

Numerical Simulation of Kermanshah Severe Dust Storm (Case Study: Dust Storm on November 26 - 28, 2018)

T. Alizadeh^{1*}, A.H. Nikfal², M. Rezaei Banafsheh³, R. Sharifi⁴

1. PhD Student in Meteorology, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. PhD student in meteorology, Atmospheric Science and Meteorology Research Center, Tehran, Iran.
3. Professor of Meteorology, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4. Master of Meteorology, Department of Meteorology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Corresponding Author: mrbanafsheh@tabrizu.ac.ir

Received date: 22/09/2021

Accepted date: 26/11/2021

 [10.22034/JDMAL.2021.539412.1353](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.539412.1353)

Abstract

Iran's location in the drylands belt has increased the frequency of dust storms in western parts of Iran, particularly the city of Kermanshah and negative environmental impacts. Arid lands, as one of the main sources of suspended dust in the atmosphere, face problems such as sandstorms, high levels of dust particles and reduced visibility, which are major climate problems in the country, especially in the border provinces. The purpose of the present study is to investigate the performance of a numerical model between the meteorological-chemical atmosphere scale called WRF-Chem model in the simulation of the concentration of suspended particles in Kermanshah region. By comparing the spatial distribution and concentration of suspended particles, meteorological parameters simulated by the model, and the available observational values for PM₁₀ particles in Kermanshah, the efficiency of the WRF-Chem model was evaluated. The results of the simulation of PM₁₀ particles for the studied days showed that the central and western deserts of Iraq, Syrian desert, Kuwait and northern Saudi Arabia are the main source of dust storm. Due to the logical correlation between dust particle emissions and temperature and relative humidity parameters, accurate estimation of these parameters is very effective in PM₁₀ particle simulation accuracy. Based on the analysis of the PM₁₀ variables, temperature and relative humidity and the plotted graphs and their comparisons, a favorable agreement was achieved between the simulated and measured values for PM₁₀, temperature and relative humidity.

Keywords: Dust particles; Schema; Temperature; relative humidity; Particle concentration





شبیه‌سازی عددی توفان گردوغبار شدید کرمانشاه (مطالعه موردی: رخداد ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷)

طوبی علیزاده^{۱*}، امیرحسین نیک‌فال^۲، مجید رضایی بنفشه^۳، رحمن شریفی^۴

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
 ۲. دانش آموخته دکتری هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.
 ۳. استاد آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
 ۴. کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- * نویسنده مسئول: mrbanafsheh@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۵

doi: [10.22034/JDMAL.2021.539412.1353](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.539412.1353)

چکیده

قرار گرفتن ایران در نواحی بیابانی موجب افزایش رخداد توفان‌های گردوغبار در نواحی غربی ایران به‌ویژه شهر کرمانشاه و تأثیر نامطلوب محیط‌زیستی شده‌است. از آن جایی که یکی از چشمه‌های اصلی در گسیل ذرات معلق به جو، سطوح بیابانی است، مسائلی از قبیل توفان ماسه، غلظت زیاد ذرات گردوغبار و کاهش دید از مشکلات عمده اقلیمی در کشور است. هدف این پژوهش، بررسی عملکرد مدل عددی میان مقیاس هواشناسی- شیمی جو به نام مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی غلظت گردوغبار شهر کرمانشاه است. با مقایسه غلظت گردوغبار و توزیع مکانی متغیرهای هواشناسی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقدارهای مشاهداتی ذرات PM₁₀ در کرمانشاه، کارایی مدل WRF-chem ارزیابی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ذرات PM₁₀ برای روزهای مورد بررسی، بیابان‌های مرکزی و غربی عراق، بیابان‌های سوریه، کویت و شمال عربستان را به عنوان منبع اصلی برداشت ذرات گردوغبار نمایش داد. به دلیل همبستگی منطقی گسیل ذرات گردوغبار با متغیرهای دما و رطوبت‌نسبی، برآورد مناسب آنها، در میزان دقت شبیه‌سازی ذرات PM₁₀ بسیار مؤثر است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته برای متغیرهای PM₁₀، دما و رطوبت‌نسبی و نمودارهای ترسیم شده و مقایسه‌های انجام شده، توافقی مطلوب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده PM₁₀، دما و رطوبت‌نسبی را نشان داد.

واژگان کلیدی: گردوغبار؛ طرحواره؛ دما؛ رطوبت نسبی، ذرات معلق



■ مقدمه

ذرات معلق موجود در جو که دارای منشأ طبیعی و انسانی می‌باشند، اثرات زیادی بر آب و هوا، تابش حرارتی خورشید، محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها می‌گذارند (۱۴). سرچشمه طبیعی گردوغبارها، ذرات نمک برخاسته از اقیانوس‌ها و ذرات بسیار ریز حمل شده توسط باد از نواحی بیابانی و ذرات جامد ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی است (۲۷). یکی از دلایل اصلی انتشار ذرات گردوغبار با قطر آئرودینامیک کم‌تر از $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) در جو نواحی بیابانی جهان (از جمله ایران)، وقوع توفان‌های گردوغبار است که نسبت به گذشته شدت آن افزایش یافته و بازتاب‌های محیط‌زیستی نامطلوبی به همراه داشته است (۲۲). مهم‌ترین رخدادهای منفی برآمده از افزایش تراکم ذرات گردوغبار، به خطر افتادن سلامت انسان‌ها در این نواحی است که در مطالعات مختلف به تأیید رسیده است (۱۳، ۱۶). میزان غلظت ذرات معلق در جو نواحی مختلف جغرافیایی و از جمله در هوای نواحی شهری به علل مختلف آب و هوایی، محیطی و زمینی وابسته است که از بین این عوامل، عامل آب و هوایی نقش تأثیرگذارتری بر تغییر تراکم ریزگردها دارند (۳۶). از این رو، شناسایی عوامل آب و هوایی تأثیرگذار بر تغییر تراکم گردوغبارها گامی مؤثر برای کاهش پیامدهای نامطلوب برآمده از آن‌ها به شمار می‌رود (۷).

به‌دلیل ویژگی‌های خاص آب و هوایی و زمین‌شناسی، کشور ایران زیر تأثیر مشکلاتی از قبیل توفان گردوغبار و تراکم بالای گردوغبار قرار دارد. نواحی خاورمیانه، شمال آفریقا و آسیای میانه به دلیل وجود بیابان‌های بزرگی مانند بیابان‌های شبه‌جزیره عربستان، نواحی بین رودخانه دجله و فرات، مناطق خشک مرکزی ایران و منطقه سیستان و بلوچستان و بیابان قره‌قوم در ترکمنستان، پتانسیل زیادی برای فرایند فرسایش بادی و وقوع توفان‌های گردوغبار دارد (۳۴). پدیده توفان‌های 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 توفان‌های 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 (۱۹). با توجه به پیامدهای زیاد این پدیده، طی دهه‌های اخیر مطالعه این پدیده از جنبه‌های مختلف آماری (۲۳، ۳)، همدیدی (۲۶، ۴۰، ۴)، شبیه‌سازی (۳۴، ۲۹، ۱۷، ۳۰) در مناطق مختلف کشور مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. برای نمونه در پژوهشی به پایش زمانی و مکانی پدیده گردوغبار با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در جنوب شرق ایران، با تأکید بر منطقه جازموریان پرداخته شد. که چند نقطه در جنوب شرق ایران به عنوان مرکز ایجاد ریزگردها؛ شامل: زابل، نواحی در پاکستان نزدیک ایران، سواحل مکران و منطقه جازموریان شناسایی شد (۶). در مطالعه‌ای دیگر به ردیابی و شبیه‌سازی عددی توفان گردوغبار در شهر کرمانشاه پرداختند. نتایج بررسی نقشه‌های ردیابی HYSPLIT نشان داد که بیابان‌های مرکزی و غربی عراق و صحرای سوریه، کانون‌های اصلی گردوغبار برای منطقه مورد مطالعه هستند (۲). در مقاله‌ای به بررسی تشکیل و انتشار توفان گردوغبار با استفاده از نرم افزار HYSPLIT و تصاویر ماهواره‌ای مودیس در شهر اهواز پرداختند، نتایج تحقیق نشان داد که جریان‌های باد شمال با جهت شمال غرب-غرب و جنوب غرب سبب جابجایی حجم انبوه گردوغبار از بیابان‌های کویت، عراق، سوریه و عربستان به سمت جنوب غرب ایران و شهر اهواز شده است (۲۰).

توفان‌های گردوغبار بزرگ ایران اغلب دارای ابعاد منطقه‌ای هستند. به همین دلیل برای بررسی این رخدادهای لازم است از ابزارها و روش‌هایی که توانایی مطالعه بعدهای مختلف این رخداد را در ابعاد منطقه‌ای دارند به کار گرفته شود. امروزه شبیه‌سازی عددی نسبت به رویدادهای گردوغبار به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین ابزارهای افزایش آگاه‌شناخته می‌شود و در بسیاری از پژوهشگاه‌ها و ارگان‌های اجرایی مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته و می‌توان برای پیش‌بینی زمان، شدت و در مقیاس‌های متفاوت رخدادهای گردوغبار مورد استفاده قرار گیرد. چرخه گردوغبار شامل ۳ بخش، انتشار گردوغبار، انتقال گردوغبار و فرونشست گردوغبار است که می‌توان آن را از

صورت گرفته می‌تواند تا حد زیادی به توسعه مطالعه و دستیابی به نتایج جدید کمک کند. در ادامه تعدادی از منابع داخلی و خارجی در مورد موضوع پژوهش، مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهشی به شبیه‌سازی عددی توفان گردوغبار شرق ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل WRF-chem از لحاظ بعد زمانی، تا حدی ارزیابی درست از گردوغبار در منطقه مورد مطالعه به دست می‌دهد. همچنین اجرای مدل با قدرت تفکیک ۱۰ و ۳۰ Km بیانگر این واقعیت است که شکل‌گیری توفان‌های گردوغبار نواحی سیستان به شدت از ویژگی‌های جغرافیایی محلی، به‌ویژه توپوگرافی متأثر است (۲۰). بررسی قابلیت‌های مدل عددی WRF-Chem در برآورد غلظت گردوغبار نشان داد که خروجی مدل WRF-Chem می‌تواند غلظت PM₁₀ و باد سطحی روز ۱۲ خرداد ۱۳۹۳ را نشان دهد. در ساعت ۱۲ توده کوچکی در شمال غربی استان تهران مشاهده شده که به تدریج با گذشت زمان، مقدار غلظت ذرات افزایش یافته و وزش بادهای غربی و شمال غربی سبب ورود گردوخاک به داخل شهر تهران شده تا جایی که در ساعت ۱۵ کلانشهر تهران را با غلظتی زیاد در بر گرفت. نکته قابل توجه این بود که اگر چه مدل غلظت زیادی را در مناطق غرب کشور نشان داد، که منشأ آن نواحی شرقی و شمال شرقی کشور عراق بوده، چشمه گسیل توفان گردوخاک شهر تهران را کاملاً داخلی و مستقل از آن به دست آورده است (۲۹). در مقاله‌ای دیگر، توفان گردوغبار در چین با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی WRF-Chem مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت، از مقایسه خروجی مدل WRF Chem با تصاویر سنجنده MODIS به این نتیجه رسیدند که قسمت عمده تولید گردوغبار در چین به دلیل بادهای شدید سطحی در بیابان گبی است و کم‌ترین مقدار گردوغبار مربوط به بیابان تکله مکان است (۹). در مقاله‌ای به مدل‌سازی توزیع سه بعدی آئروسول‌های^۸ گردوغبار در حوضه تاریم^۹ در شمال غرب چین پرداخته شد. به این نتیجه دست یافتند که توزیع سه

طریق مدل‌های مختلف شبیه‌سازی نمود (۳۸). از آنجا که توفان گردوغبار، پدیده‌های جوی هستند، می‌توانند با بهره‌گیری از الگوهای مختلف جوی در ابعاد جهانی، منطقه‌ای و محلی شبیه‌سازی و پیش‌بینی شوند (۳۷). در میان مدل‌ها و روش‌های شبیه‌سازی گردوغبار، مدل WRF می‌باشد. مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا WRF سامانه عددی شبیه‌سازی جوی است. مدل WRF^۱ علاوه بر توسعه نسل قبلی مدل‌های میان‌مقیاس^۲ پیش‌بینی وضع هوا و سیستم‌های 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 برای پژوهش‌ها و شبیه‌سازی‌های جوی و اقیانوسی توسط این مدل ایجاد کرده است. استفاده از این مدل، بخش وسیعی از پژوهش‌های علمی از شبیه‌سازی حالات ایده‌آل تا پیش‌بینی‌های کاربردی را در برمی‌گیرد. فواصل بین نقاط شبکه در مدل WRF قابلیت تغییر از یک تا چند ده کیلومتر دارد (۱۵). تا این اواخر روندهای شیمیایی در الگوهای مدل‌سازی کیفیت هوا از نمونه‌های هواشناسی به صورت مستقل به کار می‌رفت. در مدل WRF-Chem^۳، انتقالات ذرات شیمیایی گردوغبار به شکل بر خط^۴ ارزیابی می‌شود. از فرایندهای شیمیایی مورد استفاده در مدل WRF (WRFV3)، ۳۹ مورد از ترکیبات شیمیایی به طور کامل مناسب پیش‌بینی و ارزیابی می‌باشند. یکی از ماژول‌های مرتبط به شیمی جو که در این تحقیق به کار گرفته شد بر پایه الگوی پویای گردوغبارها برای اروپا MADE^۵ است (۱)، که این مدل نیز توسط تغییرات و پیشرفت الگوی منطقه‌ای (۸) برنامه ریزی شده است. ذرات معلق آلی ثانویه SOA^۶ به وسیله مدلی به نام SORGAM^۷ وارد طرح MADE شده است. طرحواره پیشرفته MADE-SORGAM به عنوان طرحواره گسیل گردوغبار جوی استفاده می‌شود. درباره هر موضوع و در پژوهش‌های مختلف وجود پیشینه‌ای از مطلب و اطلاع از تحلیل‌های

6 Secondary Organic Aerosols

7 Secondary Organic Aerosol Model

8 Aerosols

9 Tarim

1 Weather Research & Forecasting

2 Mesoscale

3 WRF-Chemical

4 Online

5 Modal Aerosol Dynamics Model for Europe

شبیه‌سازی غلظت PM_{10} در شهر کرمانشاه است. به عبارت دیگر، با مقایسه توزیع مکانی و تراکم گردوغبار و متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیرهای مشاهداتی در دسترس برای ذرات معلق PM_{10} و متغیرهای هواشناسی در منطقه کرمانشاه، کارایی مدل WRF-Chem مورد بررسی قرار گرفت.

■ مواد و روش

منطقه مورد بررسی

شهر کرمانشاه در غرب ایران به دلیل مجاورت به نواحی خشک کشورهای همسایه در معرض توفان‌های گردوغباری بسیاری است. با توجه به مسیر حرکت سامانه‌ها و شیوه قرارگیری کم‌فشارها در روزهای مختلف ایام سال، مهمترین مبدأ گردوغباری وارد به این شهر، بیابان‌های مرکزی و غربی عراق، صحرای سوریه، کویت، و بیابان نفود در عربستان است. از نظر موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در بین $25^{\circ} 46'$ تا $47^{\circ} 4'$ طول شرقی و $45^{\circ} 33'$ تا $34^{\circ} 4'$ 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. میانگین بارندگی و دمای سالیانه آن به ترتیب $400-500 \text{ mm}$ و 16°C است. سمت وزش بادهای غالب در این شهر در طول سال غربی بوده، که همراه با نوسان‌های در جهت شمال‌غرب و جنوب غربی است (شکل ۱).

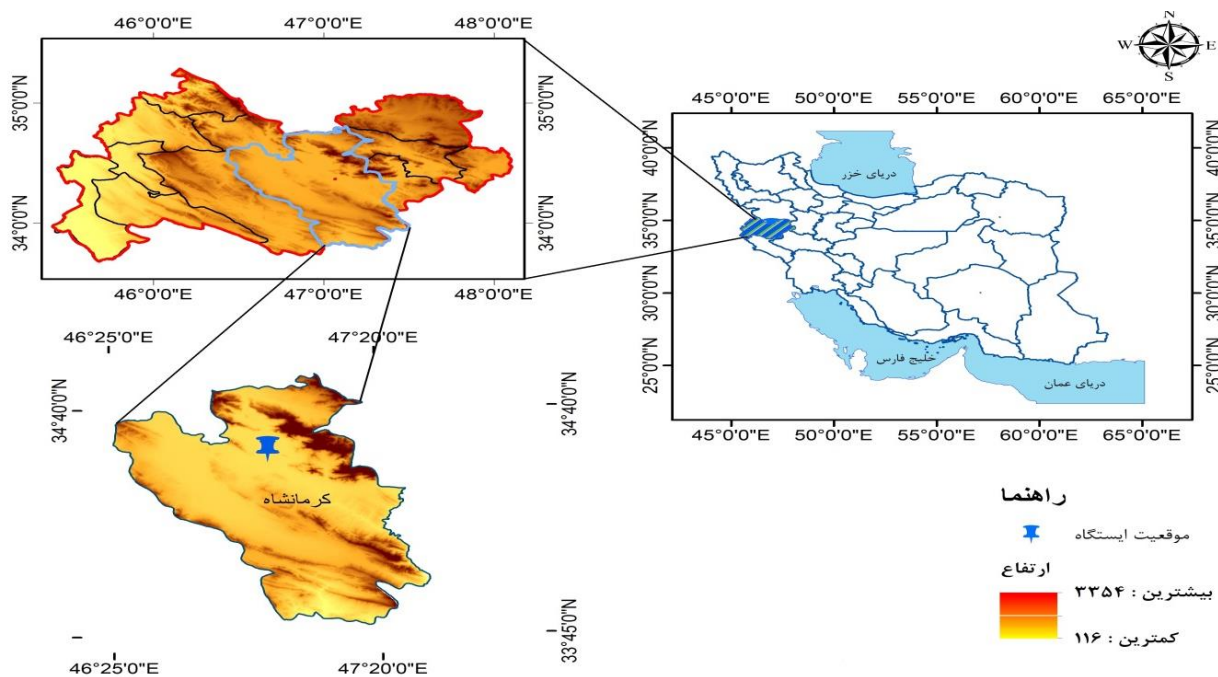
روش پژوهش

در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد مدل عددی میان‌مقیاس هواشناسی- شیمی جو به نام مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی غلظت ذرات PM_{10} در شهر کرمانشاه پرداخته شد. از آنجایی که شبیه‌سازی غلظت ذرات گردوغبار، بخشی از فرایند پیچیده سنجش کیفی وضعیت هوا است که در برگیرنده متغیرهای هواشناسی مانند

بعدی آئروسول‌های گردوغبار در لایه مرزی فوقانی در ارتفاع $3-5 \text{ km}$ با همگرایی جریان‌های هوای نزدیک سطح بر روی حوضه تاریم به دلیل وجود فلات‌ها و کوه‌های اطراف حوضه تاریم با ایجاد لایه گردوغبار شناور بر روی این حوضه، بیشتر از لایه‌های دیگر است (۲۴). در تحقیقی به شبیه‌سازی فعل و انفعالات شیمی آئروسول‌های هوا با مدل MOSAIC^۱ و پیش‌بینی ذرات گردوغبار با مدل WRF-Chem به وسیله سیستم درون‌یابی آماری Gridpoint و همچنین اندازه‌گیری نوری آئروسول^۲ AOD، گردوغبار در منطقه کاشی^۳، نزدیک صحرای تکله‌مکان^۴، شمال‌غربی چین پرداختند. بهترین نتیجه کلی از جذب چندگانه غلظت ذرات سطحی و AOD بدست آمد. جذب به طور قابل توجه بخش‌های شیمیایی آئروسول را تغییر نمی‌دهد. بعد از شبیه‌سازی DA^5 ، نیروی تابشی آئروسول در منطقه کاشی $10/4 \text{ w/m}^2$ در بالای جو بوده، که 55% بیشتر از ارزش نیروی تابشی قبل از شبیه‌سازی با DA بوده است (۱۰). گسیل ذرات گردوغبار از سطح زمین در ارتباط مستقیم با طبقه‌بندی جنس خاک، مقدار فرسایش‌پذیری، پوشش گیاهی و شرایط هواشناسی و زمین‌شناسی، به ویژه باد و رطوبت خاک است. ویژگی‌های زمین‌شناسی حوضه شبیه‌سازی به ویژه پارامتر فرسایش‌پذیری، توسط مدل WRF-Chem طی فرآیند پیش‌پردازش آماده شده و در فرآیند شبیه‌سازی غلظت هواویزهای سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابلیت سامانه جفت شده WRF-Chem در مدل‌سازی کیفیت هوا به صورت برخط با فرآیندهای هواشناسی، به ویژه در شبیه‌سازی گردوغبار شایان توجه است. از آنجایی که گسیل ذرات گردوغبار به جو در مقایسه با مقدار گسیل آلاینده‌های گازی انسان‌زاد که مستقل از شرایط هواشناسی است، کاملاً در ارتباط مستقیم با پارامترهای هواشناسی و زمین‌شناسی است، قابلیت شبیه‌سازی برخط فرآیندهای هواشناسی و کیفیت هوا از امتیازات مدل عددی جفت شده WRF-Chem است (۲۹). هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد مدل عددی میان‌مقیاس هواشناسی- شیمی جو مدل WRF-Chem در

4 Taklimakan
5 Data assimilation

1 Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry
2 Aerosol Optical Depth
3 Kashi



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر کرمانشاه در استان

فرایندهای فیزیکی شامل فرایندهای مربوط به لایه مرزی سیاره‌ای، همرفت، میکروفیزیک ابر، تابش و برهم‌کنش‌های سطح و جو پارامترسازی می‌شوند. بخش فیزیک مدل به واسطه فصل مشترک فیزیکی با هسته دینامیکی در ارتباط است. بخش شیمی جو نیز در این مدل به فرایندهای شیمیایی مربوط به گازهای جوی و ذرات هواویز موجود در جو اختصاص دارد (۳۹).

مدل WRF-Chem حاصل کارگروهی مجموعه‌ای از معتبرترین مراکز پژوهشی علوم جو شامل NCAR^۳، NOAA، GFS، NCEP، FSL، AFWA، FAA و ECMWF است (۱۸). این مدل برای بررسی کیفیت هوا در مقیاس منطقه‌ای و همچنین تجزیه و تحلیل فعل و انفعالات بین ابر و ترکیبات شیمیایی جو است. این مدل توسط دو مرکز NOAA/ESRL و DOC/PNLL در ایالات متحده طراحی و توسعه یافته است.

در مدل WRF-CHEM، مدل‌های هواویز متعددی برای پارامترسازی گونه‌های مختلف هواویز و گازهای آلاینده جو وجود دارد که در جدول ۱ به چند طرحواره اشاره می‌شود.

تشکیل ابر، بارندگی و فرایندهای شیمیایی مانند گسیل ذرات هواویز به جو، نشست ذرات، انتقال ذرات می‌باشد، بنابراین از مدلی توانمند استفاده شد که در تحلیل این گونه شبیه‌سازی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از مدل WRF-Chem به عنوان قسمتی از مدل WRF است که کاربرد اصلی آن در بررسی شیمی جو متأثر از ساختارهای طبیعی، فعالیت‌های انسانی، آلاینده‌ها و گردوغبار در اندازه‌های متفاوت، روش انتشار و نهشت آنها می‌توان بکار برد. ساختار نرم‌افزاری مدل WRF شامل هسته‌های پویا، بخش فیزیکی، بخش شیمی و برنامه‌هایی به منظور تعیین مقادیر مرزی در شبیه‌سازی‌ها و گوارد داده‌ها است. در حال حاضر دو هسته پویای متفاوت که عبارتند از هسته تحقیقاتی پیشرفته ARW^۱ (باعنوان هسته پویای مختصات جرمی اویلری) و هسته پویای مدل میان‌مقیاس غیر هیدرواستاتیک NMM^۲ در مدل WRF وجود دارد. هسته ARW توسط سازمان NCAR و هسته NMM توسط سازمان NCEP تهیه شده است (۳۹). علاوه بر هسته پویای فرایندهای فیزیکی و شیمی فاز گازی و ذرات هواویز نیز به طور جداگانه در دو ماژول فیزیک و شیمی در مدل WRF در نظر گرفته می‌شوند. در بخش فیزیک مدل، کلیه

³ <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>

¹ Advanced Research WRF

² Nonhydrostatic Mesoscale Model

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} d_p^k n(\ln d_p) d(\ln d_p) \quad (3)$$

با جایگذاری k در رابطه بالا به شاخص‌های مختلفی می‌توان دست یافت. M_0 تعداد کل ذرات جامد معلق در حجم واحد از هوا را نشان می‌دهد. M_2 سطح کل ذرات معلق در حجم واحد هوا را نشان می‌دهد. و در پایان M_3 بیانگر حجم کل ذرات ریزگرد معلق در حجم واحد از هوا است (۱۹).

حوزه شبیه‌سازی، شبکه‌ای از نقاط به تعداد 146×171 گره با تفکیک مکانی 10 Km شامل بخش‌هایی از خاورمیانه می‌باشد که تقریباً کل مساحت ایران را پوشش داد، به صورتی که منطقه غربی ایران و شهر کرمانشاه در مرکز آن قرار گرفت (شکل ۲).

به منظور انجام پژوهش حاضر در ابتدا با تهیه داده‌های هواشناسی و استخراج کدهای ۰۶ از گزارش‌های همدیدی از سازمان هواشناسی کل کشور، توفان‌های گردوغبار و تاریخ وقوع آنها شناسایی شد همچنین داده‌های مربوط به مقدار غلظت گردوغبار و ذرات PM_{10} برای تاریخ و منطقه مورد مطالعه برای تطبیق از سازمان حفاظت محیط زیست استان کرمانشاه اخذ شد. توفان گردوغبار تاریخ ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ به علت تداوم زمانی و گستردگی مکانی و غلظت بالای آن در غرب کشور بخصوص شهر کرمانشاه انتخاب شد.

برای مدل‌سازی عددی اندازه ذرات معلق از جدیدترین نسخه الگوی پیش‌بینی عددی WRF-Chem با طرحواره MADE-SORGAM استفاده شد. (۱). این طرحواره بر پایه مدل دینامیک مودال^۱ برای ذرات گردوغبار در اروپا طراحی شده است (۹). این رهیافت نیز به نوبه خود بر پایه مدل منطقه‌ای ذرات معلق طراحی شده است. در طراحی MADE ذرات معلق جوی در سه بخش 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 می‌شوند. پراکنش اندازه ذرات گردوغبار با قطر کوچکتر از $10 \mu\text{m}$ از پراکنش لوگ-نرمال پیروی می‌کند که یکی از مقیاس‌های اصلی در محاسبه طرحواره‌های گردوغبار است:

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

که در آن: N تعداد ذرات بر حسب مترمکعب، dp : قطر ذرات، dp_g : قطر میانه، σ_g : انحراف معیار می‌باشد (۱۹). شاخص‌هایی نیز به شکل رابطه‌های ۲ و ۳ معرفی می‌شوند:

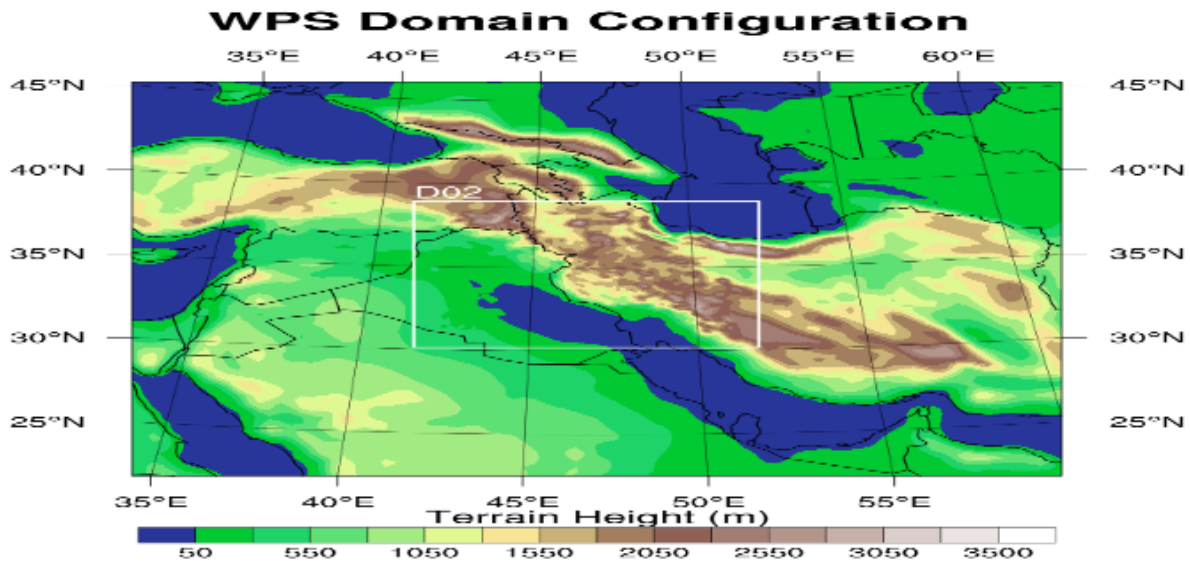
$$M_k = N d_{pg}^k \exp \left[\frac{k^2}{2} (\ln \sigma_g)^2 \right] \quad (2)$$

با حل تحلیلی رابطه ۳:

جدول ۱. برخی طرحواره‌های مهم بخش شیمی جو مدل WRF-Chem (۱۸)

طرحواره	رهیافت
شیمی جو Atmospheric chemistry	RADM2
هواویز Aerosol	MADE/SORGAM
گسیل ذرات معلق Aerosol emission	GOCART
فوتوشیمیایی Photochemical	Madronich photolysis

¹ Modal Aerosol Dynamic Model



شکل ۲. موقعیت حوزه شبیه‌سازی شده

طرحواره MADE/SORGAM انجام شد و نتیجه با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. در حالت دوم، توسط فرآیند پس‌پردازش نقشه‌های غلظت PM_{10} ، دمای میانگین و رطوبت نسبی برای سه روز از ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ توسط برنامه NCL^۵ ترسیم شدند که خطوط قرمز رنگ معرف میانگین دمای روزانه و رطوبت نسبی با خطوط منقطع آبی بر روی نقشه‌ها نمایش داده شد، همچنین مناطقی از حوزه که دارای بیشترین غلظت PM_{10} بودند به عنوان منابع اصلی گسیل ذرات معلق شناسایی شدند. در پایان نمودار پراکنش نقطه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی PM_{10} توسط مدل WRF-Chem و مقادیر مشاهده‌ای که از سازمان محیط زیست استان کرمانشاه اخذ شده بود، ترسیم شد و به این ترتیب با به کارگیری از ضریب تعیین R^2 ، اندازه تغییرات گردوغبار شبیه‌سازی شده تعیین گردید.

نتایج

نتایج خروجی مدل WRF برای غلظت ذرات PM_{10}

شبیه‌سازی غلظت PM_{10} برای دوره زمانی ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ شهر کرمانشاه توسط مدل WRF-Chem انجام گرفت. در این اجرا از طرحواره MADE/SORGAM برای مدل‌سازی گردوغبار استفاده شد. مقایسه‌های انجام شده

همچنین میانگین دمای روزانه و رطوبت نسبی از سازمان هواشناسی کل کشور^۱ برای شهر کرمانشاه جهت مقایسه با خروجی مدل اخذ شد. شبیه‌سازی فضاهای جوی با شرایط اولیه و مرزهای جانبی گرفته شده از داده‌های FNL که از بایگانی مرکز پیش‌بینی محیطی آمریکا NCEP^۲ و مرکز تحقیقات جوی آمریکا NCAR^۳ با گام زمانی ۶ ساعته و تفکیک مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ در ابعاد طول و عرض جغرافیایی به‌دست آمد (۲۹). فرآیند شبیه‌سازی با کمک آخرین نسخه ۳.۶ از مدل WRF-Chem توسط طرحواره پیشرفته MADE-SORGAM به‌عنوان طرحواره گسیل ذرات معلق جوی با استفاده از شبیه‌سازی برخط^۴ با در نظر داشتن پارامترهای هواشناسی، به برآورد غلظت PM_{10} پرداخته شد و خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید.

در پژوهش حاضر با مقایسه غلظت PM_{10} ، دما و رطوبت نسبی مشاهداتی در شهر کرمانشاه با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-Chem، به ارزیابی قابلیت این مدل در شبیه‌سازی پرداخته شد. مقایسه به دو صورت انجام شد. در حالت نخست، شبیه‌سازی غلظت PM_{10} و متغیرهای هواشناسی دما و رطوبت نسبی با گام سه ساعته برای دوره زمانی ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ برای شهر کرمانشاه از

4 Online
5 NCARG Command Language

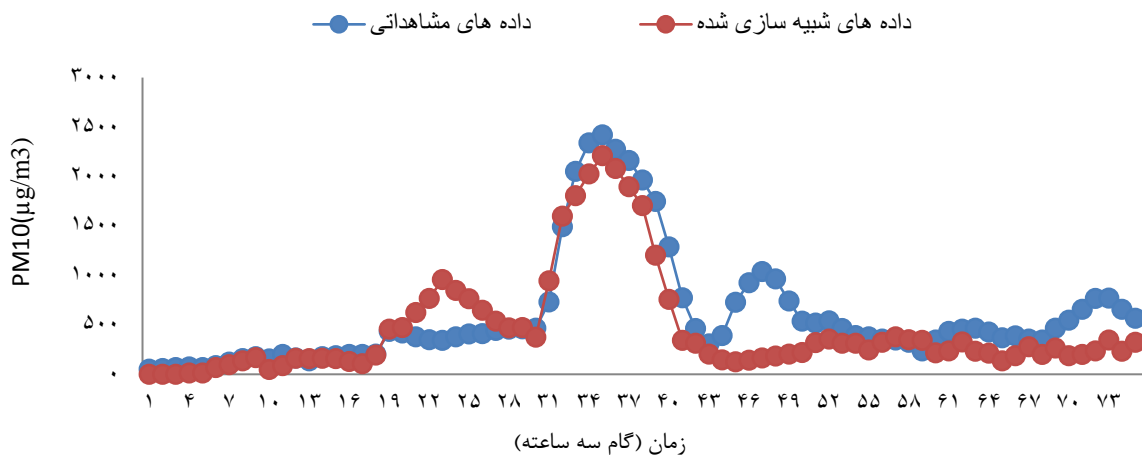
1 www.irimo.ir
2 National Centers for Environmental Prediction
3 http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/

اصلی دخیل بر مقدار گسیل، انتشار و بارگذاری گردوغبار در لایه‌های مختلف جوی هستند. بالا رفتن دما، با اثر بر رطوبت خاک، منبع اصلی گسیل ذرات به جو در ایران و کاهش آن، موجب گسستگی در ذرات خاکدانه‌ها می‌شود که افزایش گسیل ذرات به جو را در پی دارد. متغیر رطوبت نسبی نیز با افزایش رطوبت هوا بین ۲۰ تا ۸۰٪ بر ذرات گردوغبار اثرگذار هستند، ذرات گردوغبار از راه رطوبت‌گیری آب را جذب می‌کنند در نتیجه جذب، قطر و سطح مقطع ذرات گردوغبار افزایش می‌یابد بنابراین با بزرگ شدن ذرات گردوغبار دید افقی کاهش می‌یابد (۲۱). در این قسمت با مقایسه غلظت PM_{10} ، دما و رطوبت نسبی مشاهداتی در شهر کرمانشاه با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF، به ارزیابی قابلیت این مدل در شبیه‌سازی پرداخته شد. مقایسه به دو صورت انجام شده است. در حالت نخست، دمای شبیه‌سازی شده هماهنگ با دمای مشاهداتی با گام ۳ ساعته برای روزهای ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ به صورت نمودار برای شهر کرمانشاه ترسیم شد (شکل ۴). مقایسه بیانگر وجود توافق خوب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است. در ساعت ۱۵ روز ۵ آبان زمان وقوع توفان گردوغبار، دمای اندازه‌گیری شده در سازمان هواشناسی شهر کرمانشاه $25^{\circ}C$ بوده است و دمای شبیه‌سازی شده در این روز $25^{\circ}C$ بدست آمد. می‌توان نتیجه گرفت که مدل WRF-Chem به خوبی دما را برای شهر کرمانشاه شبیه‌سازی کرده است.

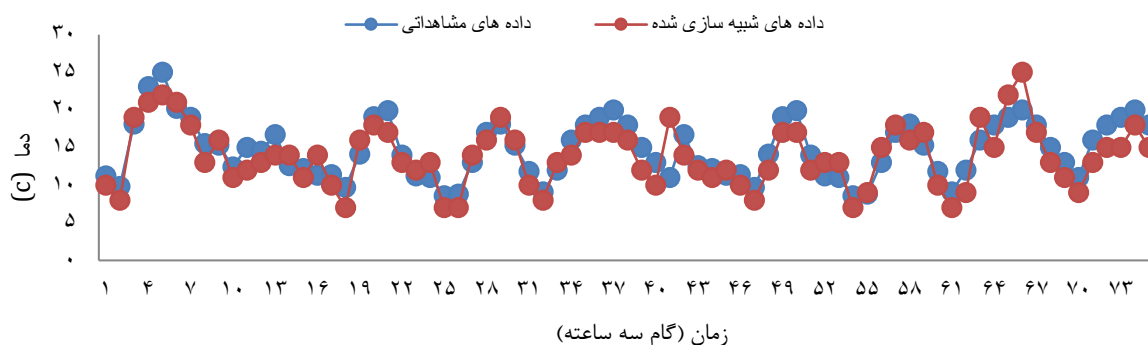
بین مقادیر شبیه‌سازی شده PM_{10} با مقادیر مشاهداتی، تا حد زیادی مقدار بیش برآورد غلظت PM_{10} شبیه‌سازی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک است تغییرات زمانی PM_{10} به عنوان کمیتی که نمایش دهنده مقدار ذرات گردوغبار موجود در جو است، در (شکل ۳) نشان داده شده است. پس از گذشت ۳۴ ساعت از شروع شبیه‌سازی، در ساعت ۱۵ روز ۵ آبان ماه، یک جهش خیلی شدید در غلظت ذرات PM_{10} مشاهده می‌شود که بیشینه آن به بیش از $2000 \mu g/m^3$ می‌رسد. از آنجایی که این زمان مطابق با زمان وقوع توفان در کرمانشاه است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل WRF-Chem به خوبی وقوع توفان گردوغبار برای شهر کرمانشاه را شبیه‌سازی نموده است. اگر چه در بعضی از ساعت‌ها مقداری خطا در شبیه‌سازی PM_{10} به چشم می‌خورد، می‌تواند به دلیل استفاده از داده‌های جهانی برای گسیل ذرات باشد، به همین دلیل احتمال رخداد خطا در برآورد غلظت گرد و غبار آشکار و روشن است.

دما و رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده

با توجه به همبستگی منطقی گسیل ذرات گردوغبار با دو متغیر دما و رطوبت نسبی، برآوردی مناسب از آن دو در مقدار دقت شبیه‌سازی ذرات PM_{10} بسیار مؤثر می‌باشد. در واقع وجود خطا در برآورد دما و رطوبت نسبی، عامل قابل توجهی در کاهش دقت مقادیر شبیه‌سازی شده برای ذرات PM_{10} است. متغیرهای دما و رطوبت نسبی از عوامل



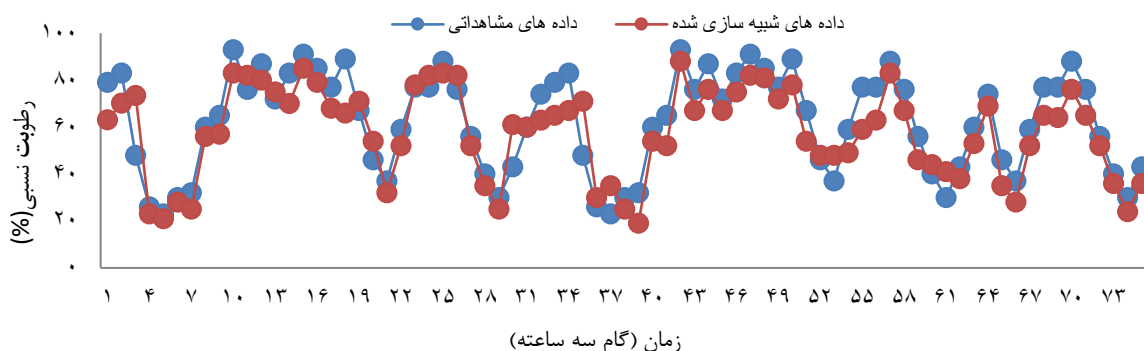
شکل ۳. مقایسه غلظت PM_{10} شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF و مشاهداتی در شهر کرمانشاه



شکل ۴. مقایسه دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF و مشاهداتی در شهر کرمانشاه

افزایش تراکم ذرات گردوغبار در هوای شهر مکه، کاهش رطوبت نسبی و افزایش سرعت باد گزارش شد (۲۸). بنابراین می‌توان رابطه دقیق بین دو عنصر مهم اقلیمی دما و رطوبت نسبی با غلظت گردوغبار را با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی WRF-Chem بیان کرد. در حالت دوم، دستیابی نقشه‌های توزیع غلظت ذرات PM_{10} توسط فرآیند پس‌پردازش بر خروجی مدل شبیه‌سازی (شکل ۶) می‌توان نواحی را از ناحیه شبیه‌سازی که دارای بیشترین غلظت ذرات معلق گردوغبار می‌باشند به عنوان مناطق اصلی گسیل ذرات معلق معرفی کرد. نقشه‌های غلظت PM_{10} دمای میانگین و رطوبت نسبی برای سه روز از ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ توسط برنامه NCL تهیه شد و خطوط قرمز رنگ که معرف میانگین دمای روزانه و همچنین رطوبت نسبی با خطوط منقطع آبی بر روی نقشه‌ها نمایش داده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ذرات PM_{10} برای روزهای ۴ تا ۶ آبان ۱۳۹۷ (شکل ۶) بیابان‌های مرکزی و غربی عراق، صحرای سوریه، کویت و شمال عربستان کانون‌های اصلی توفان گردوغبار را به‌عنوان چشمه اصلی نشان داد.

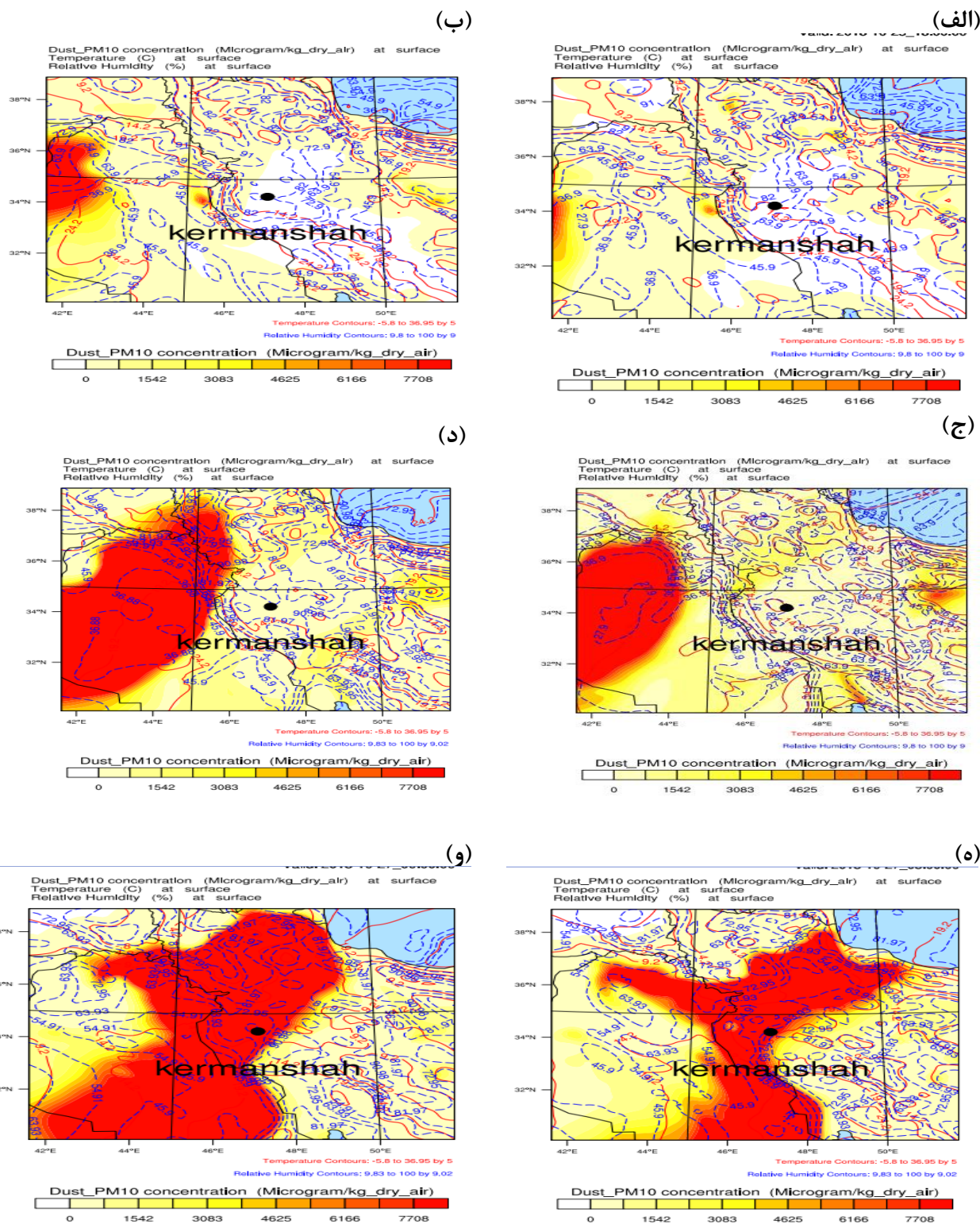
تحلیل‌های صورت گرفته، بیانگر تطابق بسیار خوب مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت نسبی با مقادیر مشاهداتی آن دارد. با توجه به شکل ۵ در روز ۵ آبان ۱۳۹۷، روز توفان گردوغبار با افزایش غلظت گردوغبار مقدار رطوبت نسبی کاهش یافته است. این نتایج منطبق بر یافته‌های دیگر محققان می‌باشد. به عنوان نمونه در بررسی، تغییرات زمانی و مکانی فرونشست ذرات معلق در منطقه اصفهان و ارتباط آن با برخی متغیرهای هواشناسی، همبستگی معنی‌دار منفی بین نرخ فرونشست گردوغبار با مقدار رطوبت نسبی و همبستگی معنی‌دار مثبت با دما وجود داشته است (۳۲). در پژوهشی اثر رطوبت نسبی در غلظت گردوغبار اتمسفری در نواحی نیمه‌خشک بررسی شد، نتایج نشان داد که غلظت گردوغبار با افزایش رطوبت نسبی به طور بیشینه تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد (۱۱). در پژوهشی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر افزایش تراکم PM_{10} در شهر اگریان^۱ چین در سال ۲۰۱۰، افزایش سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی معرفی شده است (۴۱). همچنین دلیل اصلی



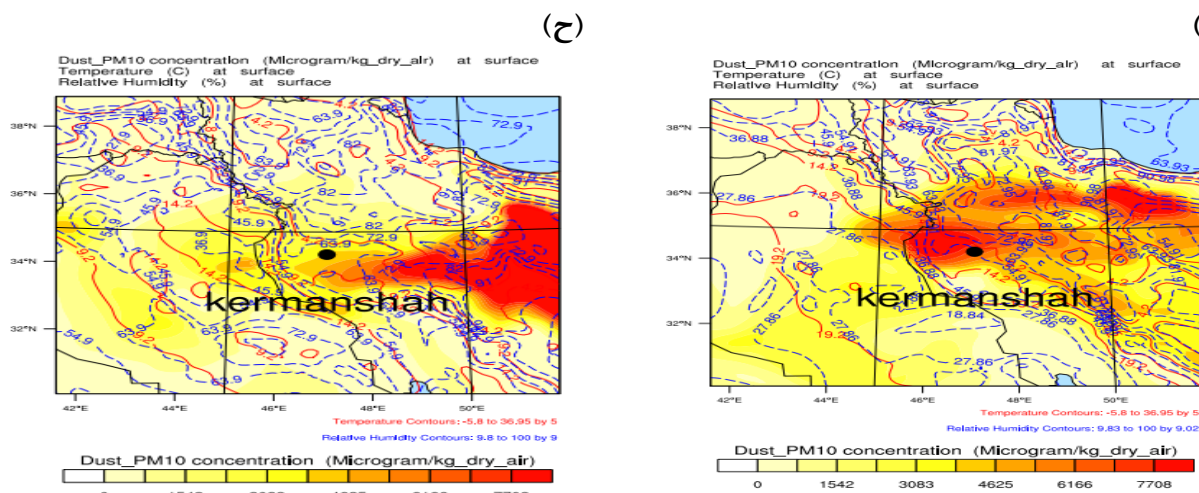
شکل ۵. مقایسه رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF و مشاهداتی در شهر کرمانشاه

غلظت PM₁₀ شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ۰/۷۸٪ تخمین زده شد و همبستگی به صورت مثبت و معنی‌دار بیانگر این مطلب است که شبیه‌سازی به درستی انجام شده است.

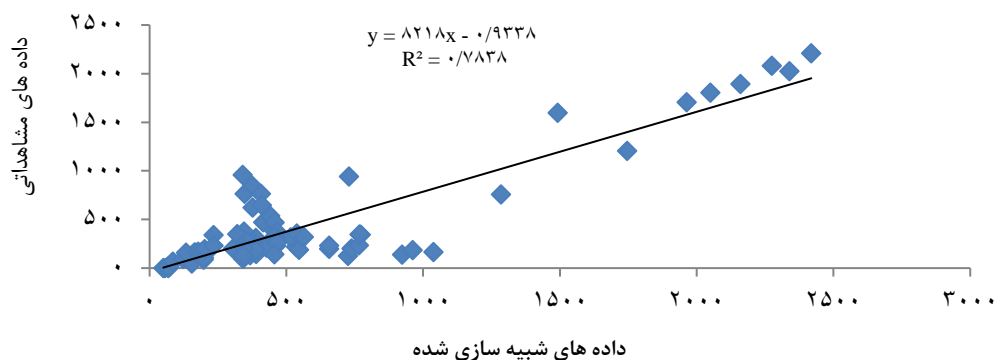
پراکنش غلظت PM₁₀ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-Chem نشان داد (شکل ۷) که ضریب تعیین حاصل از برازش مدل رگرسیون بین داده‌های



شکل ۶. توزیع دمای میانگین، رطوبت نسبی و توزیع غلظت PM₁₀ شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF برای روزهای ۴ آبان (الف، ب، ج، د، ۵ آبان (ه، و) و ۶ آبان (ز، ح) ۱۳۹۷



ادامه شکل ۶. توزیع دمای میانگین، رطوبت نسبی و توزیع غلظت PM₁₀ شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF برای روزهای ۴ آبان (الف، ب، ج، د)، ۵ آبان (ه، و) و ۶ آبان (ز، ح) ۱۳۹۷



شکل ۷. پراکنش مقادیر مشاهده‌اتی و شبیه‌سازی شده PM₁₀ شهر کرمانشاه

■ بحث و نتیجه‌گیری

انسانی باشد (۲۵). مدل‌سازی کیفیت هوا به صورت برخط و با واردسازی هم‌زمان متغیرهای هواشناسی و شیمی جو در فرآیند اجرای مدل، به ویژه هنگامی که غلظت ذرات گردوغبار مورد نظر باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در خروجی مدل، سری زمانی غلظت PM₁₀ در شهر کرمانشاه جهشی ناگهانی را درست در زمان وقوع و شدت توفان را به درستی شبیه‌سازی کرده است. بررسی الگوی غلظت PM₁₀ در حوضه شبیه‌سازی نشان داد که مدل عددی WRF، چشمه انتشار ذرات معلق را به درستی بدست آورده است. بنابراین می‌توان گفت عملکرد طرحواره پیشرفته MADE-SOGAM در برآورد مقادیر کمیت PM₁₀ به عنوان غلظت گردوغبار، به ویژه از نظر الگوی تغییرات و آشکارسازی توفان، از کیفیت قابل قبول و رضایت بخشی برخوردار است. متغیرهای دما و رطوبت نسبی از عوامل اصلی دخیل بر میزان گسیل، انتشار و بارگذاری گردوغبار در

در پژوهش حاضر، به بررسی عملکرد مدل عددی میان‌مقیاس جو، مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی غلظت PM₁₀ در شهر کرمانشاه پرداخته شد. با توجه به نتایج آماری حاصل از پردازش داده‌های گردوغبار ایستگاه سینوپتیک منطقه مورد مطالعه می‌توان گفت که گردوغبارهای ورودی به غرب ایران و شهر کرمانشاه از گستردگی مکانی و زمانی قابل توجهی برخوردار شده‌اند و در راستای غربی-شرقی نواحی غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده توسط دیگر محققان (۳۳، ۳۱ و ۲۵) و یافته‌های مشابه می‌توان گفت این گستردگی مکانی و زمانی می‌تواند در نتیجه کاهش رطوبت خاک و افزایش زمین‌های بدون پوشش در مناطق منشأ کشورهای مجاور عراق، سوریه و عربستان و همچنین افزایش زمین‌های بدون پوشش در مناطق غربی کشور در نتیجه تغییرات اقلیمی و دخالت‌های

Chem پرداختند. پارامترهای هواشناسی، دما و بردار باد با استفاده از مدل MERRA2 مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل تنوع مکانی-زمانی بالایی در پارامترهای هواشناسی در تابستان و تنوع کم در زمستان را نشان داد (۳۵). در پژوهشی به بررسی مسیرهای انتشار گردوغبار در استان هرمزگان با استفاده از مدل HYSPLIT پرداختند. بر اساس خروجی‌های به دست آمده، مناطق مرکزی و جنوبی عربستان، مناطق غربی افغانستان و پاکستان، نواحی شرقی استان هرمزگان، تالاب جازموریان، شرق سیستان و بلوچستان از اصلی‌ترین چشمه‌های ایجاد توفان‌های گردوغبار در این نواحی شناخته شدند (۱۲). همچنین در پژوهشی از بادهای ۱۲۰ روزه و توفان گردوغبار در سیستان و بلوچستان، با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی WRF-Chem به این نتایج رسیدند که بادهای قوی در نزدیک سطح زمین در پراکندگی ذرات معلق در مسیرهای طولانی تأثیر زیادی دارند (۵). نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج بررسی‌های انجام‌شده هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. به طور کلی عملکرد مدل عددی WRF-Chem در پژوهش حاضر، قابلیت کاربردی این مدل را در مدل‌سازی و پیش‌بینی کیفیت هوا، به ویژه برای هواپیزهای که از چشمه های گسیل طبیعی مانند مناطق فرسایش‌پذیر و بیابان‌ها تولید می‌شوند، تأیید می‌کند. مدل WRF-Chem علاوه بر توانایی شبیه‌سازی ذرات معلق طبیعی، قابلیت مدل‌سازی ذرات و آلاینده‌های گازی و انسان زاد را نیز دارد. در صورت آماده‌سازی دقیق فهرست انتشار برای مناطق شهری، می‌توان از خروجی‌های مدل WRF-Chem برای سنجش و پیش‌بینی کیفیت هوا در حوضه‌های شهری نیز بهره گرفت. البته استفاده از داده‌های جهانی پراکنش هواپیزها گزینه مناسبی برای شبیه‌سازی آلاینده‌های معیار مانند NO_2 ، SO_2 و CO است.

لایه‌های مختلف جوی است. بالا رفتن دما، با اثر بر رطوبت خاک، منبع اصلی گسیل ذرات به جو در کرمانشاه و کاهش آن، باعث گسستگی در ذرات خاکدانه‌ها می‌شود که افزایش گسیل ذرات به جو را در پی دارد. متغیر رطوبت‌نسبی، باعث افزایش قطر و سطح مقطع ذرات گردوغبار می‌باشد. همچنین با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته برای متغیرهای دما و رطوبت‌نسبی و نمودارهای ترسیم شده و مقایسات صورت گرفته، توافقی مطلوب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای دو متغیر دما و رطوبت‌نسبی به دست آمد. این نتایج حاکی از این می‌باشد که مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی متغیرهای اصلی هواشناسی مؤثر بر غلظت گردوغبار به خوبی عمل کرده است. این نتیجه طی تحقیقی در شبیه‌سازی ذرات PM_{10} توسط مدل WRF-Chem در منطقه شرق ایران نیز به دست آمده است. همچنین نتایج حاکی از انطباق نسبی محدوده‌های با حداکثر غلظت گردوغبار شرق و جنوب شرق ایران بر مناطق شناسایی شده ذرات خاک بستر خشک تالاب هامون است (۳۰). پیرو تحقیقات صورت گرفته برای توفان گردوغبار شدید ۱۸ تا ۲۳ مارس ۲۰۰۹ در شرق آسیا، نشان دادند که WRF-Chem برای شبیه‌سازی مسیر گردوغبار، حمل و نقل و غلظت آن در مسیرهای طولانی دارای قابلیت است (۴۲). این نتیجه در تحقیقی دیگر نیز به اثبات رسیده است. نتایج نشان داد که مقدار غلظت گردوغبار شبیه‌سازی شده نسبت به طرحواره‌های مختلف رسوبات خشک بسیار دقیق‌تر است، در طرحواره GOCART مسیریابی ذرات گردوغبار نشان می‌دهد که توزیع فضایی مقدار غلظت گردوغبار را به طور دقیقی می‌تواند شبیه‌سازی کند (۴۳). همچنین در مطالعه‌ای دیگر به بررسی تغییرات زمانی-مکانی و فصلی آئروسول‌ها، ازن تروپوسفریک و گردوغبار موجود در هوای خاورمیانه (ME) برای سال ۲۰۱۲، با استفاده از طرحواره HTAP در مدل WRF-

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. Alizadeh, T., Rezaei Banafsheh, M., Goudarzi, G., & Sheikh Ghaderi, S.H. (2021). Detection and numerical simulation of dust storm in Kermanshah, *Desert Management*, 9(2), 1-14. (in Farsi)
3. Alizadeh, T. (2014). Investigation of the role of climatic elements and pollutants in respiratory and heart diseases (Case study of Kermanshah), Master Thesis, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University. (in Farsi)
4. Alizadeh, T., Rezaei Banafsheh, M., & Sharifi, R. (2021). Detection and simulation of dust storm in different levels of Kermanshah atmosphere using HYSPLIT and WRF-chem models, *Environmental Science Studies*, 6(4), 4266- 4279.
5. Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). A global satellite view of the seasonal distribution of mineral dust and its correlation with atmospheric circulation. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 60, 20-34.
6. Arjmand, M., Rashki, A.R., & Sargzi, H. (2018). Temporal and spatial monitoring of dust phenomenon using satellite data in southeastern Iran, with emphasis on Jazmourian region. *Sepehr Geographical Information Quarterly*, 27(106), 153-168. (in Farsi)
7. Ashpole, I, Washington, R. (2013). A new high-resolution central and western Saharan summertime dust source map from automated satellite dust plume tracking. *Geophysical Research Atmospheres*, 118(13), 6981-6995.
8. 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.
9. Binkowski, F. & Shankar, U. (1995). The Regional particulate matter model. 1. model description and preliminary results. *Geophysical Research Atmospheres*, 100(D12), 26191-26209.
10. Chang, W., Zhang, Y., Li, Z., Chen, J., & Li, K. (2021). Improving the sectional Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry (MOSAIC) aerosols of the Weather Research and Forecasting-Chemistry (WRF-Chem) model with the revised Gridpoint Statistical Interpolation system and multi-wavelength aerosol optical measurements: the dust aerosol observation campaign at Kashi, near the Taklimakan Desert, northwestern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 4403-4430.
11. Csavina, J., Field, J., Félix, O, Corral-Avitia, A.Y., Sáez, A.E., & Betterton, E.A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, 487(1), .82-90.
12. Damizadeh, M., Mahdavi, A.A., Gholami, H., & Halisaz, A. (2021). Investigation of dust diffusion paths province using HYSPLIT model in Hormozgan, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 431-444. (in Farsi)
13. Daryanoosh, M., Goudarzi, Gh.R., Rashidi, R., Keishams, F., Hopke, P.K., Mohammadi, M.J., Nourmoradi, H., Sicard, P., Takdastan, A., & Vosoughi, M. (2018). Risk of morbidity attributed to ambient PM10 in the western cities of Iran. *Toxin Reviews*, 37(4), 313-318.
14. Faraji, M., Pourpak, Z., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Nicknam, M.H., Shamsipour, M., Rezaei, S., Ghozikali, M.Gh., Ghanbarian, M., Mesdaghinia, A.R. (2018). Effects of airborne particulate matter (PM10) from dust storm and thermal inversion on global DNA methylation in human peripheral blood mononuclear cells (PBMCs) in vitro. *Atmospheric Environment*, 195, 170-178.
15. Fouquart, Y., Bonnel, B., Brogniez, G., Buriez, J. C., Smith, I., & Morcrette, J.J. (1987). Observations of Saharan aerosols: Results of ECLATS field experiment. Part II: Broadband radiative Characteristics of the aerosols and vertical radiative Flux divergence. *Applied Meteorology and Climatology*, 26(1),38-52.

16. Gautam, S., Patra, A.K., Sahu, S.P., & Hitch, M. (2018). Particulate matter pollution in opencast coal mining areas: a threat to human health and environment. *Mining, Reclamation and Environment*, 32(2), 75-92.
17. Goudarzi, G., Heidari Farsani, M., Shirmardi, H., Maleki, H., Sorooshian, A., Babaei, A., (2018), Evaluation of the relationship between PM10 concentrations and heavy metals during normal and dusty days in Ahvaz, Iran. *Aeolian Research* 33, 12–22.
18. Goudie, A.S. & Middleton, N.J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56(1-4), 179-204.
19. 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.
20. Heidari, M., Shirmardi, M., Alavi, N., Malehi, H., Sorooshian, A., Babaei, A., Asgharnia, H., Marzouni, M., Goudarzi, Gh., (2018). Evaluation of the relationship between PM₁₀ concentrations and heavy metals during normal and dusty days in Ahvaz, *Aeolin Research*, 33, 12-22.
21. Hyslop, N. P. (2009). Impaired visibility: the air pollution people see. *Atmospheric Environment*, 43(1), 182-195.
22. Karegar, I., Badagh Jamali, J., Ranjbar Saadatabadi, A., Moen Aldini, M., Goshtasb, H. (2016). Numerical simulation of sandstorms and severe dust in eastern Iran using WRF_Chem model. *Spatial analysis of environmental hazards*, 3(4), 110-119. (in Farsi)
23. Lashkari, H., & Kikhosravi, GH. (2008). Synoptic statistical analysis of dust storms in Khorasan Razavi province in time interval (1993-1995). *Natural Geography Studies*, 40(65), 17-33. (in Farsi)
24. Lu, M., Xinghua, Y., Tianliang, Z., Qing, H., Lua, H., Ali, M., Wen, H., Fan, Y., Chong, L. (2019). Modeling study on three- dimensional distribution of dust aerosols during a dust storm over the Tarim Basin, Northwest China. *Atmospheric Research*, 218, 285-295.
25. Miri, M., Pilehvaran, R., Zand, M., & Nowruzi, A. A. (2021). Detection of dust nature using WRF-Chem model and remote sensing data (Case study: West and southwest of Iran). *Soil and Water Resources Protection*, 10(4), 81-94. (in Farsi)
26. Miri, m., Azizi, Gh., & Shamsi pour, A.A. (2014). Identifying patterns of summer and winter atmospheric circulation of dust entering western Iran, *Geography and environmental planning*, 25(4), 203-220. (in Farsi)
27. Modarres, R., & Sadeghi, Sh. (2018). Spatial and temporal trends of dust storms across desert regions of Iran. *Natural Hazards*, 90(1), 101-114. (in Farsi)
28. Munir, S. (2016). Modelling the non-linear association of particulate matter (PM10) with meteorological parameters and other air pollutants-a case study in Makkah. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 1-13.
29. 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)
30. Nikfal, A.H., Karami, S., Ranjbar Saadatabadi, A., & Sehatkashani, S. (2017). Capabilities of the WRF-Chem model in estimating the concentration of dust–A case study of a dust storm in Tehran. *Environmental Sciences*, 15(1), 115-126. (in Farsi)
31. Nowruzi, A.A., & Shoaie, Z. (2018). Identification of areas with dust production potential in the southwestern watersheds of the Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 398-409. (in Farsi)

32. Nowrouzi, S., & Khademi.H. (2015). Spatial and temporal variation in dust deposition rate in Isfahan and its relationship with selected climatic Parameters. *Water and Soil Science*, 19(72), 149-162. (in Farsi)
33. Rezaei Banafsheh, M., Sharifi, L., PirKhezryan, S.Gh., (2012). Estimation of dust using satellite images (case study: Kurdistan province), *Natural Geography*, 5(18), 13-22. (in Farsi)
34. Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Dust emission simulation with the WRF-Chem model using new surface data in the Middle East region. *Earth and Space Physics*, 39(1), 191-212. (in Farsi)
35. Shahid, M. Z., Chishtie, F., Bilal, M., & Shahid, I. (2021). WRF-Chem simulation for modeling seasonal variations and distributions of aerosol pollutants over the Middle East. *Remote Sensing*, 13(11), 2112.
36. Sharafi, K., Khosravi, T., Moradi, M., & Pirsahab, M. (2015). Air quality and variations in PM10 pollutant concentration in western Iran during a four-year period (2008–2011), Kermanshah-a case study. *Engineering Science and Technology*, 10(1), 47-56.
37. Shaw, P. (2008). Application of aerosol speciation data as an insitu dust proxy for validation of the Dust Regional Atmospheric Model (DREAM). *Atmospheric Environment*, 42, 7912-7913.
38. Stix, J., de-Moor, J.M., Rüdiger, J., Alan, A., Corrales, E., D'Arcy, F., Andres Diaz, J., & Liotta, M. (2018). Using drones and miniaturized instrumentation to study degassing at turrialba and masaya volcanoes, central America. *Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), 6501-6520.
39. Stockwell, W.R., Kirchner, F., Kuhn, M., & Seefeld, S. (1997). A new mechanism for regional Atmospheric chemistry modeling. *Geophysical Research*, 102(D22), 25847-2587.
40. Tulabi nezhad, M., Hejazizadeh, Z., Zarei, Z., Amrai, B., (2018). Dust storm monitoring in the western hemisphere: a case study of dust storm June 16-19, 2015. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*. 5(4), 107-124. (in Farsi)
41. Wang, P., Cao, J., Tie, X., Wang, G., Li, G., Hu, T., Wu, Y., Xu, Y., Xu, G., Zhao, Y., Ding, W., Liu, H., Huang, R., & Zhan, CH. (2015). Impact of meteorological parameters and gaseous pollutants on PM2.5 and PM10 mass concentrations during 2010 in Xi'an, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(5), 1844-1854.
42. Yu, X., Wang, T., Liu, Ch., Pu, L. (2017). Numerical studies on a severe dust storm in East Asia using WRF-Chem. *Atmospheric and Climate Sciences*, 7(1), 92-116.
43. Zeng, Y., Wang, M., Zhao, CH., Chen, S., Liu, Zh., Huang, X., & Gao, Y. (2020). WRF-Chem v3.9 simulations of the East Asian dust storm in May 2017: modeling sensitivities to dust emission and dry deposition schemes, *Geoscientific. Model Development*, 13(4), 2125-2147.