

بررسی سازوکار و چشمه گردوخاک فراگیر در استان خراسان رضوی توسط مدل RegCM4 و HYSPLIT: مطالعه موردی (اول ژوئیه سال ۲۰۱۴)

ابراهیم فتاحی^۱، محسن عراقی زاده^۲، الهام مبارک حسن^۳، سکینه خان‌سالاری^۴، نسیم حسین حمزه^۵

۱- دانشیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۲- مدیر کل اداره هواشناسی استان خراسان رضوی، مشهد، ایران

۳- استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

۴- استادیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۵- دانش آموخته دکتری هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

چکیده

کاربرد مدل‌های عددی در شبیه‌سازی رویدادهای گردوخاک به منظور شناخت بهتر سازوکارهای آن می‌تواند مفید و مؤثر باشد. هدف اصلی این مطالعه، شناسایی چشمه‌های گردوخاک فراگیری است که در استان خراسان در اول ژوئیه سال ۲۰۱۴ رخ داده است و بیشتر مناطق استان خراسان رضوی را تحت تاثیر قرار داده است. به عبارت دیگر هدف از مطالعه حاضر بررسی علت و چشمه‌های گردوخاک فراگیر رخ داده در این استان از طریق شبیه‌سازی این رویداد توسط مدل RegCM و مدل HYSPLIT و مقایسه نتایج شبیه‌سازی به کمک داده‌های زمینی و سنجش از دور انجام شد. به این منظور داده‌های دید افقی از سازمان هواشناسی کشور و AOD ماهواره آکوا و Merra-2 تهیه شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که گسترش کم‌فشار حرارتی بر روی پاکستان همراه با بادهای شمال و شمال شرقی با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در شرق استان منجر به انتقال گردوخاک به منطقه می‌شود. مدل HYSPLIT و برون داد مدل RegCM منشأ گردوخاک را بیابان‌های ترکمنستان و غرب افغانستان نشان می‌دهند. عمق نوری هواویزها حاصل از مدل RegCM با دیدافتی مشاهداتی در ایستگاه‌های شرق و جنوب استان هماهنگی خوبی دارند. به طوری که ضریب همبستگی بین آن دو در گناباد ۰/۹۸-، تربت جام ۰/۶۶- و سرخس ۰/۶۱- به دست آمد. همچنین ضریب همبستگی برون داد مدل و ضخامت نوری هواویزهای حاصل از MERRA-2 در دو ایستگاه شرق استان شامل سرخس و تربت جام به ترتیب ۰/۴۵- و ۰/۷۸- به دست آمد. نتیجه حاصل از مقایسه سری زمانی عمق نوری هواویزها نشان داد که در ایستگاه‌های شرق و جنوب استان برون داد مدل در بازه‌های زمانی سه ساعته با تغییرات افقی، عمق نوری هواویزهای ماهواره آکوا، ضخامت نوری هواویزهای MERRA-2 هماهنگی خوبی دارد. اما در ایستگاه‌های مرکزی و غرب مدل RegCM گردوخاک را به خوبی بر آورد ننموده و تاخیر زمانی ۶ تا ۹ ساعته دارد.

کلید واژه‌ها: گردوخاک، مدل RegCM، ماهواره آکوا، MERRA-2، خراسان رضوی.

مقدمه

کمک مقدار گردوخاک به دست آمده توسط مدل RegCM گردوخاک‌های عراق دسته‌بندی شده اند (Abed et al., 2019). توفان‌های گردوخاک شدید در مناطق مختلف دنیا از جمله منطقه ساحل و مدیترانه، هند توسط این مدل شبیه‌سازی شده است (Zakey et al., 2006; Nabat et al., 2013; Das et al., 2012). تحقیق انجام شده در هیمالیا توسط مدل RegCM انتشار فصلی گردوخاک فصلی و همچنین انتقال و توزیع آن از چشمه را به طور قابل قبولی نشان داد (Das et al., 2013). گردوخاک در منطقه صحرای افریقا توسط مدل RegCM شبیه‌سازی شده و نتیجه نشان داد که مدل عمق نوری هواویزها را در شرق منطقه بیش تر و در خلیج گینه کمتر برآورد شده است (Tesfaye et al., 2016). کاربرد مدل RegCM در شرق آسیا نشان داد که به دلیل ساختار کوهساری پیچیده، کاربر زمین و ویژگی‌های سطحی در منطقه، برآورد گردوخاک دشوار است (Zhang et al., 2009, 2008). در جنوب غرب آسیا نیز به اثر ریزمقیاس نمایی باد و شرایط مرزی اولیه در بهبود شبیه‌سازی گردوخاک اشاره شده است (Marcella and Eltahir, 2012). Eltahir, 2010 در تفکیک‌پذیری بالاتر 3 (کمتر از 50 کیلومتر) فرآیندهای انتشار گردوخاک 4، ترابرد 5 و نهشت 6 اثر تابشی در اقلیم منطقه بهتر برآورد می‌شوند. در شبیه‌سازی گردوخاک با استفاده از مدل RegCM دیده شد که انتقال گردوخاک صحرا به آناتولی در کیفیت هوای استانبول تأثیر دارد. همچنین گردوخاک بر واداشته‌ای تابشی خورشید تأثیر داشته و بخش از آن را جذب می‌نماید (Agacayak et al., 2012). کاربرد مدل RegCM4.3 در بیابان تاکلامکان نشان داد که در این منطقه گردوخاک به طور قابل توجهی افزایش یافته و انتقال گردوخاک به جو در بخش‌های شمالی فلات تبت رخ می‌دهد. این مدل جفت شده انتقال فصلی گردوخاک را از منطقه صحرا ۷ به بخش‌های جنوبی و مرکزی آمریکا را به خوبی شبیه‌سازی نمود (Tesfaye et al., 2016). کاربرد مدل RegCM در شبیه‌سازی گردوخاک و بازخوردهای آن در شرق آسیا نشان داد که برآورد غلظت گردوخاک به دلیل

یکی از مدل‌های عددی-دینامیکی اقلیمی که در طی سال‌های اخیر توسعه یافته و کاربران بسیاری از آن استفاده می‌نمایند مدل RegCM می‌باشد. به منظور مطالعه فرآیندهای جوی و اقلیمی، با کاربست مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای^۱، ریزمقیاس نمایی دینامیکی انجام می‌شود تا اقلیم و آب‌وهوای منطقه‌ای مورد بررسی قرار گیرد (Abiodun, Giorgi et al., 2012; Marcella and Eltahir, 2008 et al., 2008). مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM برای مدل‌سازی و پیش‌بینی‌های بلندمدت منطقه‌ای طراحی شده است و نسخه اولیه مدل RegCM در مرکز ملی پژوهش‌های جوی دانشگاه پنسیلوانیا در سال ۱۹۸۰ تهیه شد (Grell et al., 1994). به کارگیری مدل RegCM در گردوخاک با دیدگاه‌های مختلفی از جمله نقش شرایط سطحی و ساختار کوهساری، حساسیت‌سنجی مدل به تفکیک مکانی افقی، گسترش عمودی و منشأیابی و شار سطحی در مناطق مختلف دنیا انجام شده است (Zhang et al., 2008; Santese et al., 2009; Nabat et al., 2012; Tsikerdekis et al., 2016; Sun and Liu, 2016). همچنین اثر گردوخاک بر تغییر اقلیم و ترازمندی انرژی تابشی جو توسط مدل RegCM تحقیق شده است (Salmon et al., 2015; Pal, 2007; Diro et al., 2012; Zakey et al., 2006; Salon, 2008; Marcella and Eltahir, 2010, 2012). زکی و همکاران (Zakey et al., 2006) توانایی مدل RegCM در بررسی اثر گردوخاک صحرا 2 در اقلیم آفریقا و اروپا را تأیید می‌نمایند. کاربرد بلندمدت مدل RegCM نشان می‌دهد که گرمایش جهانی منجر به افزایش انتشار گردوخاک و افزایش گردوخاک در ستون هوا در شرق آسیا خواهد شد (Zhang et al., 2016). شبیه‌سازی گردوخاک توسط مدل RegCM و بررسی اثر اقلیمی گردوخاک نشان داد که حضور گردوخاک بر ساختار دما و سرعت و جهت باد در ترازهای مختلف تأثیر دارد (N'Datchoh et al., 2018). در منطقه جورجیا اثر مستقیم گردوخاک، منجر به افزایش دما در تمام ماه‌های سال می‌شود (N'Datchoh et al., 2018). به

⁵-Transportation

⁶-Deposition

⁷-Sahara

¹- Regional climate model

²- Saharan

³-Higher spatial resolution

⁴-Dust emission processes

از جمله کاربردهای مدل RegCM در شناسایی ساختار شکل‌گیری گردوخاک و تعیین چشمه آن است که توسط فاروقی و همکاران (۱۳۹۶) در شمال شرق ایران انجام شد و بیابان‌های ترکمنستان به عنوان منشأ شکل‌گیری گردوخاک خراسان شمالی شناخته شد. گرچه مدل در بر آورد گردوخاک در منطقه جنوب ترکمنستان خطای قابل توجهی دارد.

مدل RegCM مدلی اقلیمی است، اما به منظور بررسی توانایی این مدل در شبیه‌سازی بلندمدت و اقلیمی گردوخاک بهتر است ابتدا گردوخاک‌های موردی شبیه‌سازی شده و مشخصه‌ها آن تحلیل گردد (Zakey et al., 2006). استان خراسان رضوی ساختار کوهساری پیچیده ای دارد. ناهمواری‌های شمال شرق ایران بر دما، جهت و سرعت باد تأثیر می‌گذارند به طوری که با حذف ساختار کوهساری در مدل RegCM ساختار دما و بادهای محلی تغییر می‌نماید (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). از این رو عمل کرد مدل های عددی در این مناطق اهمیت ویژه ای دارد. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی دقت و توانایی مدل RegCM در شبیه‌سازی گردوخاک‌های اول ژوئیه ۲۰۱۴ در خراسان رضوی است. پس از اطمینان از دقت مدل RegCM در شبیه‌سازی رویدادهای گردوخاک موردی می‌توان از آن در مقیاس زمانی طولانی‌تر نیز استفاده نمود.

داده‌ها و روش

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمال شرقی کشور ایران در محدوده ۷۱ طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی قرار دارد. این استان از جنوب به استان‌های خراسان جنوبی و یزد، از غرب به استان سمنان، از شمال به استان خراسان شمالی و از شرق با کشور افغانستان هم‌مرز است. ارتفاعات هزار مسجد، کپه داغ و بینالود در شمال استان در راستای شمال شرقی - جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده دیگر در راستای شرقی در مرکز و در راستای جنوب شرقی در مرکز و جنوب استان وجود دارند. سرخس کم ارتفاع‌ترین شهرستان، در شمال شرق استان، کویر بجنستان در جنوب شرقی استان و دشت کویر در غرب استان قرار دارند.

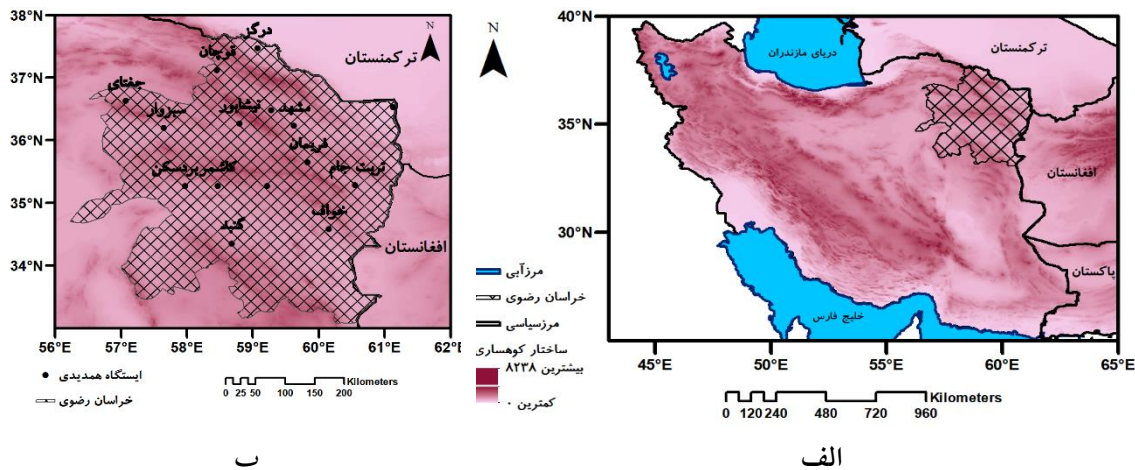
کوهساری پیچیده، شرایط کاربری زمین و پوشش برفی کاری نسبتاً دشوار است.

عمق نوری هواویزها (AOD) به عنوان معرف گردوخاک در مطالعه‌های مختلف در نظر گرفته شده که یکی از برون دادهای گردوخاک در مدل RegCM است. برآورد عمق نوری هواویزها در مدل RegCM در مناطق مختلف مشابه نیست. بررسی بلندمدت اقلیمی نشان می‌دهد توزیع AOD1 حاصل از مدل‌ها و ماهواره هماهنگ بوده اما مقدار عددی AOD حاصل از مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی ماهواره کمتر است (Mallet et al., 2017). در جنوب آفریقا و مدیترانه AOD مدل نسبت به ماهواره تقریباً هماهنگ بوده (Tesfaye et al., 2013)، اما در شمال آفریقا و جنوب اروپا کمتر برآورد شده است (Nabat et al, 2012; Santese et al., 2009).

در ایران نیز ارزیابی اقلیمی و کوتاه‌مدت پدیده‌های جوی مختلف از جمله گردوخاک توسط مدل RegCM انجام شده است. مدل RegCM4 برای پدیده گردوخاک جنوب غرب ایران به کار گرفته شد و نشان داد که توفان‌های گردوخاک در این منطقه به ترازهای زیرین جو محدود می‌شوند (مفیدی و جعفری، ۱۳۹۱). کاربرد مدل RegCM4-1 با طرح‌واره گردوخاک در دشت سیستان نشان داد که واداشت‌های محلی در ترازهای زیرین جو در انتشار گردوخاک نقش مهمی داشته و همچنین چشمه آن‌ها را می‌توان تعیین نمود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴).

اهمیت ریزمقیاس نمایی گردوخاک و باد توسط مدل RegCM به ویژه در مناطقی با ساختار کوهساری مانند شمال شرق ایران و دشت سیستان توسط حسینی و همکاران (۱۳۹۴) مورد تأکید بوده است. نتیجه این تحقیق‌ها نشان داد که کاربست مدل RegCM در ریزمقیاس نمایی گردوخاک اهمیت داشته و برآورد صحیح آن به تفکیک‌پذیری مکانی حساس می‌باشد. مدل RegCM با تفکیک ۲۰ کیلومتر ساختار سطحی در انتشار گردوخاک عمل کرد بهتری داشته و برآوردها بهبود می‌یابند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴). در حالی که تفکیک ۸۰ کیلومتر نتیجه نامطلوبی به دست می‌آید (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴).

در راستای شمال به جنوب استان از ارتفاع کاسته شده و دشت‌های هموار و حاصل خیز در بین ارتفاعات و اطراف آن‌ها قرار دارند.



شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی (منطقه هاشور زده) ، ب) ایستگاه‌های همدیدی استان خراسان رضوی

مواد و روش‌ها

در شکل ۱ ب، موقعیت ایستگاه‌های همدیدی با دایره مشکی نشان داده شده است. به جز سرخس و درگز دیگر ایستگاه‌ها ارتفاعی بیش از ۹۰۰ متر ندارند. برخی ایستگاه‌های همدیدی استان خراسان رضوی مانند مشهد، سبزوار و تربت حیدریه قدمت بیشتری داشته و دوره آماری طولانی‌تر دارند. برخی دیگر مانند درگز (۲۰۰۷)، فریمان (۲۰۰۵) و خواف (۲۰۰۵) پس از سال ۲۰۰۰ تأسیس شده‌اند. همچنین در برخی ایستگاه‌ها داده‌ها در ۸ نوبت دیدبانی شبانه‌روزی موجود نیست. بنابراین در بررسی و تحلیل‌های روند زمانی نمی‌توان از آن‌ها استفاده نمود. در شکل‌های ترسیمی در ادامه متن موقعیت ایستگاه‌های انتخابی با دایره مشکی توپر نمایش داده شده است.

در ابتدا به منظور تعیین تاریخ‌های وقوع گردوخاک در استان خراسان رضوی کاهش دید افقی کمتر از ۵۰۰۰ متر به همراه کدهای هواشناسی مربوط به دیدبانی توفان‌های گردوخاک (۰۶ و ۰۷) در ایستگاه‌های انتخابی مدنظر قرار گرفت. با توجه به ۸ نوبت دیدبانی در شبانه‌روز، اگر حداقل در یک نوبت، دید افقی به کمتر از ۵۰۰۰ متر رسیده باشد، آن روز به‌عنوان روز گردوخاکی در آن ایستگاه در نظر گرفته شد.

سپس روزهای گردوخاک در ایستگاه‌های مختلف استان استخراج شد.

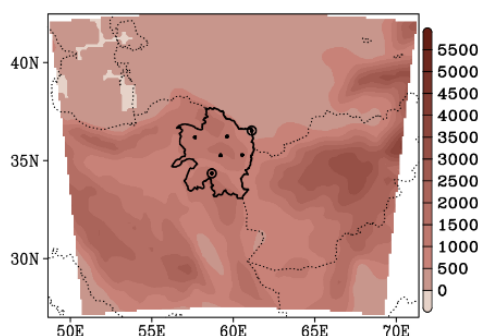
در مرحله بعد به بررسی چشمی رخداد گردوخاک با استفاده از تصویر ماهواره MODIS در منطقه پرداخته شد. به طوری که اگر گردوخاک بخش‌های بیشتری از استان را در بر گرفته و یا توده گردوخاک به شکل بارزی در تصویر ماهواره دیده شد، آن تاریخ به‌عنوان گردوخاک فراگیر در نظر گرفته شد. در انتخاب نهایی مورد تابستانی مد نظر بود تا وجود ابر مانع آشکارسازی گردوخاک نشده باشد. با شرایط پیش گفته شده اول ژوئیه سال ۲۰۱۴ انتخاب شد.

تنظیم مدل RegCM در شبیه‌سازی گردوخاک

در این تحقیق از مدل RegCM4.6 با تعداد ۹۵ گام شبکه در راستای عرض جغرافیایی، ۱۲۸ گام شبکه در راستای طول جغرافیایی و ۱۸ تراز در راستای قائم در دستگاه سیگما استفاده شده است که فشار بالاترین تراز آن ۵ میلی‌بار است. عرض مرکزی ۳۵ درجه شمالی و طول مرکزی ۶۰ درجه شرقی در نظر گرفته شده است. مدل به صورت یک آشیانه‌ای با قدرت تفکیک ۳۰ کیلومتر اجرا شده است (جدول ۱). دامنه انتخابی مدل RegCM در شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۱- تنظیم مختصات جغرافیایی و نقاط شبکه مدل RegCM

تعداد نقاط شبکه	مختصات نقطه مرکزی
dimparam	geoparam
iy = 95	iproj = 'LAMCON'
jx = 128	ds = 30.0
kz = 18	ptop = 5.0
nsg = 1	clat = 35.00
	clon = 60.00
	plat = 50.39
	plon = 35.48
	truelatl = 30.0
	truelath = 45.0



شکل ۲- دامنه و ساختار کوهساری مدل RegCM

سیستم تصویر انتخابی، نگاشت لامبرت است که برای عرض‌های میانی مناسب است. تنظیمات فیزیکی مدل و شرایط اجرای آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- تنظیمات مدل RegCM

Grell(1993)	طرح واره همرفت	شمال شرق ایران	منطقه
Explicit moisture (SUBEX; Pal et al 2000)	طرح واره رطوبت	نگاشت لامبرت	سیستم تصویر انتخابی
Holtslag PBL (Holtslag, 1990)	طرح واره لایه مرزی	ERA-Interim(EIN15)	داده اولیه و شرایط مرزی
OI_WK	طرح واره دمای سطح دریا	۱۸ لایه	تعداد لایه‌های قائم
۴ دسته ذره، با در نظر گرفتن گسیل و انتقال ذرات (۰/۱ تا ۱، ۲/۵ تا ۲/۵ تا ۵، ۵ تا ۲۰ میکرومتر)	طرح واره گردوخاک	بیست روز پیش از شروع توفان تا یک روز پس از پایان	مدت اجرا

RegCM در ادامه متن به اختصار AOD_Re نامیده

می‌شود.

سنجش از دور و گردوخاک

استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای در پایش آلودگی هوا و ذرات معلق مزایای زیادی را نسبت به ایستگاه‌های زمینی به همراه دارد. داده‌های ماهواره با تفکیک مکانی و زمانی

بررسی روند

داده‌های ورودی ERA Interim است که از پایگاه ICTP تهیه شده است. مدل با spin-up 20 روزه اجرا شده است (جدول ۲). گام زمانی داده‌های ورودی شش ساعته و با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر و گام زمانی خروجی سه ساعته و با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. برون‌داد مدل

AOD، یکی از پارامترهای مهم در بررسی توفان‌های گردوخاک است. در این مطالعه از داده‌های Blue AOD از محصولات سنجنده مودیس نصب شده بر روی ماهواره آکوا با تفکیک مکانی ۱ درجه استفاده شده است (<https://lance.modis.eosdis.nasa.gov>). داده‌های تهیه شده از سنجنده مودیس ماهواره آکوا در متن با علامت اختصاری AOD_Aq می‌باشد.

گرددند (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). زمان عبور ماهوار آکوا از حوالی ایران بین ساعات ۹ الی ۱۴ محلی (UTC ۷:۳۰ تا ۱۰:۳۰) می‌باشد، خروجی‌های مدل در ساعت ۹ UTC ترسیم شده و مورد مقایسه قرار گرفتند. مقدار عمق نوری اپتیکی با توجه به غلظت، تعداد و اندازه هواویزها و همچنین ویژگی ذره‌ها متفاوت است (Ogren, 1995). در شرایطی که هوای قاره‌ای صاف و پاک باشد عمق اپتیکی بین ۰/۱ تا ۰/۲ بوده و برای هوای صاف اقیانوسی بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ تعریف می‌شود (Ogren, 1995). بیشتر بودن این مقدار به معنای وجود ذرات معلق بیشتری در جو در امتداد ستون عمودی هوا می‌باشد. بنابراین افزایش هواویزها منجر به افزایش عمق اپتیکی جو شده که در نتیجه آن تیرگی جو افزایش و دید افقی کاهش می‌یابد. در واقع مقدار AOD، میزان تضعیف پرتو خورشید در جو، به دلیل جذب و پراکندگی ناشی از ذره‌های جوی (هواویزها) می‌باشد. بنابراین مقدار بزرگ‌تر AOD به معنای غلظت بیشتر هواویزها در ستون عمودی جو است. عوامل مختلفی از جمله فاصله از منشأ گردوخاک، کوهساری، مسیر حرکت توده‌های هوا، ویژگی‌های اقلیمی منطقه، فعالیت‌های صنعتی، آلودگی‌های محیطی و صنعتی، دود، فاصله از منابع آبی (نمک دریا) و شهری عامل مهمی در توزیع گردوخاک و AOD می‌باشد (Aloysius et al., 2009). فعالیت‌های انسانی به‌ویژه در مناطق پرجمعیت و یا صنعتی و سوختن سوخت‌های فسیلی عامل مهمی در افزایش AOD می‌باشند. بنابراین وجود پالایشگاه‌های استخراج نفت و گاز و انتشار دود ناشی از احتراق‌ها و فرآیندهای پالایشی منجر به افزایش AOD در آن مناطق می‌شود (Song et al., 2009). در برخی مناطق شهری با بافت پراکنده و وجود زمین خال، بازتابندگی بالایی از سطح خاک داشته و الگوریتم،

مناسب محدودیت‌های یاد شده را نداشته و پهنه‌بندی ذره‌های جوی به خوبی انجام می‌شود بنابراین داده‌های ماهواره به‌عنوان داده‌های مکمل ایستگاه‌های زمینی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (Guo et al., 2009)). داده‌های ماهواره برای شبیه‌سازی توزیع مکانی و زمانی گردوخاک استفاده می‌شوند، بنابراین برای پایش و آشکارسازی منابع تولید کننده گردوخاک ضروری هستند. در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده، تصویر ماهواره پهنای وسیع‌تری را پوشش می‌دهد (Wang and Christopher, 2003). تصاویر ماهواره یکی از بهترین منابع جهت بررسی مشخصات و مسیر هواویزها هستند (Myhre et al., 2005). محصولات محصلاتی که از تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آیند نقش مهمی در اجرا و اعتبارسنجی مدل‌های منطقه‌ای و مدل‌های انتقال دارند. این داده‌ها در بخش پیش‌بینی کارآمد هستند زیرا ضمن شناسایی پدیده ایجاد شده و تخمین سرعت و جهت حرکت آن، زمان رسیدن این پدیده را به منطقه مورد نظر می‌توان پیش‌بینی کرد. همچنین در کمی‌سازی گردوخاک و برآورد غلظت آن در مطالعات کیفیت هوا بسیار با اهمیت است. مطالعه‌های زیادی در ارتباط با امکان‌سنجی کاربرد سنجنده‌های ماهواره‌های پایش آلودگی هوا و گردوخاک انجام شده است.

داده‌های سنجنده مودیس (MODIS)

سنجنده مودیس MODIS1، اولین سنجنده تحقیقاتی کاربردی برای سنجش ذرات معلق می‌باشد که در دسامبر ۱۹۹۹ روی دو ماهواره ترا ۲ و آکوا ۳ نصب شده است (Kaufman, 2002). استفاده از داده‌های سنجنده MODIS به‌ویژه زمانی که اندازه‌گیری زمینی موجود نیست، ابزار بسیار مهمی در پایش ذرات معلق جو هستند (Gupta and Christopher, 2008). یکی از محصولات مودیس برای هواویزهای جوی، (Aerosol Optical Depth) AOD می‌باشد. عمق نوری هواویزها (AOD) که توسط ماهواره تعیین می‌شود، ابزار مفیدی برای بررسی شرایط توده‌های گردوخاک می‌باشد. عمق نوری اپتیکی در واقع توزیع هواویزهای مربوط به گردوخاک را نشان می‌دهد. شاخص

³ - Aqua

¹ - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

² - Terra

پهنه‌بندی دو محدوده کمتر با دو رنگ متفاوت سبز و آبی مشخص شده است.

مدل HYSPLIT⁸

یکی از روش‌های شناسایی کانون‌های گردوخاک علاوه بر تصاویر ماهواره‌های استفاده از مدل مسیریاب HYSPLIT است که با تقریب خوبی قادر است مسیرهای برگشت برای دستیابی به چشمه آلودگی و منابع تولید گردوخاک را نشان دهد (Draxler, 1999). در این مطالعه بازه زمانی پس‌گردی نیز ۲۴ ساعت و ارتفاع مسیر ذره ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. مسیرهای به‌دست آمده بر تصویر مرئی گردوخاک منطبق شد تا به این ترتیب منشأ شکل‌گیری گردوخاک استان خراسان رضوی تعیین گردد.

نتایج و بحث

بررسی ساختار همدیدی

در این سامانه منجر به گردوخاک در استان خراسان رضوی در روز ۳۰ ژوئن و اول ژوئیه سال ۲۰۱۴ کم‌فشار حرارتی بر منطقه شرق ایران بر کشورهای پاکستان و افغانستان مستقر است. در این منطقه در روز اول ژوئیه سال ۲۰۱۴ شیو فشاری به‌خصوص در منطقه افغانستان و تاجیکستان افزایش یافته است (شکل ۳). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز در این مدت زبانه‌ی کم ارتفاع بسته مستقر بر کشورهای همسایه شرقی ایران تا روی ایران نفوذ نموده است (شکل ۴). با این شرایط همدیدی و وجود شیو فشاری قابل توجه در شمال افغانستان، بادهای خشک و فاقد رطوبت شمال و شمال شرقی در مرز شرقی استان خراسان رضوی رخ می‌دهد. سرعت بادهای در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال به ۲۰ متر بر ثانیه نیز رسیده است (شکل ۵) که می‌تواند گردوخاک را از شرق ترکمنستان و غرب افغانستان به سمت خراسان رضوی انتقال دهد. ساختار کوهساری منطقه نیز عامل دیگری در جهت افزایش سرعت باد و تشدید گردوخاک است.

عمق نوری هواویز در این مناطق با دقت بر آورد نمی‌شود. در شرایط ابرناکی عدم قطعیت در بازیابی AOD به علت اندازه‌گیری بازتاب سطحی، برخی فرضیات در شکست نور، شکل ذره، نمایه عمودی و توزیع اندازه ذره می‌باشد (Li et al., 2018).

مدل MERRA-2¹

دومین بازیابی تحلیلی تحقیقات و برنامه‌های کاربردی دفتر ارزیابی و مدل جهانی ناسا^۲ به نام MERRA-2 نامیده شده و بر اساس بازتخلیل داده‌های ماهواره عمل می‌نماید. MERRA-2 شامل مدل (Molod et al., 2012; 2014) و طرح‌واره تحلیلی درون‌یابی آماری جهانی^۳ (Wu et al., 2002; Koster et al., 2016) مدل بر اساس AERONEY⁷، MISR⁶، MODIS⁵، AVHRR⁴ می‌باشد. داده‌های MERRA-2 شامل ۵۷۶ نقطه طول جغرافیایی و ۳۶۱ نقطه عرض جغرافیایی و در تفکیک $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ هستند. این داده‌ها در بازه زمانی سه ساعته تا میانگین یک ماه در دسترس هستند. وجود داده در بازه زمانی سه ساعته امکان مقایسه آن را با داده‌های زمینی سه ساعته (دید افقی) فراهم می‌آورد. همچنین ترسیم توزیع مکانی آن‌ها و انطباق زمانی با برون‌داد مدل و دیگر داده‌های ماهواره که در ساعت مشخصی از روز تهیه می‌شوند، مناسب‌تر است. لازم به ذکر مجدد است که این داده‌ها حاصل ترکیبی از داده‌های چهار ماهواره قید شده در بالا هستند. این مدل انواع مختلف داده‌های مشاهداتی را در اختیار دارد. در ادامه متن داده‌های این بخش با AOT_Me نام‌گذاری شده‌اند.

در تصاویر ترسیم شده AOD حاصل از مدل، اکوا و MERRA-2 محدوده بین ۰/۱ تا ۰/۲ بدون رنگ، ۰/۲ تا ۰/۴ با رنگ آبی و بیش از ۰/۴ نیز با دامنه مختلفی از قرمز مشخص شده است. ۰/۴ و بیشتر آستانه گردوخاک، مقدار کمتر از ۰/۴ در محدوده گردوخاک قرار نمی‌گیرد. اما به دلیل آن‌که برآورد مدل کمتر از ماهواره اکوا بوده است و به‌منظور مقایسه بهتر

⁵ - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

⁶ - Multiangle Imaging Spectroradiometer

⁷ - Aerosol Robotic Network

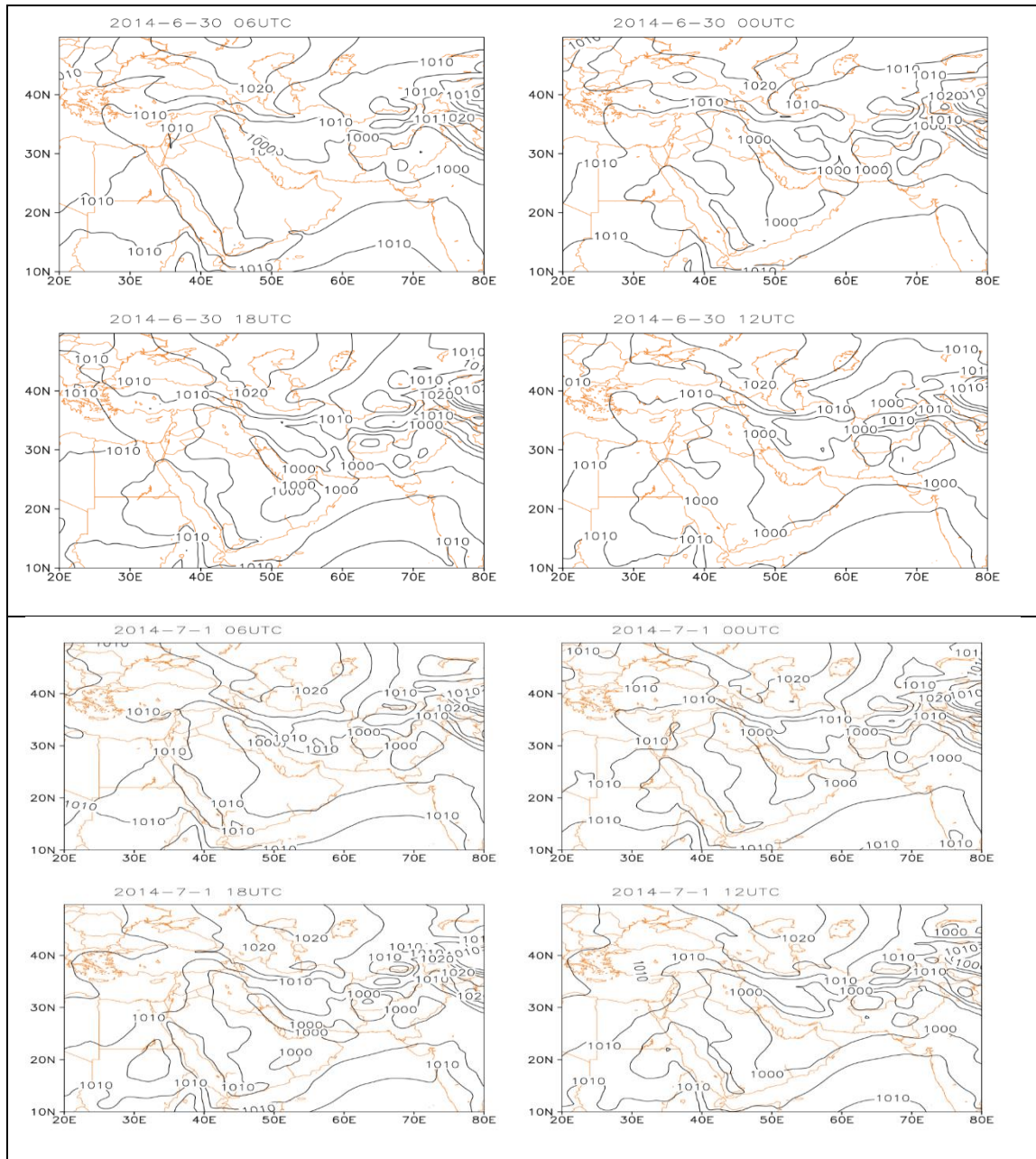
⁸ - Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

¹ - Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2

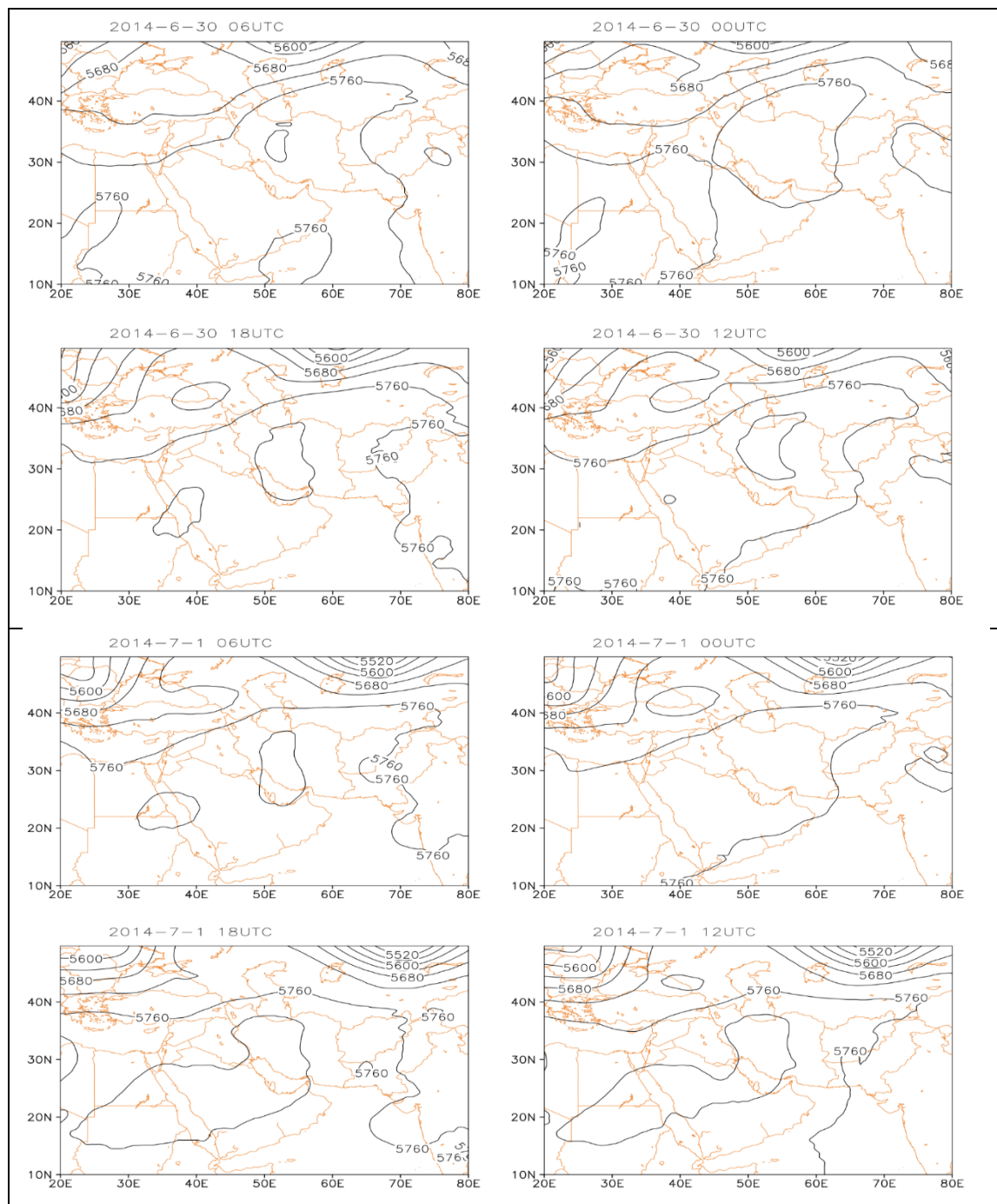
² - NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)

³ - Global Statistical Interpolation

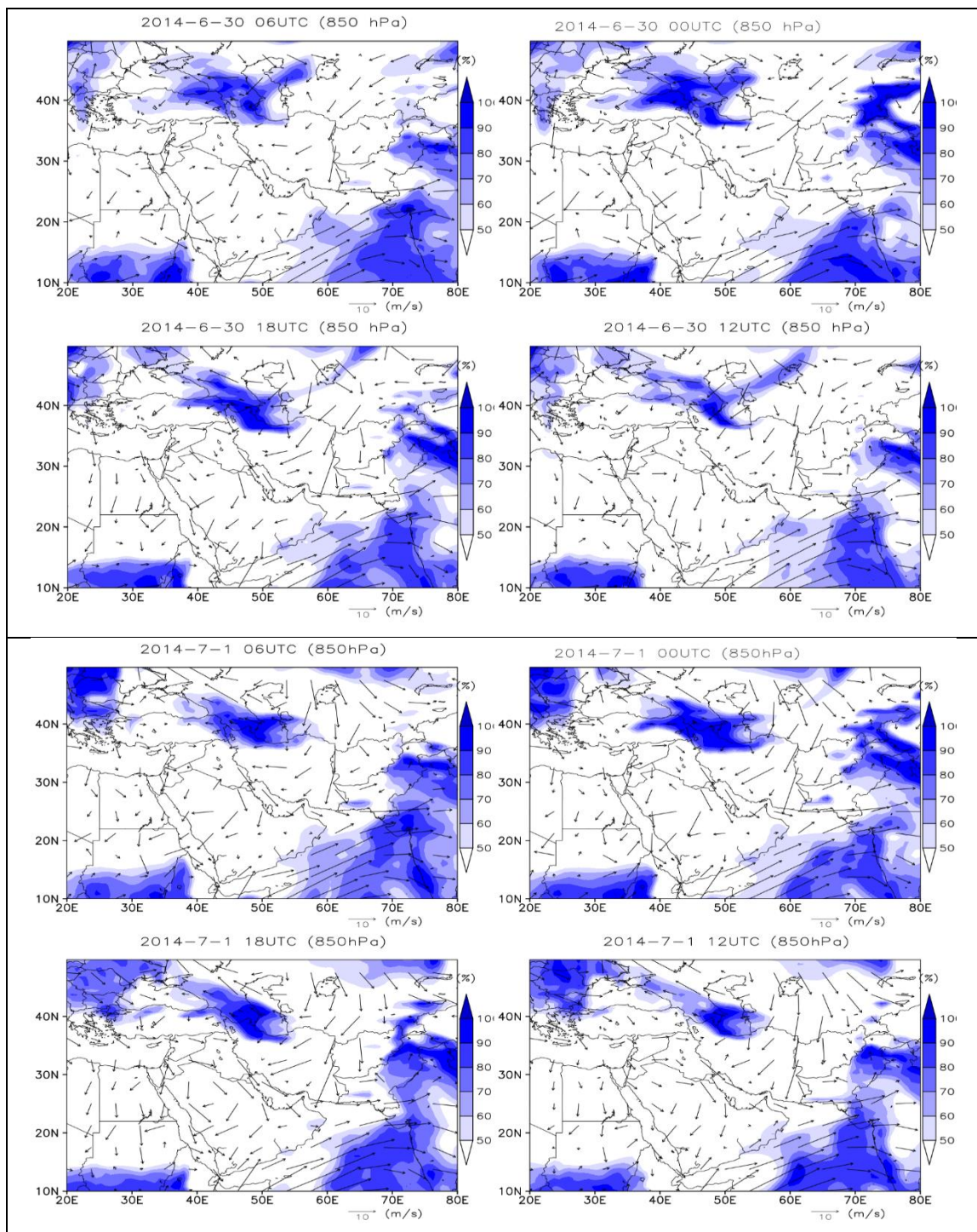
⁴ - Advanced Very High-Resolution Radiometer



شکل ۳- الگوی فشار سطح دریا بر حسب هکتوپاسکال، در روز ۲۰۱۴/۷/۱ و ۲۰۱۴/۶/۳۰



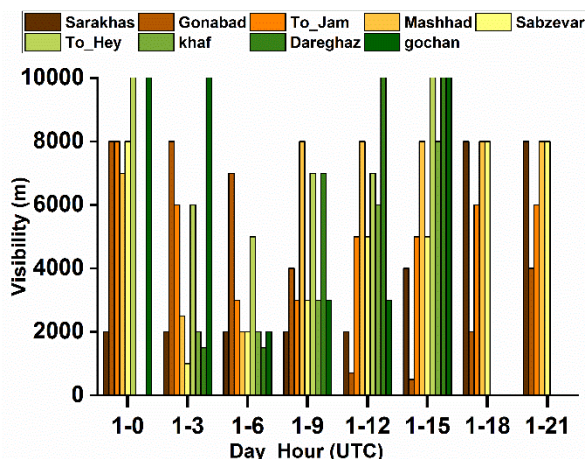
شکل ۴- الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوپتانسیل متر، در روز ۲۰۱۴/۷/۱ و ۲۰۱۴/۶/۳۰



شکل ۵- الگوی فرارفت رطوبت در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، در روز ۲۰۱۴/۶/۳۰ و ۲۰۱۴/۷/۱

ساعت ۰۳ UTC تا ۱۲ UTC بوده است. قوچان، درگز، خواف نیز دید افقی کمتر از ۳۰۰۰ متر داشته اند اما مدت زمان وقوع آن نسبت به دیگر شهرها کمتر بوده است. شدیدترین و طولانی ترین گردوخاک در گناباد ثبت شده است.

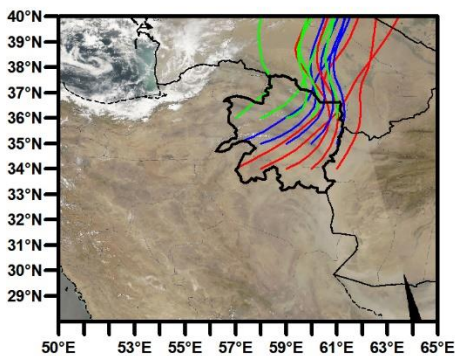
کاهش دید افقی در سرخس، گناباد، تربت جام، مشهد، سبزوار، تربت حیدریه، خواف، درگز و قوچان گزارش شده است (شکل ۶). در گناباد و سبزوار تا کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده و بیشترین شدت گردوخاک در روز اول ژوئیه در فاصله زمانی



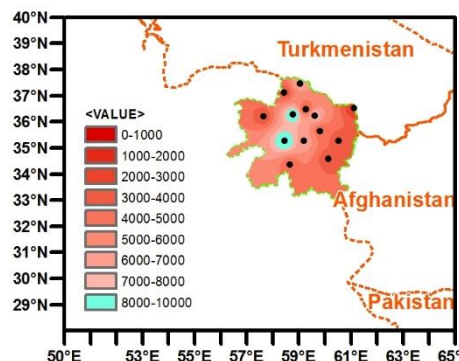
شکل ۶- تغییرات دید افقی (بر حسب متر) مشاهداتی در برخی ایستگاه‌های استان خراسان رضوی، اول ژوئیه سال ۲۰۱۴

گردوخاک رقیق تصویر ماهواره هماهنگی ندارد. ردیابی مسیر پس گردی توسط مدل HYSPLIT بر روی تصویر ماهواره منشا گردوخاک را ترکمنستان نشان می‌دهد که در راستای شمالی - جنوبی به سمت استان خراسان رضوی انتقال یافته است نتیجه حاصل با نتیجه فاروقی و همکاران (۱۳۹۶) هم‌خوانی دارد که بیابان‌های ترکمنستان را منشا گردوخاک‌های خراسان شمالی می‌دانند.

در پهنه‌بندی دید افقی در ساعت ۰۹ UTC روز اول ژوئیه، بخش شرقی و غربی استان شدت کاهش دید بیشتر بوده و بخش‌های مرکزی مانند کاشمر و نیشابور گردوخاک گزارش نشده است (شکل ۷). بنابراین تقریباً تمامی ایستگاه‌ها به جز ۲ مورد، دستخوش کاهش دید افقی شده‌اند. در تصویر ماهواره در مرزی شرقی ایران توده گردوخاک غلیظی مشاهده می‌شود (شکل ۷ب) که با محدوده کاهش دید افقی هماهنگ است اما کاهش دید افقی در بخش‌های غربی استان با



ب



الف

شکل ۷- الف) پهنه‌بندی دید افقی در ساعت ۰۹ UTC، ب) تصویر سنجنده مودیس و مسیر پس‌گردی مدل HYSPLIT در روز اول ژوئیه سال ۲۰۱۴

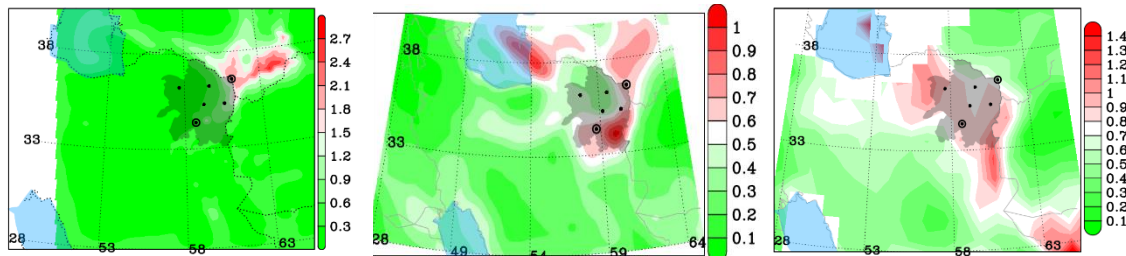
AOT_{Me} نیز در جنوب شرق استان با مقدار ۰/۸ قرار داشته و دیگر مناطق غربی و شرقی مقدار کمتر دارند. اما بخش شمالی مقدار کمتر از ۰/۴ دارد (شکل ۸ب). هر دو AOT_{Me} و AOT_{Aq} هماهنگ هستند. برون داد مدل RegCM بیشینه AOD را در مرز شرقی استان برآورد نموده است (شکل ۸پ) و با AOT_{Aq} و AOT_{Me} هماهنگ است اما گردوخاک در غرب استان در برون داد مدل دیده

برونداد مدل

در ابتدا توزیع افقی AOD مقایسه می‌شود. در ۱ ژوئیه ۲۰۱۴ AOT_{Aq} با مقدار ۰/۶ تقریباً تمامی مناطق استان را به جز مناطق مرکزی دربر گرفته است (شکل ۸الف). کمترین مقدار آن در بخش‌های شمالی استان قرار دارد. الگوی آن با توزیع دید افقی تقریباً هماهنگ است (شکل ۷الف). بیشینه

ترکمستان نشان می‌دهد (شکل ۷پ) که می‌توان آن را منشأ شکل‌گیری گردوخاک دانست. با توجه به شکل ۷ب و نتیجه فاروقی و همکاران (۱۳۹۶) هماهنگی دارد.

نمی‌شود. مدل RegCM انتقال جنوب غربی گردوخاک همراه با میدان باد را به خوبی برآورد نموده است (شکل ۸پ و شکل ۳). مدل RegCM بیشینه AOD را بر روی

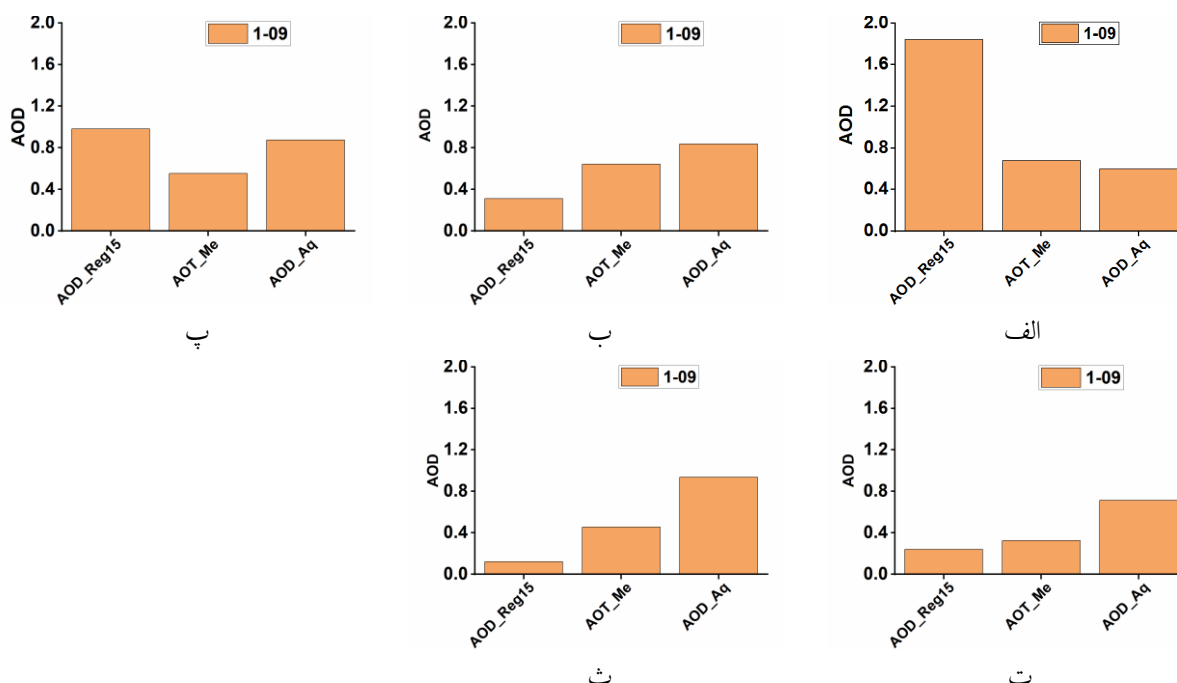


شکل ۸- توزیع افقی الف) عمق نوری هواویزها ماهواره آکوا، ب) ضخامت نوری هواویزها Merra-2، پ) غلظت نوری هواویزها مدل RegCM4 در روز اول ژوئیه سال ۲۰۱۴

کمتر است (شکل ۹ب). در تربت جام برآورد مدل بیش تقریباً مشابه AOD_Aq بوده و از AOT_Merra بیشتر است (شکل ۹پ).

در مشهد پیش‌بینی مدل نسبت به AOD_Aq و AOT_Me کمتر است (شکل ۹ت). در سبزوار نیز این شرایط مشاهده شده و کم برآورد مدل نسبت به AOD_Aq بسیار زیاد و حدود ۰/۹ است (شکل ۹ث).

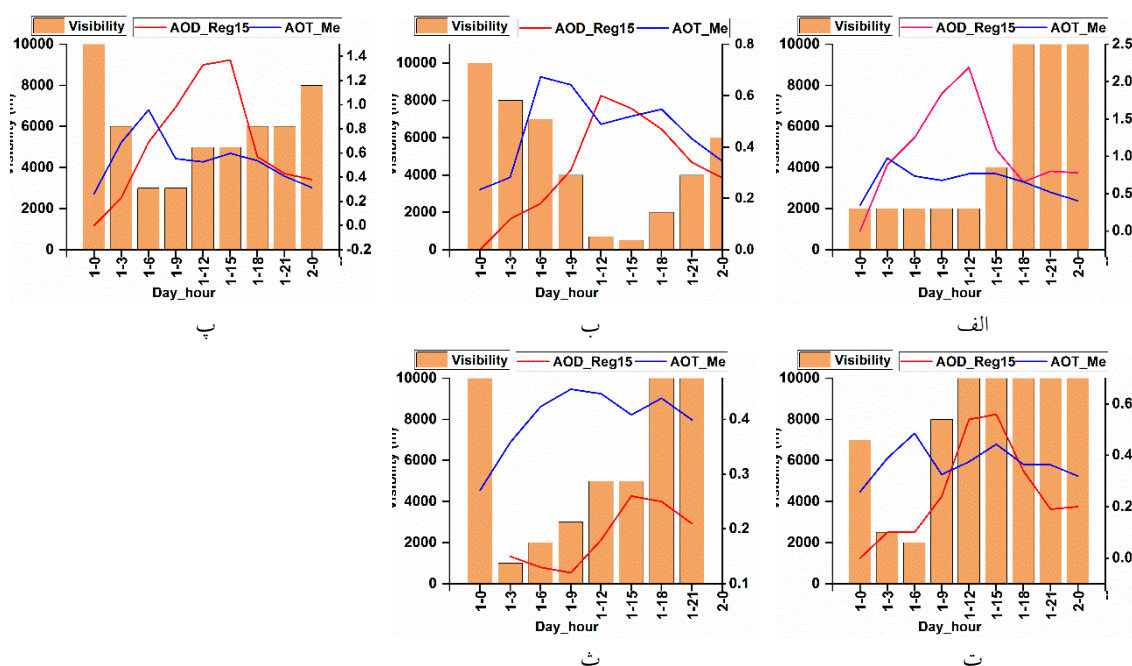
در ادامه مقایسه مقدار عددی عمق نوری هواویزها در ساعت ۰۹ UTC روز اول ژوئیه در برخی ایستگاه‌های استان انجام می‌شود. در سرخس، AOT_Me هم‌مقدار AOD_Aq بوده اما مدل RegCM4 به طور قابل توجهی AOD بیشتری را برآورد نموده است (شکل ۹الف). در گناباد مقدار AOT_Me اندکی با AOD_Aq تفاوت دارد، اما شبیه‌سازی RegCM4 نسبت به آن دو به طور قابل توجهی



شکل ۹- مقایسه AOD ماهواره آکوا، Merra-2 و RegCM_15، روز اول ژوئیه ۲۰۱۴، الف) سرخس، ب) گناباد، پ) تربت جام، ت) مشهد و ث) سبزوار

گردو خاک از ساعت‌های اولیه روز ۱ ژوئیه آغاز شده است. اما با انتقال جنوب سوی گردو خاک در میانه روز به گناباد رسیده است. روند تغییرات زمانی AOD_Re و AOT_Me با تغییرات دید افقی در سرخس، تربت جام و گناباد تقریباً هماهنگ است. در حالی که در مشهد و سبزوار تاخیر زمانی ۹ ساعته در برآورد پیشینه AOD توسط مدل RegCM دیده می‌شود. در این دو شهر داده‌های Merra با تغییرات دید افقی تقریباً هماهنگ است.

به این ترتیب مدل RegCM4 در غلظت نوری هواویزها را در سرخس و تربت جام در شرق استان بیش از ماهواره و در گناباد، مشهد و سبزوار (مناطق مرکزی استان) کمتر برآورد می‌نماید. همچنین عمق نوری هواویزها در ماهوار آکوا در برخی ایستگاه بیش‌تر و در برخی دیگر کمتر از Merra ثبت شده است (شکل ۹).
در ادامه روند تغییرات ساعتی دید افقی و عمق نوری هواویزها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در اول ژوئیه در شکل ۱۰ الف تا ت نمایش داده شده است. در سرخس، سبزوار و مشهد



شکل ۱۰- روند تغییرات سه ساعته دید افقی، AOD حاصل از مدل AOT_RegCM_15 حاصل از مدل Merra-2، اول ژوئیه ۲۰۱۴ (الف) سرخس، (ب) گناباد، (پ) تربت جام، (ت) مشهد و (ث) سبزوار

به طوری که در گناباد ۰/۹۸- می باشد. گناباد طولانی‌ترین دوره زمانی گردو خاک و بیشترین کاهش دید افقی را در بین ایستگاه‌های استان داشته است. برون داد مدل در این ایستگاه بهترین نتیجه را نیز نشان می‌دهد.

ضریب همبستگی دید افقی با برون داد مدل و Merra-2 در جدول ۳ آورده شده است. دید افقی در سه شهر سرخس، تربت جام و گناباد که در شرق و جنوب استان خراسان رضوی واقع شده‌اند، با خروجی مدل همبستگی خوبی داشته است

جدول ۳- ضریب همبستگی دید افقی و AOD_Re و AOT_Me

AOT_Me	AOD_Re	شهر
-۰/۴۵	-۰/۶۱	سرخس
-۰/۷۸	-۰/۶۶	تربت جام
-۰/۲۹	-۰/۹۸	گناباد

نتیجه گیری

در ۱ ژوئیه ۲۰۱۴ گردوخاکی بیشتر مناطق خراسان رضوی را تحت تاثیر قرار داده به طوری که در گناباد دید افقی به کمتر از ۵۰۰ متر کاهش یافت. نتیجه حاصل از تحلیل همدیدی علت شکل گیری گردوخاک را در سطح دریا توسعه کم فشار حرارتی بر روی پاکستان و هسته پرفشار در شمال افغانستان و در نتیجه وجود شیو فشاری قابل توجه بر منطقه که نتیجه این الگو، شکل گیری بادهای شمال و شمال شرقی با بیشینه سرعت ۲۰ متر بر ثانیه شده است. این الگو در تراز ۵۰۰ هکتو پاسکال با نفوذ زیانه سی ناوه مستقر بر کشورهای همسایه شرقی ایران، بر روی افغانستان و ایران همراه است. در بررسی برون داد مدل HYSPLIT مسیر بازگشتی با میدان باد هماهنگی داشته و توسط آن می توان منشأ گردوخاک را بیابان های ترکمنستان و غرب افغانستان تعیین نمود.

در بررسی مدل RegCM4 پهنه بندی افقی و همچنین مقایسه مقدار و سری زمانی عمق نوری هواویزها انجام شد. در مقایسه سی پهنه بندی و اندازه عمق نوری هواویزها باید به این نکته دقت نمود که فقط یک ساعت مورد قیاس قرار گرفته است.

در پهنه بندی افقی، نتایج به دست آمده از مدل RegCM4 و AOD_Aq، تصویر مرئی گردوخاک و AOT_Me در ایستگاه های شرقی هماهنگی خوبی دارند. اما در ایستگاه های مرکزی و غرب استان مدل RegCM گردوخاک را بر آورد ننموده است. تسی کرتکیس و همکاران (Tsikerdekis et al., 2016) نیز در مورد عمق نوری هواویزها در گینه نتیجه مشابهی به دست آورده اند.

در مقایسه مقدار عمق نوری هواویزها می توان مشاهده نمود که در برخی ایستگاه های مقدار حاصل از مدل RegCM4 بیش تر و در برخی دیگر کمتر از AOD_Aq و AOD_Me می باشد. در نتایج پیشین نیز در جنوب آفریقا و مدیترانه AOD مدل نسبت به ماهواره تقریباً هماهنگ به دست آمده (Tsfaye et al., 2013) اما در شمال آفریقا و جنوب اروپا کمتر بر آورد شده است (Nabat et al., 2012; Santese et al., 2009).

نتیجه حاصل از مقایسه سری زمانی نشان داد که در ایستگاه های شرق و جنوب استان برون داد مدل در بازه های زمانی سه ساعته با تغییرات افقی هماهنگی خوبی دارد. به

طوری که ضریب همبستگی بین آن دو در گناباد ۰/۹۸-، تربت جام ۰/۶۶- و سرخس ۰/۶۱- به دست آمد. اما در ایستگاه های مرکزی و غرب مدل RegCM گردوخاک را با تاخیر زمانی ۹ ساعته بر آورد می نماید.

به طور کلی باتوجه به این که مدل RegCM مدلی اقلیمی است در مواردی که دوره زمانی گردوخاک کوتاه و کمتر از ۱۲ ساعت باشد، بر آورد خوبی از گردوخاک نخواهد داشت. بهترین نتیجه مدل در گردوخاک های شدید که دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ رسیده باشد و همچنین مدت زمان وقوع آن یک روز باشد، نتیجه بسیار خوبی به دست می دهد. همچنین ساختار کوهساری پیچیده منطقه از جمله دیگر دلیل های عدم کارایی مدل در برخی مناطق مرکزی استان است زیرا کاربرد مدل RegCM در شرق آسیا نشان داد که به دلیل ساختار کوهساری پیچیده، کاربر زمین، ویژگی های سطحی مانند پوشش برفی و بازخوردهای حاصل از گردوخاک، بر آورد آن دشوار است. (Zhung et al., 2008 and 2009)

از دلایل دیگر می توان به این مورد اشاره نمود که AOD لزوماً نشان دهنده گردوخاک نبوده و معرف آن است که در نتیجه احتمال دارد بین توزیع AOD حاصل از ماهواره و برون داد مدل هماهنگی دیده نشود. به این معنا که هواویزهای دیگری در جو نیز در تغییر مقدار AOD مؤثر هستند. همان طور که پیش تر مطرح شد بر اساس (Aloysius et al., 2009; Song et al., 2009) هواویزها از منابع مختلفی شامل کارخانه ها، دود ناشی از آتش سوزی، گردوخاک ناشی از توفان های گردوخاک، نمک دریا، خاکستر آتش فشان و دود تولید می شوند. همچنین عوامل دیگری از جمله فاصله از منشأ گردوخاک، فاصله از مراکز صنعتی، نوع فعالیت های صنعتی، آلودگی های محیطی و صنعتی، فاصله از منابع آبی (نمک دریا)، توپوگرافی، مسیر حرکت توده های هوا، ویژگی های اقلیمی منطقه و شهری در توزیع افقی و غلظت آن ها تأثیر گذار هستند. فعالیت های انسانی به ویژه در مناطق پرجمعیت و یا صنعتی و همچنین سوختن ذخیره فسیلی عامل مهمی در افزایش غلظت هواویزها می باشند.

همچنین از دیگر علت های عدم هماهنگی آن دو می توان به مقدار AOD_Aq به دست آمده از ماهواره آکوا اشاره نمود. AOD_Aq توسط الگوریتم بر آورد می شود، وجود عوامل دیگر که پیش تر شرح آن داده شد، در افزایش AOD حاصل

سه ساعته دید افقی مقایسه نمود اما گسترش جنوب سوی گردوخاک را در این رویداد به خوبی نشان ندادند.

حمایت های مالی

مقاله حاضر از طرح پژوهشی " شناسایی چشمه های گردوغبار استان خراسان رضوی با استفاده از اجرای مدل RegCM پیوند خورده با طرحواره غبار و سنجش از دور " استخراج شده است. این طرح با حمایت مالی اداره هواشناسی استان خراسان رضوی تهیه شده است.

از الگوریتم مؤثر باشند. با مقایسه تصویر مرئی و توزیع افقی AOD_Aq این تفاوت مشاهده می‌شود. علاوه بر آن از دیگر علت‌های عدم هماهنگی بین مدل و داده‌های مشاهداتی ، تفکیک پذیری متفاوت آن‌هاست به طوری که داده آکوا یک درجه (۱۱۱ کیلومتر) بوده و تفکیک پذیری مدل RegCM 30 کیلومتر تعیین شده است. همچنین در توزیع افقی دید افقی ترسیمی، فاصله مکانی بین ایستگاه‌های همدیدی متغیر بوده و یکسان نیست که ممکن است یکی از دلایل عدم هماهنگی برون داد مدل و دیدافقی مشاهداتی باشد .

از جمله ویژگی‌های مثبت داده‌های MERRA-2 آن است که به طور ساعتی در دسترس بوده و می‌توان آن‌ها را با تغییرات

منابع

1. Abed, N. M., Al-Jiboori, M. H., & Wahab, M. M. A. (2019). "Study of the Synoptic Characteristics of a Severe Dust Storm over Iraq Using Regional Climate Model 4 ". Diyala Journal For Pure Science, 15(04), 1-14.
2. Abiodun, B. J., Pal, J. S., Afiesimama, E. A., Gutowski, W. J., & Adedoyin, A. (2008). "Simulation of West African monsoon using RegCM3 Part II: impacts of deforestation and desertification ". Theoretical and Applied Climatology, 93(3-4), 245-261.
3. Agacayak, T., Kindap, T., Unal, A., Mallet, M., Pozzoli, L., Karaca, M., & Solmon, F. (2012, April). " Impact of Dust on Air Quality and Radiative Forcing: AN Episodic Study for the Megacity Istanbul Using RegCM4. 1". In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 14, p. 4479).
4. Aloysius, M., Mohan, M., Suresh Babu, S., Parameswaran, K., & Krishna Moorthy, K. (2009, June). "Validation of MODIS derived aerosol optical depth and an investigation on aerosol transport over the South East Arabian Sea during ARMEX-II". In Annales Geophysicae (Vol. 27, No. 6, pp. 2285-2296). Copernicus GmbH
5. Das, S., Dey, S., Dash, S. K., & Basil, G. (2013). "Examining mineral dust transport over the Indian subcontinent using the regional climate model, RegCM4. 1". Atmospheric research, 134, 64-76
6. Diro, G. T., Rauscher, S. A., Giorgi, F., & Tompkins, A. M. (2012). "Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over Central America to land and sea surface schemes in RegCM4". Climate Research, 52, 31-48
7. Draxler, R.R. and HYSPLIT4 user's guide, 1999. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230. Silver Spring, MD: NOAA Air Resources Laboratory.
8. Farooghi, Ayda, Kazemi, Mona , Jalali , Mojtaba, Hashemiyan , Saeideh, Nosraty, Nader, "Evaluation of the RegCM4 model coupled with Dust module on Identification of dust storm features over the North Khorasan", Nivar, 2016, pp.23.
9. Grell, G. A., Dudhia, J., & Stauffer, D. R. (1994). "A description of the fifth-generation

- Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) ". NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research, Boulder.
10. Giorgi, F., et al., (2012). "RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains", *Climate Research*, 52: 7-29.
 11. Guo, J. P., Zhang, X. Y., Che, H. Z., Gong, S. L., An, X., Cao, C. X., ... & Xue, M. (2009). Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China. *Atmospheric Environment*, 43(37), 5876-5886.
 12. Gupta, P., & Christopher, S. A. (2008). "Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(12), 3311-3324.
 13. Hamidianpour M, Mofidi A, Saligheh M, Alijani B. "The role of topography on the simulation of Sistan wind structure in the east of Iranian Plateau", *researches in Geographical Sciences*. 2016; 16 (43) :25-53.
 14. Hasani, Samira, Mofidi, Abbas, Zarrin, Azar, " Investigation of north wind role in dust rising by RegCM model ", *Meteorology national conference, Yazd*, 2015.
 15. Koster, R. D., McCarty, W., Coy, L., Gelaro, R., Huang, A., Merkova, D., ... & Wargan, K. (2016). *MERRA-2 input observations: Summary and assessment*
 16. Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system.
 17. Li, L., & Sokolik, I. (2018). "Analysis of Dust Aerosol Retrievals Using Satellite Data in Central Asia".
 18. Mallet, M., Solmon, F., Roblou, L., Peers, F., Turquety, S., Waquet, F., & Torres, O. (2017). "Simulation of optical properties and direct and indirect radiative effects of smoke aerosols over marine stratocumulus clouds during summer 2008 in California with the regional climate model RegCM". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(19), 10-312.
 19. Marcella, M. P., & Eltahir, E. A. (2008). "Modeling the hydroclimatology of Kuwait: The role of subcloud evaporation in semiarid climates". *Journal of Climate*, 21(12), 2976-2989.
 20. Marcella, M. P., & Eltahir, E. A. B. (2010). "Effects of mineral aerosols on the summertime climate of southwest Asia: Incorporating subgrid variability in a dust emission scheme". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18).
 21. Marcella, M. P., & Eltahir, E. A. (2012). "Modeling the summertime climate of Southwest Asia: The role of land surface processes in shaping the climate of semiarid regions". *Journal of Climate*, 25(2), 704-719.
 22. Mofidi, Abbas, Kamali, Somayeh, " Investigation of the structure of dust storms in Sistan plain using RegCM4 regional scale climate model: A case study in July 2014 ", *Meteorology conference, (2012), Karaj, Iran*.
 23. Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., & Bacmeister, J. (2014). "Development of the GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Evolution from MERRA to MERRA2".
 24. Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., Bacmeister, J., Song, I. S., & Eichmann, A. (2012). " The GEOS-5 atmospheric general circulation

- model: Mean climate and development from MERRA to Fortuna".
25. Myhre, G., et al. 2005. "Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over ocean during the period September 1997 to December 2000". *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1697–1719
 26. Nabat, P., Solmon, F., Mallet, M., Kok, J. F., & Somot, S. (2012). "Dust emission size distribution impact on aerosol budget and radiative forcing over the Mediterranean region: a regional climate model approach". *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 12(7).
 27. N'Datchoh, E. T., Diallo, I., Konaré, A., Silué, S., Ogunjobi, K. O., Diedhiou, A., & Doumbia, M. (2018). "Dust induced changes on the West African summer monsoon features". *International Journal of Climatology*, 38(1), 452-466.
 28. Ogren, J. A. (1995). "A systematic approach to in situ observations of aerosol properties". *Aerosol forcing of climate*, 215-226.
 29. Pal, J.S., et al., (2007). *Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 1395–1409.
 30. Sun, H., & Liu, X. (2016). "Numerical modeling of topography-modulated dust aerosol distribution and its influence on the onset of East Asian summer monsoon". *Advances in Meteorology*, 2016.
 31. Solmon, F., Nair, V. S., & Mallet, M. (2015). "Increasing Arabian dust activity and the Indian summer monsoon". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8051.
 32. Salon, S., Cossarini, G., Libralato, S., Gao, X., Solidoro, C., & Giorgi, F. (2008). "Downscaling experiment for the Venice lagoon. I. Validation of the present-day precipitation climatology". *Climate Research*, 38(1), 31-41.
 33. Santese, M., Perrone, M. R., Zakey, A. S., De Tomasi, F., & Giorgi, F. (2009). "Modeling of Saharan dust outbreaks over the Mediterranean by RegCM3: case studies". *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9(5), 19387-19433.
 34. Song, C. K., Ho, C. H., Park, R. J., Choi, Y. S., Kim, J., Gong, D. Y., & Lee, Y. B. (2009). "Spatial and seasonal variations of surface PM10 concentration and MODIS aerosol optical depth over China". *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45(1), 33-43.
 35. Tesfaye, M., Botai, J., Sivakumar, V., & Mengistu Tsidu, G. (2013). "Evaluation of regional climatic model simulated aerosol optical properties over South Africa using ground-based and satellite observations". *ISRN Atmospheric Sciences*, 2013.
 36. Tsikerdekis, A., Zanis, P., Steiner, L. A., Amiridis, V., Marinou, E., Katragkou, E., & Solmon, F. (2016). "Modeling the trans-Atlantic transportation of Saharan dust". *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50(2), 1052-1061.
 37. Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). "Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM2.5 mass: Implications for air quality studies". *Geophysical research letters*, 30(21).
 38. Wu, W. S., Purser, R. J., & Parrish, D. F. (2002). "Three-dimensional variational

- analysis with spatially inhomogeneous covariances". *Monthly Weather Review*, 130(12), 2905-2916.
39. Zakey, A. S., Solmon, F., & Giorgi, F. (2006). "Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model".
40. Zhang, D. F., Zakey, A. S., Gao, X. J., & Giorgi, F. (2008). "Simulation of dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model".
41. Zhang, D. F., Zakey, A. S., Gao, X. J., Giorgi, F., & Solmon, F. (2009). "Simulation of dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(4), 1095-1110.
<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
42. Zhang, D. F., Gao, X. J., Zakey, A., & Giorgi, F. (2016). "Effects of climate changes on dust aerosol over East Asia from RegCM3". *Advances in Climate Change Research*, 7(3), 145-153.