

DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2024.20805.1969

## شناسایی مسیرها و منابع رخدادهای گردوغبار در استان یزد با استفاده از مدل HYSPLIT

## و داده‌های سنجش از دور

## (مقاله پژوهشی)

۱- محمدرضا شیرغلامی\*، دکترای آب و هواشناسی، رییس گروه توسعه هواشناسی کاربردی اداره کل هواشناسی استان یزد، یزد، ایران.  
mrshirgholami@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

## چکیده

یکی از پدیده‌های مخرب جوی که مناطق دارای اقلیم خشک تا فراخشک مانند استان یزد را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، طوفان گردوغبار است. این مخاطره جوی، زیان‌های زیادی را به دنبال دارد که از جمله آنها می‌توان به مشکلات محیط زیستی، اجتماعی-اقتصادی، سلامت انسان، اقلیم و ریزاقلیم اشاره کرد. پایش مکانی و زمانی دقیق گردوغبار می‌تواند به شناسایی مسیر و کانون این پدیده کمک کرده و نقشی حیاتی در مدیریت و کاهش خسارات احتمالی طوفان ایفا کند. در پژوهش حاضر، سه نمونه از طوفان‌های گردوغبار رخ داده در سال ۲۰۲۲ میلادی در استان یزد مورد واکاوی قرار گرفت. زمانی که دید افقی کمتر از ۳/۵ کیلومتر و یکی از کدهای ۰۶ تا ۰۹ و یا ۳۰ تا ۳۵ گزارش شده باشد، یک طوفان گردوغبار مؤثر در نظر گرفته می‌شود. برای شناسایی مسیرهای انتقال توده گردوغبار به استان یزد، از مدل لاگرانژی HYSPLIT استفاده شد. نتایج حاصل از این مدل نشان داد که توده‌های گردوغبار برای رسیدن به استان یزد سه مسیر اصلی جنوب‌غربی، غربی-شمال‌غربی و شمال‌شرقی را طی می‌کنند. برای بررسی توزیع مکانی گردوغبار و نیز شناسایی دقیق‌تر منابع گردوغبار از داده‌های عمق نوری هواویزها مبتنی بر سنجش از دور، فرآورده MOD04/ MYD04\_L2 و همچنین فرآورده MOD08\_D3 استفاده شد. تصاویر به‌دست آمده از سنجنده مودیس، کانون‌های گردوغبار خارجی را بیابان‌های بزرگ عراق، سوریه، شبه جزیره عربستان و صحرای ترکمنستان و منشاء داخلی گردوغبار انتقالی را مناطق بیابانی واقع در استان‌های سمنان و اصفهان در شمال شرق استان یزد معرفی می‌نمایند. ضمن این که تالاب گاوخونی در شمال غرب منطقه مورد مطالعه به‌عنوان تشدیدکننده گردوغبار انتقالی از مرزهای غربی کشور عمل می‌کند. همچنین نتایج به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل HYSPLIT با یکدیگر همخوانی دارند.

واژگان کلیدی: کانون گردوغبار، دید افقی، عمق نوری هواویز، سنجنده مودیس، توزیع مکانی.

## مقدمه

ذرات گردوغبار می‌توانند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر اقلیم و وضع هوا تأثیر بگذارند. هواویزهای خاکی به‌طور مستقیم از طریق پراکندگی و جذب تابش، شار تابشی موج کوتاه و بلند را تحت تأثیر قرار می‌دهند و به‌طور غیرمستقیم با تأثیر بر فرآیندهای میکروفیزیکی ابر و با تغییر خواص نوری ابرها بر تعادل تابشی زمین اثر می‌گذارند. ذرات خاک می‌توانند به‌عنوان هسته‌های تراکم ابر و یخ عمل کنند و از طریق ویژگی‌هایی مانند سپیدایی ابر، بازدهی بارش، طول عمر ابر و ارتفاع ابر بر بودجه

هواویزها ذرات ریز جامد یا مایع معلق در جو زمین هستند که در اثر عوامل طبیعی و انسانی وارد جو زمین می‌شوند [۲۱]. گردوغبار فراوان‌ترین نوع هواویز در سطح جهان به‌صورت انبوه است و بر آب و هوا، چرخه آب، سلامت و رفاه عمومی و پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد. رویدادهای طوفان گردوغبار اغلب مقادیر زیادی گردوغبار معدنی را صدها کیلومتر انتقال می‌دهند و تأثیرات متعددی بر سامانه زمین دارند [۳۰، ۲۵، ۴].

بلندمدت بیانگر آن است که از اواخر دهه ۱۹۸۰ در نواکشوت موریتانی، از سال ۲۰۰۴ در زابل ایران و از اواخر دهه ۱۹۷۰ در مینکین چین، کاهش رخداد طوفان‌های گردوغبار ثبت شده است. هم متغیرهای اقلیمی و هم متغیرهای انسانی مهم هستند، اما فرآیندهای طبیعی (مجموع بارش و شدت باد) تأثیر بیشتری نسبت به اقدامات انسانی دارند [۲۶].

یکی دیگر از روش‌های بررسی طوفان‌های گردوغبار به ویژه در شناسایی کانون‌های گردوغبار و شبیه‌سازی مسیر آن‌ها، استفاده از مدل‌های عددی می‌باشد. در پژوهشی، رخداد گردوغبار در مارس و آوریل ۲۰۰۳ با استفاده از سامانه پیش‌بینی میان‌مقیاس جفت‌شده اقیانوس-جو (COAMPS<sup>۱</sup>) نیروی دریایی ایالات متحده در کشور عراق مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه پیش‌بینی‌های مدل با مقادیر دیدبانی برای طوفان‌های گردوغبار شدید نشان می‌دهد که COAMPS ورود و عقب‌نشینی رویدادهای گردوغبار اصلی را در مدت ۲ ساعت پیش‌بینی کرده است. در بیشتر موارد، COAMPS توانایی پیش‌بینی شدت طوفان را با خطای کمتر از ۱ کیلومتر دارد. به‌طور کلی، مدل بیش از ۸۵٪ از رویدادهای گردوغبار و رویدادهای جوی غیرخاکی دیدبانی شده در ایستگاه‌های مورد استفاده توسط مدل قابل پیش‌بینی است [۲۵].

نتایج حاصل از شبیه‌سازی شدیدترین رخداد طوفان گردوغبار در ۵۰ سال گذشته بر فراز بیابان صحرا در مناطق مراکش و موریتانی بین ۱۴ تا ۱۹ ژوئن ۲۰۲۰، با استفاده از مدل HYSPLIT<sup>۲</sup> نشان می‌دهد که میانگین غلظت PM<sub>10</sub> زیر ارتفاع ۱۰۰m در حین طوفان گردوغبار بالاتر از ۱۰۰ µg/m<sup>3</sup> در بیشتر مناطق مانند مراکش و موریتانی است؛ همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل، گویای آن است که ذرات PM<sub>10</sub> از طریق اقیانوس اطلس به دریای کارائیب و خلیج مکزیک منتقل و باعث افزایش غلظت در آن مناطق می‌شوند [۳۴].

استفاده از خروجی‌های مدل WRF به عنوان ورودی مدل HYSPLIT برای بررسی چشمه طوفان گردوغباری

تابشی تأثیر بگذارند. علاوه بر این، ذرات گردوغبار معدنی، اصلی‌ترین هواویز طبیعی تشکیل‌دهنده هسته یخ هستند که باعث می‌شوند ابرهای همرفتی به سرعت منجمد شوند [۳۴،۳۰،۲۲،۹،۸،۷].

طوفان‌های گردوغبار توسط بادهای شدید و متلاطم ایجاد می‌شوند که مواد ریزدانه را از رسوبات خشک و تثبیت‌نشده در مکان‌هایی که پوشش گیاهی اندک است و یا وجود ندارد، منتقل می‌سازد [۲۶،۵]. عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و فرسایش خاک سه عامل اصلی مؤثر بر رویدادهای گردوغبار هستند. با این حال، نقش شرایط اقلیمی در مقیاس بزرگ از اثرات پوشش گیاهی و فرسایش خاک قابل توجه‌تر است [۵]. علاوه بر این پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی نیز حاکی از آن است که طی قرن بیست و یکم، به سبب تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی بر وسعت مناطق خشک در سطح جهان احتمالاً افزوده خواهد شد. از این‌رو، انتشار گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تقریباً یک‌سوم مساحت زمین را دربرمی‌گیرد، سبب نگرانی‌های فزاینده‌ای شده است [۲۶].

با توجه به اهمیت زیاد طوفان‌های گردوغبار و خسارات سنگین آن به زندگی بشر، مطالعات زیادی در مورد جنبه‌های مختلف این پدیده اقلیمی مانند شکل‌گیری، علل و پیامدها، روند تغییرات، توزیع مکانی-زمانی و شناسایی منابع و مسیرهای انتقال آن انجام شده است.

یکی از رایج‌ترین روش‌ها در بررسی ویژگی‌های مکانی و زمانی و نیز ارزیابی روند فراوانی طوفان‌های گردوغبار، استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. مطالعه طوفان‌های گردوغبار در منطقه خاورمیانه در دوره زمانی ۱۹۷۳-۱۹۹۳ با توجه به مقادیر دید افقی، حاکی از آن بود که کشورهای عراق، عربستان سعودی و خلیج فارس از جمله نواحی هستند که بیشترین وقوع طوفان‌های گردوغبار را گزارش کرده‌اند. طوفان گردوغبار در ایران، شمال‌شرق عراق و سوریه، خلیج فارس و جنوب شبه‌جزیره عربستان بیشتر در فصل تابستان اتفاق می‌افتد [۱۲].

بررسی نقش متغیرهای آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی در روند فراوانی طوفان گردوغبار در سه سکونتگاه واقع در کمربند گردوغبار با استفاده از داده‌های هواشناسی

1- Coupled Ocean-Atmospheric Mesoscale Prediction System

2- Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

اطمینان ۹۵٪ بین پارامترهای AOD، دید و سرعت باد به هنگام رخداد کدهای سینوپ ۳۰-۳۵ معرفی نمود [۳۲].

مطالعه شش رخداد طوفان گردوغبار در استان یزد بیانگر آن است که مقادیر AOD، از ۰/۱ در مناطق بدون گردوغبار تا ۱/۹ در مناطق با گردوغبار شدید و مقدار دید افقی متناظر نیز از ۶۴m در مناطق واقع در کانون‌های گردوغبار تا ۱۹۹۵۱m فراتر از کانون‌های مذکور متغیر است؛ ضمن این که ارزیابی روند تغییرپذیری مکانی دید افقی مناطق درگیر با طوفان، نشان‌دهنده ارتباط معنی‌دار در سطح ۹۹٪ بین داده‌های AOD و داده‌های دید افقی است [۱۸].

جنبه‌های خطرناک طوفان‌های گردوغبار در سال‌های اخیر به یک نگرانی روزافزون در بسیاری از نقاط جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. همین امر سبب شده است که کشورهای عضو مجمع عمومی سازمان ملل از سال ۲۰۱۵ هر ساله قطعنامه‌هایی را در مورد مبارزه با طوفان‌های گردوغبار به تصویب رسانند [۲۶، ۲۷]. خشکسالی، وقوع بیشتر فرسایش بادی و رویدادهای فرین آب و هوایی، که همگی از پیامدهای تغییرات آب و هوایی هستند، سبب شده است که شدت و فراوانی طوفان‌های گردوغبار و اثرات منفی آنها بر اقتصاد و سلامت طی سالیان اخیر افزایش یابد [۱۴، ۴۲].

استان یزد نیز به واسطه قرارگرفتن در ناحیه خشک و فراخشک، همواره مشکلات محیط زیستی و اقتصادی فراوانی را به دلیل وقوع طوفان‌های گردوغبار و ماسه متحمل شده است. از این رو، آگاهی از ویژگی‌های مکانی و زمانی و وابستگی‌های هواشناسی طوفان‌های گردوغبار برای مواجهه با پیامدهای آن در آینده و اتخاذ تدابیر لازم کارگشا و ضروری است.

در مطالعاتی که پیش از این برای استان یزد انجام گرفته است، برای تعیین چشمه‌های گردوغبار عمدتاً از مدل HYSPLIT استفاده شده است [۱۵، ۱۸، ۱۹، ۲۸]؛ اما این مدل از تعیین دقیق و قطعی چشمه‌های گردوغبار ناتوان است و تنها کانون‌های احتمالی را مشخص می‌کند [۳۵].

با توجه به اهمیت این موضوع، هدف از پژوهش حاضر شناسایی کانون‌های گردوغبار، شبیه‌سازی مسیر آن‌ها و

که در تاریخ ۸ خرداد ۱۳۸۲ در استان یزد اتفاق افتاد بیانگر آن است که کانون احتمالی شکل‌گیری طوفان، تالاب گاوخونی در شمال غرب استان و مناطق کویری اطراف آن است [۲۸]. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که مسیره‌های HYSPLIT برای تعیین مکان منبع احتمالی گردوغبار استفاده می‌شوند و به عبارتی دارای عدم قطعیت هستند [۳۵].

با توجه به توزیع مکانی محدود و بسیار پراکنده ایستگاه‌های هواشناسی به ویژه در مناطق بیابانی، در مطالعات بسیاری جهت بررسی تغییرپذیری مکانی-زمانی رخداد‌های گردوغبار از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای، مانند عمق نوری هواویزها (AOD<sup>۱</sup>)، به دلیل پوشش جهانی آن‌ها استفاده شده است [۲، ۷]. مطالعه بلندمدت توزیع جهانی AOD اهمیت زیادی برای کنترل آلودگی هوا، پیشگیری از آتش‌سوزی جنگل‌ها و مطالعات آب و هوا دارد [۳۹].

در دو دهه اخیر، استفاده از داده‌های مبتنی بر سنجش از دور در بررسی طوفان‌های گردوغبار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است [۲۵]. از داده‌های AOD در پژوهش‌های متعددی برای تحقیقات مرتبط با ذرات معلق در هوا و آشکارسازی منابع گردوغبار استفاده شده است [۱۷، ۱۹، ۲۱، ۳۲]. مجموعه داده‌های سری زمانی ۲۰ ساله محصولات MODIS و TerraClimate نشان می‌دهد که ۳/۵٪ از ایران مرکزی به عنوان منابع طوفان‌های گردوغبار و ماسه با پتانسیل بالا شناخته شده است. در این میان، منابع ماسه‌ای با مساحت ۶۰/۹٪ و فراوانی وقوع طوفان بیش از ۵۰٪ بیشترین سهم را دارا هستند [۳۳].

واکاوی توزیع مکانی زمانی طوفان‌های گردوغبار در مناطق غربی ایران با استفاده از داده‌های MODIS AOD نشان می‌دهد که بخش‌های جنوب غربی بیشترین آسیب‌پذیری را از طوفان دارند؛ ضمن این که بالاترین مقادیر AOD مربوط به ماه جولای است [۳۰]. همچنین مطالعات بسیاری، ارتباط و همبستگی بین AOD و دید افقی را تأیید کرده است [۲۱، ۳۰]. برای نمونه در مطالعه‌ای در استان یزد مشخص شد که می‌توان یک معادله تجربی بر اساس یک تابع دوجمله‌ای با سطح

<sup>۱</sup>- Aerosol Optical Depth

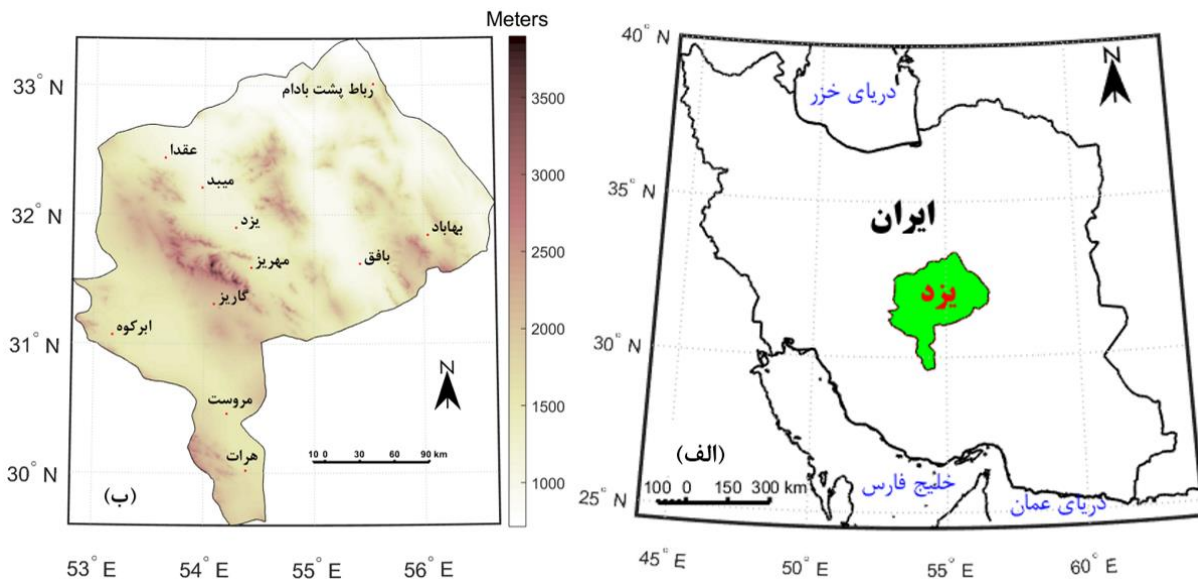
و ۴/۵٪ از مساحت ایران را شامل می‌شود (شکل الف). بخش بزرگی از محدوده مورد مطالعه شامل مناطق بیابانی و زمین‌های بایر است به طوری که بیش از ۱۹٪ از عرصه‌های بیابانی کشور را در خود جای داده است [۳۱]. تنها ۱۲/۸٪ از پهنا استان یزد دارای ارتفاع بیش از ۲۰۰۰m و فقط ۱/۸۴٪ در محدوده ارتفاعی بیش از ۲۵۰۰m قرار دارد (شکل ب). تغییرات مکانی و زمانی بارندگی در منطقه مورد مطالعه بسیار زیاد است؛ به گونه‌ای که میانگین بارش منطقه مورد مطالعه از ۲۶mm در کم‌بارش‌ترین سال تا ۱۶۶mm در پر بارش‌ترین سال در نوسان است. قلمرو وسیعی از استان یزد از نظر تقسیمات اقلیمی، زیرپوشش اقلیم‌های خشک و فراخشک قرار گرفته است. مقادیر پایین بارش و بالابودن تبخیر، از جمله عوامل اصلی خشکی این استان محسوب می‌شود [۳۶، ۱۵].

تحلیل توزیع مکانی طوفان‌های گردوغبار رخ داده در استان یزد با استفاده از داده‌های ایستگاهی، مدل پخش لاگرانژی HYSPLIT و داده‌های سنجش از دور برگرفته از سنجنده مودیس است. بنابراین، در پژوهش حاضر سعی شده است برای اولین بار با استفاده از داده‌های MODIS AOD برای تعیین منابع گردوغبار استان یزد استفاده شود. در حالی که در مطالعات پیشین، از داده‌های AOD بیشتر برای بررسی تغییرپذیری طوفان‌های گردوغبار در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان یزد با ۷۳۷۵۶ کیلومترمربع وسعت، در بخش مرکزی فلات ایران و در محدوده ۲۹° ۳۶' تا ۳۳° ۲۴' عرض شمالی و ۵۲° ۴۵' تا ۵۶° ۴۲' طول شرقی واقع شده



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه و ب) مدل رقومی ارتفاع (DEM) همراه با موقعیت ایستگاه‌های همدیدی آن

به دلیل پوشش وسیع فضایی و زمانی سنجنده مودیس، داده‌های AOD آن، به‌طور گسترده برای بررسی توزیع مکانی و زمانی گردوغبار استفاده شده است [۳۰]. دو سنجنده مودیس، به عنوان بخشی از برنامه سامانه پایش زمین (EOS<sup>۱</sup>)، از ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ بر روی ماهواره ترا و از ۴ می ۲۰۰۲ بر روی ماهواره آکوا در حال فعالیت هستند. زمان عبور ماهواره ترا حدود ۱۰:۳۰ بر

## داده‌ها

### داده‌های عمق نوری هواویز

برای بررسی آلاینده‌های جوی، به‌خصوص ذرات معلق موجود در جو، معمولاً از پارامتر عمق نوری هواویزها استفاده می‌شود. عمق نوری هواویزها درجه‌ای است که هواویزها از انتقال نور در جو جلوگیری می‌کنند. این کمیت، بدون بُعد بوده و نشان‌دهنده تضعیف تابش خورشیدی توسط پراکنش و جذب هواویزها است [۳۱].

<sup>۱</sup>- Earth Observation System

افقی، امکان استفاده از داده‌های دید افقی به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی جایگزین برای داده‌های ماهواره‌ای وجود دارد [۲۱].

بر همین اساس در پژوهش حاضر، به‌منظور تعیین دید افقی منطقه مورد مطالعه از داده‌های سمت و سرعت باد و دید افقی ۱۰ ایستگاه هم‌دید استان یزد بهره گرفته شد.

### معرفی مدل HYSPLIT

مدل HYSPLIT یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای محاسبات مسیر و پراکندگی جو است [۳۸]. این مدل برای پشتیبانی از طیف گسترده‌ای از شبیه‌سازی‌های مربوط به انتشار جوی، پراکندگی آلاینده‌ها و مواد خطرناک و همچنین رسوب این مواد به سطح زمین طراحی شده است [۳۵]. این مدل مسیرهای پسگرد را برای رسیدن به منبع آلودگی نشان می‌دهد [۹]. میدان داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای این مدل از وب سایت مرکز داده‌های آب و هوایی ملی (NCDC<sup>۵</sup>) قابل دسترسی است.<sup>۶</sup>

در پژوهش حاضر، از داده‌های هواشناسی GDAS1<sup>۷</sup> (سامانه داده‌گذاری جهانی) با قدرت تفکیک افقی ۱° و ۲۳ لایه عمودی استفاده شد. GDAS، سامانه‌ای است که توسط مدل سامانه پیش‌بینی جهانی (GFS<sup>۸</sup>) برای واردکردن دیدبانی‌ها در فضای مدل شبکه‌ای برای مقاردهی اولیه به منظور پیش‌بینی وضع هوا با استفاده از داده‌های دیدبانی شده استفاده می‌شود [۳۴].

### روش کار

اولین اثر مشهود طوفان‌های گردوغبار بر روی جو، کاهش دید افقی می‌باشد. بر این اساس، در ابتدا با بررسی داده‌های دید افقی ثبت‌شده مرتبط با پدیده گردوغبار در ایستگاه‌های هم‌دید استان یزد و همچنین اطلاعات سامانه پایش آلودگی هوای سازمان محیط‌زیست، روزهایی که با رخداد پدیده گردوغبار همراه بوده‌اند، مشخص شد.

مدار نزولی و ۲۲:۳۰ بر مدار صعودی به وقت محلی خورشیدی است، در حالی که زمان گذر آکوا ۰۱:۳۰ و ۱۳:۳۰ به وقت محلی است [۴۳، ۴۱، ۴۰].

سنجنده مودیس در طول موج ۵۵۰ نانومتر با استفاده از اندازه‌گیری میزان جذب و پراکندگی در آن طول‌موج، عددی را به‌عنوان عمق نوری هواویزها ارائه می‌کند. داده‌های هر کدام از دو ماهواره آکوا و ترا با سه خوارزمیک Deep blue، Dark Target و خوارزمیک Combine که ترکیبی از دو خوارزمیک قبل است، بررسی می‌شوند. با توجه به بررسی تمام خوارزمیک‌های این سنجنده، خوارزمیک Deep blue برای منطقه مورد مطالعه نتایج بهتری را نشان می‌دهد [۲۳].

در پژوهش حاضر از دو نوع داده سنجنده مودیس استفاده می‌شود؛ داده‌های AOD سطح دو روزانه<sup>۱</sup>، که با قدرت تفکیک مکانی یک آرایه یاخته‌ای ۱ km و ۱۰×۱۰ (در ندر<sup>۲</sup>) تولید می‌شوند؛ بنابراین قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها ۱۰ km و تفکیک زمانی این داده‌ها نیز روزانه است. این داده‌ها با فرمت سلسله مراتبی (HDF<sup>۳</sup>) و از درگاه earthdata.nasa.gov در دسترس هستند. از این محصول برای بررسی تغییرات مکانی طوفان گردوغبار و نیز شناسایی دقیق‌تر مناطق متأثر از طوفان استفاده شد. علاوه بر این، برای بررسی کانون گردوغبارهای ورودی به استان یزد، داده‌های AOD سطح سه روزانه<sup>۴</sup> مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها با قدرت تفکیک مکانی ۱° و قدرت تفکیک زمانی روزانه و با فرمت netcdf و از درگاه NASA/GIOVANNI و با فرمت دریافت است.

### داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی

دید افقی منبع دیگری برای استخراج کمیت عمق نوری هواویزها است. در مناطق وسیعی که امکان اندازه‌گیری نورسنج خورشیدی وجود ندارد، می‌توان AOD را با استفاده از این کمیت تعیین کرد. با توجه به وجود همبستگی بین داده‌های سنجنده مودیس و داده‌های دید

<sup>۵</sup>- National Climatic Data Centre

<sup>۶</sup>- <http://www.ncdc.noaa.gov/>

<sup>۷</sup>- Global Data Assimilation System

<sup>۸</sup>- Global Forecast System

<sup>۱</sup>- MOD04\_L2 - MODIS/Terra Aerosol

<sup>۲</sup>- Nadir

<sup>۳</sup>- Hierarchical Data Format

<sup>۴</sup>- MOD08\_D3 v6.1- Deep blue, Land Only

استفاده از دستور `inpolygon` در متلب، تنها داده‌هایی که در محدوده استان یزد قرار دارند، استخراج شد. با توجه به این که ضریب مقیاس فرآورده عمق نوری هواویز مودیس ۰/۰۱ است، بایستی داده‌های به دست آمده در این عدد نیز ضرب شود. از این داده‌ها برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی `AOD` در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. فرآورده `MOD08_D3` نیز از درگاه `NASA/GIOVANNI` به فرمت `netcdf` در دسترس هست که در نرم‌افزار متلب از تابع `ncread` برای خواندن آن استفاده می‌شود. از این داده‌ها نیز با ترسیم نقشه‌های توزیع مکانی `AOD` در محدوده ایران و کشورهای همسایه جهت شناسایی منابع داخلی و خارجی طوفان گردوغبار استفاده می‌شود (شکل ۲).

### نتایج

#### واکاوی رخداد طوفان گردوغبار مورخ ۱۱ تا ۱۳ مارس ۲۰۲۲ (۲۰ تا ۲۲ اسفند ۱۴۰۰)

بررسی داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های همدیدی استان نشان داد که دید افقی در بیشتر ایستگاه‌ها طی روزهای ۱۱ تا ۱۳ مارس به زیر ۳۵۰۰ متر رسید. شدت طوفان به حدی بود که دید افقی برای ساعاتی در روزهای ۱۱ و ۱۲ مارس در ایستگاه میبد به صفر رسید. همچنین غلظت ذرات `PM2.5` (ذرات با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر) در ایستگاه میبد، در زمان اوج طوفان به بیش از  $1570 \mu\text{g}/\text{m}^3$  رسید که بیش از ۴۵ برابر حد استاندارد خود بود.

#### نتایج مدل HYSPLIT

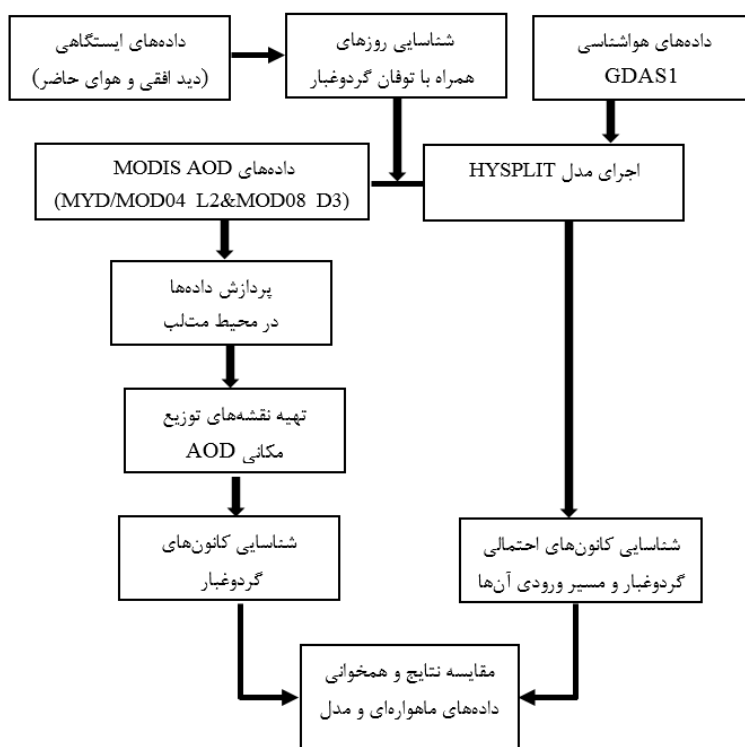
چشمه احتمالی طوفان گردوغبار برای ایستگاه فرودگاه یزد که در ۱۱ مارس ۲۰۲۲ در ساعت ۰۶ گرینویچ رخ داده است در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، منشأ این طوفان خارج از کشور ایران و از سمت جنوب‌غرب و از جانب بیابان‌های واقع در شبه‌جزیره عربستان است.

در مطالعه حاضر، زمانی که دید گزارش شده کمتر از  $3/5 \text{ km}$  باشد، یک طوفان گردوغبار مؤثر فرض می‌شود. این انتخاب صرفاً بر اساس دیدبانی‌های گزارش شده هوای حاضر مربوط به کدهای «طوفان گردوغبار» یعنی کدهای ۰۶ تا ۰۹ و نیز کدهای ۳۰ تا ۳۵ صورت گرفته است؛ زیرا برخی پدیده‌های جوی دیگر مانند بارش، مه، دود و دمه نیز که در هوای حاضر گزارش می‌شوند، ممکن است دلیل دید گزارش شده کمتر از آستانه باشد [۲۵].

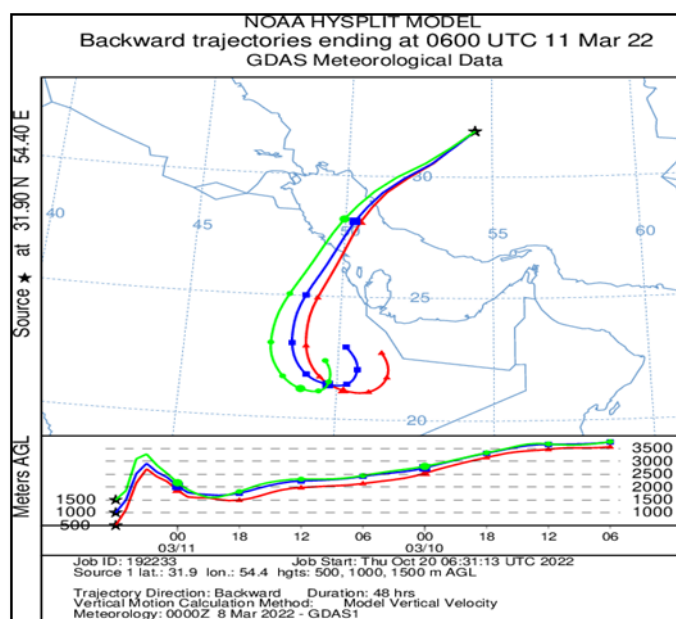
از آنجا که دیدبانی‌های هواشناسی هر سه ساعت یک بار انجام می‌گیرد، داده‌های مربوط به ساعت‌های ۰۶، ۰۹، ۱۲ و ۱۵ مورد استفاده قرار گرفت و رخدادهای تکراری در هر روز نیز حذف شد. سه نمونه از طوفان‌های گردوغبار رخ داده در استان یزد در سال ۲۰۲۲ به تاریخ‌های ۱۱ تا ۱۳ مارس، ۲۵ تا ۲۶ می و ۴ تا ۵ جولای ۲۰۲۲ انتخاب شد. دلیل انتخاب این سه رویداد گستردگی و فراگیری آن‌ها بود به گونه‌ای که تقریباً تمام پهنه منطقه مورد مطالعه متأثر از طوفان بودند و خسارات فراوانی ناشی از این طوفان‌ها به بار آمد. اما در سایر طوفان‌های به وقوع پیوسته در این سال، تنها مناطق محدودی از استان، بیشتر نیمه شمالی استان، درگیر این پدیده جوی بودند.

در مرحله بعد با استفاده از مدل لاگرانژی `HYSPLIT` کانون‌های احتمالی گردوغبار و مسیر ورودی آن‌ها به استان شناسایی شد. مدل `HYSPLIT` قادر است مسیرهای پسگرد را برای رسیدن به منبع آلودگی نشان دهد. ذرات در ارتفاعات ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری از سطح زمین و به مدت ۴۸ ساعت قبل از وقوع طوفان گردوغبار ردیابی شدند.

در پژوهش حاضر، داده‌های `AOD` در روزهای مشخص شده از درگاه‌های مربوطه دریافت شد. داده‌های `AOD` فرآورده ۰۴ (`MOD04_L2`) با فرمت `hdf` از درگاه `earthdata.nasa.gov` در دسترس هستند، در نرم‌افزار متلب برای خواندن این گونه داده‌ها باید از توابع سطح پایین استفاده کرد. به همین منظور داده‌های فرآورده ۰۴ با توابع مربوطه در محیط متلب خوانده و سپس با



شکل ۲- نمودار روندنما از پردازش و تحلیل داده‌ها



شکل ۳- مسیریابی پسگرد طوفان گردوغبار به استان یزد با استفاده از مدل HYSPLIT در تاریخ ۲۰۲۲/۰۳/۱۲ ساعت ۰۶:۰۰ UTC

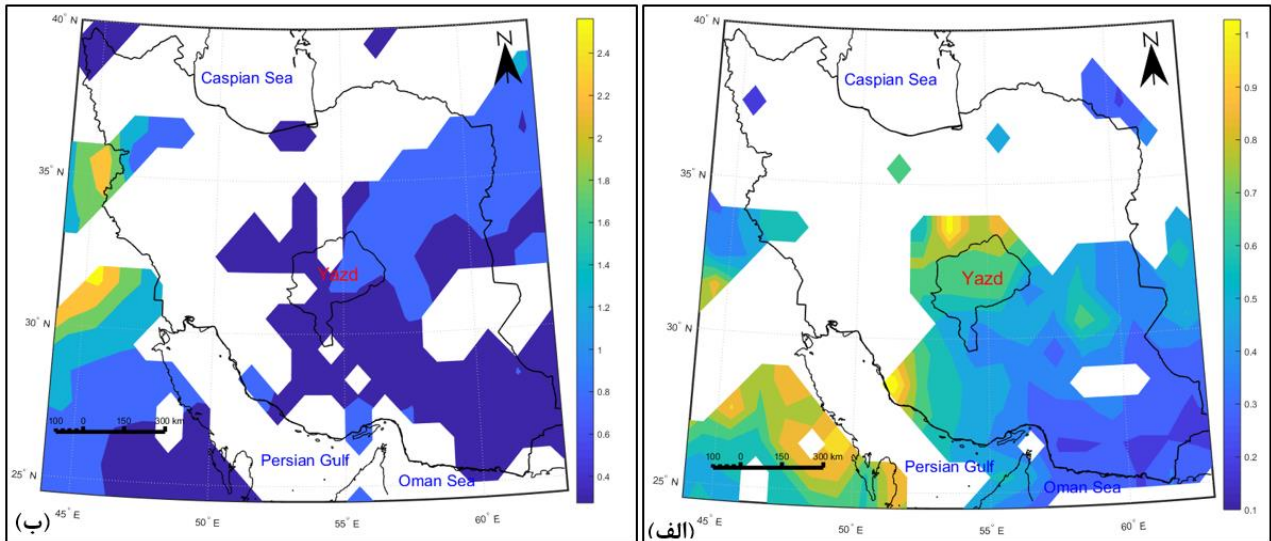
### تصاویر عمق نوری هواویزها (AOD) مبتنی بر سنجش از دور

توزیع مکانی AOD ۵۵۰nm به دست از آمده از فرآورده سطح سه روزانه ماهواره ترا در روز ۱۱ و ۱۲ مارس ۲۰۲۲ در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص است، بالاترین مقادیر AOD مربوط به سواحل جنوبی خلیج فارس و شبه‌جزیره عربستان است.

با توجه به خروجی مدل، منشأ و چشمه اصلی ذرات واقع در ارتفاع ۵۰۰m، ۱۰۰۰m و ۱۵۰۰m تقریباً یکسان و از یک منطقه واحد است. با توجه به این که جهت باد غالب ایستگاه‌های همدیدی متأثر از طوفان، طی این مدت جنوب‌غربی بوده است، بنابراین مسیر پسگرد طوفان به سمت استان با جهت باد غالب مطابقت و همخوانی کامل دارد.

کانون داخلی گردوغبار برای مناطق مرکزی کشور محسوب شده و به‌عنوان تشدیدکننده طوفان‌های گردوغبار رخ داده در این مناطق ایفای نقش کند [۲۸]. همان‌گونه که از شکل ۴ دیده می‌شود، در روز ۱۲ مارس گردوغبار به سمت مناطق شرقی و شمال‌شرقی کشور کشیده شده است.

در نتیجه این مناطق به‌عنوان منبع طوفان گردوغبار روز ۱۱ مارس در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در مناطقی از استان اصفهان که تقریباً منطبق بر تالاب گاوخونی است، مقدار AOD بسیار بالا است. کم‌بارشی سال‌های اخیر، ایجاد سد در بالادست و عدم‌رعایت حق‌آبه تالاب، سبب خشک‌شدن تالاب گاوخونی شده است و در نتیجه این تالاب می‌تواند یک



شکل ۴- نقشه میانگین زمانی از عمق نوری هواویز (AOD)  $550\text{ nm}$  سنجنده مودیس ترا (محصول MOD08\_D3 v6.1) در روزهای ۱۱ و ۱۲ مارس ۲۰۲۲

### بررسی رخداد طوفان گردوغبار مورخ ۲۵ و ۲۶ می ۲۰۲۲ (۴ و ۵ خرداد ۱۴۰۱)

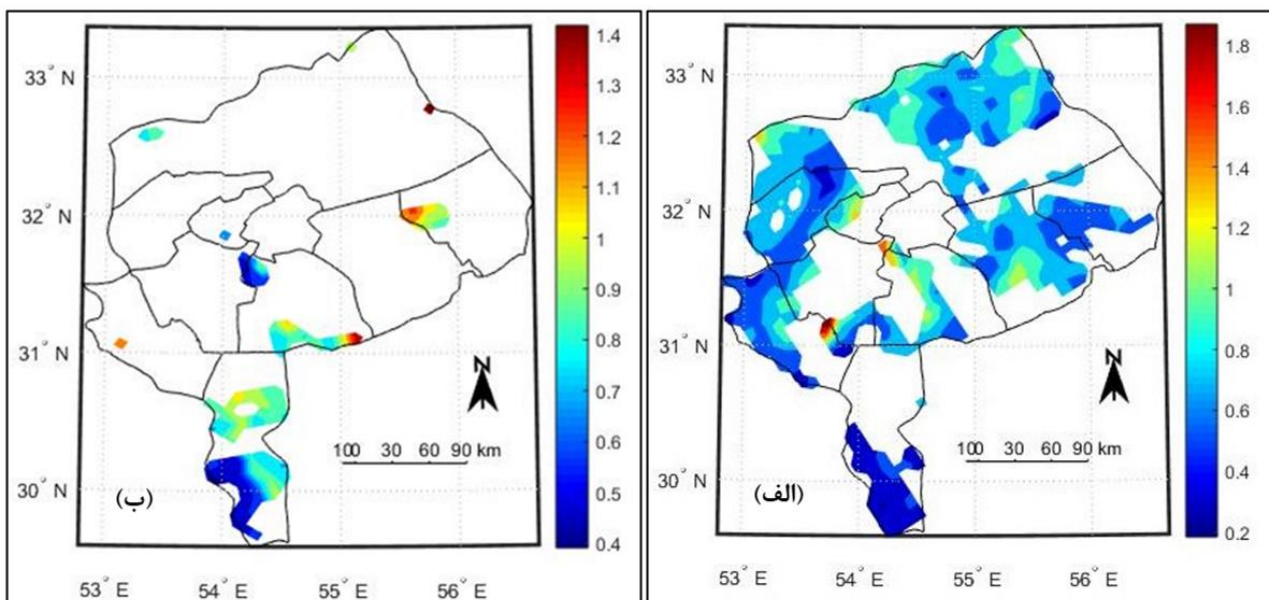
دید افقی در ایستگاه‌های واقع در مناطق مرکزی، شمالی و شرقی استان در روزهای ۲۵ و ۲۶ می تا  $1500\text{ m}$  نیز کاهش یافت. همچنین در زمان اوج طوفان، غلظت ذرات  $\text{PM}_{2.5}$  در ایستگاه اشکدر به بیش از  $160\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  و در ایستگاه اردکان به حدود  $140\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  رسید که به‌ترتیب ۴/۵ و ۴ برابر حد استاندارد خود بود.

### نتایج مدل HYSPLIT

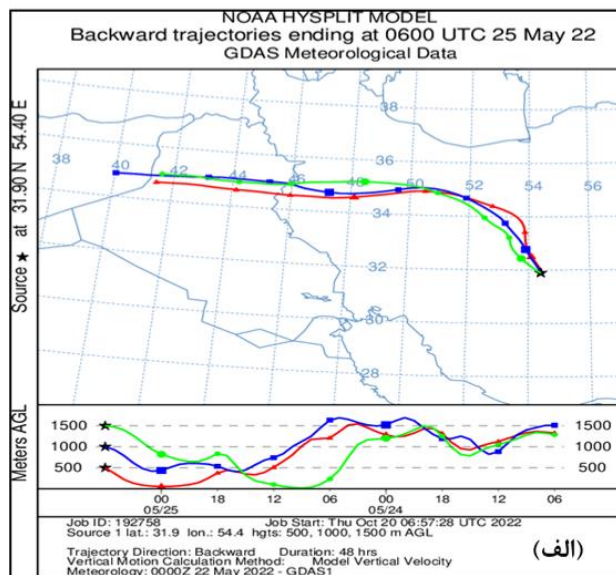
ردیابی ذرات گردوغبار در سه ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰ و  $1500\text{ m}$  متری از سطح زمین و به مدت ۴۸ ساعت قبل از وقوع طوفان گردوغبار در ساعت UTC ۰۶:۰۰ روز ۲۵ ماه می ۲۰۲۲ و با استفاده از مدل HYSPLIT در شکل ۶الف به تصویر کشیده شده است.

برای بررسی دقیق‌تر چگونگی توزیع مکانی AOD در مناطق مختلف استان یزد، توزیع مکانی AOD به‌دست آمده از سنجنده مودیس ترا برای روز ۱۱ مارس در ساعت UTC ۰۷:۰۵ در شکل ۵الف و برای ساعت UTC ۰۷:۴۵ روز ۱۲ مارس در شکل ۵ب نشان داده شده است. در روز ۱۱ مارس دامنه مقادیر AOD بین ۰/۲ تا ۱/۸ متغیر است و مناطق نسبتاً وسیعی از استان درگیر پدیده طوفان گردوغبار بوده‌اند؛ اما در روز ۱۲ مارس دامنه تغییرات از ۰/۴ تا ۱/۴ بوده و مناطق اندکی از استان عمدتاً در نیمه جنوبی، متأثر از این پدیده بوده‌اند. باید توجه داشت که مقادیر بیشتر AOD بیانگر انباشت بیشتر هواویزها در ستون جو، افزایش غلظت آلاینده‌ها و در نتیجه دید افقی کمتر است [۲۱].





شکل ۵- توزیع مکانی عمق نوری هواویز (AOD) به دست آمده از سنجنده مودیس ترا در روز ۱۱ مارس (الف) و ۱۲ مارس ۲۰۲۲ (ب) (محصول MOD04\_L2)



شکل ۶- مسیریابی پسگرد طوفان گردوغبار به استان یزد با استفاده از مدل HYSPLIT در تاریخ ۲۵/۰۵/۲۰۲۲ ساعت ۰۶:۰۰ UTC

شمال غرب است، که تأییدکننده خروجی‌های مدل HYSPLIT می‌باشد.

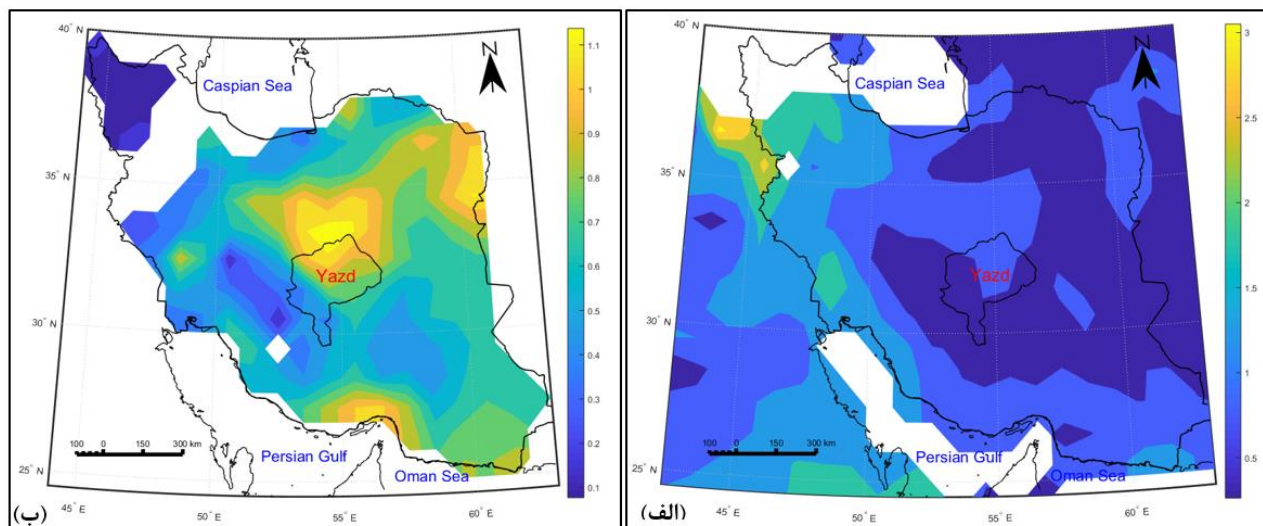
### تصاویر عمق نوری هواویزها (AOD) مبتنی بر سنجش از دور

توزیع مکانی AOD به دست آمده از سنجنده مودیس ترا در روزهای ۲۴ و ۲۵ می ۲۰۲۲ در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل گیری چشمه گردوغبار در خارج از

همان گونه که از این شکل مشخص است، چشمه احتمالی طوفان گردوغبار، بیابان‌های واقع در کشورهای عراق و سوریه است. این طوفان پس از شکل‌گیری در بیابان‌های عراق و سوریه و بعد از ورود به ایران، با عبور از چشمه‌های گردوغبار داخلی مثل اراضی بیابانی و کویری واقع در استان‌های مرکزی و قم و همچنین کویر کاشان، از این منابع نیز تغذیه شده و بر شدت آن افزوده شده است (شکل ۶). جهت باد غالب ایستگاه‌های همدیدی استان در زمان وقوع طوفان نیز بیشتر از جهت شمال و

استقرار توده گردوغبار در مناطق مرکزی کشور و به‌ویژه مناطق شمالی استان یزد در روز ۲۵ می ۲۰۲۲ به‌وضوح دیده می‌شود (شکل ۷ب). برای واضح‌تر بودن توزیع مکانی گردوغبار در سطح کشور، داده‌های AOD مربوط به مناطق خارج از محدوده ایران حذف شده است.

مرزهای ایران در کشور عراق به‌خوبی از شکل ۷الف قابل مشاهده است. مقادیر بالای کمیت عمق نوری هواویز با  $AOD > 2/5$  نشان‌دهنده حجم زیادی از گردوغبار در ستون جو و غلظت زیاد گردوغبار انتقالی است. این شکل تأییدکننده نتایج مدل HYSPLIT (شکل ۶) می‌باشد.



شکل ۷- نقشه میانگین زمانی از عمق نوری هواویز (AOD)  $550\text{ nm}$  سنجنده مودیس ترا (محصول MOD08\_D3 v6.1) در روزهای ۲۴ و ۲۵ می ۲۰۲۲

دید افقی کمتر از  $3\text{ km}$  کیلومتر را ثبت کردند. حتی ایستگاه گاریز که در دامنه شیرکوه واقع شده و به‌ندرت پدیده گردوغبار در آن گزارش می‌شود، دید افقی  $2\text{ km}$  را ثبت کرد. علاوه بر این، غلظت ذرات  $PM_{2.5}$  در ایستگاه میبد به بیش از  $310\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  و در ایستگاه بافق به حدود  $280\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  رسید که به ترتیب ۹ و ۸ برابر حد استاندارد خود بود.

### نتایج مدل HYSPLIT

مسیر پسگرد ذرات گردوغبار به مدت ۴۸ ساعت قبل از وقوع طوفان گردوغبار در ساعت UTC ۰۴ روز ۴ جولای ۲۰۲۲ و با استفاده از مدل HYSPLIT برای ایستگاه فرورگاه یزد در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به خروجی مدل، چشمه ذرات گردوغبار در سه ارتفاع  $500\text{ m}$ ،  $1000\text{ m}$  و  $1500\text{ m}$  یکسان نیست. بنابراین طوفان می‌تواند از منابع مختلفی سرچشمه گرفته باشد.

با توجه به شکل ۹، کانون و چشمه احتمالی طوفان گردوغبار هم می‌تواند در داخل کشور یعنی مناطق واقع

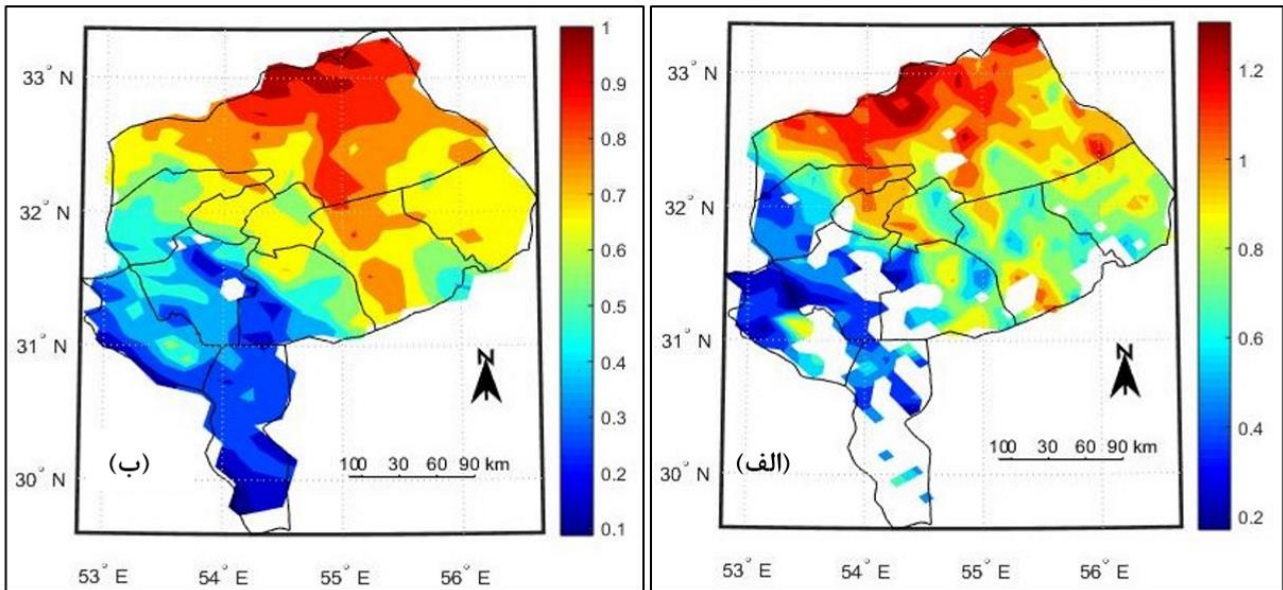
همچنین توزیع مکانی AOD با استفاده از محصول MOD04\_L2 در ساعت UTC ۰۶:۴۵ روز ۲۵ می در شکل ۸الف و در روز ۲۶ می ۲۰۲۲ در ساعت UTC ۰۷:۲۵ در شکل ۸ب نمایش داده شده است. بیشترین مقادیر AOD و در نتیجه بالاترین غلظت گردوغبار در روز ۲۵ می مربوط به مناطق شمالی و شمال‌شرقی استان است که بیشینه مقدار آن در حدود  $1/3$  می‌باشد. اما در روز ۲۶ مارس، بیشترین مقادیر AOD مربوط به نواحی شمال شرقی استان است. همچنین در این روز از غلظت گردوغبار در استان تا حدودی کاسته شده است به طوری که بیشینه مقدار AOD در این روز ۱ می‌باشد. طی این دو روز کمترین مقادیر AOD نیز مربوط به مناطق جنوبی و غربی استان بوده است.

### بررسی رخداد طوفان گردوغبار مورخ ۴ و ۵ جولای ۲۰۲۲ (۱۳ و ۱۴ تیر ۱۴۰۱)

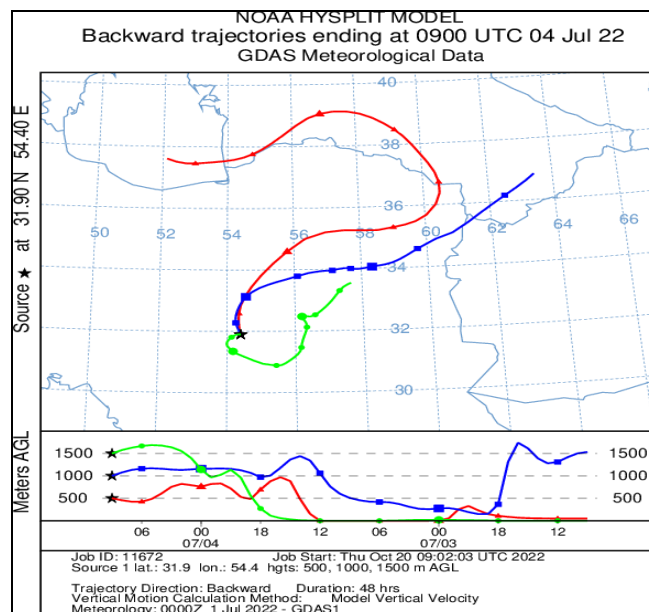
در روزهای ۴ و ۵ جولای ۲۰۲۲، گردوغبار تمام گستره استان را در بر گرفت و بیشتر ایستگاه‌های همدیدی استان

همدیدی متأثر از طوفان نیز عمدتاً از سمت شمال است که با خروجی‌های مدل HYSPLIT همخوانی دارد.

در شمال شرق کشور و هم در خارج از مرزهای ایران یعنی کشور ترکمنستان باشد. جهت باد غالب ایستگاه‌های



شکل ۸- توزیع مکانی عمق نوری هواویز (AOD) به دست از سنجنده مودیس ترا در روز ۲۵ می (الف) و ۲۶ می ۲۰۲۲ (ب) (محصول MOD04\_L2)



شکل ۹- مسیریابی پسگرد طوفان گردوغبار به استان یزد با استفاده از مدل HYSPLIT در تاریخ ۲۰۲۲/۰۷/۴ ساعت ۰۴:۰۰ UTC

به‌خوبی شکل‌گیری چشمه گردوغبار در مناطق شمال شرقی کشور خارج از استان یزد را نمایش می‌دهد. این شکل تأییدکننده نتایج مدل HYSPLIT (شکل ۹) می‌باشد. شکل ۱۰ نیز نشان‌دهنده آن است که در روز ۵

تصاویر عمق نوری هواویزها (AOD) مبتنی بر سنجش از دور

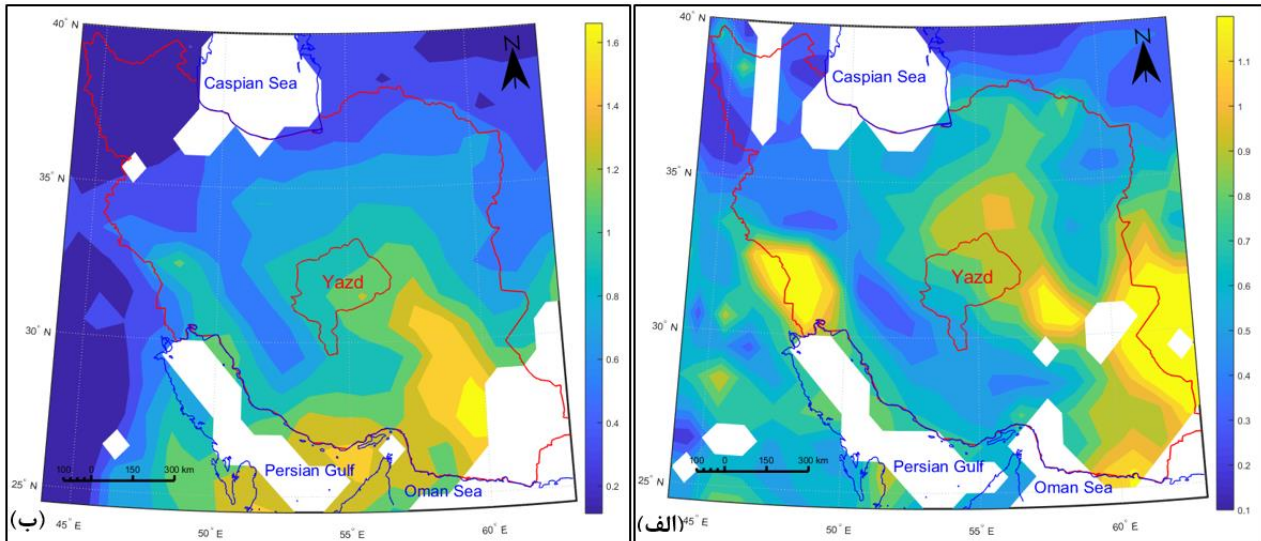
توزیع مکانی AOD مشتق از سنجنده مودیس ترا با قدرت تفکیک مکانی یک درجه در روزهای ۴ و ۵ جولای ۲۰۲۲ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شکل ۱۰ الف



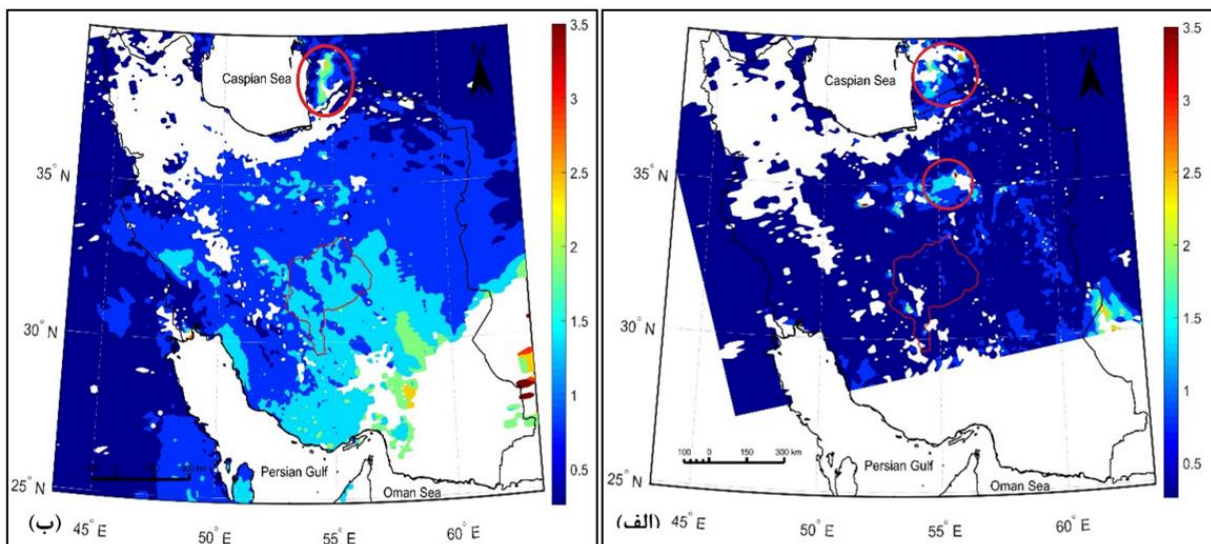
در روز ۴ جولای ساعت UTC ۰۹:۲۵ و روز ۵ جولای ساعت UTC ۰۹:۴۵ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در روز ۴ جولای علاوه بر وجود یک چشمه فعال در شمال شرق استان با بزرگی AOD حدود ۳، یک چشمه دیگر در کشور ترکمنستان نیز دیده می شود (دایره های قرمز رنگ در شکل ۱۱ الف).

جولای گردوغبار بیشتر به مناطق جنوب شرقی استان منتقل شده است.

برونداد مدل HYSPLIT همچنین حاکی از احتمال وجود یک چشمه گردوغبار در خارج از مرزهای ایران در کشور ترکمنستان بود. برای بررسی درستی یا نادرستی این احتمال، توزیع مکانی AOD به دست آمده از سنجنده مودیس آکوا با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر



شکل ۱۰- نقشه میانگین زمانی از ژرفای نوری هواویز (AOD)  $550\text{ nm}$  سنجنده مودیس ترا (محصول MOD08\_D3 v6.1) در روزهای ۴ و ۵ جولای ۲۰۲۲



شکل ۱۱- الف) توزیع مکانی ژرفای نوری هواویز (AOD) به دست آمده از سنجنده مودیس آکوا در روز ۴ جولای ۲۰۲۲؛ و ب) روز ۵ جولای (محصول MYD04\_L2)

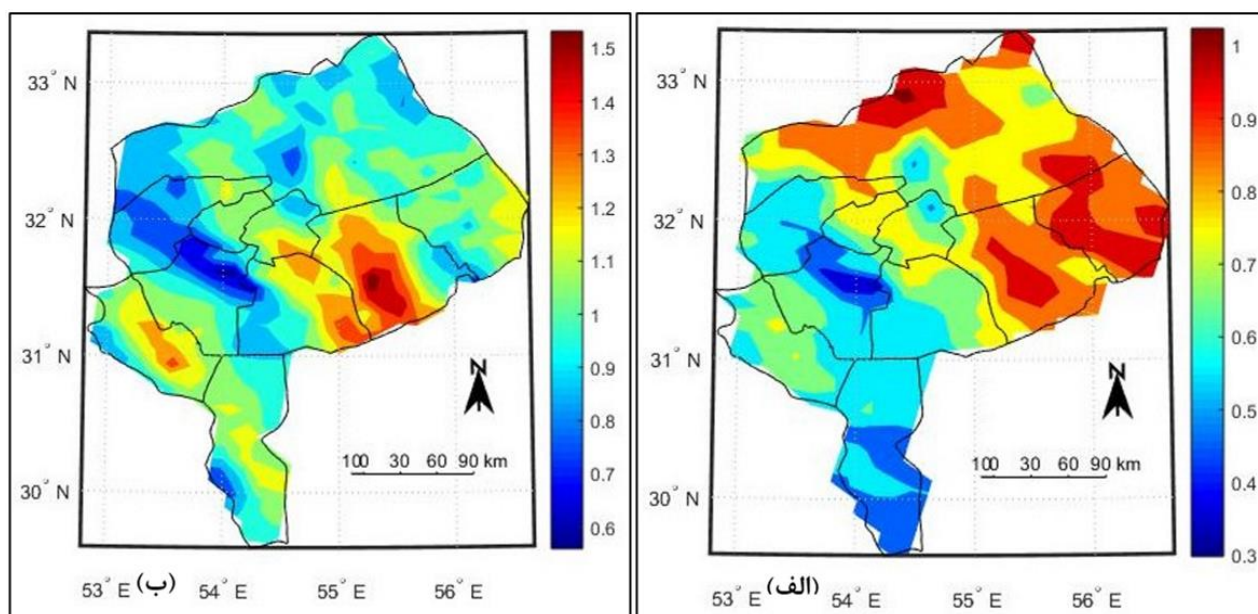
همچنان فعال است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که گردوغبار استان یزد ناشی از هر دو کانون داخلی و خارجی

همان گونه که از شکل ۱۱ ب دیده می شود، چشمه گردوغبار واقع در کشور ترکمنستان، در روز ۵ جولای

شکل‌های ۱۲ الف و ۱۲ ب نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر AOD در روز ۴ جولای، طوفان گردوغبار در مناطق شمالی و شرقی منطقه مورد مطالعه از شدت بیشتری برخوردار است (شکل ۱۲ الف). اما بیشینه غلظت ذرات گردوغبار در روز ۵ جولای مربوط به مناطق جنوب‌شرقی است (شکل ۱۲ ب). ضمن این‌که مقادیر AOD در این روز بزرگ‌تر از روز ۴ جولای است. در مجموع، در هر دو روز کل پهنه استان یزد درگیر پدیده گردوغبار بود و با توجه به مقادیر AOD بزرگ‌تر از ۰/۳ در هیچکدام از یاخته‌ها آسمان صاف و شفاف دیده نمی‌شود. شکل ۱۲ با شکل ۱۰ همخوانی و تطابق کامل دارد.

بوده است. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که طوفان گردوغبار در روزهای ۴ و ۵ جولای علاوه بر استان‌های واقع در مرکز کشور مانند یزد و اصفهان، استان‌های واقع در دامنه‌های جنوبی البرز مانند تهران و البرز را نیز فراگرفت و باعث کاهش دید افقی و حتی تعطیلی ادارات و مدارس در این استان‌ها شد که این موضوع نیز مؤید فعال‌بودن چشمه گردوغبار در ترکمنستان است.

به مانند دو رخداد قبلی، برای بررسی تغییرپذیری گردوغبار در استان یزد، توزیع مکانی AOD با استفاده از محصول MOD04\_L2 در ساعت ۰۷:۳۰ UTC روز ۴ جولای و در ساعت ۰۶:۳۵ UTC روز ۵ جولای ۲۰۲۲ در



شکل ۱۲- الف) توزیع مکانی عمق نوری هواویز (AOD) به‌دست از آمده از سنجنده مودیس ترا در روز ۴ جولای؛ و ب) ۵ جولای ۲۰۲۲ (محصول MOD04\_L2)

داخلی و ۸۵٪ منشأ خارجی دارند (جدول ۱). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رخدادهای گردوغبار در استان یزد عمدتاً از منابع و کانون‌های واقع در خارج از مرزهای غربی ایران یعنی کشورهای عربستان سعودی و عراق سرچشمه می‌گیرند.

یافته‌های پژوهش حاضر، در مورد منشأ طوفان‌های گردوخاک با نتایج مطالعات [۲۸، ۱۹، ۱۸، ۱۵] مطابقت دارد. بر اساس این تحقیقات، طوفان‌های گردوغبار در استان یزد هم از منابع داخل کشور و هم از منابعی خارج

در بررسی انجام شده از گزارش‌های دیدبانی در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، در مجموع، ۱۳ مورد طوفان گردوغبار مؤثر و نسبتاً فراگیر در استان یزد شناسایی شد. با استفاده از تصاویر سنجش از دور و نیز مدل HYSPLIT، کانون مولد دو مورد از این رخدادهای گردوغبار، مناطق شمال‌شرقی کشور، دو مورد خارج از مرزهای غربی کشور و ۹ مورد خارج از مرزهای جنوب‌غربی کشور است. بر این اساس، در این بازه زمانی، تنها ۱۵٪ از گردوغبارهای انتقالی به استان یزد منشأ

از ایران سرچشمه می‌گیرند و با توجه به افزایش بیابان‌زایی در استان یزد و ایران، می‌تواند بر شدت و فراوانی این پدیده در سال‌های آینده افزوده شود.

جدول ۱- تاریخ و منشأ طوفان‌های گردوغبار مؤثر استان یزد در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲

تاریخ وقوع طوفان	منشأ طوفان	تاریخ وقوع طوفان	منشأ طوفان
۲۰۱۶/۵/۱۸	خارجی- مرزهای غربی	۲۰۲۰/۵/۳	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی
۲۰۱۶/۵/۲۰	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی	۲۰۲۱/۳/۲۵	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی
۲۰۱۷/۷/۱۳	داخلی- شمال‌شرق ایران	۲۰۲۱/۵/۲۶	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی
۲۰۱۸/۲/۱۴	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی	۲۰۲۲/۳/۱۱	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی
۲۰۱۸/۵/۱۳	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی	۲۰۲۲/۴/۲۵	خارجی- مرزهای غربی
۲۰۱۹/۱/۲۹	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی	۲۰۲۲/۷/۴	داخلی- شمال‌شرق ایران
۲۰۲۰/۲/۲۶	خارجی- مرزهای جنوب‌غربی		

### بحث و نتیجه‌گیری

شناسایی منابع طوفان، اولین گام در تعیین راهبرد مؤثر برای کنترل این پدیده و کاهش اثرات ویرانگر آن است [۳۳،۲]. بنابراین، در پژوهش حاضر به واکاوی سه نمونه از طوفان‌های گردوغبار رخ داده در سال ۲۰۲۲ در استان یزد به منظور شناسایی کانون‌های این طوفان‌ها، مسیر انتقال گردوغبار و توزیع مکانی آن‌ها در پهنه استان پرداخته شد. نتایج بررسی طوفان‌های گردوغبار در سال ۲۰۲۲ با مدل لاگرانژی HYSPLIT حاکی از آن است که توده‌های گردوغبار برای رسیدن به استان یزد سه مسیر اصلی جنوب‌غربی، غربی-شمال‌غربی و شمال‌شرقی را طی می‌کنند که این موضوع با جهت باد غالب ایستگاه‌های همدیدی متأثر از طوفان همخوانی دارد. مسیرهای انتقال گردوغبار به استان یزد متأثر از فصل نیز می‌باشد به گونه‌ای که طوفان‌هایی که در فصل تابستان رخ می‌دهد از شمال‌شرق و طوفان‌های که در فصل‌های زمستان و بهار اتفاق می‌افتد، از غرب و جنوب‌غرب سرچشمه می‌گیرد. یکی از ابزارهای اصلی برای بررسی شرایط گردوغبار در یک منطقه، دیدبانی‌های گردوغبار و داده‌های دید افقی ایستگاه‌های هواشناسی است. اما این ایستگاه‌ها به‌ویژه در مناطق کویری و بیابانی، مانند استان یزد، دارای توزیع مکانی نامنظم و بسیار پراکنده هستند. بنابراین استفاده از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور یک جایگزین بسیار مناسب می‌باشد.

تصاویر AOD به‌دست آمده از سنجنده مودیس نشان داد که طوفان‌های گردوغبار در استان یزد هم می‌تواند منشأ داخلی و هم منشأ خارجی داشته باشد. یکی از کانون‌های اصلی گردوغبار استان یزد، بیابان‌های عراق، سوریه و شبه‌جزیره عربستان شناسایی شد. در مطالعات بسیاری نیز ثابت شده است که بیابان‌های بزرگ در کشورهای جنوب‌غربی آسیا، مانند بیابان‌های عربستان سعودی، عراق، سوریه و ایران، منابع اصلی گردوغبار در این منطقه هستند [۳۷،۲۰،۱۱،۶،۱].

کانون‌های داخلی مانند تالاب گاوخونی و مناطق بیابانی داخلی که در مسیر طوفان واقع شده‌اند، مانند کویر کاشان و اراضی بیابانی استان‌های قم و مرکزی، نیز سبب تشدید طوفان و افزایش غلظت ذرات گردوغبار در مناطق مرکزی کشور از جمله استان یزد می‌شوند. همچنین صحرای ترکمنستان نیز یکی از کانون‌های خارجی گردوغبار برای ایران می‌باشد. این صحرا بیشتر برای مناطق شمالی و شمال‌شرقی ایران به‌عنوان یک چشمه گردوغبار اصلی لحاظ می‌شود. در مناطق مرکزی مانند استان یزد، این چشمه به‌عنوان تشدیدکننده طوفان‌هایی که از مناطق بیابانی استان‌های اصفهان، سمنان و دشت کویر منشأ می‌گیرند، عمل می‌کند. ضمن این که مدیریت نادرست منابع آب، خاک، پوشش گیاهی، شیوه‌های سنتی کشاورزی و افزایش جمعیت، سبب تسریع در بیابان‌زایی و تخریب زمین و در نتیجه افزایش شدت و فراوانی

منظور بهبود خوارزمیک‌های تشخیص گردوغبار وجود دارد [۲۸].

تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی، پیش‌بینی می‌شود رخداد پدیده‌های فرین جوی مانند طوفان‌های گردوغبار، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش یابد که این موضوع می‌تواند خسارات مالی و حتی جانی فراوانی به دنبال داشته باشد [۲۴، ۱۳]. بر این اساس پیشنهاد می‌شود با استفاده از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای و تحت سناریوهای مختلف، میزان انتشار گردوغبار استان یزد در بلندمدت پیش‌نگری شده و همچنین غلظت ذرات گردوغبار، تغییرات احتمالی در چشمه‌های طوفان و نیز مسیرهای انتقال گردوغبار به منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی شود.

### سیاسگزاری

از اداره کل هواشناسی استان یزد جهت در اختیار گذاشتن داده‌های ایستگاه‌های همدیدی استان و نیز حمایت از انجام پژوهش حاضر، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

### References

- [1]. Alam, K., Trautmann, T., Blaschke, T., & Subhan, F. (2014). Changes in aerosol optical properties due to dust storms in the Middle East and Southwest Asia. *Remote sensing of environment*, 143, 216-227. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.021
- [2]. Alhebsi, K. (2020). Spatio-temporal Variability of Aerosol Optical Depth in the UAE Using MODIS Data [Doctoral dissertation, George Mason University].
- [3]. Ansari, A., & Jamshidi, R. (2018). Identification of sources and tracking dust storm routes entering from domestic sources to Arak metropolitan using HYSPLIT model. *Environmental Sciences*, 16(1), 101-110. [in Farsi]
- [4]. Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A., & Ghader, S. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of environmental health science and engineering*, 12, 1-9. doi: 10.1186/2052-336X-12-9
- [5]. Attiya, A. A., & Jones, B. G. (2022). An extensive dust storm impact on air quality on

رخدادهای گردوغبار در مناطق مرکزی ایران به‌ویژه استان یزد می‌شود [۲۶، ۳۳].

براساس نقشه‌های به‌دست آمده از توزیع مکانی AOD مشخص شد که مناطق مرکزی و شمالی استان با شدت بیشتری تحت تأثیر طوفان گردوغبار قرار دارند. درحالی‌که مناطق جنوبی استان کمترین تأثیرپذیری را از این پدیده داشتند. همچنین یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های AOD به‌دست آمده از سنجنده مودیس با نتایج مدل HYSPLIT همخوانی دارد. علاوه بر روش‌های ذکر شده در مطالعه حاضر، در برخی مطالعات از مدل‌های عددی نیز برای بررسی ویژگی‌ها و منابع طوفان استفاده شده است [۲۸، ۱۵]. به منظور مدل‌سازی طوفان‌های گردوغبار در استان یزد از مدل عددی میان‌مقیاس WRF و برای اعتبارسنجی نتایج، از محصولات AOD MODIS استفاده شد. شباهت بین نتایج حاصل از مدل و داده‌های MODIS نشان داد که قابلیت ترکیب داده‌های هواشناسی و سنجش از دور به

- 22 November 2018 in Sydney, Australia, using satellite remote sensing and ground data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(6), 432. doi: 10.1007/s10661-022-10080-1
- [6]. Awadh, S. M. (2023). Impact of North African sand and dust storms on the Middle East using Iraq as an example: Causes, sources, and mitigation. *Atmosphere*, 14(1), 180. doi: 10.3390/atmos14010180
- [7]. Crosbie, E., Sorooshian, A., Monfared, N. A., Shingler, T., & Esmaili, O. (2014). A multi-year aerosol characterization for the greater Tehran area using satellite, surface, and modeling data. *Atmosphere*, 5(2), 178-197. doi: 10.3390/atmos5020178
- [8]. de Graaf, M. (2006). *Remote Sensing of UV-absorbing aerosols using space-borne spectrometers* [Doctoral dissertation, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam].
- [9]. Deng, X., Shi, C., Wu, B., Chen, Z., Nie, S., He, D., & Zhang, H. (2012). Analysis of aerosol characteristics and their relationships with meteorological parameters over Anhui province in China. *Atmospheric research*,

- 109, 52-63. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.02.011
- [10]. Draxler, R. R., & Hess, G. D. (1998). An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories. *Australian meteorological magazine*, 47(4), 295-308.
- [11]. Francis, D., Fonseca, R., Nelli, N., Bozkurt, D., Cuesta, J., & Bosc, E. (2023). On the Middle East's severe dust storms in spring 2022: Triggers and impacts. *Atmospheric Environment*, 296, 119539. doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119539
- [12]. Furman, H. K. H. (2003). Dust storms in the Middle East: sources of origin and their temporal characteristics. *Indoor and Built Environment*, 12(6), 419-426. doi: 10.1177/1420326X03037110
- [13]. Goel, A., & Bhatt, R. (2012). Causes and consequences of Global Warming. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*, 1(1), 27-31.
- [14]. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature climate change*, 6(2), 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
- [15]. Iraj, F., Memarian, M. H., Joghataei, M., & Malamiri, H. R. G. (2021). Determining the source of dust storms with use of coupling WRF and HYSPLIT models: A case study of Yazd province in central desert of Iran. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 93, 101197. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2020.101197
- [16]. Jafari, M., Zehtabian, G., Ahmadi, H., Mesbahzadeh, T., & Norouzi, A. A. (2019). Detection of dust storm paths using numerical models and satellite images (case study: Isfahan province). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(1). doi: 10.22092/ijrdr.2019.119324 [in Farsi]
- [17]. Jafari, R., & Malekian, M. (2015). Comparison and evaluation of dust detection algorithms using MODIS Aqua/Terra Level 1B data and MODIS/OMI dust products in the Middle East. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2), 597-617. doi: 10.1080/01431161.2014.999880
- [18]. Jebali, A., Zare, M., Ekhtesasi, M. R., & Jafari, R. (2020). Investigating of Change Extent of Horizontal Visibility in Regions Affected by Dust events in Yazd Province. *Desert Management*, 8(15), 21-36. doi: 10.22034/JDMAL.2020.44927 [in Farsi]
- [19]. Jebali, A., Zare, M., Ekhtesasi, M. R., & Jafari, R. (2022). Performance Evaluation of Detector Algorithms of Dust Storms in Arid Lands (Case Study: Yazd Province). *Desert Ecosystem Engineering*, 8(23), 85-105. doi: 10.22052/deej.2018.7.23.59 [in Farsi]
- [20]. Jooybari, S. A., Peyrowan, H., Rezaee, P., & Gholami, H. (2022). Evaluation of pollution indices, health hazards and source identification of heavy metal in dust particles and storm trajectory simulation using HYSPLIT model (Case study: Hendijan center dust, southwest of Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 107. doi: 10.1007/s10661-022-09760-9
- [21]. Khoshshima, M., Bidokhti, A. A., & Ahmadi-Givi, F. (2013). Evaluation of aerosol optical depth using visibility and remote sensing data in urban and semi urban areas in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 39(1), 163-174. doi: 10.22059/jesphys.2013.31953 [in Farsi]
- [22]. Knippertz, P., & Todd, M. C. (2012). Mineral dust aerosols over the Sahara: Meteorological controls on emission and transport and implications for modeling. *Reviews of Geophysics*, 50, RG1007. doi: 10.1029/2011RG000362
- [23]. Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E. F., & Kaufman, Y. J. (2007). Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D13), 1-21. doi: 10.1029/2006JD007815
- [24]. Liang, J., Zhang, L., Wang, Y., Cao, X., Zhang, Q., Wang, H., & Zhang, B. (2014). Turbulence regimes and the validity of similarity theory in the stable boundary layer over complex terrain of the Loess Plateau, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(10), 6009-6021. doi: 10.1002/2014JD021510
- [25]. Liu, M., Westphal, D. L., Walker, A. L., Holt, T. R., Richardson, K. A., & Miller, S. D. (2007). COAMPS real-time dust storm



- forecasting during Operation Iraqi Freedom. *Weather and forecasting*, 22(1), 192-206. doi: 10.1175/WAF971.1
- [26]. Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, 9(6), 261. doi: 10.3390/geosciences9060261
- [27]. Middleton, N., Kashani, S. S., Attarchi, S., Rahnema, M., & Mosalman, S. T. (2021). Synoptic causes and socio-economic consequences of a severe dust storm in the Middle East. *Atmosphere*, 12(11), 1435. doi: 10.3390/atmos12111435
- [28]. Mohammadpour Penchah, M., Memarian, M. H., & Mirrokni, S. M. (2015). Modeling and Analysis of Dust Storms of Yazd Province Using Numerical Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(4), 67-83. doi: 10.22067/geo.v3i4.34323 [in Farsi]
- [29]. Namdari, S., Karimi, N., Sorooshian, A., Mohammadi, G., & Sehatkashani, S. (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. *Atmospheric environment*, 173, 265-276. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.016
- [30]. Namdari, S., Valizade, K. K., Rasuly, A. A., & Sari Sarraf, B. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 1-11. doi: 10.1007/s12517-015-2029-7
- [31]. Nowjavan, M. R., & Hashemi, M. (2013). Geomorphological Disparity of Kavir Landscapes (Case study: Yazd Province). *Geography and Environmental Planning*, 24(2), 141-152. [in Farsi]
- [32]. Omidvar, K., Dehghan, M., & Khosravi, Y. (2022). Assessment of relationship between aerosol optical depth (AOD) index, wind speed, and visibility in dust storms using genetic algorithm in central Iran (case study: Yazd Province). *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(10), 1745-1753. doi: 10.1007/s11869-022-01214-y
- [33]. Papi, R., Kakroodi, A. A., Soleimani, M., Karami, L., Amiri, F., & Alavipanah, S. K. (2022). Identifying sand and dust storm sources using spatial-temporal analysis of remote sensing data in Central Iran. *Ecological Informatics*, 70, 101724. doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101724
- [34]. Qor-el-aine, A., Beres, A., & Geczi, G. (2022). Dust storm simulation over the Sahara Desert (Moroccan and Mauritanian regions) using HYSPLIT. *Atmospheric Science Letters*, 23(4), e1076. doi: 10.1002/asl.1076
- [35]. Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time environmental applications and display system: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.06.025
- [36]. Shirgholami, M., & Masoodian, S. A. (2022). Assessment of spatial and temporal variations of land surface temperature (LST) due to elevation changes in Yazd Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(16), 1372. doi: 10.1007/s12517-022-09943-1
- [37]. Solomos, S., Ansmann, A., Mamouri, R. E., Biniotoglou, I., Patlakas, P., Marinou, E., & Amiridis, V. (2017). Remote sensing and modelling analysis of the extreme dust storm hitting the Middle East and eastern Mediterranean in September 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(6), 4063-4079. doi: 10.5194/acp-17-4063-2017, 2017.
- [38]. Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1
- [39]. Tian, X., Tang, C., Wu, X., Yang, J., Zhao, F., & Liu, D. (2023). The global spatial-temporal distribution and EOF analysis of AOD based on MODIS data during 2003–2021. *Atmospheric Environment*, 302, 119722. doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.119722
- [40]. Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., & Connor, S. J. (2010). Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 449-465. doi: 10.1016/j.rse.2009.10.002
- [41]. Wan, Z., Wang, P., & Li, X. (2004). Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the

- southern Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 25(1), 61-72. doi: 10.1080/0143116031000115328
- [42]. Wu, Y., Wen, B., Li, S., & Guo, Y. (2021). Sand and dust storms in Asia: a call for global cooperation on climate change. *The Lancet Planetary Health*, 5(6), e329-e330. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00082-6
- [43]. Xiong, X., Sun, J., Wu, A., Chiang, K. F., Esposito, J., & Barnes, W. (2005, October). Terra and Aqua MODIS calibration algorithms and uncertainty analysis. In *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX*, Proceedings of the SPIE, 5978, 255-264. doi: 10.1117/12.627631

## Identifying trajectories and sources of dust events in Yazd province using HYSPLIT model and remote sensing data (Research Paper)

1- Mohammad Reza Shirgholami\*, Ph.D. of Climatology, Head of Applied Meteorology Development Group, Yazd Meteorological Office, Yazd, Iran.

mrshirgholami@yahoo.com

Received: 31 Oct. 2023

Accepted: 15 Jan. 2024

### Abstract

Dust storm is one of the destructive weather phenomena that strongly affects regions with arid and semiarid climates like Yazd province. This phenomenon leads to many losses, including environmental, socio-economic, human health, climate and microclimate problems. Accurate spatial and temporal monitoring of dust can help identify the trajectories and sources of this atmospheric hazard and play a vital role in management and reduction of possible damages of storm. In the present study, three examples of dust storms that occurred in 2022 in Yazd province were analyzed. When the visibility is less than 3.5 km and one of the codes 06 to 09 or 30 to 35 is reported, it is considered as an effective dust storm. The lagrangian HYSPLIT model was used to identify the trajectories of dust transfer to Yazd province. The results of this model indicate that dust masses travel three main pathways to reach Yazd province: southwest, west-northwest, and northeast. In order to investigate the spatial distribution of dust and also to identify dust sources more accurately, the aerosol optical depth data based on remote sensing, the MOD04/MYD04\_L2 product and also the MOD08\_D3 product, were used. These images showed that the external sources of dust are the large deserts of Iraq, Syria, the Arabian Peninsula, and the desert of Turkmenistan, and the internal source of dust is the desert areas located in the provinces of Semnan, Isfahan in the northeast of Yazd province. In addition, the Gavkhoni wetland in the northwest of the study area acts as an intensifier of the dust transferred from the western borders of the country. Also, the results obtained from the satellite data and the HYSPLIT model are consistent with each other.

**Keywords:** Dust Sources, Visibility, Aerosol Optical Depth, MODIS, Spatial Distribution.