

بررسی فصلی گردو خاک در شمال شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخدادهای

گردو خاک فرین با مدل WRF-CHEM

آذر زرین^{۱*}، نرگس صالح‌آبادی^۲، عباس مفیدی^۳ و عباسعلی داداشی رودباری^۴

۱. دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴. پژوهشگر پسا دکتري، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱/۲۰)

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی فعالیت‌های گردو خاک فصلی و شبیه‌سازی عددی پدیده‌های گردو خاک فرین در شمال شرق ایران است. برای این منظور داده‌های گردو خاک پایگاه MERRA-2 و داده‌های عمق نوری هواویز الگوریتم ترکیبی DB و DT سنجنده MODIS طی دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۴ مورد بررسی قرار گرفتند. برای شبیه‌سازی عددی نمونه‌های منتخب گردو خاک نیز از مدل WRF-CHEM استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشینه فعالیت گردو خاک طی دوره ۱۵ ساله به ترتیب در فصول بهار و تابستان به وقوع می‌پیوندد. بررسی فصلی مقادیر AOD و غلظت گردو خاک نشان داد که بیابان‌های آرال قوم، قزل قوم، قره قوم و قره بغاز به عنوان چشمه‌های اصلی گردو خاک فرامرزی و سرخس به عنوان چشمه داخلی در شمال شرق هستند. همچنین چهار طرحواره گردو خاک مدل WRF-Chem آزمایش شد. نتایج نشان از کارایی بالای طرحواره GOCART در مدل‌سازی گردو خاک در شمال شرق ایران دارد. یافته‌های تحقیق نشان داد که مدل قابلیت آشکارسازی تیپ‌های مختلف گردو خاک با منشأ و ساختارهای مختلف در هر دو دوره سرد و گرم سال را دارد. نتایج نشان داد که سه رخداد از رخدادهای مورد مطالعه در نتیجه گذر یک موج راسی برون‌حاره و عمیق شدن ناه موج بر روی محدوده ترکمنستان به وقوع پیوسته‌اند. در مقابل، رخداد مربوط به فصل تابستان، نتیجه استقرار یک الگوی گردش تابستانه است که با استقرار همزمان یک گردش و اچرخندی در محدوده جنوبی ترکمنستان و بخش‌های شمال-شمال شرقی ایران و گردش چرخندی در محدوده دشت سیستان و بخش‌های جنوب شرقی کشور به وقوع پیوسته است.

واژه‌های کلیدی: گردو خاک، مدل WRF-CHEM، AOD، شمال شرق ایران.

۱. مقدمه

فضایی و وردایی زمانی آن تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل هواشناختی، اقلیمی و محیطی قرار دارد (شائو و همکاران، ۲۰۱۳). ضرورت شناخت صحیح از فعالیت‌های گردو خاک و پیش‌بینی دقیق و مدل‌سازی آن برای کاهش زیان‌های اقتصادی و آسیب‌های انسانی باعث شده است که بررسی این رخدادهای در کانون توجه مطالعات زیادی قرار گیرد (میبیدی و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات انجام شده در سطح جهانی بر اساس منطقه، داده و نوع روش مورد استفاده بسیار گسترده هستند. در یک طبقه بندی کلی این مطالعات را می‌توان بسته به نوع داده به کار گرفته شده به مطالعات مبتنی بر داده‌های ایستگاهی (این‌دیتو و همکاران،

گردو خاک بیابانی جزء مهمی از هواویزهای جوی است. ذرات گردو خاک موجود در جو می‌توانند با پراکندگی و جذب تابش ورودی خورشید بر بودجه تابشی سامانه زمین-جو اثر بگذارند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین ذرات گردو خاک به‌طور غیرمستقیم با تغییر مشخصه‌های خرد فیزیک ابرها بارش را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند (لی و همکاران، ۲۰۱۶). از طرف دیگر، گردو خاک به یک نگرانی زیست محیطی جدی تبدیل شده و در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است (شائو و همکاران، ۲۰۱۳). گردو خاک از پدیده‌های رایج هواشناسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۷) و توزیع

با استفاده از مدل WRF-Chem پژوهشی است که توسط کیم و همکاران (۲۰۱۲) برای رخدادهای نمونه آوریل ۲۰۱۲ انجام شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل WRF-Chem برای ذرات با اندازه بزرگ (۲۰-۶ میکرومتر) دارای بیش‌برآوردی و برای اندازه کوچک (۰/۵-۳/۶ میکرومتر) دارای کم‌برآوردی است. در پژوهشی دیگر، سینگ و همکاران (۲۰۲۱) به شبیه‌سازی رخدادهای گردو خاک شدید با استفاده از مدل WRF-CHEM به منظور پیش‌بینی همادی در کشور هند پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل WRF-CHEM قادر است هر دو اثر مستقیم و نیمه‌مستقیم ذرات معلق در هوا را به خوبی شبیه‌سازی کند.

در ایران نیز مطالعات مربوط به گردو خاک در سال‌های اخیر با توجه به افزایش گستره مکانی این پدیده مخرب افزایش یافته است. بررسی تحقیقات انجام شده در حوزه گردو خاک در ایران نشان می‌دهد که این مطالعات را می‌توان در چهار دسته کلی قرار داد: ۱- بررسی‌های آماری گردو خاک در ایستگاه‌های هواشناسی (رسولی و همکاران، ۱۳۹۰؛ منتظری و دادخواه، ۱۳۹۲؛ گودرزی و همکاران، ۱۳۹۶؛ سهرابی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ ۲- بررسی گردو خاک با رویکرد تحلیل هم‌مدیدی (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ براتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ نجفی و همکاران، ۲۰۱۷)؛ ۳- رویکرد سنجش‌ازدور (تقوی و همکاران، ۱۳۹۲؛ علی‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ رایگانی، ۱۳۹۸؛ داداشی رودباری و احمدی، ۲۰۲۰) و ۴- مطالعاتی که از خروجی مدل‌های عددی (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۶ الف و ب؛ کرمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ کمالی و همکاران، ۲۰۱۷؛ داداشی رودباری، ۱۳۹۹) استفاده کردند. استفاده از مدل‌های عددی جفت‌شده با طرحواره گردو خاک که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است؛ بیشتر معطوف به غرب و جنوب‌غرب ایران بوده است و محدود مطالعاتی هم کل ایران را مورد مطالعه قرار داده‌اند

۲۰۱۲؛ چین و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، داده‌های بازتحلیل (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ گکیاس و همکاران، ۲۰۲۱)، سنجش از دور (دوخووی و همکاران، ۲۰۰۸؛ یون و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژو و سکولیک، ۲۰۱۶؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، پرونداد مدل‌ها (جینوکوس و همکاران، ۲۰۰۱؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۰؛ سو و فونگ، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۹) و به‌خصوص مدل جفت‌شده WRF-CHEM (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ چایو و همکاران، ۲۰۲۰؛ کیم و همکاران، ۲۰۲۱؛ سینگ و همکاران، ۲۰۲۱) تقسیم‌بندی کرد. بیشتر این مطالعات که در برگیرنده کمربند جهانی گردو خاک از آفریقا تا شمال چین است، روند افزایشی را برای گردو خاک در این مناطق گزارش کرده‌اند.

به‌دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی و محدودیت محصولات سنجش از دوری، بسیاری از مطالعات مدل‌های جفت‌شده عددی نظیر WRF-CHEM و RegCM-CHEM را جهت بررسی گردو خاک به کمک گرفته شده‌اند. این مدل‌ها با طرحواره‌های گردو خاک متنوع و همچنین به‌کارگیری شرایط آغازگری می‌توانند نتایج دقیق‌تری از رخدادهای گردو خاک شبیه‌سازی شده را ارائه دهند. ژائو و همکاران (۲۰۱۰) عملکرد طرحواره گردو خاک GOCART و مدل DUSTRAN را با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند که DUSTRAN دارای بیش‌برآوردی در انتشار گردو خاک در سواحل غربی شمال آفریقا است. چایو و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی گردو خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-Chem و مقایسه آن با داده‌های CALIPSO و AERONET در شمال آفریقا به این نتیجه رسیدند که به‌رغم آن‌که هر سه طرحواره GOCART، AFWA و UoC توزیع فضایی و زمانی گردو خاک در شمال آفریقا را به‌درستی بازتولید می‌کنند، با این‌حال، تفاوت در وسعت و شدت بین پرونداد سه طرحواره انتشار و داده‌های مشاهداتی وجود دارد. مدل‌سازی طوفان‌های گردو خاک آسیایی

همانند آنچه که در جنوب غرب و شرق ایران شاهد هستیم به‌همراه داشته باشد. این پژوهش با هدف بررسی گردو خاک‌های فصلی و شبیه‌سازی عددی چند نمونه از پدیده‌های گردو خاک فرین شمال شرق ایران توسط مدل WRF-CHEM انجام شده است. برای حصول به این نتیجه از ترکیبی از داده‌های ایستگاهی، بازتحلیل و سنجش از دور برای دوره ۲۰۱۸-۲۰۰۴ و برونداد مدل عددی WRF-CHEM استفاده شد. نتایج این مطالعه برای پیش‌بینی مخاطره گردو خاک و همچنین برنامه‌ریزی آمایش سرزمین می‌تواند مفید باشد.

۲. داده و روش تحقیق

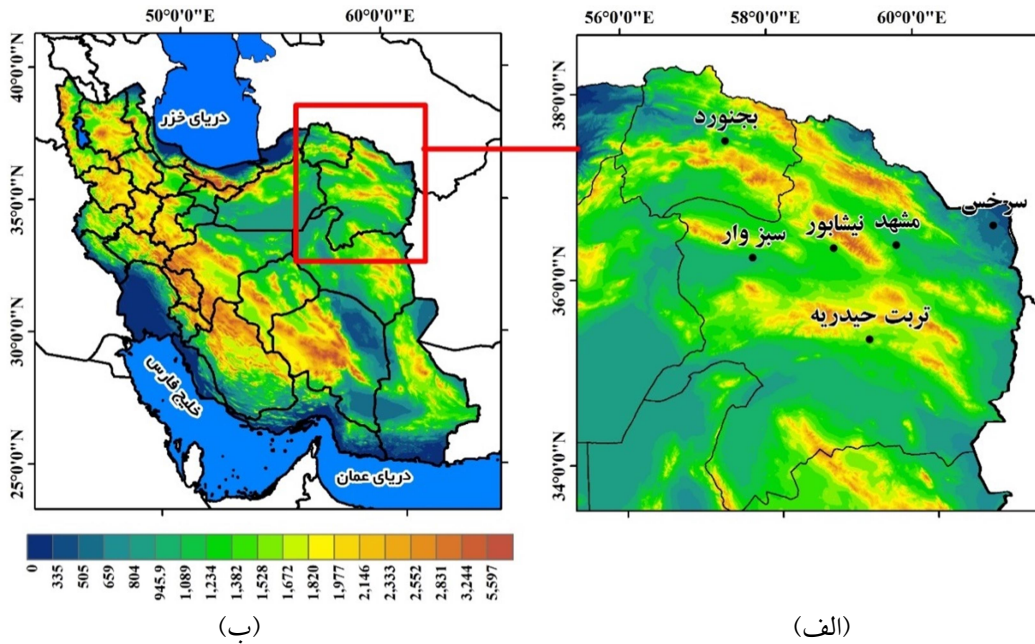
۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش شمال شرق ایران، در برگرنده دو استان خراسان رضوی و شمالی است (شکل ۱-الف). دو بیابان بزرگ قره قوم و قزل قوم و همچنین بسترهای خشکیده دریاچه آرال (آرال قوم) و خلیج قره بغاز در این منطقه قرار دارند که نقش مهمی در انتشار و ترابرد ذرات گردو خاک به شمال شرق ایران دارند (شکل ۱-ج). گردو خاک‌های این منطقه جغرافیایی برای یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۴) مورد بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب این دو استان به دلیل آن است که اولاً منطقه هدف این پژوهش صرفاً شمال شرق کشور بوده که شامل دو استان خراسان رضوی و شمالی می‌باشد. از طرف دیگر منشأ گردو خاک‌های استان‌های خراسان رضوی و شمالی بیشتر از بیابان‌های ترکمنستان و افغانستان است. و در نهایت علت انتخاب این دو استان به این دلیل است که اکثر رخدادهای گردو خاک این مناطق نتیجه جریانات شمالی و شمال شرقی است.

(داداشی رودباری، ۱۳۹۹). شبیه‌سازی واداشت‌های تابشی گردو خاک در غرب ایران یکی از این پژوهش‌ها است که ساری صراف و همکاران (۱۳۹۶ب) با استفاده از مدل WRF-CHEM و طرحواره GOCART به بررسی آن پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که اثرات تابشی گردو خاک در منطقه باعث کاهش تابش طول موج کوتاه و افزایش تابش طول موج بلند و همچنین کاهش تابش خالص در سطح زمین می‌شود. داداشی رودباری (۱۳۹۹) با شبیه‌سازی بازخورد اقلیمی گردو خاک مبتنی بر برونداد مدل RegCM4-CHEM در ایران نشان داد که گردو خاک باعث کاهش دمای سطح زمین و کاهش ارتفاع لایه مرزی می‌شود.

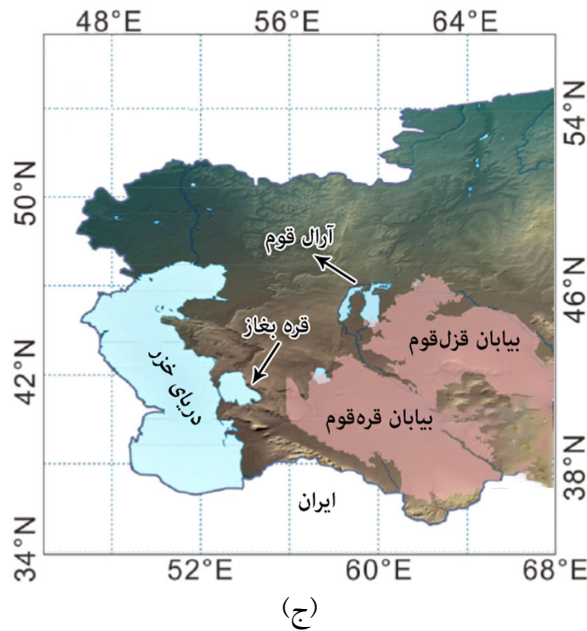
بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که به‌رغم مطالعات بسیاری که به بررسی گردو خاک در ایران پرداخته‌اند اما رخدادهای گردو خاک منطقه شمال شرق ایران تاکنون چندان مورد توجه قرار نگرفته است. معدود مطالعات انجام شده بر روی گردو خاک‌های این منطقه به روش همدیدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷؛ دوستان، ۱۳۹۷). بر این اساس، شناخت دقیق گردو خاک در این منطقه از ایران می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در برنامه‌های مدیریتی مربوط به کنترل و سپس مهار چشمه‌های گردو خاک فعال این منطقه داشته باشد.

شمال شرق ایران یک منطقه جمعیتی بزرگ و استراتژیک است. این منطقه به دلیل نزدیکی به مناطق خشک وسیع در آسیای مرکزی دارای خطر بالایی برای رخدادهای گردو خاک است. به طوری که در سال‌های اخیر با مشکلات بسیاری در این زمینه روبه‌رو بوده است. به دلیل نزدیکی این منطقه به آسیای مرکزی ترابرد ذرات گردو خاک به سوی ایران می‌تواند مشکلات عدیده‌ای را



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۱. (الف) ایستگاه‌های همدید منتخب برای شناسایی روزهای فراگیر گردوخاک؛ (ب) منطقه مورد مطالعه در شمال شرق ایران (کادر قرمز رنگ)؛ (ج) موقعیت بیابان‌های قره قوم و قزل قوم به همراه بستر خشکیده دریاچه آرال (آرال قوم) و خلیج قره باغ.

برای پدیده‌های گردوخاک نمونه در دوره مذکور می‌باشد.

۲-۲-۱. داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های هواشناسی همدید

برای شناسایی روزهای با رخداد گردوخاک فرین از کدهای ۰۶ تا ۰۹، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸ به همراه دید افقی

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل چهار دسته کلی داده‌های ایستگاه‌های همدید سازمان هواشناسی کشور (شکل ۱-الف)، داده‌های بازتحلیل (غلظت گردوخاک)، داده‌های سنجش‌ازدور (عمق نوری هواویز و الگوریتم شناسایی گردوخاک) برای دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۴ و داده‌های خروجی مدل WRF-CHEM

۲-۲-۳. داده DDA سنجنده Atmospheric (Infrared Sounder)

از آنجایی که گردو خاک یک پدیده پیچیده جوی است برای شناخت آن نیاز است تا از داده‌ها و روش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از داده‌های مورد بررسی الگوریتم شناسایی گردو خاک Dust-Detection Algorithm (DDA) است که داده‌های آن با تفکیک افقی 0.1×0.1 درجه قوسی برای دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۴ از پایگاه علوم زمین ناسا اخذ شد. الگوریتم DDA یکی از محصولات کاربردی AIRS است و می‌تواند گردو خاک را طی روز و شب شناسایی کند. در این شاخص آستانه ۳۸۰ نشان دهنده گردو خاک است.

۲-۲-۴. داده غلظت گردو خاک از پایگاه MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications)

برای بررسی تغییرات غلظت گردو خاک فصلی از متغیر غلظت سطحی گردو خاک (Dust Surface Mass Concentration) از داده‌های پایگاه MERRA-2 استفاده شد. پایگاه داده مرکز ارزیابی نوین ناسا برای پژوهش‌ها و برنامه‌های کاربردی (MERRA)، یک پایگاه باز تحلیل است که توسط اداره داده‌گذاری و مدل‌سازی جهانی (GMAO) ناسا تولید و به شکل مداوم در حال توسعه است (ریکتر و همکاران، ۲۰۱۱). این پایگاه داده از نسخه پنجم مدل گردش کلی جو (GEOS-5) و سامانه داده‌گذاری (DAS) استفاده می‌کند. همچنین در جدیدترین به‌روزرسانی پایگاه MERRA-2، داده‌های تصحیح شده عمق نوری هواویز (AOD) سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra و Aqua گنجانده شده است (نووتیک و همکاران، ۲۰۱۷). شبیه‌سازی‌های MERRAero برای گردو خاک در این پژوهش با گام زمانی روزانه و تفکیک افقی 0.5×0.625 درجه قوسی از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸ را پوشش می‌دهد.

ایستگاه‌های همدید استفاده شد. در بررسی‌های انجام شده چهار روز با رخداد گردو خاک فرین در منطقه مورد مطالعه شناسایی و برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. این روزها عبارت‌اند از: ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷، ۲۹ می ۲۰۰۸، ۸ ژوئن ۲۰۱۵ و ۱۷ اکتبر ۲۰۱۷.

۲-۲-۲. داده AOD سنجنده MODIS

برای بررسی تغییرات زمانی-مکانی عمق نوری ذرات گردو خاک که کمک شایان‌توجهی در شناخت گردو خاک دارند از داده‌های عمق نوری هواویز (AOD₅₅₀) سنجنده MODIS ماهواره Terra با تفکیک افقی 0.1×0.1 درجه قوسی برای دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۴ استفاده شد. برای این منظور از شاخص عمق نوری هواویز (AOD) سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra و Aqua استفاده شد. عمق نوری هواویزها میزان فراوانی آلاینده‌ها در ستون قائم جو را به‌صورت انتگرال ضریب میرایی آلاینده‌ها در امتداد ستون قائم جو از سطح زمین تا بالای جو تعریف می‌کند. به‌عبارت‌دیگر عمق نوری هواویز نشان‌دهنده تمام آلاینده‌هایی است که باعث پراکنش نور می‌شوند. علت انتخاب طول‌موج ۵۵۰ نانومتر برای بررسی عمق نوری هواویزها به این دلیل است که این طول‌موج در میانه محدوده باند مرئی قرار دارد یعنی جایی که اوج طیف الکترومغناطیس خورشیدی اثر بیشینه تابشی دارد (فلوتسی و همکاران، ۲۰۱۶). سنجنده MODIS توسط دو ماهواره Terra (۱۸ دسامبر ۱۹۹۹) و Aqua (۴ می ۲۰۰۲) پرتاب شد (بارنس و همکاران، ۲۰۰۳). دو الگوریتم (Dark Target (DT) (لوی و همکاران، ۲۰۱۳) و Deep Blue (DB) (سیبر و همکاران، ۲۰۱۴) برای بررسی هواویزها توسعه داده شدند. در این تحقیق ضمن استفاده از الگوریتم ترکیبی DB و DT به ارائه نقشه ترکیبی با بهره‌گیری از داده‌های دو ماهواره Terra و Aqua پرداخته شد. چرا که این رویکرد برآیند بهتری از ارائه جداگانه این ماهواره‌ها برای شاخص AOD دارد (سیبر و همکاران، ۲۰۱۴).

است. ابتدا، با استفاده از کدهای پدیده گردوخاک ایستگاه‌های هواشناسی همدید (شکل ۱-الف) از سری زمانی ۱۵ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۴)، چهار رخداد گردوخاک فرین انتخاب شد. سپس مدل WRF-CHEM برای این چهار روز با پیکربندی که در بخش ۲-۳-۱ توضیح داده شده است اجرا شد. درستی مدل با استفاده از داده‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} ایستگاه کنترل کیفی هوای شهر مشهد مورد سنجش قرار گرفت.

۲-۳-۱. پیکربندی مدل WRF-CHEM

همان‌طور که گفته شد مدل‌ها با در نظر گرفتن فرایندهای جوی و سطحی پاسخ مناسب‌تری برای شناخت گردوخاک در اختیار پژوهشگران و برنامه‌ریزان قرار می‌دهند. لذا در این پژوهش پس از شناخت وردایی فصلی گردوخاک در شمال‌شرقی ایران، با استفاده از مدل WRF-CHEM چهار رخداد نماینده گردوخاک فرین شبیه‌سازی شد (محدوده اجرا شده در شکل ۲ آمده است). در پیکربندی مدل برای شرایط لایه‌مرزی سیاره‌ای (PBL) از طرحواره YSU (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶)، شرایط سطح زمین از Noah (چن و دودیا، ۲۰۰۵)، برای پارامترسازی کومولوس از طرحواره همادی سه‌بعدی Grell و در نهایت از مدل انتقال تابش سریع (RRTMG) (ایاکونو و همکاران، ۲۰۰۰) برای پرتوهای طول‌موج بلند و کوتاه در این پژوهش استفاده شد. دامنه مورد مطالعه شامل شمال‌شرق ایران و بخش‌هایی از آسیای مرکزی است. تفکیک افقی مدل برای دامنه شماره یک ۶۰ کیلومتر و برای دامنه شماره دو ۳۰ کیلومتر و با ۳۲ تراز قائم اجرا شد. برای شرایط مرزی مدل از داده‌های NCEP FNL / با گام زمانی ۳ ساعته و تفکیک افقی ۱ درجه استفاده شد. زمان پایدارسازی مدل (Spinup Time) نیز ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. رخدادهای گردوخاک مورد مطالعه در این پژوهش شامل چهار رخداد فرین گردوخاک ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷، ۲۹ می ۲۰۰۸، ۸ ژوئن ۲۰۱۵ و ۱۷ اکتبر ۲۰۱۷ می‌باشد. جهت انتخاب طرحواره مناسب

۲-۲-۵. داده شاخص نوع گردوخاک سنجنده

MODIS

تشخیص درست رخدادهای گردوخاک به‌خصوص بر فراز مناطق شهری در گزارش ایستگاه‌های کنترل کیفی هوا مشکلاتی را برای تمایز گردوخاک با آلودگی‌های شهری ایجاد می‌کند. چراکه تشخیص کاهش کیفیت هوا در نتیجه فعالیت‌های شهری-صنعتی از رخدادهای گردوخاک بیابانی بسیار مشکل است. برای رفع این مشکل و تمایز رخدادهای گردوخاک بیابانی رسیده به منطقه مورد مطالعه از آلودگی‌های شهری، شاخص نوع گردوخاک سنجنده MODIS ماهواره Terra در رخدادهای منتخب آن با تفکیک افقی $1/1 \times 1/1$ درجه قوسی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳. روش کار

پژوهش حاضر در دو بخش اصلی سازماندهی شده است. بخش نخست تغییرات بلند مدت گردوخاک را در شمال-شرقی ایران بررسی می‌کند و در بخش دوم چند رخداد نماینده گردوخاک فرین طی دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۴ برای بررسی سازوکار و همچنین شناسایی چشمه‌های گردوخاک شمال‌شرق ایران مورد بررسی قرار گرفته است. برای بخش اول تحقیق که مربوط به تغییرات فصلی گردوخاک در شمال‌شرق است از دو سری داده عمق نوری هواویز (AOD) سنجنده MODIS و غلظت گردوخاک داده‌های پایگاه بازتحلیل MERRA-2 استفاده شده است. هر چند که AOD توانایی خوبی برای شناسایی دوره‌های فعال گردوخاک دارد اما برای بررسی دقیق‌تر تغییرات فصلی گردوخاک از داده‌های غلظت گردوخاک پایگاه بازتحلیل MERRA-2 برای دوره نامبرده نیز استفاده شد. بخش دوم تحقیق مربوط به شبیه‌سازی رخدادهای گردوخاک فرین در شمال‌شرق کشور است. برای این منظور مدل WRF-CHEM مورد استفاده قرار گرفت. برای اجرای مدل نیز از داده‌های مختلفی استفاده شده است که جزئیات کامل هر یک در بخش‌های بعدی آمده

همکاری‌های تحقیقات جوی و محیطی (AER) به‌طور مشترک شروع به بررسی کد مرجع طرحواره GOCART در مدل WRF-CHEM کنند. دلیل این بررسی نتایج غیرمنتظره‌ای بود که در الگوی شبیه‌سازی شده انتشار گردو خاک در جنوب غرب آسیا به دست آمده بود. زیرا این طرحواره بر اساس رابطه مستقیم بین سرعت باد و انتشار گردو خاک عمل می‌کند و نمک را ردیابی نمی‌کند. نتیجه این تحقیقات معرفی طرحواره اصلاح شده Air Force Weather Agency (AFWA) بود (جونز و همکاران، ۲۰۱۲؛ یوآن و همکاران، ۲۰۱۹). این طرحواره کاستی‌های GOCART-WRF به ویژه در گردو خاک کاذب به دست آمده در سرعت‌های باد کم را با بهبود فیزیک مدل برای کنترل بهتر انتشار ذرات ریز گردو خاک که با بمباران ذرات نمک نمایش می‌دهد برطرف کرد. سومین طرحواره فیزیکی به کار رفته در پیکربندی WRF-CHEM، طرحواره University of Cologne (UoC) است (شائو، ۲۰۰۴؛ شائو و همکاران، ۲۰۱۱). این طرحواره با اصلاح پارامترهای مربوط به رطوبت خاک و اصلاح ضریب زبری سطح که شار نمک و محاسبات انتشار گردو خاک به آن وابسته هستند سعی در برطرف کردن خطای طرحواره‌های قبلی در شناسایی و شبیه‌سازی گردو خاک در مناطقی که سرعت باد کم و زبری بالاست کرد (لیگرانده و همکاران، ۲۰۱۹).

چهار طرحواره UoC_S01، AFWA، GOCART و UoC_S11 جهت شبیه‌سازی گردو خاک آزمایش شد. طرحواره Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) انتشار گردو خاک است (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱) که در پیکربندی مدل WRF-CHEM از آن استفاده شد. این طرحواره در ابتدا به‌عنوان یک مدل منفرد هواویز آفلاین که با میدان‌های هواشناسی داده گواری شده کار می‌کرد طراحی شد (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۴). در سال ۲۰۰۹ فیزیک هواویز GOCART شامل الگوریتم‌هایی برای انتشار گردو خاک، تراپرد ونهشت خشک به مدل WRF-CHEM اضافه شد. از آن زمان محققین بسیاری از الگوریتم‌های انتشار گردو خاک GOCART به کار گرفته شده در مدل WRF-CHEM برای شبیه‌سازی گردو خاک بهره گرفتند. انتشار پژوهش‌های اولیه ضمن تأکید بر کاربردهای مفید این طرحواره بر نیاز به تنظیم مدل برای هر مکان یا رخداد برای شبیه‌سازی مناسب عمق نوری هواویز یا سایر پارامترهای مورد نیاز گردو خاک اشاره کردند. کاستی‌های این طرحواره در شناسایی گردو خاک، محاسبه انتشار گردو خاک به‌عنوان تابعی از سرعت باد یا هر دو سبب شد که در سال ۲۰۱۱ محققینی از آژانس وضعیت جوی نیروی هوایی (AFWA) و مرکز



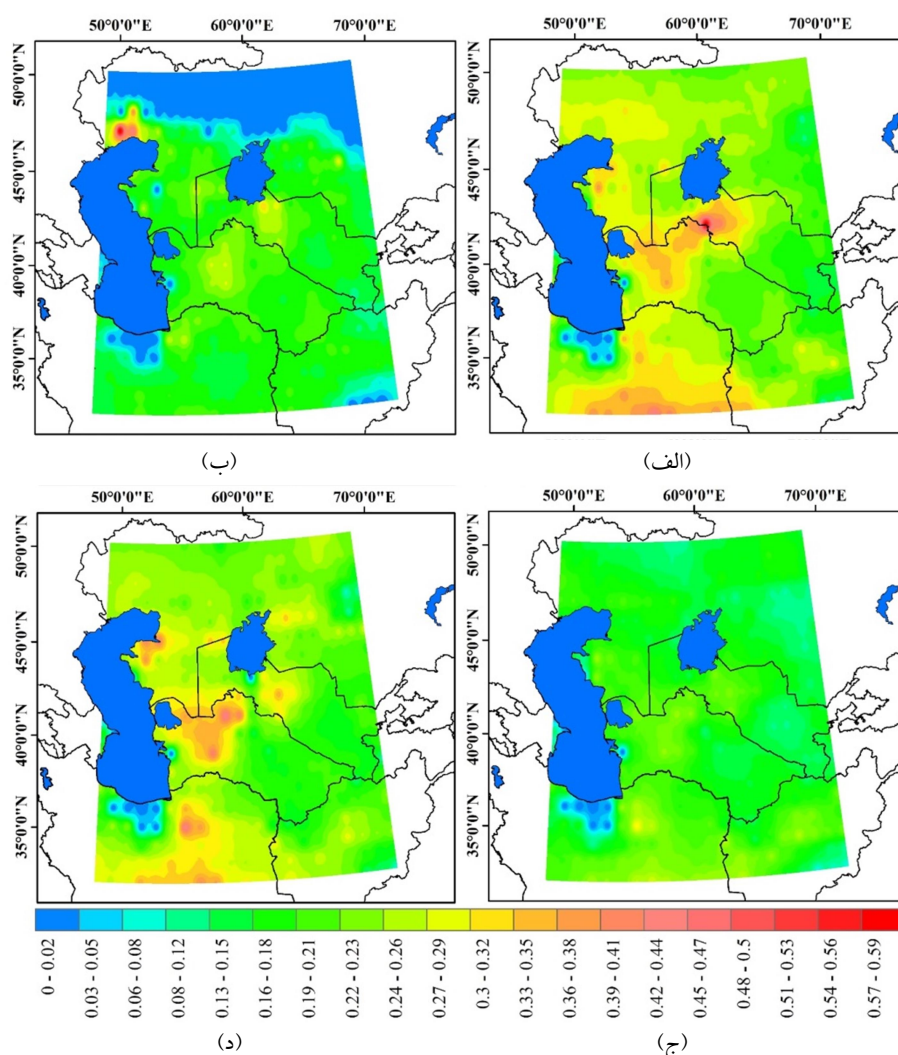
شکل ۲. دامنه تعریف شده برای مدل WRF-CHEM؛ کادرهای زرد تو در تو موقعیت دامنه‌های اول و دوم را نشان می‌دهد.

داده‌های ساعتی ایستگاه کنترل کیفی هوای شهر مشهد برای دو متغیر $PM_{2.5}$ و PM_{10} استفاده شد. برای درستی‌سنجی این دو متغیر از دو سنجه آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RSME) و ضریب همبستگی (PCC) استفاده شد. سنجه RSME انحراف تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهدات را نشان می‌دهد. سنجه PCC نشان دهنده رابطه بین دو متغیر است که دامنه آن بین -۱ تا ۱ است.

۲-۳-۲. درستی‌سنجی برونداد مدل WRF-CHEM با استفاده از داده‌های کنترل کیفی هوا پس از اجرای مدل WRF-CHEM نیاز است تا برونداد آن بر اساس داده‌های مشاهداتی مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که داده‌های مشاهداتی و به‌خصوص داده‌های شبکه رباتیک هواپزها Aerosol Robotic Network (AERONET) در شمال شرق ایران وجود ندارد در این تحقیق برای بررسی نتایج مدل از

جدول ۱. سنجه‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش.

سنجه آماری	نحوه محاسبه سنجه آماری
ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}}$
ضریب همبستگی پیرسون (PCC)	$PCC = \frac{(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}}$



شکل ۳. میانگین فصلی AOD مبتنی بر برونداد الگوریتم ترکیبی DB و DT سنجنده MODIS دو ماهواره Terra و Aqua طی دوره آماری بلندمدت (۲۰۰۴-۲۰۱۸) (الف فصل بهار؛ ب فصل زمستان؛ ج فصل پاییز و د فصل تابستان).

مهم‌ترین منبع گردو خاک در آسیای مرکزی تبدیل شده است؛ به طوری که ایندویتو و همکاران (۲۰۱۲) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که از اواخر قرن بیستم (۱۹۹۹-۱۹۸۴) تا اوایل قرن بیست و یکم (۲۰۱۸-۲۰۰۰) وقوع گردو خاک در آسیای مرکزی، دریاچه آرال، شمال دریای خزر و قره‌بغاز به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

۳. نتایج و بحث

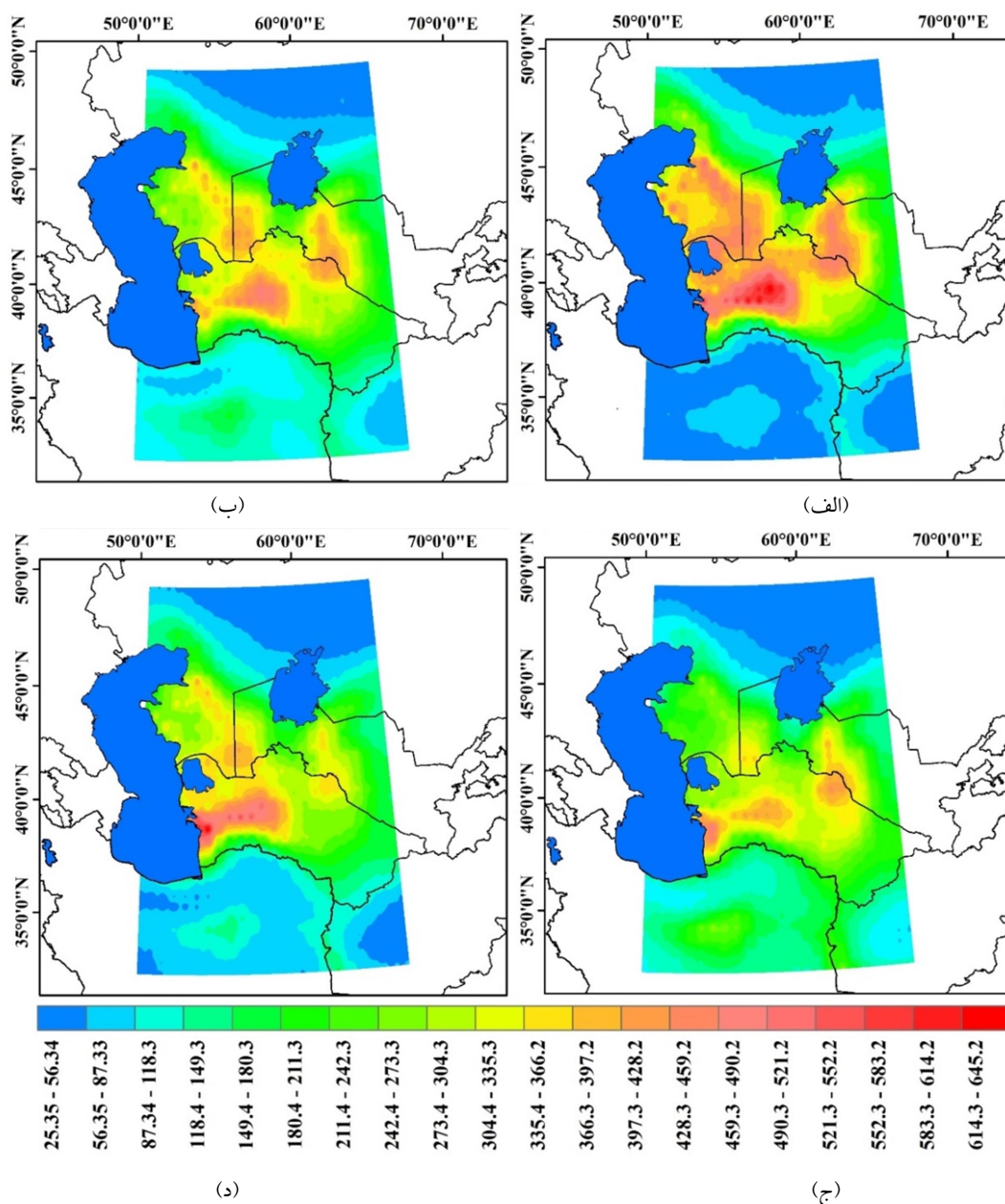
۳-۱. میانگین فصلی غلظت سطحی گردو خاک

شکل ۴ میانگین فصلی غلظت گردو خاک که از داده‌های بازتحلیل پایگاه MERRA-2 در طول ۱۵ سال گذشته ۲۰۱۸-۲۰۰۴ به دست آمده را نشان می‌دهد. گردو خاک به طور گسترده‌ای در سراسر منطقه توزیع شده و مناطقی با بیشینه غلظت گردو خاک در بیابان‌های قزل‌قوم و قره‌قوم و بسترهای خشکیده آرال قوم و قره‌بغاز در فصول مختلف سال دیده می‌شود. بیشینه میانگین فصلی غلظت گردو خاک در بیابان قره‌قوم با مقدار $645.2 \mu\text{g m}^{-3}$ در فصل بهار مشاهده می‌شود. کمینه مقدار غلظت گردو خاک در منطقه $25.3 \mu\text{g m}^{-3}$ است. به طوری که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، مقدار گردو خاک موجود در شمال شرقی ایران در مقایسه با چشمه‌های فرامنطقه‌ای نامبرده در آسیای مرکزی در فصول مختلف سال خیلی کم است. به طوری که بالاترین مقدار آن در فصل تابستان ($208 \mu\text{g m}^{-3}$) است. به طور کلی با بررسی نقشه غلظت گردو خاک (شکل ۴) و همین‌طور عمق نوری هواویز (شکل ۳) به نظر می‌رسد که گردو خاک در شمال شرقی ایران تغییرات چندانی ندارد و در طول سال ثابت است، اما در حقیقت مقدار غلظت بالای گردو خاک در منطقه آسیای مرکزی باعث شده است تا تغییرات گردو خاک شمال شرقی ایران به چشم نیاید (با توجه به هم‌مقیاس بودن شکل‌ها). همین امر برای عمق نوری هواویزها نیز قابل بحث است به طوری که شاخص AOD در فصل بهار برای منطقه شمال شرق ایران بین ۰/۲۷ تا ۰/۲۹ در تغییر است. بستر خشکیده دریاچه آرال که امروزه با عنوان بیابان آرال قوم شناخته می‌شود، در اوایل قرن ۲۱ به

۳-۲. شبیه‌سازی عددی پدیده‌های گردو خاک فرین
۳-۲-۱. درستی‌سنجی طرحواره‌های گردو خاک مدل WRF-CHEM و انتخاب طرحواره مناسب
برای گزینش طرحواره مناسب از بین چهار طرحواره اجرا شده، دو متغیر $\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10} شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده ایستگاه‌های کنترل کیفی هوای سازمان محیط زیست (ایستگاه کنترل کیفی هوای شهر مشهد) مقایسه شدند. دوره زمانی درستی‌سنجی برای رخدادهای نمونه شبیه‌سازی شده (هر چهار روز) با مدل WRF-CHEM به شکل ساعتی است. بررسی نشان داد که به جز طرحواره UoC_S11 دیگر طرحواره‌ها به شکل قابل توجهی قادر به شبیه‌سازی $\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10} در طول دوره به‌ویژه در ساعت اوج رخدادهای گردو خاک بوده‌اند. به طوری که هریک از طرحواره‌های GOCART، AFWA، UoC_S01 و UoC_S11 در ساعت ۱۲ روز ۱۷ اکتبر که متغیر $\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10} به اوج خود رسیده، به ترتیب حدود ۱۰/۶۷، ۳۶/۸۲، ۸۴/۰۲ و ۱۱۵/۹۸ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) کمتر از داده‌های مشاهده‌ای برای متغیر $\text{PM}_{2.5}$ نشان دادند. با بررسی مقادیر ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده ایستگاهی و شبیه‌سازی شده، طرحواره GOCART مدل WRF-CHEM نسبت به دیگر طرحواره‌ها کارایی قابل قبولی در شبیه‌سازی ذرات معلق داشته است. به طوری که همبستگی بین این طرحواره و داده‌های مشاهده‌ای ۰/۹ به دست آمده است (در سطح $\alpha = 0.05$). این درحالیست که ضریب همبستگی هر یک از طرحواره‌های AFWA،

(۲۰۱۰؛ سو و فونگ، ۲۰۱۵؛ یوآن و همکاران، ۲۰۱۹) است. همچنین بررسی نتایج به دست آمده بر روی پارامتر PM_{10} نشان داد که اگرچه PM_{10} اختلاف زیادی با داده مشاهداتی دارد اما با این حال طرحواره GOCART با کمترین اختلاف ($309/64 \mu g/m^3$) با داده مشاهداتی و طرحواره UoC_S11 با بیشترین اختلاف ($\mu g/m^3$) ۶۶۰/۵۶ به ترتیب بهترین و ضعیف ترین کارایی را دارند (شکل ۵).

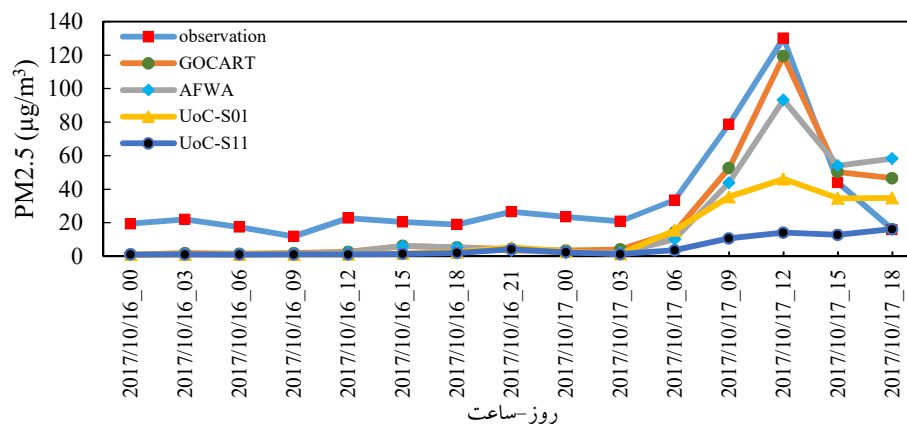
UoC_S01 و UoC_S11 با داده مشاهداتی به ترتیب نسبت به طرحواره GOCART کاهش یافته و RMSE آنها افزایش یافته است (جدول ۲). بنابراین می توان اظهار داشت که طرحواره GOCART در شبیه سازی رخداد گردوخاک در منطقه مورد مطالعه کارایی نسبتاً بالاتری نسبت به دیگر طرحواره ها دارد. در مجموع، نتایج درستی سنجی طرحواره GOCART، تأییدکننده نتایج تحقیقات گذشته (ژائو و همکاران،



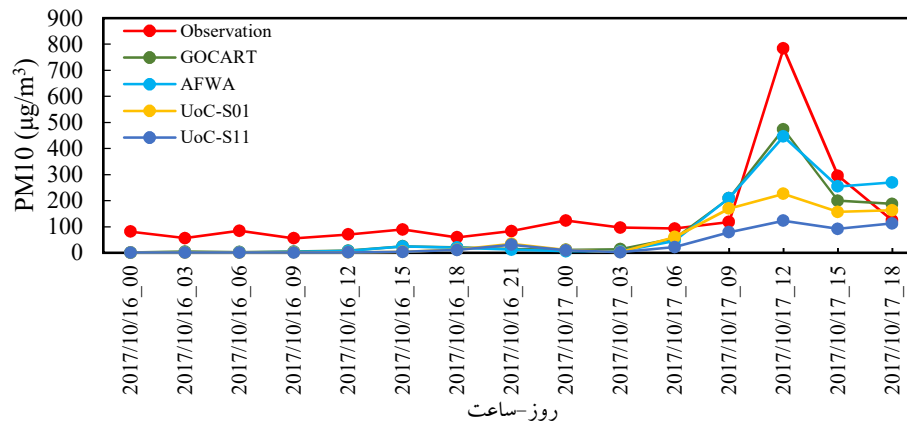
شکل ۴: میانگین فصلی غلظت گردوخاک ($\mu g/m^3$) مبتنی بر برون داد پایگاه داده MERRA-2 طی دوره آماری بلندمدت (۲۰۰۴-۲۰۱۸) (الف فصل بهار؛ ب) فصل زمستان؛ ج) فصل پاییز و د) فصل تابستان.

جدول ۲. سنجه‌های آماری و طرحواره‌های مدل WRF-CHEM با داده‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} ایستگاه کنترل کیفی هوای شهر مشهد.

طرحواره	شاخص	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PCC
GOCART	$PM_{2.5}$	۱۸/۶۸	۰/۹
	PM_{10}	۱۰۶/۶۹	۰/۹
AFWA	$PM_{2.5}$	۲۳/۵۴	۰/۸
	PM_{10}	۱۱۶/۴۳	۰/۸۳
UoC_S01	$PM_{2.5}$	۲۹/۶۹	۰/۷۷
	PM_{10}	۱۶۱/۷۸	۰/۷۲
UoC_S11	$PM_{2.5}$	۳۹/۶۵	۰/۶۱
	PM_{10}	۱۹۰/۲۶	۰/۷۰



(الف)



(ب)

شکل ۵. مقایسه مقادیر $PM_{2.5}$ (الف) و PM_{10} (ب) شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-CHEM و اندازه‌گیری شده در ایستگاه کنترل کیفی مشهد برای رخداد

گردو خاک نمونه در ۱۷ اکتبر ۲۰۱۷.

منطقه‌ای درک بهتری از وضعیت این پدیده ارائه می‌دهد.

توزیع فضایی و میزان غلظت گردو خاک مبتنی بر پرونداد

طرحواره GOCART مدل WRF-CHEM در شکل ۶

۳-۳. شبیه سازی رخدادهای گردو خاک منتخب و

تحلیل وضعیت جو

بررسی زمانی-مکانی غلظت گردو خاک در مقیاس

ایجاد شده، از نظر فضایی از گستره جغرافیایی کمتری برخوردار بوده، به طوری که در میان چهار رخداد منتخب، کمترین گسترش فضایی را از آن خود کرده است (شکل ۶-ب). تحلیل میدان باد در ترازهای زیرین جو مبین آن است که شدت باد تنها در یک محدوده کوچکی در جنوب بیابان قره قوم به طور برجسته‌ای افزایش یافته به شکلی که متوسط سرعت باد در ۱۰۰۰ متر اول وردسپهر در جنوب بیابان قره قوم به حدود ۳۰ متر بر ثانیه بالغ شده است. شکل‌گیری بادهای بسیار شدید با جهت غالب شمال-شمال شرقی، سبب افزایش محلی غلظت گردو خاک به میزان ۵۰۰ mg/kg در مجاورت مرزهای ایران شده است (شکل ۶-ب). تحلیل وضعیت جو برای روز ۲۹ می ۲۰۰۸، حاکی از عبور یک ناوه کوتاه (Minor Trough) از بخش‌های جنوبی کشور ترکمنستان می باشد (شکل ۷-ب). عبور سریع ناوه کوتاه، بادهای شمالی بسیار شدیدی را در پایین‌ترین ترازهای جو بر جانب شمالی مرزهای ایران در پی داشته (شکل ۷-و)، که به سرعت به یک توفان گردو خاک در مقیاس نسبتاً کوچک‌تر در محدوده بیابان قره قوم در جنوب کشور ترکمنستان تبدیل شده است. با توجه به شکل ۷-و، در این نمونه، متوسط سرعت باد در تراز ۹۵۰ هکتوپاسکال در محدوده بیابان قره قوم بین ۱۵ الی ۲۰ متر بر ثانیه بوده که برداشت سریع و قابل توجه گردو خاک از این بیابان را در پی داشته است. بررسی‌ها بیانگر آن است که در هر دو مورد ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷ و ۲۹ ماه می ۲۰۰۸، عامل اصلی ایجاد توفان‌ها، عبور ناوه امواج غربی برون‌حاره بوده که در گذر شرق‌سوی خود، سبب شکل‌گیری بادهای شدید در محدوده کشور ترکمنستان و شمال شرق ایران شده‌اند.

بررسی رخداد گردو خاک در روز ۸ ژوئن ۲۰۱۵ نشان‌دهنده آن است که در این روز گردو خاک پهنه وسیعی را در منطقه مورد مطالعه پوشانده است (شکل ۶-ج). در مقام مقایسه، توفان گردو خاک ۸ ژوئن ۲۰۱۵، بیشترین گسترش عرضی را در میان رخدادهای مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. در این رخداد

نشان داده شده است. بررسی تغییرات مکانی غلظت گردو خاک به همراه وضعیت متوسط میدان باد در ترازهای زیرین جو در روزهای منتخب نشان داد که طرحواره GOCART دارای کارایی لازم برای شبیه‌سازی پراکندگی گردو خاک در منطقه مورد مطالعه است. به طور موردی، در رخداد گردو خاک ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷ هسته مرکزی گردو خاک بخش گسترده‌ای از کشورهای ازبکستان و ترکمنستان را فرا گرفته و با توجه به وضعیت متوسط میدان باد، توفان گردو خاک حرکتی شرق‌سو و جنوب‌سو را تجربه کرده است (شکل ۶-الف). با در نظر گرفتن موقعیت‌های جغرافیایی، منشأ این توفان می‌بایست بیابان‌های خشک قزل قوم (ازبکستان) و قره قوم (ترکمنستان) باشد. الگوی متوسط جریان باد در ۱۰۰۰ متر اول وردسپهر، مبین انتقال جنوب‌سوی گردو خاک از بیابان‌های یادشده به مناطق واقع در منتهی‌الیه شمال شرق کشور است (شکل ۶-الف). تحلیل وضعیت جو در زمان وقوع توفان ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷، بیانگر آن است که در روز یادشده به واسطه عمیق‌شدن یک ناوه موج غربی، همراه با شکل‌گیری یک کم ارتفاع بریده (سردچال) در وردسپهر میانی در محدوده کشورهای ازبکستان و ترکمنستان، بادهای غرب - جنوب غربی شدیدی کل منطقه را دربر گرفته است (شکل ۷-الف و ۷-ه). استقرار شرایط یادشده سبب شده تا در روز ۱۳ نوامبر، شدت باد در پایین‌ترین ترازهای جو از مقدار ۱۵ متر بر ثانیه فراتر رفته (شکل ۷-ه) و خیزش گسترده و غلیظ گردو خاک از بیابان‌های قزل قوم و قره قوم را در پی داشته باشد. با استقرار گردش چرخندی قوی در محدوده‌ای بالاتر از عرض ۳۹ درجه شمالی و برداشت گسترده گردو خاک از بیابان‌های ازبکستان و ترکمنستان، به طور همزمان در محدوده شمال شرقی کشور، شاهد شکل‌گیری یک جریان با جهت غالب شرق-شمال شرقی هستیم که انتقال گردو خاک به شمال شرق کشور را در مقیاسی کوچک‌تر در پی داشته است (شکل ۷-الف).

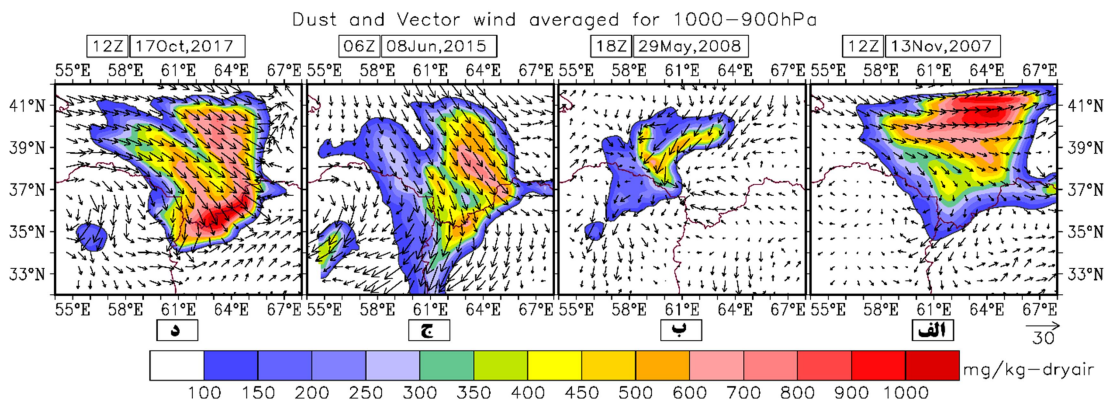
بررسی توفان ۲۹ ماه می ۲۰۰۸ بیانگر آن است که توفان

برخوردار است. مضاف بر این، در این نمونه، به واسطه وجود یک کم‌ارتفاع بریده با تعداد قابل توجهی پربند داخلی بسته و تاوایی مثبت بسیار بالا در وردسپهر میانی (شکل ۷-د)، شدت باد در ترازهای زیرین بر روی کل منطقه به شدت بالا بوده است. همین امر موجب شکل‌گیری یکی از گسترده‌ترین توفان‌ها با مقادیر غلظت گردوغبار بالا در شرق دریای خزر شده است (شکل ۶-د). حرکت شرق سوی ناوه و استقرار یک الگوی گردش چرخندی، سبب گسترش مداری این توفان گردو خاک بر روی کشورهای ترکمنستان و ازبکستان شده است. شکل‌گیری بادهای شدید در زیر این سامانه با جهت کلی شمال غربی در ترازهای زیرین وردسپهر، سبب برداشت مقادیر قابل ملاحظه‌ای از گردو خاک از بیابان‌های ترکمنستان و ازبکستان شده که با توجه به الگوی غالب جریان، یک توفان گردو خاک جنوب شرق سو را در پی داشته است (شکل ۶-د).

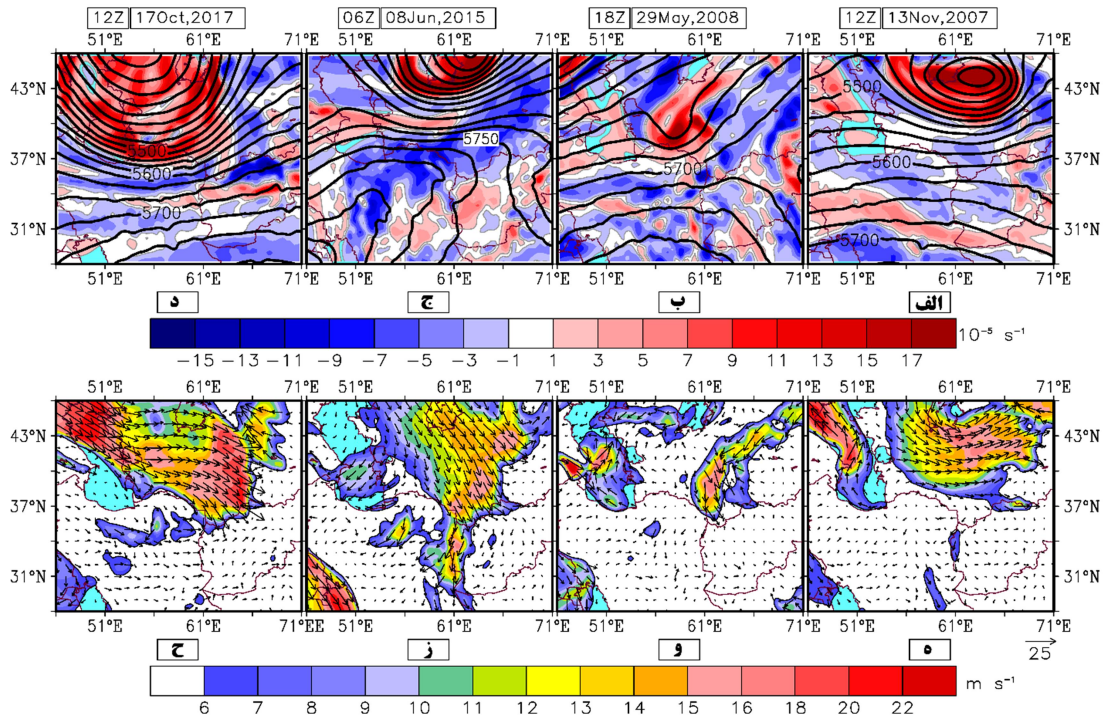
در یک ارزیابی کلی می‌توان گفت که در تمامی رخدادهای منتخب، منطقه سرخس در قیاس با سایر مناطق شمال شرق کشور مقادیر بالایی از غلظت گردو خاک را تجربه می‌کند. از آنجایی که رخدادهای نمونه برای روزهای گسسته و فصول مختلف سال هستند؛ می‌توان اذعان داشت که منطقه سرخس در استان خراسان رضوی یکی از مناطقی است که در طول سال طوفان‌های گردو خاک با شدت بالا را داراست که در خروجی‌های مدل نیز دیده می‌شود (شکل ۶).

وسعت مناطق همراه با گردو خاک علاوه بر شمال شرق ایران، مناطقی از افغانستان و جنوب ترکمنستان تا بخش‌هایی از ایران مرکزی را شامل می‌شود. مضاف بر این، توفان ماه ژوئن به همراه توفان روز ۱۷ اکتبر ۲۰۱۷، بالاترین میزان غلظت گردو خاک در مرزهای ایران و افغانستان را نشان می‌دهد (شکل ۶-ج و ۶-د). علاوه بر این، غلظت گردو خاک شبیه‌سازی شده، از نظر توزیع مکانی، با تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۸) انطباق خوبی را به نمایش می‌گذارند. تحلیل وضعیت جوی توفان هشتم ژوئن ۲۰۱۵، بیانگر آن است که، رخداد یاد شده، حاصل استقرار یک واچرخند در عرض‌های شمالی و یک چرخند در جنوب شرق کشور و بخش‌هایی از پاکستان بوده است. چنین الگویی، ویژگی غالب جریانات ترازهای زیرین وردسپهر در دوره گرم سال در محدوده شرق فلات ایران محسوب می‌شود. بدین ترتیب، استقرار یک پشته قوی جنب حاره‌ای همراه با گردش واچرخندی گسترده در ترازهای میانی وردسپهر (شکل ۷-ج) و شکل‌گیری هم‌زمان جریانات شمال غربی گسترده با گردش کلی واچرخندی در تمامی ساعات شبانه‌روز در پایین‌ترین ترازهای جو (شکل ۷-ز)، رخداد توفان گردو خاک را در سطح وسیع از شمال شرق کشور در پی داشته است.

بررسی توفان روز ۱۷ اکتبر ۲۰۱۷، مشابه رخداد روز ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷، حکایت از عبور یک ناوه عمیق از روی منطقه دارد. در قیاس با رخداد ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷، ناوه یاد شده از گستردگی جغرافیایی و عرضی بیشتری



شکل ۶. نقشه‌های ترکیبی باد برداری (پیکان‌ها) و مقادیر گردو خاک (رنگ‌ها) متوسط‌گیری شده برای ترازهای ۹۰۰ الی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-CHEM برای چهار رخداد منتخب. واحد غلظت گردو خاک میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد.



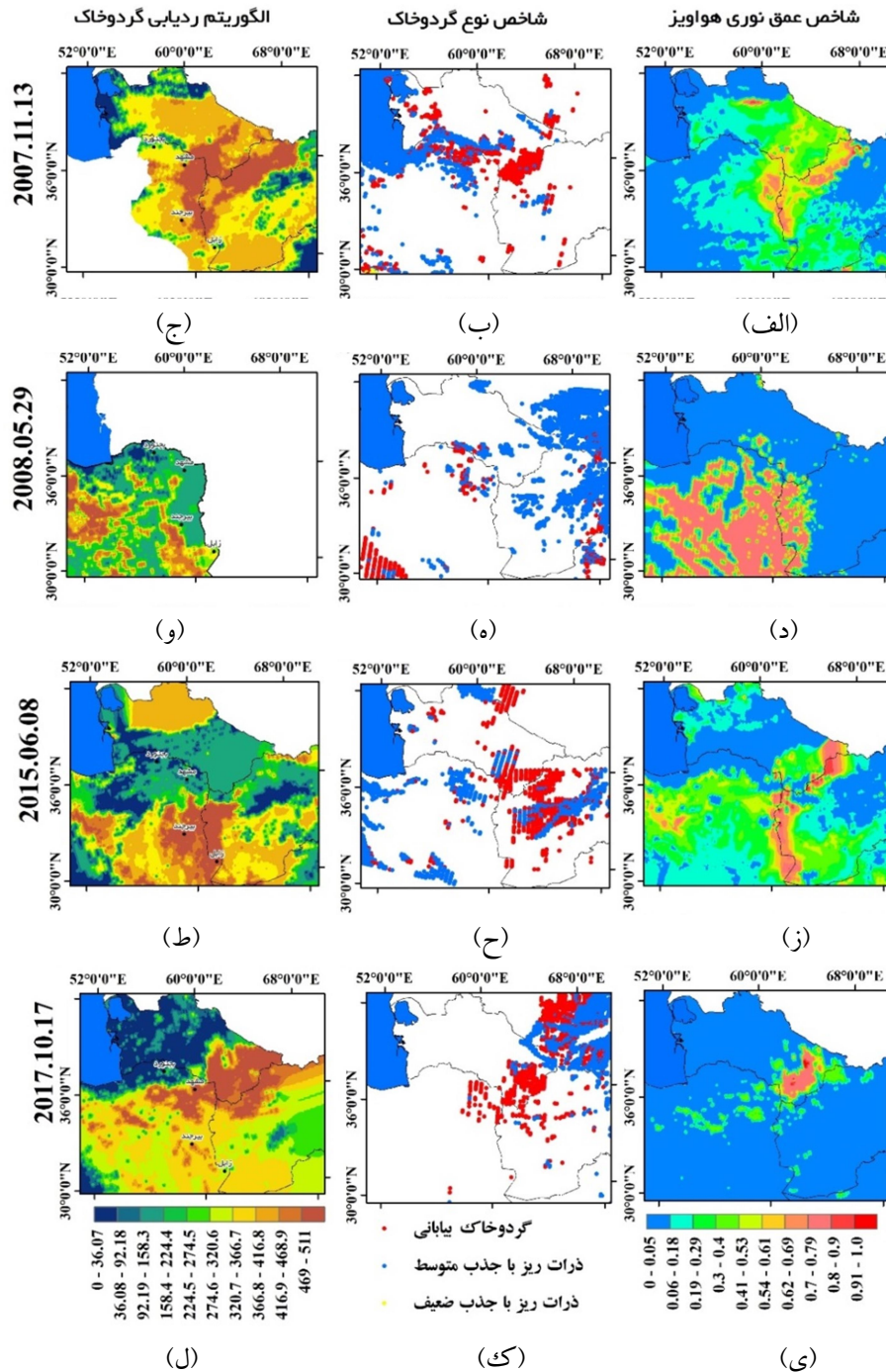
شکل ۷. وضعیت هم‌مدیدی در زمان اوج وقوع توفان‌های گردوخاک. پتل‌های بالا، نقشه‌های ترکیبی تاوایی نسبی (رنگ‌ها) و ارتفاع ژئوپتاسیل (خطوط ممتد سیاه)، در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال. پتل‌های پایین، نقشه‌های ترکیبی باد برداری (پیکان‌ها) و شدت باد (رنگ‌ها) برای تراز ۹۵۰ هکتوپاسکال، شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-CHEM برای چهار رخداد منتخب.

۳-۴. بررسی محصولات سنجش از دور در زمان رخداد‌های منتخب گردوخاک

برای تبیین بهتر رخداد‌های گردوخاک فصول مختلف و تحلیل بیشتر رخداد‌های منتخب، مقادیر مربوط به AOD، DDA و نوع گردوخاک مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۸ مقادیر AOD که توسط سنجنده MODIS به دست آمده است را نشان می‌دهد. به طوری که در شکل ملاحظه می‌شود، گردوخاک زیادی در شرق استان خراسان رضوی و در منطقه سرخس مشاهده می‌شود. این مقدار زیاد از هواویزها با بررسی کدهای پدیده گردوخاک ایستگاه‌های هم‌مدید مورد تأیید است. مقایسه توزیع گردوخاک به دست آمده از محصولات سنجش از دور توافق بالایی با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-CHEM نشان می‌دهد که در شکل‌های (۶ و ۸) نیز قابل مشاهده است. مقدار DDA برای رخداد‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ به آستانه ۵۱۰ در منطقه سرخس رسیده است. همان‌طور که در بخش روش کار نیز توضیح

داده شد در این الگوریتم آستانه ۳۸۰ نشان‌دهنده گردوخاک است. مقایسه مقدار به دست آمده با آستانه شاخص DDA نمایانگر مقدار بسیار زیاد بار گردوخاک ورودی به منطقه مورد مطالعه است. بررسی بار گردوخاک موجود در جو برای روزهای منتخب با استفاده از شاخص AOD سنجنده MODIS نشان می‌دهد که گردوخاک در هر چهار رخداد نمونه در شرق دریای خزر و منطقه سرخس در شرق استان خراسان رضوی نسبتاً زیاد است (AOD، ۱ است). در عین حال، در بیشتر بخش‌های مرکزی و شمالی استان خراسان رضوی، مقدار AOD بین ۰/۷ تا ۱ است. شاخص نوع گردوخاک نیز که توسط داده‌های ماهواره Terra به دست آمده است، نتایج به دست آمده توسط دو شاخص قبلی را تأیید می‌کند. به طوری که نوع غالب ذرات در منطقه مورد مطالعه از نوع گردوخاک بیابانی است. از آنجا که انتظار می‌رود مقدار گردوخاک روی چشمه‌های گردوخاک بیشتر باشد، مناطقی که مقدار عمق نوری هواویز (AOD)

بیشتر است را می‌توان چشمه گردوخاک در نظر گرفت. مناطق مرکزی ترکمنستان، منطقه سرخس در شرق استان خراسان رضوی و شرق دریای خزر (قره بغاز) قرار چشمه‌های اصلی گردوخاک به‌ترتیب اولویت روی دارند.



شکل ۸. شاخص عمق نوری هواویز (AOD) مبتنی بر برون‌داد سنجنده MODIS بر اساس الگوریتم ترکیبی DT و DB ماهواره‌های Terra و Aqua؛ الگوریتم ردیابی گردوخاک (DDA) سنجنده AIRS (ردیف اول و دوم به دلیل فقدان داده در ایران مرکزی و شرق ایران ماسک شده است)؛ شاخص نوع گردوخاک ماهواره Terra در رخدادهای منتخب؛ الف) شاخص عمق نوری هواویز ۲۰۰۷/۱۱/۱۳؛ ب) شاخص نوع گردوخاک ۲۰۰۷/۱۱/۱۳؛ ج) الگوریتم ردیابی گردوخاک ۲۰۰۷/۱۱/۱۳؛ د) شاخص عمق نوری هواویز ۲۰۰۸/۰۵/۲۹؛ ه) شاخص نوع گردوخاک ۲۰۰۸/۰۵/۲۹؛ و) الگوریتم ردیابی گردوخاک ۲۰۰۸/۰۵/۲۹؛ ز) شاخص عمق نوری هواویز ۲۰۱۵/۰۶/۰۸؛ ح) شاخص نوع گردوخاک ۲۰۱۵/۰۶/۰۸؛ ط) الگوریتم ردیابی گردوخاک ۲۰۱۷/۱۰/۱۷؛ ی) شاخص عمق نوری هواویز ۲۰۱۷/۱۰/۱۷؛ ک) شاخص نوع گردوخاک ۲۰۱۷/۱۰/۱۷؛ ل) الگوریتم ردیابی گردوخاک ۲۰۱۷/۱۰/۱۷.

سپس تابستان بیشینه فعالیت گردو خاک را در بین فصول مختلف سال در منطقه مورد مطالعه دارا می‌باشند. چهار چشمه گردو خاک اصلی شناسایی شده در این پژوهش عبارت‌اند از: بیابان‌های قره‌قوم و قزل‌قوم و بسترهای خشکیده آرال‌قوم و قره‌بغاز. الگوریتم شناسایی گردو خاک (DDA) و شاخص عمق نوری هواویزها (AOD) نیز نقش چهار چشمه اصلی گردو خاک را تأیید می‌کند. بیشینه غلظت سطحی گردو خاک با مقدار $208 \mu\text{g m}^{-3}$ در شمال شرقی ایران در فصل تابستان دیده می‌شود. تغییرات فصلی غلظت گردو خاک در شمال شرقی کشور نسبت به چهار چشمه اصلی گردو خاک در منطقه آسیای مرکزی ناچیز است. شاخص عمق نوری هواویز نیز در شمال شرق کشور در دوره گرم سال بیشینه است به طوری که در فصل بهار مقدار این شاخص 0.27 تا 0.29 را نشان می‌دهد. داده شاخص نوع گردو خاک ماهواره Terra نشان داد که نوع هواویزها در نمونه‌های منتخب گردو خاک بوده است.

به‌طور کلی یافته‌های تحقیق نشان داد که مدل WRF-CHEM قابلیت آشکارسازی و تحلیل تیپ‌های مختلف توفان‌های گردو خاک را دارد. به طوری که به شکل قابل‌قبولی ویژگی‌های توفان‌های گردو خاک هر دو دوره سرد و گرم سال را نشان می‌دهد. بررسی ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی مدل WRF-CHEM و مشاهداتی نشان داد که برونداد طرحواره GOCART همبستگی معنی داری در سطح 0.05 داشته است. بر اساس سنج‌های RMSE و PCC طرحواره GOCART طرحواره مناسبی برای مطالعه گردو خاک در شمال شرق ایران است. مقایسه نتایج طرحواره‌های گسیل گردو خاک مختلف برای متغیرهای $\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10} با داده‌های مشاهداتی ایستگاه کنترل کیفی هوای شهر مشهد نشان داد که طرحواره GOCART به‌خوبی می‌تواند رخدادهای گردو خاک را به تصویر بکشد و خطای پایینی را نسبت به داده ایستگاهی ارائه دهد. ساری صراف و همکاران (۱۳۹۶ب) نیز در غرب ایران به همین نتیجه رسیدند که

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود نقاط قرمز رنگ گردو خاک بیابانی، نقاط آبی‌رنگ ذرات ریز با جذب متوسط و نقاط زرد رنگ ذرات ریز با جذب ضعیف هستند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این محصول ماهواره‌ای در تمامی چهار رخداد نماینده مورد بررسی گردو خاک بیابانی در منطقه مورد مطالعه درست تشخیص داده شده است. با توجه به اینکه $\text{PM}_{2.5}$ در شهرها اغلب منشأ آلودگی‌های شهری دارد و تمایز ذرات بیابانی و آلودگی شهری به‌عنوان یک چالش تلقی می‌شود، شاخص نوع گردو خاک ماهواره Terra در رخدادهای گردو خاک منتخب نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این شاخص نشان داد که گردو خاک بیابانی (نقاط قرمز رنگ شکل ۸) در تمامی روزهای منتخب در سطح منطقه مورد مطالعه وجود داشته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در روزهای مورد مطالعه گردو خاک بیابانی در سطح شهر مشهد وجود داشته است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

رخدادهای گردو خاک یکی از مشخصه‌های اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک کره زمین است. شمال شرق ایران به‌دلیل نزدیکی به آسیای مرکزی یکی از مناطق مورد تهدید جدی گردو خاک است. تغییرات فصلی گردو خاک با استفاده از داده‌های غلظت سطحی گردو خاک پایگاه MERRA-2 و داده‌های عمق نوری هواویز بر اساس الگوریتم ترکیبی DB و DT سنجنده MODIS طی دوره آماری (۲۰۱۸-۲۰۰۴) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به‌منظور درک بهتر رخدادهای گردو خاک، چهار نمونه رخداد گردو خاک فرین انتخاب و توسط مدل WRF-CHEM شبیه‌سازی شد.

نتایج نشان داد که چشمه‌های اصلی گردو خاک در خارج از مرزهای ایران در کشور ترکمنستان قرار دارد. همچنین در داخل مرزهای کشور نیز سرخس به‌عنوان یکی از چشمه‌های گردو خاک فعال شناسایی شد. فصل بهار و

با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۳)، ۸۳-۹۶.

داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۹، واکاوی وردایی زمانی- مکانی الگوهای قائم و افقی ریزگردها و ارزیابی بازخوردهای آب هوایی آن در ایران، رساله دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

دوستان، ر.، ۱۳۹۷، تحلیل همبند گردوغبار شمال شرق ایران، مخاطرات محیط طبیعی، ۷(۱۶)، ۲۳-۴۴.
ذوالفقاری، ح.، معصوم پور سماکوش، ج.، شایگان‌مهر، ش. و احمدی، م.، ۱۳۹۰، بررسی همبند توفان‌های گردوغباری در مناطق غربی ایران طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ (مطالعه موردی: موج فراگیر تیرماه ۱۳۸۸)، م. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۴۳(۳)، ۱۷-۳۴.
رایگانی، ب.، ۱۳۹۸، شناسایی کانون‌های بالقوه تولید گردوغبار با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: استان البرز). م. مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۰)، ۱-۲۰.

رسولی، ع.، ساری صراف؛ ب. و محمدی، غ.، ۱۳۹۰، تحلیل روند وقوع پدیده اقلیمی گردوغبار در غرب کشور در ۵۵ سال اخیر با به‌کارگیری روش‌های آماری نا پارامتری، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۴(۱۱)، ۱-۱۶.

رضازاده، م.، ایران‌نژاد، پ. و شائو، ی.، ۱۳۹۲، شبیه‌سازی گسیل غبار با مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا -WRF-Chem و با استفاده از داده‌های جدید سطح در منطقه خاورمیانه، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۱)، ۱۹۱-۲۱۲.
ساری صراف، ب.، رسولی، ع.، زرین، آ. و نجفی، م.، ۱۳۹۶ الف، شبیه‌سازی توزیع قائم سامانه‌های گردوغبار زا در ارتباط با سامانه‌های همبند و توپوگرافی در غرب ایران، م. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۹(۲)، ۱۶۹-۱۸۹.

ساری صراف، ب.، رسولی، ع.، زرین، آ. و نجفی، م.، ۱۳۹۶ ب، شبیه‌سازی واداشت‌های تابشی گردوغبار در

طرحواره GOCART بهترین طرحواره برای بررسی گردوخاک است.

نتایج تحلیل همبندی و بررسی الگوی فشار برای چهار نمونه منتخب بیانگر آن است که سه رخداد از پدیده‌های گردوخاک فرین مورد آزمایش در نتیجه گذر یک موج راسبی برون حاره و عمیق شدن ناوه موج در محدوده کشور ترکمنستان به‌وقوع پیوسته‌اند. در مقابل، در بررسی مورد مربوط به تابستان، مشخص شد که علی‌رغم عبور ناوه یک موج برون‌حاره از عرض‌های شمالی، توفان ایجاد شده در محدوده افغانستان و مرزهای شرقی و منتهی‌الیه شمال شرق کشور می‌باشد. الگوی همبندی این نمونه نتیجه استقرار یک الگوی گردش تابستانه است که با استقرار همزمان یک گردش واچرخندی در محدوده جنوبی ترکمنستان و بخش‌های شمال-شمال شرقی ایران و گردش چرخندی در محدوده دشت سیستان و بخش‌های جنوب شرقی کشور به‌وقوع پیوسته است.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد با عنوان «بررسی توانمندی مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی رخدادهای گردوغباری شمال شرق ایران» است که با پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد با کد ۵۱۸۴۹ انجام شده است. نویسندگان برخوردار لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از دانشگاه فردوسی مشهد که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

مراجع

براتی، غ.، مرادی، م.، شامخی، ع. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۶، تحلیل روابط توفان‌های غباری جنوب ایران با کم‌فشار سند. مخاطرات محیط طبیعی، ۶(۱۳)، ۹۱-۱۰۸.

تقوی، ف.، اولاد، ا.، صفر راد، ط. و ایران‌نژاد، پ.، ۱۳۹۲، تشخیص و پایش توفان گردوغبار غرب ایران

- زمین و فضا، ۴۴(۱)، ۱۲۵-۱۴۶.
- گودرزی، م.، حسینی، ا. و احمدی، ح.، ۱۳۹۶، ارزیابی توزیع زمانی و مکانی روزهای همراه با گردوغبار در غرب و جنوب غرب ایران. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۱(۳۹)، ۱-۱۰.
- لشکری، ح. و کیسخروی، ق.، ۱۳۸۷. تحلیل آماری سینوپتیکی توفان‌های گرد و غبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی (۲۰۰۵-۱۹۹۳)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۰(۶۵)، ۱۷-۳۳.
- منتظری، م. و دادخواه، ل.، ۱۳۹۲، بررسی روند تغییرات روزهای همراه با گردوغبار در ایستگاه سینوپتیک بوشهر، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۲(۸۶-۱)، ۸۹-۹۱.
- Barnes, W. L., Xiong, X. and Salomonson, V. V., 2003, Status of terra MODIS and aqua MODIS. *Advances in Space Research*, 32(11), 2099-2106.
- Chaibou, A. A. S., Ma, X., Kumar, K. R., Jia, H., Tang, Y. and Sha, T., 2020, Evaluation of dust extinction and vertical profiles simulated by WRF-Chem with CALIPSO and AERONET over North Africa. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 199, 105213.
- Chen, S.H. and Dudhia, J., 2005, Annual Report: WRF PHYSICS [R/OL]. <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/wrf-doc-physics.pdf>.
- Chen, J., Wan, S., Henebry, G., Qi, J., Gutman, G., Sun, G. and Kappas, M. (Eds.), 2013, *Dryland East Asia: land dynamics amid social and climate change*. Walter de Gruyter.
- Chen, S., Jiang, N., Huang, J., Zang, Z., Guan, X., Ma, X., Luo, Y., Li, J., Zhang, X. and Zhang, Y., 2019, Estimations of indirect and direct anthropogenic dust emission at the global scale. *Atmospheric Environment*, 200, 50-60.
- Chin, M., Diehl, T., Tan, Q., Prospero, J.M., Kahn, R.A., Remer, L.A., Yu, H., Sayer, A.M., Bian, H., Geogdzhayev, I.V. and Holben, B.N., 2014, Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: a perspective from observations and a global model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(7), 3657-3690.
- Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B.N., Duncan, B.N., Martin, R.V., Logan, J.A., Higurashi, A. and Nakajima, T., 2002, Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and Sun photometer measurements. *Journal of the atmospheric sciences*, 59(3), 461-483.
- Dadashi-Roudbari, A. and Ahmadi, M., 2020, Evaluating temporal and spatial variability and trend of aerosol optical depth (550 nm) over Iran using data from MODIS on board the Terra and Aqua satellites. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), 1-23.
- Dukhovny, V. A., Navratil, P., Rusiev, I., Stulina, G. and Roshenko, Y. E., 2008, Comprehensive remote sensing and ground-based studies of the dried Aral Sea bed. *SIC ICWC, Tashkent*, 173.
- Floutsi, A. A., Korras-Carraca, M. B., Matsoukas, C., Hatzianastassiou, N. and Biskos, G., 2016, Climatology and trends of aerosol optical depth over the Mediterranean basin during the last 12 years (2002–2014) based on Collection 006 MODIS-Aqua data, *Science of the Total Environment*, 551, 292-303.
- 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.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Torres, O. and Chin, M., 2004, Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation. *Environmental Modelling & Software*, 19(2), 113-128.
- Gkikas, A., Proestakis, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Di Tomaso, E., Tsekeri, A., Marinou, E., Hatzianastassiou, N. and Pérez

- García-Pando, C., 2021, ModIs Dust AeroSol (MIDAS): a global fine-resolution dust optical depth data set. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 309-334.
- Hong, S. Y., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*, 134(9), 2318-2341.
- Huang, J., Li, Y., Fu, C., Chen, F., Fu, Q., Dai, A., Shinoda, M., Ma, Z., Guo, W., Li, Z. and Zhang, L., 2017, Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719-778.
- Huang, J., Wang, T., Wang, W., Li, Z. and Yan, H., 2014, Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(19), 11-398.
- Iacono, M. J., Mlawer, E. J., Clough, S. A. and Morcrette, J. J., 2000, Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D11), 14873-14890.
- Indoitu, R., Orlovsky, L. and Orlovsky, N. 2012, Dust storms in Central Asia: spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85, 62-70.
- Jones, S. L., Adams-Selin, R., Hunt, E. D., Creighton, G. A. and Cetola, J. D., 2012, December, Update on modifications to WRF-CHEM GOCART for fine-scale dust forecasting at AFWA. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2012, pp. A33D-0188).
- Kamali, S., Mofidi, A., Zarrin, A. and Nazaripour, H., 2017, Sensitivity studies of the forth-generation regional climate model simulation of dust storms in the Sistan plain, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(2), 769-781.
- Kim, K.M., Kim, S.W., Choi, M., Kim, M., Kim, J., Shin, I., Kim, J., Chung, C.Y., Yeo, H., Kim, S.W. and Joo, S.J., 2021, Modeling Asian Dust Storms Using WRF-Chem During the DRAGON-Asia Field Campaign in April 2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(18), e2021JD034793.
- 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.
- Levy, R. C., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remer, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F. and Hsu, N. C., 2013, The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11), 2989.
- Li, Z., Lau, W.M., Ramanathan, V., Wu, G., Ding, Y., Manoj, M.G., Liu, J., Qian, Y., Li, J., Zhou, T. and Fan, J., 2016, Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Reviews of Geophysics*, 54(4), 866-929.
- Meibodi, A. E., Abdoli, G., Taklif, A. and Morshedi, B., 2015, Economic modeling of the regional policies to combat dust phenomenon by using game theory. *Procedia Economics and Finance*, 24, 409-418.
- Najafi, M. S., Sarraf, B. S., Zarrin, A. and Rasouli, A. A., 2017, Climatology of atmospheric circulation patterns of Arabian dust in western Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), 473.
- Nowottnick, E. P., Colarco, P. R., Yorks, J. E., Burton, S. P. and da Silva Jr, A. M., 2017, December. Evaluating Aerosol Optical Properties in the NASA MERRA-2 Reanalysis Using NASA Lidar Observations. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., Kim, G.K. and Bloom, S., 2011, MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14), 3624-3648.
- Sayer, A. M., Munchak, L. A., Hsu, N. C., Levy, R. C., Bettenhausen, C. and Jeong, M. J., 2014, MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24), 13-965.
- Shao, Y., 2004, Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D10).
- Shao, Y., Ishizuka, M., Mikami, M. and Leys, J. F., 2011, Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D8).
- Shao, Y., Klose, M. and Wyrwoll, K. H., 2013, Recent global dust trend and connections to climate forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11-107.
- Singh, C., Singh, S. K., Chauhan, P. and Budakoti, S., 2021, Simulation of an extreme dust episode using WRF-CHEM based on optimal ensemble approach. *Atmospheric Research*, 249, 105296.
- Su, L. and Fung, J. C., 2015, Sensitivities of WRF-Chem to dust emission schemes and land surface properties in simulating dust cycles during springtime over East Asia. *Journal of Geophysical Research:*

- Atmospheres, 120(21), 11-215.
- Xi, X. and Sokolik, I. N., 2016, Quantifying the anthropogenic dust emission from agricultural land use and desiccation of the Aral Sea in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(20), 12-270.
- Yang, L., Mukherjee, S., Pandithurai, G., Waghmare, V. and Safai, P. D., 2019, Influence of dust and sea-salt sandwich effect on precipitation chemistry over the Western Ghats during summer monsoon. *Scientific reports*, 9(1), 1-13.
- Yoon, J., von Hoyningen-Huene, W., Kokhanovsky, A. A., Vountas, M. and Burrows, J. P., 2012, Trend analysis of aerosol optical thickness and Ångström exponent derived from the global AERONET spectral observations. *Atmos. Meas. Tech*, 5, 1271-1299.
- Yuan, T., Chen, S., Huang, J., Zhang, X., Luo, Y., Ma, X. and Zhang, G., 2019, Sensitivity of simulating a dust storm over Central Asia to different dust schemes using the WRF-Chem model. *Atmospheric Environment*, 207, 16-29.
- Zhang, X.X., Claiborn, C., Lei, J.Q., Vaughan, J., Wu, S.X., Li, S.Y., Liu, L.Y., Wang, Z.F., Wang, Y.D., Huang, S.Y. and Zhou, J., 2020, Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability. *Atmospheric Environment*, 238, 117734.
- Zhao, C., Liu, X., Leung, L.R., Johnson, B., McFarlane, S.A., Gustafson Jr, W.I., Fast, J.D. and Easter, R., 2010, The spatial distribution of mineral dust and its shortwave radiative forcing over North Africa: modeling sensitivities to dust emissions and aerosol size treatments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(18), 8821.

Investigation of Seasonal dust in northeastern Iran and numerical simulation of extreme dust events using WRF-CHEM model

Zarrin, A.^{1*}, Salehabadi, N.², Mofidi, A.³ and Dadashi-Roudbari, A. A.⁴

1. Associate Professor, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. M.Sc. Graduated, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3. Assistant Professor, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4. Post-Doc Researcher, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 15 Sep 2021, Accepted: 19 April 2022)

Summary

In recent years, dust storm has become a serious environmental concern and has attracted a lot of attention among atmospheric scientists. Northeast of Iran is a large and strategic population area. Due to its proximity to large arid regions in Central Asia, this region has a high risk of experiencing dust events. In recent years, it has faced many problems regarding dust phenomena. This study is conducted to investigate seasonal dust events in northeastern Iran. To achieve this goal, a combination of station data, reanalysis, satellite and output of the WRF-Chem numerical model have been used simultaneously to improve our understanding of the dust seasonal cycle in northeast of Iran. Accordingly, this research was organized in two parts: monitoring and modeling of dust phenomenon. The results of this study may be useful for forecasting dust storms as well as spatial planning.

To investigate the dust events seasonal variabilities, the dust surface mass concentration of MERRA-2 dataset, aerosol optical depth (AOD) of the combined Dark Target (DT) and Deep Blue (DB) algorithms of MODIS sensor of Terra and Aqua satellites were examined during the long-term period (2004-2018).

Since the emission of dust is highly dependent on biophysical components, it is necessary to use numerical models. The WRF-Chem numerical model was used for this purpose. The study area includes northeastern Iran and parts of Central Asia. The horizontal resolution of the child domain of 30 km model was performed with 32 vertical levels. The NCEP / FNL is used as boundary conditions with 3-hourly time step and 1-degree horizontal resolution for the model configuration. Four extreme dust events were selected to investigate the transport of dust to northeastern Iran. The selected dust events occurred on November 13, 2007, May 29, 2008, June 8, 2015, and October 17, 2017 in northeastern Iran. Therefore, case events were simulated with a time step of 180 seconds and output every three hours using GOCART, AFWA, UoC_S01 and UoC_S11 schemes.

The results showed that the maximum dust activity occurred in spring with AOD value equal to 0.59 and dust surface mass concentration is $645.2 \mu\text{g m}^{-3}$. The summer is in the next place. Seasonal analysis of AOD and dust using satellite and reanalysis data, showed that Aralkum, Kyzylkum, Karakum and Kara-Bogaz-Gol are the main dust sources in Central Asia that are active in all seasons.

Comparison of dust simulation results for $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} variable with observational data of air quality control stations in Mashhad showed that GOCART scheme can well depict dust events and provide a low bias towards station data. Also, the study of correlation coefficient between simulation and observation showed that the GOCART scheme explains nearly 90% of the variance of data. The root mean square error (RMSE) for the GOCART scheme is less than 20 micrograms per cubic meter for $\text{PM}_{2.5}$. Accordingly, the GOCART scheme is a suitable scheme for dust study in Northeast of Iran and the WRF-Chem model can be used to operationally forecast dust storms. The dust detection algorithm (DDA) of the AIRS sensor and the aerosol optical depth (AOD) of the MODIS sensor confirm the contribution of the mentioned sources of dust in transferring dust to the northeast of Iran. The results showed that three of the case studies occurred as a result of the passage of an extratropical Rossby wave and the deepening of the trough on the territory of Turkmenistan. In contrast, the summer case study is the result of the establishment of a summer circulation pattern that has occurred with the simultaneous establishment of an anticyclonic circulation in the southern part of Turkmenistan and the northeastern parts of Iran and a cyclonic circulation in the Sistan plain and southeastern parts of the country.

Keywords: Dust events, WRF-CHEM model, AOD, Northeast of Iran.

* Corresponding author:

zarrin@um.ac.ir