

## بررسی توانایی مدل RegCM در شبیه‌سازی گردوخاک تابستانی خراسان بزرگ

دریافت مقاله: ۹۸/۹/۲۴ پذیرش نهایی: ۹۹/۲/۶

صفحات: ۳۹-۵۹

الهام مبارک حسن: گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران<sup>۱</sup>

Email: Mobarak\_e@yahoo.com

ابراهیم فتاحی: پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران

Email: ebfat2002@yahoo.com

عباس رنجبر سعادت آبادی: پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران

Email: aranjbar@gmail.com

نسیم حمزه حسینی: پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران

Email: nasim\_hh@yahoo.com

### چکیده

استان خراسان بزرگ واقع در شمال شرق ایران ساختار سطحی متنوعی با دشت‌ها و قله‌های متعدد دارد اما به دلیل مجاورت با بیابان‌های افغانستان و ترکمنستان در همه اوقات سال به‌ویژه تابستان تحت تأثیر گردوخاک قرار می‌گیرد. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی گردوخاک‌های تابستانی توسط مدل RegCM است. به این منظور در طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ سه رویداد گردوخاک شدید و فراگیر انتخاب شدند. وجود گردوخاک با تصویر ماهواره تأیید و سپس ساختار همدیدی تحلیل شد. در انتها نیز نتیجه شبیه‌سازی مدل RegCM4.6 با داده‌های مشاهداتی دید افقی و عمق نوری اپتیکی هواویز AOD ماهواره آوا مقایسه شد. نتیجه بررسی همدیدی نشان می‌دهد که در فصل تابستان کم‌فشار حرارتی در جنوب و پرفشار در شمال افغانستان شکل می‌گیرد که منجر به توسعه بادهای شمال و شمال شرقی با سرعت ۱۲ تا ۲۱ متر بر ثانیه در مرز شرقی ایران و غرب افغانستان شده و گردوخاک در این مناطق انتشار می‌یابد. بررسی برون داد مدل RegCM با دید افقی و AOD حاصل از ماهواره آکوا نشان می‌دهد که عمل کرد مدل در خراسان جنوبی بهتر از خراسان رضوی است. بیشترین ضریب همبستگی AOD مدل و دید افقی در ایستگاه‌های مرکزی خراسان شامل گناباد، فردوس، نهبندان و قائن به ترتیب با  $-0.82$ ،  $-0.77$  و  $-0.44$  در ۱ جولای ۲۰۱۴ به دست آمد. مدل RegCM در گردوخاک‌های شدید با کاهش دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر، تداوم و گسترش افقی زیاد نتیجه بهتری از شبیه‌سازی گردوخاک به دست می‌دهد. به‌طور کلی مدل RegCM از نظر مقدار AOD را کمتر از الگوریتم ماهواره آکوا برآورد می‌نماید.

کلید واژگان: خراسان بزرگ، گردوخاک، مدل RegCM، عمق نوری هواویز AOD.

۱ نویسنده مسئول: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، ۰۹۱۲۳۶۱۳۹۷۷

## مقدمه

یکی از مدل‌های عددی-دینامیکی اقلیمی که در طی سال‌های اخیر توسعه یافته و کاربران بسیاری از آن استفاده می‌نمایند مدل RegCM می‌باشد. با کاربست مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای<sup>۲</sup>، ریزمقیاس نمایی دینامیکی به منظور مطالعه فرایندهای جوی و اقلیمی انجام می‌شود (گیورگی و همکاران، ۲۰۱۲؛ آبی‌دون و همکاران، ۲۰۰۸؛ سایلا و همکاران، ۲۰۱۰؛ مارسلا و الطاهیر، ۲۰۰۸). به کارگیری مدل RegCM با در گردوخاک با دیدگاه‌های مختلفی از جمله نقش شرایط سطحی و ساختار کوهساری، حساسیت سنجی مدل به تفکیک مکانی افقی، گسترش عمودی و منشأ یابی، شار سطح انجام می‌شود. همچنین اثر گردوخاک بر تغییر اقلیم و ترازمندی انرژی تابشی جو تحقیق شده است. (سالمون و همکاران، ۲۰۱۵، پال و همکاران، ۲۰۰۷؛ دیرو و همکاران، ۲۰۱۲؛ زکی و همکاران، ۲۰۰۶، سالون، ۲۰۰۸؛ کونارو همکاران، ۲۰۰۸؛ مارسلا و الطاهیر، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۰). این مدل برآورد قابل قبولی در آسیا، آفریقا و جنوب آمریکا داشته و ابزار مفیدی برای مطالعه‌های اقلیمی است (پال و همکاران، ۲۰۰۷). اگرچه در مناطق مرکزی آمریکا دما را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد نموده است (دیرو و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده از مدل RegCM در شبیه‌سازی مانسون آفریقا نشان داد که مدل میانگین بارش در منطقه را برآورد نموده و در بارش‌های حدی نیز عمل کرد مناسبی دارد (آفیسیماما و همکاران، ۲۰۰۶). برهم‌کنش ساختار سطحی به‌ویژه ساختار کوهساری با عوامل جوی یکی از مهم‌ترین بخش‌های ریزمقیاس نمایی است. مدل RegCM با تفکیک‌پذیری مکانی کم‌تر<sup>۳</sup> در آشکارسازی روزانه ابر و مشخصه‌های آن دقت کافی ندارد (مالت و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر پدیده‌های ذکر شده، توانایی مدل RegCM پیوند خورده با طرحواره گردوخاک در شبیه‌سازی توفان‌های گردوخاک تحقیق شده است. زکی و همکاران (۲۰۰۶) توانایی مدل RegCM در بررسی اثر گردوخاک صحرا<sup>۴</sup> در اقلیم آفریقا و اروپا را تأیید می‌نمایند. کاربرد بلندت مدل RegCM نشان می‌دهد که گرمایش جهانی به افزایش انتشار گردوخاک خواهد شد. همچنین گردوخاک در ستون هوا در شرق آسیا خواهد شد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶). نداچو و همکاران (۲۰۱۸) در شبیه‌سازی گردوخاک توسط مدل RegCM به بررسی اثر اقلیمی گردوخاک پرداخته و نشان دادند که حضور گردوخاک بر ساختار دما و سرعت و جهت باد در ترازهای مختلف تأثیر دارد. در منطقه جورجیا اثر مستقیم گردوخاک، منجر به افزایش دما در تمام ماه‌های سال می‌شود (داویتاشویلی و همکاران، ۲۰۱۸). عابد و همکاران (۲۰۱۹) بر اساس مقدار گردوخاک به‌دست‌آمده توسط مدل RegCM، گردوخاک‌های عراق را دسته‌بندی نمودند. بررسی بلندمدت اقلیمی نشان می‌دهد توزیع AOD<sup>۵</sup> حاصل از مدل‌ها و ماهواره هماهنگ بوده اما مقدار عددی AOD حاصل از مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی ماهواره کمتر است (مالت و همکاران، ۲۰۱۷). تسی کرتکیس و همکاران (۲۰۱۶) گردوخاک در منطقه صحرای آفریقا توسط مدل RegCM شبیه‌سازی نموده و نتیجه نشان داد که مدل عمق نوری هواویزها را در شرق منطقه بیش‌تر و در خلیج گینه کمتر برآورد می‌کند.

<sup>۲</sup> Regional climate model

<sup>۳</sup> Coarse horizontal

<sup>۴</sup> Saharan

<sup>۵</sup> Aerosol Optical Depth

مدل RegCM برآورد خوبی از عمق نوری هواویزها در جنوب آفریقا دارد (تسغای و همکاران، ۲۰۱۳). نتیجه حاصل از مدل RegCM در منطقه مدیترانه الگوی تقریباً هماهنگی با AOD دارد اما در شمال آفریقا مقدار AOD را کمتر برآورد می‌نماید (نبات و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه دیگر نیز به برآورد خوب مدل (AOD) در مدیترانه نشان داده شده است اما در جنوب اروپا در برخی ایستگاه‌ها کم برآورد و در برخی دیگر بیش برآورد به دست آمده است (سانترو همکاران، ۲۰۰۹). کاربرد مدل RegCM در شرق آسیا نشان داد که به دلیل ساختار کوهساری پیچیده، کاربر زمین و ویژگی‌های پوشش برف در منطقه، برآورد گردوخاک دشوار است (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹). در جنوب غرب آسیا نیز به اثر ریزمقیاس نمایی باد و شرایط مرزی اولیه در بهبود شبیه‌سازی گردوخاک اشاره نمود (مارسلا والطاهیر ۲۰۱۲، ۲۰۱۰). در تفکیک‌پذیری بالاتر<sup>۶</sup> (کمتر از ۵۰ کیلومتر) فرآیندهای انتشار گردوخاک<sup>۷</sup>، تراپرد<sup>۸</sup> و نهشت<sup>۹</sup> 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 دارد (آگاکایات و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین گردوخاک بر و واداشته‌ای تابشی خورشید تأثیر داشته و بخش از آن را جذب می‌نماید (آگاکایات و همکاران، ۲۰۱۲). مدل RegCM اقلیمی است، اما به‌منظور بررسی توانایی مدل RegCM در شبیه‌سازی بلندمدت و اقلیمی گردوخاک بهتر است ابتدا گردوخاک‌های موردی شبیه‌سازی شده و مشخصه‌ها آن تحلیل گردد (زکی و همکاران، ۲۰۰۶).

در سال‌های اخیر در ایران نیز مدل RegCM در ارزیابی اقلیمی و کوتاه‌مدت پدیده‌های جوی مختلف به کار گرفته شده است. از جمله مطالعه‌های بلندمدت می‌توان برآورد تبخیر تعرق پتانسیل (قهرمان و همکاران، ۱۳۹۳)، بارش و دما (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ کیخسروی، ۱۳۹۶؛ سلطان‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶؛ مدیریان و همکاران، ۱۳۸۶)، باد (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵)، موج گرمایی (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵) اشاره نمود. همچنین مطالعه‌های موردی برای تاریخ‌های ۱۲ جون ۲۰۰۶ (حسنی و همکاران، ۱۳۹۴)، ۱۳-۱۴ آوریل ۲۰۰۱ (فاروقی و همکاران، ۱۳۹۶)، ۳۰ جولای ۲۰۰۱ (مفیدی و کمالی، ۱۳۹۱)، ۱ جولای ۲۰۰۰ (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵) انجام شده است. توفان‌های گردوخاک در مناطق مختلف ایران توسط مدل RegCM شبیه‌سازی شده است. از جمله کاربردهای مدل RegCM در شناسایی ساختار شکل‌گیری گردوخاک و تعیین چشمه آن می‌باشد که توسط فاروقی و همکاران (۱۳۹۶) در شمال شرق ایران انجام شد و بیابان‌های ترکمنستان به‌عنوان منشأ شکل‌گیری گردوخاک خراسان شمالی شناخته شد. غفاریان و همکاران (۱۳۹۴) نیز به نقش بیابان‌های ترکمنستان در گردوخاک‌های کرانه‌های جنوبی دریای خزر و شمال شرق ایران اشاره نموده‌اند؛ بنابراین مدل RegCM در شناسایی چشمه گردوخاک موفق بوده است. پورهاشمی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از داده‌های ماهواره به شناسایی منشأ انتشار گردوخاک در استان خراسان رضوی پرداختند. نتیجه آن‌ها ۶۵ کانون برداشت گردوخاک شناسایی شده و بیشتر این نقاط در جنوب و شرق استان قرار دارند.

<sup>۶</sup>Higher spatial resolution

<sup>۷</sup>Dust emission processes

<sup>۸</sup>Transportation

<sup>۹</sup>Deposition

با تفکیک پذیری مختلف، نتیجه برهم کنش ساختار کوهساری و ویژگی‌های سطحی با عوامل جوی و شبیه‌سازی گردوخاک تغییر می‌نماید. نقش عوامل جغرافیایی محلی در مشخصه‌های گردوخاک در مناطقی با شرایط سطحی متفاوت بارز است. اهمیت ریزمقیاس نمایی گردوخاک و باد توسط مدل RegCM به‌ویژه در مناطقی با ساختار کوهساری مانند شمال شرق ایران و دشت سیستان توسط حسنی 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 (حسنی و همکاران، ۱۳۹۴). درحالی‌که تفکیک ۸۰ کیلومتر نتیجه نامطلوبی به دست می‌آید (حسنی و همکاران، ۱۳۹۴). ناهمواری‌های شمال شرق ایران بر دما، جهت و سرعت باد تأثیر می‌گذارند به‌طوری‌که با حذف ساختار کوهساری در مدل RegCM ساختار دما و بادهای محلی تغییر می‌نماید (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). نقش باد شمالی در انتشار گردوخاک و گسترش عمودی آن تا تراز ۹۰۰ هکتوپاسکال در دشت سیستان به کمک مدل RegCM به دست آمد (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۲، ب).

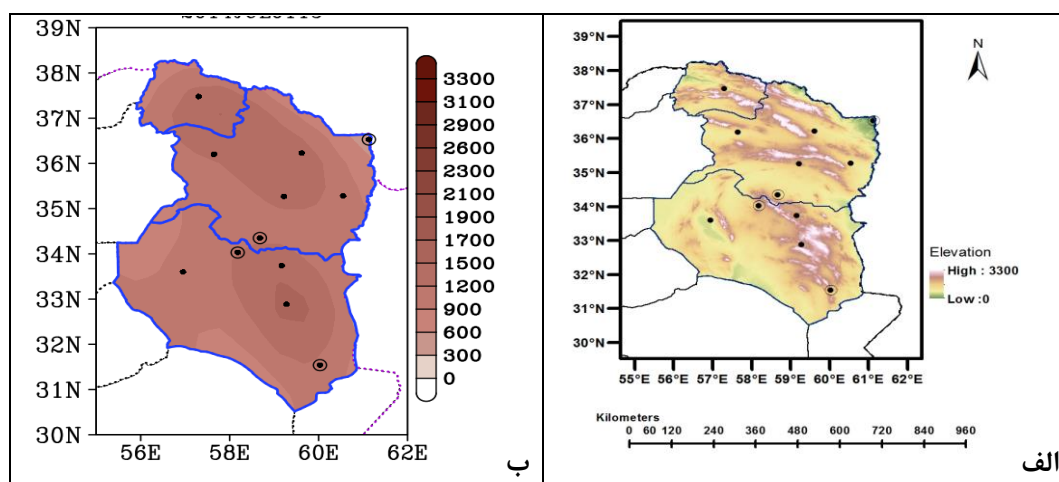
علاوه بر کاربست مدل RegCM، در برخی مطالعه سازوکار همدیدی و روند آماری بلندمدت گردوخاک در شمال شرق ایران بررسی شده است. گردوخاک‌های نیمه گرم سال در خراسان جنوبی تحت تأثیر دو الگوی همدیدی انتشار می‌یابند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). ساختار همدیدی تابستانی همراه با بادهای شمالی گردوخاک را از ترکمنستان به شرق و جنوب شرق ایران انتقال می‌دهد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). کارکن سیستانی (۱۳۹۴) به بررسی گردوخاک در استان خراسان رضوی در دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۷ پرداخته است، نتیجه تحقیق وی نشان می‌دهد که دو ایستگاه سرخس و گناباد واقع در استان خراسان رضوی بیشترین گردوخاک‌ها را تجربه می‌نمایند. بروغنی و همکاران (۱۳۹۴) نیز بیشترین تعداد وقوع گردوخاک را ایستگاه‌های خراسان رضوی در سرخس و کمترین آن را قوچان تعیین نمودند. همچنین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸، به‌عنوان کمترین و بیشترین فراوانی گردوخاک در استان خراسان رضوی شناخته شدند (بروغنی و همکاران، ۱۳۹۴).

گرچه گردوخاک در شمال شرق ایران مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است اما در بیشتر موارد عمده توجه به استان خراسان رضوی بوده و گردوخاک‌های خراسان جنوبی و شمالی به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته است. همچنین توانایی مدل RegCM در شبیه‌سازی گردوخاک این دو استان ارزیابی نشده است. درحالی‌که استان خراسان جنوبی به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه، به‌شدت از توفان‌های گردوخاک تأثیر می‌گیرد. هدف از این تحقیق بررسی دقت و توانایی مدل RegCM در شبیه‌سازی گردوخاک‌های تابستانی خراسان بزرگ شامل خراسان رضوی، خراسان شمالی و جنوبی می‌باشد. با توجه به تفاوت موقعیت جغرافیایی و ساختار کوهساری متفاوت هر سه استان، مقایسه عمل کرد مدل در برآورد گردوخاک در این مناطق اهمیت ویژه‌ای دارد. پس از اطمینان از دقت مدل RegCM در شبیه‌سازی رویدادهای گردوخاک موردی در خراسان بزرگ، این مدل می‌تواند در مقیاس زمانی طولانی‌تر نیز مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو سه رویداد گردوخاک فراگیر با ساختار همدیدی مشابه در فصل تابستان در خراسان بزرگ انتخاب شده و توسط مدل RegCM جفت شده با گردوخاک شبیه‌سازی شدند.

## روش تحقیق

## معرفی محدوده مورد مطالعه

خراسان بزرگ در شمال شرق کشور بین ۵۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته است. همچنین از شمال و شمال شرق به جمهوری ترکمنستان، از شرق به افغانستان، از غرب به استان‌های گلستان، سمنان و اصفهان و از جنوب به استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و یزد محدود است (تارنمای سازمان هواشناسی کشور). دنباله ارتفاعات البرز به سمت شرق تا ارتفاعات هندوکش افغانستان بخش‌های عمده‌ای از منطقه را در بر می‌گیرند. خراسان بزرگ ساختار کوهساری متنوعی دارد. در میان این رشته‌کوه‌های موازی، دره‌ها و دشت‌های وسیعی وجود دارد که گاه پهنای آن به حدود ۲۰۰ کیلومتر می‌رسد. وجود دشت‌های حاصل خیز و سرسبز بین دو رشته ارتفاعات موازی کپه داغ و هزار مسجد در شمال و آلا داغ و بینالود در مرکز این منطقه حائز اهمیت است (تارنمای سازمان هواشناسی کشور). خراسان بزرگ شامل سه استان خراسان شمالی، رضوی و جنوبی می‌باشد. موقعیت هر سه استان و ساختار کوهساری در شکل (۱-الف) ارائه شده است. برخی ایستگاه‌های هر استان (دایره مشکی توپر) با دوره بلند آماری انتخاب شدند شکل (۱-الف). سرخس با ۲۷۸ متر کم‌ترین و بیرجند با ۱۴۹۱ متر بیشترین ارتفاع از سطح دریای آزاد را دارند. به جز سرخس دیگر ایستگاه‌ها ارتفاعی بیش از ۷۰۰ متر دارند. انتشار گردو خاک تحت تأثیر ساختار سطحی مانند ویژگی‌های کوهساری و ویژگی‌های خاک و میدان باد می‌باشد. ساختار کوهساری بر سرعت و جهت باد تأثیر ویژه‌ای دارد؛ بنابراین مطالعه و شناخت گردو خاک‌های خراسان با توجه به ساختار سطحی متنوع آن، چالش برانگیز است بوده و تأثیر شرایط سطحی در انتشار گردو خاک در ایستگاه‌های مختلف مشابه نیست. از آنجاکه گردو خاک‌های رخ داده در فصل تابستان بیشترین تأثیر را در شرق محدوده انتخابی دارند، تحلیل‌های بیشتر در برخی ایستگاه‌های شرقی و مرکزی خراسان بزرگ (دایره بزرگ‌تر مشکی) انجام شد شکل (۱-الف). در شکل‌های ترسیم‌شده مرز خراسان بزرگ بارنگ آبی و مرز کشورهای تاجیکستان و افغانستان نیز بارنگ بنفش مشخص شد. ساختار کوهساری مدل RegCM در شکل (۱-ب) نمایش داده شده است. با مقایسه اشکال (۱ الف و ب) می‌توان مشاهده نمود که پیچیدگی و تنوع ساختار کوهساری منطقه مورد مطالعه در مدل RegCM با دقت زیادی لحاظ نمی‌گردد. پیش نیز به اثر ساختار کوهساری در شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف اشاره شده بود.



شکل (۱). الف) ساختار کوهساری خراسان بزرگ شامل شمالی، رضوی و جنوبی، ب) ساختار کوهساری در مدل RegCM، ایستگاه‌های انتخابی در مطالعه حاضر با دایره توپر مشخص شده‌اند.

### گردوخاک‌های انتخابی

به‌منظور تعیین زمان وقوع گردوخاک فراگیر در ایران از آمار سه‌ساعته داده‌های مشاهداتی دید افقی و کد دیده گزارش‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شد. در شرایطی که هوا پاک باشد دید افقی در ایستگاه‌های هواشناسی ۱۰۰۰۰ متر یا بیشتر گزارش می‌شود و کاهش آن معرف تیرگی و کدر شدن جو هست. ابرناکی، بارش، مه و گردوخاک از جمله عامل‌های آب و هوایی هستند که منجر به تیرگی جو و کاهش دید افقی می‌شوند. کدهای پدیده شامل ۰۶، ۰۷، ۰۸، ۰۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ هریک برای وضعیت مشخصی از گردوخاک تعریف شده‌اند. کاهش دید افقی به کمتر از ۳۰۰۰ متر با کدهای یادشده در ایستگاه‌های مختلف منطقه، به‌عنوان گردوخاک شدید و فراگیر در نظر گرفته شد. با توجه به این شرایط، سه رویداد گردوخاک انتخاب شد (جدول (۱)). آشکارسازی منشأ شکل‌گیری، گسترش افقی و ترابرد گردوخاک توسط تصویر مرئی سنجنده مودیس ماهواره آکوا<sup>۱۰</sup> انجام شد. مودیس اولین سنجنده تحقیقاتی کاربردی برای سنجش ذرات معلق هست که در دسامبر ۱۹۹۹ روی ماهواره ترا<sup>۱۱</sup> و در مه ۲۰۰۲ بر روی ماهواره آکوا نصب شد (کافمن و همکاران، ۲۰۰۲). تفکیک افقی داده‌های مشاهداتی آن یک درجه هست. ماهواره آکوا هرروز در ساعت مشخصی از یک منطقه روی کره زمین عبور می‌کند. زمان عبور آن از محدوده ایران، بین ۸ تا ۱۰:۴۰ UTC می‌باشد.

جدول (۱). رویدادهای انتخابی گردوخاک در دوره گرم خراسان بزرگ

رویداد	تاریخ خورشیدی	تاریخ میلادی	زمان آغاز اجرای مدل
اول	۱۱ تا ۱۴ مرداد ۱۳۸۷	۱-۴ اوت ۲۰۰۸	۳۰ جولای ساعت ۰۰
دوم	۱۹ و ۲۰ مرداد ۱۳۸۷	۹-۱۰ اوت ۲۰۰۸	۷ اوت ساعت ۰۰
سوم	۱۰ و ۱۱ تیر ۱۳۹۳	۱-۲ جولای ۲۰۱۴	۳۰ جون ساعت ۰۰

<sup>۱۰</sup> Aqua

<sup>۱۱</sup> Terra

### مدل RegCM

در این تحقیق مدل RegCM نسخه ۴/۶ برای شبیه‌سازی گردو خاک به کار گرفته شد که تنظیم‌های آن در جدول (۲) اشاره شده است. مدل به صورت یک آشیانه‌ای با قدرت تفکیک ۳۰ کیلومتر، تعداد ۵۰ گام شبکه در راستای عرض جغرافیایی، ۵۰ گام شبکه در راستای طول جغرافیایی با مختصات مرکزی ۳۰ درجه شمالی و ۴۰ درجه شرقی در نظر گرفته شد. به این ترتیب دامنه مدل شامل کشورهای ایران، عراق، حاشیه جنوبی خلیج فارس، افغانستان و پاکستان بود. تصویرنگاشت لامبرت مناسب عرض‌های میانی تنظیم شد. داده‌های ورودی شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه مداری باد، مؤلفه نصف‌النهاری باد، دمای هوا، سرعت عمودی و رطوبت نسبی در ترازهای مختلف جوی از داده‌های ERA-Interim (EIN15) در بازه زمانی ۶ ساعته تهیه شد. داده‌های سطحی مانند ساختار کوهساری، عمق اقیانوس، کاربری زمین و رطوبت خاک با تفکیک افقی... و دمای سطح آب دریا SST با تفکیک مکانی ۱ درجه از NOAA تهیه شد. زمان تنظیم مدل یک یا دو روز پیش از گردو خاک در خراسان بزرگ در نظر گرفته شد.

جدول (۲). تنظیم مدل برای شبیه‌سازی گردو خاک فوریه ۲۰۰۸

سیستم تصویر انتخابی	نگاشت لامبرت	طرحواره رطوبت	Explicit moisture (SUBEX; Pal et al 2000)
داده اولیه و شرایط مرزی	ERA-Interim(EIN15)	طرحواره لایه‌مرزی	UW PBL (Bretherton and McCaa, 2004)
تعداد لایه‌های قائم	۱۸ لایه	طرحواره دمای سطح دریا	OI_WK
طرحواره همرفت	Grell(1993)	طرحواره گردو خاک	۴ دسته ذره، با در نظر گرفتن گسیل و انتقال ذرات

### عمق نوری هواویز AOD

عمق نوری هواویز AOD و یا ضخامت نوری هواویز<sup>۱۳</sup> AOT کمیته بدون بوده و نشان‌دهنده میزان تضعیف خورشید در جو به دلیل جذب و پراکندگی ناشی از ذره‌های جوی (هواویزها) می‌باشد (وانگ و کریستوفر، ۲۰۰۳). هواویزها تابش خورشیدی ورودی به جو را جذب یا پراکنده می‌کنند و باعث کاهش دید می‌شوند. هواویزها از منابع مختلفی شامل کارخانه‌ها، دود ناشی از آتش‌سوزی، گردو خاک ناشی از توفان‌های گردو خاک، نمک دریا، خاکستر آتش‌فشان و دود تولید می‌شوند. همچنین عوامل دیگری از جمله فاصله از منشأ گردو خاک، فاصله از مراکز صنعتی، نوع فعالیت‌های صنعتی، آلودگی‌های محیطی و صنعتی، فاصله از منابع آبی (نمک دریا)، توپوگرافی، مسیر حرکت توده‌های هوا، ویژگی‌های اقلیمی منطقه و شهری در توزیع افقی و غلظت آن‌ها تأثیرگذار هستند (آلوزیوس و همکاران، ۲۰۰۹). فعالیت‌های انسانی به‌ویژه در مناطق پرجمعیت و یا صنعتی و همچنین سوختن ذخیره فسیلی عامل مهمی در افزایش غلظت هواویزها می‌باشند (سانگ و همکاران، ۲۰۰۹).

<sup>۱۲</sup> ECMWF Reanalyses

<sup>۱۳</sup> Aerosol Optical Thickness

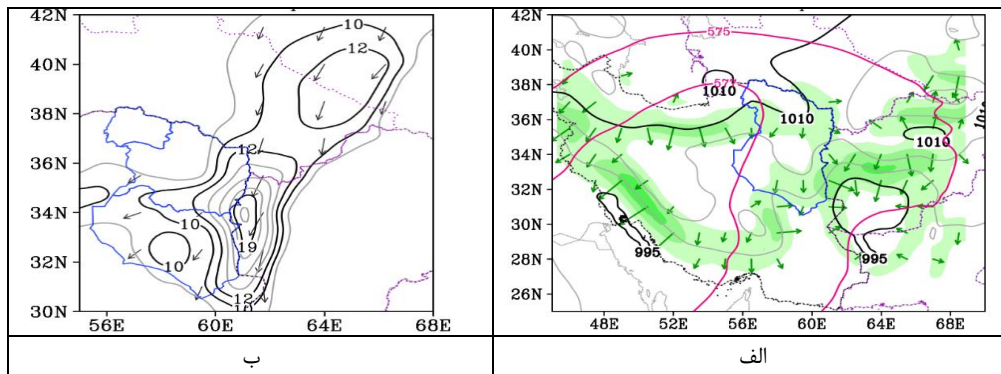
مقدار عمق نوری اپتیکی با توجه به غلظت و تعداد و اندازه هواویزها و همچنین ویژگی ذره‌ها متفاوت است (اورگن، ۱۹۹۵). افزایش AOD به معنای غلظت بیشتر هواویزها در ستون عمودی جو است؛ بنابراین افزایش هواویزها منجر به افزایش عمق اپتیکی جو شده که در نتیجه آن تیرگی جو افزایش و دید افقی کاهش می‌یابد؛ بنابراین افزایش مقدار AOD با کاهش دید افقی همراه بوده و رابطه عکس دارند. مقادیر عمق نوری هواویز در بازه صفر تا ۵ اندازه‌گیری می‌شوند. مقدار صفر نشان‌دهنده عدم ثبت داده توسط سنجنده است. مقدار کمتر از ۰/۲ نیز معرف شاخص هوای پاک است به این معنا که بیشترین انرژی خورشید به زمین رسیده و دید افقی کامل است (تارنمای داده‌های زمینی ناسا). البته شرایط هوای پاک و مقدار AOD روی خشکی و آب متفاوت است (تارنمای ناسا). مقدار AOD بیش از ۰/۵ نشان‌دهنده افزایش آلودگی جوی است. اگر مقدار AOD بیش از ۳ تا ۵ شود، به معنی افزایش شدید غلظت هواویزها، کاهش شدید تابش خورشیدی، آسمانی تیره بوده و منجر به کاهش شدید دید می‌شود؛ که معرف شرایط نامناسب و آلودگی زیاد است. بیشترین مقدار AOD به‌عنوان گردو خاک و یا مه سنگین دسته‌بندی می‌شود. به‌منظور بررسی شبیه‌سازی گردو خاک AOD برآورد شده توسط مدل RegCM که در ادامه متن به‌اختصار AOD\_Mo نامیده می‌شود، استخراج شد. همچنین به‌منظور ارزیابی صحت شبیه‌سازی مدل، از AOD محصول مودیس ماهواره آکوا استفاده شد که به‌اختصار در متن AOD\_Aq بیان می‌گردد. با توجه به زمان عبور ماهواره آکوا از محدوده ایران، نتیجه مدل و داده مشاهداتی آکوا، در ساعت UTC ۹ مقایسه شدند.

## نتایج

### تحلیل همدیدی

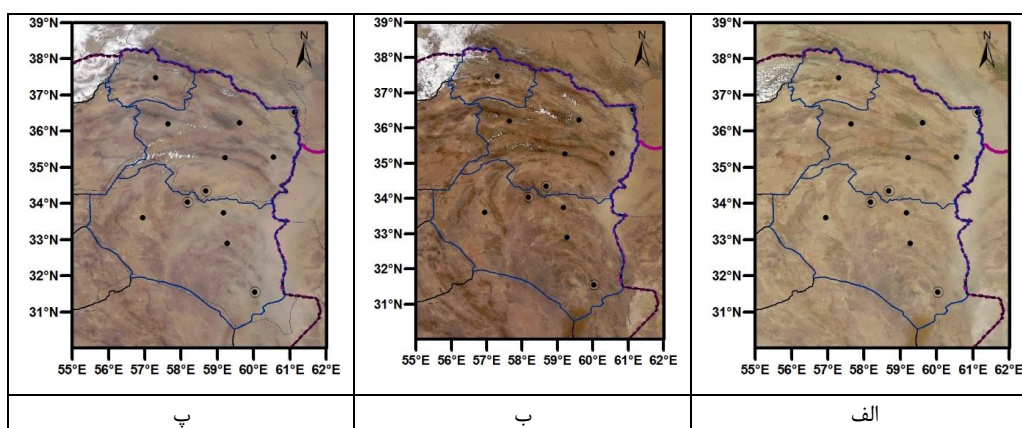
با توجه به شباهت ساختار همدیدی سه رویداد گردو خاک، میانگین آن‌ها ارائه می‌شود. در ساختار فشار سطح دریای آزاد کم‌فشار ۹۹۵ هکتوپاسکال در جنوب غرب افغانستان دیده شد شکل (۲۱ الف). فشار یادشده از نوع حرارتی بود. با شکل‌گیری خط هم‌فشار ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در شمال افغانستان، بین آن دو شیب فشاری از شمال تا جنوب افغانستان توسعه یافت شکل (۲۱ الف) که پس از تأثیر نیروی کوریولیس به توسعه بادهای شمال و شمال شرقی با سرعت ۱۲ و ۲۱ متر بر ثانیه در شرق ترکمنستان و جنوب خراسان منجر شد شکل (۲۱ ب). کوه‌های افغانستان در افزایش شیب فشاری در منطقه مؤثر هستند (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۲ الف) بخش شرق استان خراسان رضوی و جنوبی تحت تأثیر این باد قرار گرفته‌اند. نکته دیگر آن‌که در استان خراسان جنوبی نیز گردبان فشار مشاهده شد که نتیجه آن توسعه بادهای شمال شرقی با بیشینه سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در این منطقه بود. به‌این ترتیب تقریباً تمامی استان خراسان جنوبی تحت تأثیر باد ۱۰ متر بر ثانیه بوده و در خراسان شمالی و بخش‌های غربی خراسان رضوی بادهای کمتر از ۸ متر بر ثانیه وزیده است. ایستگاه‌های واقع در شرق خراسان بزرگ مانند سرخس، تربت‌جام، قائن، بیرجند و نهبندان بیشتر از دیگر ایستگاه‌ها تحت تأثیر میدان باد قرار داشته‌اند؛ اما با توجه به باد شمال شرقی در جنوب استان خراسان رضوی و شمال استان خراسان جنوبی، ایستگاه‌های واقع در مرکز منطقه مورد مطالعه مانند فردوس، گناباد و طبس نیز گردو خاک شدیدی را تجربه می‌نمایند.





شکل (۲). ساختار همدیدی میانگین در رویدادهای انتخابی، الف) فشار سطح دریای آزاد (مشکی) بر حسب ارتفاع  $hPa$ ؛ ب) ژئوپتانسیل سطح  $500$  هکتوپاسکال (قرمز) بر حسب دکامتر، مقدار و جهت شیب فشاری (هاشور و پیکان باد)؛ ب) سرعت و جهت باد در سطح  $850$  هکتوپاسکال

بررسی حاصل نشان می‌دهد نقش پرفشار شمال افغانستان (ترکمنستان) عامل ایجاد شیب فشار و بادهای شمالی در خراسان بزرگ است که با مطالعه حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵) و مفیدی (۱۳۸۶) هماهنگی دارد. گرچه در برخی مطالعه‌ها علت شکل‌گیری باد شمالی را وجود کم‌فشار پاکستان و پرفشار شرق دریای خزر می‌دانند (حسین‌زاده، ۱۳۷۶، نجار سلیقه، ۱۳۸۹؛ گندم‌کار، ۱۳۸۵، خسروی، ۱۳۸۷ و نجار سلیقه، ۱۳۸۹). بادهای مناطق شرقی ایران در دوره گرم سال به‌واسطه برهم‌کنش جو و ناهمواری سطحی ایجاد می‌شوند (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). در تصویر ماهواره در هر سه رویداد، توده گردوخاک در مرز شرقی خراسان بزرگ مشاهده شد شکل (شکل ۳). در اول اوت ۲۰۰۸ مرز هردو استان خراسان رضوی و جنوبی گردوخاک را تجربه کردند شکل (شکل ۳ الف). ایستگاه‌های سرخس، تربت‌جام و نهبندان در نزدیکی مرز شرقی تحت بیشتری گرفتند. گرچه با توجه به باد شمال شرقی، گردوخاک به مناطق مرکزی نیز انتقال یافته اما شدت آن نسبت به شرق منطقه کمتر است. گردوخاک در اول اوت ۲۰۰۸ در مرز شرقی شکل گرفته و در روزهای بعدی تا ۴ اوت ایستگاه‌های مرکزی را نیز تحت تأثیر قرار گرفته و شدت گردوخاک در آن مناطق افزایش یافت؛ بنابراین شدت و تداوم گردوخاک در ایستگاه‌های مختلف یکسان نبود. در ۹ اوت ۲۰۰۸ در مرز شرقی خراسان رضوی و شمال شرق خراسان جنوبی گردوخاک شدید بوده و ایستگاه سرخس بیشتر از دیگر مناطق تحت تأثیر گردوخاک قرار گرفته بود شکل (شکل ۳ ب). در رویداد دوم (۹ اوت) گردوخاک در مرز شرقی شکل گرفته و تا روز ۱۰ به برخی مناطق داخلی خراسان رضوی گسترش یافت. همچنین شدت گردوخاک در مناطق مرکزی نسبت به رویداد اول بسیار کمتر بود. در رویداد سوم (۱ جولای ۲۰۱۴) بیشترین شدت گردوخاک در مرز شرقی خراسان جنوبی و بخش‌های جنوب شرق خراسان رضوی بوده شکل (شکل ۳ پ) اما گسترش آن به مناطق مرکزی خراسان بزرگ نسبت به دو رویداد دیگر بیشتر است.

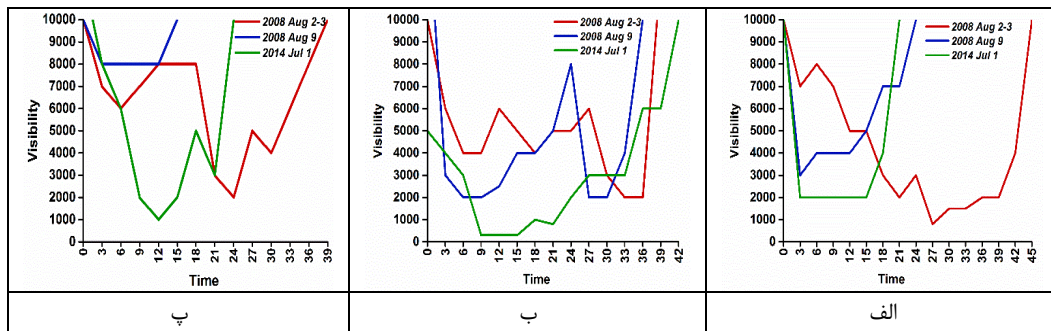


شکل (۳). تصویر مرئی ماهواره آکوا، الف) ۱ اوت ۲۰۰۸، ب) ۹ اوت ۲۰۰۸، پ) ۱ جولای ۲۰۱۴

در ادامه به بررسی تداوم و شدت گردوخاک در ایستگاه‌های انتخابی شامل سرخس، نهبندان و فردوس پرداخته می‌شود. سرخس در شمالی شرقی‌ترین نقطه ایران و در حدفاصل مرز ایران، ترکمنستان و افغانستان قرار دارد. در این ایستگاه کمترین دید افقی با ۱۰۰۰ متر و بیشترین تداوم ۴۵ ساعت در ۲-۳ اوت ۲۰۰۸ رخ داده بود شکل (۴ الف). در رویداد ۹ اوت شدت گردوخاک کمتر از دو مورد دیگر بود. نکته قابل توجه دیگر آن که در ۱ جولای ۲۰۱۴ در سرخس در طی ۱۲ ساعت به‌طور مشابه دید افقی ۲۰۰۰ متر گزارش شده بود که با توجه به تغییرات سرعت باد در طی این دوازده ساعت شکل (۸ الف)، یکسان بودن شدت گردوخاک در طی این مدت مورد سؤال بوده و احتمالاً خطای گزارش وجود دارد.

در نهبندان در جنوب شرقی‌ترین محدوده انتخابی واقع شده است، شدیدترین گردوخاک بادید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر و با تداوم ۶۰ ساعت در رویداد ۱ جولای رخ داده و ۲ تا ۳ اوت شدت گردوخاک کمتر از دو مورد دیگر بود شکل (۴ ب).

در فردوس واقع در مناطق مرکزی محدوده انتخابی، بیشترین تداوم گردوخاک با ۳۹ ساعت در ۳ اوت و بیشترین کاهش دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر در ۱ جولای ۲۰۱۴ رخ داده بود. شدت و تداوم گردوخاک در ۹ اوت نسبت به دو مورد دیگر کمتر بود. با بررسی ساختارهای همدیدی شکل (شکل ۲)، تصویر ماهواره شکل (۳) و دید افقی شکل (۴) در سه ایستگاه سرخس، نهبندان و فردوس می‌توان دریافت که رویداد ۹ اوت نسبت به دو مورد دیگر در تمام منطقه انتخابی شدت و تداوم کمتری داشته و همچنین گردوخاک به مناطق مرکزی استان‌ها نرسیده بود. رویداد ۳ اوت در ایستگاه‌های شمال شرق و مرکزی شدت و تداوم بیشتری داشته در حالی که ایستگاه‌های جنوب شرق در ۱ جولای شدت و تداوم بیشتری داشته تجربه نمودند. به این ترتیب گرچه ساختار همدیدی مؤثر در انتشار گردوخاک مشابه است اما تأثیرگذاری میدان باد در استان‌ها و ایستگاه‌های مختلف یکسان نیست.



شکل (۴). روند تغییرات زمانی دید افقی در هر سه رویداد گردو خاک، (الف) سرخس، (ب) نهبندان و (پ) فردوس

### صحت سنجی برون داد مدل RegCM

در این بخش برون داد مدل AOD\_Mo با داده‌های دید افقی گزارش شده در ایستگاه‌های هواشناسی و AOD\_Aq مقایسه می‌شود. در ابتدا ضریب همبستگی AOD حاصل از مدل RegCM با دید افقی مشاهداتی در تمامی ایستگاه‌های منطقه در هر سه رویداد مورد تحقیق قرار گرفت جدول (جدول ۳). بالاترین ضریب همبستگی در رویداد ۱ جولای ۲۰۱۴ در گناباد با  $-0/82$ ، فردوس  $-0/77$  و قائن و نهبندان هر کدام با  $-0/44$  به دست آمد که نشان می‌دهد مدل RegCM در برآورد گردو خاک عمل کرد بهتری در این ایستگاه‌ها داشته است. در بررسی‌های همدیدی در ۱ جولای ۲۰۱۴ سرعت باد نسبت به دو مورد دیگر بیشتر بوده و جهت وزش باد در خراسان جنوبی شمال شرقی بود که نتیجه آن افزایش شدت گردو خاک و تداوم بیشتر آن در استان خراسان جنوبی در مقایسه با دو رویداد دیگر بود. با توجه به این که بالاترین ضریب همبستگی در ایستگاه‌های خراسان جنوبی و در ۱ جولای ۲۰۱۴ به دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل عمل کرد بهتری در گردو خاک‌های شدیدتر و با گسترده افقی بیشتر دارد.

در رویداد ۹ اوت که گردو خاک نسبت به دو مورد دیگر ضعیف‌تر بوده و تداوم کمتری داشته، طبس با  $-0/6$  بهترین ضریب همبستگی را داشته و در رتبه بعدی نهبندان با  $-0/48$  و بیرجند با  $-0/38$  قرار دارند جدول (جدول ۳). هردو ایستگاه در خراسان جنوبی قرار دارند؛ بنابراین به نظر می‌رسد مدل عمل کرد خوبی در شبیه‌سازی گردو خاک‌های این استان دارد.

در ۳ اگوست ۲۰۰۸ بیشترین ضریب همبستگی در ایستگاه تربت جام با  $-0/62$  و گناباد با  $-0/42$  به دست آمد جدول (جدول ۳). همان‌طور که در تحلیل‌های پیشین اشاره شد، در این رویداد گردو خاک نسبتاً شدید بوده و در استان خراسان رضوی تداوم بیشتری داشت. با توجه به ضریب همبستگی بالاتر در تربت جام و گناباد (خراسان رضوی) نسبت به دیگر ایستگاه‌ها به نظر می‌رسد مدل گردو خاک‌های استان خراسان رضوی را بهتر برآورد نموده است؛ اما در ایستگاه‌های خراسان جنوبی ضریب همبستگی کمتری به دست آمد.

AOD حاصل از مدل در تمامی ایستگاه‌های انتخابی خراسان جنوبی در هر سه رویداد یاد شده با دید افقی ضریب همبستگی منفی داشته‌اند. به این معنا که با کاهش دید افقی مقدار AOD افزایش یافته است؛ بنابراین عمل کرد مدل در هر سه رویداد در خراسان جنوبی بهتر از خراسان رضوی است. گرچه مقدار همبستگی در برخی موارد کمتر از  $-0/5$  است. قائن و نهبندان و فردوس نسبت به دیگر ایستگاه‌های استان نتیجه بهتری ارائه

داند. درحالی که در استان خراسان رضوی مدل در برخی گردو خاک‌ها و یا برخی ایستگاه‌ها برآورد بهتری داشته است. به‌طور کلی عمل کرد مدل در خراسان جنوبی بهتر از خراسان رضوی است. مدل برآورد بهتری در خراسان جنوبی با ساختار کوهساری کمتری و مناطق بیشتر دشت و کویر ارائه داد درحالی که در خراسان رضوی با ساختار کوهساری بیشتر، دقت آن کمتر است؛ بنابراین می‌توان به نقش ساختار کوهساری در برآورد گردو خاک توسط مدل توجه نمود که در مطالعه حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵) و ژانگ و همکاران، (۲۰۰۸) نیز اشاره شده است. به این معنا که شرایط سطحی تأثیر ویژه‌ای در عمل کرد مدل دارد. به‌طوری که در مناطقی با ساختار کوهساری پیچیده مدل نتیجه ضعیف‌تری برای شبیه‌سازی گردو خاک ارائه می‌دهد.

جدول (۳). ضریب همبستگی AOD\_Mo و دید افقی در ایستگاه‌های انتخابی در سه رویداد گردو خاک

ایستگاه	رویداد اول	رویداد دوم	رویداد سوم	ایستگاه	رویداد اول	رویداد دوم	رویداد سوم
فائن	-۰/۲۴	-۰/۲۵	-۰/۴۴	ایستگاه جنوبی سرخس	سرخس	۰/۳۲	-۰/۲۳
نهبندان	-۰/۱۱	-۰/۴۸	-۰/۴۴		گناباد	۰/۰۲	-۰/۸۲
فردوس	-۰/۱۶	-۰/۳۱	-۰/۷۷		تربت جام	-۰/۰۵۲	-۰/۱۴
بیرجند	-۰/۲۵	-۰/۳۸	-۰/۲۰				
طبرس	-۰/۱۰	-۰/۶۰	-۰/۳۷				

در ایستگاه سرخس در دو مورد ضریب همبستگی مثبت و در ۱ جولای همبستگی  $-۰/۲۳$  - به دست آمده است. سرخس با ۲۷۸ متر از سطح دریای آزاد نسبت به دیگر ایستگاه‌های محدوده، کمترین ارتفاع را دارد. همچنین به بیابان‌های ترکمنستان و افغانستان نزدیک می‌باشد. علاوه بر آن بررسی دید افقی در سرخس تداوم طولانی گردو خاک‌های ضعیف را نشان داد. به‌طوری که پیش از شدت یافتن گردو خاک در رویدادهای انتخابی، گردو خاک‌های ضعیفی بادید افقی ۷۰۰۰ متر در ایستگاه گزارش شده است.

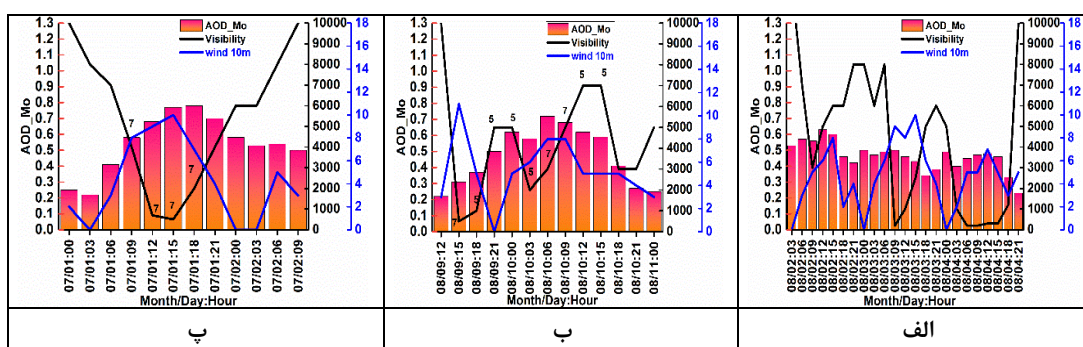
بنابراین به نظر می‌رسد سرخس از نظر جغرافیایی در شرایطی قرار دارد که در فصل تابستان به‌طور مداوم گردو خاک‌های ضعیفی را تجربه نموده و می‌تواند عامل مهمی در عمل کرد ضعیف مدل RegCM در برآورد گردو خاک سرخس باشد.

ضریب همبستگی نشان‌دهنده رابطه عکس دید افقی (گردو خاک) و AOD مدل می‌باشد اما این همبستگی در طول دوره بررسی شده و نتیجه‌ای از تغییرات ساعتی به دست نمی‌دهد درحالی که شدت و تداوم گردو خاک در دوره زمانی وقوع یکسان نیست. تداوم گردو خاک، اشتباه در گزارش دید افقی، کد پدیده و نوسان‌های شدید دید افقی در بازه‌های سه‌ساعته از جمله عامل‌های هستند که در کاهش ضریب همبستگی تأثیر دارند. علاوه بر آن افزایش سرعت باد در بازه زمانی سه یا شش ساعت در یک منطقه می‌تواند به گردو خاک محلی منجر شده و غلظت ذرات را در زمان کوتاهی به‌سرعت افزایش دهد.

در مرحله بعد تغییرات ساعتی AOD\_Mo، دید افقی مشاهداتی و سرعت باد ده متری به بررسی خواهد شد. از آنجایی که گناباد در هر سه رویداد گردو خاک ضریب همبستگی مناسبی داشت، مقایسه ساعتی در این ایستگاه ارائه خواهد شد. در رویداد اول (۲-۴ اوت ۲۰۰۸)، در گناباد سه کاهش دید افقی رخ داده بود که به

ترتیب مقدار آن کاسته شده و کمترین دید افقی در روز ۴ اوت از ساعت ۰۶ UTC تا ۱۵ UTC در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر گزارش شد شکل (شکل ۵ الف). تغییر سرعت باد ده متری بادید افقی در روز سوم و چهارم اوت ۲۰۰۸ روند عکس داشته و با افزایش سرعت باد در طی ساعت‌های ۹ تا ۱۲ UTC کاهش شدید دید افقی رخ داده است. سرعت باد در روز ۳ اوت بیشتر از ۴ ام بوده اما دید در هر دو روز به ۲۰۰ متر کاهش یافته است؛ بنابراین به نظر می‌رسد در روز سوم گردو خاک محلی تأثیر بیشتری در کاهش دید داشته در حالی که در روز ۴ ام گردو خاک ناشی از سیستم همدیدی مؤثرتر بوده است. مدل از روز سوم اوت ساعت ۱۲ UTC به بعد هماهنگی خوبی بادید افقی داشته و با افزایش یکی دیگری کاهش می‌یابد. کاهش ناگهانی دید افقی در روز ۲ ام اوت با افزایش سرعت باد ده متری همراه نیست. در این روز بین AOD\_Mo و دید افقی نیز هماهنگی مشاهده نمی‌شود. ضریب همبستگی ۰/۴۲- نیز نشان می‌دهد تأیید می‌کند که بعضی روزها این همبستگی کمتر و در برخی دیگر بیشتر بوده است. نکته قابل توجه دیگر مقدار AOD\_Mo برآورد شده توسط مدل در طی این سه روز است. در روز ۲ ام اوت که دید افقی ۳۰۰۰ متر بوده AOD حدود ۰/۶ برآورد شده اما در روز ۴ ام اوت که دید به ۲۰۰ متر کاهش یافته AOD در حدود ۰/۵ برآورد شده است.

در رویداد دوم (۹ تا ۱۰ اوت ۲۰۰۸) در گناباد ضریب همبستگی ۰/۰۲ به دست آمده است جدول (جدول ۳) که نشان می‌دهد نه تنها بین دید افقی و AOD\_Mo روند عکس وجود نداشته بلکه ارتباط مثبتی دارند که این روند در شکل (۵ ب)، دیده می‌شود. در روز ۹ اوت افزایش سرعت باد با کاهش دید افقی و کد ۰۷ همراه بوده است که نشان از گردو خاک محلی داشته و پس از آن در دیگر ساعت‌ها و بیشینه کاهش دید در روز ۱۰ اوت با کد ۰۵ گزارش شده است. مجدداً از ساعت ۰۶ تا ۰۹ UTC روز ۱۰ اوت کد ۰۷ به معنای گردو خاک ثبت شده است. گرچه در روز ۱۰ ام روند AOD\_Mo و دید افقی مشابه نیست اما روند افزایش سرعت باد AOD\_Mo کاملاً هماهنگ است. به نظر می‌رسد بین بیشینه AOD\_Mo و کاهش دید افقی تأخیر زمانی وجود داشته باشد. اختلاف زمانی بین مدل و داده مشاهداتی متداول است. در این رویداد که گردو خاک محلی رخ داده یا کاهش دید افقی با کد ۰۵ همراه بوده مدل عمل کرد هماهنگی بادید افقی ندارد.



شکل (۵). تغییر زمانی AOD\_Mo و دید افقی در ایستگاه گناباد، الف) ۲ تا ۴ اوت ۲۰۰۸، ب) ۹ تا ۱۰ اوت ۲۰۰۸، پ) ۱

تا ۲ جولای ۲۰۱۴

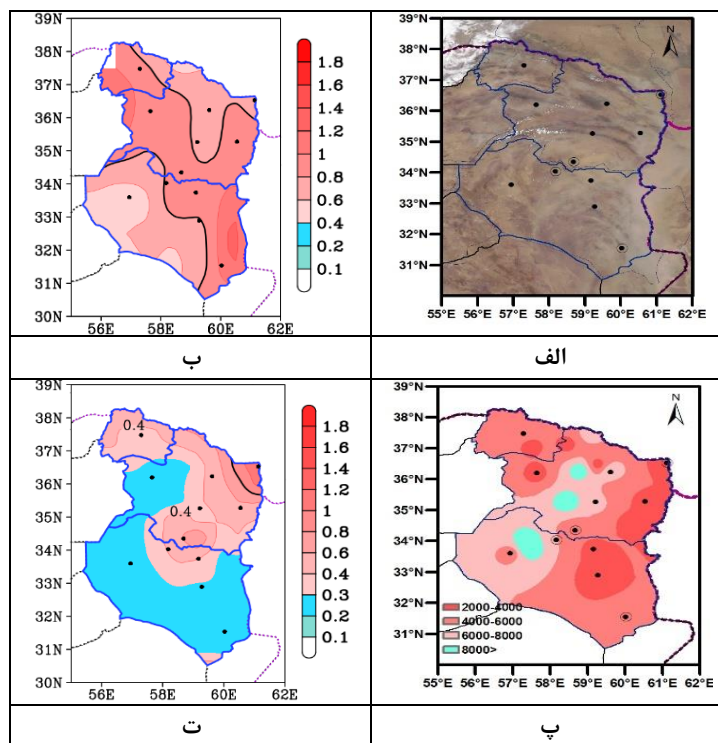
در رویداد سوم (۱ جولای ۲۰۱۴) روند تغییرات عکس دید افقی با سرعت باد به خوبی دیده می‌شود. کد ۰۷ نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد منجر به کاهش دید افقی شده است. همچنین روند عکس بین دید افقی و AOD\_Mo به خوبی مشاهده شده شکل (شکل ۵) و ضریب همبستگی  $-0/82$  جدول (جدول ۳ پ) این روند را تأیید می‌نماید. با مقایسه سه رویداد یادشده می‌توان نتیجه گرفت در گردوخاکی با کاهش دید شدید تا کمتر از ۱۰۰۰ متر، مدل برآورد بهتری دارد. همچنین روند تغییرات روزانه سرعت باد ده متری بادید افقی روند منفی و با AOD\_Mo روند مثبت دارد. در مواردی که تغییر ناگهانی سرعت باد یا دید افقی رخ داده و یا رطوبت در جو زیاد باشد، مدل گردوخاک را به خوبی شبیه‌سازی نمی‌نماید.

همچنین مقایسه مقداری AOD در ۱ جولای که دید افقی به ۲۰۰ متر رسیده مدل AOD را حدود  $0/77$  برآورد نموده درحالی‌که در ۴ اوت با همین میزان کاهش دید، مدل AOD را حدود  $0/5$  برآورد نموده است؛ که نشان می‌دهد مقدار عددی AOD\_Mo با مقدار کاهش دید افقی هماهنگی ندارد. از جمله دلیل این اختلاف می‌توان به خطا در گزارش دید افقی، شرایط جوی مانند بالا بودن رطوبت نسبی، افزایش سرعت باد محلی و... اشاره نمود.

#### مقایسه توزیع افقی AOD مدل با داده‌های مشاهداتی در رویداد سوم (۱ و ۲ جولای ۲۰۱۴)

در ۱ جولای ۲۰۱۴، در تصویر ماهواره آکوا، گردوخاک در مرز شرقی ایران با شدت بیشتر و در گستره خراسان بزرگ با شدت کمتری مشاهده شد شکل (۶ الف). در توزیع دید افقی AOD\_Aq، در مرزی شرقی خراسان بزرگ و در شمال غرب و غرب آن مقدار AOD مشابه و حدود  $1/2$  تا  $0/8$  مشاهده می‌شود شکل (شکل ۶ ب)، به جز محدوده بین نهبندان و بیرجند که تا  $1/2$  ثبت شده است شکل (شکل ۶ ب). درحالی‌که در تصویر مرئی گردوخاک شدت آن در مرز شرقی بیش از غرب است. همچنین در شمال غرب محدوده انتخابی در تصویر مرئی پوشش ابری مشاهده می‌شود که در AOD\_Aq مقدار ثبت نشده است اشکال (شکل ۶ الف و ب). به نظر می‌رسد الگوریتم تعیین AOD در شرایط پوشش ابری برآوردی ندارد. در توزیع دید افقی بیشینه کاهش دید افقی را در سرخس، تربت‌جام، بیرجند و قائن در شرق و سبزوار در شمال غرب رخ داده است شکل (شکل ۶ پ). توزیع کلی دید افقی و AOD\_Aq تقریباً هماهنگ است اما در برخی مناطق عدم هماهنگی‌های مشاهده می‌شود که علت آن فاصله ایستگاه‌های همدیدی است. در ماهواره آکوا تفکیک‌پذیری مکانی یک درجه و در حدود ۱۱۱ کیلومتر است؛ اما فاصله مکانی ایستگاه‌های همدیدی با همدیگر تفاوت دارد.

در پهنه‌بندی AOD\_Mo بیشینه مقدار در سرخس و همچنین در منطقه مرکزی بین فردوس، گناباد و قائن مرکز بیشینه دیگری مشاهده می‌شود شکل (شکل ۶ ت). با مقایسه پهنه‌بندی AOD در آکوا و مدل هماهنگی مناسبی بین آن دو مشاهده نمی‌شود. گرچه مدل در ساعت‌های بعد گسترش جنوب سوی AOD را نشان می‌دهد اشکال (۶ ب و ت). تفکیک‌پذیری مکانی نقاط شبکه مدل ۳۰ کیلومتر و تفکیک‌پذیری مکانی ماهواره آکوا ۱ درجه یا در حدود ۱۱۱ کیلومتر است؛ بنابراین در درون‌یابی انجام‌شده در ترسیم پهنه‌بندی احتمال خطا وجود داشته و می‌تواند یکی از دلیل‌های اختلاف بین برآورد مدل و آکوا باشد.



شکل (۶). الف) تصویر مرئی ماهواره آکوا، ب) توزیع افقی AOD ماهواره آکوا، پ) توزیع دید افقی، ت) توزیع افقی AOD برون داد مدل در ساعت ۰۹ UTC روز ۱ جولای ۲۰۱۴

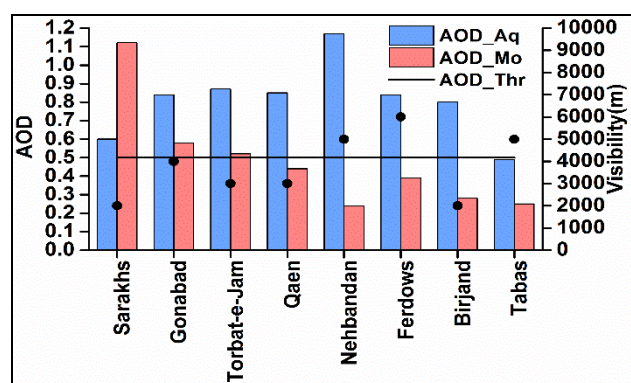
مقایسه AOD\_Mo و دید افقی در خراسان رضوی و خراسان شمالی تقریباً هماهنگ بوده اما در استان خراسان جنوبی بین آن دو تفاوت دیده می‌شود. به طوری که بیشینه کاهش دید افقی در قائن و بیرجند گزارش شده اما مدل بیشینه AOD را در حدفاصل گناباد، فردوس و قائن برآورد نموده است. مقایسه فاصله بین نقاط شبکه مدل ۳۰ کیلومتر بوده است درحالی که فاصله مکانی ایستگاه نیست. در ادامه مقدار عددی AOD\_Mo، AOD\_Aq و دید افقی در ساعت ۰۹ UTC روز ۱ جولای مقایسه شده است.

در روز ۱ جولای ساعت ۰۹ UTC مقدار AOD\_Mo و AOD\_Aq در ایستگاه‌های انتخابی مقایسه شدند (شکل ۷). مقدار ثبت شده در آکوا به جز طبس و سرخس در دیگر ایستگاه‌ها بیش از ۰/۸ بوده و بیشترین مقدار آن در نهبندان با ۱/۱ مشاهده شد (شکل ۷). در تمام ایستگاه‌ها مقدار AOD\_Aq از آستانه ۰/۵ بالاتر است. درحالی که مقدار برآورد شده AOD\_Mo به جز سرخس در دیگر ایستگاه‌ها بین ۰/۲ تا ۰/۵ بوده و فقط گناباد از حد آستانه ۰/۵ بیشتر است (شکل ۷). به جز سرخس در دیگر ایستگاه‌ها مدل AOD را کمتر برآورد نموده است. در مطالعه‌های پیشین نیز به کم برآورد شدن AOD در مدل RegCM در برخی مناطق اشاره شده است (مالت و همکاران، ۲۰۱۷؛ تسی کرتکیس و همکاران، ۲۰۱۶ و سانتزو همکاران، ۲۰۰۹).

کمترین اختلاف بین آن دو در گناباد و طبس و بیشترین اختلاف در نهبندان به دست آمد. نکته مهم آن که دید افقی و مقدار AOD\_Aq در نهبندان و فردوس هماهنگی ندارد. دید افقی نهبندان ۵۰۰۰ متر گزارش شده درحالی که AOD\_Aq بیشترین مقدار ۱/۱ را در این ایستگاه نشان می‌دهد؛ بنابراین یا افزایش AOD

به دست آمده توسط الگوریتم از داده ماهواره آکوا به جز گردوخاک به عامل دیگری بستگی داشته یا آن که گزارش مقدار کاهش دید در ایستگاه خطا بوده است.

سرخس و بیرجند کمترین دید افقی با ۲۰۰۰ متر داشته‌اند. برآورد مدل در سرخس با ۱/۱ با کاهش دید ۲۰۰۰ متری آن نسبت به دیگر ایستگاه‌ها نتیجه خوبی به دست داده است؛ اما در بیرجند علیرغم دید افقی ۲۰۰۰ متر، برآورد AOD\_Mo ۰/۲۸ است؛ که در مقایسه با سرخس با همان کاهش دید افقی مقدار کمتری برآورد شده است.



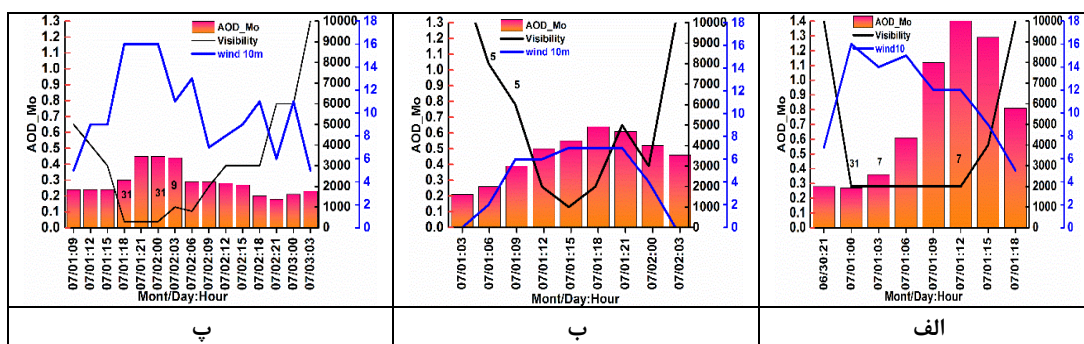
شکل (۷). مقایسه AOD مدل و آکوا روی ۱ جولای ۲۰۱۴ ساعت ۰۹ UTC در ایستگاه‌های مختلف

تا به اینجا مقایسه بین برون داد مدل و داده‌های مشاهده در ساعت ۰۹ UTC روز ۱ جولای انجام شد؛ اما از آنجاکه گردوخاک چند ساعت تداوم داشته و شدت آن در دوره زمانی وقوع تغییر می‌نماید، لازم است که تغییر زمانی AOD\_Mo با داده مشاهده نیز بررسی گردد. به دلیل کاهش حجم مطالب نتیجه مقایسه AOD\_Mo و دید افقی فقط در سه ایستگاه سرخس، فردوس و نهبندان در روز ۱ و ۲ جولای ۲۰۱۴ ارائه می‌شود شکل (شکل ۸)؛ که تغییرات دید افقی آن‌ها در هر سه رویداد انتخابی پیش‌تر ارائه شد شکل (۴).

در سرخس روند تغییرات دید افقی با باد ده متری هماهنگی کاملاً ندارد. در ساعت ۰۰ روز ۱ جولای افزایش سرعت باد ده متری تا ۱۶ متر بر ثانیه منجر به توفان گردوخاک شده است (کد ۳۱)؛ اما پس از آن دید افقی در طی ۱۲ ساعت با کد ۰۷ به‌طور یکسان و بدون تغییر ۲۰۰۰ متر گزارش شده است، در حالی که سرعت باد کاهش شدیدی داشته است. مدل در برآورد توفان گردوخاک در ساعت ۰۰ UTC عمل کرد خوبی نداشته اما از ساعت ۰۹ تا ۱۵ UTC بین سرعت باد، دید افقی و AOD\_Mo هماهنگی مشاهده می‌شود. مجدد مشاهده شد که مدل گردوخاک محلی کوتاه‌مدت به دلیل افزایش ناگهانی سرعت باد را به‌خوبی برآورد نمی‌کند. ضریب همبستگی بین دید افقی و برون داد مدل به همین علت ضعیف (۰/۲۳-) به دست آمد جدول (جدول ۳). در فردوس بین دید افقی و سرعت باد ده متری هماهنگی خوبی مشاهده می‌شود. در این ایستگاه دید افقی با کد ۶ و ۷ گزارش شده است. کمترین دید افقی در ساعت ۱۵ UTC گزارش شده و بیشینه AOD در ساعت ۱۸ UTC برآورد شده است. هماهنگی مناسب دید افقی و AOD\_Mo در شکل (۷ ب) و جدول (۳) ضریب



همبستگی  $-0.77$  دیده می‌شود. در فردوس بین سرعت باد ده متری و AOD\_Mo هماهنگی مثبتی وجود دارد. سرعت باد ده متری ۶ متر بر ثانیه بوده و نسبت به سرخس کمتر است. در نهبندان کاهش دید افقی با کدهای ۳۱ و ۹ (عدم تغییر شدت گردو خاک و گردو خاک در خارج از ایستگاه) همراه بوده است. افزایش سرعت باد ده متری تا ۱۶ متر بر ثانیه در ساعت ۱۸ تا ۲۱ UTC روز ۱ جولای با کاهش دید افقی هماهنگ است. در روز ۱ جولای که بین سرعت باد و دید افقی هماهنگی مشاهده می‌شود، AOD\_Mo نیز بادید افقی رابطه منفی و با سرعت باد رابطه مثبت دارد؛ اما در روز ۲ جولای که سرعت باد و دید افقی نوسان‌های زیادی دارند، این هماهنگی را نمی‌توان یافت. به همین دلیل ضریب همبستگی در نهبندان  $-0.44$  به دست آمده است که عدم هماهنگی در برخی ساعت‌ها را تأیید می‌نماید.



شکل (۸). تغییر زمانی AOD\_Mo و دید افقی در ایستگاه الف (سرخس، ب) فردوس؛ پ) نهبندان، ۱ تا ۲ جولای ۲۰۱۴

### نتیجه‌گیری

در فصل تابستان کم‌فشار حرارتی در جنوب و پرفشار در شمال افغانستان شکل می‌گیرد که منجر به توسعه بادهای شمال و شمال شرقی با سرعت ۱۲ تا ۲۱ متر بر ثانیه در مرز شرقی ایران و غرب افغانستان شده و گردو خاک‌های در این مناطق انتشار می‌یابد که با نتیجه حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۵) و مفیدی (۱۳۸۶) هماهنگی دارد. این گردو خاک‌ها عمدتاً شرق و مرکز خراسان بزرگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ساختار پیچیده سطحی منطقه که شامل کوه‌های مرتفع و دشت‌های بین آن‌هاست باعث می‌شود، شدت و تداوم گردو خاک در محدوده مورد مطالعه، بسیار متفاوت باشد. در طی ساعت ۹ تا ۱۲ UTC افزایش سرعت باد رخ داده و علاوه بر گردو خاک‌های همدیدی، گردو خاک‌های محلی نیز انتشار می‌یابند که بر شدت گردو خاک افزوده می‌شود. در بسیاری از ایستگاه‌ها افزایش سرعت باد با کاهش دید افقی هماهنگ است که نشان از تأثیر شرایط محلی در افزایش شدت گردو خاک دارد.

بررسی برون داد مدل RegCM بادید افقی و AOD حاصل از ماهواره آکوا نشان می‌دهد که عمل کرد مدل در هر سه رویداد در خراسان جنوبی بهتر از خراسان رضوی است. با توجه به این‌که خراسان جنوبی ساختار کوهساری کمتری داشته و بیشتر مناطق آن دشت و کویر است، می‌توان به نقش ساختار کوهساری در برآورد گردو خاک توسط مدل تأکید نمود. همچنین مقایسه توزیع افقی AOD آکوا و مدل RegCM نشان می‌دهد که مدل گسترش جنوب سوی گردو خاک را در مرز شرقی (شرق خراسان جنوبی) به خوبی برآورد نمی‌نماید.

مقایسه نتیجه AOD مدل بادید افقی مشاهداتی، بیشترین ضریب همبستگی در هر سه رویداد در مناطق مرکزی شامل گناباد، فردوس، قائن و نهبندان نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی در ۱ جولای ۲۰۱۴ در چهار ایستگاه یادشده به ترتیب با  $-۰/۸۲$ ،  $-۰/۷۷$  و  $-۰/۴۴$  به دست آمد. به‌طورکلی مدل RegCM گردوخاک‌های شدید همراه با کاهش دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر، تداوم بیشتر با گستردگی افقی بیشتر را بهتر برآورد می‌نماید. گرچه روند تغییرات AOD مدل در ایستگاه‌های مرکزی محدوده انتخابی و ایستگاه‌های خراسان جنوبی هماهنگی مناسبی بادید افقی دارند اما از مقدار AOD نمی‌توان شدت گردوخاک را به‌دقت تعیین نمود. از علت‌های عدم هماهنگی آن دو می‌توان به عدم دقت در برآورد مقدار AOD به‌دست‌آمده از ماهواره، عدم هماهنگی بین مدل و داده‌های مشاهداتی و تفاوت تفکیک‌پذیری آن‌هاست. مدل RegCM شبیه‌سازی گردوخاک در سرخس ضعیف عمل می‌نماید درحالی‌که این ایستگاه بیشترین فراوانی گردوخاک را دارد که از جمله خطای برآورد مدل می‌توان به ضعیف بودن گردوخاک در فصل تابستان در سرخس اشاره نمود. به‌طورکلی مدل RegCM مقدار AOD را کمتر از الگوریتم ماهواره آکوا برآورد می‌نماید که با نتیجه مالت و همکاران، ۲۰۱۷ هماهنگی دارد. مقدار عددی AOD در گردوخاک‌های با شدت یکسان (دید افقی مشابه) متفاوت است. عامل‌های متعددی از جمله خطا در گزارش دید افقی، خطا در گزارش گردوخاک (کد پدیده)، بالا بودن رطوبت نسبی و یا افزایش ناگهانی سرعت باد محلی و... در عدم همبستگی AOD مدل و دید افقی همبستگی مؤثر هستند.

## منابع

- احمدی زهره؛ دوستان رضا؛ مفیدی عباس (۱۳۹۴). تحلیل همدیدی گردوغبار نیمه گرم سال در استان خراسان جنوبی. فصل‌نامه جغرافیایی طبیعی. ۴۱-۶۲: ۸(۳۹).
- بروغنی مهدی؛ مرادی حمیدرضا؛ زنگنه اسدی (۱۳۹۴). محمدهلی تحلیل وقوع گردوغبار و پهنه‌بندی آن در استان خراسان رضوی، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، (۴): ۴۵-۵۷.
- پورهایمی سیم؛ امیراحمدی ابوالقاسم؛ زنگنه اسدی؛ محمدعلی؛ صالحی مهدی (۱۳۹۷). شناسایی و تعیین خصوصیات کانون‌های گردوغبار در استان خراسان رضوی، تحقیقات جغرافیایی، (۱): ۳۴: ۱-۹.
- حسینی سمیرا؛ مفیدی عباس؛ آذر زرین (۱۳۹۴). بررسی ساختار باد شمال و گردوغبار ناشی از آن با کاربری مدل اقلیمی RegCM4. کنفرانس ملی هواشناسی ایران، دوم و سوم اردیبهشت ۱۳۹۴، یزد، ایران.
- حسین زاده سیدرضا (۱۳۷۶). **بادهای ۱۲۰ روزه سیستان**، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، (۴۶): ۱۲۷-۱۰۲.
- حمیدیان پور محسن؛ مفیدی عباس؛ نجار سلیقه محمد؛ علیجانی بهلول (۱۳۹۵). نقش توپوگرافی بر شبیه‌سازی ساختار باد سیستان، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۴۳): ۱۶: ۲۵-۵۳.
- خسروی محمود (۱۳۸۷). تأثیرات محیطی اندرکنش نوسان‌های رودخانه هیرمند با بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، (۹۹): ۱۹-۴۹.

- سلطان‌زاده ایمان؛ احمدی گیوی فرهنگ؛ ایران‌نژاد پرویز (۱۳۸۶). بررسی سه‌ماهه‌ی تأثیر رشته‌کوه‌های زاگرس بر جریان‌های میان‌مقیاس منطقه‌ی شرق زاگرس با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۱): ۳۳-۵۱
- فاروقی آیدا؛ کاظمی منا؛ جلالی مجتبی، هاشمیان سعیده؛ نصرتی نادر (۱۳۹۶). شناسایی ساختار و چشمه گردو خاک‌های استان خراسان شمالی با استفاده از مدل RegCM4-1.1: مطالعه موردی ۱۴-۱۳ آوریل ۲۰۱۱، نشریه علمی-ترویجی نیوار، ۴۱: ۳۶-۲۳
- غفاریان پروین؛ نگاه سمانه؛ فرید مجتهدی نیما؛ عابد حسین (۱۳۹۴). شبیه‌سازی ریزگردهای گسیل‌شده از صحرای ترکمنستان به کرانه‌های جنوبی دریای خزر. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۳۸(۱۵): ۱۴۱-۱۶۴
- قوبدل رحیمی یوسف؛ ظرافتی هادی؛ فرج زاده‌ی اصل منوچهر (۱۳۹۵). کاربرد مدل RegCM4 در تحلیل ساختار سینوپتیک موج گرمای جولای ۲۰۰۰ استان خوزستان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۲۰(۱): ۲۸۶-۲۶۹
- قهرمان نودر؛ بابائیان ایمان؛ موسوی مینا (۱۳۹۳). بررسی مهارت مدل RegCM در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در اقلیم گذشته و دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵، بررسی موردی: ایستگاه مشهد، مجله ژئوفیزیک ایران، ۴(۸): ۶۴-۴۹
- کارکن سیستانی مرضیه (۱۳۹۱). بررسی آماری و پهنه‌بندی توفان‌های گردوغبار در استان خراسان رضوی. اولین همایش ملی بیابان، ۲۷ و ۲۸ خرداد ۱۳۹۱، کرج، ایران
- کیخسروی قاسم (۱۳۹۶). برونداد مدل دینامیکی RegCM4 در شبیه‌سازی داده‌های فصلی و سالانه بارش - دما، در ناحیه شرق و شمال شرق ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۴۷): ۲۱۱-۱۹۱
- گندم‌کار امیر (۱۳۸۵). بررسی سینوپتیک انرژی باد در منطقه سیستان، رساله دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه اصفهان
- محمدی فهیمه؛ زرین آذر؛ بابائیان ایمان (۱۳۹۴). کارایی مدل اقلیمی RegCM4 در شبیه‌سازی بارش دوره سرد استان فارس مطالعه موردی: دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۰، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳(۴۱): ۵۲۴-۵۱۱
- مدیریان راهله؛ بابائیان ایمان؛ کریمیان مریم (۱۳۸۶). شبیه‌سازی عددی بارش و دمای جنوب شرق ایران با استفاده از مدل اقلیمی RegCM3، مجله نیوار، ۶۸(۶۸): ۲۵-۷
- مفیدی عباس؛ کمالی سمیه؛ زرین آذر (۱۳۹۲ الف). ارزیابی توان مدل RegCM4 پیوند خورده با طرحواره غبار در آشکارسازی ساختار توفان‌های گردوغباری تابستانه در دشت سیستان، فصل‌نامه جغرافیا برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۳(۳): ۶۹-۵۱
- مفیدی عباس؛ حمیدیان پور محسن؛ نجار سلیقه محمد؛ علیجانی بهلول (۱۳۹۲ ب). تعیین زمان آغاز، خاتمه و طول مدت وزش باد سیستان با بهره‌گیری از روش‌های تخمین منطقه تغییر، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی ۲(۸): ۱۱۲-۸۷
- مفیدی عباس (۱۳۸۶). تحلیل گردش جو تابستانه بر روی ایران و ارتباط آن با بارش‌های تابستانه فلات ایران، رساله دکتری، دانشگاه تربیت‌معلم، دانشکده علوم جغرافیایی، تهران

مفیدی عباس و کمالی سمیه (۱۳۹۱). بررسی تحلیل ساختار توفان‌های گردوغباری در دشت سیستان با استفاده مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM4: مطالعه موردی جولای ۹۳، ۲۷ و ۲۸ خرداد ۱۳۹۱، کرج، ایران.

نجار سلیقه محمد (۱۳۸۹). آثار مشترک تقابل حرارتی سیستم‌های جوی در کشورهای اسلامی مطالعه موردی: بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، ۱۳۸۹، ایران، زاهدان.

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.

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.

Afiesimama, E. A., Pal, J. S., Abiodun, B. J., Gutowski, W. J., & Adedoyin, A. (2006). **Simulation of West African monsoon using the RegCM3. Part I: model validation and interannual variability.** Theoretical and Applied Climatology, 86(1-4), 23-37.

Agacayak, T., Kindap, T., Unal, A., Mallet, M., Pozzoli, L., Karaca, M., & Solmon, F. (2012). **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).

Aloysius, M., Mohan, M., Suresh Babu, S., Parameswaran, K., & Krishna Moorthy, K. (2009). **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. 27(6), 2285-2296.

Davitashvili, T., Kutaladze, N., Kvatadze, R., Kvatadze, R. A., & Mikuchadze, G. (2018). **Effect of Dust Aerosols in Forming the Regional Climate of Georgia.** Scalable Computing: Practice and Experience, 19(2), 87-96.

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

Giorgi, F., et al., (2012). **RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains,** Climate Research, 52: 7-29.

Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). **A satellite view of aerosols in the climate system.** Nature, 419(6903), 215

Konare, A., Zakey, A. S., Solmon, F., Giorgi, F., Rauscher, S., Ibrah, S., & Bi, X. (2008). **A regional climate modeling study of the effect of desert dust on the West African monsoon.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D12).

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.

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.

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).

- 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.
- 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).
- 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.
- Ogren, J. A. (1995). **A systematic approach to in situ observations of aerosol properties.** *Aerosol forcing of climate*, 215-226.
- Pal, J.S., et al., (2007). **Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCM3.5.** *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 1395-1409.
- Solmon, F., Nair, V. S., & Mallet, M. (2015). **Increasing Arabian dust activity and the Indian summer monsoon.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(14), 8051.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sylla, M. B., Coppola, E., Mariotti, L., Giorgi, F., Ruti, P. M., Dell'Aquila, A., & Bi, X. (2010). **Multiyear simulation of the African climate using a regional climate model (RegCM3) with the high resolution ERA-interim reanalysis.** *Climate Dynamics*, 35(1), 231-247.
- 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.
- 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.
- 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).
- Zakey, A. S., Solmon, F., & Giorgi, F. (2006). **Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model.**
- 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.**
- 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/>
- 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.