

کاربرد مدل های WRF-Chem و HYSPLIT در بررسی کانون و مسیر گرد و غبار (مورد مطالعه: طوفان گرد و غبار سپتامبر ۲۰۱۵ در کلانشهر تهران)

غلامرضا نبی بید هندی^۱، سهیلا جوانمرد^۲، غلامرضا زهتابیان^۳، سیده معصومه موسوی^{۴*}

^۱ استاد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، ایران

^۳ استاد پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران

^۴ دکتری برنامه ریزی محیط زیست، دانشگاه تهران و کارشناس پژوهشکده محیط زیست، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۱۲ ، تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۹

چکیده

در سالهای اخیر آلودگی ناشی از ذرات گرد و غبار در نقاط مختلف جهان، از جمله در ایران مرتباً در حال افزایش بوده است. گزارش های انتشار یافته سازمان های هواشناسی و حفاظت محیط زیست نشان می دهد که کلانشهر تهران نیز از این پدیده بی بهره نبوده است. به عنوان نمونه، این کلانشهر در طوفان رخ داده در روز های اول تا سوم سپتامبر سال ۲۰۱۵، به شدت تحت تاثیر بوده است. با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش حاضر با هدف بررسی و شناسایی کانون های گرد و غبار کلانشهر تهران در روزهای طوفانی مذکور به انجام رسیده است. داده های طوفان مذکور با استفاده از اطلاعات سازمان هواشناسی، سازمان حفاظت محیط زیست و داده های باز تحلیل شده FNL که از بایگانی مرکز پیش بینی محیطی آمریکا NCEP و مرکز تحقیقات جوی آمریکا NCAR بدست آمده است، استخراج شد، در ادامه با استفاده از مدل جفت شده WRF-Chem بررسی رفتار و غلظت گرد و غبار، مورد تحلیل قرار گرفت در ادامه با استفاده از مدل لاگرانژی HYSPLIT مسیر ذرات گرد و غبار نیز ردیابی شد. نتایج مدل های به کار گرفته در تحقیق حاضر نشان می دهد که کانون داخلی گرد و غبار طوفان مذکور، شرق و جنوب شرق تهران بوده است و کانون منطقه ای نیز کشورهای عراق، عربستان و ترکمنستان می باشند، ردیابی مسیر طوفان با استفاده از مدل HYSPLIT نمایانگر آن است که طوفان پس از ورود به کشور شهرهای گرگان، شاهرود، سمنان، گرمسار، شهریار، تهران، کرج و قم را در بر گرفته و در نهایت در قم نهشت می کند. همچنین نتایج استخراج شده از مدل WRF-Chem مشخص کرد که اوج میزان غلظت گرد و غبار تهران (۵۱-۲۰۰ میکروگرم بر متر مکعب) در ۲ سپتامبر ۲۰۱۵ (۱۱ شهریور ۱۳۹۴) ایجاد شده، که در محدوده ناسالم طبقه بندی می شود. در آخر به منظور اعتبار سنجی مدل عددی استفاده شده، خروجیهای مدل با داده های غلظت گرد و غبار که توسط اداره کل محیط زیست تهران، اندازه گیری شده بود، مقایسه گردید. نتایج مدل WRF-Chem نشان داد که چشمه گسیل، نحوه انتشار و گستردگی مناطق تحت پوشش گرد و غبار به خوبی شبیه سازی شده است و امکان پیش بینی قابل قبولی را میسر می سازد.

کلمات کلیدی: طوفان گرد و غبار، مدل WRF-Chem، مدل HYSPLIT، کلانشهر تهران

گرد و غبار مواد جامد بسیار ریزی هستند که در اثر باد و طوفان در هوا معلق می شوند. این مواد می توانند مسافت های طولانی را طی کنند و با کم شدن سرعت باد، براساس وزن مخصوص خود بتدریج رسوب نمایند. ریزگرد یا گرد و غبار بطور غالب از ذرات بسیار ریز خاک یعنی سیلت و رس و کمی شن ریز تشکیل شده اند و یکی از پیامدهای فرسایش خاک یعنی فرسایش بادی محسوب می شود که یکی از دلایل عمده ایجاد آن بی توجهی انسان به توسعه پایدار است (افضلی، ۲۰۱۲). مطالعات اخیر نشان داده است که فراوانی طوفان های گرد و غبار می تواند نشانه تغییرات آب و هوای جهانی باشد و به نوبه خود می تواند انواع تاثیرات محیط زیستی داشته باشد (طاهری شهریانی و همکاران، ۲۰۱۵). رویدادهای گرد و غبار شدید اغلب در مناطق خشک رخ داده است که به شدت بر کیفیت هوا، آب و هوا و سلامت عمومی تأثیر گذاشته است. خاورمیانه یکی از مناطقی در جهان است که تحت تأثیر طوفان های گرد و غبار شدید قرار گرفته است (لی و همکاران، ۲۰۲۰). فراوانی طوفان گرد و غبار در سلامت انسان و فعالیت های کشاورزی در آسیای میانه آثار مخربی برجای می گذارد (سبحانی و صفریان زنگیر، ۲۰۱۹). طوفان های گرد و غبار نقش مهمی در تبادل انرژی سیستم زمین دارند و ذرات، آلاینده ها و مواد بیولوژیکی را برای مسافت های طولانی در جهت باد منتقل میکنند (گودی، ۲۰۲۰) کشور ما نیز در منطقه خشک و نیمه خشک جهان واقع شده است و حدود ۹۱ درصد از مساحت کشور جزو مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود (فرج زاده و همکاران، ۱۳۹۲). طبق گزارش برنامه محیط زیست سازمان ملل وقوع خشکسالی در منطقه غربی و جنوب غربی ایران و کشورهای همسایه چون عراق به علت کاهش رطوبت سطحی و زیر سطحی و همچنین از بین رفتن پوشش گیاهی و توسعه پهنه های رسوبی و ریز دانه، این مناطق را با شدت گرد غبار روبرو ساخته است (عزیزی و همکاران ۱۳۹۱). با در نظر گرفتن این که تعداد روزهای گرد و غباری رخ داده در سال اخیر در ایران مرتباً در حال افزایش می باشد و کلاتشهر تهران نیز از آن بی بهره نبوده است، بنابراین شناخت منابع محلی تولید گردوغبار و بررسی وقوع این پدیده که باد غالب آلودگی

های آن را به سمت کلان شهر تهران هدایت می نماید یک ضرورت اجتناب ناپذیر می باشد. مطالعه منابع انتشار فعلی گرد و غبار و پیش بینی آینده آن ها در جنوب غربی ایران با استفاده از داده های اقلیمی و مدل های آماری در نرم افزار مکسنت با استفاده از سناریوهای ۴،۵ و ۶،۴،۵، نشان داد که مناطق مستعد انتشار گرد و غبار در آینده افزایش می یابد (لبابپور، ۲۰۲۰).

چندین روش، جهت بررسی طوفان های گرد و غبار وجود دارد، مدل های زیادی به منظور پیش بینی غلظت ذرات معلق و چگونگی انتشار و نهشت آن ها ارائه شده است (زاکی و همکاران، ۲۰۰۶. وود وارد، ۲۰۰۱. نیکوویچ، ۲۰۰۱ و کولارکو، ۲۰۰۹). یکی از روش هایی که جهت تحلیل گرد و غبار در مطالعه مورد نظر بکار گرفته شد استفاده از مدلهای عددی است که می تواند حتی برای زمان هایی که داده مناسب (پارامترهای جوی) وجود ندارد استفاده شود. شبیه سازی طوفان گرد و غبار می تواند ابزاری توانمند برای تشخیص مناطق کانون، مطالعه نحوه شکل گیری، انتشار، انتقال و همچنین نشست و رسوب ذرات غبار، کمی کردن چرخه گرد و غبار جهانی و بازسازی شرایط اقلیمی گذشته باشد همچنین این ابزار برای کاهش خطرات این پدیده و کنترل و مدیریت آن نیز بسیار راهگشا خواهد بود مدل جفت شده WRF-Chem¹ جهت بررسی رفتار و غلظت گرد و غبار انتخاب شده است این مدل با در نظر گرفتن حداکثر پارامترهای موثر بر پیش بینی مانند سرعت و جهت باد، تابش خورشیدی، تلاطم جوی، بارش و ... که از نظر تحلیل مقیاس، نقش پررنگی دارد مسیر گرد و غبار را ترسیم می نماید (کاستلانی، ۲۰۰۷). در نتایج شئی و همکارانش، که بررسی عملکرد پردازش و محاسبه قوی جهت شبیه سازی طوفان گردوغبار از طریق مقایسه مدل DREAM² با مدل گردوغبار WRF-Chem انجام دادند نشان داد که مدل های جدید می توانند با عملکرد محاسبات قوی سبب کاهش زمان اجرا و افزایش میزان تفکیک مکانی شوند (شئی و همکاران، ۲۰۱۰). در پژوهش کومار و همکارانش، موضوع طوفان گردوغبار شمال هند قبل از باد موسمی را در رابطه با خواص جذب نوری و میزان تابش ذرات معلق را با استفاده از مدل WRF-Chem از مقیاس محلی به منطقه ای شبیه سازی

1. Weather Research and Forecasting- Chemistry

2. Dust REgional Atmospheric Model

نمودند و به این نتیجه رسیدند که ذرات گردوغبار در سطوح بالای جو سبب سرد شدن جو پایین می‌شوند به‌طوری‌که زیر ستون گردوغبار دما بسیار کم است زیرا این لایه گردوغبار مانع افزایش نفوذ تابش خورشیدی به سطح زمین می‌شوند (کومار و همکاران، ۲۰۱۴). تیانگانگ و همکاران در مطالعه‌ای به حساسیت شبیه سازی طوفان گرد و غبار در آسیای میانه به طرح‌واره‌های (schemes) گرد و غبار مختلف با استفاده از مدل WRF-Chem اقدام کردند و به این نتیجه رسیدند که انتشار کل گرد و غبار از دوره چهار روزه در طرح 11.9 Tg,Shao04 (teragram) بوده است یعنی ۲ تا ۳ برابر بزرگ تر از آنچه در طرح‌واره‌های AFWA³ و GOCART⁴ به دست آمده است (تیانگانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی دیگر از مدل‌هایی که برای سیر حرکت گرد و غبار پراکندگی و شبیه سازی ته نشینی آن بکار برده می‌شود مدل HYSPLIT⁵ است. این مدل جهت تعیین ردیابی پسگرد ذرات در ترازهای مختلف جو استفاده می‌شود (دراکسلر و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش عزیزی و همکارانش، با ردیابی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران توسط مدل HYSPLIT، داده‌های همدیدی، تصاویر ماهواره‌ای MODIS و داده‌های GDAS⁶ (سامانه یکپارچه‌سازی داده‌های جهانی) به این نتیجه رسیدند که فصل بهار بیشترین رخداد گردوغبار را دارد. در طول شبانه‌روز نیز بیشترین رخداد گردوغبار بین ساعت‌های ۹ صبح تا ۶ بعدازظهر ثبت شده است. با توجه به پردازش تصاویر و خروجی‌های مدل منطقه مرزی بین سوریه و عراق و مسیر شمال غرب-جنوب شرق به ترتیب منشأ و مسیر اصلی ورود گردوغبار به غرب ایران محسوب می‌شوند (عزیزی و همکاران، ۲۰۱۲). حسینی و رستمی به واکاوی و ردیابی پدیده گرد و غبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش از دور اقدام کردند و به این یافته رسیدند که جریان‌های پرسرعت باد و در صورت کمبود رطوبت، هسته گرد و غبار بر روی منطقه مورد مطالعه شکل می‌گیرد (حسینی و رستمی، ۱۳۹۷).

یکی دیگر از روش‌های تحلیل گرد و غبار استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور می‌باشد. لی و همکاران، با استفاده از تصاویر Modis⁷ به تحلیل نقش کاربری اراضی و نوع پوشش زمین، جهت شناسایی منابع تولید گرد و غبار ۱۵ دسامبر ۲۰۰۳ در جنوب غرب آمریکای شمالی پرداختند و نتایج نشان داد که ویژگی‌های زمین و خاک در گرد و غبار موثر می‌باشد، در این تحقیق استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بسیار مورد توجه در بررسی مسائل مربوط به گرد و غبار قرار گرفته است (لی و همکاران، ۲۰۰۹). در تحقیق اواد، نیز ترکیب ژئوشیمی و کانی‌شناسی ذرات حاصل از تپه‌های شن و ماسه و طوفان گرد و غبار معلق در هوای عراق و تأثیرات محیط زیستی آنها را بررسی شد. که در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به بررسی پنج طوفان گرد و غباری که در سال ۲۰۰۸ در عراق رخ داده بود پرداخته شد. و نتایج حاکی از آن بود که کویر صحرای خشک شمال آفریقا، شبه جزیره عربستان و همچنین سوریه و اردن منبع اصلی طوفان گرد و غبار در آسیا است و همچنین اشاره شد که طوفان گرد و غبار تأثیر مستقیم بر آب و هوا می‌گذارد و باعث کاهش دما ۶ درجه سلسیوس در طول ۸ ساعت می‌شود و نیز به اثرات شدید گرد و غبارها بر سیستم تنفسی در انسان‌ها اشاره کرد (اواد، ۲۰۱۲). در نتایج تحقیقات اورلوفسکی و همکارانش، که با استفاده از اطلاعات ۱۴۴ ایستگاه هواشناسی قزاقستان و ۲۹ ایستگاه هواشناسی ازبکستان و ترکمنستان طی دوره ۱۹۷۲-۱۹۳۶، طوفان‌های شدید گرد و غبار در آسیای مرکزی را مطالعه کرده‌اند نشان داد که طوفان‌های شدید با شرایط طول زمانی ۱۲-۳ ساعت، سرعت باد ۱۴-۱۰ متر بر ثانیه و دید افقی ۱۰۰-۵۰۰ متر دارند و طوفان‌های بسیار شدید، شرایط وخیم تری را مانند دید افقی کمتر از ۵۰ متر دارند (اورلوفسکی و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین بررسی یک مدل در یک منطقه و مقایسه خروجی‌های آن با داده‌های مشاهداتی می‌تواند در ارزیابی آن برای پیش‌بینی طوفان‌های گردوغبار بسیار مفید باشد (حسین همزه و همکاران، ۱۳۹۵).

گزارش‌های انتشار یافته سازمان‌های هواشناسی و حفاظت محیط زیست نشان داد طوفان گرد و غبار اول تا

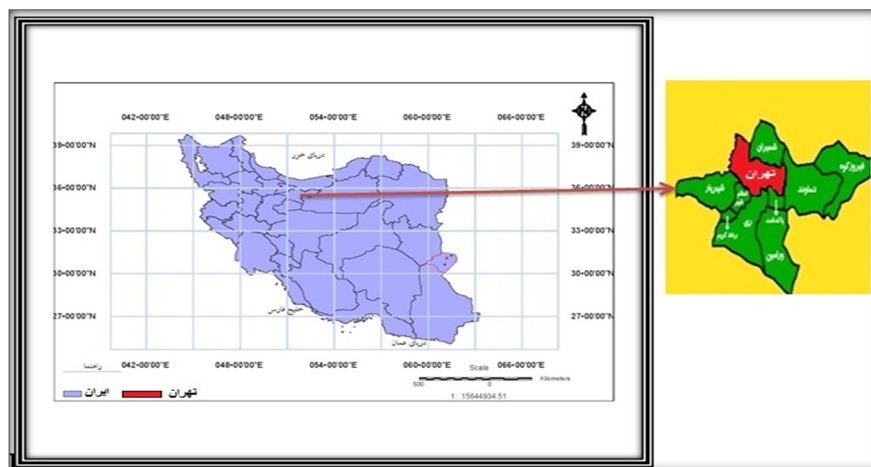
3 . Air Force Weather Agency

4 . Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport

5 . Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

6 .Global Data Assimilation System

7 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (شهر تهران) در نقشه ایران

آمار ۱۳۹۵، به ۸۶۹۳۷۰۶ نفر رسیده بود (حبیبی و هورکارد، ۱۳۹۰). منطقه کلانشهر تهران از سه بخش کوهستانی، کوهپایه و دشت تشکیل می شود. مناطق کوهستانی، ارتفاعات بالای ۱۸۰۰ متر را در بر می گیرد. ارتفاع تهران نسبت به سطح متوسط دریا در نواحی شمالی ۱۸۰۰ متر، در مرکز ۱۲۰۰ متر و در جنوب ۱۱۰۰ متر است. شیب عمومی تهران شمال به جنوب می باشد. علاوه بر وجود این شیب کلی، در داخل شهر نیز ناهمواری هایی وجود دارد که در شرایط آلودگی هوا اثرگذار است (نادری و همکاران، ۱۳۹۶). شکل (۱) موقعیت تهران (منطقه مورد مطالعه) را در کشور نشان می دهد. از اینرو تأثیر مستقیم جریان های جوی که منجر به وقوع پدیده هایی از جمله گرد و غبار، وارونگی دما و یا بارش برف و باران می شوند در کیفیت هوای شهر تهران انکارناپذیر است.

مواد و روش ها

در پژوهش حاضر ابتدا بر اساس اطلاعات استخراج شده از مرکز کنترل آلودگی اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران طوفان گرد و غبار رخ داده شده در روزهای ۱، ۲ و ۳ سپتامبر ۲۰۱۵ (۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهریور ماه ۱۳۹۴) مشخص شد و سپس اطلاعات این طوفان با استفاده از داده های مرکز پیش بینی محیطی آمریکا NCEP⁸ و مرکز تحقیقات

سوم سپتامبر سال ۲۰۱۵ وضعیت هوای کلانشهر تهران را در محدوده بسیار ناسالم قرار داده است بنابراین پژوهش حاضر با هدف مطالعه و شناسایی کانون های گرد و غبار طوفان مذکور، مورد مطالعه قرار گرفت. در شروع کار روزهای گرد و غباری سپتامبر ۲۰۱۵ در کلانشهر تهران از کل ایستگاههای کنترل کیفیت هوای سازمان حفاظت محیط زیست اخذ گردید. و داده های مربوط به حداقل دید، سرعت باد حداکثر، از ایستگاه های اداره هواشناسی استان تهران برای محدوده زمانی مورد مطالعه استخراج گردید، این روزها مبنای کار مدل کاربردی ما قرار گرفت، سپس با استفاده از مدل جفت شده WRF-Chem بررسی رفتار و غلظت گرد و غبار تجزیه و تحلیل شد در ادامه با استفاده از مدل لاگرانژی HYSPLIT مسیر ذرات گردو غبار ردیابی شد سپس خروجی آن با داده های غلظت بدست آمده از اداره کل محیط زیست تهران مقایسه و اعتبار مدل کاربردی، ارزیابی شد.

منطقه مورد مطالعه

کلانشهر تهران یکی از بزرگ ترین شهرهای ایران و به عنوان مغز مدیریتی و سیاسی کشور ایران تلقی می شود و پاکسازی هوای آن در ایجاد محیطی مناسب جهت تصمیم گیری های کلان از ضروریات استراتژیک کشور محسوب می شود. عرض و طول جغرافیایی تهران برابر ۳۵° تا ۳۵° ۵۰' و ۵۱° ۱۸' تا ۵۱° ۳۱' است. جمعیت تهران در سرشماری

8 National Center for Environmental Prediction



شکل ۲. تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر برای آشیانه اول و ۱۰ کیلومتر برای آشیانه دوم

است. در پژوهش حاضر از نسخه 3.8.1 مدل جفت شده وضع هوا - شیمی WRF-Chem به صورت یک دامنه با تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتری پیکربندی و اجرا گردید. تا در این حالت امکان بررسی میزان نقش و تأثیر عوامل محلی در شکل گیری طوفان گرد و غبار فراهم گردد. نسبت تفکیک افقی آشیانه ها ۱ به ۲ است. آشیانه ها به گونه ای انتخاب شده اند که کشور ایران را در طول جغرافیایی ۴۲ تا ۶۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۳ تا ۴۱ درجه شمالی پوشش می دهد. شکل (۲) تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر برای آشیانه اول و ۱۰ کیلومتر برای آشیانه دوم را نشان می دهد، در آشیانه اول کل کشور ایران به همراه کشورهای همسایه پوشش داده می شود و آشیانه دوم کلانشهر تهران و استان های هم جوار را در برمی گیرد.

مدل برای ۲۴ تراز قائم تا فشار ۵۰۰ میلی بار پیکربندی شده و در آن از نگاشت لامبرت استفاده شده است. شبیه سازی شرایط آغازین میدان های هواشناسی توسط این داده ها با گام زمانی ۶ ساعته و تفکیک $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (GRIB-1) انجام شده است.

در نهایت خروجی این پژوهش بصورت نقشه های زیر) شکل های ۵، ۷، ۸، ۹ و ۱۰) از مدل WRF-Chem توسط نرم افزار GrADS (سامانه نرم افزاری برای تحلیل داده های

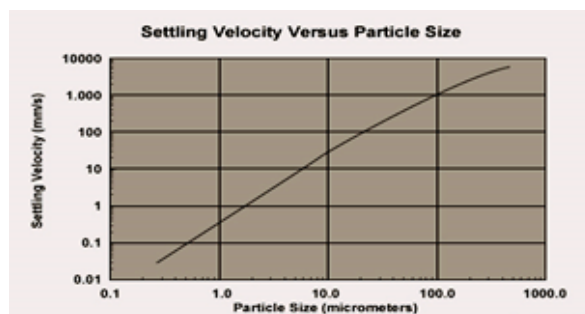
جوی آمریکا NCAR⁹ توسط لابراتوار منابع هوا وابسته به NOAA¹⁰ با دقت ۲،۵ درجه، استخراج گردید. سپس با اطلاعات بدست آمده از مراکز فوق نصب و اجرای مدل بر روی سرور پژوهشگاه هواشناسی با استفاده از نرم افزارهای putty, VNC-Viewer, MobaXterm انجام شد، خروجی های مدل WRF-Chem تصاویر شبیه سازی از توزیع مکانی و زمانی غلظت گرد و غبار، سرعت نهشت ذرات گرد و غبار و انتشار گرد و غبار بر اثر سرعت فرسایشی در منطقه مورد مطالعه است که مبنای تحلیل طوفان مورد نظر قرار گرفت. شبیه سازی میدان های هواشناسی با شرایط آغازین و مرزهای جانبی گرفته شده، از داده های باز تحلیل شده FNL¹¹ که از بایگانی مرکز پیش بینی محیطی آمریکا NCEP و مرکز تحقیقات جوی آمریکا NCAR با گام زمانی شش ساعته و تفکیک مکانی یک درجه (GRIB-1) در مقیاس طول و عرض جغرافیایی، تامین شده است. طرحواره بکار رفته در این مدل از نوع GOCART¹² است که در این طرحواره ۵ گروه اندازه ذرات گرد و غبار با اندازه ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده

9. National Center for Atmospheric Research

10. National Oceanic and Atmospheric Administration

11. Final Reanalysis

12. Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport



شکل ۳. سرعت نهشت استاندارد ذرات گردوغبار (کارگر و همکاران، ۱۳۹۵ و COMET, 2012).

جوی) رسم شده است:

۱. توزیع مکانی غلظت گرد و غبار، ۲. سری زمانی تغییرات غلظت گرد و غبار، ۳. سرعت آستانه فرسایشی (اصطلاحی) و ۴. سرعت آستانه فرونشست یا نهشت گردوغبار. در این مدل شبیه سازی نهشت یا فرونشست نیز با سرعت نهشت استاندارد مقایسه می شود. شکل (۳) نشان دهنده سرعت نهشت استاندارد برای کل ۵ اندازه ذرات گردوغبار است. در این شکل مشاهده می گردد، ذرات با قطر کمتر از ۲۰ میکرومتر (سیلت و رس) دارای سرعت نهشت حدود ۱۰۰ میلی متر/ثانیه بوده و به آهستگی فرونشست می کنند. ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر (سیلت)، سریع تر و با سرعت ۵۰۰ میلی متر/ثانیه (نیم متر در ساعت) فرونشست می کنند. سرعت نهشت ذرات ۸ میکرومتری، ۲۱ میلی متر/ثانیه و ذرات غبار ۲/۴ میکرومتری (رس) فقط ۲ میلی متر/ثانیه است. (کارگر و همکاران، ۱۳۹۵ و COMET, 2012).

در ادامه با استفاده از مدل HYSPLIT مسیر گرد و غبار مورد مطالعه، تعیین شده است، داده های ورودی به این مدل نیز از داده های دوباره تحلیل شده مرکز اقیانوسی و جو آمریکا و داده های تحلیل شده GDAS تامین شد. این داده ها با قدرت تفکیک افقی ۵، درجه، برای ۲۶ تراز فشاری ۱۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال و با گام زمانی ۶ ساعته در دسترس می باشند. در نهایت برای اعتبار سنجی نتایج غلظت گرد و غبار خروجی مدل جفت شده WRF-Chem از داده های مشاهداتی ذرات PM10 دریافتی از اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران استفاده شد.

غلظت گرد و غبار انتخاب شده است این مدل با در نظر گرفتن حداکثر پارامترهای جوی موثر بر پیش بینی (مانند سرعت، جهت باد، تابش خورشیدی، تلاطم جوی، بارش و ...) که از نظر تحلیل مقیاس، نقش پررنگی دارد مسیر گرد و غبار را ترسیم می نماید (کاستلانی، ۲۰۰۷). در مدل WRF-Chem، تمام انتقالات ذرات شیمیایی به صورت بر خط (online) محاسبه می شود. از فرایندهای شیمیایی استفاده شده در نسخه جدید مدل (WRFV3)، ۳۹ مورد از ترکیبات شیمیایی به طور کامل قابل تحلیل و پیش بینی می باشند (گرل، ۲۰۰۵).

سیستم مدل WRF-Chem از ۴ قسمت تشکیل شده است:

۱. سیستم پیش پردازش $(WPS)^{13}$
۲. سیستم داده گواری $(WRF-VAR)^{14}$
۳. حل کننده ARW^{15} (نرم افزاری که داده گواری (ترکیب دو مجموعه داده به بهینه ترین حالت ممکن از لحاظ آماری) را برای مدل WRF انجام میدهد)
۴. ابزارهای تجسمی و پس پردازشی (پکهام و همکاران، ۲۰۱۴).

شکل (۴) قسمت های مختلف مدل WRF-Chem را نشان می دهد:

به طور کلی برای پدیده گرد و غبار سه فاز گسیل، انتقال و نهشت در نظر گرفته می شود که در هر یک از این بخش ها داده های مختلفی مورد نیاز است (بالداسانو، ۲۰۱۳). بخش شیمی مدل محاسبات مربوط به ساز و کارهای شیمیایی، تجزیه نوری ذرات هواویز، فرآیندهای گسیل ذرات هواویز از سطح به جو و

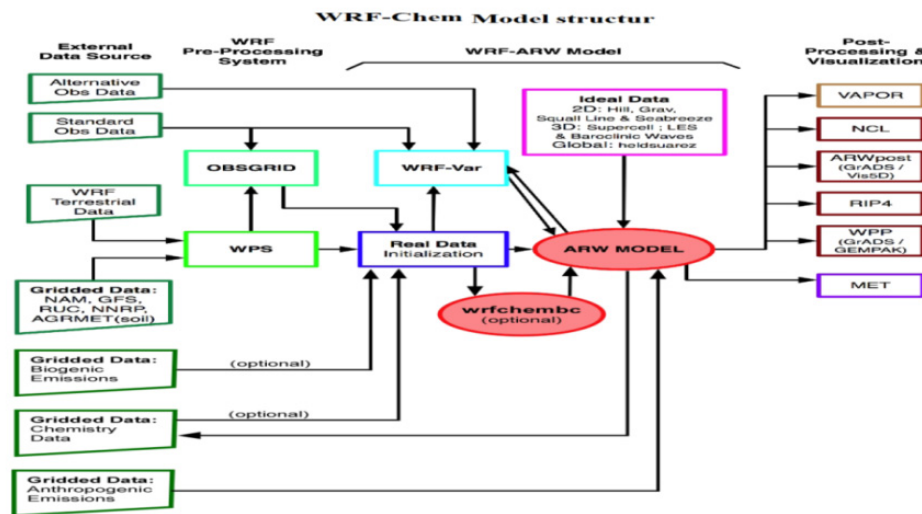
13 . Weather Research and Forecasting Preprocessing System

14 . Weather Research and Forecasting - Variation AL

15 . Advanced Research Weather Research and Forecasting, Advanced Research WRF

۳-۱ مدل عددی WRF_Chem

مدل جفت شده WRF_Chem جهت بررسی رفتار و



شکل ۴. ساختار سامانه مدل‌سازی WRF.Chem (پکهام و همکاران، ۲۰۱۴).

آمریکا (ARL^{۱۶}) NOAA در سال ۱۹۸۲ با کمک اداره هواشناسی استرالیا توسعه یافته که کاربردهای آن شامل ردیابی و پیش بینی مسیر مواد آلوده کننده آزاد، مسیریابی ذرات هوا، خاکسترهای آتشفشانی و دوده‌های ناشی از آتش سوزهای جنگل‌ها می‌باشد. روش محاسبات مدل یک روش مختلط بین روش لاگرانژی (که یک چارچوب متحرک برای حرکات ذرات را مورد استفاده قرار می‌دهد) و روش اولیتری (که یک چارچوب ثابت سه بعدی را برای حرکت‌های ذرات مورد استفاده قرار می‌دهد) می‌باشد (Shan et al., 2009). جهت تعیین منابع اصلی گرد و غبار برای هر یک از طوفان‌های گرد و غباری از مدل لاگرانژی با امکان ردیابی پس‌گرد ذرات در ترازهای مختلف جو HYSPLIT استفاده شد (دراکسلر و همکاران، ۲۰۱۶). از آنجایی که رهیافت لاگرانژی هر ذره در زمان‌های مختلف موقعیت‌های متفاوتی خواهد داشت، بنابراین رهیافت لاگرانژی این امکان را فراهم می‌کند که مدل‌های پایه لاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی و زمانی خاص، حرکت آن را در گام‌های زمانی دلخواه به سمت آینده (روش پیشرو^{۱۷}) یا به سمت زمان‌های گذشته (روش پس‌گرد^{۱۸}) ردیابی کنند. برای مسیریابی پس‌گرد ذرات در تهران، زمان اوج وقوع هر یک

فرآیندهای مربوط به حذف ذرات و طرحواره‌های پارامترسازی فرآیندهای میکروفیزیکی، دینامیکی و ترمودینامیکی ذرات هواویزه را در بر می‌گیرد (علیزاده چوباری، ۲۰۱۴).

مدل WRF_Chem برخلاف بیشتر مدل‌های مشابه، نیازی به جفت شدن با یک مدل جوی و یا وارد کردن پارامترهای جوی ندارد و به صورت روی خط پارامترهای جوی را نیز محاسبه می‌کند، بنابراین علاوه بر پارامترهای مرتبط با شیمی جو، پارامترهای جوی از قبیل باد در سطوح مختلف، فشار و ارتفاع ژئوپتانسیلی را نیز به عنوان خروجی مدل ارائه می‌دهد (فست و همکاران، ۲۰۰۶ . گرل و همکاران، ۲۰۰۵). در این مطالعه طرحواره گسیل ذرات معلق GOCART تنها با در نظر گرفتن ذرات معلق گردوغبار، استفاده شده است. این طرحواره، چشمه‌های پتانسیلی گردوغبار را بر پایه کسر قابل فرسایش و شار قائم گرد و خاک از سطح که از طریق فرمول ذیل در نظر می‌گیرد (کاوازوس گوئرا، ۲۰۱۱).

مدل HYSPLIT

مدل هایسپلیت مدلی دوگانه برای محاسبات خط سیر حرکت گرد و غبار، پراکندگی و شبیه‌سازی ته‌نشینی آن پارامترهای هواشناسی انجام می‌گیرد (آبروش و همکاران، ۱۴۰۰). مدل مسیریابی لاگرانژی تک ذره ای هیبریدی (HYSPLIT) برای اولین بار توسط آزمایشگاه منابع هوای

16 . Air Resources Laboratory

17 . forward

18 . backward

جدول ۲. تعداد روزهای گرد و غباری استخراج شده سال ۲۰۱۵ در کلانشهر تهران از کل ایستگاههای کنترل کیفیت هوای تهران با توجه به جدول (AQI)

تعداد روزهای گرد و غبار	تعداد روزهای ناسالم	تعداد افراد حساس	تعداد روزهای ناسالم	تعداد روزهای بسیار ناسالم	تعداد روزهای خطرناک
۹ روز	۱ روز	۲۰۱۵/۸/۱۰	۳ روز	۲۰۱۵/۹/۳ و ۲۰۱۵/۹/۲ و ۲۰۱۵/۹/۱	-

جدول ۱. معیار شاخص کیفیت هوا (AQI)

ردیف	میزان شاخص	سطوح سلامتی
۱	۰-۵۰	خوب
۲	۵۱-۱۰۰	ناسالم برای برخی گروهها
۳	۱۰۱-۲۰۰	ناسالم
۴	۲۰۱-۳۰۰	بسیار ناسالم
۵	۳۰۱-۴۰۰	خطرناک
۶	۴۰۱ >	بسیار خطرناک

از طوفان های گرد و غباری در نظر گرفته شد. در این مطالعه ذرات در پنج سطح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ متری، ارتفاع از سطح زمین و در حد فاصل زمانی ۴۸ ساعت قبل ردیابی شدند.

دقت مدل در مطالعه تا حدود زیادی بسته به داده های هواشناسی است و هرچه دقت و تفکیک داده های هواشناسی بالاتر باشد، نتایج دقیق تر خواهد بود. داده های هواشناسی مدل را می توان از داده های دوباره تحلیل شده مرکز اقیانوسی و جو آمریکا^{۱۹}، داده های تحلیل شده GDAS^{۲۰} بدست آورد. این داده ها با قدرت تفکیک افقی ۰٫۵ درجه، برای ۲۶ تراز فشاری ۱۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال و با گام زمانی ۶ ساعته در دسترس میباشند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

نتایج و بحث

در شروع کار روزهای گرد و غباری ۱ و ۲ و ۳ سپتامبر ۲۰۱۵ (۱۰، ۱۱ و ۱۲ شهریور ماه ۱۳۹۴) که تهران از لحاظ شاخص کیفیت هوا (AQI^{۲۱}) در مرحله بسیار ناسالم قرار داشت از کل ایستگاههای کنترل کیفیت هوای سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید جدول (۱) که معیار شاخص کیفیت هوا را نشان می دهد و جدول (۲) روزهای گرد و غباری استخراج شده از ایستگاههای اندازه گیری کنترل کیفیت هوای تهران را نشان می دهد و این روزها مبنای کار مدل کاربردی ما قرار گرفت. بعد از استخراج روزهای مورد نظر و ورود آن به مدل WRF-Chem نتایج استخراج شده از مدل های بکار برده شده در روزهای طوفانی مذکور بشرح ذیل تحلیل شد:

19 . NCAR/NCEP Reanalysis Data

20 . Global Data Assimilation System

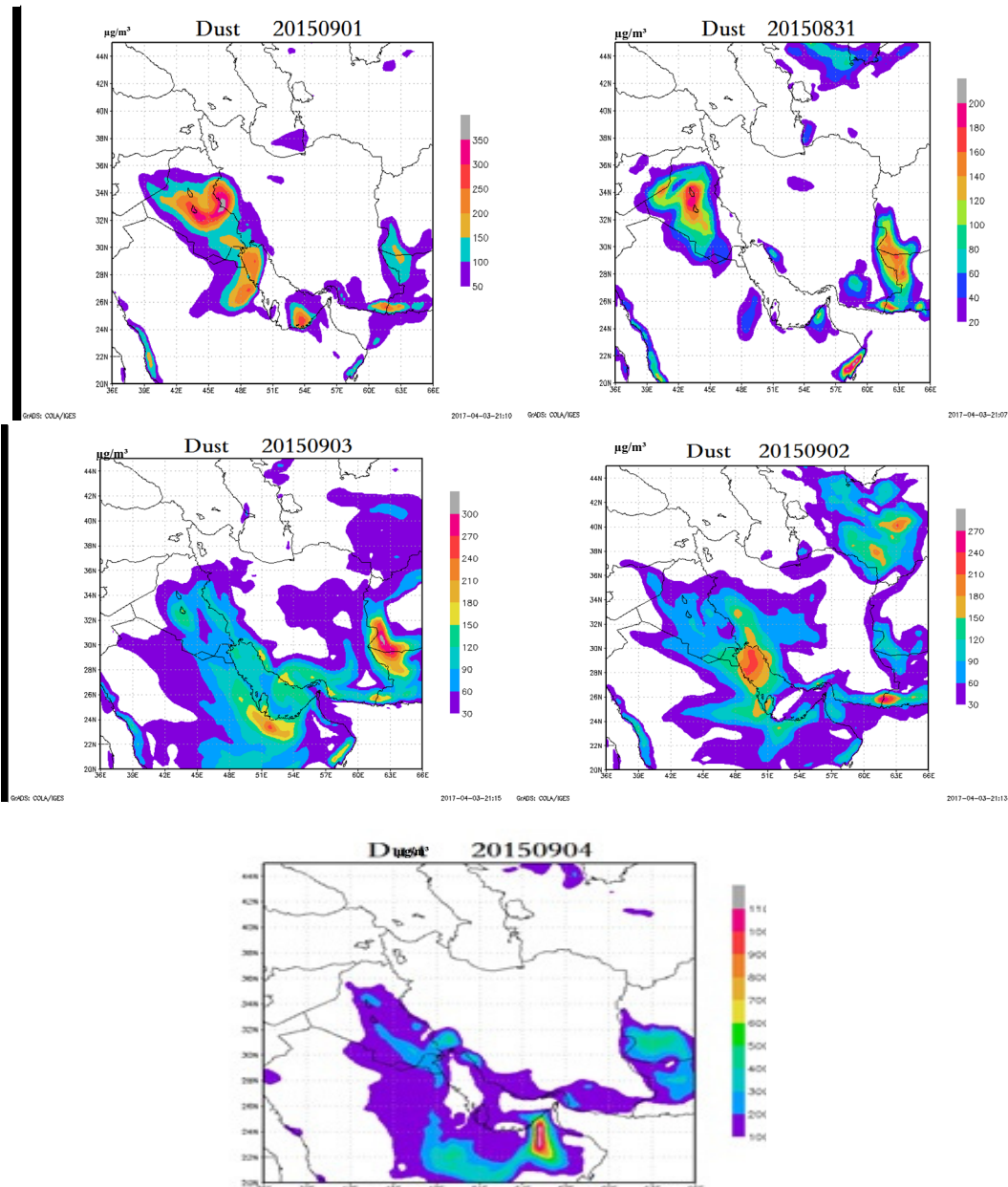
21 . Air Quality Index

غلظت و مسیر گردوغبار با استفاده از مدل های WRF-Chem و HYSPLIT

نقشه های توزیع غلظت گردوغبار (میکروگرم بر مترمکعب) شبیه سازی شده برای نمونه طوفان ماسه و گرد و غبار ۳۱ آگوست و ۱-۴ سپتامبر ۲۰۱۵ توسط مدل WRF-Chem در شکل (۵) قابل نمایش است. مطابق شکل این رخداد شدید ذرات گردوغبار را از مقیاس محلی به مقیاس منطقه ای بارگذاری کرده است. مقادیر غلظت بر واحد سطح گردوغبار در روز ۳ سپتامبر بیشتر از سایر روزها بوده و محدوده وسیع تری را در بر گرفته است. ولی همانطور که نقشه های خروجی مدل نشان می دهد در منطقه تهران غلظت گرد و غبار در روز ۲ سپتامبر بیشتر بوده است. مطابق نقشه ها منبع گردوغبار از کشورهای عراق و عربستان و بیابان قره قوم ترکمنستان بوده است.

نتایج شکل (۵) شبیه سازی حداکثر میزان توزیع غلظت گردوغبار (پیک) را برای ساعت ۱۲ روز ۲ و ساعت ۱۲ روز ۳ سپتامبر ۲۰۱۵ نشان می دهد. مطابق شکل بیشینه غلظت گردوغبار عمدتاً در نواحی شرق و جنوب شرق تهران سبب کاهش کیفیت هوا می شود. مطابق شکل گستره طوفان در روز ۲ سپتامبر، منطقه وسیعی را در بر گرفته که علاوه بر تهران سایر استان های جنوبی ایران تا دریای عمان را در بر گرفته است.

پیش بینی مسیر حرکت طوفان گردوغبار حاصل از مدل HYSPLIT در شکل (۶) نیز مسیر جریان طوفان از شمال شرق و بیابان قره قوم ترکمنستان را تایید می کند. همانطور که در شکل مشاهده می گردد طوفان پس از ورود به کشور

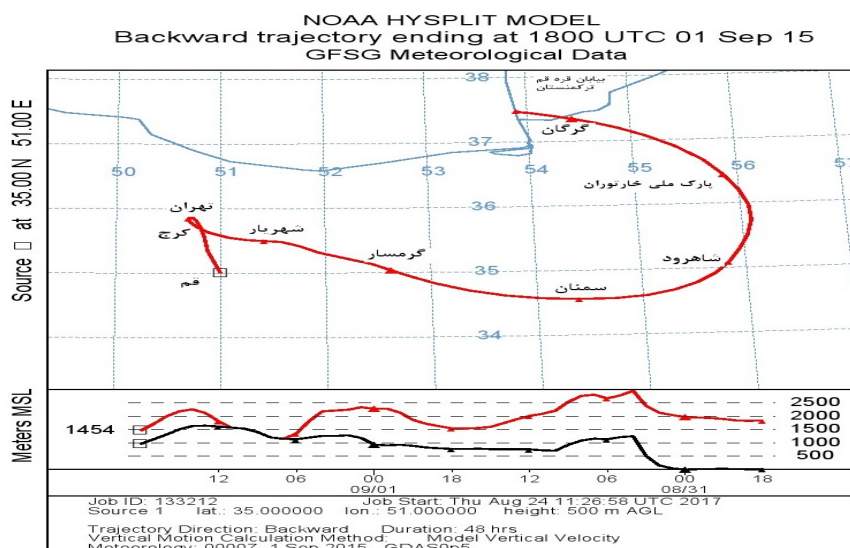


شکل ۵. نقشه‌های توزیع متوسط غلظت گردوغبار (میکروگرم بر مترمکعب) حاصل از مدل WRF.Chem برای تاریخ ۳۱ آگوست و ۱، ۲، ۳، ۴ سپتامبر ۲۰۱۵ در دو قدرت تفکیک افقی ۱۰ و ۳۰ کیلومتری

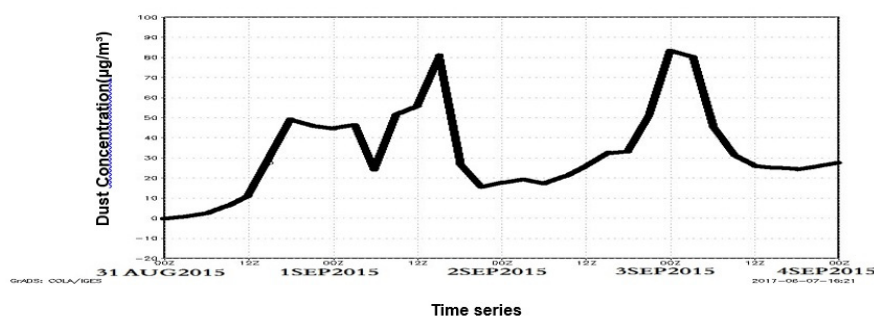
می‌دهد. اوج میزان غلظت گردوغبار تهران در ساعت ۰۰ روز ۳ سپتامبر ۲۰۱۵ (۸۰ میکروگرم بر مترمکعب) ایجاد شده است. این میزان گرد و غبار شبیه سازی شده در مقایسه با توزیع فراوانی گرد و غبار با توجه به شاخص کیفیت هوا (AQI) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ جدول (۲ و ۱) دارای میزان بسیار ناسالم برای افراد جامعه است. میزان گردوغبار در روز ۴ سپتامبر کاهش یافته است.

شهرهای گرگان، شاهرود، سمنان، گرمسار، شهریار، تهران، کرج و قم را در بر گرفته و در نهایت در قم نهشت می‌کند.

سری زمانی تغییرات غلظت گردوغبار در تهران
سری زمانی شبیه‌سازی شده در شکل (۷) تغییرات میزان غلظت گرد و غبار را در طول دوره شبیه‌سازی برای تهران نشان



شکل ۶. نقشه مسیر طوفان گردوغبار حاصل از مدل HYSPLIT برای تاریخ ۳۱ آگوست و ۱ سپتامبر ۲۰۱۵.



شکل ۷. سری زمانی تغییرات غلظت کل گردوغبار در طول روزهای ۳۱ آگوست و ۱، ۴ سپتامبر ۲۰۱۵ حاصل از مدل WRF.Chem.

طوفان بوده است. از روز ۴ سپتامبر میزان نهشت در تهران افزایش یافته است.

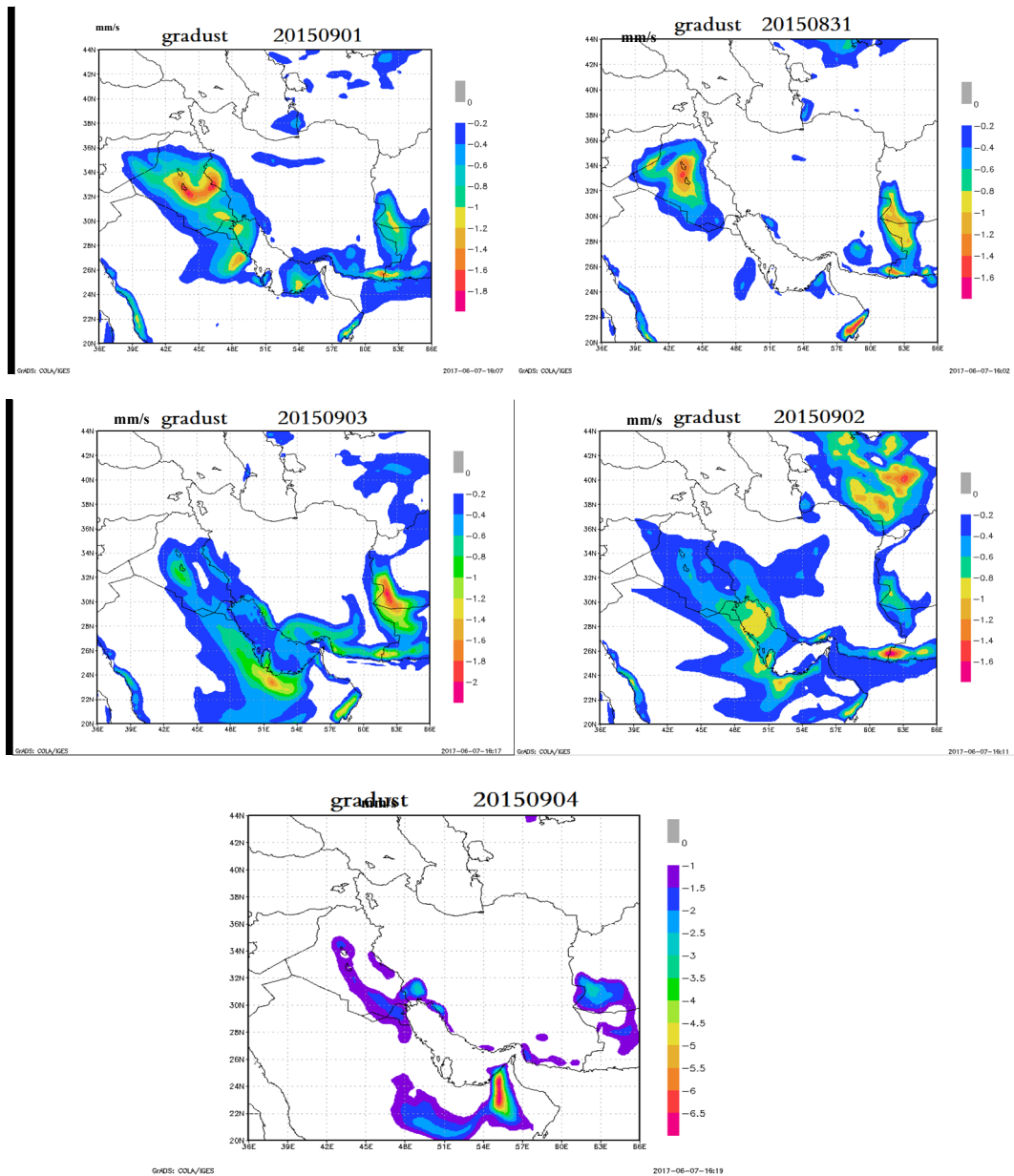
انتشار گردوغبار بر اثر سرعت فرسایشی

بر اساس شکل (۹) میزان بیشینه سرعت فرسایشی در استان تهران حدود ۱ متر بر ثانیه در ساعت ۱۲ روز ۱ سپتامبر ۲۰۱۵ رخ داده است. در واقع این سرعت حداکثر اصطحاک (ust) در روز شروع طوفان رخ داده و با توجه به وجود نواحی مستعد بیابانی در این مناطق سبب ایجاد طوفان گرد و غبار و انتقال آن به سایر نقاط شده است. وقوع طوفان گردوغبار در تهران را باید به الگوی خاص جریان باد و نواحی

سرعت نهشت ذرات گردوغبار

نقشه های خروجی مدل WRF-Chem در شکل (۸) نشان دهنده سرعت نهشت برای کل ۵ اندازه ذرات گردوغبار است. همان گونه که مشاهده می شود، سرعت نهشت گردوغبار در خروجی مدل WRF-Chem به علت وجود بادهای شدید در منطقه تهران دارای نوسان هایی در مقایسه با سرعت نهشت استاندارد شکل (۲) است.

خروجی مدل در هنگام طوفان، سرعت نهشت منطقی را نسبت به سرعت نهشت استاندارد نشان می دهد. مطابق نقشه های شکل (۸) کمترین میزان نهشت خشک مربوط به ۲ سپتامبر ۲۰۱۵ با میزان ۲- میلی متر بر ثانیه و در روز اوج



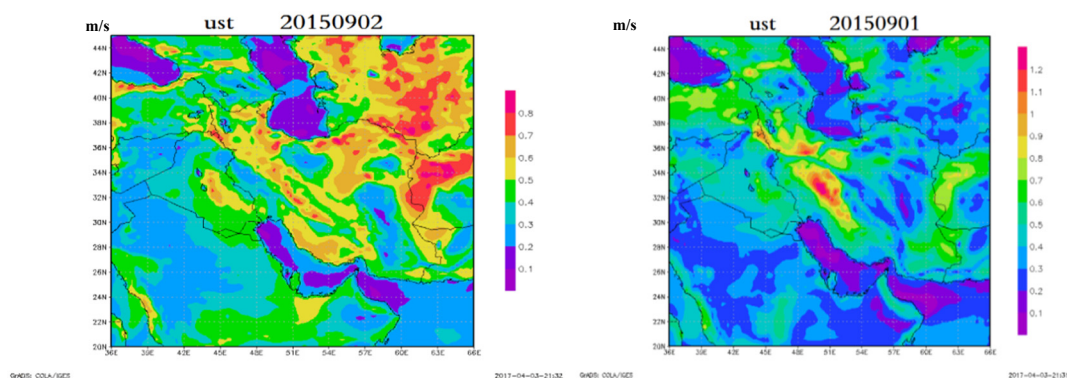
شکل ۸. نقشه های سرعت نهشت خشک (گرانشی) برحسب (میلی متر بر ثانیه) خروجی مدل WRF-Chem برای تاریخ ها ۳۱ آگوست و ۱،۴ سپتامبر ۲۰۱۵ در دو قدرت تفکیک افقی ۱۰ و ۳۰ کیلومتری

بیابانی نسبت داد.

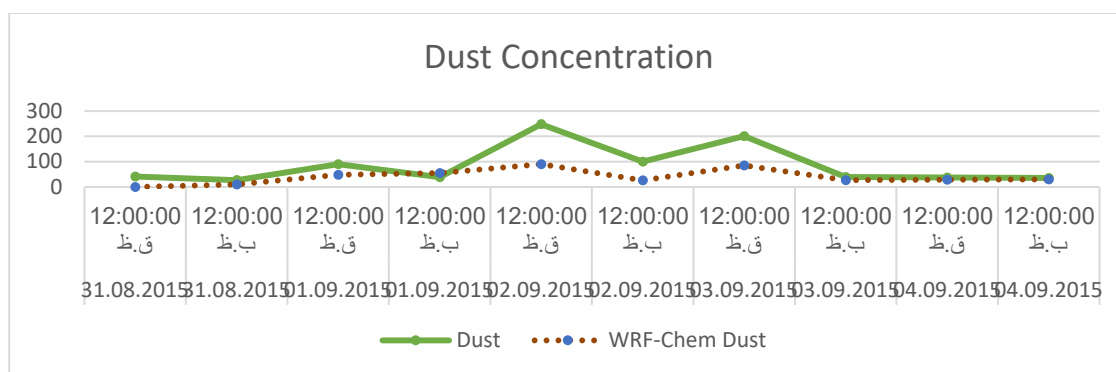
است. مقایسه خروجی مدل کار شده در پژوهش با داده های دریافتی از اداره کل تهران در شکل (۱۰) بیانگر این واقعیت است که خروجی مدل WRF-Chem میزان گردوغبار کمتری نسبت به داده های مشاهداتی نشان می دهد. در خروجی مدل، سری زمانی غلظت PM10 در شهر تهران جهشی ناگهانی را درست در زمان اوج طوفان ۲ سپتامبر نشان میدهد هرچند

اعتبار سنجی نتایج مدل WRF-Chem

برای ارزیابی غلظت گرد و غبار خروجی مدل جفت شده WRF-Chem از داده های مشاهداتی ذرات PM10 دریافتی از اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران استفاده شده



شکل ۹. نقشه های پیشینه سرعت فرسایشی (متر بر ثانیه) برای تاریخ ۱ و ۲ سپتامبر ۲۰۱۵، خروجی مدل WRF.Chem در دو قدرت تفکیک افقی ۱۰ و ۳۰ کیلومتری



شکل ۱۰. نمودار تغییرات میزان غلظت ذرات PM10 حاصل از مدل WRF.Chem با داده های دستگاههای سنجش PM10 مرکز پایش آلودگی تهران، دریافتی از اداره کل حفاظت محیط زیست تهران در سپتامبر ۲۰۱۵ برای روزهای گردوغباری

خشک است که این امر همه ساله آثار مخربی را برای ساکنان این مناطق دارد و خسارت های زیادی را به بخشهای مختلف وارد می کند. پژوهش حاضر گرد و غبار ۱، ۲ و ۳ سپتامبر ۲۰۱۵ را مورد بررسی قرار داده که کیفیت هوای بسیاری از مناطق ایران از جمله تهران در این تاریخ مطابق شاخص کیفیت هوا (AQI) دارای میزان ناسالم و بسیار ناسالم برای افراد جامعه است. با توجه به نقشه های استخراج شده از مدل های مورد استفاده در پژوهش حاضر مشخص گردید گرادیان فشار شدیدی همزمان بروی کشورهای ترکمنستان عراق و جنوب خلیج فارس برقرار شده و منجر به وزش بادهای شدید در بیابان های این کشورها گردیده و موجب گسیل گرد و غبار به کشور ایران شده است. کانون گرد و غبار ۱، ۲ و ۳ سپتامبر ۲۰۱۵ تهران در سمت شرق، جنوب شرق واقع شده است. منبع

که از لحاظ میزان غلظت گرد و غبار مقدار کمتری را نسبت به ایستگاههای کنترل کیفیت هوا نشان می دهد ولی به طور کلی این مدل زمان وقوع و شدت طوفان را به درستی شبیه سازی کرده است. و خروجی مدل از لحاظ تغییرات زمانی میزان گردوغبار، و تشخیص زمان اوج میزان گردوغبار، پیش بینی قابل قبولی را با توجه به داده های دریافتی از دستگاههای سنجش PM10 مرکز پایش آلودگی هوای اداره کل حفاظت محیط زیست تهران ارائه می نماید.

جمع بندی

گرد و غبارها یکی از پدیده های متداول جوی و در ردیف بزرگ ترین مشکلات محیط زیستی در مناطق خشک و نیمه

گردوغبار منطقه ای از کشورهای عراق، عربستان و ترکمنستان بوده است. در نتایج تحقیق تحلیل همدیدی و دینامیکی پدیده گردوغبار در جنوب غرب ایران با استفاده از مدل WRF-Chem در هنگام طوفان تابستان ۸۴، یک مرکز پر ارتفاع بسیار قوی از سمت جنوب غربی را نشان داده که تمام مناطق کشور ایران را پوشش داده است که مانع از انتقال گردوغبار تا ترازهای بالایی جو شده و سبب معلق ماندن گردوغبار در ترازهای میانی جو شده است (حسین همزه و همکاران، ۱۳۹۵). این مدل جفت شده، برای شبیه سازی طوفان گردوغبار مدلی جهت پیش بینی و تحقیقات جو که نسل جدیدی از سیستم میان مقیاس پیش بینی عددی آب و هوا و نخستین مدل پیش بینی جوی است که هم پیش بینی عملیاتی و هم نیازهای تحقیقاتی جوی را برآورده می کند (مزیدی و همکاران، ۱۳۹۴). در نتایج تحقیق ارزیابی طرحواره های گسیل گردوغبار در منطقه شرق و جنوب شرق کشور با استفاده از مدل WRF-Chem نیز خروجی مدل از نظر مقیاس و تغییرات زمانی، برآوردی منطقی از هواویزها در محدوده مطالعاتی را نشان داده است و طرحواره های گسیل AFWA و GOCART مدل WRF-Chem چشمه گسیل و تغییرات غلظت گردوغبار طوفان ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸ را تا حد زیادی شبیه سازی کرده اند (اصغری و همکاران، ۱۳۹۹).

نتایج شبیه سازی مسیر حرکت طوفان گردوغبار تهران حاصل از مدل HYSPLIT مسیر جریان طوفان از بیابان قره قوم ترکمنستان را تایید می کند. طوفان پس از ورود به کشور شهرهای گرگان، شاهرود، سمنان، گرمسار، شهریار، تهران، کرج و قم را در بر گرفته و در نهایت در قم نهشت می کند. اوج میزان غلظت گردوغبار تهران در ۲ سپتامبر ۲۰۱۵ (۱۱ شهریور ماه ۱۳۹۴) ایجاد شده است، که در محدوده ناسالم (۲۰۰-۵۱ میکرو گرم بر متر مکعب) قرار داشته است و این میزان گردوغبار شبیه سازی شده در مقایسه با شاخص کیفیت هوا AQI، ناسالم برای افراد جامعه محسوب می شود. در نتایج مطالعه ردیابی منابع گردوغبار در سطوح مختلف با استفاده از مدل HYSPLIT مسیر های انتقال ذرات در خروجی مدل نشان داده شده است که بطور کلی منابع اصلی غبار بروی تهران در عرض های ۲۵ تا ۳۷ درجه شمالی،

محدوده حفافصل عراق، عربستان و سوریه می باشد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). در تحقیق آشکارسازی گردوغبار روی تصاویر ماهواره ای همراه با ردیابی باد در مدل HYSPLIT نیز نشان داد که پدیده گردوغبار در جنوب شرق ایران از ۶ کانون اصلی منشأ می گیرد (حسینی و رستمی، ۱۳۹۷). در پژوهش تحلیل روند حرکت گردوغبار منطقه شرق استان قم با بهره گیری از داده های هواشناسی و بکارگیری مدل HYSPLIT و مشاهدات میدانی، آبروش و همکارانش نتیجه گرفتند که این مدل بخوبی مسیر گردوغبار را شبیه سازی می کند. (آبروش و همکاران، ۱۴۰۰)

خروجی مدل در هنگام طوفان، سرعت نهشت منطقی را نسبت به سرعت نهشت استاندارد نشان می دهد. بطور کلی نتایج مدل WRF-Chem نشان داده است که چشمه گسیل، نحوه انتشار و گستردگی مناطق تحت پوشش گردوغبار به خوبی شبیه سازی شده است و مقایسه نتایج تغییرات میزان غلظت ذرات PM10 حاصل از مدل WRF-Chem با داده های دستگاههای سنجش PM10 مرکز پایش آلودگی تهران، دریافتی از اداره کل حفاظت محیط زیست تهران در سپتامبر ۲۰۱۵ برای روزهای گردوغباری بیانگر این واقعیت است که خروجی مدل WRF-Chem تغییرات روزانه غلظت را بخوبی پیش بینی می کند. همانطور که در نتایج شبیه سازی طوفان گردوغبار شدید شرق ایران استفاده از نتایج خروجی مدل WRF-Chem به لحاظ تطابق در زمان وقوع پدیده های گردوغبار شدید تطابق قابل قبولی را با داده های ایستگاه زابل نشان داده است و موفق بودن مدل را در شبیه سازی بخوبی نشان داده است (کارگر و همکاران، ۱۳۹۵). در پژوهش صحرایی و همکاران نیز به منظور اطمینان از نتایج شبیه سازی گردوغبار توسط مدل WRF-Chem، این نتایج با داده های مشاهده ای دید افقی در ایستگاه همدیدی ایلام برای دو مورد طوفان گردوغبار مقایسه شده است و نشان داد نتایج شبیه سازی گردوغبار با داده های دید افقی همخوانی دارد (صحرایی و همکاران، ۱۳۹۸).

در این پژوهش از مدل های عددی جهت تحلیل رفتار گردوغبار استفاده شد در حالی که در بسیاری از نقاط دنیا از روش تفسیر تصاویر ماهواره ای استفاده گردیده است با این تفاوت

که در مورد پژوهش حاضر نتایج، صحت سنجی نیز انجام شده است. با تجربه بدست آمده در این پژوهش پیشنهاد می شود با توجه به امکان شناسایی نقاط منشأ و نشست طوفان گرد و غبار، با استفاده از مدل های شبیه سازی همچون مدل WRF-Chem و مدل HYSPLIT، به مطالعه و مدیریت این نقاط بحرانی با استفاده از روش های جلوگیری از برداشت و کنترل طوفان های گرد و غبار جهت کاسته شدن هرچه بیشتر اثرات زیان بار این پدیده پرداخته شود.

مراجع

- ۱- آبروش، ص.، محمدخان، ش.، ثروتی، م. و قهرودی، م.، ۱۴۰۰، مسیر یابی و بررسی روند حرکت منابع تولید گرد و غبار در شکل گیری تپه های ماسه ای با استفاده از مدل HYSPLIT مطالعه موردی : شرق استان قم، ماسه زار جلالی، نشریه مرتع و آبخیزداری، ۲۷۳(۲): ۲۸۶-۲۷۴
- ۲- اصغری، م.، مشکوتی، ا.، رنجبر، ع. و مرادی، م.، ۱۳۹۹، مطالعه و ارزیابی طرحواره های گسیل گرد و خاک در مدل WRF-Chem توفان شرق و جنوب شرق کشور (مطالعه موردی ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸، نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، ۹۸: ۸۷-۹۸)
- ۳- حبیبی، س. و هورکاد، ب.، ۱۳۹۱، اطلس کلانشهر تهران، سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران، مرکز فضای مجازی تحقیقات سیاسی، دانشگاه تهران. شهرداری تهران، سازمان اطلاعات و فناوری ارتباطات (TMICTO)، ۳۳۱ ص، (<http://atlas.tehran.ir>)
- ۴- حسین حمزه، ن.، فتاحی، ا.، ذوالجودی، م.، غفاریان، پ. و رنجبر سعادت آبادی، ع.، ۱۳۹۵، تحلیل همبندی و دینامیکی پدیده گرد و غبار و شبیه سازی آن در جنوب غرب ایران در تابستان ۱۳۸۴، نشریه تحلیل فضایی و مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ۱، صفحات ۹۱-۱۰۲
- ۵- حسینی، ا. و رستمی، د.، ۱۳۹۷، واکاوی و ردیابی پدیده گرد و غبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل Hysplit و اصول سنجش از دور، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۰۹(۳): ۱۰۳-۱۰۹
- ۶- صحرایی، ج.، مبارک حسن، ا. و محمدی، ن.، ۱۳۹۸، نقش رشته کوه زاگرس بر ترابرد گردوخاک های عراق به غرب ایران با استفاده از مدل WRF/Chem مطالعه موردی، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۳۲: ۱۳۴-۱۱۹
- ۷- فرج زاده، م. و کریمی، ن.، ۱۳۹۲، مبانی هواشناسی ماهواره ای، انتشارات سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاهها (سمت)، مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی، چاپ اول
- ۸- عزیزی، ق.، میری، م. و نبوی، ا.، ۱۳۹۱، ردیابی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال ۲، شماره ۷، بهار ۱۳۹۱، ص ۶۳-۸۱
- ۹- کارگر، ا.، بذاق جمالی، ج.، رنجبر سعادت آبادی، ع.، معین الدینی م. و گشتاسب، ح.، ۱۳۹۵، شبیه سازی و تحلیل عددی طوفان گرد و غبار شدید شرق ایران، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۳، شماره ۴ صفحات ۱۱۹-۱۰۱
- ۱۰- مزیدی، ا.، جعفری زوج، ف.، حیدری، س.، ۱۳۹۴، شبیه سازی طوفان گرد و غبار ۲۸ فوریه ۲۰۰۹ استان فارس با مدل WRF. فصل نامه آب و هواشناسی کاربردی، مقاله ۱۰، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۴۹-۶۸
- ۱۱- محمدی، ف.، کمالی، س. و اسکندری، م.، ۱۳۹۴، ردیابی منابع گرد و غبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۶
- ۱۲- نادری، م.، روشنی، م.، عباسیان، م.، تربتیان، س.، شهبازی، ج.، ۱۳۹۶، گزارش کیفیت هوای تهران ۱۳۹۵، شرکت کنترل کیفیت شهرداری تهران، انتشارات نشر شهر
- 13- Afzali, S. F., (2012), Dust clouds ; A scientific brief on dust in Iran (Source , Damage, Cause and The solution), Journal of Association of Fars Consulting Engineers , Issue 14, pp. 12-15
- 14- Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., Sturman, A., (2014) The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review , Atmospheric Research 138; 152-165
- 15- Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P. and Sturman, A., (2014). "A global satellite view of the seasonal distribution of mineral dust and its correlation with atmospheric circulation", Journal of Dynamics of Atmospheres and Oceans, No. 68; 20-34.
- 16- Azizi, Ghasem, Shamsipour, A., Miri, M., and Safarrad, T.; (2012), "Synoptic and remote sensing analysis of dust events in southwestern Iran". Natural Hazards 64; 2. pp. 1625-1638
- 17- Awadh, S. M., (2012), Geochemistry and mineralogical composition of the airborne particles of sand dunes and dust storms settled in Iraq and their environmental impacts, Environmental Earth Sciences, Volume 66, Issue 8, Pages 2247-2256
- 18- Baldasano, J. M. (2013). "Mineral dust modeling from meso to global scale", Barcelona Supercomputing Center, Evora-Portugal, 1-3 July, pp. 1-77, Website: www.bsc.es.
- 19- Castellani, F. (2007) "Downscaling Meteorological Model Data using WindSim", Wind Sim User Meeting , Department of Industrial Engineering - University of Perugia (ITALY)
- 20- Cavazos Guerra, C. D. C.; (2011), Modeling the atmospheric controls and climate impact of mineral dust in The Sahara Desert . PhD Thesis in Climate Science. University College London.
- 21- Colarco, P.; da Silva, A.; Chin, M. and Diehl, T. (2009), Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-; model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. Journal of Geophysical Research., 115, D14207, doi:10.1029/2009JD012820.
- 22- COMET (Cooperative Program for Operational Meteorology, Education, and Training) Program. (2012). Atmospheric Dust. University Corporation for Atmospheric Research, Website: <https://www.goes-r.gov>
- 23- Draxler, R., R. Draxler, B. Stunder, G. Rolph, A. Stein, and A. Taylor (2016), HYSPLIT4 user's guide Version 4-Last Revision: February 2016, report, NOAA. (Available at http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf)
- 24- Fast, J. D.; Gustafson, W. I.; Easter, R. C.; Zaveri, R.

- Severe dust storms in Central Asia. *Arid Ecosystems*, Volume 3, Issue 4, pp: 227-234
- 33- Peckham, S.E., Grell, G.A., McKeen, S.A., Ahmadov, R., Fast, J.D., Gustafson, W.I., Ghan, S.J., Zaveri, R., Schmitz, R. et al.(2014). "WRF-Chem Version 3.6 Users Guide", NOAA, 8 July 2014, Volume6 , Website: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
- 34- Shan, W., Yin, Y., Lu, H., & Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*. 93, 767-776.
- 35- Sobhani.B , Safarianzengir. V, (2019). Investigation hazard effect of monthly ferrrin temperature on agricultural products in north bar of Iran. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 50 (1): 320-330
- 36- Taheri Shahraiyini . H, Karimi .Kh , Habibi Nokhandan. M , Hafezi Moghaddas . N , (2015). "Monitoring of dust storm and estimation of aerosol concentration in the Middle East using remotely sensed images." *Arabian Journal of Geosciences* Volume 8, Issue 4, pp 2095-2110
- 37- Tiangang, Y.; Siyu, C.; Jianping, H.; Xiaorui, Z.; Yuan, L.; Xiaojun, M. and Guolon, Z.(2019). Sensitivity of simulating a dust storm over Central Asia to different dust schemes using the WRF-Chem model, *Journal Atmospheric Environment*. Volume 207, 15 June, Pages 16-29.
- 38- Woodward, S. (2001). Modeling the atmospheric life cycle and radiative impact of mineral dust in the Hadley Centre climate model, *Journal of Geophysical Research.*, Volume 106, No.D16.
- 39- Xie;j , Yang;ch , Zhou;b, and Huang; q (2010), High-performance computing for the simulation of dust storms, *Computers, Environment and Urban Systems* 34 , 278-290.
- 40- Zakey, S.; Solmon, F. and Giorgi, F. (2006). Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model, *Atmospheric Chemistry and Physics.*, 6, 4687-4704.
- A.; Barnard, J. C.; Chapman, E. G. and Peckham, S. E. (2006). Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research* , Atmospheres, Volume 111, Issue D21.
- 25- Goudie, A. S. (2020). Dust storms and human health. In *Extreme Weather Events and Human Health* :pp 13-24.
- 26- Grell, G., Peckham, S., Schmitz, R., McKeen, S., Frost, G., Skamarok, W. and Eder, B. (2005). "Fully coupled "online" chemistry within the WRF model", *Journal of Atmospheric Environment*, No. 39, pp. 6957-6975.
- 27- Kumar, R., Barth, M.C., Pfister, G.G., Naja, M. and Brasseur, G.P.(2014). "WRF-Chem Simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget", *Atmospheric Chemistry and Physics*, No. 14; 2431-2446.
- 28- Lababpour, A.(2020). The response of dust emission sources to climate change: Current and future simulation for southwest of Iran. *Science of the Total Environment*: Volume 714, 136821
- 29- Li,J, E. Garshick, A. Al-Hemoud, S. Huang, and P. Koutrakis. (2020). Impacts of meteorology and vegetation on surface dust concentrations in Middle Eastern countries. *Science of the Total Environment*: Volume 712, 136597.
- 30- Lee. J, Gill. T, Mulligan. K , Dominguez Acosta, M , Perez. A; (2009), Land use/land cover and point sources of the 15 December 2003 dust storm in southwestern North America; *Geomorphology*, Volume 105, Issues 1-2, Pages 18-27
- 31- Nickovic, S.; Kallos, G.; Papadopoulos, A. and Kakaliagou, O. 2001. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106=(D16), 18113-18129.
- 32- Orlovsky .N. S , Orlovsky. L, Indoitu.R (2013)

Application of WRF-Chem and HYSPLIT Models In The Study of Dust Hotspot and path (Cases study: The Dust Storm On September, 2015 In The Metropolitan Tehran)

**Gholamreza Nabi Bidhendi¹, Soheila Javanmard², Gholamreza Zehtabian³,
Mousavi Seyedeh Masoumeh^{4*}**

¹ Professor at Faculty of Environment, University of Tehran, Iran

² Associated Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Institute, Tehran, Iran

³ Professor at Agriculture & Natural resources Campus, University of Tehran, Iran

⁴ Ph.D. Environmental Planning, University of Tehran; Expert of Environmental Research Institute; Iran

*Corresponding Author Email: mousavi_sm@ut.ac.ir

Received: 02 November 2020 , accepted: 28 January 2021

ABSTRACT

Pollution caused by dust particles has been increasing recently in different parts of the world, including Iran. According to the published reports of meteorological and environmental protection organizations, the metropolis of Tehran is no exception to this rule. For example, the metropolis was severely affected by the storm that occurred between September 1 and 3, 2015. Accordingly, this study was conducted to investigate and identify dust sources in Tehran during the above stormy days. Storm data were extracted using data from Iran Meteorological Organization, the Iranian Department of Environment, and FNL re-analyzed data from the NCEP and NCAR archives. Dust behavior and concentrations were then analyzed using the Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with Chemistry (WRF-Chem). The path of dust particles was also traced using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT). The results of the models used indicate that the internal sources of the storm dust are east and southeast of Tehran and that its regional sources are Iraq, Saudi Arabia, and Turkmenistan. According to the tracking of the storm using HYSPLIT, after entering Iran, the storm covered the cities of Gorgan, Shahroud, Semnan, Garmsar, Shahriyar, Tehran, Karaj, and Qom, and finally deposited in Qom. Besides, the results extracted from the WRF-Chem suggested that the peak dust concentration in Tehran (200-51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) occurred on September 2, 2015. This concentration is classified as unhealthy. Finally, the model outputs were compared with dust concentration data measured by the Head Office of the Tehran Province Environmental to validate the numerical model. The WRF-Chem results indicated that the emission source, the mode of emission, and the extent of the dust-covered areas were well simulated, making it possible to make an acceptable prediction.

Keywords: Dust Storm, WRF-Chem Model, HYSPLIT Model, Tehran

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Nabi Bidhendi, Gh.; Javanmard, S.; Zehtabian, Gh.; Mousavi Seyedeh, M. (2021). Application of WRF-Chem and HYSPLIT Models In The Study of Dust Hotspot and path (Cases study: The Dust Storm On September, 2015 In The Metropolitan Tehran). J. Meteorol. Atmos. Sci., 4(1): 30-44

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAs Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

