

Detection and Numerical Simulation of Dust Storm in Kermanshah

T. Alizadeh^{1*}, M. Rezaei Banafsheh², Gh.R. Goodarzi³, S.H. Sheikhghaderi⁴

1. PhD Student of Meteorology, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. Professor of Meteorology, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. Associate Professor of Health and Environmental Engineering, Air Pollution and Respiratory Diseases Research Center, Department of Health and Environmental Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.
4. MSc student of Remote sensing and Geographic Information System, Department Remote sensing and Geographic Information System, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University of Tehran, Iran.

* Corresponding Author: mrbanafsheh@tabrizu.ac.ir

Received date: 14/04/2021

Accepted date: 08/08/2021

 [10.22034/JDMAL.2021.246299](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.246299)

Abstract

This study aimed to identify the epicenter and co-occurrence factors of dust storm waves in Kermanshah from 16 to 18 June 2016. To investigate the synoptic conditions of the causes of this phenomenon, data set with a resolution of 0.125° arcs from the European Center for Medium-Term Atmospheric Prediction (ESMWF), including geopotential height at 500 hPa, omega at 700 hPa, sea level pressure, orbital components and meridian at 300 hPa level, specific moisture at 700 hPa level, soil moisture up to 10 cm depth and dust optical depth were used. To route, the origin of dust particles, the Lagrangian method of the HYSPLIT model was used 48 hours before the occurrence of dust phenomenon in Kermanshah at three altitude levels of 200, 1000, and 1500 m. The dust storm was also simulated using WRF-chem numerical weather forecasting model. Finally, through the processing of MODIS satellite images, its scope was determined. Examination of HYSPLIT tracking maps showed that the central and western deserts of Iraq and the Syrian are the main sources of dust for the study area. In synoptic conditions, simultaneously with the occurrence of rising dust, cyclonic systems play a significant role in the transmission of this phenomenon. Significant strengthening of the Iraqi low-pressure system along with the formation of traffic in the Zagros mountains has caused the creation and transfer of dust in the warm period of the year to the study area. The spatial distribution of the dust interpreted by the MODIS images is consistent with the spatial distribution of the dust concentration simulated by the WRF-chem model.

Keywords: Dust particles; synoptic system; Routing; Satellite Images; Forecast





ردیابی و شبیه‌سازی عددی طوفان گردوغبار در شهر کرمانشاه

طوبی علیزاده^{۱*}، مجید رضایی‌بنفشه^۲، غلامرضا گودرزی^۳، سیده‌هدایت شیخ‌قادری^۴

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
 ۲. استاد آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
 ۳. دانشیار مهندسی بهداشت و محیط، مرکز تحقیقات آلودگی هوا و بیماری‌های تنفسی، گروه مهندسی بهداشت و محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران.
 ۴. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
- * نویسنده مسئول: mrbanafsheh@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

 [10.22034/JDMAL.2021.246299](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.246299)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف شناسایی کانون و عوامل هم‌دید موج طوفان گردوغبار ۲۷ تا ۲۹ خرداد ۱۳۹۵ در شهر کرمانشاه انجام گرفت. برای بررسی شرایط هم‌دید علل وقوع این پدیده، از مجموعه داده‌های پیش‌بینی میان مدت جوی مرکز اروپایی (ESMWF) با قدرت تفکیک 0.125° قوسی شامل، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ hpa، امگا در تراز ۷۰۰ hpa، فشار تراز دریا، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری در تراز ۳۰۰ hpa، رطوبت ویژه در تراز ۷۰۰ hpa، رطوبت خاک تا عمق ۱۰ cm و عمق آپتیکی گردوغبار استفاده شد. برای مسیریابی منشأ ذرات گردوغبار از روش لاگرانژی مدل HYSPLIT در ۴۸ ساعت قبل از وقوع پدیده گردوغبار در کرمانشاه در سه سطح ارتفاعی ۲۰۰ m، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ استفاده شد. همچنین با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی عددی وضع هوا WRF-chem طوفان گردوغبار شبیه‌سازی شد. در پایان با پردازش تصاویر ماهواره‌ای مودیس قلمرو گسترش آن مشخص شد. بررسی نقشه‌های ردیابی HYSPLIT نشان داد که بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و صحرای سوریه کانون‌های اصلی گردوغبار برای منطقه مورد مطالعه هستند. در شرایط هم‌دید همزمان با رخداد گردوغبارهای برخاسته، سامانه چرخندی (سیکلونی) نقش بارزی در انتقال این پدیده داشته است. تقویت قابل توجه سامانه کم‌فشار عراق به همراه شکل‌گیری تراف در زاگرس موجب ایجاد و انتقال گردوغبار در دوره گرم سال به منطقه مورد بررسی شده است. همچنین توزیع مکانی گردوغبار تفسیر شده توسط تصاویر سنجنده مودیس با توزیع مکانی غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-chem انطباق دارد.

واژگان کلیدی: گردوغبار؛ سامانه هم‌دید؛ مسیریابی؛ تصاویر ماهواره‌ای؛ پیش‌بینی



■ مقدمه

یکی از مهم‌ترین پیامدهای محیط زیستی رخداد گردوغبار در جو، اثر عمده آن بر اقلیم است. گردوغبار می‌تواند بر روی درجه حرارت، جذب و پخش تابش خورشید با تغییر در تابش موج کوتاه ارسالی به سطح زمین و تابش موج بلند از زمین اثر بگذارد. با این حال توازن بین این دو گرایش که گردوغبار باعث گرم شدن و یا سرد شدن می‌شود به متغیرهای زیادی از جمله اندازه ذرات گردوغبار و ترکیبات شیمیایی آنها وابسته است (۱۰). مقادیر زیادی گردوغبار همه ساله از بیابان‌های شمال آفریقا، شبه‌جزیره عربستان، عراق و سوریه به مناطق مختلف ایران منتقل می‌شوند. این گردوغبارها بسته به میزان گرم شدن سطح زمین و سرعت بادهایی مثل هارماتان و بادهای شدید محلی دیگر تا ارتفاع ۳۰۰۰ متری و بالاتر کشیده شده و با ورود به سامانه‌های بادی مدیترانه و شمال آفریقا به مناطق واقع در پیش روی این سامانه‌ها منتقل می‌شوند (۱۴). گردوغبارها یکی از پدیده‌های متداول جوی و در ردیف بزرگترین مشکلات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که این امر هر ساله آثار مخربی را برای ساکنان این مناطق دارد. در سال‌های اخیر آلودگی ناشی از ذرات گردوغبار به یکی از معضلات زیست محیطی به خصوص در کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است. با توجه به اینکه ایران نیز در منطقه‌ی خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده است و مساحت زیادی از کشور جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود مطالعه این پدیده ضرورت دارد (۷). پدیده طوفان‌های گردوغبار در سال‌های اخیر با تشدید بیابان‌زایی در کشورهای عراق و عربستان و سوریه جنبه‌های مختلفی از زندگی مردم کرمانشاه که در همسایگی کانون‌های گردوغباری هستند را متأثر ساخته است با توجه به اهمیت آثار منفی طوفان‌های گردوغبار و همچنین روند افزایشی آنها بررسی، تشخیص و تحلیل زمانی و مکانی ویژگی‌های این ریزگردها به منظور مدیریت این بحران و جلوگیری از اثرات زیان‌آور این ریزگردها بسیار مهم می‌باشد (۱۰). در سال‌های اخیر علاوه بر دانش سنجش از دور، بسیاری از روش‌ها به منظور شبیه‌سازی،

مسیریابی و پراکنش ریزگردها توسعه یافته‌اند، در میان مدل‌ها و روش‌های شبیه‌سازی گردوغبار، مدل HYSPLIT به عنوان یک سامانه مبنای کامل در رابطه با شناسایی منبع و نحوه پراکنش ذرات گردوغبار است (۲). مدل HYSPLIT، مدلی دوگانه برای محاسبه‌ی خط سیر حرکت گردوغبار، پراکندگی و شبیه‌سازی ته‌نشینی آن با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی است که به دلیل بهبود رویکردهای (الگوریتم) فرارفتی، به روز شدن معادله‌های پایداری و پراکندگی، بهبود رابطه کاربرگرافیکی نسبت به سایر مدل‌های ردیابی قابلیت بهتری دارد (۲). یکی دیگر از مدل‌های شبیه‌سازی گردوغبار مدل WRF می‌باشد. مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا WRF سامانه عددی شبیه‌سازی جوی است. مدل WRF¹ علاوه بر توسعه نسل بعدی مدل‌های میان‌مقیاس^۲ پیش‌بینی وضع هوا و سامانه‌های گوارد داده‌ها، عامل پیشرفت و افزایش کارایی در سامانه‌های پیش‌بینی میان‌مقیاس و همچنین درک چگونگی عملکرد این مدل‌ها می‌باشد. وجود تعداد قابل توجهی از زیر برنامه‌ها در WRF، بستر مناسبی را برای پژوهش‌ها و شبیه‌سازی‌های جوی و اقیانوسی توسط این مدل ایجاد کرده است. استفاده از این مدل، بخش وسیعی از پژوهش‌های علمی از شبیه‌سازی حالت‌های ایده‌آل تا پیش‌بینی‌های کاربردی را در بر می‌گیرد. فواصل بین نقاط شبکه در مدل WRF قابلیت تغییر از یک تا چند ده کیلومتر دارد (۸). تصاویر مودیس برای نشان دادن وقوع یک رخداد مثل حرکت سیلاب، فوران آتشفشان، طوفان گردوغبار و غیره همواره استفاده گردیده‌اند. در این پژوهش، برای شناخت هر چه بیشتر وقوع گردوغبار و همچنین درک بیشتری از ابعاد و ویژگی‌های این طوفان‌ها از تصاویر سنجنده مودیس نیز استفاده شده است. در مورد هر موضوعی و در بررسی‌های مختلف وجود پیشینه‌ای از موضوع و یا اطلاع از بررسی‌های انجام شده می‌تواند تا حد زیادی به پیشرفت مطالعه و دستیابی به نتایج منطقی جدید کمک کند. در ادامه تعدادی از منابع داخلی و خارجی موجود درباره موضوع تحقیق، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در تحقیقی که برای مسیریابی طوفان‌های

سال‌های اخیر در ایستگاه همدیدی شهر کرمانشاه ثبت شده است، سعی بر آن شد شرایط اقلیمی و سامانه‌های جوی منجر به پدیده گردوغبار بررسی و در پایان منشأ و مسیر طوفان گردوغبار با استفاده از مدل‌های HYSPLIT و WRF-Chem، پایش شود.

■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه کرمانشاه در غرب ایران به دلیل نزدیکی به بیابان‌های کشورهای مجاور در معرض رخدادهای گردوغباری متعدد است. با توجه به مسیر حرکت سامانه‌ها و نحوه‌ی قرارگیری ناو‌ها و کم‌فشارها در روزهای متفاوت، مهمترین چشمه‌های گردوغبار وارد به این منطقه، بیابان‌های سوریه، کویت، بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و بیابان نفود در عربستان است. از نظر موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در بین $25^{\circ} 46'$ تا $47^{\circ} 04'$ طول شرقی و $45^{\circ} 33'$ تا $4^{\circ} 34'$ عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. شهرستان کرمانشاه مساحتی بالغ بر 24640 km^2 و ایستگاه آن 1420 m از سطح دریا ارتفاع دارد. دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک با جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای است. متوسط میزان بارندگی آن بین 400 تا 500 mm می‌باشد و میانگین دمای سالیانه 16°C است. جهت وزش بادهای غالب در این منطقه در طول سال غربی است، که همراه با نوسان‌هایی در جهت شمال غرب و جنوب غربی است (شکل ۱).

روش پژوهش

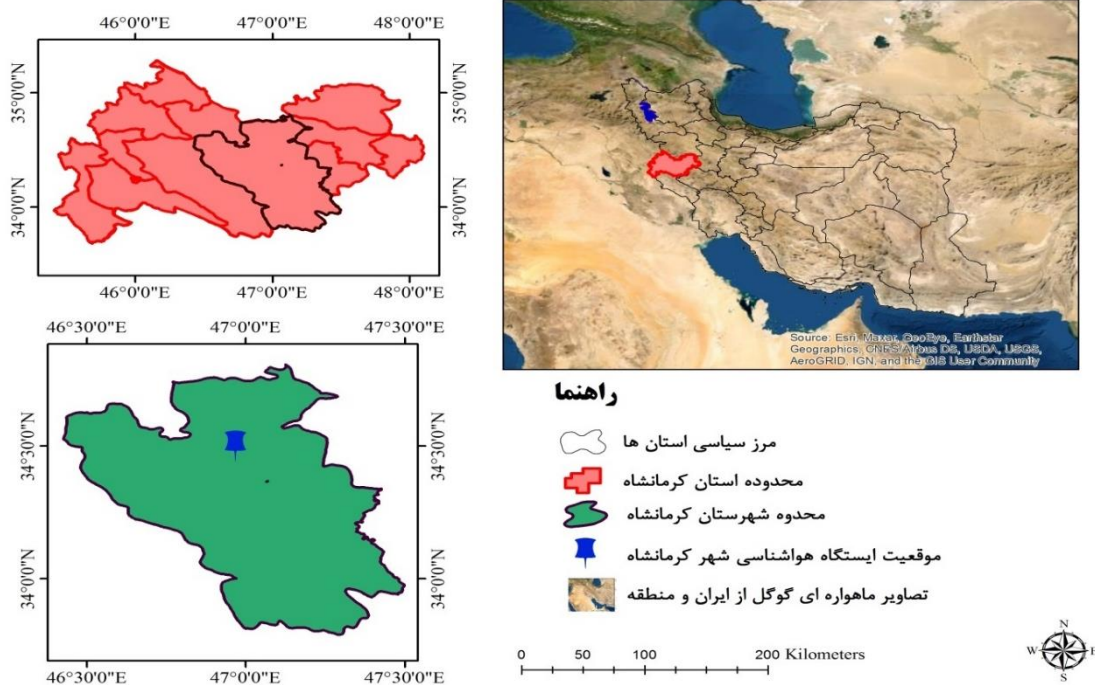
فرآیند انجام پژوهش در (شکل ۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، هدف اصلی این بررسی، تبیین علل وقوع و مسیریابی چشمه‌های طوفان گردوغبار شهر کرمانشاه در بازه زمانی سه روزه ۲۷ تا ۲۹ خرداد ۱۳۹۵ است. در مرحله اول ابتدا با استفاده از داده‌های هواشناسی روزهای همراه با طوفان گردوغبار مشخص شد. در مرحله دوم برای واکاوی همدیدی علل وقوع این طوفان از مجموعه داده‌های پیش‌بینی میان مدت جوی مرکز اروپایی با قدرت تفکیک 0.125° قوسی شامل،

گردوغبار در عراق، عربستان و کویت با استفاده از مدل عددی HYSPLIT مورد بررسی قرار گرفت، به این نتیجه دست یافتند مدل در شبیه‌سازی مسیرها و تعداد رویدادهای گردوغبار برای کویت از صحت بالایی برخوردار است (۳). در مطالعه‌ای دیگر، طوفان‌های گردوغبار در چین با استفاده از مدل عددی WRF مورد بررسی قرار گرفت، از مقایسه تصاویر سنجنده مودیس با خروجی مدل WRF نشان داده شد که سهم عمده تولید غبار در چین ناشی از بادهای شدید سطحی در بیابان گبی است و کم‌ترین سهم مربوط به بیابان تاکلامکان می‌باشد (۴). در مقاله‌ای به بررسی روند فصلی روزهای همراه با گردوغبار در غرب ایران پرداخته شد، به این نتیجه دست یافتند که فراوانی روزهای گردوغبار از شمال به جنوب و از شرق به غرب ایران افزایش می‌یابد. حداکثر فراوانی روزهای گردوغبار در ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه اتفاق افتاده است و دوره‌های افزایش و کاهش فزاینده وجود داشته است که این تغییرات به طور منطقی با تغییرات فصلی مرتبط است، بیشترین گسترش و تشدید الگوی فراوانی روزهای گردوغبار در فصل بهار در غرب ایران مشاهده شده است (۱۸). در مطالعه‌ای به بررسی تشکیل و انتشار طوفان گردوغبار با استفاده از نرم‌افزار HYSPLIT و تصاویر ماهواره‌ای مودیس در شهر اهواز پرداختند، نتایج تحقیق نشان داد که جریانات باد شمال با جهت شمال غرب- غرب و جنوب غرب باعث انتقال حجم انبوهی گردوغبار از بیابان‌های کویت، عراق، سوریه و عربستان به سمت جنوب غرب ایران و شهر اهواز شده است (۱۲). در بررسی منشأ گردوغبار فراگیر اردیبهشت ۱۳۹۷ وارده به قسمت‌های شرق، جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب و مرکز ایران و ردیابی مسیر حرکت آن با مدل HYSPLIT، نواحی شبه‌جزیره عربستان منشأ اصلی تعیین گردید (۱۹). منطقه خاورمیانه به عنوان یکی از بزرگترین چشمه‌های انتشار گردوغبار در جهان است (۲۰). با توجه به اینکه ۹۱٪ از مساحت کشور ایران در منطقه‌ی خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده است، تأثیر گردوغبار می‌تواند خسارت فاجعه بار محیط زیستی فراوانی به بار آورد، بنابراین مطالعه عوامل به وجود آورنده این پدیده و شناسایی کانون‌های آن ضروری است. در این پژوهش که با هدف بررسی جامع ویژگی‌های شدیدترین مورد وقوع طوفان گردوغبار که طی

مدل مسیریابی HYSPLIT

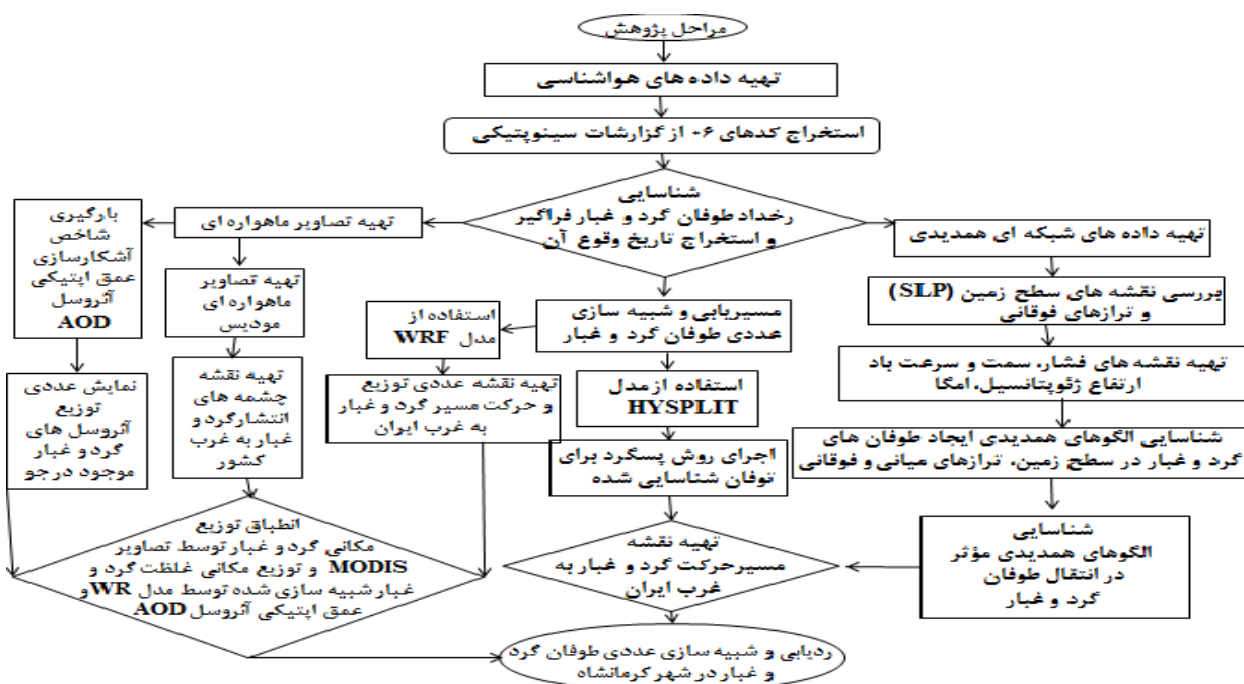
برای تعیین مسیر گردوغبار از مدل ترکیبی لاگرانژی با امکان ردیابی پسرگرد ذرات در ترازهای مختلف جو موسوم به مدل HYSPLIT^۱ استفاده شد. در این مدل موقعیت اولیه ذرات گردوغبار شامل مؤلفه‌های مکانی آلودگی، اطلاعات هواشناسی مانند سرعت و جهت باد از جمله پارامترهای مورد نیاز است. ذرات با توجه به سرعت و جهت باد در هوا حرکت می‌کنند و نرم افزار به ثبت مسیر آنها می‌پردازد. این مدل، مدلی دوگانه برای محاسبات خط سیر حرکت گردوغبار، پراکندگی و شبیه‌سازی ته‌نشینی آن با استفاده از رویکردهای PUFF و ذرات است که در آن محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی انجام گرفت. روش محاسبه‌ی مدل، ترکیبی میان دیدگاه‌های اویلری و لاگرانژی است و به همین دلیل HYSPLIT را مدلی دوگانه می‌نامند (۳). دو دیدگاه اساسی بر این مدل حاکم است:

ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ hpa، امگای تراز ۷۰۰ hpa، فشار تراز دریا (SLP)، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در تراز ۳۰۰ hpa، رطوبت ویژه در تراز ۷۰۰ pa به دلیل قدرت تفکیک بالاتر و داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک تا عمق ۱۰ cm در منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. با بکارگیری داده‌های فوق در نرم افزار GRADS؛ الگوهای بادی و سامانه‌های هم‌دیدمی مؤثر در حمل و انتقال ریزگردها به شهر کرمانشاه ترسیم شد. در مرحله سوم با استفاده از مدل HYSPLIT، ذرات گردوغبار در سه سطح ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ از سطح زمین در حد فاصل زمانی ۶ تا ۴۸ ساعت قبل از رخداد گردوغبار ردیابی شدند. از مدل شبیه‌سازی عددی وضع هوا WRF-CHEM، در تهیه نقشه‌های عددی توزیع غلظت ذرات و حرکت مسیر طوفان گردوغبار به غرب ایران استفاده گردید. و در مرحله آخر از تصاویر MODIS برای تعیین چشمه‌های انتشار گردوغبار به غرب ایران استفاده شد و همچنین با به‌کارگیری شاخص آشکارسازی عمق اپتیکی آئروسول AOD، نقشه توزیع عددی آئروسول‌های گردوغبار موجود در جو به‌دست آمد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر کرمانشاه در استان

^۱ Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory



شکل ۲. نمودار جریان‌ی مراحل انجام پژوهش

عملیاتی طراحی شده است. توسعه و گسترش این مدل تبدیل به یک تلاش همگانی برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی میان مقیاس و نیز ایجاد یک سامانه داده‌گذاری شده است تا فهم و پیش‌بینی وضعیت جوی را گسترش و پیشرفت‌های تحقیقاتی را تسریع کند. WRF-CHEM قابلیت مدل‌سازی شیمی هوا مربوط به هواشناسی فیزیکی و آلودگی را ایجاد می‌کند و محدوده کاربرد این مدل بسیار وسیع است و گسترده‌ای بین چندین m تا هزاران km را پوشش می‌دهد (۸).

در پژوهش حاضر با استفاده از نسخه ۳،۶،۱ از مدل جفت شده WRF-chem³، شبیه‌سازی برای ۳ روز از تاریخ ۲۷ تا ۲۹ خرداد ماه سال ۱۳۹۵ با استفاده از داده‌های آنالیز GFS به منظور شرایط اولیه و مرزی صورت پذیرفت. در این اجرا از طرح‌واره پیشرفته MADE-SORGAM به عنوان طرح‌واره گسیل ذرات معلق جوی استفاده شد (۱). این طرح‌واره بر پایه مدل دینامیک مودال^۴ برای ذرات گردوغبار در اروپا طراحی شده است (۵). که این رهیافت نیز به نوبه خود بر پایه مدل منطقه‌ای ذرات معلق طراحی شده است. در طراحی MADE ذرات معلق جوی در سه

۱- رویکرد لاگرانژی: در این رویکرد قضیه از دید فردی که با بسته هوا در حرکت است، بررسی می‌شود. به این ترتیب مجموع غلظت ذرات در هر شبکه در طول مسیر حرکت تعیین می‌شود.

۲- رویکرد اوبلری: در این حالت قضیه از دید فردی که در مکان ثابت ایستاده است، بررسی می‌شود. غلظت ذرات برای هر شبکه با استفاده از حرکات پخش و انتقال ذرات تعیین می‌گردد.

از آنجایی که رهیافت لاگرانژی هر ذره در زمان‌های مختلف موقعیت‌های متفاوتی خواهد داشت، بنابراین این امکان فراهم می‌شود که مدل‌های پایه لاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی و زمانی خاص، حرکت آن را در گام‌های زمانی دلخواه به سمت آینده^۱ یا به سمت زمان‌های گذشته یا پس‌گرد^۲ ردیابی کنند، بنابراین در پژوهش حاضر از روش لاگرانژی استفاده شد (۳).

مدل شبیه‌سازی WRF-CHEM

مدل WRF یک مدل برای پیش‌بینی عددی وضع هوا و شبیه‌سازی جو است که برای کاربردهای پژوهشی و

3 Weather research and forecasting chemistry
4 Modal Aerosol Dynamic Model

1 Forward
2 Backward

بررسی شود. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای دریافت شده از وبگاه سازمان ناسا، ماهواره ترا سنجنده MODIS با قدرت تفکیک ۱ km مربوط به روزهای گردوغباری انتخابی، استفاده شد. تصاویر روزهای ۲۷ تا ۲۹ خرداد ۱۳۹۵ محدوده غرب ایران برای آشکارسازی گردوغبار استان کرمانشاه از سایت نوا^۱ دریافت شد.

عمق آپتیکی آئروسول AOD

در پژوهش حاضر همچنین برای مشخص شدن وضعیت شفافیت جو از داده‌های ماهواره‌ای عمق آپتیکی آئروسول^۲ AOD استفاده گردید. AOD یکی از پارامترهای مهم در مطالعه گردوغبار است. عمق آپتیکی در واقع به توزیع هواویزها (آئروسول) و گردوغبار موجود در جو اشاره دارد. این کمیت وابسته به طول موج، به صورت کاهش نور در واحد طول بر روی مسیر مشخص تعریف می‌شود (۱۳). مسیر آپتیکی عمودی، فاصله عمودی از سطح زمین در قسمت فوقانی جو است. مقدار عمق آپتیکی با تراکم تعداد هواویزها و ویژگی‌های ذرات متفاوت است. همچنین AOD کمیتی بی‌بعد است و عبارتند از میزان جلوگیری از گذر پرتو نور در جو به خاطر جذب و پراکنش ناشی از وجود هواویزها در مسیر عبور نور. در واقع AOD به‌عنوان ضریب میرایی تشعشع بر روی ستون قائم در واحد طول تعریف می‌شود. زیاد بودن مقدار AOD نشان دهنده بیشتر بودن هواویزها در امتداد ستون عمودی هوا است و به عبارتی دید در امتداد ستون کم می‌باشد (۱۶). ارزش‌های AOD به‌صورت تقریبی طبقه‌بندی شد که نشان دهنده شرایط جوی است (جدول ۱).

مدل با قطر کمتر از $0.1 \mu\text{m}$ ، تجمعی با قطر بین 0.1 تا $2 \mu\text{m}$ و درشت با قطر بزرگتر از $2 \mu\text{m}$ با توزیع لوگ-نرمال در فرآیند شبیه‌سازی کیفیت هوا وارد شدند. الگوی ریاضی توزیع هواویزها با رابطه ۱ محاسبه شد.

$$n(\text{ln}dp) = \frac{N}{\sqrt{2\pi \text{ln}\delta g}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(\text{ln}dp - \text{ln}dpg)^2}{\text{ln}\delta g^2} \right] \quad (1)$$

که در آن:

N: تعداد ذرات بر حسب m^3 ; dp: قطر ذرات، dpg: قطر میانه، g: انحراف معیار می‌باشد (۱۱).

تصاویر MODIS

به‌دلیل تغییرات سریع در ماهیت و مکان گسترش طوفان‌های گردوغبار، محدودیت‌هایی در پایش و اندازه‌گیری‌های مربوط به آن وجود دارد. مدل‌های عددی هواشناسی نیز به تنهایی نمی‌تواند به ردیابی و آشکارسازی طوفان‌های گردوغبار بپردازد. امروزه فناوری سنسجش از دور با فراهم کردن تصاویر متعدد جهانی و منطقه‌ای با مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، ابزاری مناسب برای پایش، اندازه‌گیری و برداشت ویژگی‌های گردوغبار است. در این پژوهش برای بررسی طوفان گردوغباری، از تصاویر MODIS نیز استفاده شد. در سنجنده‌های MODIS، ماهواره‌های Aqua-Terra در ۳۶ کانال قرار گرفته است. دامنه طیفی آنها از انرژی تابشی محدوده $0.4 \mu\text{m}$ تا $14.385 \mu\text{m}$ مرئی تا مادون قرمز را پوشش می‌دهد و در روز، حداقل ۴ تصویر MODIS از هر منطقه حاصل می‌شود. قدرت تفکیک بالای زمانی داده‌ها موجب می‌شود که طوفان‌های گردوغبار به طور مداوم

جدول ۱. ارزش‌های AOD که نشان دهنده شرایط جوی است (۱۶)

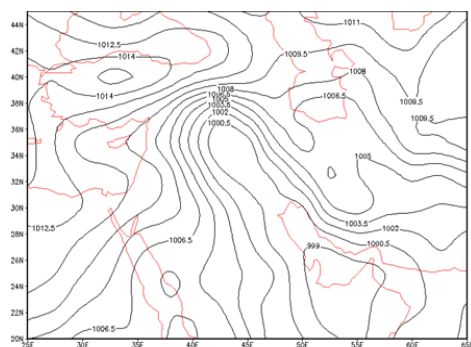
| شرایط جوی | ارزش AOD |
|-----------------------------------|---------------|
| مناطق بسیار پاک | < 0.02 |
| مناطق پاک | $0.02 - 0.08$ |
| مناطق نسبتاً | $0.08 - 0.2$ |
| مناطق آلوده | $0.2 - 0.6$ |
| پدیده‌های گردوغباری سنگین | $0.6 - 1.5$ |
| شرایطی که موقعیت خورشید مشخص نیست | $1.5 - 3$ |

■ نتایج و بحث

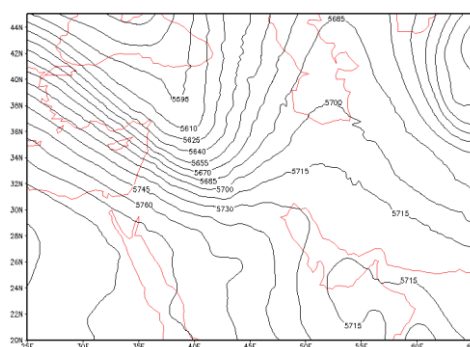
بررسی همدیدی، تعیین منابع و مسیر گردوغبار با مدل HYSPLIT

با توجه به تداوم وجود گردوغبار و غلظت زیاد آن در شهر کرمانشاه، روزهای ۲۷ تا ۲۹ خرداد ۱۳۹۵، برای بررسی همدید و تعیین کانون گردوغبار بر مبنای رویکرد لاگرانژی ذرات گردوغبار در مدل HYSPLIT بهره‌گیری شد. پدیده غالب روز ۲۷ خرداد ۱۳۹۵ برای تراز ۵۰۰ hpa (شکل ۳، الف) اتفاق افتاد. در این روز حاکمیت سامانه پرفشار جنب حاره‌ای آزور^۱ در بالای منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده بوده، به طوری که جو بالا در این روز پایدار و شرایط صعود و ناپایداری وجود نداشت، حاکمیت پرفشار آزور از ایجاد شرایط برای شکل‌گیری پدیده گردوغباری توسط سامانه‌های سطوح میانی جلوگیری می‌کند. فشار تراز دریا (شکل ۳، ب) در روز مذکور، سامانه کم‌فشاری با فشار مرکزی ۹۹۹ hpa بر روی خلیج فارس کشیده شده و خطوط هم‌فشار به صورت زبانه‌ای به منطقه غرب ایران کشیده شده بود. گردش چرخندی هوا درون این سامانه موجب انتقال ذرات گردوغبار از بیابان‌های عراق و سوریه به غرب ایران شد و شرایط برای ایجاد پدیده گردوغبار را در منطقه غرب ایران فراهم کرد. با توجه به نقشه باد در تراز ۳۰۰ hpa (شکل ۳، ج)، زبانه کم‌ارتفاع جنب قطبی که به صورت کم‌فشار بریده در شرق مدیترانه می‌باشد با زبانه پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای در موقعیت عربستان و جنوب ایران استقرار یافته است جریان‌های باد با جهت‌های شمال غربی - جنوب شرقی موجب هدایت گردوغبار به منطقه مورد مطالعه شد. نقشه امگا (شکل ۳، د) و مقدار آن و همچنین جهت پیکان‌ها سمت و سرعت باد نشان دهنده وجود جریان صعودی عمیق و قوی در محدوده باد شدید است. لذا طبق این شواهد وزش باد به همراه صعود هوا توسط الگوی همدیدی مذکور کمربند بادهای شدید ترازهای فوقانی شکل گرفته است و در مناطق بیابانی سوریه و شمال عراق موجب ایجاد طوفان در سطح زمین شده است. با در نظر گرفتن بررسی‌های انجام شده و خروجی مدل HYSPLIT (شکل ۳، ه) سازوکار اصلی انتقال ذرات غبار در محدوده‌ای در حد فاصل شرق سوریه و عراق به منطقه مورد مطالعه بود. در الگوی فشاری مستقر بر روی منطقه در زمان وقوع گردوغبار،

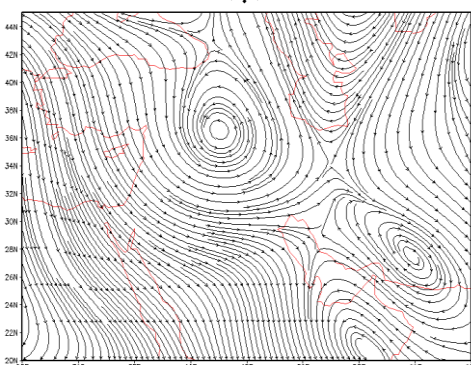
مسیرهای انتقال ذرات در سه سطح ۲۰۰ m، ۱۰۰۰ m، ۱۵۰۰ m تابعی از مسیر و جهت حرکت باد غربی است. در مسیر A ارتفاع ۲۰۰ m نزدیک‌ترین ارتفاع به زمین است لذا تأثیر بیشتری بر شهر کرمانشاه داشته است و همچنین این ارتفاع به عنوان شاخص اصلی جهت تشخیص منشأ گردوغبارهای شدید مورد بررسی قرار گرفت به طوری که از زمان شروع روند عقب‌گرد به ساعات ماقبل در ارتفاع ۲۰۰ m در هر زمانی که مسیر A با توجه به پروفیل عمودی خروجی از مدل HYSPLIT، از ارتفاع ۱۰۰۰ m عبور کرد آخرین نقطه منشأ طوفان گردوغبار در نظر گرفته می‌شود. منشأ گردوغبار (شکل ۳، ه) در مسیرهای A، B و C ارتفاع‌های ۱۰۰۰ m، ۲۰۰ m و ۱۵۰۰ m منطبق بر جریانات باد غربی می‌باشد که از بیابان‌های سوریه و اردن آغاز و سپس با عبور از بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و با انتشار عمودی ناچیزی به سمت شرق ادامه داده‌اند. همچنین بررسی نقشه رطوبت (شکل ۳، و) روز ۲۷ خرداد ۱۳۹۵ نشان داد که میزان رطوبت موجود در سطح زمین، در منطقه مورد مطالعه بسیار کم و زیر ۲۵٪ است که موجب خشک شدن خاک‌های سطحی شده که با وجود کم‌فشارهای حرارتی سطح زمین و ناپایداری ایجاد شده، شرایط تشکیل گردوغبار را به دنبال داشته است. امتداد جریان‌های گردوغبار روز ۲۸ خرداد بر روی منطقه به موجب کم‌فشار بریده‌ای که در عرض‌های بین ۳۴° تا ۴۰° شمالی بوده و (شکل ۴، الف) حرکت‌های شرق سوی این بریده کم‌فشار با ارتفاع ۵۶۱۰ gpm بر روی منطقه غرب عراق و سوریه موجب انتقال گردوغبار به غرب کشور شده است. نقشه فشار تراز دریا (شکل ۴، ب) در روز طوفان گردوغبار نشان داده شد. همان‌طور که در این نقشه پیداست، در این روز سامانه کم‌فشار حرارتی با فشار ۱۰۰۰/۵ hpa همچنان در سطح منطقه فعال بوده و زبانه‌های آن به سمت شرق و روی منطقه مورد مطالعه کشیده شده است، اما در شمال غرب این کم‌فشار، پرفشاری با ۱۰۱۸/۵ hpa بر روی ترکیه مستقر بوده و کنش و واکنش این سامانه منجر به ایجاد شیب فشاری متأثر از جریانات پرفشاری عرض‌های بالاتر شده است این اختلاف فشار باعث افزایش سرعت باد و شکل‌دهی جریاناتی از شمال‌غرب به سمت جنوب‌شرق ایران شده است (شکل ۴، د).



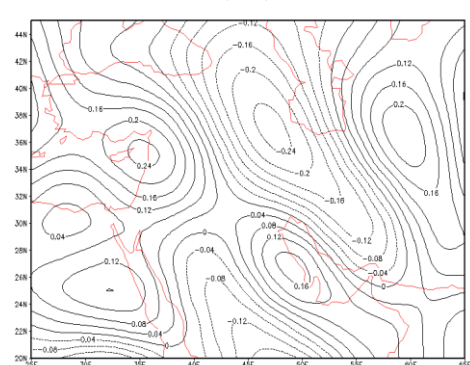
(ب)



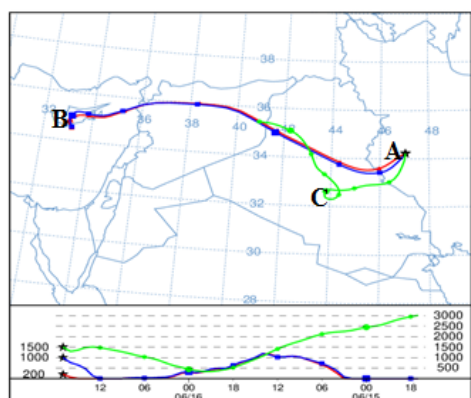
(الف)



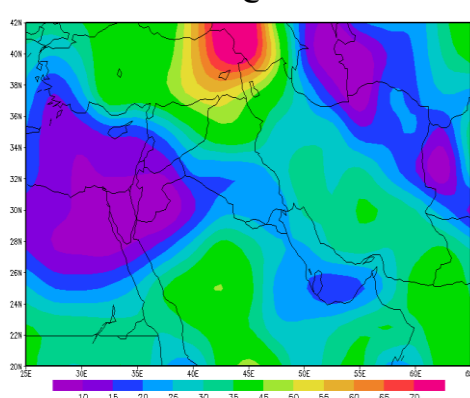
(د)



(ج)



(ه)



(و)

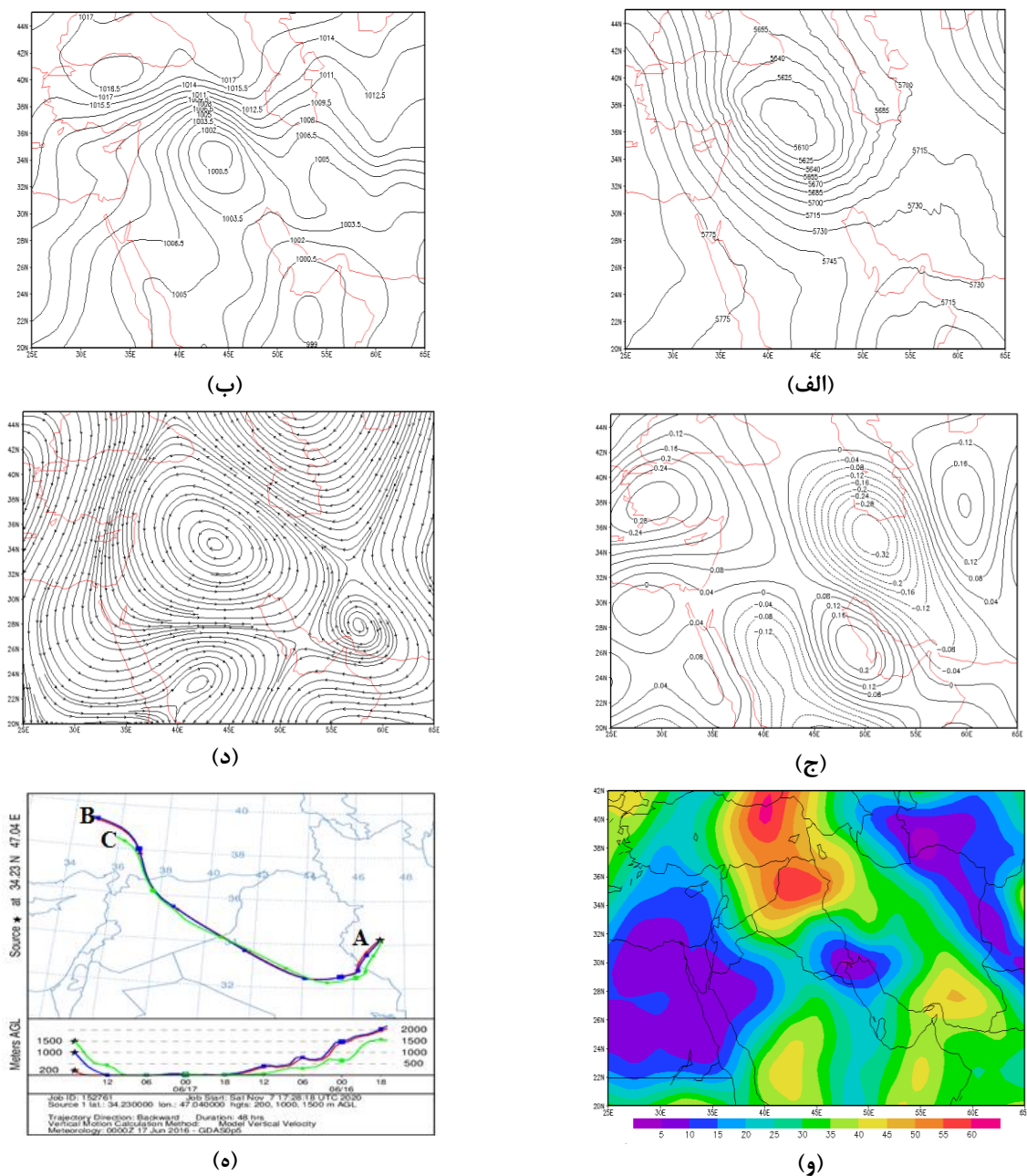
شکل ۳. الف. ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ hpa؛ ب. فشار سطح دریا؛ ج. امگای تراز ۷۰۰ hpa؛ د. جریان باد در تراز ۳۰۰ hpa؛ و. رطوبت ویژه ۷۰۰ hpa؛ ه. نقشه ردیابی ذرات گردوغبار HYSPLIT روز ۲۷ خرداد ۱۳۹۵

و). منشأ هر سه سطح ارتفاعی گردوغبار شهر کرمانشاه، کشورهای همسایه بوده‌اند که حاکی از آشفتگی جریان هوا را در منطقه دارد. به همین دلیل است که پیک اصلی یا بیشترین غلظت PM_{10} ، $2125/346 \mu g/m^3$ در این طوفان به ثبت رسیده است و تعداد ساعات دوام این طوفان به ۴۱ ساعت در این دو روز رسیده است. عامل اصلی نزول ذرات بر روی ایران کمتر شدن اثر جریان‌های چرخندی و حاکمیت بیشتر پرفشار بوده است. همچنین بررسی نقشه رطوبت روز ۲۸ خرداد نشان داد که میزان رطوبت موجود در سطح زمین

نقشه امگا در تراز ۷۰۰ hpa نیز نشان از ناپایداری‌های شدیدی بر روی منطقه مورد مطالعه داشته که در شکل‌گیری پدیده گردوغباری مؤثر بوده است (شکل ۴، ج). بررسی مدل نشان می‌دهد که در این روز ذرات غباری در ارتفاعات زیر ۱۵۰۰ m مسیر افقی را ابتدا از سوریه طی کرده و سپس با عبور از بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و با انتشار عمودی ناچیزی به سمت شرق ادامه داده‌اند و با یک جهش عمودی در ساعات پایانی در ارتفاعات بالاتر از ۲۰۰ m به مرزهای غربی کشور نفوذ کرده و به منطقه منتقل شده‌اند (شکل ۴،

است؛ اما دو سامانه پرفشار در شمال و شمال غرب این کم‌فشار، با 1020 hpa و 1018.5 hpa در شمال ترکیه و شرق دریای سیاه مستقر بودند که منجر به شیب فشار به سمت غرب ایران شده است. همچنین کم‌فشار ترمیک وسیعی با فشار مرکزی 1006.5 hpa بر روی خلیج فارس دیده می‌شود، گردش چرخندی هوا درون این سامانه باعث کشیده شدن هوای بیابان‌های عراق به غرب ایران گردیده و شرایط را برای ایجاد پدیده گردوغبار در منطقه مورد مطالعه فراهم کرده است (شکل ۵، ب).

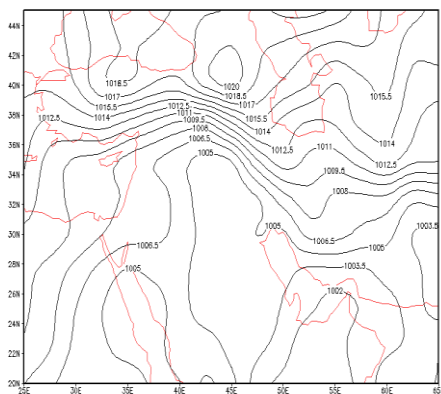
همچنان اندک و زیر 15 m می‌باشد که موجب خشک شدن خاک‌های سطحی و ایجاد شرایط گردوغبار گردیده است (شکل ۴، و). کم‌فشارهای بسته بر روی عراق و سوریه در روز ۲۹ خرداد 1395 (شکل ۵، الف) موجب ایجاد شرایط مناسب برای صعود حجم عظیمی از گردوغبار به هوا شد. حرکات شرق سوی این بریده کم‌فشار که دارای 5625 gpm ارتفاع بوده که موجب ناپایداری در تراز میانی جو شد. در این روز سامانه کم‌فشار حرارتی با فشار 1005 hpa همچنان در سطح منطقه فعال بود که زبانه‌های آن به غرب کشور نفوذ کرده



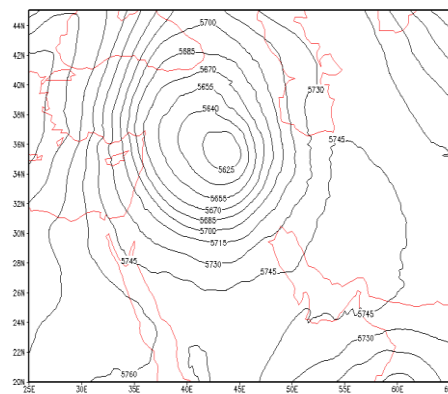
شکل ۴. الف. ارتفاع ژئوپتانسیل تراز 500 hpa ؛ ب. فشار سطح دریا؛ ج. امگای تراز 700 hpa ؛ د. جریان باد تراز 300 hpa ؛ و. رطوبت ویژه تراز 700 hpa ؛ ه. نقشه ردیابی ذرات گردوغبار HYSPLIT روز ۲۸ خرداد 1395

مطالعه رسیده است (شکل ۵، ه). در این روز میزان رطوبت موجود در سطح زمین همچنان زیر ۳۰٪ است که خشک شدن خاک‌های سطحی و ایجاد شرایط گردوغبار را در پی داشته است (شکل ۵، و). نتایج بررسی‌های عمق اِپتیکی اُتروسل نشان داد که در روز ۲۷ خرداد ۱۳۹۵ میزان عمق اِپتیکی بالاتر از ۰/۱ قرار گرفت که گسترش گردوغبار تا سطوح بالاتر از ۱۰۰۰ hpa از علل آن محسوب شد (شکل ۶، الف). اما در روز ۲۸ خرداد با شکل‌گیری جریان گردوغباری شدید در این روز به دلیل گسترش گردوغبار به سطح ۲۰۰ m جو، عمق اِپتیکی به حدود ۰/۰۹ و تراکم به حد زیادی می‌رسد (شکل ۶، ب). همچنین در روز ۲۹ خرداد با غلبه بادهای غربی و شمال غربی، میزان عمق اِپتیکی کاهش یافته و در حد ۰/۳ مشاهده گردد (شکل ۶، ج). که غلبه کامل جریانات شمال غربی در سطوح جوی مشهود بود و قابلیت دید را کاهش داد.

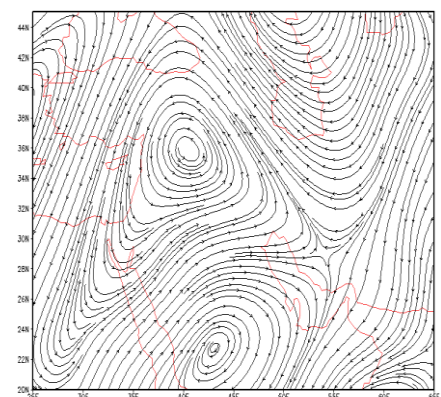
به علت وجود پرفشار عربستان و کم‌فشار موجود در شمال منطقه مورد مطالعه، جریانات باد با جهت‌های شمال غربی-جنوب شرقی باعث هدایت گردوغبار به منطقه مورد مطالعه شده است (شکل ۵، د). نقشه امگا همانند روز قبل در تراز ۷۰۰ hpa (شکل ۵، ج) نیز از ناپایداری بر روی منطقه مورد مطالعه حکایت داشته که در شکل‌گیری پدیده گردوغباری مؤثر بوده است. مشاهده نقشه‌های ردیابی نشان داد که طی این روز مبدأ ذرات غباری در دو مسیر A و B از لحاظ ارتفاعی به نسبت روزهای دیگر در سطوح پایین‌تری کمتر از ۲۰۰ m حرکت خود را از چشمه گردوغبار به سمت شرق آغاز نموده‌اند و مبدأ این دو مسیر در داخل خاک عراق و در بیابان‌های غرب عراق قرار دارد، اما مبدأ گردوغبار در مسیر C منطبق بر جریانات باد می‌باشد که از بیابان‌های سوریه آغاز و با عبور از بیابان‌های غربی عراق، در ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ m به منطقه مورد



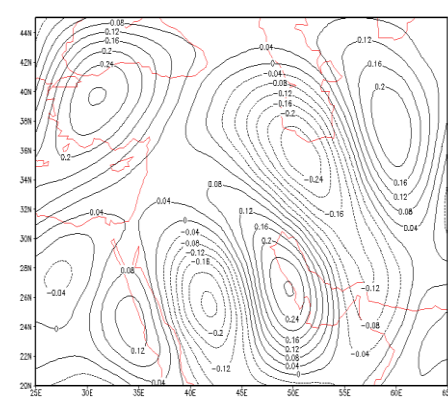
(ب)

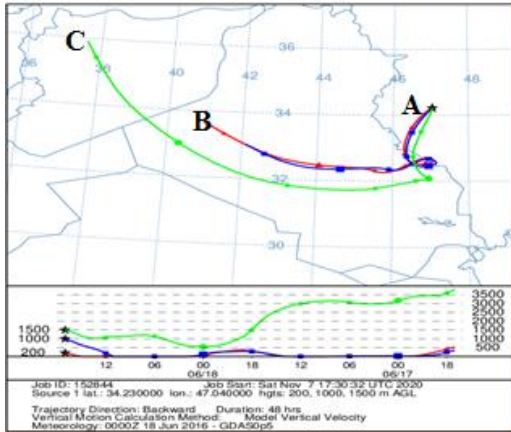


(د)

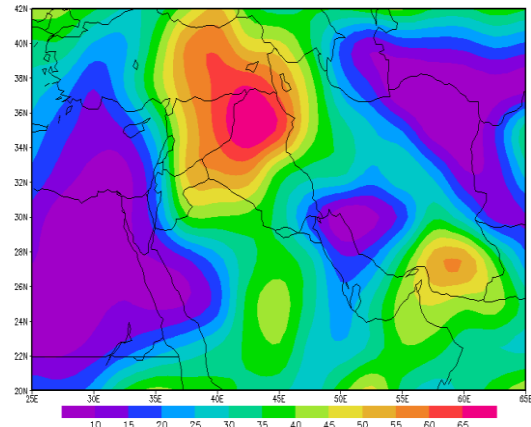


(ج)



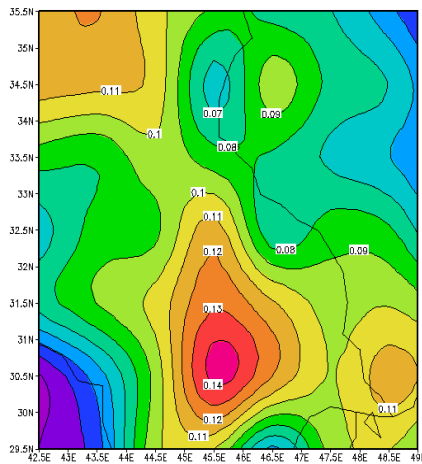


(ه)

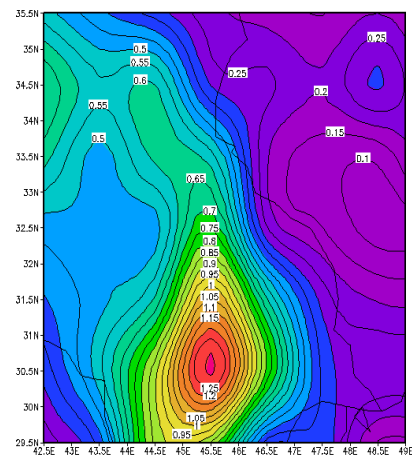


(و)

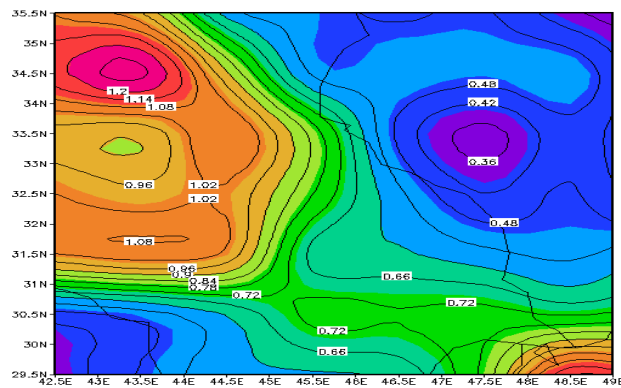
ادامه شکل ۵. الف. ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ hpa؛ ب. فشار سطح دریا؛ ج. امگای تراز ۷۰۰ hpa؛ د. جریان باد تراز ۳۰۰ hpa؛ و. رطوبت ویژه تراز ۷۰۰ hpa؛ ه. نقشه ردیابی ذرات گردوغبار HYSPLIT روز ۲۹ خرداد ۱۳۹۵



(ب)



(الف)



(ج)

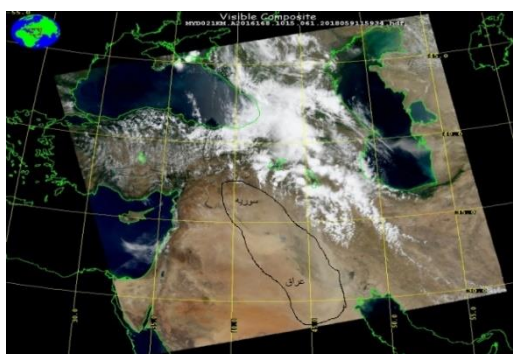
شکل ۶. عمق آبتیکی آئروسول AOD طی روزهای الف. ۲۷ خرداد ب. ۲۸ خرداد ج. ۲۹ خرداد

(شکل ۷، ب) و (شکل ۷، ج) گردوغبار به طور کامل وارد ایران شده است، توده‌ی گردوغباری که در سوریه و مرکز و غرب عراق، شکل گرفته است؛ همان گونه که در تصاویر مشاهده می‌گردد، در حال وارد شدن به غرب

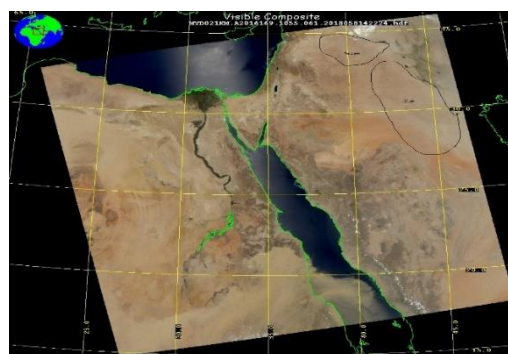
در تصاویر MODIS مربوط به روزهای گردوغباری مشاهده می‌شود که در روزهای ۲۷ خرداد ۱۳۹۵ (شکل ۷، الف) توده‌ی گردوغباری در سوریه و عراق شکل گرفته و به طرف غرب ایران در جریان است. اما در روز ۲۸ خرداد

chem نشان داد که در (شکل ۷، و) ۲۸ خرداد ۱۳۹۵ غلظت گردوغبار به بیش از $2300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ رسیده است که می‌تواند به دلیل جریان بادهای غربی باشد. اما در تاریخ ۲۹ خرداد (شکل ۷، ه) غلظت گردوغبار به کمتر از $2300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ رسیده و به تدریج از منطقه کرمانشاه خارج می‌شود. توزیع مکانی گردوغبار تفسیر شده توسط تصاویر سنجنده MODIS با توزیع مکانی غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-chem انطباق دارد.

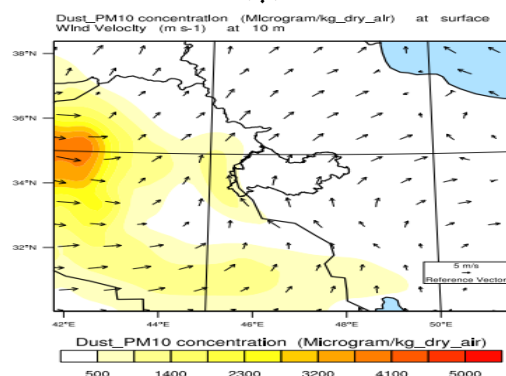
ایران می‌باشد. به‌طور مثال در پژوهشی منشأ رخداد پدیده گردوغبار مربوط به ۲۹ خرداد ۱۳۹۱ که در نواحی غرب و جنوب غرب ایران رخ داده بود، به کمک تصاویر ماهواره‌ای و با استفاده از باندهای مرئی و باندهای حرارتی سنجنده مودیس و با به‌کارگیری شاخص آکرمن شناسایی شد، معلوم شد منشأ اصلی آن محل رودخانه‌های دجله و فرات بوده که در محدوده شمال و شمال شرق عراق و غرب سوریه می‌باشد (۹). شبیه‌سازی توزیع غلظت گردوغبار توسط مدل WRF-



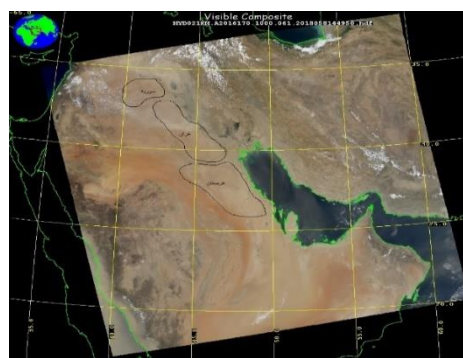
(ب)



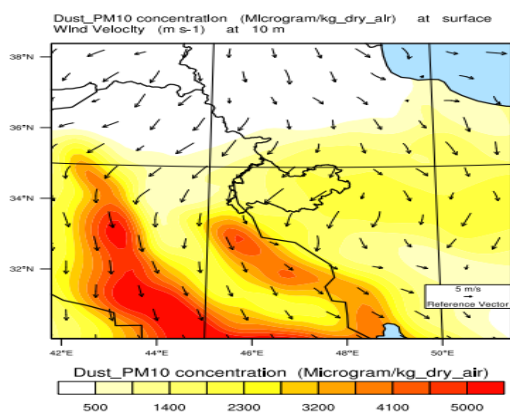
(الف)



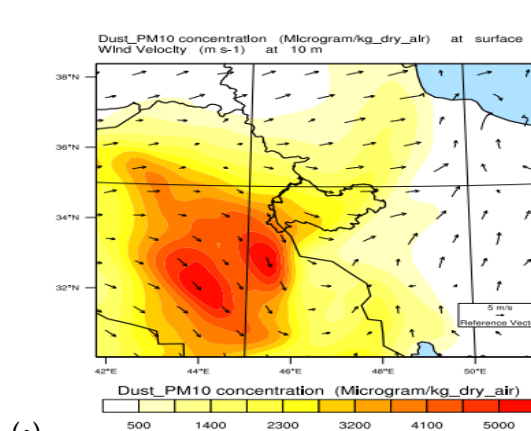
(د)



(ج)



(ه)



(و)

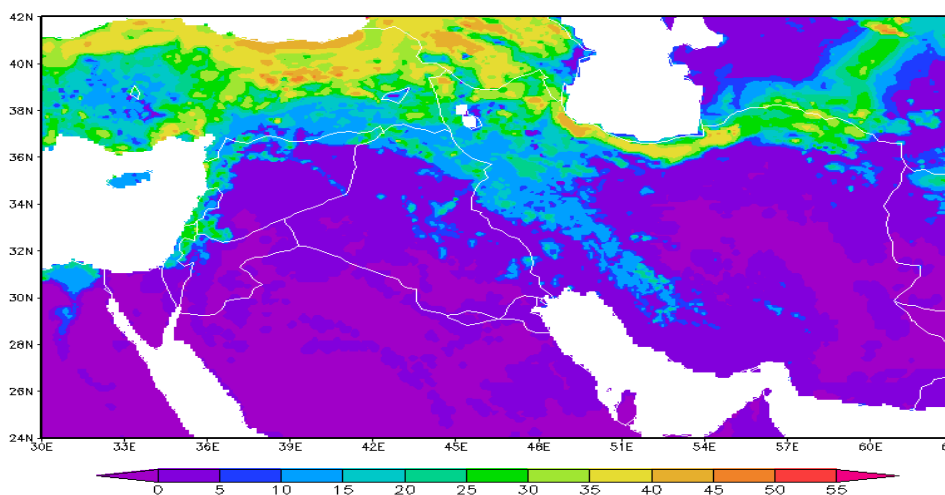
شکل ۷. الف. تصویر ماهواره ای MODIS ۱۳۹۵/۳/۲۷ ب. تصویر مادیس ۱۳۹۵/۳/۲۸ ج. تصویر مادیس ۱۳۹۵/۳/۲۹: پیش‌بینی توزیع غلظت گردوغبار توسط مدل WRF-chem د. نقشه ۱۳۹۵/۳/۲۷ و. نقشه ۱۳۹۵/۳/۲۸ ه. نقشه ۱۳۹۵/۳/۲۹

همگرایی جریان‌های به سمت غرب شده‌اند. استقرار یک بریده کم‌فشار در سطوح میانی جو در این رخداد به خوبی نمایان است به طوری که با وجود ناپایداری در تراز میانی جو، عدم وجود رطوبت کافی در سامانه‌های منتقل شده به غرب کشور، عبور جریان‌های از بیابان‌های عراق و سوریه عدم رطوبت کافی چه در سطح و چه در عمق خاک در داخل کشور و در کشورهای همسایه موجب شکل‌گیری چشمه گردوغبار و انتقال آن به منطقه مورد مطالعه شد. همچنین بررسی نقشه‌های ردیابی حاصل از HYSPLIT نشان داد که دو مسیر کلی برای انتقال گردوغبار به منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص است. ۱- مسیر شمال‌غرب-جنوب‌شرقی که با عبور از روی هسته‌های گردوغبار شکل گرفته در بیابان‌های عراق و سوریه عمل انتقال گردوغبار به نیمه غربی ایران را انجام می‌دهد؛ این مسیر را می‌توان ورود گردوغبار به منطقه در ۳ ارتفاع ۲۰۰، ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ دانست. ۲- مسیر غربی-شرقی ایران و شهر کرمانشاه که در هر سه ارتفاع ۲۰۰، ۱۰۰۰، و ۱۵۰۰، که سرچشمه اصلی گردوغبار در روز ۲۸ و ۲۹ خرداد می‌باشد، منبع ذرات این مسیر سوریه و بیابان‌های عراق می‌باشد. بررسی مسیر ذرات نشان می‌دهد که این ذرات توسط سامانه‌های کم‌فشار مستقر در منطقه به سطوح بالاتر منتقل شده است. نقشه رطوبت خاک نیز حاکی از کمبود شدید رطوبت تا عمق ۱۰ cm خاک دارد که هم‌زمان با عبور سامانه‌های ناپایدار و جریان‌های غربی از روی مناطق، ذرات زیر خاک به راحتی از زمین جدا شده و به منطقه مورد مطالعه منتقل گردد.

فرسایش بادی یکی از جنبه‌های تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. رطوبت خاک از طریق کنترل سرعت آستانه و نیز فرسایش‌پذیری خاک، بر شدت فرسایش تأثیرگذار است. در مطالعه‌ای نشان داده شد که رطوبت خاک، مهم‌ترین و بارزترین متغیر مؤثر بر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در کانون‌های گردوغباری در استان البرز است. هر چه رطوبت خاک بیشتر شود، ذرات چسبندگی بیش‌تر و مقاومت بیش‌تر می‌شود (۶). در پژوهش حاضر با توجه به نقشه میانگین رطوبت خاک (شکل ۸) از سطح زمین تا عمق ۱۰ cm می‌توان گفت در روزهای همراه با گردوغبار، رطوبت موجود در خاک کانون ذرات گردوغبار کم‌تر از ۵٪ بوده است. به همین دلیل با عبور جریان‌ها از روی این مناطق فاقد رطوبت کافی، ذرات زیر خاک به راحتی از سطح زمین جدا شده و به سمت منطقه مورد بررسی حمل شدند.

نتیجه‌گیری

قرارگیری ایران در منطقه گرم و خشک کره زمین و مجاورت با بیابان‌های جنب حاره مانند عراق، سوریه و عربستان باعث به وجود آمدن مداوم مخاطره گردوغبار در نیمه غربی ایران می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های همدیدی در واقع عامل اصلی ایجاد کننده پدیده موج گردوغبار طی روزهای ۲۷ تا ۲۹ خرداد ۱۳۹۵ در شهر کرمانشاه، علاوه بر ناپایداری ایجاد شده توسط کم‌فشارهای حرارتی سطح زمین، تحرکات پرفشار عربستان که موجب



شکل ۸. میانگین رطوبت خاک (درصد) تا عمق ۱۰ cm (۲۷ تا ۲۹ خرداد ۱۳۹۵)

سامانه حرکت و جابه‌جایی اندکی داشته و تقریباً به صورت یک سامانه دائمی در منطقه بوده است (۱۵). در مقاله‌ای به بررسی تشکیل و منشأ طوفان گردوغبار در منطقه جنوب غرب ایران با استفاده از مدل HYSPLIT پرداختند که نتایج نشان داد هسته‌های گردوغبار در محدوده‌های غرب عراق، شرق سوریه و عربستان در خرداد ۱۳۹۴ بوده است (۲۰). نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های انجام شده هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. هر چند این مطلب بارها در پژوهش‌های گوناگونی به اثبات رسیده، اما چنین وضعیتی نیازمند تلاش برای حل این مشکل به صورت فرامنطقه‌ای است، نه اینکه لزوماً تنها در سطح ایران و شهر کرمانشاه بر آن تأکید شود. گستردگی بیابان‌های وسیع خاستگاه گردوغبار، بیابان‌زایی رو به رشد، خشکسالی‌های پی‌درپی و نقش عوامل انسانی در مدیریت نابخردانه سرزمین، رویدادهای گردوغباری در غرب ایران را به چالش محیط زیستی کنترل ناپذیر تبدیل کرده است.

در پژوهش حاضر به روشنی مشخص شد که بهره‌گیری از مدل WRF-chem فن مناسبی برای شبیه‌سازی طوفان گردوغبار است و از نظر مقیاس و تغییرات زمانی، برآوردی منطقی از گردوغبار در محدوده مطالعاتی به دست می‌دهد. با شبیه‌سازی طوفان‌های گردوغبار حاصل از بادهای غربی توسط مدل WRF-chem نشان داد که منبع اصلی گردوغبار نواحی واقع در بیابان‌های غربی و مرکزی عراق، سوریه و شمال عربستان قرار دارد. طی پژوهشی با استفاده از مدل WRF-chem به برآورد غلظت ذرات PM_{10} در منطقه ایران پرداخته شد، که نتایج حاصل از شبیه‌سازی ذرات PM_{10} ، منطقه بین‌النهرین در نزدیکی جنوب غرب ایران را به عنوان چشمه اصلی معرفی کردند (۱۷). در مطالعه‌ای دیگر به ردیابی منابع گردوغبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT پرداخته شد نتایج کار نشان داد که یکی از سامانه‌های فشار مؤثر در وقوع گردوغبار و تعیین مسیر آنها پرفشار مستقر بر روی عربستان است که در تمام روزها گردوغبار مورد مطالعه این

■ References

1. Ackermann, I.J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F.S., & Shankar, U. (1998). Modal aerosol dynamics model for Europe: development and first applications. *Atmospheric Environment*, 32(17), 2981–2999.
2. Ashrafi, Kh., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemann, A., & Ghadri, S. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Environmental Health Science & Engineering*, 12, 3-12.
3. Behyar, M.B. (2015). Zoning risk degree of climatic phenomena and dust storms in roads network of the country using satellite data. *Geographical Research Quarterly*, 30(2), 103-112.
4. Bian, H., Tie, X., Cao, J., Ying, Z., Han, S., & Xue, Y. (2011). Analysis of a severe dust storm event over China: application of the WRF-Dust model, *Aerosol and Air Quality Research*, 11(4), 419_428.
5. Binkowski, F., & Shankar, U. (1995). the regional particulate matter model. 1. model description and preliminary results. *Geophysical Research Atmospheres*, 100(D12), 26191–26209.
6. Dagsson-Waldhauserova, P., Osp Magnusdottir, A., Olafsson, H., & Arnalds, O. (2016). The spatial variation of dust particulate matter concentrations during two Lcelandic dust storms in 2015. *Atmosphere*, 7(6), 77.
7. Draxler, R.R. and Hess, G, D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modelling system of trajectories, dispersio, and deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 47, 295- 308.
8. Engelstadler, S. (2001). Dust storm frequencies and their relationships to land surface conditions. Freidrich Schiller University Press, Jena. Germany.

9. Fallah -Zazuli, M., Vafaeinezhad, A. R., Kheirkhah- Zarkesh, M. M., & Ahmadi Dehka, F. (2014). Source routing of dust haze phenomenon in the west and southwest of Iran and its synoptic analysis by using remote sensing and GIS, *RS and GIS for Natural Resources*, 5(4), 61-77. (in Farsi)
10. Goudie, A.S., & Middleton, N.J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences, *Earth-Science Reviews*, 56(1-4), 179-204.
11. Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., & Eder, B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*. 39(37), 6957-6975.
12. Heidari-Farsani, M., Shirmardi, M., Alavi, N., Maleki, H., Sorooshian, A., Babaei, A.A., Asgharnia, H., Bagherian -Marzouni, M., & Goudarzi, Gh.R. (2018). Evaluation of the relationship between PM₁₀ concentrations and heavy metals during normal and dusty days in Ahvaz, Iran, *Aeolin Research*, 33, 12-22.
13. Hejazizadeh, Z., Toulabi-Nejad, M., Zarei-Chaghabalaki, Z., Amraeei, B. (2019). Monitoring of dust storm in the midwest of Iran case study: dust storm June 16-19, 2015. *Spatial Analysis Environmental Hazards*. 5(4), 107-124. (in Farsi)
14. Khorshiddoust, A.M., Mohamadi, Gh.H., Hosseini-Sadr, A., Javan, Kh., & Jamali, A. (2014). Synoptic analysis of effective factors on dust frequency in west of Iran. *Geography and Planning*, 17(46), 47-66. (in Farsi)
15. Mohammadi, Gh.H. (2016). Analysis of atmospheric mechanisms in dust transport over west of Iran. Ph.D. Thesis, University of Tabriz. PP: 170. (in Farsi)
16. Namdari, S., Karimi, N., Sorooshian, A., Mohammadi, Gh.H., & Sehatkashani, S. (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East, *Atmospheric environment*, 173, 265-276.
17. Nikfal, A.H. (2014). *Simulation of the density of PM10 particulates by the coupled WRF-Chem modeling system over the region of Iran*. Proceedings of the 16th Iranian Geophysical Conference, 77-81. (in Farsi)
18. Sari-Sarraf, B., Rasouli, A.A., Mohammadi, GH.H., & Hoseini-Sadr, A. (2016). Long- term trends of seasonal dusty day characteristic- West Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 9(10), 1-10.
19. Shao, Y., & Dong C.H. (2006). A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring. *Global and Planetary Change*, 52(1- 4), 1-22.
20. Tanaka, T.Y., Chiba. M. (2006). A numerical study of the contribution of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 88-104.