروجی AOD این مدل به‌درستی وقوع دو طوفان هم‌زمان و افزایش عمق نوری در منطقه متأثر از آن‌ها را شبیه‌سازی کرده است. همچنین، بررسی گرد و غبار در غرب ایران با کاربست داده AOD تغییرات شدیدتر و بیشتری را در استان خوزستان نسبت به دیگر استان‌های غربی تعیین نمود (برتینا و همکاران، ۱۳۹۳). بیشترین AOD در استان خوزستان با ۰/۷۸ با خطای ۰/۲۲ بوده است. انحراف معیار بالا در استان خوزستان نشان‌دهنده تغییرات شدید AOD در این استان است. گسترش رخداد طوفان‌های گرد و غبار در سال‌های آتی می‌تواند از پیامدهای خشک‌سالی و تغییرات اقلیمی و ایجاد پهنه‌های بیابانی نوظهور به‌عنوان منبع و سرچشمه طوفان‌های گرد و غبار باشد. بررسی و مطالعه طوفان‌های گرد و غبار امری ضروری است و استفاده هم‌زمان از داده‌های ماهواره‌ای همراه مدل کاربردی و دوگانه HYSPLIT به همراه تحلیل و بررسی آماری می‌تواند بسیار مفید و کاربردی برای منطقه مورد مطالعه باشد. هدف از این مطالعه بررسی برخی مشخصه‌های طوفان‌های گرد و غبار در استان خراسان رضوی و شناسایی چشمه‌ها و ردیابی مسیر گرد و غبار به شمال شرق کشور است.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمال شرقی کشور ایران در محدوده طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی قرار دارد. این استان از جنوب به استان‌های خراسان جنوبی و یزد، از غرب به استان سمنان، از شمال به استان خراسان شمالی، و از شرق با کشور افغانستان هم‌مرز است. ارتفاعات هزارمسجد، کپه‌داغ، و بینالود در شمال استان در راستای شمال شرقی- جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده دیگر در راستای شرقی در مرکز و در راستای جنوب شرقی در مرکز و جنوب استان وجود دارد. سرخس کم‌ارتفاع‌ترین در شمال شرق استان، کویر بجستان در جنوب شرقی استان، و دشت کویر در غرب استان قرار دارد. شمال به جنوب استان از ارتفاع کاسته شده و دشت هموار و حاصل خیز در بین ارتفاعات و اطراف آن‌ها قرار دارد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی

مشخصات ایستگاه‌های همدیدی استان خراسان رضوی در جدول ۱ آمده است. برخی ایستگاه‌ها قدمت بیشتر و دوره آماری طولانی‌تر دارند.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی و تاریخ تأسیس ایستگاه‌های همدیدی استان خراسان رضوی

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	سال تأسیس (خورشیدی)	سال تأسیس (میلادی)
۱	بردسکن	۳۵٫۲۷	۵۷٫۹۷	۱۳۷۸	۱۹۹۹
۲	درگز	۳۷٫۴۷	۵۹٫۰۷	۱۳۸۶	۲۰۰۷
۴	گلمکان	۳۶٫۴۸	۵۹٫۲۸	۱۳۶۳	۱۹۸۴
۵	گناباد	۳۴٫۳۵	۵۸٫۶۸	۱۳۶۵	۱۹۸۶
۷	کاشمر	۳۵٫۲۷	۵۸٫۴۷	۱۳۶۴	۱۹۸۵
۹	مشهد	۳۶٫۲۳	۵۹٫۶۲	۱۳۲۸	۱۹۴۹
۱۰	نیشابور	۳۶٫۲۷	۵۸٫۸	۱۳۶۹	۱۹۹۰
۱۱	قوچان	۳۷٫۱۲	۵۸٫۴۵	۱۳۶۲	۱۹۸۳
۱۲	سبزوار	۳۶٫۲	۵۷٫۶۵	۱۳۳۳	۱۹۵۴
۱۳	سرخس	۳۶٫۵۳	۶۱٫۱۳	۱۳۶۳	۱۹۸۴
۱۴	ترت حیدریه	۳۵٫۲۷	۵۹٫۲۲	۱۳۳۷	۱۹۵۸
۱۵	ترت جام	۳۵٫۲۸	۶۰٫۵۵	۱۳۷۱	۱۹۹۲

بر اساس دستورالعمل سازمان جهانی هواشناسی (WMO)<sup>۱</sup>، هرگاه در ایستگاهی سرعت باد از ۳۰ نات (۱۵ متر بر ثانیه) بیشتر شود و دید افقی به علت پدیده گرد و غبار به کمتر از یک کیلومتر برسد، طوفان گرد و غبار گزارش می‌شود (Manual on Code, WMO NO.306). در میان صد پدیده هواشناختی، که در دیده‌بانی سطح زمین گزارش می‌شود، کد پدیده‌های ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵ طوفان گرد و غبار را معرفی می‌کنند.

کدهای ۳۰ تا ۳۵ مربوط به طوفان گرد و غبار یا شن است. شرایط گزارش طوفان گرد و غبار یا شن کاهش دید به کمتر از یک هزار متر و سرعت باد ۳۰ نات یا بیشتر است.

#### جدول ۲. کدهای طوفان گرد و غبار در گزارش‌های هواشناسی

کد	وضعیت جوی
۳۰	طوفان گرد و غبار سبک تا متوسط ضعیف
۳۱	طوفان گرد و غبار سبک تا متوسط
۳۲	طوفان گرد و غبار تشدیدشده طی ساعت گذشته
۳۳	طوفان گرد و غبار شدید، تضعیف طی ساعت گذشته
۳۴	طوفان گرد و غبار شدید بدون تغییر طی ساعت گذشته
۳۵	طوفان گرد و غبار شدیدشده طی ساعت گذشته

در ابتدا به منظور تعیین فراوانی رخداد طوفان‌های گرد و غبار در استان خراسان رضوی، از کدهای هواشناسی مربوط به دیده‌بانی طوفان‌های گرد و غبار (۳۰-۳۵) در ایستگاه‌های انتخابی استفاده شده است. تحلیل و واکاوی آماری فراوانی رخداد‌های طوفان‌های گرد و غبار منطقه مورد مطالعه محاسبه و تعیین شد. فهرست آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

در مرحله بعد به بررسی چشمه رخداد طوفان گرد و غبار به صورت مطالعه موردی در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵ با استفاده از تصویر ماهواره MODIS در مشهد پرداخته شد. برای آشکارسازی مسیر پدیده و بررسی تصاویر ماهواره از سنجنده مودیس استفاده شد. در مقایسه با دیگر سنجنده‌ها، MODIS تمام سطح زمین را در ۳۶ باند سنجش می‌کند که از باند مرئی (۰,۴۱۵ میکرومتر) تا مادون قرمز حرارتی (۱۴,۲۳۵ میکرومتر) را پوشش می‌دهد. محصولات MODIS برای تعیین خصوصیات و پایش انتقال گرد و غبار می‌تواند بسیار مفید باشد. MODIS دارای برخی ویژگی‌ها مثل دارابودن کانال‌های باریک مفید قابل دسترس و قدرت تفکیک فضایی مناسب است. بنابراین، با به‌کارگیری باندهای MODIS می‌توان طوفان‌های گرد و غبار را به صورت دقیق آشکارسازی کرد (فلاح ززولی و همکاران، ۱۳۹۳).

حسگر مودیس دستگاهی با تفکیک رادیومتریکی زیاد (۱۲ بیت) است که در دو ماهواره امریکایی ترا Terra و آکوا Aqua حمل می‌شود. زمان عبور دو ماهواره ترا Terra و آکوا Aqua از خط استوا ۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰ به وقت محلی است. در این پژوهش تصاویر True color باند مرئی MODIS با قدرت تفکیک یک کیلومتر در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵ در منطقه از سایت ناسا دریافت شد.

ژرفای نوری هواویز (AOD)<sup>۲</sup> یکی از پارامترهای مهم در مطالعه طوفان‌های گرد و غبار است. ژرفای نوری هواویز در واقع به توزیع هواویزهای گرد و غبار موجود در جو اشاره دارد. این کمیت وابسته به طول موج به صورت کاهش نور در واحد طول بر روی یک مسیر مشخص تعریف می‌شود. مسیر نوری عمودی فاصله عمودی از سطح زمین در قسمت

1. World Meteorological Organization  
2. Aerosol Optical Depth

فوقانی جو است. مقدار ژرفای نوری هواویز می‌تواند با تراکم تعداد هواویزها (آئروسول‌ها) و ویژگی‌های آن ذرات متفاوت باشد.

AOD ژرفای نوری هواویز کمیته بی‌بُعد بوده و عبارت است از میزان جلوگیری از گذر پرتو نور در جو به خاطر جذب و پراکنش ناشی از وجود هواویزها در مسیر عبور نور. همچنین، AOD به‌عنوان ضریب خاموشی کاهش تشعشع بر روی یک ستون قائم در واحد طول تعریف می‌شود. نقشه‌های مربوط به ژرفای نوری هواویزها با تفکیک مکانی ۰٫۱ در ۰٫۱ درجه و در دوره‌های زمانی سه‌ساعته از مرکز پیش‌بینی بارسلونا برای تاریخ مورد بررسی دریافت شد.

پس از وقوع طوفان گرد و غبار و شناسایی مناطق درگیر، با استفاده از مدل HYSPLIT ردیابی مسیر جابه‌جایی ذرات گرد و غبار به مشهد مشخص شد. مدل HYSPLIT، که مدلی دوگانه است، برای محاسبات خط سیر حرکت گرد و غبار، پراکندگی، و شبیه‌سازی آن استفاده می‌شود. در این مدل محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی انجام می‌گیرد. زیربخش تعیین غلظت مدل نیاز به داده‌های کامل هواشناسی از جمله سرعت باد (در سه جهت مداری، نصف‌النهاری، و قائم)، ارتفاع لایه مرزی، دما و فشار سطحی، میزان اختلاط افقی و عمودی، میزان رطوبت، شار گرمای سطحی و پنهان، شار تلاطمی و مقادیر بارش دارد. این مدل، که توسط لابراتوار هوایی سازمان ملی جوی و اقیانوس NOAA طراحی و توسعه یافته، برای نمایش مسیر حرکت جریانات جوی از دو رویکرد لاگرانژی و اوپلری بهره می‌برد. طبق تعریف دراکسلر و رالف (۲۰۰۳)، در علم مکانیک و دینامیک سیالات دو رویکرد برای مطالعه حرکت سیالات در فضا وجود دارد که عبارت‌اند از: رویکرد اوپلری و لاگرانژی. این دو رویکرد در پاره‌ای از موارد با هم متفاوت‌اند. برای ردیابی از رویکرد لاگرانژی استفاده می‌شود. این رویکرد در بررسی آلودگی هوا، مسیریابی چرخندها، بررسی منشأ طوفان‌های گرد و غبار کاربردهای گسترده‌ای دارد. از آنجا که در رویکرد لاگرانژی هر ذره در زمان‌های مختلف موقعیت‌های متفاوتی خواهد داشت، رویکرد لاگرانژی این امکان را فراهم می‌آورد که در مدل‌های پایه لاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی و زمانی خاص حرکت آن را در گام‌های زمانی Forward و روش Backward ردیابی نمایند. در این تحقیق از روش Forward و Backward در ساعت‌های ۱۲ و ۱۵ استفاده شده است. ارتفاع اولیه برای ردیابی مسیر ذرات گرد و غبار ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شد.

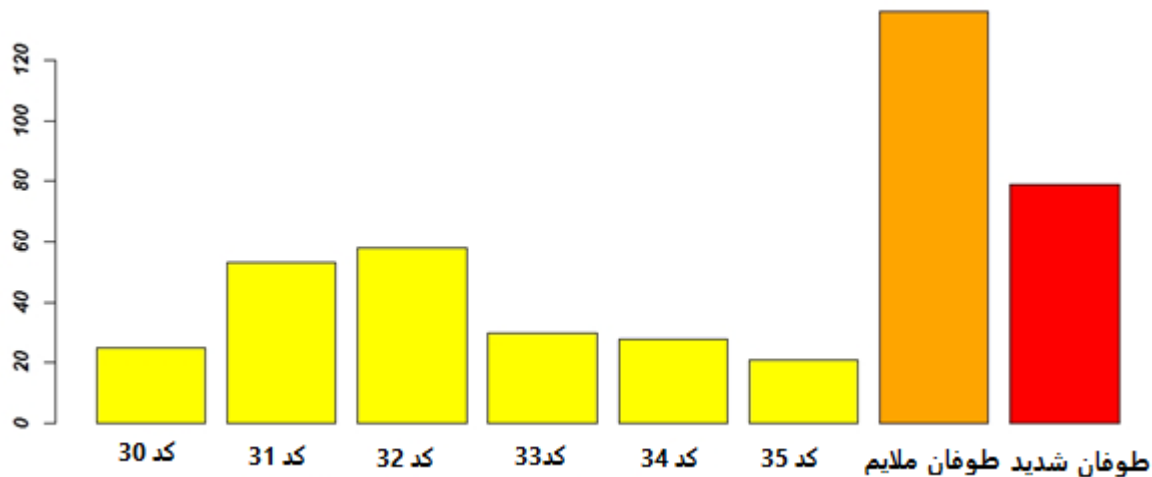
## نتایج

مجموع تعداد فراوانی طوفان گرد و غبار در جدول ۳ ارائه شده است. بیشترین فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در سبزوار با ۱۳۶ طوفان ملایم و ۷۹ طوفان شدید است. سرخس و گناباد با توجه به تعداد قابل توجه روزهای طوفان گرد و غبار در رتبه‌های بعدی بوده‌اند. ذکر این نکته لازم است که قوچان واقع در شمال غرب استان با کمترین تعداد روزهای طوفان گرد و غبار در مباحث بعدی در تحلیل‌ها مدنظر قرار نگرفت.

جدول ۳. فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در ایستگاه‌های خراسان رضوی (کدهای ۳۰-۳۵)

دوره آماری	ایستگاه هواشناسی	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	طوفان ملایم	طوفان شدید
۱۳۹۸-۱۳۶۶	گلمکان	۲	۱	۲	۱	*	۲	۵	۳
۱۳۹۸-۱۳۶۷	گناباد	*	۷	۴	۱	۱	۱	۱۱	۳
۱۳۹۸-۱۳۸۰	کاشمر	۱	*	*	*	۱	*	۱	۱
۱۳۹۸-۱۳۳۱	مشهد	*	۵	*	*	۴	۱	۵	۵
۱۳۹۸-۱۳۸۵	نیشابور	*	۱	*	*	*	۱	۱	۱
۱۳۹۸-۱۳۷۲	قوچان	*	*	۱	*	*	*	۱	۰
۱۳۹۸-۱۳۳۴	سبزوار	۲۵	۵۳	۵۸	۳۰	۲۸	۲۱	۱۳۶	۷۹

دوره آماری	ایستگاه هواشناسی	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	طوفان ملایم	طوفان شدید
۱۳۹۸-۱۳۶۳	سرخس	۱۳	۱۱	۲۷	۱	۱	۳	۵۱	۵
۱۳۹۸-۱۳۴۰	ترت حیدریه	۲	۳	۵	۲	*	*	۱۰	۲
۱۳۹۸-۱۳۷۴	ترت جام	۳	*	۱	*	*	۳	۴	۳



شکل ۲. تعداد طوفان‌های گرد و غبار در ایستگاه سبزوار

### ردیابی و آشکارسازی مسیر طوفان گرد و غبار با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و مدل‌سازی این پدیده با استفاده از نرم‌افزار HYSPLIT، مشهد تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵

در تاریخ ۲۵ مهر ۱۳۹۶ طوفان گرد و غباری شدید در سطح استان خراسان رضوی و کلان‌شهر مشهد به وقوع پیوسته است که این رخداد با کمک مدل‌سازی HYSPLIT و تصاویر سنجش از دور بررسی و تحلیل شد. این پدیده همراه با کاهش دید افقی تا ۵۰۰ متر بوده و حداکثر سرعت باد به ۱۱ متر بر ثانیه معادل ۴۰ کیلومتر بر ساعت رسید. وقوع این طوفان، که به همراه گرد و غبار غلیظ آسمان مشهد مقدس را فراگرفته، در نه سال اخیر بی‌سابقه بود. شدت گردوغبار به حدی بود که دید افقی در مشهد کاهش یافته و تردد عابران پیاده و حتی خودروها را سخت و کند کرده بود (شکل ۳).

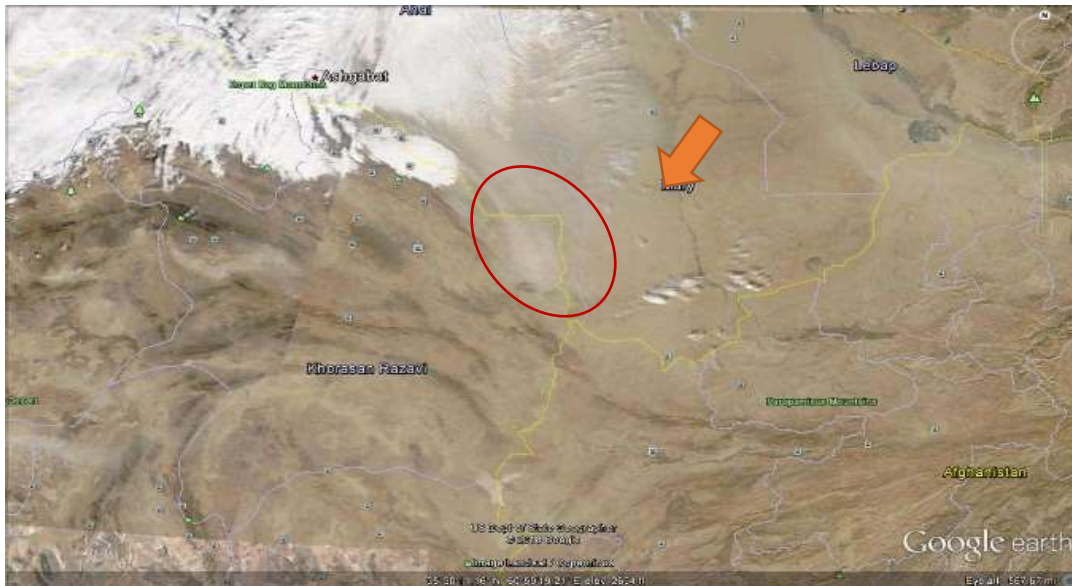
بررسی مدل HYSPLIT و تصاویر سنجنده MODIS تأیید کرد و نشان داد که انتقال گرد و غبار از ناحیه شمال و شمال شرق از صحرای قره‌قوم در کشور ترکمنستان به مشهد رخ داده است.



شکل ۳. تصویر طوفان گرد و غبار مشهد در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵

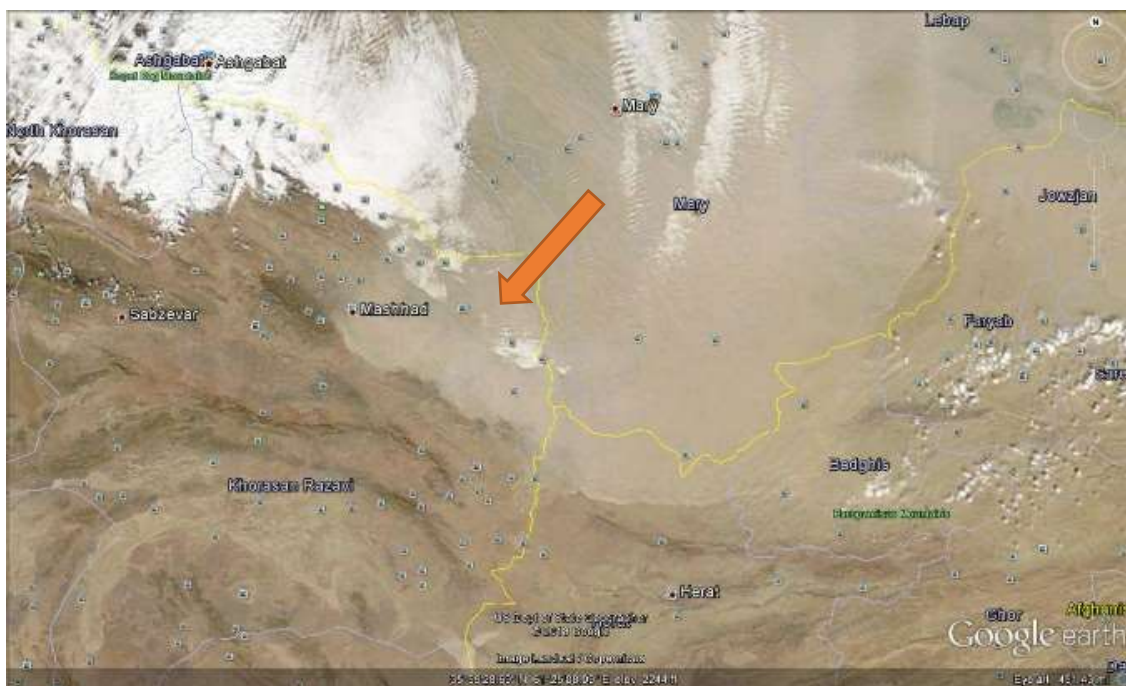
### بررسی تصاویر ماهواره

به منظور پایش حرکت طوفان گرد و غبار و بررسی رفتار آن از داده‌های سنجنده مودیس در ماهواره‌های ترا و آکوا استفاده شد. در بررسی تصاویر True color باند مرئی مودیس در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵ مشاهده شد که در ابتدا این پدیده بر روی صحرای ترکمنستان شکل گرفته و منشأ این سامانه صحرای ترکمنستان بوده که در حرکت به سمت غرب بر تراکم گرد و غبار افزوده شده و با ادامه به سمت غرب حرکت کرده و پس از عبور از مرزهای شرقی ایران بر روی مشهد واقع شده که در تصاویر مشاهده می‌شود.



(a)

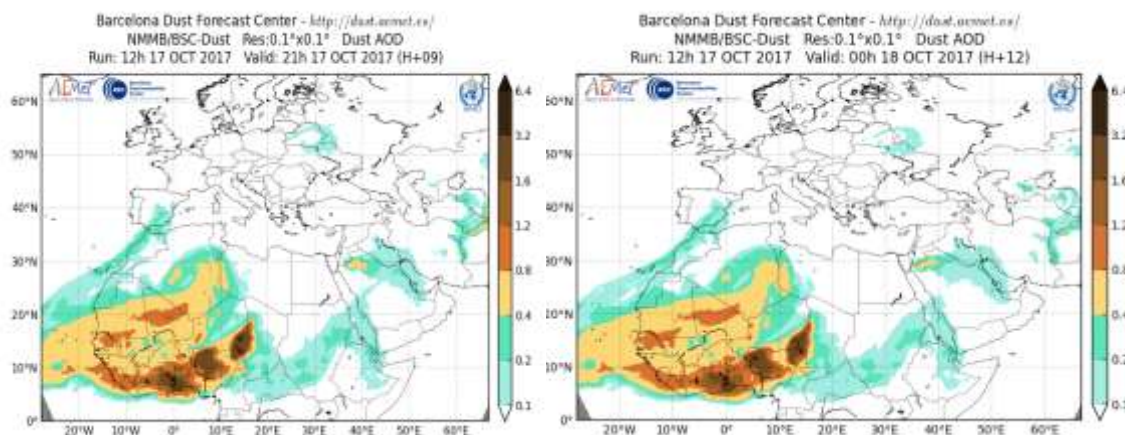


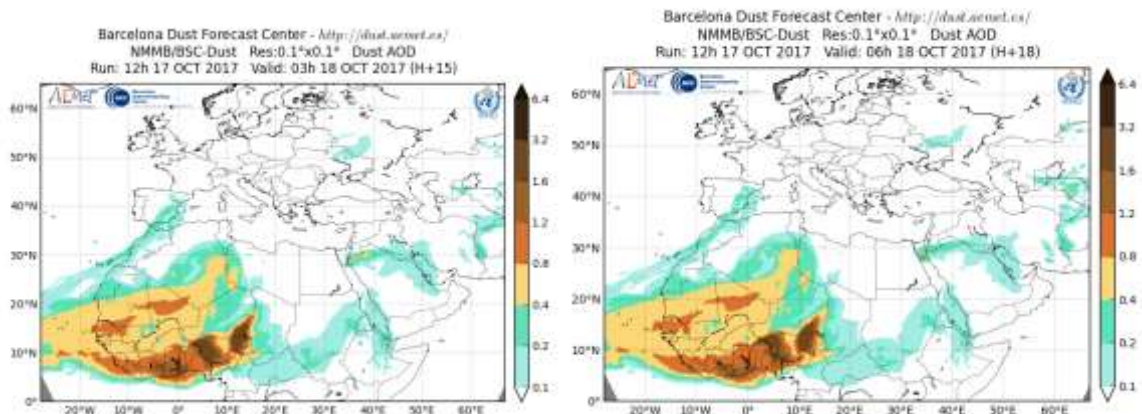


(b)

شکل ۴. محدوده شکل‌گیری و گسترش گرد و غبار ۱۳۹۶/۷/۲۵ و نفوذ آن به مشهد  
تصاویر سنجنده مودیس (a) ماهواره Terra (b) ماهواره آکوا

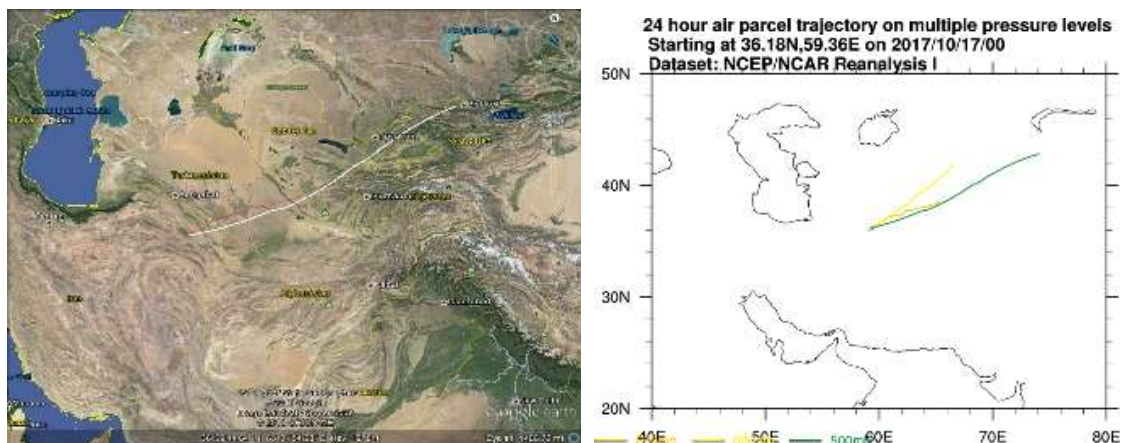
نقشه‌های مربوط به پیش‌بینی ژرفای نوری هواویزها با تفکیک مکانی ۰.۱ در ۰.۱ درجه از مرکز پیش‌بینی بارسلونا برای روز ۱۳۹۶/۷/۲۵ و در بازه‌های زمانی سه‌ساعته دریافت و مشاهده شد که این پدیده بر روی ترکمنستان شکل گرفته و با نفوذ به مرزهای شرقی کشور مشهد را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۵).





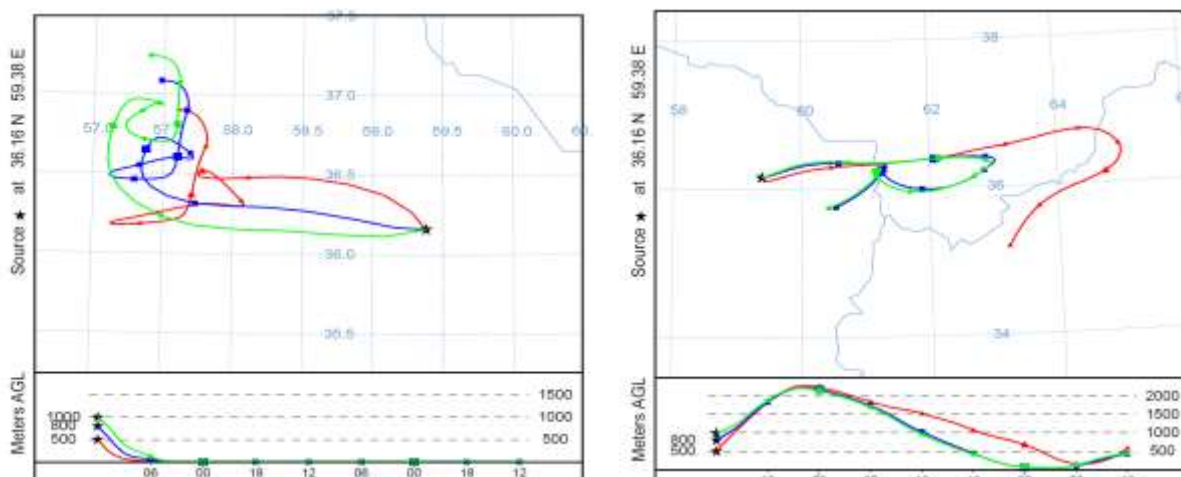
شکل ۵. چگونگی توزیع هواویزها بر اساس ژرفای نوری هواویز در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵

نقشه‌های تعیین مسیر و ردیابی سامانه‌های جوی و ذرات هوا در سطوح فشاری ۵۰۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ میلی بار و با انتخاب زمان ۲۴ ساعته در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵ و تعیین موقعیت مکانی مشهد بر اساس داده‌های NCAR R1 در سایت NOAA در دو فرمت pdf و KML ترسیم و بررسی شد. مسیر بسته هوا می‌تواند نمایشگر مسیر انتشار گرد و غبار باشد که در شکل ۶ مسیر و جهت سامانه نشان داده شده است. هر چه زمین صاف‌تر و در ارتفاع کمتر و خشکی هوا و رطوبت خاک کمتر باشد و منطقه به مراکز تولید گرد و غبار نزدیک‌تر باشد امکان رخداد طوفان گرد و غبار به همراه ناپداری‌های جوی بیشتر خواهد بود. طوفان‌های گرد و غبار در شمال شرقی کشور به صورت پدیده‌ای متداول تبدیل شده و توپوگرافی، فیزیک زمین منطقه، و گسترده شدن دشت‌های خشک ناشی از خشک‌سالی‌های پیاپی و خشکی هوا عوامل مؤثر آن‌هاست.

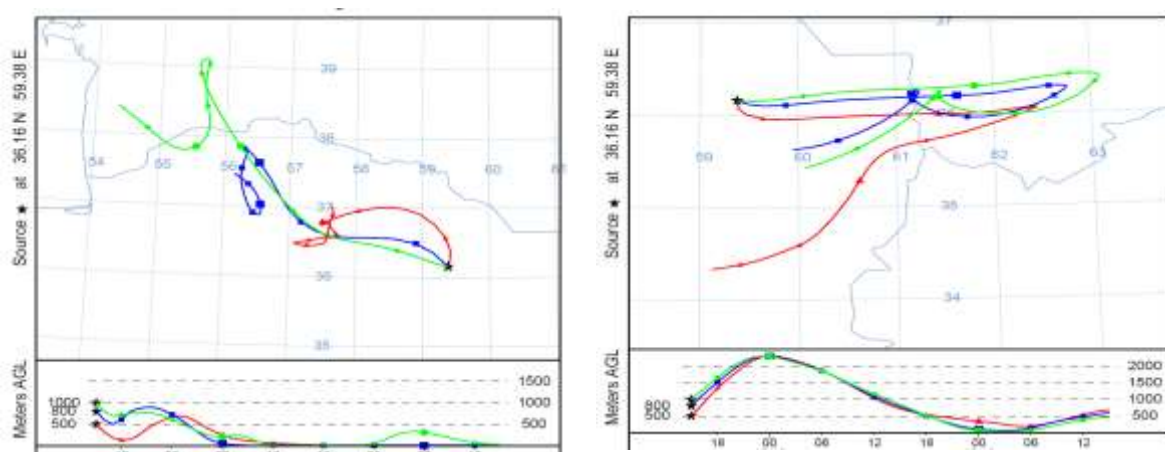


شکل ۶. ردیابی مسیر باد و توده هوا در تاریخ ۱۳۹۶/۷/۲۵

ردیابی جریان باد در روزهای طوفان گرد و غبار با استفاده از مدل رهگیری HYSPLIT انجام شده و روش‌های خط سیر عقب‌گرد و جلوگرد، رخداد طوفان گرد و غبار در ایستگاه مشهد را رهگیری کرده‌اند.



(a)



(b)

### شکل ۷. رهگیری جریان باد به روش Forward و Backward

(a) ساعت ۱۲ (b) ساعت ۱۵

رو به عقب (سمت راست) و رو به جلو (سمت چپ)

علامت ستاره روی خروجی‌های مدل نشان می‌دهد که ایستگاه با طوفان گرد و غبار بوده که طول و عرض آن به مدل داده شده است. همچنین، مسیر باد رسیده به ایستگاه با رنگ‌های سبز، آبی، و قرمز نشان داده شده است. ارتفاع نمایش داده شده در پایین هر نقشه که مسیرهای باد رسیده به ایستگاه از آن منشأ می‌گیرند نشان‌دهنده ارتفاع مسیر طی شده از سطح زمین است. با توجه به اینکه توده‌های هوای رسیده به منطقه از مناطق مولد توده‌های گرد و غبار عبور کرده باشند، می‌توان آن‌ها را به منزله محل عبور توده‌های گرد و غبار شناسایی کرد.

تصاویر مدل‌سازی فوق نشان می‌دهد که منشأ گرد و غبار از کشور همسایه و ترکمنستان به سمت منطقه مورد مطالعه و شهر مشهد بوده است.

## نتیجه‌گیری

پدیده طوفان گرد و غبار در دهه اخیر یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در ایران، غرب، و جنوب غرب آسیاست که از پیامدهای خشک‌سالی و تغییر اقلیم است. طوفان‌های گرد و غبار می‌تواند اثرهای مخربی در محصولات کشاورزی، مسکن، و زیرساخت و همچنین سلامت جامعه داشته باشد. در این پژوهش با کمک تحلیل آماری، فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در استان خراسان رضوی بررسی و مشاهده شد که بیشترین فراوانی طوفان‌های گرد و غبار در سبزواری با ۱۳۶ طوفان ملایم و ۷۹ طوفان گرد و غبار شدید بوده است. با توجه به تعداد قابل توجه روزهای طوفان گرد و غبار، شهرهای سرخس و گناباد در رتبه‌های بعدی هستند. با توجه به حمل دوربرد ذرات گرد و غبار، کشورهای همسایه و پهنه‌هایی در فواصل دور نیز می‌توانند به‌عنوان چشمه و منبع گرد و خاک‌ها عمل کنند و تأثیرگذار باشند. سنجش از دور علم و تکنیک به‌دست‌آوردن اطلاعات از پدیده‌های جغرافیایی بدون تماس با آنهاست و می‌تواند راه تشخیص بسیار مؤثری برای مسیریابی طوفان‌های گرد و غبار جهت برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های مؤثرتر باشد. برای تشخیص پدیده طوفان گرد و غبار نیاز به تصاویری با پوشش وسیع است. از این لحاظ، تصاویر مربوط به سنجنده مودیس به دلیل داشتن باندهای طیفی زیاد برای مطالعات مربوط به پدیده گرد و غبار مناسب است. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع و رخداد طوفان‌هایی که می‌تواند وضعیت بحرانی در کلان‌شهر مشهد و مناطق شمال شرق کشور ایجاد نماید، بررسی‌هایی با استفاده از تصاویر مودیس و همچنین خروجی مدل HYSPLIT در این مطالعه انجام گرفت. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر اساس تصاویر ماهواره منشأ پدیده طوفان گرد و غبار در تاریخ مورد بررسی بخش‌هایی از ترکمنستان واقع در شمال شرق مشهد بوده که خروجی نقشه‌های مدل HYSPLIT نیز هم‌پوشانی خوبی با تصاویر ماهواره را نشان می‌دهد. همچنین، در بررسی شاخص AOD و بررسی Trajectory\_Wind نیز این مسیر هم‌پوشانی داشته است. به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد در ابتدا هسته‌های اولیه گرد و غبار در صحرای ترکمنستان شکل گرفته و در حرکت به سمت غرب بر تراکم گرد و غبار افزوده شده و به سمت غرب حرکت کرده و پس از عبور از مرزهای شرقی ایران سپس به سمت شهر مشهد نفوذ کرده است. این نتایج با مطالعات انجام گرفته در منطقه همسوسست (کرمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ بروغنی و همکاران، ۱۳۹۸).

## منابع

- اردبیلی، لیلا (۱۳۸۹). بررسی فرایندهای مؤثر در تشدید گردوغبار سال‌های اخیر ایران، مجموعه مقالات همایش ملی فرسایش بادی و طوفان‌های گرد و غبار یزد-ایران، ص ۲۴-۴۹.
- برتینا، ه.؛ صیاد، غ.؛ متین‌فر، ح. و حجتی، س. (۱۳۹۳). توزیع زمانی- مکانی ذرات معلق اتمسفری در غرب کشور بر مبنای داده‌های طیفی سنجنده MODIS، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۴).
- بروغنی، م.؛ مرادی، ح.؛ زنگنه اسدی، م. و پورهاشمی، س. (۱۳۹۸). ارزیابی نقش خشک‌سالی بر فراوانی وقوع گرد و غبار در استان خراسان رضوی، فصل‌نامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۵): ۱۰۹-۱۲۱.
- رمضانی، ن. و جعفری، ر. (۱۳۸۹). تغییرات کاربری اراضی در ایجاد طوفان‌های گرد و غبار و تأثیر آن بر تغییرات اقلیمی، مجموعه مقالات همایش ملی فرسایش بادی و طوفان‌های گرد و غبار، یزد-ایران، ش ۱۷.
- رستمی د. و حسینی س. ا. (۱۳۹۷). واکاوی و ردیابی پدیده گرد و غبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش از دور، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۳): ۱۰۳-۱۱۹.
- علیدادی، ح. (۱۳۹۰). منابع آلاینده هوا و اثر آن بر محیط زیست، چ ۲، انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد.
- فلاح ززولی، م.؛ وفایی‌نژاد، ع.؛ خیرخواه زرکش، م. و احمدی دهکاء، ف. (۱۳۹۳). پایش و تحلیل سینوپتیکی پدیده گرد و غبار با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: گرد و غبار ۱۸ ژوئن ۲۰۱۲)، نشریه اطلاعات جغرافیایی، ۲۳(۹۱): ۶۹-۸۰.
- کرمی، س.؛ حسین حمزه، ن.؛ نوری، ف. و رنجبر، ع. (۱۳۹۸). بررسی هم‌دیدگی و شبیه‌سازی ۲ طوفان هم‌زمان گردوغبار در مناطق شرق و شمال شرقی ایران، کنفرانس بین‌المللی گرد و غبار در جنوب غرب آسیا، زابل، دانشگاه زابل.
- Alam, K.; Qureshi, S. and Blaschke, T. (2011). Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. *Atmospheric environment*, 45(27): 4641-4651.
- Alizadeh Choobari, O.; Zawar-Reza, P. and Sturman, A. (2014). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Journal of Atmospheric Research*, 138: 152-165.
- Draxler, R.R. and Rolph, G.D. (2003). HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>
- Huang, J.; Fu, Q.; Zhang, W.; Wang, X.; Zhang, R.; Ye, H. and Warren, S. G. (2011). Dust and black carbon in seasonal snow across northern China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(2): 175-181.
- Kaskaoutis, D. G.; Kahn, R. A.; Gupta, P.; Jayaraman, A. and Bartzokas, A. (2012). *Desert Dust Properties, Modelling, and Monitoring*. Advances in Meteorology.
- Miller, R. L.; Tegen, I. and Perlwitz, J. (2004). Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D4).

- Nabat, P.; Solmon, F.; Mallet, M.; Kok, J. F. and Somot, S. (2012). Dust emission size distribution impact on aerosol budget and radiative forcing over the Mediterranean region: a regional climate model approach. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 12(7).
- Namdari, S.; Valizade, K. K.; Rasuly, A. A. and Sarraf, B. S. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 191.
- Prasad, A. K.; Singh, S.; Chauhan, S. S.; Srivastava, M. K.; Singh, R. P. and Singh, R. (2007). Aerosol radiative forcing over the Indo-Gangetic plains during major dust storms. *Atmospheric Environment*, 41(29): 6289-6301.
- Shao, Y., Yang, Y., Wang, J., Song, Z., Leslie, L. M., Dong, C., ... & Chun, Y. (2003). Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
- WMO Manual of codes Volume I.1-NO-306-(2009)
- Xuan, J. and Sokolik, I. N. (2002). Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China. *Atmospheric Environment*, 36(31): 4863-4876.
- Zakey, A. S.; Solmon, F. and Giorgi, F. (2006). Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(12): 4687-4704.
- Zhang, D.F.; Zakey A.S.; Gao, X.J. and Giorgi, F. (2008). Simulation of Dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8: 4625-4667.
- Zhang, D. F.; Zakey, A. S.; Gao, X. J.; Giorgi, F. and Solmon, F. (2009). Simulation of dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(4): 1095-1110.
- Zhang, H.; Hoff, R. M. and Engel-Cox, J. A. (2009). The relation between Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol optical depth and PM<sub>2.5</sub> over the United States: a geographical comparison by US Environmental Protection Agency regions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(11): 1358-1369.
- Zhao, C.; Liu, X.; Leung, L. R.; Johnson, B.; McFarlane, S. A.; Gustafson Jr, W. I. ... and Easter, R. (2010). The spatial distribution of mineral dust and its shortwave radiative forcing over North Africa: modeling sensitivities to dust emissions and aerosol size treatments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(18): 8821-8838.
- Zhao, C.; Liu, X.; Ruby Leung, L. and Hagos, S. (2011). Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over West Africa. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5): 1879-1893.
- Zhao, S.; Zhang, H.; Feng, S. and Fu, Q. (2015). Simulating direct effects of dust aerosol on arid and semi-arid regions using an aerosol-climate coupled system. *International Journal of Climatology*, 35(8): 1858-1866.