

اصلاح و ارزیابی چشمه‌های گردوخاک ناشی از فرسایش بادی در مدل WRF/Chem در غرب آسیا

امیرحسین نیک‌فال^{۱*}، عباس رنجبر سعادت‌آبادی^۲، سحر تاج‌بخش مسلمان^۳ و محمد مرادی^۲

^۱ دانشجوی دکتری هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۳ استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹)

چکیده

در این پژوهش با هدف ارتقاء نتایج به‌کارگیری مدل WRF/Chem برای ارزیابی غلظت گردوخاک، با استفاده از روش سنجش از دور (داده‌های ماهواره‌ای SEVIRI) و محاسبه پارامترهای فیزیکی مؤثر بر انتشار گردوخاک مانند سرعت باد و رطوبت خاک، مقادیر پارامتر فرسایش‌پذیری خاک که تعیین‌کننده توزیع چشمه‌های گردوخاک است، برای غرب آسیا مجدداً برآورد شد. از مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق، تلفیق بسامد رخدادهای گردوخاک با عوامل مؤثر بر تلاطم جوئی (سرعت اصطکاکی و سرعت همرفتی) و نیز سرعت باد ۱۰ متری است. با توجه به نتایج، وزن‌دهی و تصحیح بسامد رخدادهای گردوخاک در شبیه‌سازی دقیق‌تر غلظت گردوخاک در موارد مطالعاتی مؤثر است. مهم‌ترین چشمه‌های شناسایی شده در نقشه جدید، چشمه‌های گردوخاک مربوط به عراق، سوریه، شرق ایران، سواحل عمان و دریاچه آرال است. مناطق زیادی از جمله صحرای ترکمنستان و جنوب خلیج فارس که در نقشه پیش‌فرض، چشمه‌های گردوخاک محسوب می‌شدند، در نقشه جدید تغییر یافته‌اند. نتایج شبیه‌سازی برخی رخدادهای گردوخاک با استفاده از نقشه تصحیح‌شده و مقایسه آن با نقشه پیش‌فرض از نتایج رضایت‌بخشی برخوردار بوده است؛ زیرا بیش‌برآورد شدید غلظت ذرات با استفاده از نقشه پیش‌فرض تا حد زیادی برطرف شده است و از طرف دیگر، توزیع غلظت ذرات نیز تطابق مناسب‌تری را با واقعیت نشان می‌دهد که در قیاس با کل عملکرد مدل می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. استفاده از مدل تابشی RTTOV در بررسی تغییرات کلی در دمای روشنایی شبیه‌سازی شده از دیگر نوآوری‌های این تحقیق است. نتایج این تحقیق می‌تواند در سامانه‌های عملیاتی پیش‌بینی گردوخاک استفاده شود. الگوی جدید چشمه‌های گردوخاک قبل از اجرای مدل WRF/Chem بر فایل geo اعمال و چشمه‌های گردوخاک جدید جایگزین حالت پیش‌فرض شد.

واژه‌های کلیدی: مدل WRF/Chem، چشمه‌های گردوخاک، مدل RTTOV، داده‌های ماهواره‌ای SEVIRI

۱ مقدمه

بسیاری از توفان‌های گردو خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک با پوشش گیاهی ضعیف، خاک فرسایش‌پذیر، سرعت زیاد باد و به همراه رسوبات تجمع‌یافته رخ می‌دهند. در دهه‌های اخیر، مناطق وسیعی از غرب آسیا و خاورمیانه، به‌ویژه جنوب غرب و جنوب شرق ایران شاهد افزایش چشمگیر تعداد رخداد‌های گردو خاک بوده است (بلورانی و همکاران، ۲۰۱۴ و نبوی و همکاران، ۲۰۱۶). با وجود اینکه خاک‌های فرسایش‌پذیر نقش تعیین‌کننده‌ای در گسیل ذرات گردو خاک معدنی دارند، شناسایی دقیق از نظر کمی و کیفی و توزیع مکانی مناطق فرسایش‌پذیر همواره از چالش‌های اصلی در پژوهش‌های آلودگی هوا و گردو خاک بوده است. شار گسیل گردو خاک معمولاً با استفاده از تابع چشمه ذرات محاسبه می‌شود. چشمه‌های ذرات گردو خاک در مقیاس‌های کوتاه‌مدت تقریباً ثابت هستند، اما پس از گذشت ده سال یا بیشتر می‌توانند به‌صورت معنی‌داری تغییر کنند (کوون و فونگ، ۲۰۰۸؛ لی و همکاران، ۲۰۰۹؛ واکر و همکاران، ۲۰۰۹؛ بولارد و همکاران، ۲۰۱۱ و سائو و همکاران، ۲۰۱۵).

عوامل بروز خطا در مدل‌های پیش‌بینی میزان آلاینده‌گی جو می‌توانند ناشی از انواع عدم قطعیت در مدل، مانند تغییرات روزانه در میزان گسیل ذرات باشند (فریبرگ و همکاران، ۲۰۱۷). اگر وضعیت گسیل ذرات و گازها به جو به‌صورت یکنواخت در مدل وارد شود، می‌تواند عاملی در بروز خطا در پیش‌بینی‌های نهایی غلظت ذرات باشد. با استفاده از ماژول‌های مربوطه، مدل WRF/Chem این توانایی را دارد که وضعیت گسیل ذرات به جو را به‌صورت برخط در نظر بگیرد. این موضوع به افزایش دقت در شبیه‌سازی ذرات معلق جو منجر می‌شود. ضعف مدل‌ها در بررسی پیچیدگی‌های کوهساری در منطقه و عدم قطعیت در لحاظ کردن شرایط اولیه و مرزی هواشناسی از دیگر عوامل وقوع خطا در شبیه‌سازی نهایی

غلظت ذرات معلق جو است. همچنین در شبیه‌سازی‌های کوتاه‌مدت چندروزه، وجود آثار گسیل ذرات از روزهای قبل که می‌تواند میدان‌های گسیل ذرات در دوره شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار دهد، از موارد دیگر بروز خطا است. هرچه به میزان طول دوره شبیه‌سازی افزوده شود، از مقدار این خطا کاسته می‌شود (سایده و همکاران، ۲۰۱۱). هدف اصلی این تحقیق، برآورد عوامل ثابت یا جغرافیایی مؤثر بر گردو خاک (فرسایش‌پذیری خاک) با در نظر گرفتن متغیرهای هواشناسی مؤثر بر انتشار گردو خاک است. برآوردن این هدف، نقش اساسی در ارتقاء و کاهش خطای خروجی مدل WRF/Chem از غلظت گردو خاک ایفا می‌کند.

برای محاسبه و تخمین تابع چشمه ذرات گردو خاک، ژینو و همکاران (۲۰۰۱) رابطه (۱) را تعریف کردند. مناطق فرسایش‌پذیر موسوم به تابع چشمه ژینو (Ginoux source function) با استفاده از این رابطه محاسبه و در مدل WRF/Chem استفاده می‌شود:

$$S = [(Z_{\max} - Z_i)/(Z_{\max} - Z_{\min})]^5 \quad (1)$$

S برابر با احتمال تجمع رسوبات در نقطه i و در ارتفاع Z_i است. مقدار Z_i متناسب با اختلاف بین Z_{\max} و Z_{\min} در محدوده جغرافیایی به اندازه ۱۰ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی نرمال شده است. در سال‌های گذشته، روش‌های گوناگونی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای برای افزایش دقت در شناسایی توده‌های گردو خاک و تعیین چشمه‌های گردو خاک معرفی شده است (اکرم، ۱۹۸۹، ۱۹۹۷؛ تورس و همکاران، ۱۹۹۸؛ هسو و همکاران، ۲۰۰۴؛ روسکونسکی و لیو، ۲۰۰۵؛ کریمی و همکاران، ۲۰۱۲ و صمدی و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهشی از پراسپرو و همکاران (۲۰۰۲)، فراوانی رخداد شاخص هواویز (AI) با مقدار بیشتر از ۷/۰ از سنجنده TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)، معیار

پژوهش‌هایی که در منطقه ایران انجام گرفته است، می‌توان به مطالعه خسرو سرشکی و همکاران (۱۳۹۳) اشاره کرد که در آن آهنگ گسیل گردو خاک در ایران با دو طرح‌واره MBA (مارتیکورنا و همکاران، ۱۹۹۷)؛ برماگمتی و همکاران، ۱۹۹۵ و آلفارو و همکاران، ۱۹۹۷) و شائو برای یک رخداد شدید گردو خاک در منطقه ایران در ۲۴ مه ۲۰۱۲ شبیه‌سازی شد. نتیجه شبیه‌سازی آن بود که شار قائم گردو خاک طرح‌واره MBA در بعضی نواحی بزرگ‌تر و در سایر مناطق کوچک‌تر از طرح‌واره شائو است. در پژوهش رضازاده و همکاران (۲۰۱۳)، مقدار گسیل گردو خاک برآورد شده با مدل WRF/Chem در منطقه خاورمیانه با استفاده از سری داده‌های بهبودیافته پارامترهای سطح بررسی شد. استفاده از داده‌های جدید، از مقدار خطا در شناسایی چشمه‌های گردو خاک و نیز خطا در مقدار گسیل و توزیع گردو خاک کاست. اگرچه شاخص هواویز (AI) سنجنده TOMS زمان زیادی از داده‌برداری را پوشش می‌دهد (از ۱۹۷۹ تا به اکنون) و برای مطالعات اقلیمی داده خوبی به نظر می‌رسد، برخی از پژوهشگران (برای مثال مهوولد و دوفرسن، ۲۰۰۴) به این نتیجه رسیدند که شاخص AI به ارتفاع ذرات گردو خاک حساس است. این موضوع باعث افزایش مقادیر AI در مناطق بیابانی و در طول فصل‌های گرم سال می‌شود. به عبارت دیگر، مقادیر زیاد AI لزوماً نشان‌دهنده چشمه گردو خاک نیست؛ زیرا عواملی مانند مقادیر زیاد دمای سطح و ارتفاع لایه مرزی می‌توانند باعث افزایش ارتفاع مرکز جرم توده هواویزها شوند؛ بنابراین به جای استفاده از مقادیر AI به صورت مستقیم یا با حد آستانه ثابت، حد آستانه متغیر از مقادیر AI برای شناسایی رخداد‌های گردو خاک پیشنهاد شد.

از مهم‌ترین تصحیحاتی که در چشمه‌های گردو خاک مدل WRF/Chem انجام شده است می‌توان به پژوهش نبوی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. در این پژوهش با

شناسایی چشمه گردو خاک فرض شد و این نتیجه به دست آمد که مناطق پست از نظر ارتفاعی از چشمه‌های اصلی انتشار ذرات گردو خاک محسوب می‌شوند. بر طبق این تحقیق تمامی غرب آسیا در ماه ژوئیه یک چشمه گردو خاک عظیم است.

کومار و همکاران (۲۰۱۴) به این نتیجه رسیدند که محاسبه تابع چشمه گردو خاک (S) به داده‌های مشاهداتی زیادی از میزان تجمع رسوبات در منطقه مورد مطالعه نیاز دارد. به دلیل کمبود داده‌های دیدبانی، فراسنج (S) به صورت غیرمستقیم و بر مبنای شرایط عارضه‌نگاری تخمین زده می‌شود. تابع چشمه گردو خاک ژینو، اولین بار در مدل هواویز GOCART و بر سطح خاک عریان اعمال شد (تاد و همکاران، ۲۰۱۲). سطح خاک عریان بر مبنای داده‌های پوشش سطح مانند AVHRR می‌تواند تعیین شود (تاوونشن و دی‌فرایز، ۱۹۹۴). کیم و همکاران (۲۰۱۳) دریافتند پوشش گیاهی ثابت نمی‌تواند تغییرات سالیانه و فصلی را در سطح خاک عریان به خوبی نشان دهد؛ بنابراین از شاخص NDVI با دوره‌های زمانی پانزده روزه حاصل از سنجنده AVHRR استفاده کردند تا نقشه‌ای متغیر از پوشش خاک عریان (با مقدار NDVI کمتر از ۱۵/۰) و تابع چشمه گردو خاک تولید کنند. نتایج کار حاکی از تصحیح چشمگیر در شبیه‌سازی با طرح‌واره GOCART در مناطقی بود که به صورت فصلی از نظر میزان سطح خاک عریان تغییر می‌کنند. در غرب آسیا به دلیل وجود مناطق وسیع بیابانی، تغییرات فصلی چندانی در وضعیت پوشش گیاهی رخ نمی‌دهد و بنابراین اثر چندانی بر تابع چشمه گردو خاک ژینو ندارد.

به طور خلاصه، در تمامی روش‌ها و الگوریتم‌های بیان شده، برای تعیین مناطقی که بیشترین اثر و مشارکت را در گسیل گردو خاک دارند، از ویژگی‌های سطح زمین مانند وضعیت ریخت‌شناسی عوارض زمین، هیدرولوژی و ویژگی‌های پوشش گیاهی استفاده می‌شود. از

با مقادیر بزرگ‌تر از ۲ در نظر گرفته شد. این تابع چشمه گردوخاک جدید، مرز بین عراق و عربستان سعودی و شمال غرب عراق را دو منطقه اصلی چشمه‌های گردوخاک در غرب آسیا معرفی می‌کند. مطالعات دیگری با روش‌های مختلف، چشمه دوم را منبع اصلی گردوخاک در منطقه معرفی می‌کنند (بلورانی و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴؛ سائو و همکاران، ۲۰۱۵ و مریدنژاد و همکاران، ۲۰۱۵). از طرف دیگر، چشمه‌ای دیگر در شمال عربستان سعودی به‌عنوان منبع مهمی از توفان‌های گردوخاک شناسایی شد. سایر مطالعات نشان داد تابع جدید چشمه گردوخاک که ژینو معرفی کرد، افزایش درخور توجهی در دقت شبیه‌سازی‌های گردوخاک حاصل از مدل WRF/Chem نشان نمی‌دهد. پاراجولی و همکاران (۲۰۱۴) یکی از آخرین توابع جهانی چشمه‌های گردوخاک را با نرمال‌سازی ضریب همبستگی اسپیرمن بین سرعت باد ۱۰ متری و متغیر عمق نوری سنجنده مادیس با تفکیک مکانی ۱ درجه به‌دست آوردند. با توجه به اینکه سرعت باد و غلظت گردوخاک بسیار متغیر و وابسته به تفکیک مکانی شبکه نقاط هستند، به‌نظر نمی‌رسد تحلیل داده‌های خام مکانی در مقیاس زمانی ماهانه دقت کاملی در تعیین شرایط لحظه‌ای در حین رخداد گردوخاک داشته باشد. علاوه‌براین، استفاده از ضریب همبستگی برای چشمه گردوخاک به نتایج ناپذیرفتنی در مناطق فرسایش‌ناپذیر مانند کوه‌های زاگرس در غرب ایران منجر می‌شود (گریوانی و همکاران، ۲۰۰۱). به عبارت دیگر، این روش مقادیری از فرسایش‌پذیری را حتی برای خشکی‌های بدون خاک فرسایش‌پذیر نشان می‌دهد.

۲ روش تحقیق

در این طرح، با استفاده از محصول Dust RGB سنجنده SEVIRI، رخداد گردوخاک به‌صورت یکپارچه در

استفاده از داده‌های ماهواره مادیس (MODIS)، تعداد رخداد‌های گردوخاک در حوضه مطالعاتی عراق بررسی شد. در این روش، مقدار عمق نوری بیش از یک مقدار معین، رخداد گردوخاک فرض و تعداد رخداد‌های گردوخاک تعیین شد. از چشمه‌های گردوخاک جدید که با WASF نام‌گذاری شده است، در چند رخداد گردوخاک در شبیه‌سازی‌های مدل WRF/Chem استفاده شد که با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، دقت مدل WRF/Chem را در بررسی غلظت گردوخاک به‌طور نسبی افزایش داد. پژوهش مشابه دیگری را کریمادس و همکاران (۲۰۱۷) برای تصحیح چشمه‌های گردوخاک با استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های زمینی انجام دادند. در روش اول با استفاده از داده‌های عارضه‌نگاری SRTM، دقت عارضه‌نگاری یا به عبارت دیگر، تابع چشمه گردوخاک ژینو در حوضه شبیه‌سازی مدل WRF برای منطقه آرژانتین افزایش یافت. در حالت دوم با استفاده از داده‌های عمق نوری مادیس، چشمه‌های جدید گردوخاک شناسایی شد. مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان داد چشمه‌های گردوخاک شناسایی‌شده حاصل از مادیس از دقت بیشتری برخوردار بودند. در پژوهش شپانسکی و همکاران (۲۰۰۷) نیز با استفاده از داده‌های سنجنده SEVIRI، موقعیت چشمه‌های گردوخاک برای شمال آفریقا شناسایی شد. این پژوهش نظری و نه کاربردی، به‌گونه‌ای انجام شد که بتوان از آن در یک مدل هواشناسی استفاده کرد.

ژینو و همکاران (۲۰۱۲) الگوریتم جدیدی را برای شناسایی چشمه‌های گردوخاک پیشنهاد دادند که در آن به جای شاخص AI از فراسنج عمق نوری حاصل از سنجنده مادیس استفاده و با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی و نوری هواویزها، عمق نوری ذرات گردوخاک با استفاده از فراسنج AOD و در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ استخراج شد. معیار شناسایی چشمه‌های گردوخاک، بسامد رخداد

در سامانه‌های پیش‌بینی میان‌مقیاس و همچنین درک چگونگی عملکرد این مدل‌ها است. یکی از اجزای اصلی موجود در مدل پیش‌بینی عددی WRF، بخش مربوط به طرح‌واره‌های فیزیکی مدل است که به پارامترسازی فرایندهای فیزیکی جوّی در مقیاس شبکه‌ای و زیرشبکه‌ای اختصاص دارد. بخش فیزیک در مدل WRF جدا از بخش دینامیک است. زیرروال‌هایی برای آماده‌سازی و تعدیل متغیرهای فیزیکی در مدل جهت اختصاص متغیرهای فیزیکی مورد نیاز از قبیل دما، فشار، ارتفاع ژئوپتانسیلی، ضخامت لایه و سایر متغیرهای جوّی به نقاط شبکه تعبیه شده‌اند و هسته فیزیکی، میدان‌های سرعت، دمای پتانسیل و میدان‌های سرعت باد، دمای پتانسیل و رطوبت را محاسبه می‌کند.

مدل WRF/Chem (گرل و همکاران، ۲۰۰۵) مبتنی بر مدل WRF است. در واقع مدل WRF/Chem با اضافه شدن بخش مربوط به شبیه‌سازی فرایندهای شیمیایی به صورت جفت‌شده با مدل WRF اجرا می‌شود. سامانه‌های مدل‌سازی کیفیت هوا، اغلب گستره‌ای از فرایندهای جفت‌شده فیزیکی و شیمیایی جوّ مانند انتقال، نشست، گسیل، تبدیلات شیمیایی، برهم‌کنش بین ذرات معلق جوّی، تابش و فرایندهای مرتبط با آن را در محاسبات مدل وارد می‌کنند. تمام انتقالات ذرات شیمیایی به صورت برخط در مدل محاسبه می‌شود. شار جریان ذرات گازی و ریزگردها از جوّ به سطح زمین تابعی از غلظت ذرات و تغییرات زمانی و مکانی سرعت نشست است که با سه ویژگی مقاومت آیرودینامیکی، مقاومت زیرسطحی و مقاومت سطحی متناسب است. وسلی (۲۰۰۷) مقاومت سطحی را پارامترسازی کرد. در آن روش، مقاومت سطحی با محاسبه مقاومت سطوح خاکی و گیاهی به دست آمد. مشخصات گیاهی از کاربری اراضی و فصل سال به دست می‌آید. مقاومت سطحی همچنین به عواملی مانند ضریب انتقال و فعالیت گاز و میزان حلالیت

منطقه مورد مطالعه که دربرگیرنده افغانستان، پاکستان، ایران، عراق و شبه‌جزیره عربستان است، با دقت زمانی ۱۵ دقیقه و دقت مکانی ۳ کیلومتر شناسایی و در تصحیح چشمه‌های گردو خاک استفاده شد. به بیان دیگر، از پارامتر دمای روشنایی در تعیین جوّ حامل گردو خاک و تفکیک آن از جوّ بدون گردو خاک استفاده شد. در مرحله اول، ماه‌های گرم (آوریل تا سپتامبر) از دو سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، با فراوانی‌های مختلف در رخدادهای گردو خاک تعیین و به عنوان دوره‌های زمانی مبنا در تصحیح میدان فرسایش خاک یا تابع چشمه ذرات گردو خاک در نظر گرفته شد. در نهایت، داده‌های دمای روشنایی برای این دوره‌های زمانی منتخب تحلیل شد. فراوانی بیشتر رخداد گردو خاک برای یک منطقه خاص به مفهوم احتمال بیشتر تجمع رسوبات در منطقه و در نتیجه، فرسایش‌پذیری بیشتر خاک در آن محدوده است. مقادیر فراوانی رخداد گردو خاک با استفاده از بیشینه مقدار فراوانی رخدادهای گردو خاک، نرمال و به صورت ضریبی که نشان‌دهنده فرسایش خاک است، در نقشه جدید فرسایش خاک منطقه اعمال شد. پس از تعیین چشمه‌های جدید گردو خاک، این چشمه‌ها به حوضه شبیه‌سازی در مدل WRF/Chem اضافه و جایگزین چشمه‌های پیش‌فرض می‌شوند. سپس می‌توان مدل را با چشمه‌های جدید اجرا کرد. محدوده مورد مطالعه که غرب آسیا را دربرمی‌گیرد، در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱-۲ مدل‌ها و داده‌ها

۱-۱-۲ مدل عددی WRF/Chem

مدل عددی WRF (Weather Research and Forecasting) (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۱۹)، یک مدل منطقه‌ای و میان‌مقیاس جوّی است. این مدل علاوه بر توسعه نسل بعدی مدل‌های میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوا و سامانه‌های گوارد داده‌ها، عامل پیشرفت و افزایش کارایی

گاز در آب بستگی دارد.

شبه‌سازی و پیش‌بینی وضعیت هوا، اجزا و پیچیدگی‌های بسیاری از جمله پارامترهای هواشناسی مانند سرعت و جهت باد، اغتشاشات جوئی، تابش، وضعیت ابرها، بارش و فرایندهای شیمیایی مانند گسیل، نشست و انتقال را دربرمی‌گیرد. اتمسفر در حالت واقعی، تلفیقی از واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی است. واکنش‌های شیمیایی می‌توانند با تغییر دادن بودجه تابشی بر وضعیت هواشناسی مؤثر باشند؛ همانند ریزگردها که می‌توانند به‌عنوان هسته‌های تراکم در ابرها عمل کنند. توده‌های ابر و بارش‌های جوئی تأثیر درخور توجهی بر فرایندهای انتقال و حذف ذرات معلق جوئی دارند. همچنین تغییرات محلی در سرعت باد و امواج و اغتشاشات صورت گرفته می‌تواند بر نحوه انتقال ذرات مؤثر باشد.

مدل WRF یا WRF/Chem که معمولاً برای شبه‌سازی‌های چندروزه استفاده می‌شود، یک مدل هواشناسی منطقه‌ای است به‌ویژه برای سامانه‌های عملیاتی که روزانه اجرا می‌شوند. اگر از نظر سخت‌افزاری محدودیتی وجود نداشته باشد، این مدل برای شبه‌سازی رخدادهای گذشته می‌تواند به‌صورت بلندمدت (چند ماه) اجرا شود. اجرای مدل WRF/Chem برای گردو خاک از نظر زمانی تفاوت چندانی با اجرای مدل WRF ندارد، ولی در صورتی که مدل WRF/Chem با استفاده از داده‌های جهانی انتشار و جهت شبه‌سازی آلودگی شهری (آلاینده‌های گازی غیر از گردو خاک) اجرا شود، چند برابر مدل WRF زمان‌بر خواهد بود.

۲-۱-۲ طرح‌واره گردو خاک GOCART

مدل GOCART (لوگراند و همکاران، ۲۰۱۹) که مدل عمومی هواویز در مدل جفت‌شده WRF/Chem است، رفتار اجزای اصلی هواویزهای جوئی مانند گردو خاک، نمک، سولفات و کربن سیاه را شبه‌سازی می‌کند. این

مدل که برای شبه‌سازی غلظت گردو خاک به سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، سرعت اصطکاکی آستانه و ویژگی فرسایش‌پذیری خاک نیاز دارد، در معادله (۲) برای دسته‌بندی با قطر p نشان داده شده است:

$$F_p = CS_s p u^2 (u - u_t) \quad \text{if } u > u_t \quad (2)$$

که C ضریب ثابت با مقدار ۱ است. s_p نسبت هریک از ذرات در خاک است. u و u_t به ترتیب سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و سرعت اصطکاکی آستانه در فرسایش خاک هستند. S تابع فرسایش‌پذیری خاک است که در این تحقیق با روشی نوین برآورد می‌شود.

۲-۱-۳ داده‌های ماهواره‌ای SEVIRI

در این تحقیق ابزار اصلی برای رصد حرکت توده‌های گردو خاک و شناسایی منطقه انتشار ذرات، تصاویر سنجنده SEVIRI از ماهواره MSG-1 است. این سنجنده (اوتکین و همکاران، ۲۰۰۹) یازده باند در طول موج‌های مرئی، فروسرخ و گرمایی دارد. سه طول موج ۷/۸، ۱۰/۸ و ۰/۱۲ میکرومتر به‌صورت عمده در منطقه پنجره جوئی قرار دارند و بدون تغییر یا جذب می‌توانند از جو زمین عبور کنند؛ بنابراین سنجه مناسبی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های سطح زمین و متغیرهای لایه مرزی مانند توده‌های گردو خاک هستند. برای شناسایی توده گردو خاک با استفاده از تصاویر سنجنده SEVIRI، ترکیبی از سه باند مذکور به تصاویر RGB رنگی تبدیل و حجم گردو خاک با مناطقی به رنگ صورتی (در هنگام روز) نمایش داده می‌شود. رابطه تبدیل داده‌های طول موج‌های مذکور به هریک از رنگ‌های قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B) عبارت است از (بنکس و همکاران، ۲۰۱۸):

$$R = \frac{(T_{B12.0} - T_{B10.8}) - \min_R}{\max_R - \min_R}$$

$$G = \left(\frac{(T_{B10.8} - T_{B8.7}) - \min_G}{\max_G - \min_G} \right)^{0.4} \quad (3)$$

$$B = \frac{T_{B10.8} - \min_B}{\max_B - \min_B}$$

۴-۱-۲ داده‌های بازتحلیل ERA5

همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، شناسایی و استخراج چشمه‌های گردو خاک از داده‌های محصول Dust RGB به‌تنهایی نمی‌تواند معیار کاملاً دقیقی برای تصحیح پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک در محدوده مطالعاتی باشد؛ از این رو جهت وزن‌دهی به هر کدام از چشمه‌های گردو خاک شناسایی شده از داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود. برای محاسبه این داده‌ها، یا به عبارت دیگر برای محاسبه سرعت‌های اصطکاکی و سرعت همرفتی از داده‌های بازتحلیل ERA5 (هرسباخ، ۲۰۱۶)، که به‌طور جهانی در دسترس است (<https://cds.climate.copernicus.eu>)، استفاده شد. داده‌های ERA5 با استفاده از روش داده‌گواری 4D-VAR با سامانه یکپارچه پیش‌بینی عددی ECMWF در ۱۳۷ تراز فشاری جوئی (سیگما) در راستای قائم با فشار ۰/۰۰۱ پاسکال در بالاترین تراز قائم به‌صورت جهانی اجرا می‌شود. داده‌های جوئی در دسترس در این ترازها در ۳۷ تراز فشاری، ۱۶ دمای پتانسیل مختلف و یک تراز تاوایی پتانسیلی نیز درون‌یابی می‌شوند. مدل یکپارچه پیش‌بینی ECMWF با یک مدل خاک و یک مدل موج اقیانوسی جفت شده است. از پارامترهای حاصل از مدل خاک به‌عنوان پارامترهای سطح استفاده می‌شود. مدل ERA5 حاوی داده‌های بازتحلیل با تفکیک زیاد (۳۱ کیلومتر) است. بیشتر داده‌های بازتحلیل به‌صورت داده‌های پیش‌بینی نیز در دسترس هستند. برخی از متغیرهای پیش‌بینی در قالب مقادیر میانگین و تجمعی تولید می‌شوند که در بایگانی خروجی داده‌های بازتحلیل وجود ندارد.

۵-۱-۲ مدل تابش RTTOV

مدل RTTOV (هاکینگ و همکاران، ۲۰۲۱ و ساندرز و همکاران، ۲۰۱۸) یک مدل انتقال تابش سریع برای سنجنده‌های طول موج ریزموج، فروسرخ و مرئی است

که کاربردهای بسیاری از جمله شبیه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای دارد. داده‌های ورودی مدل RTTOV، نیم‌رخ قائم فشار، دما و بخار آب و در صورت در دسترس بودن داده‌ها، غلظت گازها و ذرات معلق جوئی به همراه شرایط سطح زمین است. مدل تابش، دمای روشنایی و تابش بالای جو را برای طول موج‌های یک سنجنده خاص، مانند سنجنده SEVIRI از ماهواره MSG شبیه‌سازی می‌کند. باید توجه داشت تمامی سنجنده‌ها با مدل RTTOV پشتیبانی نمی‌شوند، اما همواره در نسخه‌های جدیدتر مدل، سنجنده‌های بیشتری اضافه می‌شود. محاسبات انتقال تابش در مدل RTTOV در ترازهای فشاری انجام می‌شود که کاربر برای ورودی مدل تعریف می‌کند. در نسخه‌های ابتدایی مدل RTTOV داده‌های ورودی در ترازهای فشاری و ترازهایی که در آنها محاسبات انجام می‌شد یکسان بود. این روش باعث می‌شود محاسبات دقیق‌تری برای تابش‌های متأثر از ابرناکی در بام ابر انجام شود. برای این منظور نیم‌رخ‌های ورودی و خروجی باید از ترازهایی که کاربر تعریف کرده است به ترازهایی درون‌یابی شود که ضرایب مدل RTTOV برای آن تعریف شده است (ماتریکاردی، ۲۰۰۸). گزینه‌های مختلفی برای درون‌یابی موجود است که می‌تواند یک شبکه ثابت از ترازهای فشاری یا یک شبکه متغیر از ترازهای فشاری را برای اعمال مختصات سیگما در نظر بگیرند و در مدل‌های عددی وضع هوا استفاده شوند.

جهت محاسبه اثر نوری ذرات معلق جوئی، نیاز است تا مقادیر غلظت ذرات برای اجرای مدل فراهم شود. به همین دلیل ذرات معلق جوئی در مدل RTTOV بر مبنای نوع و اندازه قطر ذرات دسته‌بندی می‌شوند. یکی از دسته‌بندی‌هایی که برای ذرات معلق جوئی استفاده می‌شود، مدل CAMS است که برای انواع هواویزها از جمله گردو خاک معدنی، نمک دریا و سولفات آمونیم

بر انتشار گردو خاک است، عامل تلاطم و گسیل ذرات از سطح به جو است. روش محاسبه سرعت اصطکاکی (u_*) مبتنی بر نظریه تشابهی مومین اوبوخوف در رابطه (۴) نشان داده شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۷):

$$u_* = \kappa \bar{U}(z) \left[\ln \left(\frac{z_u}{z_0} \right) - \Psi_M \left(\frac{z_u}{L} \right) + \Psi_M \left(\frac{z_0}{L} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

که $k=4/0$ ثابت فون کارمن است. \bar{U} سرعت میانگین، Ψ_M تابع تصحیح پایداری لایه سطحی با در نظر گرفتن اندازه حرکت، پارامتر z_0 طول زبری و z_u ارتفاع اندازه گیری سرعت باد میانگین است. تابع تصحیح پایداری مطابق با روش پروتسارت (۱۹۹۲) با رابطه (۵) برآورد می شود:

$$\Psi_m(y) = \int_{y_0}^y [1 - \Phi_m(x)] dx \quad (5)$$

متغیرهای y_0 و Φ_m با روابط زیر تعریف می شوند:
 $y_0 = -z_0/L$

$$\Phi_m(y) = (a + by^n)/(a + y^n) + cy^{1/3} \quad (6)$$

که z_0 زبری سطح است و ضرایب a ، b ، c و n ثابت هستند. L طول اوبوخوف و y تابعی از ارتفاع است.

یکی دیگر از متغیرهای جوی نشان دهنده عامل تلاطم در انتشار گردو خاک، متغیر سرعت همرفتی است (رابر و واتسون، ۱۹۹۱):

$$w_* = \left[\frac{ghH_v}{\rho C_p T_v} \right]^{1/3} \quad (7)$$

که g ثابت گرانش، h ارتفاع لایه مرزی، H_v شار گرمای محسوس سطحی، ρ چگالی هوا، C_p گرمای ویژه هوا و T_v دمای مجازی است.

۳-۲ برآورد فعالیت چشمه های گردو خاک در غرب آسیا

در این بخش مراحل برآورد ضریب فرسایش پذیری یا به عبارت دیگر، مراحل برآورد فعالیت چشمه های گردو خاک تشریح می شود. چشمه های گردو خاک در مدل

در فرایند شبیه سازی کارایی دارد. به منظور درستی سنجی نتایج اجرای مدل WRF/Chem برای غلظت گردو خاک، مقادیر غلظت گردو خاک در خروجی مدل WRF/Chem متناسب با اندازه قطر ذرات با جدول CAMS تطبیق داده می شود. در مدل WRF/Chem ذرات گردو خاک به پنج دسته از نظر قطر ذرات تقسیم بندی می شوند؛ بنابراین این پنج دسته در سه دسته از ذرات گردو خاک معدنی در مدل CAMS هماهنگ می شوند تا بتوان از آنها برای داده ورودی مدل RTTOV جهت شبیه سازی دمای روشنایی متأثر از گردو خاک استفاده کرد.

۲-۲ متغیرهای هواشناسی مؤثر بر انتشار گردو خاک

برای محاسبه متغیرهای هواشناسی مؤثر در فرایند انتشار گردو خاک از داده های حاصل از خروجی مدل جهانی ERA5 استفاده شد.

۱-۲-۲ متغیرهای سرعت اصطکاکی، سرعت همرفتی و سرعت باد ۱۰ متری

برای تعیین دقیق تر میزان فعالیت چشمه های گردو خاک، لازم است هرکدام از چشمه های شناسایی شده با متغیرهای مؤثر در انتشار گردو خاک وزن دهی شوند. در این بخش روش برآورد فعالیت چشمه های گردو خاک توضیح داده می شود. متغیرهای سرعت اصطکاکی و سرعت همرفتی مربوط به عامل تلاطم جوی هستند که در کنار سرعت باد نزدیک به سطح (۱۰ متری)، از عوامل انتشار گردو خاک محسوب می شوند. سرعت باد ۱۰ متری در جو غیرمتلاطم معمولاً با ایجاد عامل جهش (saltation) که مسبب حرکت و جهش ذرات با قطر بسیار بزرگ روی سطح زمین است، باعث انتشار گردو خاک می شود. اثر سرعت باد ۱۰ متری بر انتشار گردو خاک در رابطه (۲) (ژینو و همکاران، ۲۰۰۱) نشان داده شد.

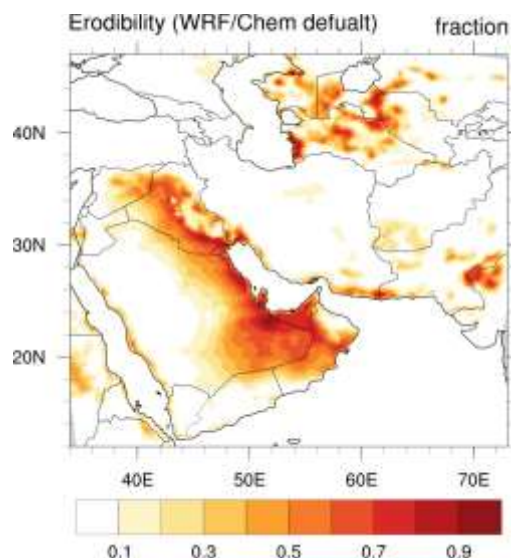
سرعت اصطکاکی که از مهم ترین عوامل تلاطمی مؤثر

۲-۳-۱ شناسایی مناطق انتشار گردوخاک در

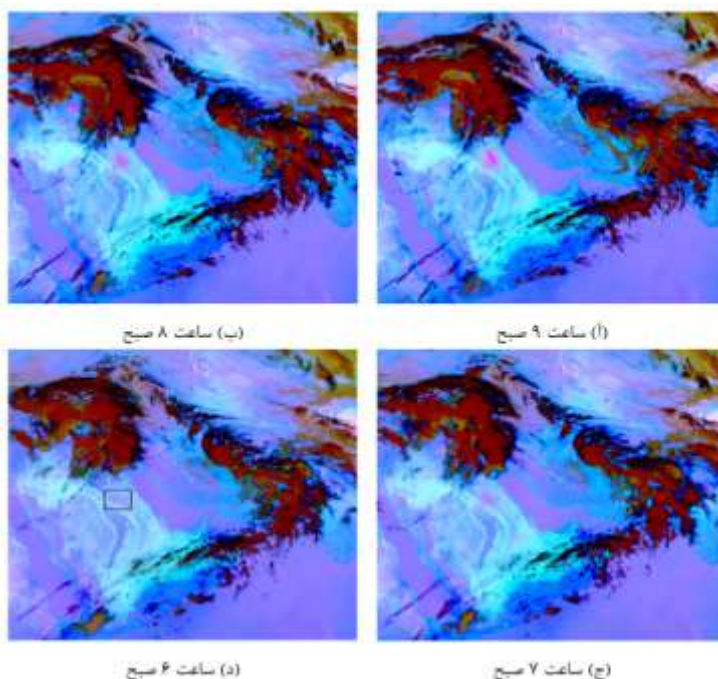
غرب آسیا

شپانسکی و همکاران (۲۰۰۹) برای تعیین چشمه‌های گردوخاک صحرای آفریقا از داده‌های محصول Dust RGB سنجنده SEVIRI استفاده کردند. در پژوهش حاضر نیز از همین داده‌ها در شناسایی چشمه‌های گردوخاک در غرب آسیا (خاورمیانه) استفاده شده است. شکل ۲ روش شناسایی چشمه‌های گردوخاک را نشان می‌دهد. لکه صورتی‌رنگ (شکل ۲-الف) توده گردوخاک است که به خوبی نمایان است. با تعقیب این لکه در سری تصاویر به صورت پس‌رو، می‌توان با دقت زیادی از نظر زمانی و مکانی، چشمه انتشار این توده گردوخاک را تعیین کرد (شکل ۲-د). مستطیلی که در شکل ۲-د محدوده چشمه را مشخص کرده است، با ماتریسی که موقعیت آن نسبت به تصویر اصلی با کلبه

WRF/Chem با رابطه ژینو و همکاران (۲۰۰۱) محاسبه می‌شوند. در شکل ۱ احتمال فرسایش‌پذیری یا به بیان دیگر، فعالیت چشمه‌های گردوخاک در حالت پیش‌فرض در مدل WRF/Chem نشان داده شده است



شکل ۱. نقشه پیش‌فرض احتمال فرسایش‌پذیری خاک (چشمه‌های گردوخاک) در مدل WRF/Chem مبتنی بر رابطه ژینو و همکاران (۲۰۰۱).



شکل ۲. روش شناسایی کانون انتشار گردوخاک از تصاویر متوالی Dust RGB از یک رخداد گردوخاک در منطقه غرب خلیج فارس. تاریخ رخداد در این شکل مورد بحث نیست. مستطیل در تصویر آخر، نشان‌دهنده محل انتشار گردوخاک است.

منطقه خاورمیانه، دو روش اعمال می‌شود. در روش اول، فراوانی رخداد های گردوخاک برای منطقه مورد مطالعه محاسبه می‌شود که با نرمال‌سازی فراوانی‌ها، فعالیت چشمه گردوخاک یا به عبارت دیگر، احتمال فرسایش‌پذیری خاک نشان داده می‌شود. در روش دوم با استفاده از متغیرهای هواشناسی مؤثر بر انتشار گردوخاک، هرکدام از چشمه‌های شناسایی شده به طور جداگانه از نظر پتانسیل فرسایش‌پذیری وزن‌دهی می‌شوند. این روش یکی از نوآوری‌های این تحقیق نسبت به موارد مشابه قبلی است.

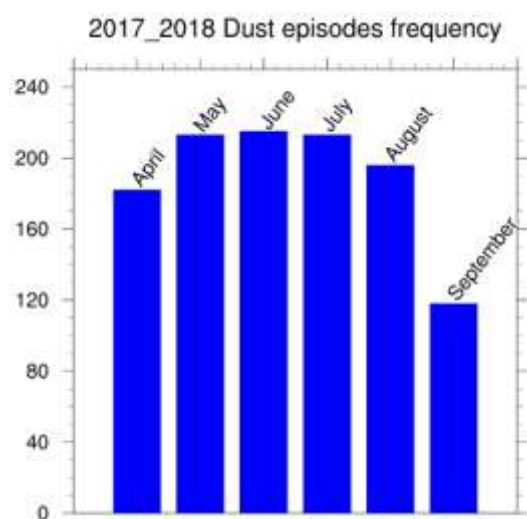
برای هریک از چشمه‌های شناسایی شده از تصاویر Dust RGB، مقادیر سرعت اصطکاکی، سرعت همرفتی و سرعت باد ۱۰ متری در فایل‌های جداگانه و با پیکربندی NetCDF تولید می‌شود. شکل ۴ نقشه متغیرهای سرعت اصطکاکی و سرعت همرفتی را برای یکی از چشمه‌های گردوخاک شناسایی شده نشان می‌دهد. پتانسیل فرسایش‌پذیری هریک از چشمه‌ها (به صورت نمایی) متناسب با معکوس مقادیر میانگین سرعت اصطکاکی و سرعت همرفتی و سرعت باد ۱۰ متری است. هرچه انتشار گردوخاک از یک چشمه خاص با مقادیر کمتری از سرعت‌های اصطکاکی و همرفتی همراه باشد، مقادیر رسوبات و به عبارت دیگر، پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک در آن محدوده بیشتر است.

در شکل ۵ ساعت‌های شناسایی هریک از ۱۱۰۰ رخداد گردوخاک به صورت نمودار فراوانی نشان داده شده است. قریب به اتفاق رخداد های گردوخاک شناسایی شده (بیش از ۹۵ درصد) در ساعات روز بین ۲ تا ۱۶ (UTC) و با شار گرمای سطحی مثبت (سرعت همرفتی مثبت) رخ داده‌اند. بیشترین فراوانی رخداد گردوخاک مربوط به ساعت ۷ UTC (نزدیک به ظهر محلی) است.

روش وزن‌دهی که چشمه‌های گردوخاک را مبتنی بر فراوانی رخدادها تصحیح می‌کند، در رابطه (۸) نشان داده شده است (راینر و واتسون، ۱۹۹۱):

تصاویر Dust RGB انجام و در نهایت، تعداد ۱۱۳۷ چشمه گردوخاک در خاورمیانه شناسایی شد که در تعیین نقشه نهایی و یکپارچه چشمه‌های گرد خاک در مراحل بعدی استفاده می‌شود.

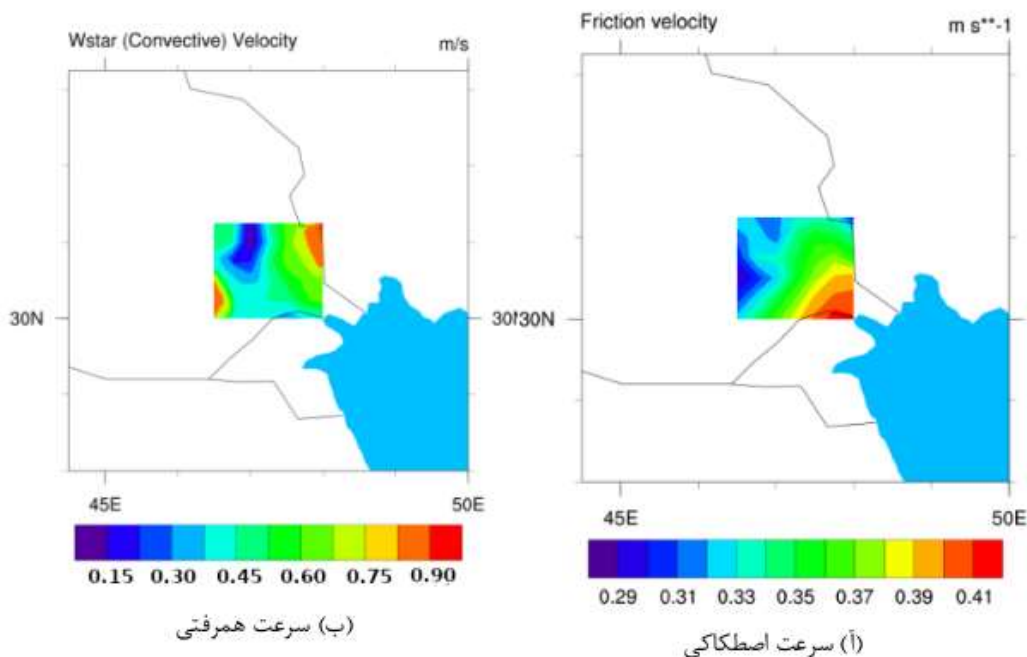
مقادیر فراوانی رخداد های گردوخاک به تفکیک ماهانه برای تمامی موارد مشاهده شده که در مجموع ۱۱۳۵ رخداد بود، در نمودارهای شکل ۳ نشان داده شده است. این تعداد رخداد مشاهده شده از گردوخاک از نظر فراوانی رقم مناسبی برای تعیین نقشه نهایی چشمه‌های گردوخاک در منطقه غرب آسیا است. با توجه به شکل ۳ در ماه‌های ابتدایی و انتهایی دوره مطالعاتی یعنی آوریل و سپتامبر برای مجموع دو سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ کمترین فراوانی رخداد های گردوخاک وجود دارد. در واقع دوره مطالعاتی به گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین فراوانی رخداد های گردوخاک را دربرگیرد.



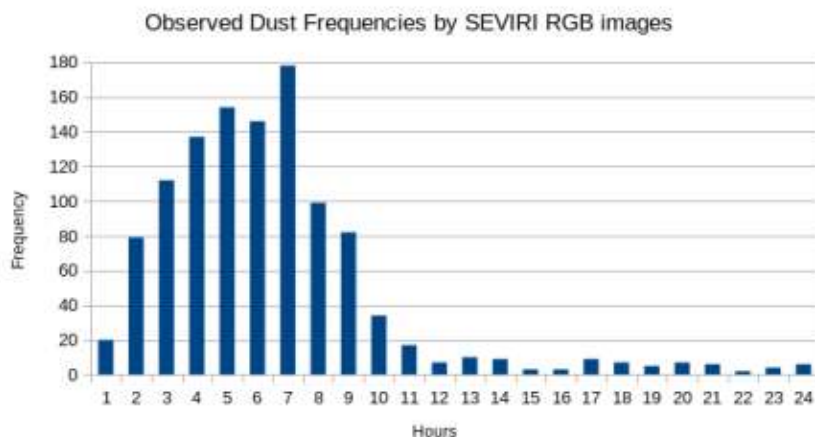
شکل ۳. فراوانی کلی رخداد های مشاهده شده گردوخاک در ماه‌های گرم سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ (مجموع دوازده ماه) در حوضه مطالعاتی غرب آسیا.

۲-۳-۲ تعیین احتمال فرسایش‌پذیری خاک (فعالیت چشمه‌های گردوخاک)

برای داشتن نقشه‌ای واحد از چشمه‌های گردوخاک در



شکل ۴. محاسبه سرعت‌های اصطکاکی و همرفتی با استفاده از داده‌های ERA5 برای یک نمونه از تعداد ۱۱۰۰ کانون گردوخاک شناسایی شده در ماه مه سال ۲۰۱۷ (ساعات روز) در جنوب عراق. مقادیر متغیرهای محاسبه شده برای خارج از کانون در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۵. فراوانی تعداد ۱۱۰۰ رخداد گردوخاک مشاهده شده در ساعات شبانه‌روز برای شش ماه گرم سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ (مجموع دوازده ماه) در منطقه مطالعاتی غرب آسیا (خاورمیانه).

است. متغیر U_t سرعت آستانه باد برای گسیل ذرات از سطح به جو است. با تقسیم کردن سرعت‌های مذکور بر بیشینه‌شان فرایند نرمال‌سازی انجام می‌شود. وزن نهایی هر یک از چشمه‌های گردوخاک برابر با تفاضل میانگین جمله تلاطمی (turbulence term) و سرعت باد ۱۰ متری است. در رابطه (۹) سرعت آستانه در معادله (۸) با

$$Turbulenceterm = \frac{(W^*)^3 + (CN \times U^*)^3}{den} \quad (8)$$

$$Windspeedterm = \frac{U^2 \times (U - U_t)}{\text{Maximum of } U^2 \times (U - U_t)}$$

$$Weight = 1 - \frac{(Turbulenceterm + Windspeedterm)}{2}$$

که ضریب CN برابر با مقدار ثابت $1/33$ است. W^* سرعت همرفتی، U^* سرعت اصطکاکی و U سرعت باد ۱۰ متری

فعالیت چشمه‌های گردو خاک با دقتی بیشتر نسبت به حالتی محاسبه می‌شوند که تنها فراوانی رخدادهای گردو خاک معیار شناسایی چشمه‌های گردو خاک است. پس از محاسبه وزن یا به عبارت دیگر، فعالیت چشمه‌های گردو خاک با استفاده از رابطه (۸)، نقشه فعالیت چشمه‌های گردو خاک که نشان‌دهنده مقدار پارامتر فرسایش‌پذیری خاک در خاورمیانه است، تولید و پهنه‌های آبی به صورت ماسک از نقشه‌های نهایی حذف می‌شوند. نقشه فرسایش‌پذیری که تنها مبتنی بر فراوانی رخدادهای بدون اعمال وزن‌دهی بوده است نیز جهت ارزیابی و مقایسه با نقشه وزن‌دهی شده تولید شد.

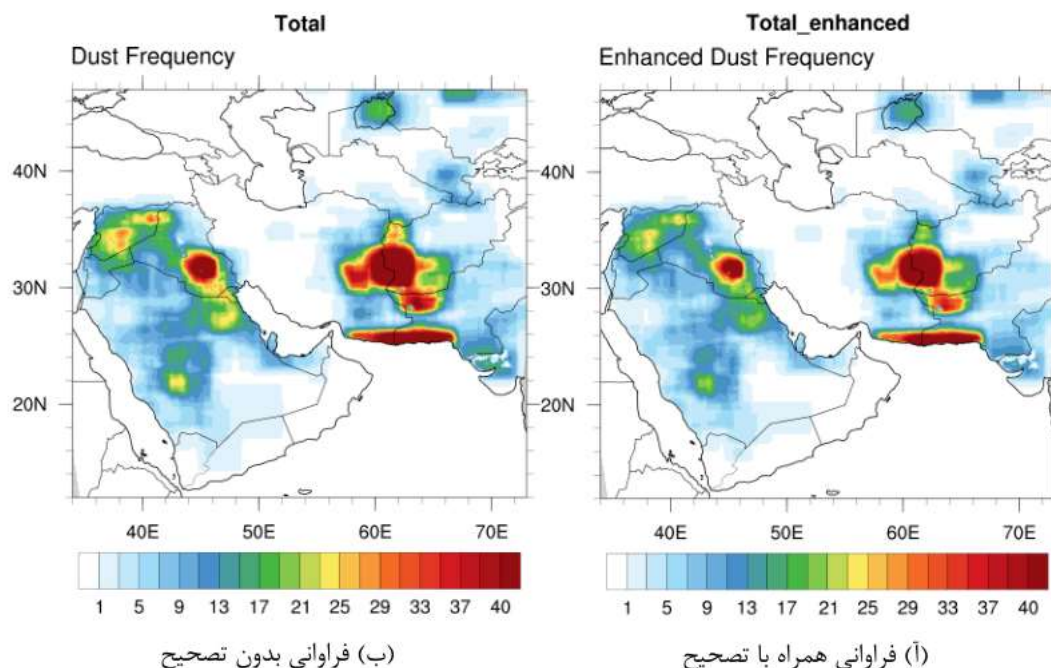
در شکل ۶ چشمه‌های شناسایی شده گردو خاک با اعمال وزن‌دهی و ضرایب تصحیح مشاهده می‌شود. سه منطقه شرق ایران، جنوب شرق عراق، سواحل عمان و صحرای شرقی سوریه از چشمه‌های شاخص گردو خاک هستند (شکل ۶). از تغییرات درخور توجهی که نقشه جدید چشمه‌های گردو خاک نسبت به نقشه پیش فرض در مدل WRF/Chem نشان می‌دهد، منطقه شرق دریای خزر یا غرب ترکمنستان است که در الگوی جدید از چشمه‌های گردو خاک، به عنوان چشمه‌ای بسیار ضعیف شناسایی شده است، در حالی که در نقشه پیش فرض (شکل ۱)، چشمه‌ای فعال شناخته می‌شود. الگوی کلی توزیع چشمه‌های گردو خاک در دو تصویر شکل ۶ کاملاً بر یکدیگر منطبقند. البته از نظر کمی بین مقادیر این دو تصویر تفاوت‌هایی وجود داد. این تفاوت‌ها که در خروجی مدل WRF/Chem در غلظت گردو خاک مؤثرند، در بخش نتایج توضیح داده می‌شوند.

در نظر گرفتن رطوبت خاک محاسبه شده است (بلی، ۱۹۶۲):

$$u_i = \begin{cases} A \sqrt{\frac{\rho_a - \rho_p}{\rho_a} g \Psi_p (1.2 + 0.2 \log \omega)} & \text{if } \omega < 0.5 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

که ρ_a چگالی هوا و ρ_p چگالی ذرات خاک با قطر p است. g شتاب گرانش است و ضرایب A و Ψ_p متناسب با نوع خاک هستند. اگر مقدار رطوبت خاک یا ω بیشتر از ۰/۵ باشد، خاک از نوع خیس است و سرعت آستانه بی‌نهایت فرض می‌شود. برای هر یک از رخدادهای گردو خاک شناسایی شده (شکل ۴)، در هر یک از نقاط شبکه، چگالی ذرات با دانه‌بندی مختلف از داده‌های جغرافیایی مدل WRF استخراج شد و مقادیر رطوبت وزنی (مترمکعب بر مترمکعب) نیز از داده‌های ERA5 به دست آمد. اثر رطوبت با استفاده از معادله (۹) در سرعت آستانه وارد می‌شود. از سرعت آستانه نیز در محاسبه ضرایب وزنی (معادله ۸) استفاده می‌شود.

منطقی که در محاسبه ضرایب وزنی به کار رفته است را می‌توان با مقایسه دو چشمه گردو خاک با تعداد مساوی از رخدادهای گردو خاک در طول یک بازه زمانی مشخص توضیح داد. اگر عوامل مؤثر بر انتشار گردو خاک مانند سرعت‌های اصطکاکی و همرفتی در چشمه اول به طور میانگین از نظر بزرگی نسبت به چشمه دوم کمتر باشد، به این معنی است که چشمه گردو خاک اول که از نظر فراوانی رخداد گردو خاک با چشمه دوم برابر بوده است، از نظر فعالیت و فرسایش‌پذیری خاک نسبت به چشمه دوم فعال‌تر بوده است؛ بنابراین با استفاده از ضرایب وزنی،



شکل ۶. مجموع فراوانی رخدادهای گردو خاک مشاهده شده در ماه‌های گرم (آوریل تا سپتامبر) سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸.

شد. با این حال انتخاب طرح‌واره‌های لایه مرزی، لایه سطحی و میکروفیزیک مختلف و حساسیت‌سنجی آن در شبیه‌سازی غلظت گردو خاک می‌تواند در تحقیقات بعدی انجام شود. با مقایسه توزیع افقی و نیم‌رخ قائم غلظت ذرات گردو خاک در اجراهای مختلف و ترسیم سری زمانی غلظت گردو خاک و مقایسه با داده‌های ایستگاهی، تفاوت‌های رخ داده در شبیه‌سازی خروجی مدل WRF/Chem از غلظت گردو خاک با استفاده از نقشه‌های مختلف فرسایش‌پذیری خاک تحلیل و بررسی شد.

۳-۱ ارزیابی چشمه‌های جدید در شبیه‌سازی

گردو خاک ۲ ژوئیه ۲۰۱۸

در شکل ۷ الگوی منطقه‌ای رخداد گردو خاک در تاریخ ۲ ژوئیه ۲۰۱۸ و دو توده مشخص از گردو خاک در شرق ایران و بخش‌هایی از عراق در تصویر SEVIRI Dust RGB دیده می‌شود. رخداد مشاهده شده در شرق ایران از نظر توزیع غلظت ذرات بسیار درخور توجه است. این رخداد گستره وسیعی از شرق تا جنوب شرق ایران را

۳ نتایج

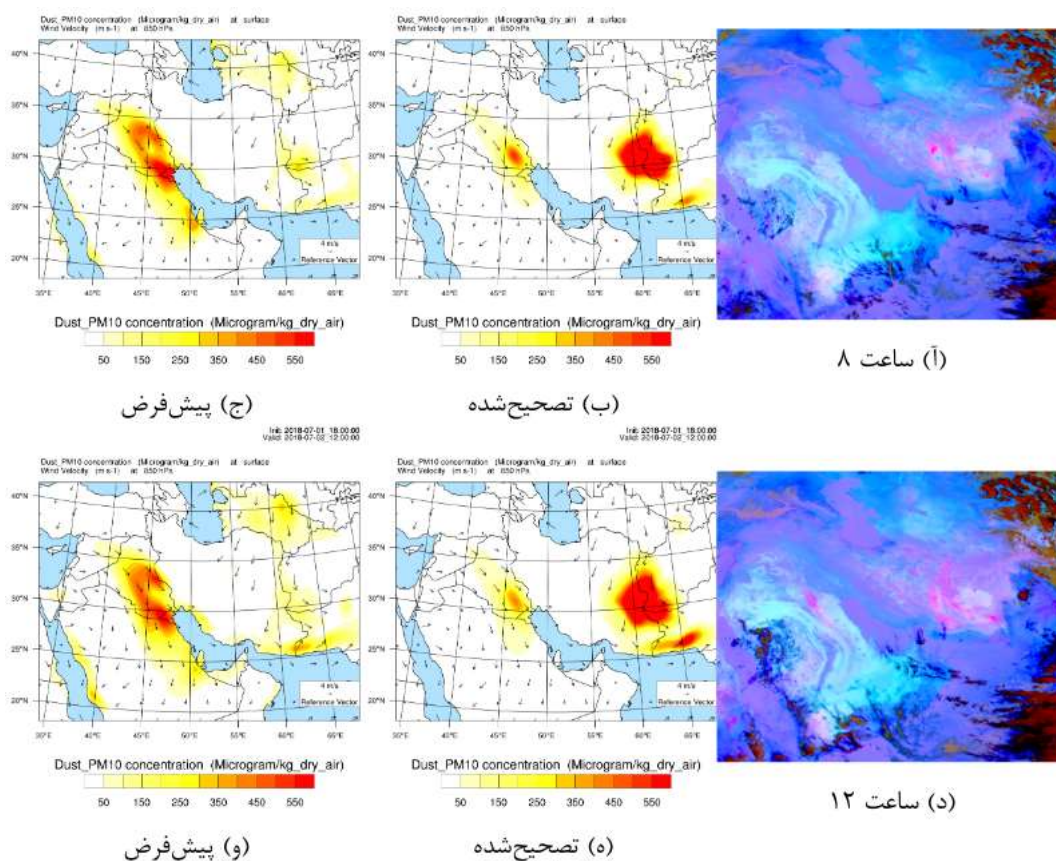
در این فصل به بررسی و تحلیل کمی و کیفی نقشه جدید فرسایش خاک در غرب آسیا و ارزیابی شبیه‌سازی‌های حاصل از این نقشه جدید پرداخته می‌شود. در مرحله اول، با توسعه کدهایی که آماده شد، نقشه فرسایش‌پذیری جدید در فایل geo در مدل WRF/Chem اعمال و مدل با حالت‌های پیش‌فرض و تصحیح شده از چشمه‌های گردو خاک، برای یک رویداد شاخص گردو خاک شبیه‌سازی شد. مدل WRF برای تمامی اجراها با یک حوضه شبیه‌سازی با نفکیک مکانی ۳۰ کیلومتر اجرا شد. بخش شیمیایی مدل به صورت شبیه‌سازی گردو خاک (dust_only) تنظیم و تنظیمات میکروفیزیک، لایه مرزی و لایه سطحی به صورت پیش‌فرض انتخاب شد. تغییر در تنظیمات هواشناسی مدل WRF تغییرات شدید و معنی‌داری در غلظت گردو خاک ایجاد نمی‌کند؛ زیرا اصلی‌ترین پارامتر در تعیین مقادیر انتشار گردو خاک، پارامتر فرسایش خاک است که در این تحقیق تصحیح

شکل گرفته است، تصاویر پیش فرض (ستون چپ) و تصاویر تصحیح شده (ستون وسط)، این رخداد را شبیه سازی کرده اند. تفاوت های چشمگیری بین الگوی مبتنی بر چشمه های گردو خاک پیش فرض و الگوی مبتنی بر چشمه های تصحیح شده وجود دارد. هر دو الگو جهت حرکت توده گردو خاک شکل گرفته در جنوب عراق را به سمت شبه جزیره عربستان (جنوب غرب خلیج فارس) نشان می دهند که با حرکت این توده در مقایسه با تصاویر ماهواره ای (ستون راست) تطابق مناسبی دارد. در نقشه های غلظت گردو خاک در ستون وسط که مبتنی بر چشمه های تصحیح شده گردو خاک است، تحول زمانی غلظت گردو خاک نیز با واقعیت همخوانی خوبی نشان می دهد.

دربر گرفته است و اهمیت و شدت فرسایش پذیری را در این منطقه به خوبی نشان می دهد. رخدادی که در غرب حوضه مطالعاتی (منطقه عراق) دیده می شود و جنوب و جنوب غرب خلیج فارس و کشورهای حاشیه خلیج فارس را دربر می گیرد نیز نقش چشمه های گردو خاک را در عراق و اثر آن را بر انتقال توده های گردو خاک نشان می دهد.

۳-۱-۳ غلظت شبیه سازی شده از گردو خاک

در شکل ۷ غلظت شبیه سازی شده از گردو خاک برای رخداد گردو خاک ۲ ژوئیه ۲۰۱۸ در دو حالت پیش فرض (ستون چپ) و اصلاح شده (ستون وسط) نشان داده شده است. با تمرکز بر توده گردو خاکی که در جنوب عراق



شکل ۷. گردو خاک ۲ ژوئیه ۲۰۱۸. مقایسه تصاویر اصلی Dust RGB (ستون راست) با خروجی مدل WRF/Chem از غلظت گردو خاک با چشمه های اصلاح شده (ستون وسط) و چشمه های پیش فرض (ستون چپ)

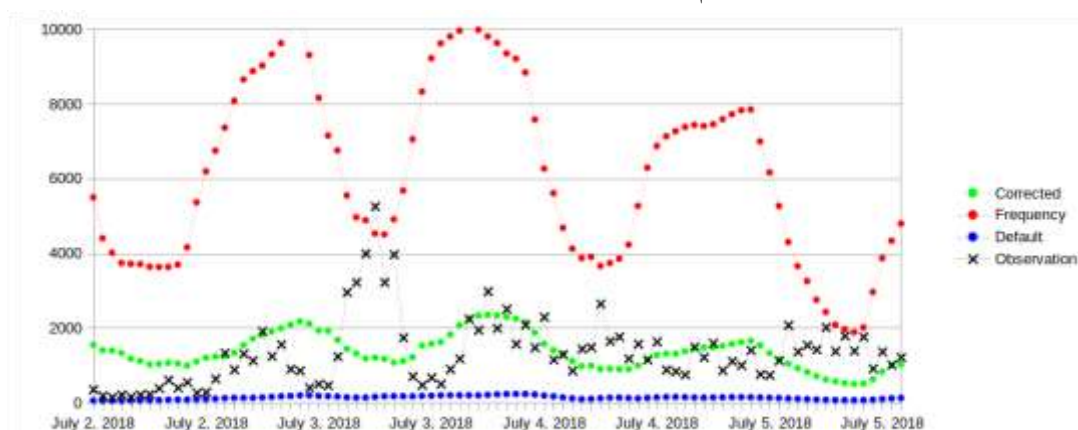
ترسیم سری زمانی مقادیر غلظت‌ها در شکل ۸ مقایسه شد. داده‌های ایستگاهی (با واحد میکروگرم بر مترمکعب) با تقسیم بر عدد ۳۵/۱ به واحد میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک تبدیل شدند تا با واحد غلظت شبیه‌سازی شده همسان شود.

در شکل ۸ نقاطی که با علامت ضربدر مشخص شده‌اند، مقادیر غلظت ایستگاهی گردوخاک را نشان می‌دهند. نقاط آبی‌رنگ نتایج شبیه‌سازی مدل WRF/Chem از غلظت گردوخاک با چشمه‌های پیش‌فرض (Ginoux) است که با کم‌برآورد شدید همراه است. نقاط قرمز رنگ نتایج شبیه‌سازی غلظت گردوخاک با استفاده از چشمه‌های تصحیح شده مبتنی بر فراوانی است که با بیش‌برآورد شدید (حدود سه برابر) همراه است. نقاط سبز رنگ که نتایج شبیه‌سازی غلظت گردوخاک را با استفاده از چشمه‌های تصحیح شده مبتنی بر فراوانی وزن‌دهی شده نشان می‌دهند، از نظر بزرگی مقادیر غلظت‌ها عملکرد بسیار مطلوبی را نشان می‌دهند که هدف اصلی این تحقیق بوده است. البته از نظر همبستگی تغییرات غلظت، نتایج دقت زیادی ندارند که می‌تواند ناشی از

توانایی مدل WRF در شبیه‌سازی میدان باد و در نتیجه، پیش‌بینی جهت حرکت توده‌های گردوخاک است. این موضوع را می‌توان در شبیه‌سازی توده‌های گردوخاک ناشی از چشمه‌های سواحل دریای عمان به شکل واضح‌تری بررسی کرد. با توجه به مشاهدات ماهواره‌ای، توده‌های گردوخاک به دلیل میدان‌های باد از دریا به ساحل از مناطق ساحلی دریای عمان به سمت شمال و شمال شرق حرکت می‌کنند. این وضعیت در هر دو دسته از شبیه‌سازی‌ها (تصحیح شده و پیش فرض) دیده می‌شود و نشان‌دهنده دقت مناسب مدل WRF در شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر انتشار گردوخاک است.

۳-۱-۲ مقایسه غلظت شبیه‌سازی شده با داده‌های ایستگاهی

یکی از رویدادهای گردوخاک ۲ ژوئیه ۲۰۱۸ در منطقه شرق ایران رخ داده است. غلظت ذرات PM10 ایستگاه زابل برای این رخداد با غلظت سطحی گردوخاک شبیه‌سازی شده با مدل WRF/Chem در دو حالت چشمه‌های پیش‌فرض و چشمه‌های تصحیح شده مبتنی بر فراوانی رخدادها و چشمه‌های تصحیح شده اصلی (فراوانی وزن‌دهی شده با استفاده از متغیرهای باد و تلاطم)، در قالب



شکل ۸. نتایج مدل WRF/Chem برای ۲ تا ۵ ژوئیه ۲۰۱۸ و مقایسه شبیه‌سازی غلظت گردوخاک با چشمه‌های پیش‌فرض و تصحیح شده (فقط فراوانی و فراوانی وزن‌دهی شده)، با داده‌های ایستگاهی (زابل) برای رخداد گردوخاک ژوئیه ۲۰۱۸ در شرق ایران. علامت ضربدر مشکی نشان‌دهنده داده‌های دیدبانی است. نقاط آبی، قرمز و سبز به ترتیب خروجی مدل WRF/Chem با چشمه‌های پیش‌فرض، چشمه‌های تصحیح شده بدون وزن‌دهی و چشمه‌های تصحیح شده با وزن‌دهی را نشان می‌دهند.

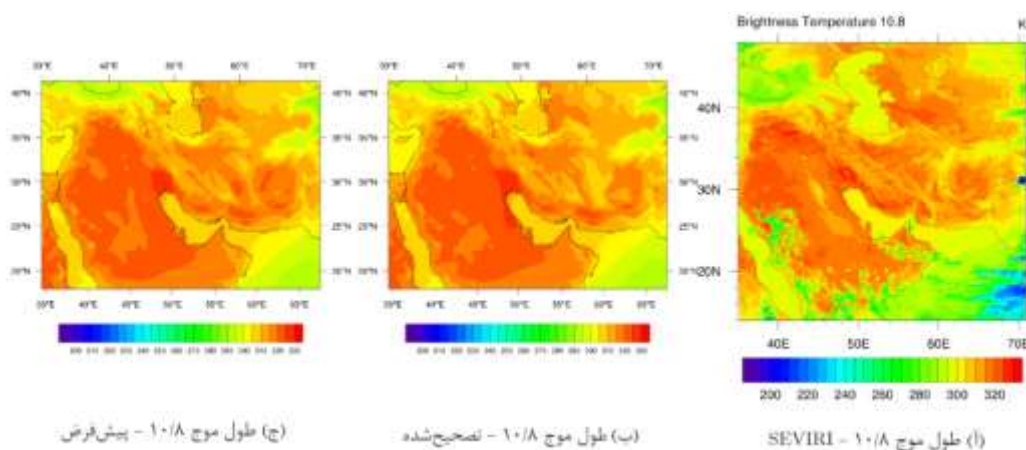
تشکیل دهنده تصاویر SEVIRI Dust RGB است. اجرای مدل RTTOV با در نظر گرفتن غلظت ذرات گرد و خاک انجام می‌پذیرد؛ یعنی علاوه بر نیم‌رخ‌های جوئی دما و بخار آب، نیم‌رخ غلظت گرد و خاک نیز برای تمام نقاط شبکه استخراج می‌شود و بنابراین اثر غلظت گرد و خاک شبیه‌سازی شده بر دمای روشنایی در فرایند اجرا وارد می‌شود.

توفان گرد و خاکی که در شرق ایران در این مورد مطالعاتی رخ داد، وسعت زیادی از منطقه را پوشش داده است. با توجه به شکل ۹، دمای روشنایی مناطق شرق ایران که از شبیه‌سازی‌های تصحیح شده به دست آمده است، نسبت به دمای روشنایی شبیه‌سازی‌های پیش فرض کمتر است و بنابراین تطابق بیشتری با مشاهدات (ستون راست) دارد. توفانی را که در غرب و در جنوب عراق رخ داده است، به دلیل وسعت کوچک نمی‌توان به سادگی تشخیص داد. البته در ساعت ۱۲، بخش کوچکی از محدوده شمال غربی خلیج فارس، برای شبیه‌سازی تصحیح شده، کاهش دمای روشنایی را نشان می‌دهد و می‌توان آن را با نقشه‌های مشاهداتی ماهواره (ستون راست) مشاهده کرد؛ از این رو اثر توفان گرد و خاک در این منطقه در شبیه‌سازی دمای روشنایی لحاظ شده است.

عوامل متعددی از جمله خروجی مدل از متغیرهای هواشناسی و کیفیت و دقت داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاهی باشد. با مقایسه میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده (نقاط سبز با مقدار ۱۳۷۰ میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک) و میانگین مقادیر ایستگاهی (نقاط با علامت ضربدر با مقدار ۱۳۵۰)، دقتی بیش از ۹۵ درصد به دست می‌آید که نسبت به خروجی پیش فرض (نقاط آبی با غلظت ۱۳۲) و خروجی مبتنی بر فراوانی رخدادها (نقاط قرمز با غلظت ۶۱۴۰) بهبود چشمگیری را در شبیه‌سازی غلظت گرد و خاک نشان می‌دهد. همچنین تحول زمانی در نیمه دوم دوره شبیه‌سازی از پیش از ۴ ژوئیه به بعد در مقادیر مشاهداتی (نقاط ضربدر)، روند به نسبت کاهش نشان می‌دهد که این روند در نتایج شبیه‌سازی (نقاط سبز و قرمز) دیده می‌شود.

۳-۱-۳ مقایسه شبیه‌سازی دمای روشنایی با داده‌های SEVIRI

برای ارزیابی کامل‌تر خروجی مدل WRF/Chem از غلظت گرد و خاک مبتنی بر چشمه‌های جدید گرد و خاک، دمای روشنایی مشاهده شده با سنجنده SEVIRI با استفاده از مدل RTTOV شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی برای طول موج ۸/۱۰ میکرومتری اجرا شد که از اجزای



شکل ۹. دمای روشنایی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل RTTOV از خروجی WRF/Chem در حالت‌های تصحیح شده (ب) و پیش فرض (ج) و مقایسه آن با دمای روشنایی مشاهده شده با سنجنده SEVIRI (الف) برای رخداد گرد و خاک ژوئیه ۲۰۱۸ در شرق ایران.

۲-۳ ارزیابی چشمه‌های جدید در شبیه‌سازی

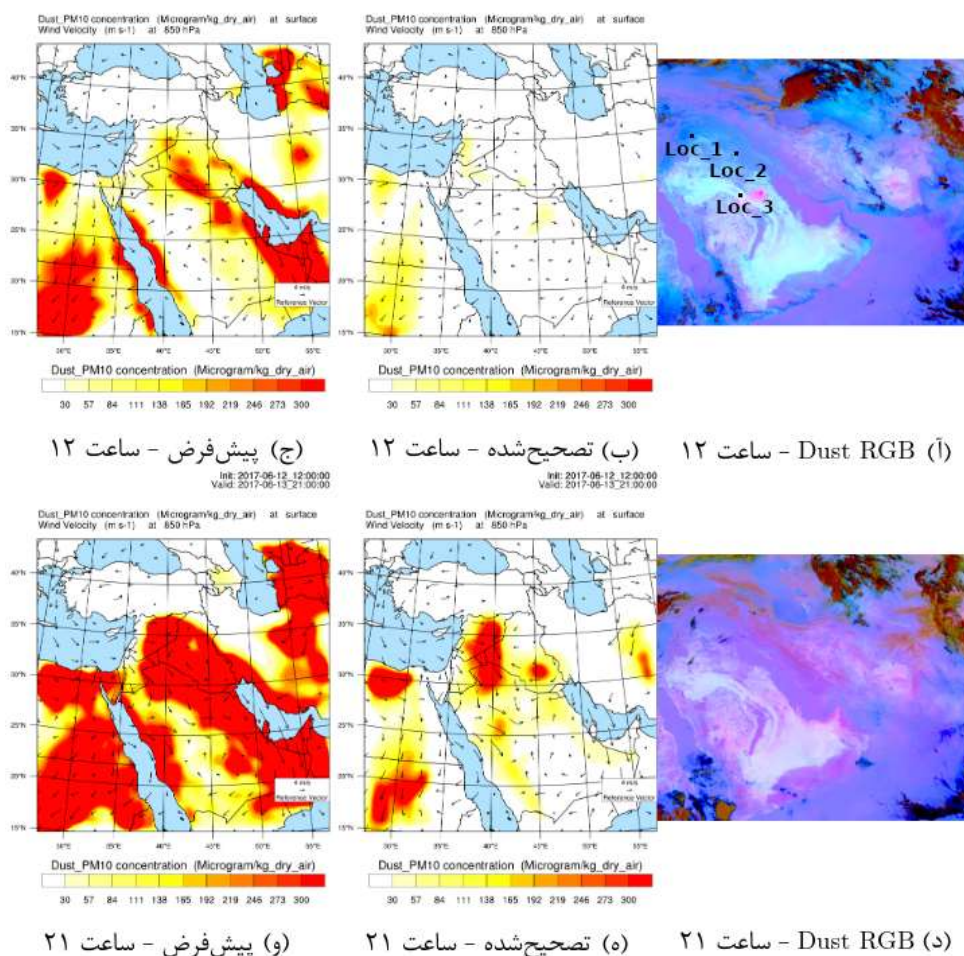
گردوخاک ۱۳ ژوئیه ۲۰۱۷

در شکل ۱۰ رخداد گردوخاک ۱۳ ژوئیه ۲۰۱۷ به‌عنوان نمونه مطالعاتی دوم در اجرای مدل WRF/Chem نشان داده شده است. موقعیت حوضه شبیه‌سازی به‌گونه‌ای تنظیم شده است که توده گردوخاک اصلی را که در شبه‌جزیره عربستان شکل گرفته است، به‌خوبی دربرگیرد و علاوه‌براین توانایی مدل در شبیه‌سازی رخداد‌های شبانه نیز با توجه به عملکرد آن در شبیه‌سازی گردوخاک سوریه در این رخداد بررسی شود. سه نقطه با نام‌های Loc_1، Loc_2 و Loc_3 در شکل ۱۰ دیده می‌شود. این نقاط موقعیت جغرافیایی مناطقی را نشان می‌دهند که سری زمانی غلظت ذرات گردوخاک در آنها با استفاده از نقشه‌های پیش‌فرض و اصلاح‌شده چشمه‌های گردوخاک استخراج و با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۱-۲-۳ غلظت شبیه‌سازی‌شده از گردوخاک

در شکل ۱۰، توده گردوخاک با رنگ صورتی به‌صورت ضعیف (شکل ۱۰-الف) اما با دقت مکانی زیاد و توزیع جغرافیایی مطلوب (شکل ۱۰-ب) دیده می‌شود. در همین زمان، نتایج پیش‌فرض مدل WRF/Chem در بسیاری از مناطق حوضه شبیه‌سازی، به‌ویژه شرق و غرب شبه‌جزیره عربستان، مقادیر شدیدی از غلظت گردوخاک

شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد (شکل ۱۰-ج) که با واقعیت (شکل ۱۰-الف) تطابق دقیقی ندارد. در شکل ۱۰-د که مربوط به ساعات شب است، به‌دلیل تباین کم رنگ‌ها در شب، رخداد گردوخاک شبانه که در سوریه شکل می‌گیرد، در تصویر دیده نمی‌شود، اما در شکل ۱۰-ه که نتایج شبیه‌سازی گردوخاک مبتنی بر چشمه‌های تصحیح‌شده و وزن‌دهی شده است، این توده گردوخاک شبانه را می‌توان با وضوح زیادی در سوریه، شمال عربستان و مناطق مرزی عراق و اردن مشاهده کرد. در همین زمان در شکل ۱۰-و که نتایج مدل WRF/Chem را با چشمه‌های گردوخاک پیش‌فرض نشان می‌دهد، محدوده زیادی از حوضه مطالعاتی همراه با غلظت‌های زیاد گردوخاک شبیه‌سازی شده است؛ بنابراین در این نمونه مطالعاتی، علاوه‌براینکه توانایی مدل در شبیه‌سازی گردوخاک شبانه با استفاده از چشمه‌های تصحیح‌شده و وزن‌دهی‌شده آشکار است، توزیع مکانی و جغرافیایی غلظت گردوخاک شبیه‌سازی‌شده نیز دقت بیشتری نسبت به نتایج شبیه‌سازی‌های پیش‌فرض دارد. همچنین بسیاری از نقاطی که در تصویر ماهواره‌ای، توده گردوخاک ندارند، در شبیه‌سازی تصحیح‌شده نیز غلظت‌های بسیار کمی دارند یا بدون گردوخاک هستند.



شکل ۱۰. مقایسه تصاویر اصلی Dust RGB (ستون راست) با خروجی مدل WRF/Chem از غلظت گردو خاک با چشمه های اصلاح شده (ستون وسط) و چشمه های پیش فرض (ستون چپ) برای گردو خاک ۱۳ ژوئیه ۲۰۱۷.

۲-۲-۳ سری زمانی غلظت گردو خاک شبیه سازی شده

در شکل ۱۱، تفاوت بین مقادیر شبیه سازی شده از غلظت گردو خاک با چشمه گردو خاک پیش فرض (ستون چپ) و چشمه گردو خاک جدید مبتنی بر فراوانی (ستون راست) و چشمه گردو خاک جدید تصحیح شده برای سه نقطه جغرافیایی دیده می شود. اختلاف بین بزرگی اعداد در نتایج چشمه های جدید و چشمه پیش فرض چشمگیر است. موضوع درخور توجه دیگر، شباهت بین تغییرات غلظت برای هر سه حالت اجرا برای این نمونه مطالعاتی

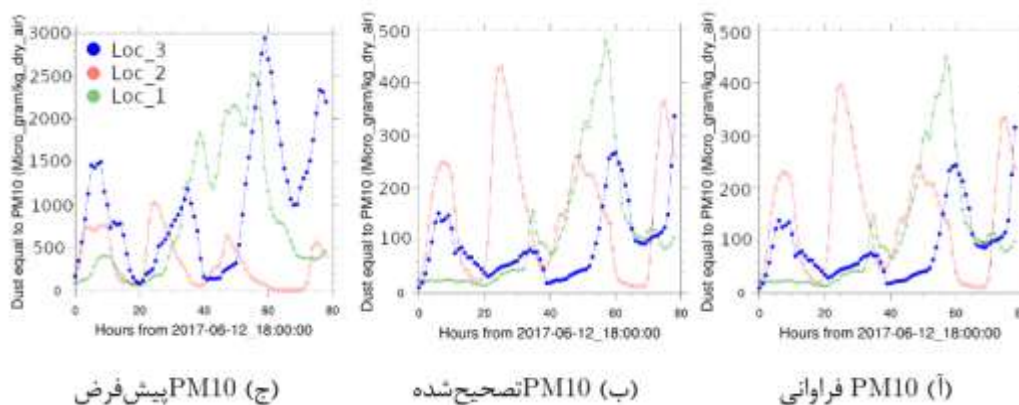
است. این مسئله نشان می دهد خروجی مدل با چشمه های تصحیح شده و خروجی مدل با چشمه های پیش فرض در برخی مناطق از نظر توزیع مکانی غلظت شبیه سازی شده از گردو خاک مشابه یکدیگر هستند. در این رخداد گردو خاک، اختلاف بین خروجی های مدل برای حالتی که با چشمه های تصحیح شده اجرا شده (ستون وسط) و حالتی که با چشمه های مبتنی بر فراوانی اجرا شده است، بسیار کم است. به عبارت دیگر، مقادیر RMSE بین خروجی های مبتنی بر فراوانی رخداد (شکل ۱۱-ب) و خروجی های تصحیح شده و وزن دهی شده

تصحیح شده (شکل ۱۲-ب) کمتر است. همچنین شکل ۱۲-ب نسبت به شکل ۱۲-الف که نشان‌دهنده دمای روشنایی مشاهداتی با سنجنده SEVIRI است، انطباق بیشتری دارد. کم بودن دمای روشنایی در شکل ۱۲-ج اغلب به دلیل بیشتر بودن ذرات معلق (گردو خاک) شبیه‌سازی شده در جو است. البته روی دریا مقادیر دمای روشنایی در شکل ۱۲-ج به واقعیت (شکل ۱۲-الف) نزدیک تر است که به دلیل شبیه‌سازی نشدن اثر نمک دریا با مدل RTTOV برای این رخداد و وجود غلظت بیشتر گردو خاک شبیه‌سازی شده برای اجرای پیش فرض است که نبود شبیه‌سازی اثر نمک دریا را جبران می‌کند. اگر شبیه‌سازی ذرات نمک دریا در مدل RTTOV وارد شود، انتظار می‌رود دمای روشنایی حاصل از اجرای تصحیح شده برای پهنه‌های آبی جنوب به واقعیت نزدیک تر شود و از طرف دیگر، برای اجرای پیش فرض کاهش یابد. در این حالت اجرای پیش فرض نسبت به واقعیت کم‌برآورد خواهد شد.

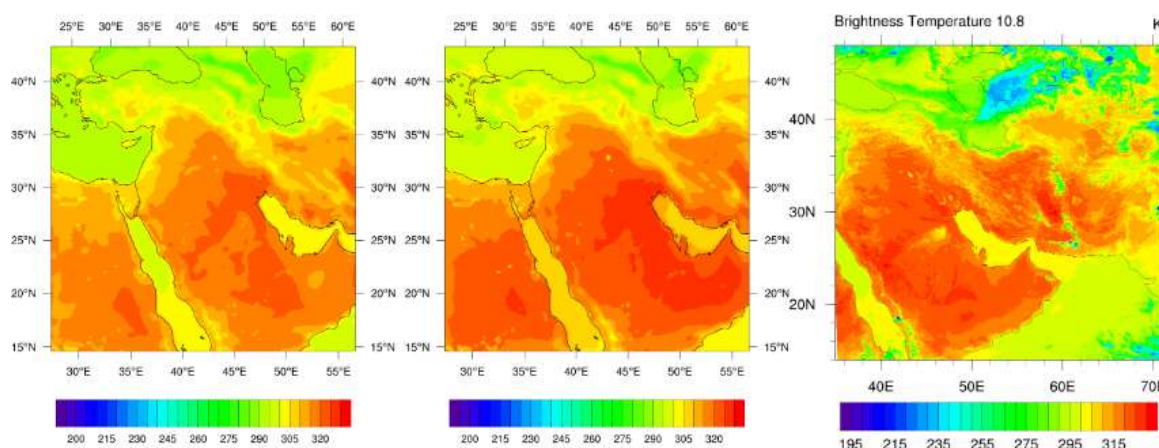
(شکل ۱۰-ج) برای غلظت ذرات گردو خاک در سه نقطه‌ای که سری زمانی در آن رسم شده است، به ترتیب برابر با مقادیر ناچیز ۲، ۴ و ۶ میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک است که نشان‌دهنده این واقعیت است که برخلاف نمونه مطالعاتی پیشین، نتایج اجراها برای شبیه‌سازی غلظت گردو خاک با استفاده از چشمه‌های تصحیح شده مبتنی بر فراوانی و چشمه‌های تصحیح شده وزن‌دهی شده در تمام حوضه شبیه‌سازی می‌تواند بسیار مشابه یکدیگر باشند و اختلاف شدیدی با یکدیگر نداشته باشند.

۳-۲-۳ مقایسه شبیه‌سازی دمای روشنایی با داده‌های SEVIRI

با توجه به شکل ۱۲، با مقایسه دمای روشنایی شبیه‌سازی شده با دمای روشنایی حاصل از تصویربرداری دستگاه SEVIRI مشاهده می‌شود که دمای روشنایی مبتنی بر اجرای مدل WRF/Chem با چشمه‌های گردو خاک پیش فرض (شکل ۱۲-ج) از دمای روشنایی مبتنی بر اجرای WRF/Chem با چشمه‌های گردو خاک



شکل ۱۱. نیم‌رخ گردو خاک شبیه‌سازی شده ۱۳ ژوئیه ۲۰۱۷ در سه نقطه Loc_1، Loc_2 و Loc_3 به ترتیب با رنگ‌های سبز، قرمز و آبی برای ذرات PM10



شکل ۱۲. دمای روشنایی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل RTTOV با خروجی WRF/Chem در حالت‌های تصحیح شده (ب) و پیش‌فرض (ج) و مقایسه آن با دمای روشنایی مشاهده شده با سنجنده SEVIRI (الف) برای رخداد گردو خاک ژوئیه ۲۰۱۷.

شکل ۱۲. دمای روشنایی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل RTTOV با خروجی WRF/Chem در حالت‌های تصحیح شده (ب) و پیش‌فرض (ج) و مقایسه آن با دمای روشنایی مشاهده شده با سنجنده SEVIRI (الف) برای رخداد گردو خاک ژوئیه ۲۰۱۷.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

نقشه جدید فرسایش‌پذیری که در این تحقیق محاسبه شده است، بهبود نسبی در شبیه‌سازی غلظت گردو خاک ایجاد می‌کند. در پژوهش‌های متعددی، چشمه‌های گردو خاک در شمال آفریقا بررسی شده‌اند. مهم‌ترین پژوهشی که از روشی مشابه برای شناسایی چشمه‌های گردو خاک استفاده کرده است، پژوهش شپانسکی و همکاران (۲۰۰۹) است که از داده‌های سنجنده SEVIRI در برآورد تعداد رخداد‌های گردو خاک و در نهایت، تعیین فعالیت چشمه - های گردو خاک استفاده کردند. در این پژوهش تنها به معرفی چشمه‌های شناسایی شده بسنده شده است و برخلاف نتایج این تحقیق، استفاده از نتایج پژوهش شپانسکی و همکاران (۲۰۰۹) به صورت عملیاتی در یک مدل هواشناسی مانند مدل WRF چندان مطرح نبوده است. همچنین به دلیل وسعت منطقه شمال آفریقا، چشمه‌های گردو خاک شناسایی شده تفکیک مکانی کمتری نسبت به نتایج این تحقیق دارند.

حوضه غرب آسیا و وسعتی که در این تحقیق به آن پرداخته شده است، یکی از اصلی‌ترین نقاط قوت این پژوهش است. منطقه خاورمیانه که حوضه مورد مطالعه در

در این تحقیق با استفاده از محصول SEVIRI Dust RGB و با مشاهده و شناسایی رویدادهای گردو خاک برای دوازده ماه گرم از سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، پارامتر فرسایش‌پذیری خاک، که چشمه گردو خاک در مدل WRF/Chem در شبیه‌سازی غلظت گردو خاک است، تصحیح و با تصاویر ماهواره‌ای اولیه SEVIRI مقایسه شد. در مجموع ۱۱۳۵ رخداد گردو خاک شناسایی شد که پس از وزن‌دهی به چشمه‌های گردو خاک، جایگزین پارامتر فرسایش‌پذیری پیش‌فرض در مدل WRF/Chem شد. با بررسی نتایج به‌طور کلی، بهبود معنی‌داری در غلظت شبیه‌سازی شده ذرات گردو خاک با مدل WRF/Chem ملاحظه شد. برخی مناطق مانند شرق دریای خزر و جنوب خلیج فارس که در نقشه فرسایش‌پذیری پیش‌فرض، نقاط فرسایش‌پذیر با شدت زیاد معرفی شده بودند، در نقشه جدید تصحیح شدند. همچنین مناطق جدیدی مانند دریاچه خشک شده آرال، چشمه جدید گردو خاک معرفی شدند و بر نقش سواحل عمان و مناطق شرقی ایران به‌عنوان چشمه‌های قوی گردو خاک تأکید شد.

ضرایب وزنی در مناطق مختلف حوضه مورد مطالعه یکسان نبوده است. به‌طور ویژه، در مناطق شرقی و غربی مرز ایران، بیشترین اختلاف بین چشمه‌های گردوخاک وزندهی شده و بدون وزندهی مشاهده می‌شود. این اختلاف در سایر نقاط ممکن است کمتر یا ناچیز باشد.

نمی‌توان انتظار داشت تمامی اجراها با مدل WRF/Chem با استفاده از این نقشه جدید، در تمام مناطق حوضه شبیه‌سازی دقت زیادی داشته باشند. یکی از مهم‌ترین اهدافی که در این پژوهش پیگیری شد، تهیه محصولی با توانایی استفاده در سامانه‌های عملیاتی است. با توجه به نتایج این تحقیق، شبیه‌سازی غلظت ذرات از نظر بزرگی مقادیر و دقت مکانی خروجی مدل بهبود مناسبی نشان می‌دهد و می‌تواند به جای نقشه پیش‌فرض در سامانه‌های عملیاتی پیش‌بینی گردوخاک استفاده شود.

شناسایی چشمه‌های گردوخاک با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و متغیرهای هواشناسی مؤثر بر انتشار گردوخاک هدف اصلی این مقاله بوده است. نقشه جدید فرسایش‌پذیری که در این تحقیق محاسبه شده است، بهبود نسبی در شبیه‌سازی غلظت گردوخاک ایجاد می‌کند و نمی‌توان انتظار داشت تمامی اجراها با مدل WRF/Chem و با استفاده از این نقشه، در تمام مناطق حوضه شبیه‌سازی دقت زیادی داشته باشند؛ زیرا داده‌برداری‌ها به‌صورت گرافیکی انجام شده است و محدودیت‌های روش گرافیکی و همچنین زمان داده‌برداری که ممکن است برخی از چشمه‌ها در آن زمان غیرفعال باشند، باعث می‌شود تمامی چشمه‌های ممکن در منطقه شناسایی نشوند. داده‌برداری بیشتر یکی از کارهای آتی است که حتماً در ارتقاء کیفیت نتایج این پژوهش نقش ویژه‌ای خواهد داشت. یکی از مهم‌ترین اهدافی که در این مطالعه پیگیری شد، تهیه محصولی بود که بتوان از آن در سامانه‌های عملیاتی استفاده کرد. با توجه به نتایج این تحقیق، شبیه‌سازی غلظت ذرات از نظر بزرگی مقادیر

این تحقیق است، در دو دهه گذشته از نظر تعداد و شدت رخدادهای گردوخاک، از مهم‌ترین مناطق جهان محسوب می‌شود و لزوم شناسایی مجدد و دقیق چشمه‌های گردوخاک و استفاده از آن به‌صورت عملیاتی در یکی از مطرح‌ترین مدل‌های هواشناسی و گردوخاک (WRF/Chem) بسیار محسوس است؛ بنابراین نتایج تحقیق کنونی این توانایی را دارد که در سامانه‌های عملیاتی هشدار گردوخاک مبتنی بر مدل WRF استفاده شود و در قیاس با خروجی مدل با چشمه‌های پیش‌فرض، نتایجی در اختیار قرار دهد که بتوان به آن تکیه کرد.

مقایسه نتایج خروجی شبیه‌سازی‌ها نشان داد اعمال وزندهی در تصحیح چشمه‌های گرد و خاک روشی مؤثر در ارتقاء دقت مدل WRF/Chem در شبیه‌سازی غلظت گردوخاک است. البته مقایسه نقشه‌های فرسایش‌پذیری به‌طور کلی، بین نقشه وزندهی شده و نقشه‌ای که تنها با استفاده از فراوانی رخدادها به‌دست آمده است، شباهت بسیار زیادی را نشان می‌دهد. از نظر مقادیر فرسایش‌پذیری، تفاوت‌هایی بین این دو نقشه وجود دارد که در خروجی مدل از شبیه‌سازی غلظت گردوخاک اثر بسیار معنی‌داری می‌گذارد. البته اثر وزندهی در مناطق مختلف منطقه مورد مطالعه متفاوت است. در برخی نقاط حوضه شبیه‌سازی ممکن است نتایج خروجی مدل با استفاده از این دو نقشه تفاوت ناچیزی با یکدیگر داشته باشد و در نقاط دیگر، اختلاف بسیار بزرگی بین نتایج غلظت گردوخاک دیده شود. محاسبه و استفاده از متغیرهای هواشناسی مؤثر بر انتشار گردوخاک، به‌ویژه عوامل تلاطم جوئی مانند سرعت اصطکاکی و سرعت همرفتی و تلفیق آن با داده‌های ماهواره‌ای به‌صورت ضرایب وزنی از دیگر دستاوردهای این پژوهش محسوب می‌شود. با توجه به نتایج ارزیابی چشمه‌های تصحیح‌شده، ضرایب وزنی نقش تعیین‌کننده‌ای در اصلاح مقدار انتشار گردو خاک از سطح ایفا می‌کنند. البته اثر

- 3077-3107.
- Eltahan, M., Shokr, M., and Sherif, A. O., 2018, Simulation of severe dust events over Egypt using tuned dust schemes in Weather Research Forecast (WRF-Chem): Atmosphere, **9**, 246, doi:10.3390/atmos9070246.
- Fouquart, Y., Bonnell, B., Brogniez, G., et al., 1987, Observations of Saharan aerosols: results of ECLATS field experiment, Part II: Broadband radiative characteristics of the aerosols and vertical radiative flux divergence: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **26**, 38-52.
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Silva Dias, M. A. F., et al., 2009, The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS): Atmospheric Chemistry and Physics, **9**, 2843-2861.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B., Dubovik, O., and Lin, S. J., 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **106**(D17), 20255-20273.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., et al., 2005, Fully coupled 'online' chemistry within the WRF model: Atmospheric Environment, **39**, 6957-6976.
- Goudie, A. S., and Middleton, N. J., 2006, Desert Dust in the Global System: Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 287p.
- Guenther, A. B., Zimmerman, P. R., Harley, P. C., Monson, R. K., and Fall, R., 1993, Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses: Journal of Geophysical Research, **98**(d7), 12,609-12,617.
- Hersbach, H., 2016, The ERA5 Atmospheric Reanalysis: AGU fall meeting abstracts, NG33D-01.
- Hocking, J., Vidot, J., Brunel, P., Roquet, P., Silveira, B., Turner, E., and Lupu, C., 2021, A new gas absorption optical depth parameterisation for RTTOV version 13: Geoscientific Model Development, **14**(5), 2899-2915.
- Kandler, K., SchütZ, L., Deutscher, C., et al., 2009, Size distribution, mass concentration, chemical and mineralogical composition, and derived optical parameters of the boundary layer aerosol at Tinfou, Morocco, during SAMUM 2006: Tellus B, **61**(1), 32-50.
- Kumar, R., Barth, M. C., Pfister, G. G., Naja, M., و دقت مکانی خروجی مدل، بهبود مناسبی نشان می‌دهد و می‌تواند به جای نقشه پیش‌فرض در سامانه‌های عملیاتی پیش‌بینی گردو خاک استفاده شود.
- نقشه جدید چشمه‌های گردو خاک را می‌توان از https://github.com/anikfal/west_asia_dust_source دریافت کرد. روش اعمال این نقشه جدید بر فایل داده‌های جغرافیایی از مدل WRF/Chem در همین پیوند موجود است. بسیاری از نقشه‌های حاصل از خروجی مدل WRF که در این مقاله نمایش داده شده‌اند، با استفاده از ابزار متن‌باز [PostWRF](https://github.com/anikfal/PostWRF) ترسیم شده‌اند.
- منابع**
- خسروسرشکی، ل.، ایران‌نژاد، پ.، علی‌اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۹۳، مقایسه طرح‌واره‌های گسیل گردو خاک در برآورد شار قائم آن در نواحی چشمه‌ای ایران: مجله فیزیک زمین و فضا، **۴۰**(۱)، ۲۰۱-۲۱۶.
- Banks, J. R., Schepanski, K., Heinold, B., Hünerbein, A., and Brindley, H. E., 2018, The influence of dust optical properties on the colour of simulated MSG-SEVIRI Desert Dust infrared imagery: Atmospheric Chemistry and Physics, **18**(13), 9681-9703.
- Brutsaert, W., 1992, Stability correction functions for the mean wind speed and temperature in the unstable surface layer: Geophysical Research Letters, **19**(5), 469-472.
- Cremades, P. G., Fernández, R. P., Allende, D. G., Mulena, G. C., and Puliafito, S. E., 2017, High resolution satellite derived erodibility factors for WRF/Chem windblown dust simulations in Argentina: *Atmósfera*, **30**(1), 11-25.
- Dentener, F. J., Carmichael, G. R., Zhang, Y., Lelieveld, J., and Crutzen, P. J., 1996, Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere: Journal of Geophysical Research, **101**, 22869-22889.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during winter Monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model: Journal of the Atmospheric Sciences, **46**(20),

- observations: Atmospheric Chemistry and Physics, **17**, 93–115.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., and Verma, S. B., 1983, Microclimate: The Biological Environment (Second Edition): John Wiley and Sons, 495 pp.
- Schepanski, K., Tegen, I., Laurent, B., Heinold, B., and Macke, A., 2007, A new Saharan dust source activation frequency map derived from MSG-SEVIRI IR-channels: Geophysical Research Letters, **34**(18), L18803.
- Schepanski, K., Tegen, I., Todd, M. C., Heinold, B., Bönišch, G., Laurent, B., and Macke, A., 2009, Meteorological processes forcing Saharan dust emission inferred from MSG-SEVIRI observations of subdaily dust source activation and numerical models: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **114**(D10).
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., and Huang, X.-Y., 2019, A description of the advanced research WRF version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp., doi:10.5065/1dfh-6p97.
- Simpson, D., Guenther, A., Hewitt, C. N., and Steinbrecher, R., 1995, Biogenic emissions in Europe: Journal of Geophysical Research, **100**(d11), 22,875-22,890.
- Tegen, I., 2003, Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system: Max Planck-Institute for Biogeochemistry, Germany.
- Thomas, D. S. G., 2011, Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands, 3rd ed.: Wiley.
- Wang, T., Jiang, F., Deng, D., et al., 2012, Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region: Atmospheric Environment, **58**, 70-83.
- United Nations Environment Programme (UNEP), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Global Assessment of Sand and Dust Storms, United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2016.
- Wesely, M. L., 2007, Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models: Atmospheric Environment, **41**, 52-63.
- Zhang, Y., 2008, Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status and outlook: Atmospheric Chemistry and Physics, **8**, 115-128.
- 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, **14**, 2431–2446.
- LeGrand, S. L., Polashenski, C., Letcher, T. W., Creighton, G. A., Peckham, S. E., and Cetola, J. D., 2019, The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3. 8.1.: Geoscientific Model Development, **12**(1), 131-166.
- Matricardi, M., 2010, A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **136**(652), 1823-1835.
- Mahowald, N. M., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R. A., Jickells, T. D., Kubilay, N., Prospero, J. M., and Tegen, I., 2005, Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean: Global Biogeochemical Cycles, **19**(4), GB4025, doi:10.1029/2004GB002402.
- Nabavi, S. O., Haimberger, L., and Samimi, C., 2017, Sensitivity of WRF-chem predictions to dust source function specification in West Asia: Aeolian Research, **24**, 115-131.
- Okeson, C. D., Riley, M. R., Fernandez, A., and Wendt, J. O., 2003, Impact of the composition of combustion generated fine particles on epithelial cell toxicity: influences of metals on metabolism: Chemosphere, **51**, 1121-1128.
- Otkin, J. A., Greenwald, T. J., Sieglaff, J., and Huang, H. L., 2009, Validation of a large-scale simulated brightness temperature dataset using SEVIRI satellite observations: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **48**(8), 1613-1626.
- Saide, P. E., Carmichael, G. R., Spak, S. N., et al., 2011, Forecasting urban PM10 and PM2.5 pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRFChem CO tracer model: Atmospheric Environment, **45**, 2769-2780.
- Rayner, K. N., and Watson, I. D., 1991, Operational prediction of daytime mixed layer heights for dispersion modelling: Atmospheric Environment, Part A., General Topics, **25**(8), 1427-1436.
- Rizza, U., Barnaba, F., Miglietta, M. M., Mangia, C., Di Liberto, L., Dionisi, D., Costabile, F., Grasso, F., and Gobbi, G. P., 2017, WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multi-sensor desert dust

Ying, Z., Tie, X., Madronich, S., Li, G., and Massie, S., 2011, Simulation of regional dust and its effect on photochemistry in the Mexico City area during MILAGRO experiment: Atmospheric Environment, **45**(15), 2549-2558.

Physics, **8**, 2895-2932.
Zhang, H. S., Zhu, H., Peng, Y., Kang, L., Chen, J., and Park, S.-U., 2007, Experiment on dust flux during dust storm periods over sand desert area: Acta Meteorologica Sinica, **22**(2), 239-247.

Correction and assessment of dust sources in WRF/Chem, caused by wind erosion, over West Asia

Amirhossein Nikfal ^{1*}, Abbas Ranjbar Saadat Abadi ², Sahar Tajbakhsh ³ and Mohamad Moradi²

¹ Ph.D. Student, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

² Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran

(Received: 29 May 2021, Accepted: 21 October 2021)

Summary

In this study, using remote sensing and calculating the physical parameters related to dust emission, the soil erodibility as a criterion of dust sources has been re-calculated and added to the WRF/Chem model, to replace the default dust sources (based on topography) in WRF/Chem, over West Asia. SEVIRI Dust RGB products, as the remote sensing data, and ECMWF-ERA5 meteorological data have been extensively used in the geographical identification of dust sources and calculation of their activity. Over 1100 dust sources have been identified by the aim of dust RGB images, and converted to dust frequency map, which at the next step, converted to the weighted frequency map, by applying the turbulence (friction and convection velocity), and 10m wind speed. One of the key innovations in this study is the combination of dust event frequencies (weighted frequencies) with the meteorological factors, including friction velocity, convection velocity, and 10m wind speed. The results show that the weighted dust frequencies are effective in improving the simulation of dust concentration. The spatial distributions of the new dust sources are similar to the default dust sources (based on Ginoux function), and different in many other regions. New redefined dust sources include regions in Iraq, Syria, eastern Iran, northern coasts of Oman Sea, and the Aral Sea. There are considerable regions in the new dust source map, including eastern coasts of Caspian Sea and southern coast of Persian Gulf, which in comparison to the default dust sources are not identified as active dust sources. The distribution and magnitude of the dust concentrations and the results of the WRF/Chem simulations of dust concentrations for two major dust episodes with the new dust sources and comparing them with the simulations with default dust sources show significant improvements. The new erodibility maps as the new West Asia dust sources, developed in this study, result in a relative improvement in the simulated dust concentration. It cannot be expected that all WRF/Chem dust simulations with the new dust sources in any region of the study area produce more accurate results.

One of the most important purposes of this study was to provide a new dust source map that makes the WRF/Chem results of dust concentration more reliable; therefore, it can be used in operational and warning advisory systems for sand and dust storms. It is shown that for some cases the simulated dust concentrations are not different, using the weighted dust frequencies or only the dust frequencies. But in some other cases (especially eastern Iran), there are major differences between the simulated dust concentration and station data, in a way that confirms the significant role of weighted frequencies in reaching better erodibility factors (dust sources) in comparison to the dust frequencies alone. The capability of the WRF model is a key factor in correcting the dust sources. Good accuracy of WRF in wind simulation makes it a capable model in predicting the temporal and spatial variability of the dust storms. However, the stochastic variables, including the turbulence, can affect the accuracy of model.

Keywords: WRF/Chem model, dust sources, ERA5 data, SEVIRI dust RGB, RTTOV model

*Corresponding author:

anik@ut.ac.ir