

توفان‌های خاک در منطقه غرب و جنوب غرب ایران و تأثیر آنها بر شارهای تابشی: مطالعه موردی

سعید فرهادی پور^۱، مجید آزادی^{۲*}، عباسعلی علی اکبری بیدختی^۳، امید علیزاده چوبری^۴، و حبیب الله سیاری^۵

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

^۳ استاد گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ استادیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۵ استاد، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۲)

چکیده

توفان‌های خاک که امروزه در بسیاری از مناطق ایران (به‌خصوص در غرب و جنوب غرب ایران) فراوانی وقوع بالایی دارد، علاوه بر تأثیر نامطلوب بر سلامتی بشر از طریق آلودگی هوا، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص نوری و توازن تابشی منطقه می‌گذارد. در مطالعه حاضر اثرات تابشی ناشی از توفان خاک در بازه زمانی ۱۶ تا ۲۱ ژوئن ۲۰۱۲ در منطقه غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از مدل عددی WRF-Chem بررسی شده است. ابتدا عملکرد مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری ایستگاهی (ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلودگی وابسته به سازمان محیط‌زیست و ایستگاه‌های AERONET) و داده‌های ماهواره‌ای OMI، MODIS، CALIPSO و OMI مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل نشان از برآورد بیشتر غلظت PM10 در ایستگاه اهواز و در اغلب موارد برآورد کمتر مقادیر عمق نوری هواویزها (aerosol optical depth) در ایستگاه‌های AERONET دارد. با این حال، عملکرد مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات و میزان گرد و خاک در طی توفان مذکور قابل قبول است، به طوری که توزیع افقی و قائم گرد و خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهده شده توسط ماهواره الگوهای تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند. ذرات گرد و خاک در سقف جو و سطح زمین دارای اثرهای سرمایشی، اما در میانه جو دارای اثر گرمایشی هستند. میانگین پریشیدگی تابش طول موج کوتاه توسط گرد و خاک در منطقه غرب و جنوب غرب ایران در بازه زمانی ۱۷ تا ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲ در سطح زمین، میانه جو و سقف جو به ترتیب $-۷/۲۷$ ، $۱/۷۹$ و $۵/۴۷ \text{ W m}^{-2}$ برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: توفان گرد و خاک، مدل WRF-Chem، داده‌های ماهواره، پریشیدگی تابش

۱ مقدمه

گرد و خاک یکی از فراوانترین هواویزهای معلق در جو زمین است (چانگ، ۲۰۰۱). در مقیاس جهانی، گرد و خاک معلق در جو زمین عمدتاً ناشی از چشمه‌های طبیعی است (تیگن و همکاران، ۲۰۰۴)، اگرچه عوامل انسان‌زاد که عامل اصلی تغییرات آب‌وهوایی و تغییر در پوشش سطح زمین هستند نیز نقش بسزایی در افزایش غلظت گرد و خاک معلق در جو ایفا می‌کند (پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲). غلظت بالای ذرات معلق در طی توفان‌های خاک باعث اثرات ناگواری بر سلامتی بشر می‌شود (هوتویجس و همکاران، ۲۰۰۱؛ هوا و همکاران، ۲۰۰۷؛ چوی، ۲۰۱۱؛ خراسانی و همکاران، ۱۳۸۱).

اثرات اقلیمی هواویزها که شامل ذرات گرد و خاک نیز می‌شود در سه دسته‌ی مستقیم، نیمه‌مستقیم و غیرمستقیم گنجانده می‌شود. هواویزها از طریق جذب و پراکنش تابش طول موج کوتاه و بلند به صورت مستقیم بر فرایندهای تابشی تأثیر می‌گذارند (مک کورمک و لودویگ، ۱۹۶۷). اصطلاح نیمه‌مستقیم برای اولین بار توسط هانسن و همکاران (۱۹۹۷) مورد استفاده قرار گرفت که پیامد این اثر کاهش پوشش ابر و افزایش تابش رسیده به سطح زمین است (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶). تأثیر غیرمستقیم هواویزها به دو دسته تقسیم می‌شود که شامل تغییر در ویژگی‌های نوری (اثر غیرمستقیم نخست) و طول عمر ابرها (اثر غیرمستقیم دوم) است (علیزاده چوبری و قرایلو، ۲۰۱۷؛ علیزاده چوبری، ۱۳۹۶). اثر غیر مستقیم هواویزها به این صورت است که با افزایش غلظت هواویزهای آب‌دوست، تعداد هسته‌های میعان ابر افزایش می‌یابد، در نتیجه میعان روی تعداد بیشتری از هواویزهای آب‌دوست صورت می‌گیرد که پیامد آن کاهش اندازه (شعاع مؤثر) قطرک‌های ابر، اما افزایش تعداد آنها است. کوچک شدن شعاع مؤثر قطرک‌ها به واسطه افزایش غلظت هواویزهای آب‌دوست، افزایش سطح مقطع و در

نتیجه سپیدایی ابر را در پی دارد که به عنوان اثر غیر مستقیم اول هواویزها شناخته می‌شود و اولین بار توسط تومی (۱۹۷۷) برای ابرهایی که محتوای آب بارش آنها ثابت می‌ماند مطرح شد. همچنین، افزایش تعداد قطرک‌های ابر و کاهش شعاع مؤثر آنها منجر به کاهش برخورد و هم‌آمیزی قطرک‌های ابر می‌شود (آلبرشت، ۱۹۸۹؛ روزنفلد و لنزکی، ۱۹۹۸؛ روزنفلد و همکاران، ۲۰۰۱) که جلوگیری از بارش گرم در ابرها (روزنفلد، ۱۹۹۹) و در نتیجه افزایش طول عمر ابرها (آلبرشت، ۱۹۸۹) را در پی دارد. افزایش طول عمر ابرها منجر به بازتاب بیشتر تابش طول موج کوتاه خورشیدی می‌شود که به عنوان اثر غیر مستقیم دوم هواویزها شناخته می‌شود و اولین بار توسط آلبرشت (۱۹۸۹) مطرح شد.

منشأ و سرچشمه تولید گرد و خاک معمولاً مناطق خشک، نیمه‌خشک و مناطق فاقد پوشش گیاهی مناسب و همچنین مناطق آبرفتی دارای رسوبات ریزدانه است (پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲). گرد و خاک معلق در جو توسط گردش کلی جو می‌تواند به مناطق بسیار دورتر از منبع تولید خود منتقل شود (تیگن و فانگ، ۱۹۹۴؛ جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱)؛ بنابراین، گرد و خاک می‌تواند بر ویژگی‌های نوری و بودجه تابشی مناطق پایین دست چشمه‌های گرد و خاک نیز اثرگذار باشد.

ایران کشوری است که بخش عظیمی از آن در کمربند پرفشار جنب حاره‌ای قرار دارد؛ بنابراین بسیاری از مناطق آن دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک (با بارش تجمعی سالانه کمتر از ۲۶۰ میلی‌متر) هستند (حسینیان، ۲۰۰۴). با وجود چشمه‌های داخلی گرد و خاک در ایران، مطالعات نشان داده است که مقدار قابل توجهی از گرد و خاک وارد شده به ایران از مناطق و کشورهای همسایه است (شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۲؛ علیزاده چوبری و همکاران ۲۰۱۶). در واقع، ایران در پایین دست منابع عظیم گرد و خاک قرار گرفته است که شامل زمین‌های رسوبی

هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی توانایی مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی توفان‌های خاک در منطقه غرب و جنوب غرب ایران و بررسی اثر مستقیم ذرات گرد و خاک است.

۲ مدل WRF-Chem

مدل WRF-Chem (گرل و همکاران، ۲۰۰۵) یک مدل تحقیقاتی و عملیاتی میان‌مقیاس برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرایندهای جوئی است. از جمله قابلیت‌های این مدل می‌توان به نصب و اجرای آن روی سیستم‌های رایانه‌ای مختلف، کاربردهای متنوع مانند مطالعات ارزیابی داده‌ها، پیش‌بینی عددی هوا، تحقیقات پارامترسازی فیزیکی، شبیه‌سازی اقلیمی، مدل‌سازی آلودگی هوا و سیستم جفت شده اقیانوس- جو اشاره نمود.

در این مطالعه از نسخه ۳/۷ مدل WRF-Chem برای شبیه‌سازی توفان خاک استفاده شده است. مطابق شکل ۱ دو دامنه تودرتو در مدل تعریف شده است. حوزه اول محدوده 20°E – 80°E و 51°N – 10°N را در برمی‌گیرد که تعداد نقاط شبکه در آن 90×98 و فاصله نقاط شبکه ۴۵ کیلومتر است. حوزه دوم محدوده 70°E – 42°E و 43°N – $23/5$ را شامل می‌شود که تعداد نقاط شبکه در آن 139×151 و فاصله نقاط شبکه ۱۵ کیلومتر است. تعداد ۲۷ تراز قائم در نظر گرفته شده است که از اولین لایه بالای سطح زمین تا تراز ۱۰ هکتوپاسکالی (حدود ۳۰ کیلومتری) را شامل می‌شود. فاصله ترازهای زیرین حدود ۶۰ متر، فاصله ترازهای بین ۳–۱ کیلومتر حدود ۴۰۰–۲۰۰ متر و فاصله ترازهای بین ۱۳–۵ کیلومتر، ۶۰۰–۵۴۰ متر است. داده‌های جغرافیایی ایستا مانند ارتفاع ناهمواری‌ها، ویژگی‌های خاک، کسر پوشش گیاهی و کاربری اراضی از داده‌های USGS اخذ شده‌اند و توسط سامانه پیش‌پردازش مدل WRF (WPS) به مدل خوراندن شده‌اند.

و خشک دجله و فرات و بیابان زبیر در عراق، بیابان سوریه و سه بیابان النفود در شمال غرب، الدهنا در شمال شرق و ربع‌الخالی در جنوب شرق شبه جزیره عربستان می‌شود (علیزاده چوبری و همکاران ۲۰۱۶). در بین این چشمه‌های گرد و خاک، مناطق بیابانی عراق و بیابان سوریه از جمله عمده‌ترین چشمه‌هایی هستند که مقادیر عظیمی از گرد و خاک را تحت تأثیر باد شمال وارد مناطق غرب و جنوب غرب ایران می‌کنند (عبدی ویشکایی و همکاران، ۲۰۱۲، علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۶).

مطالعه گذشته به وسیله مدل جفت شده هواویز پیشرفته HAM و مدل پیش‌بینی عددی- تحقیقاتی WRF تأثیر هواویزها بر خردفیزیک ابر را نشان داد (مشایخی و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین، عطایی و همکاران (۱۳۹۵) اثرات مستقیم هواویزها را بر شارهای تابشی در مقیاس جهانی با استفاده از مدل عددی WRF-Chem (Weather Research and Forecasting with Chemistry) در ماه‌های ژانویه و جولای بررسی کردند و پربشیدگی تابش طول موج کوتاه و بلند را در سقف جو و سطح زمین به دست آوردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که پربشیدگی تابش خالص (طول موج کوتاه + بلند) توسط ذرات گرد و خاک در سطح زمین و سقف جو هر دو منفی است. منفی بودن پربشیدگی تابش در سطح زمین ناشی از خاموشی پراکنش و جذب تابش خورشیدی ورودی توسط ذرات گرد و خاک و منفی بودن پربشیدگی تابش در سقف جو عمدتاً ناشی از افزایش طول موج کوتاه بازتاب شده به فضا است (عطایی و همکاران، ۱۳۹۵). علیزاده چوبری (۱۳۹۶) اثر غیر مستقیم هواویزها بر تابش طول موج کوتاه، بلند و خالص را برای یک سامانه ابر همرفتی مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که افزایش تعداد هواویزهای آبدوست موجود در جو باعث افزایش سپیدایی ابر می‌شود، درحالی‌که تأثیر اندکی بر تابش طول موج بلند می‌گذارد.

در مطالعه حاضر برای میدان باد افقی، رطوبت و دمای هوا در ترازهای قائم واقع در لایه مرزی سیاره‌ای با ضریب $10^{-4} \text{ s}^{-1} \times 6$ از داده‌گذاری (nudging) استفاده شده است. در مطالعات گذشته نشان داده است که استفاده از داده‌گذاری در تمامی ترازهای قائم جو باعث عملکرد بهتر مدل WRF در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی (دمای هوا، بخار آب و سرعت و جهت باد) می‌شود (دنگ و همکاران، ۲۰۰۷، لو و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۱. حوزه‌های تعریف شده در مدل WRF-Chem که با مستطیل‌های زرد رنگ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. طرحواره‌های مختلف فیزیکی استفاده شده در اجرای مدل WRF-Chem.

فرایند فیزیکی و شیمی	طرحواره بکار رفته
خردفیزیک ابر	<i>Morrison 2-moment (Morrison et al., 2009)</i>
تابش طول موج کوتاه و بلند	<i>RRTMG</i>
لایه سطحی	(فیرال و همکاران، ۲۰۰۳) <i>Monin-Obukov</i>
سطح زمین	<i>NOAH</i>
لایه مرزی سیاره‌ای	<i>YSU (Hong et al., 2006)</i>
حرکت‌های کومه‌ای	<i>Grell-Freitas</i>
شیمی گازها	<i>RADM2</i>
طرحواره هواویز	<i>MADE/SORGAM</i>

۳ داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای

در این مطالعه برای بررسی همبندی توفان‌های خاک و ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی میزان گسیل غبار در منطقه غرب و جنوب غرب کشور از داده‌های مختلفی استفاده شده است که شامل داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلودگی محیط‌زیست، AERONET و همچنین داده‌های ماهواره‌ای است. میانگین روزانه غلظت PM_{10} در ایستگاه اهواز در هنگام توفان خاک مورد بررسی از سازمان محیط‌زیست ایران اخذ شد. همچنین عمق نوری هواویزها (Aerosol Optical Depth (AOD)) از داده‌های AERONET (Aerosol RObotic NETwork) در دو ایستگاه Solar Village واقع در عربستان سعودی و Kuwait University واقع در کشور کویت اخذ شد.

شرایط مرزی و جانبی از NOAA GFS (National Oceanic and Atmospheric Administration Global Forecast System) با تفکیک افقی $1^\circ \times 1^\circ$ به دست آمده است. برای شبیه‌سازی توفان‌های مورد بررسی مدل از ۴۸ ساعت قبل از شروع توفان اجرا شده است و ۲۴ ساعت اول هر اجرا به‌عنوان زمان spin-up در نظر گرفته شده است.

مدل WRF دارای طرحواره‌های مختلف پارامترسازی‌های فیزیکی است که در این مطالعه از طرحواره خردفیزیک موریسون و همکاران (موریسون و همکاران، ۲۰۰۹)، طرحواره همرفت Grell-Freitas (گرل و فریتس، ۲۰۱۳)، طرحواره لایه مرزی YSU (Yonsei University) (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶)، طرحواره تابش طول موج کوتاه و بلند RRTMG (University rapid radiative transfer model for GCMs) (یاکونو و همکاران، ۲۰۰۸) و مدل سطح زمین NOAH (چن و دودهیا، ۲۰۰۱) استفاده شده است. در بخش شیمی مدل نیز برای بخش شیمی نیز طرحواره هواویز MADE/SORGAM (Modal Aerosol Dynamics Model for Europe (MADE)/Secondary Organic Aerosol Model (SORGAM)) استفاده شده است. تنظیمات کامل مدل در جدول ۱ آمده است.

استفاده شده است که در عمل منعکس کننده ضخامت توده‌های گرد و خاک و آلودگی از طریق خواص نوری آنها می‌باشد. داده‌های OMI به کار گرفته شده شامل شاخص هواویز فرابنفش تراز ۳ با تفکیک افقی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ است. این داده‌ها از تابش پراکنده شده که توسط OMI در بازه طول موجی ۵۰۰-۲۷۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود به دست می‌آید. شاخص هواویز فرابنفش بیانگر عمق اپتیکی نیست، اما یک شاخص مناسب برای جداسازی جذب و پراکنش توسط هواویزها است، بدین ترتیب که مقادیر منفی و نزدیک صفر بیانگر پراکنندگی و مقادیر بزرگ‌تر از یک بیانگر جذب توسط هواویزها است. در عمل داده‌های AI منعکس کننده مشخصات نوری ستون‌های آلودگی هوا است و در مناطق دارای غلظت بالای ذرات معلق در جو مقدار AI بیشتر است.

CALIPSO ماهواره‌ی آشکارساز ابر و هواویز مبتنی بر امواج مادون قرمز گرمایی است که در آن از فناوری لیدار استفاده می‌شود. ماهواره‌ی مذکور، ماهواره‌ی زمین چرخان است که برای مشاهدات زمینی، به صورت مشترک توسط سازمان فضایی آمریکا و فرانسه ساخته شده است. سنجنده‌ی این ماهواره به دو طریق فعال و غیرفعال اقدام به پایش توده‌های ابر و هواویزها در تمام اوقات شبانه‌روز می‌نماید و قابلیت نصب روی ماهواره‌های Aqua, Aura و CLOUDSAT را داراست. نمایه قائم داده‌های مربوط به ابر و هواویزها تا ارتفاع ۳۰ کیلومتری از سطح زمین با تفکیک افقی ۵ کیلومتر در دسترس است. این ماهواره قادر است در هر شبانه‌روز از هر منطقه از کره زمین یک بار تصویربرداری نماید و اطلاعات اخذ شده را در قالب نمایه‌های قائم ابر و هواویزها (نیمرخ قائم لایه‌های ابر و هواویزها) و دمای درخشایی (brightness temperature) در اختیار کاربران قرار دهد. نمایه‌های قائم بر مبنای امواج لیداری و در دو طول موج 532 و 1064

جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های AERONET مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های AERONET که داده‌های آن در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

کشور	نام ایستگاه	مشخصات ایستگاه
عربستان سعودی	Solar Village	در ۵۰ کیلومتری شمال غرب ریاض؛ طول جغرافیایی: 46.39729° شرقی عرض جغرافیایی: 24.90693° شمالی ارتفاع از سطح دریا: ۷۶۴ متر
کویت	Kuwait University	در دانشگاه خالد کویت در فاصله تقریباً ۵ کیلومتری شهر کویت طول جغرافیایی: 47.971° شرقی عرض جغرافیایی: 29.325° شمالی ارتفاع از سطح دریا: ۴۲ متر

برای تحلیل دقیق‌تر نتایج شبیه‌سازی، از داده‌های ماهواره نیز استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Cloud-Monitoring Instrument) و OMI (Ozone Monitoring Instrument) است. داده‌های MODIS شامل داده‌های عمق نوری هواویز در تراز ۳ در باند ۵۵۰ نانومتر با تفکیک افقی $1^\circ \times 1^\circ$ و تراز ۲ با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر است. با توجه به اینکه الگوریتم به دست آوردن عمق نوری هواویزها توسط MODIS برای سطوح زمین با سپیدایی بالا مانند سطح بیابان امکان‌پذیر نیست (کافمن و همکاران، ۱۹۹۷)، از داده‌های Deep Blue محصول Aqua که توانایی آشکارسازی هواویزها در سطوح با سپیدایی بالا را دارد (هسو و همکاران، ۲۰۰۴) استفاده شده است.

برای بررسی کیفی انتقال گرد و خاک در روزهای مورد مطالعه از داده‌های OMI AI (Aerosol Index)

نانومتر تهیه می‌شوند (وینکر و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه از داده‌های CALIPSO برای ارزیابی انتشار قائم هواویزها استفاده شده است.

۴ بررسی اثرات توفان خاک بر توازن تابشی

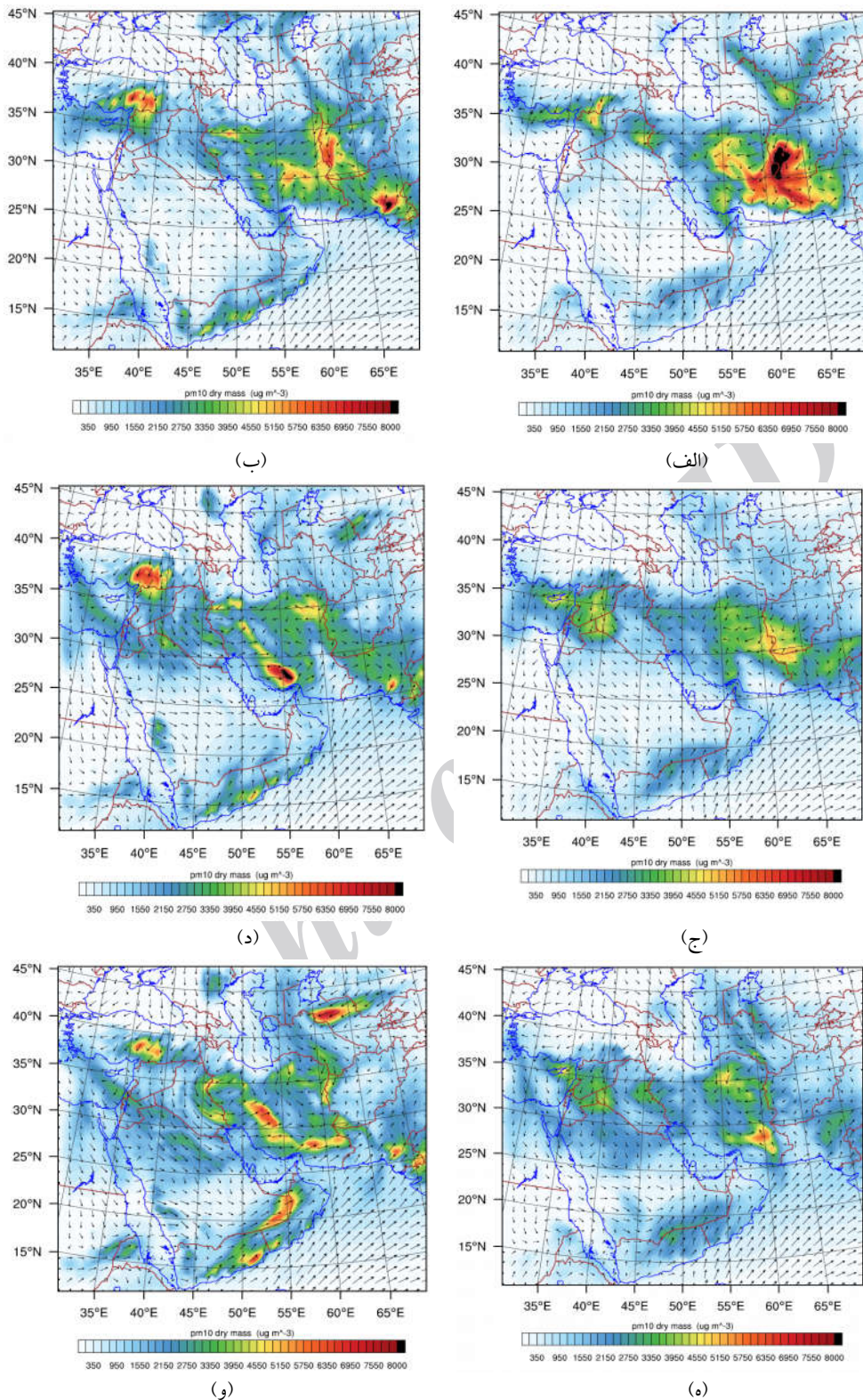
در این بخش به بررسی اثرات هواویزها بر توازن تابشی با استفاده از خروجی‌های مدل WRF-Chem پرداخته می‌شود. ابتدا پخشیدگی تابش طول موج کوتاه (SW)، تابش طول موج بلند (LW) و تابش خالص (Net=SW+LW) در سقف جو، سطح زمین و میانه جو (بین سقف جو و سطح زمین) بررسی می‌شود. بدین منظور مدل دو مرتبه در بازه زمانی رخداد توفان خاک اجرا شد، که یکی از این دو اجرا با در نظر گرفتن گرد و خاک و اجرای دیگر بدون در نظر گرفتن گرد و خاک است. اختلاف بین پخشیدگی تابشی در سقف جو و سطح زمین بیانگر تغییرات توازن تابشی در میانه جو است که پخشیدگی تابشی جو نامیده می‌شود. برآیند شارهای تابشی (SW یا LW) در سقف جو یا سطح زمین از اختلاف بین شارهای پایین سو و بالا سو محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که پخشیدگی تابشی با واداشت تابشی یکی نیست (کومار و همکاران، ۲۰۱۴) زیرا برخلاف واداشت تابشی، پخشیدگی تابشی توسط هواویزها بر توزیع ابرناکی و همچنین دینامیک مدل تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین در مطالعه حاضر که به بررسی پخشیدگی تابشی جو می‌پردازد بخشی از تغییر در توازن تابشی می‌تواند ناشی از تغییر در ترمودینامیک و دینامیک جو به واسطه هواویزها باشد، اگرچه به دلیل استفاده از داده‌گذاری در مطالعه حاضر تأثیر هواویزها بر دینامیک مدل محدود شده است. در دنیا هر دو دسته مطالعات انجام شده است، یعنی هم مطالعات زیادی در زمینه واداشت تابشی گرد و خاک (برای مثال، لی و همکاران، ۱۹۹۶؛ چیاپلو و همکاران، ۱۹۹۹؛ وودوارد، ۲۰۰۱؛ ژائو و

همکاران، ۲۰۱۳) و هم پخشیدگی تابشی توسط گرد و خاک (میلر و همکاران، ۲۰۰۴؛ علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۵) انجام شده است.

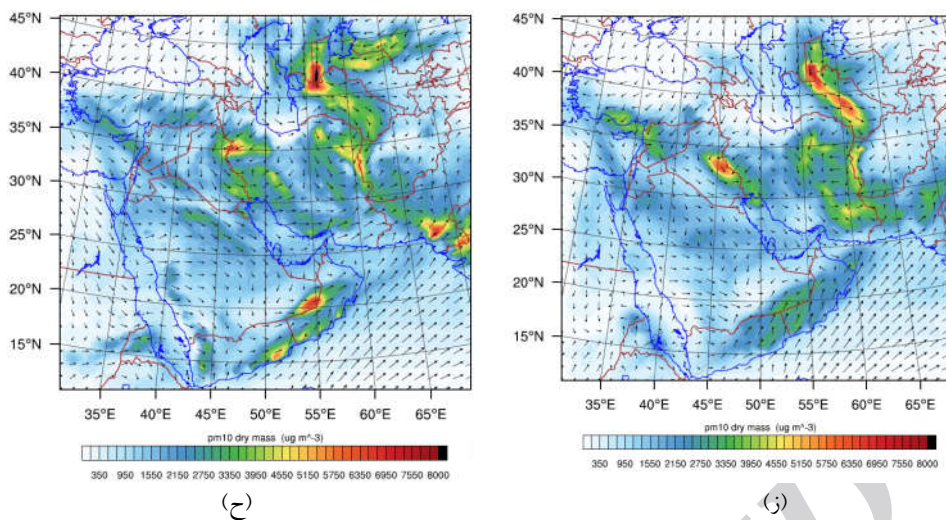
۵ نتایج و بحث

۵-۱ نتایج شبیه‌سازی توفان ژوئن ۲۰۱۲

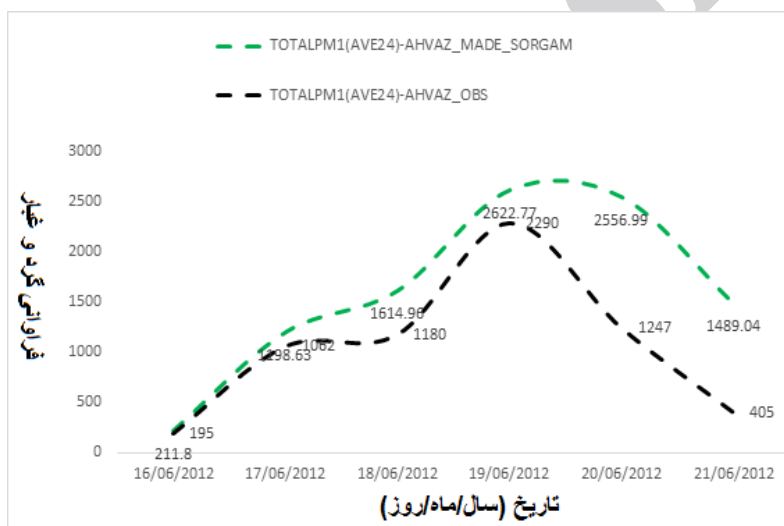
شکل ۲ (الف) تا (ح)، نقشه‌های توزیع مقدار PM10 و میدان باد سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-Chem را برای ۱۷ الی ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲ نشان می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی میدان باد ارتفاع ۱۰ متری نشان می‌دهد که بادهای شمالی و شمال شرقی در منطقه شمال سوریه حاکم است که این شرایط تقریباً با میدان سرعت باد در نقشه‌های هم‌دیدگی (در اینجا آورده نشده است) مشابه است و این شرایط سبب ایجاد گرد و خاک و پخش آن در منطقه شده است. از آنجایی که باد در شمال سوریه به سوی شمال دریای مدیترانه و جنوب سوریه در حال وزیدن است، بنابراین گرد و خاک ایجاد شده در دو جهت غربی و جنوبی در حال پخش شدن است (شکل ۲-الف). به تدریج که سرعت باد در این مناطق افزایش پیدا می‌کند، گرد و خاک ایجاد شده گسترش می‌یابد و منطقه وسیع‌تری را در بر می‌گیرد (شکل ۲-ب). همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، پس از گذشت ۱۲ ساعت سرعت باد در منطقه شرق ترکیه افزایش یافته است. همچنین غلظت گرد و خاک در کل منطقه افزایش یافته است و نحوه پخش آن به گونه‌ای است که منطقه وسیع‌تری را پوشش داده است. به تدریج با افزایش سرعت باد (تا ساعت ۱۸ روز ۱۷ ژوئن)، گرد و خاک گسیل شده به سوی نوار شمالی دریای مدیترانه انتقال می‌یابد. همچنین علاوه بر مناطق شمال سوریه، مناطق مرکزی و جنوبی آن نیز تحت تأثیر گرد و خاک قرار گرفته است (شکل آورده نشده است).



شکل ۲. توزیع مکانی غلظت PM10 شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل WRF-Chem برای بازه ۱۷ تا ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲، شروع تصاویر (الف) از ساعت ۰۰ UTC روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۲ و تصاویر دیگر به‌ترتیب از (ب) تا (ح) با اختلاف ۱۲ ساعت از هم رسم شده‌اند.



ادامه شکل ۲.



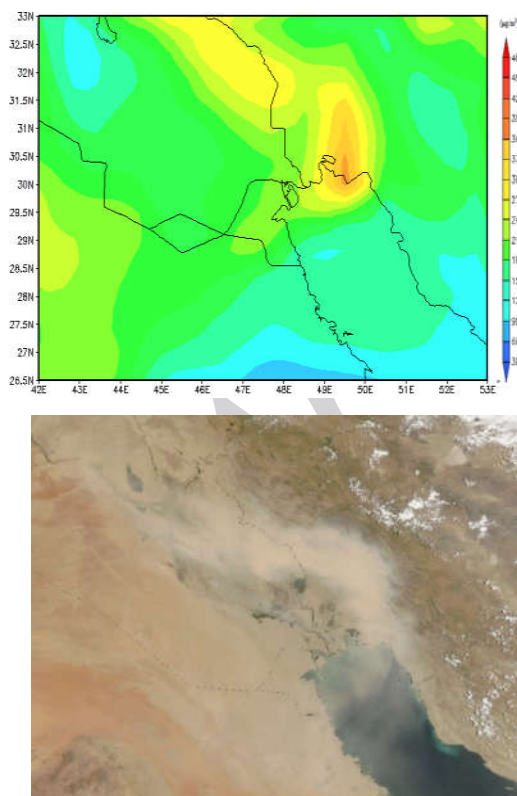
شکل ۳. تغییرات میانگین روزانه غلظت PM10 مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل WRF-Chem در ایستگاه اهواز برای ۱۶ تا ۲۱ ژوئن ۲۰۱۲.

(شکل ۲-د). بنابراین، منطقه وسیعی از استان‌های غربی ایران اعم از کردستان، ایلام، خوزستان و کرمانشاه تحت تأثیر گرد و خاک قرار گرفته‌اند. این شرایط در روز ۱۹ ژوئن نیز ادامه پیدا کرده است و مرکز چرخند به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر جابه‌جا شده است. در اطراف مرکز این چرخند به‌صورت یک دیواره از گرد و خاک پیش‌بینی شده است. (شکل ۲-ه و ۲-و).

به تدریج طی روزهای بعد نتایج مدل نشان می‌دهد (۱۸ و ۱۹ ژوئن ۲۰۱۲) که مناطق بیشتری روی دریای مدیترانه و نیز غرب کشور عراق و شرق اردن تحت تأثیر گرد و خاک قرار می‌گیرد. در ساعت ۱۲ روز ۱۸ ژوئن یک مرکز چرخندی در غرب کشور ایران روی استان‌های کردستان و کرمانشاه ایجاد شده و چپش در جهت باد ایجاد شده است. همچنین، بادهای شمال غربی روی عراق نیز سبب ایجاد گرد و خاک در شرق عراق شده است

در شکل ۴ عمق نوری هواویزها که توسط مدل شبیه-سازی شده است با داده‌های مشاهداتی AERONET در دو ایستگاه Solar Village و Kuwait University مقایسه شده است. در ایستگاه Kuwait University در اغلب موارد مقادیر شبیه‌سازی کمتر از مشاهدات است. در ایستگاه Solar Village عمق نوری هواویزها در روزهای پایانی بیش برآورد شده است.

در شکل ۵ غلظت PM10 که توسط مدل شبیه‌سازی شده است به‌طور کیفی با تصویر ماهواره MODIS در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۱۲ مقایسه شده است. مطابق این شکل، گرد و خاک از مناطق جنوبی عراق به سمت مرزهای ایران در استان خوزستان و شمال خلیج فارس انتقال یافته است، به‌نحوی که غلظت گرد و خاک در استان خوزستان و شمال خلیج فارس بالا است.

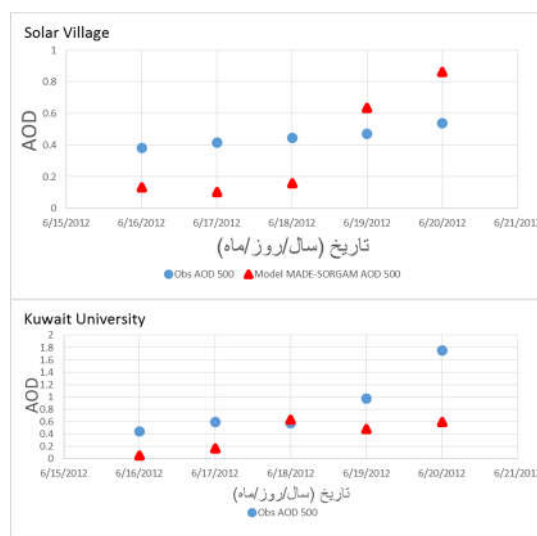


شکل ۵. تصویر ماهواره MODIS (سمت بالا) و تصویر PM10 شبیه-سازی شده توسط مدل WRF-Chem (سمت پایین) برای روز ۱۸ ژوئن ۲۰۱۲.

با وجود آن در روز ۲۰ ژوئن سرعت باد کاهش یافته است، اما به دلیل وجود حرکت‌های چرخندی در سطح زمین و ترازهای زیرین جو، شرایط برای ایجاد گرد و خاک در نوار مرزی بین ایران و عراق فراهم است. این شرایط گاهی با جریان‌های شرق روی عراق توسعه پیدا می‌کند و سپس به‌وسیله جریان‌های شمال غربی و غربی به مناطقی از استان‌های غربی و شمال غربی ایران گسترش می‌یابد. (شکل ۲-ز و ۲-ح).

۲-۵ صحت‌سنجی نتایج مدل

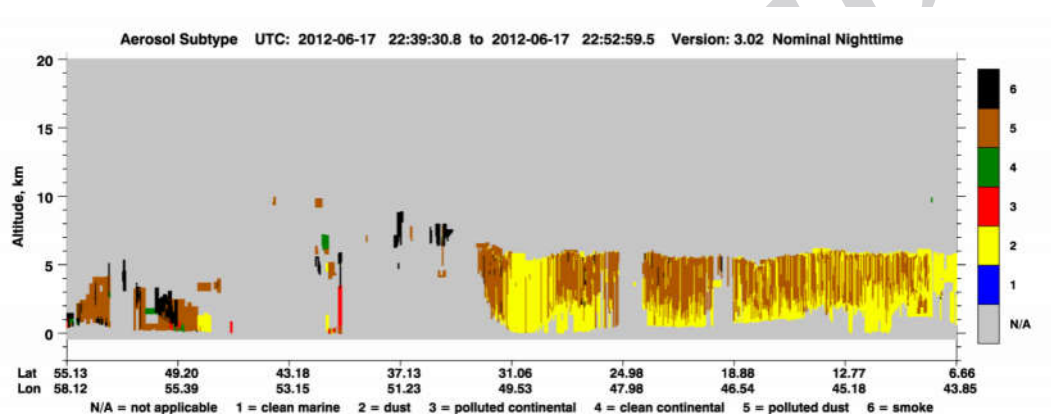
شکل ۳ نمودار تغییرات زمانی میانگین روزانه PM10 را در ایستگاه اهواز که توسط مدل شبیه‌سازی شده است (استخراج شده از حوزه دوم شبیه‌سازی) در مقایسه با مشاهدات برای بازه زمانی ۱۶ تا ۲۱ ژوئن ۲۰۱۲ نشان می‌دهد. مدل به‌خوبی روند تغییرات PM10 را شبیه‌سازی کرده است، اگرچه مقدار بیشینه PM10 شبیه‌سازی شده ($2622/7 \mu\text{g m}^{-3}$) بیشتر از مقدار مشاهداتی (2290) است.



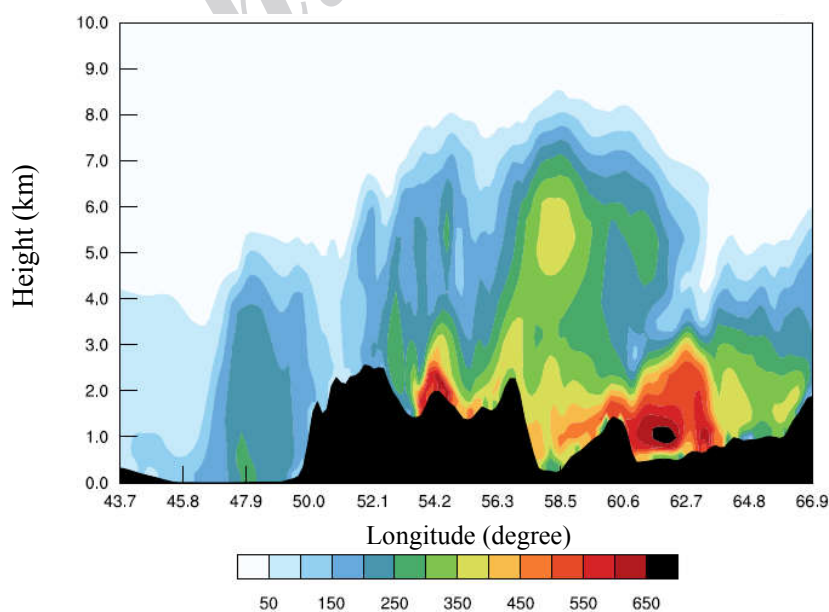
شکل ۴. عمق نوری هواویزها (AOD) که توسط مدل WRF-Chem شبیه‌سازی شده است (رنگ قرمز) در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی دو ایستگاه AERONET (رنگ آبی).

شکل ۹، که توزیع مکانی هواویزها را در همین روز نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در منطقه غرب ایران، شمال خلیج فارس و کویت افزایش شاخص UV AI با افزایش غلظت هواویزها هماهنگی دارد. پس از گسترش و پیشروی این توفان به سمت شرق، در روز ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲، شاخص UV AI روی مناطق غربی، مرکزی و شمال شرق ایران افزایش یافته است، که با توزیع مکانی هواویزها که توسط مدل شبیه‌سازی شده است هماهنگی دارد.

عبور ماهواره CALIPSO از روی منطقه مورد مطالعه در حدود ساعت ۲۲:۳۰ روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۲ بوده است. مطابق شکل ۶ هواویزها تا ارتفاع حدود ۵ کیلومتری گسترش یافته‌اند، که با نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۷، که برش عرضی غلظت PM10 را در عرض جغرافیایی $31^{\circ}N$ نشان می‌دهد هماهنگی دارد. شکل ۸ شاخص هواویز فرابنفش (UV AI) استخراج شده از ماهواره OMI را برای روز ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی در



شکل ۶. تصویری از هواویزهای گوناگون که توسط ماهواره‌ای CALIPSO در روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۲ ثبت شده است.

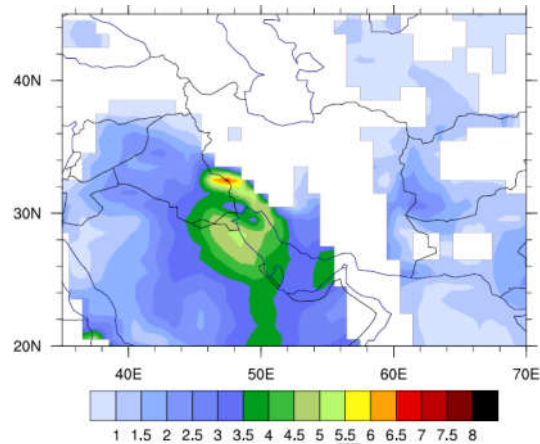


شکل ۷. برش عرضی غلظت PM10 ($\mu g m^{-3}$) شبیه‌سازی شده در ساعت ۲۲ روز ۱۷ ژوئن ۲۰۱۲.

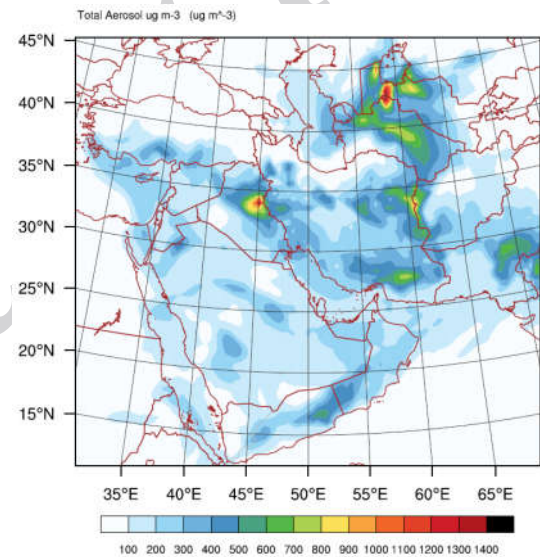
پریشیدگی تابش طول موج کوتاه، بلند و خالص را توسط گرد و خاک در بازه زمانی ۱۷ تا ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲ در سقف جو، میانه جو و سطح زمین نشان می‌دهد. در این شکل اثر سرمایشی گرد و خاک معلق در جو به دلیل بازتاب طول موج کوتاه به خوبی مشاهده می‌شود، درحالی‌که پریشیدگی تابش طول موج بلند و خالص در سقف جو به ترتیب گرمایشی و سرمایشی است. میانگین پریشیدگی طول موج کوتاه، بلند و خالص در سقف جو برای مناطق غرب و جنوب غرب ایران به ترتیب برابر با $-۰/۴۷$ ، $-۰/۵۹$ و $-۴/۸۸ \text{ W m}^{-2}$ است.

در میانه جو پریشیدگی تابش طول موج کوتاه ناشی از گرد و خاک به سبب جذب تابش طول موج کوتاه توسط ذرات گرد و خاک گرمایشی است، درحالی‌که پریشیدگی تابش طول موج بلند و برآیند به ترتیب سرمایشی و گرمایشی هستند. میانگین پریشیدگی تابش طول موج کوتاه، بلند و خالص برای مناطق غرب و جنوب غرب ایران در میانه جو به ترتیب برابر با $۱/۷۹$ ، $۱/۶۱$ و $۰/۱۹ \text{ W m}^{-2}$ است.

پریشیدگی تابش طول موج کوتاه در سطح زمین به علت تضعیف پرتوهای دریافتی خورشید از طریق جذب و پراکندگی آن توسط گرد و خاک معلق در جو مقادیر منفی که معرف اثر سرمایشی است را نشان می‌دهد، درحالی‌که پریشیدگی تابش طول موج بلند در سطح زمین مقادیر مثبت که معرف اثر گرمایشی است را نشان می‌دهد. پریشیدگی تابش خالص در سطح زمین ناشی از گرد و خاک معلق در جو مقادیر منفی که معرف سرمایش است را نشان می‌دهد. میانگین این پریشیدگی‌ها در سطح زمین برای مناطق غرب و جنوب غرب ایران برای طول موج کوتاه، بلند و خالص به ترتیب $-۷/۲۷$ ، $۲/۲۰$ و $-۵/۰۷$ است.



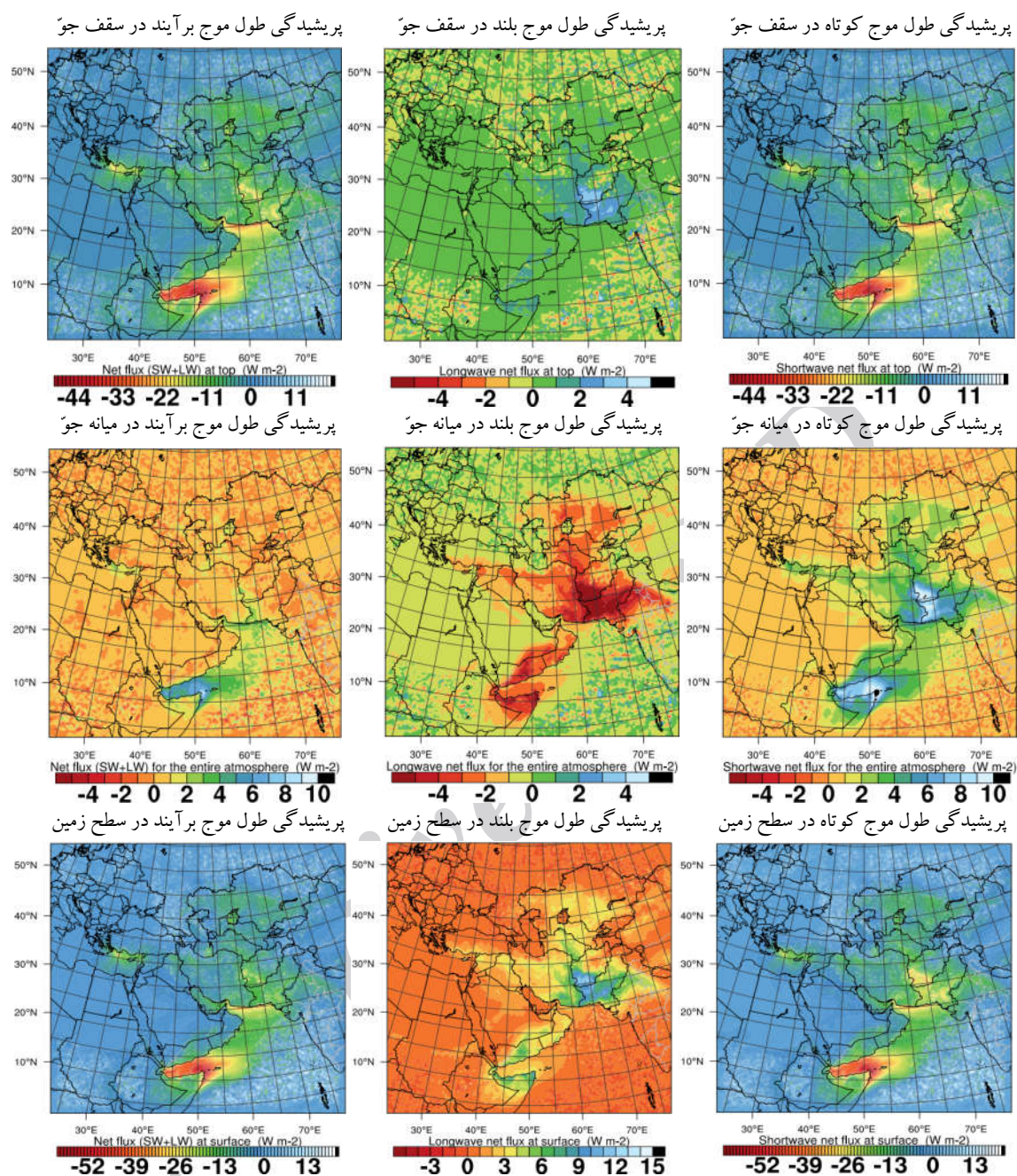
شکل ۸. شاخص UV AI ماهواره OMI با تفکیک افقی $۰/۲۵^\circ \times ۰/۲۵^\circ$ در روز ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲.



شکل ۹. توزیع مکانی غلظت هواویزها ($\mu\text{g m}^{-3}$) حاصل از خروجی مدل WRF-Chem برای روز ۲۰ جون ۲۰۱۲.

۳-۵ بررسی اثرات توفان خاک بر توازن تابشی

بررسی نتایج در بخش‌های قبل نشان داد که مدل WRF-Chem در محاسبه مقادیر هواویزها طی توفان مورد بررسی عملکرد نسبتاً خوبی دارد. در این بخش به بررسی اثرات هواویزها بر توازن تابشی با استفاده از خروجی مدل پرداخته می‌شود شکل ۱۰ توزیع مکانی میانگین روزانه



شکل ۱۰. توزیع مکانی میانگین روزانه پرشیدگی تابشی طول موج کوتاه (ستون سمت راست)، طول موج بلند (ستون وسط) و خالص (ستون سمت چپ) توسط گردوخاک بر حسب $W m^{-2}$ که توسط مدل WRF-Chem طی بازه زمانی ۱۷-۲۰ جون ۲۰۱۲ در سقف جو (ردیف بالا)، میانه جو (ردیف وسط) و سطح زمین (ردیف پایین) شبیه‌سازی شده است. مقادیر مثبت نشان دهنده اثرات گرمایشی و مقادیر منفی نشان دهنده اثرات سرمایشی گردوخاک است.

مرزی جو طی بازه زمانی ۱۷ تا ۲۰ ژوئن ۲۰۱۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شار گرمای محسوس، دما و ارتفاع لایه مرزی جو عموماً بر اثر واداشت تابشی گرد و خاک در طول روز کاهش و در طول شب افزایش

۴-۵ تأثیر گرد و خاک معلق در جو بر توازن انرژی سطح توزیع مکانی تغییرات روزانه، شبانه و میانگین ۲۴ ساعته شار گرمای محسوس، دمای ارتفاع دو متری و ارتفاع لایه

عطایی، ف.، ایران‌نژاد، پ.، مزرعه فراهانی، م.، علیزاده چوبری، ا.، ۱۳۹۵، شبیه‌سازی توزیع ذرات گرد و غبار در مقیاس جهانی و تأثیر آنها بر شارش‌های تابشی با استفاده از مدل WRF/Chem : فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۱۹-۶۳۲.

علیزاده چوبری، ا.، ۱۳۹۶، مطالعه عددی اثر غیر مستقیم هواویزها بر تابش طول موج کوتاه و بلند: مطالعه موردی، فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۳)، ۴۴۱-۴۵۰. فرهادی پور، س.، ۱۳۹۶، بررسی پدیده‌های گردوغبار سال‌های اخیر در منطقه غرب ایران با استفاده از داده‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی با چند طرحواره گسیل گردوغبار: پایان‌نامه دوره دکتری هوشناسی، پژوهشکده هوشناسی.

مشایخی، ر.، ایران‌نژاد، پ.، بیدختی، ع.، فایضی، ی.، ۱۳۸۸، بررسی فرایندهای میکروفیزیکی مؤثر بر ذرات هواویز جوی با استفاده از سامانه جفت شده طرحواره هواویز HAM و مدل میان‌مقیاس WRF : مجله ژئوفیزیک ایران، ۳(۲)، ۵۸-۷۶.

Abdi Vishkaee, F., Flamant, C., Cuesta, J., Oolman, L., Flamant, P., and Khalesifard, H. R., 2012, Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: A case study: Journal of Geophysical Research, **117**, D03201.

Ackerman, A. S., Toon, O., Stevens, D., Heymsfield, A., Ramanathan, V., and Welton, E., 2000, Reduction of tropical cloudiness by soot: Science, **288**(5468), 1042-1047.

Albrecht, B. A., 1989, Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness: Science, **245**(4923), 1227-1230.

Alizadeh-Choozari, O., Ghafarian, P., and Oowlad, E., 2016, Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations: International Journal of Climatology, **36**(4), 1575-2138.

Alizadeh-Choozari, O., and Gharaylou, M., 2017, Aerosol impacts on radiative and microphysical properties of clouds and

یافته‌اند. تغییرات شارگرمای محسوس و ارتفاع لایه مرزی جو در طول روز زیاد، اما در طول شب ناچیز است، درحالی‌که تغییرات دما در طول شب تقریباً برابر با تغییرات آن در طول روز است.

۶ نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از نتایج مدل WRF-Chem پربشیدگی تابش توسط ذرات گرد و خاک معلق در جو در طی توفان خاک ۱۶ تا ۲۱ ژوئن ۲۰۱۲ در منطقه غرب و جنوب غرب ایران مورد مطالعه قرار گرفت. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از دو دامنه تودرتو و از طرحواره هواویز MADE/SORGAM استفاده شد. ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهداتی، عملکرد مدل در شبیه‌سازی میزان گرد و خاک در طی توفان مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در مجموع عملکرد مناسب مدل را نشان داد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که پربشیدگی تابش طول موج کوتاه توسط هواویزها در سقف جو منفی، در میانه جو مثبت و در سطح زمین منفی است. پربشیدگی تابش طول موج بلند توسط هواویزها در سقف جو، میانه جو و سطح زمین از نظر علامت برعکس آنچه برای طول موج کوتاه به دست آمد محاسبه شد، اما با توجه به مقادیر بسیار بیشتر پربشیدگی‌های طول موج کوتاه، پربشیدگی تابش خالص توسط هواویزها رفتاری شبیه پربشیدگی تابش طول موج کوتاه توسط آنها دارد.

منابع

خراسانی، ن.، چراغی، م.، ندافی، ک.، و کرمی، م.، ۱۳۸۱، بررسی و مقایسه کیفیت هوا در شهرهای تهران و اصفهان در سال ۱۳۷۸ و ارائه راهکارهایی برای بهبود آن: مجله منابع طبیعی ایران، ۵۵(۴)، ۵۶۸-۵۵۹.

- C., and Eder, B., 2005, Fully coupled "online" chemistry within the WRF model: Atmospheric environment, **39**(37), 6957-6975.
- Hansen, J., Sato, M., and Ruedy, R., 1997, Radiative forcing and climate response: Journal of Geophysical Research, **102**(D6), 6831-6864.
- Hasanean, H., 2004, Middle East Meteorology. Available online: <http://www.eolss.net/> (accessed on 7 August 2015).
- Holben, B. N., Eck, T., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J., Setzer, A., Nakajima, T., 1998, AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization: Remote Sensing of Environment, **66**(1), 1-16.
- 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.
- Houthuijs, D., Breugelmans, O., Hoek, G., Vaskövi, É., Miháliková, E., Pastuszka, J. S., and Meliefste, K., 2001, PM 10 and PM 2.5 concentrations in Central and Eastern Europe: Results from the Cesar study: Atmospheric Environment, **35**(15), 2757-2771.
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., and Herman, J. R., 2004, Aerosol properties over bright-reflecting source regions: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **42**(3), 557-569.
- Hua, N. P., Kobayashi, F., Iwasaka, Y., Shi, G. Y., and Naganuma, T., 2007, Detailed identification of desert-originated bacteria carried by Asian dust storms to Japan: Aerobiologia, **23**(4), 291-298.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., and Collins, W. D., 2008, Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models: Journal of Geophysical Research, **113**, D13103.
- Kaufman, Y., Tanré, D., Remer, L. A., Vermote, E., Chu, A., and Holben, B., 1997, Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer: Journal of Geophysical Research, **102**(D14), 17051-17067.
- Koren, I., Kaufman, Y. J., Remer, L. A., and Martins, J. V., 2004, Measurement of the precipitation formation: Atmospheric Research, **185**, 53-64.
- Alizadeh-Choobari, O., Sturman, A., and Zawar-Reza, P., 2015, Global distribution of mineral dust and its impact on radiative fluxes as simulated by WRF-Chem: Meteorology and Atmospheric Physics, **127**(6), 635-648.
- Change, C., 2001, The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. by JT Houghton, Y. Ding, D. J Griggs, et al.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I, Model implementation and sensitivity: Monthly Weather Review, **129**(4), 569-585.
- Chiapello I., Bergametti G., Chatenet B., Dulac F., Jankowiak I., Liousse C., and Soares E. S., 1999, Contribution of the different aerosol species to the aerosol mass load and optical depth over the northeastern tropical Atlantic: Journal of Geophysical Research **104**(D4), 4025-4035.
- Choi, H., Shin, D. W., Kim, W., Doh, S. J., Lee, S. H., and Noh, M., 2011, Asian dust storm particles induce a broad toxicological transcriptional program in human epidermal keratinocytes: Toxicology Letters, **200**(1), 92-99.
- Deng, A., Stauffer, D. R., Dudhia, J., Otte, T., and Hunter, G. K., 2007, Update on analysis nudging FDDA in WRF-ARW. Paper presented at the 8th Annual WRF User's Workshop: National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Fairall, C., Bradley, E. F., Hare, J., Grachev, A., and Edson, J., 2003, Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. Journal of Climate, **16**(4), 571-591.
- 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, **106**(D17), 20255-20273.
- Grell, G. A., and Freitas, S. R., 2013, A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling: Atmospheric Chemistry and Physics Discussion, **13**(9), 23845-23893.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W.

- Rosenfeld, D., Rudich, Y., Lahav, R., 2001, Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, **98**(11), 5975–5980.
- Sehatkashani, S., Kamali, G., Vazifedoust, M., and Aliakbari, B. A., 2016, Study of air quality over west and south west Iran using aerosol optical thickness products of: Civil Engineering, **32-2**(1.2), 91-97.
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Haghhighifard, N. J., Mesdaghinia, A., Yunesian, M., Nabizadeh, R., and Saki, H., 2012, The evaluation of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) events in Ahvaz, Iran, from April through September 2010: Journal of Arid Environments, **77**, 72-83.
- Tegen, I., and Fung, I., 1994, Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **99**(D11), 22897-22914.
- Tegen, I., Werner, M., Harrison, S., and Kohfeld, K., 2004, Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission: Geophysical Research Letters, **31**, L05105.
- Twomey, S., 1977, The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds: Journal of Atmospheric Sciences, **34** (7), 1149–1152.
- Winker, D., Tackett, J., Getzewich, B., Liu, Z., Vaughan, M., and Rogers, R., 2013, The global 3D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP: Atmospheric Chemistry and Physics, **13**(6), 3345-3361.
- Woodward, S., 2001, Modeling the atmospheric life cycle and radiative impact of mineral dust in the Hadley Centre climate model: Journal of Geophysical Research **106**(D16): 18155–18166.
- Zhao, C., Chen, S., Leung, L. R., Qian, Y., Kok, J., Zaveri, R., Huang, J., 2013, Uncertainty in modeling dust mass balance and radiative forcing from size parameterization. Atmospheric Chemistry and Physics, **13**(7), 10733–10753.
- effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation: Science, **303**(5662), 1342-1345.
- Kumar, R., Barth, M. C., Pfister, G. G., Naja, M., and Brasseur, G. P., 2014, WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget: Atmospheric Chemistry and Physics, **14**(5), 2431-2446. doi:10.5194/acp-14-2431-2014
- Li X, Maring H, Savoie D, Voss K, Prospero J. M., 1996, Dominance of mineral dust in aerosol light-scattering in the North Atlantic trade winds: Nature, **380**(6573), 416-419.
- Lo, J. C. F., Yang, Z. L., and Pielke, R. A., 2008, Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model: Journal of Geophysical Research, **113**, D09112.
- McCormick, R. A., and Ludwig, J. H., 1967, Climate modification by atmospheric aerosols: Science, **156**(3780), 1358-1359.
- Miller R. L., Tegen I, and Perlwitz J., 2004, Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle: Journal of Geophysical Research **109**(D04), 203.
- Morrison, H., Thompson, G., and Tatarskii, V., 2009, Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes: Monthly Weather Review, **137**(3), 991-1007.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., and Gill, T. E., 2002, Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product: Reviews of Geophysics, **40**(1), 1002.
- Rosenfeld, D., 1999, TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall: Geophysical Research Letters, **26** (20), 3105.
- Rosenfeld, D., Lensky, I. M., 1998, Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds: Bulletin of the American Meteorological Society, **79** (11), 2457–2476.

Dust storms in west and southwest Iran and their impact on radiation fluxes: A case study

Saeid Farhadipour¹, Majid Azadi^{2*}, Abbasali Aliakbari Bidokhti³, Omid Alizadeh Choobari⁴, Habib Allah Sayari⁵

¹Ph. D. student, Atmospheric Science and Meteorological Research Centre (ASMERC), Tehran, Iran

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

³Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁵Professor, Up Most Strategic University, Tehran, Iran

(Received: 24 April 2017, Accepted: 24 August 2017)

Summary

Dust aerosols make a considerable contribution to the climate system through their radiative effects due to their abundance in the atmosphere. Recent observations suggest that over the past decade, dust events have become more frequent in many parts of Iran, especially in the west and southwest. Through their radiative forcing, dust aerosols have significant effects on the regional radiation budget of the atmosphere, while their adverse effects on human health have also raised serious concerns. The primary aim of the present study is to examine the radiation effects associated with a severe dust storm that occurred in west and southwest Iran on 16 to 21 June 2012. To this end, the Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem) model was used. Two simulations were conducted: a model setup that did not include dust aerosols, and the one that included dust aerosols and their feedback to the atmosphere. A two-way interactive nested domain (nesting ratio:1:3) simulations were performed using 98×90 and 151×139 horizontal grid points, respectively. In the vertical, 27 σ -levels were used. The grid spacing for the two domains were 45 and 15 km, respectively. Simulations ran from 16 to 22 June 2012, and the first 24 hours was considered as the spin-up time. Meteorological initial conditions were obtained from the Global Forecast System (GFS) data at $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ resolution. The performance of the model was evaluated using the available observed data, including PM10 observations in Ahwaz located in southwest Iran, available AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) data in nearby areas, and aerosol products of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) carried on board the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) spacecraft. Results indicate that PM10 concentration in Ahwaz is overestimated by the model, while simulated aerosol optical depth (AOD) is underestimated compared to the observed AERONET data. Relatively, good agreement is found between the model results and satellite products, and temporal evolution of the dust events is also well-simulated. Thus, generally, the performance of the model is acceptable for accurate simulation of the dust event. Our analysis indicated that radiative effects of dust particles cause cooling at the surface and top of the atmosphere, but warming in the middle of the troposphere. On average, perturbation of shortwave radiation by dust aerosols in the west, and southwest Iran is estimated to be -7.27, 1.79 and -5.47 $W m^{-2}$ at the surface, in the middle and at the top of the atmosphere, respectively. Average perturbation of the longwave radiation by dust aerosols over the same region was estimated to be 2.2, -1.61 and 0.59 $W m^{-2}$ at the surface, in the middle and at the top of the atmosphere, respectively. Thus, the net (shortwave + longwave) radiative effect of dust aerosols averaged in west and southwest Iran is found to be -5.07, 0.19 and -4.88 $W m^{-2}$ at the surface, in the middle and at the top of the atmosphere, respectively.

Keywords: dust storm, WRF-Chem, satellite data, perturbation of radiation

*Corresponding author:

azadi68@hotmail.com