

## بررسی دقت مدل WRF و تصاویر ماهواره‌ای در شبیه‌سازی گردو خاک

### جنوب شرق ایران: مطالعه موردی آوریل ۲۰۱۷

سحر زیرک‌زاده<sup>۱</sup>، امیرحسین مشکوتی<sup>۲\*</sup>، میرمسعود خیرخواه زرکش<sup>۳</sup>، ساویز صحت کاشانی<sup>۴</sup>، فاضل ایران‌منش<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، تهران

۲- دکتری هواشناسی، دانشیار گروه علوم زمین دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، تهران

۳- دکتری منابع آب، دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران

۴- دکتری هواشناسی، دانشیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران

۵- دکتری جغرافیای طبیعی-ژئومرفولوژی، استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران

#### چکیده

امروزه وقوع توفان‌های گردو خاک یکی از معضلات مهم بسیاری از مردم جهان است و هر ساله سبب بروز خسارات فراوان در بخش‌های مختلف زندگی انسان‌ها می‌شود. کشورهایی که در کمربند گردو خاک قرار دارند بیشتر از این معضل زیست محیطی آسیب می‌بینند. ایران نیز به عنوان کشوری در غرب آسیا، همواره از توفان‌های گردو خاک آسیب دیده است، توفان‌هایی که عمدتاً منشأ خارجی دارند. هدف از این مطالعه، بررسی پدیده گردو خاک در جنوب شرق ایران و منطقه هامون است. به این منظور، مورد مطالعاتی ۲۶ تا ۲۸ آوریل در منطقه هامون مورد بررسی قرار گرفت. گردو خاک ۲۶ تا ۲۸ آوریل نشان داد که در برخی از ایستگاه‌های منطقه دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده است و تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس و RGB ماهواره MSG به خوبی توده‌ی گردو خاک در منطقه را نشان می‌دهند. همچنین تصویر بازتابی تصحیح شده سنجنده مودیس توده گردو خاک را واضح‌تر نشان داده‌اند. به نظر می‌رسد عمق نوری ذرات با استفاده از الگوریتم DT و DB با قدرت تفکیک ۱۰ کیلومتر، غلظت ذرات را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. مقایسه خروجی مدل WRF-Chem با مدل MERRA2 حاکی از آن است که هر دو مدل شدت غلظت سطحی گردو خاک را در منطقه هامون به خوبی نشان می‌دهند، هر چند مقادیر خروجی مدل WRF-Chem بیشتر از مقادیر غلظت سطحی خروجی مدل MERRA2 است. مقایسه خروجی غلظت سطحی گردو خاک این دو مدل با غلظت PM10 گزارش شده در ایستگاه زابل، نشان‌دهنده آن است که داده‌های خروجی هر دو مدل بسیار بیشتر از داده‌های گزارش شده ایستگاهی است. همچنین در این مورد مطالعاتی، میانگین مربعات خطا مدل MERRA2 در ایستگاه زاهدان کم بوده که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول این مدل در این ایستگاه در مورد مطالعاتی مذکور است. همچنین خطای MSE مدل WRF-Chem در ایستگاه زاهدان بالا بوده که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف این مدل در ایستگاه زابل است.

**کلید واژه‌ها:** توفان خاک، بررسی آماری، تصاویر ماهواره، مدل‌های عددی، منطقه هامون.

## مقدمه

یکی از پدیده‌های طبیعی که بر زندگی انسان و محیط زیست بسیار تاثیرگذار است توفان گردوخاک می‌باشد. هر ساله، برخی از کشورهای جهان که منابع تولید کننده گردوخاک در آن‌ها قرار دارند از توفان‌های خاک آسیب می‌بینند. همچنین کشورهای بسیار بیشتری که منابع تولید کننده ذرات گردوخاک در آنها قرار ندارند، به علت انتقال ذرات گردوخاک، دچار ضرر و زیان می‌شوند (Middleton, 2019). توفان‌های گردوخاک به سلامت و سیستم تنفسی انسان آسیب می‌رساند (Goudie, 2020)، خطوط انتقال نیرو را دچار مشکل می‌سازد، حمل و نقل جاده‌ای و هوایی را مختل می‌کند و بخش کشاورزی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. مهمترین چشمه‌های تولید گردوخاک بیابان‌ها هستند (Middleton, 2017). پس از آن دریاچه‌های خشک شده را می‌توان به عنوان دومین منبع تولید کننده گردوخاک در جهان نام برد (Bullard et al, 2011). یخچال‌های طبیعی (Wei et al, 2017) و زمین‌های کشاورزی تغییر کاربری داده شده نیز از دیگر منابع تولید کننده گردوخاک در جهان هستند (Sharratt and Auvermann, 2011) بزرگترین منبع تولید کننده گردو- خاک در جهان در آفریقا قرار دارد که هر ساله مقدار زیادی از ذرات گردوخاک را به جو زمین وارد می‌کند (Schlesinger et al, 2006). بیابان صحرا بزرگترین بیابان در جهان است که مساحت آن ۹ میلیون کیلومتر مربع است و در ۱۰ کشور در شمال آفریقا قرار گرفته است (Middleton, 2009). کوک و همکاران (Kok et al, 2021) نشان دادند که صحرای بزرگ آفریقا، تقریباً نیمی از گردوغبار جهانی را منتشر می‌کند. سپس، منابع گردوخاک موجود در خاورمیانه و آسیای میانه در مرتبه دوم هستند و ۳۰ درصد از چشمه‌های تولیدی توفان‌های گردوخاک جهانی در آن‌ها قرار گرفته‌اند. یکی از مناطق مهم گردوخاک، صحرای آسیای شرقی است که ۱۱ درصد از ذرات گردو- غبار جهانی را منتشر می‌کند. بنابراین، منطقه خاورمیانه یکی از مهمترین مناطق جهان است که بسیاری از منابع گردوخاک در آن واقع شده‌اند. در منطقه خاورمیانه اغلب منابع تولید کننده گردوخاک در کشورهای عراق، سوریه و عربستان

واقع هستند (مریدنژاد و همکاران، ۲۰۱۵)، اما برخی از این چشمه‌های تولید کننده در کشور ایران قرار دارند که با آن‌که از چشمه‌های تولید کننده در کشورهای عراق و سوریه فعالیت و وسعت کمتری دارند، با این حال این چشمه‌ها با تولید توفان‌های گردوخاک، مناطق مختلف ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند. علاوه بر چشمه‌های پراکنده داخلی، عمده‌ی چشمه‌های تولید کننده گردوخاک ایران شامل بخش‌های خشک شده دریاچه و تالاب هامون در جنوب شرقی، بخش‌های خشک شده از تالاب هورالهویزه (هورالعظیم) در جنوب غربی و قسمت‌های خشک شده دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران است (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۰۶). استان سیستان و بلوچستان که در جنوب شرقی ایران واقع است، علاوه بر بالا بودن دما و کم بودن بارش‌های جوی، تحت تاثیر بادهای ۱۲۰ روزه قرار دارد. کارگر و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهش خود، با شبیه‌سازی توفان‌های شدید در جنوب شرق کشور (بادهای ۱۲۰ روزه) به این نتیجه رسیدند که منبع اصلی انتشار گردوغبار در سیستان، بستر خشک تالاب هامون است. همچنین طی توفان‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، حمل توده‌های گردوغبار در قسمت جنوبی ایران تا دریای عمان، به دلیل جریان‌های همگرایی (بادهای شمال به جنوب در شرق ایران، به ویژه در بهار و تابستان) ایجاد شده است. همچنین بررسی فصلی تعداد توفان‌های گردوخاک نشان داد که وقوع توفان خاک، در فصول بهار و تابستان بیشتر است (نامداری و همکاران، ۲۰۲۱) و این منطقه به یکی از مناطق گردوخاک خیز در کره‌ی زمین تبدیل شده است، به طوری که سازمان جهانی هواشناسی در سال ۲۰۱۷ حوضه‌ی آبریز سیستان را به عنوان یکی از فعال‌ترین چشمه‌های گردوخاک در ایران معرفی کرده است (WMO<sup>1</sup>, 2017). همچنین وقوع بادهای شدید در این منطقه، یکی دیگر از دلایل وقوع توفان‌های خاک است. حمیدیان پور (۱۳۹۴) در پژوهش خود، با استفاده از داده‌های با توان تفکیک بالا در مقیاس ۲۰ کیلومتر، حاصل از ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی داده‌ها با مدل دینامیکی RegCM<sup>2</sup> طی یک دوره ده ساله (۲۰۰۱-۲۰۱۰) ماهیت و ساختار باد سیستان را مورد بررسی قرار داد و به

<sup>1</sup> World Meteorological Organization

<sup>2</sup> Regional Climate Model system

یک روش بسیار مهم دیگر در بررسی تولید و انتشار ذرات گردو خاک، استفاده از تصاویر ماهواره و مقایسه‌ی این تصاویر با خروجی مدل‌های گردو خاک و داده‌های اندازه‌گیری شده و ثبت شده‌ی ایستگاهی است. در مطالعات بسیاری از تصاویر ماهواره برای بررسی میزان گردو خاک معلق در ستون جو استفاده شده است که می‌توان به مطالعات، گراسو و همکاران (Grasso et al, 2021) که به بررسی گردو خاک برخاسته از بیابان صحرا بر روی اقیانوس اطلس، شمشیری و همکاران (۲۰۱۴) که به بررسی گردو خاک بر روی کرمانشاه با بررسی مقادیر عمق نوری ذرات سنجنده مودیس بر روی ماهواره‌های آکوا و ترا، الخطیب و همکاران (۲۰۱۲) که به بررسی تصاویر ماهواره NOAA-AVHRR<sup>7</sup> در قسمت‌های جنوبی آمریکا، بانکس و همکاران (Banks et al, 2018) با کمک تصاویر ماهواره SEVIRI<sup>8</sup> به بررسی توده‌ی گردو خاک در آفریقای شمالی، پرداختند، اشاره کرد. عبدالخانی در سال ۱۳۹۸ نشان داد که داده‌های سنجنده مودیس قابلیت بالایی برای مطالعه توده‌های با تفکیک بالا دارند. وی از سه الگوریتم شامل دمای درخشندگی<sup>9</sup>، الگوریتم میلر<sup>10</sup> و روسکاونسکی<sup>11</sup> برای بازسازی گردو خاک استفاده کرد و برای اعتبارسنجی، نتایج را با تصویر رنگی طبیعی منطقه مورد مطالعه مقایسه نمود و نشان داد که همه روش‌ها تقریباً موفقیت بالایی دارند.

در این مطالعه به بررسی مکانی و زمانی توفان گردو خاک شدید و فراگیر آوریل ۲۰۱۷ که جنوب شرق ایران را به شدت تحت تاثیر قرار داده، پرداخته شده است. در این توفان ذرات گردو خاک تا ارتفاع ۱۰ کیلومتری جو، بالا رفته‌اند و منطقه وسیعی از کشورهای ایران، افغانستان و پاکستان را تحت تاثیر قرار داده است. منطقه‌ی هامون، یکی از چشمه‌های اصلی تولید کننده گردو خاک در داخل ایران است و این بررسی از آن جهت دارای اهمیت است که با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، تصاویر ماهواره را جهت شناسایی

این نتیجه رسید که باد سیستان دارای دو هسته‌ی بیشینه در حوالی خواف (دشت آیشان) و حوالی دریاچه‌ی هامون (شهر زابل) است، که هسته‌ی دوم از شدت بیشتری برخوردار است، همچنین یافته‌های او نشان می‌دهد که باد سیستان در ارتفاع تقریبی ۵۰۰ متر از سطح زمین به بیشینه سرعت خود میرسد و سرعتی بالغ بر ۱۷ متر بر ثانیه را بطور متوسط دارد. روش‌های بسیاری برای بررسی انتقال و انتشار گردو خاک توسط محققان به کار گرفته شده است که یکی از این روش‌ها مدل‌سازی چگونگی برخاستن ذرات گردو خاک از چشمه‌های تولیدکننده، انتقال و انتشار این ذرات است. این مدل‌ها هم به صورت بزرگ مقیاس مانند مدل‌های CAMS<sup>1</sup> (Mahowald et al, 2006)، مدل ECMWF<sup>2</sup> (Morcrette et al, 2009) و GOCART<sup>3</sup> (Chin et al, 2000) و هم به صورت منطقه‌ای مانند مدل‌های WRF-Chem<sup>4</sup> (Grell, 2005) و مدل NAPPs<sup>5</sup> (Hogan and Rosmond, 1991) به منظور بررسی چشمه‌های تولیدکننده گردو خاک و انتشار ذرات آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. شناسایی چشمه‌ی گردو خاک، مهمترین گام در فرایند تعیین استراتژی موثر برای کنترل گردو خاک است. یکی از راه‌های یافتن چشمه‌های گردو خاک، استفاده از مسیر انتقال ذرات با کمک مدل HYSPLIT<sup>6</sup> است، در این مدل، با تعیین مسیرهای ذرات معلق در جو می‌توان محل چشمه را مشخص کرد (Petzold et al, 2009). از این روش برای نشان دادن نحوه انتقال ذرات گردو خاک هم استفاده می‌شود (Rousseau, 2004). خطای محاسبه‌ی مسیر در مدل HYSPLIT بطور معمول حدود ۲۰ درصد است (Stohel, 1998). که این خطا را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از مسیرها و استفاده از روش‌های ماتریسی کاهش داد.

<sup>1</sup> Copernicus Atmosphere Monitoring Service

<sup>2</sup> European Center for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>3</sup> The Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport

<sup>4</sup> Weather Research and Forecasting-Chemistry

<sup>5</sup> Naval Aerosol Analysis and Prediction System

<sup>6</sup> The Hybrid Single-Particle Lagrangian

<sup>7</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer

<sup>8</sup> The Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager

<sup>9</sup> Brightness Temperature Difference

<sup>10</sup> Miller

<sup>11</sup> Roskovensky

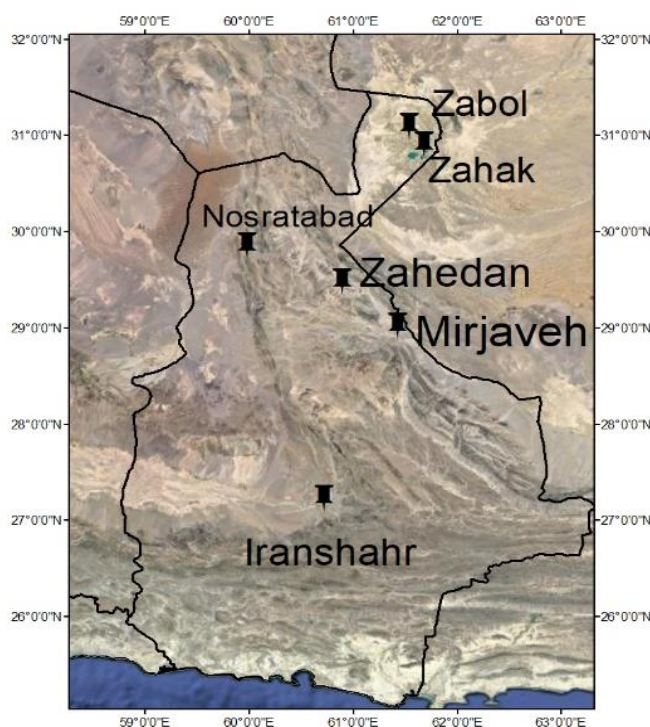
چشمه تولیدکننده خاک مورد بررسی قرار داده است. روش‌های دیگر بررسی چشمه‌ی تولید کننده خاک، با استفاده از مدل‌سازی و بررسی داده‌های ایستگاهی است که در مورد مطالعاتی حاضر، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جهت شمال شرق به جنوب شرق می‌وزد (علیزاده و همکاران، ۲۰۱۴). حداکثر وزش این باد در تیر ماه به صد کیلومتر در ساعت نیز می‌رسد که در مسیر باعث جابجایی ریگ‌های روان می‌گردد و توفان‌های شن، تپه ماهور و ماسه بادی‌ها را شکل می‌دهد. شهر زهک در شمال استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این شهر در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۶۱ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی است. آب‌وهوای شهرستان زهک هم گرم و خشک است.

زاهدان مرکز استان سیستان و بلوچستان و یکی از کلان شهرهای ایران است. آب‌وهوای زاهدان در بیشتر روزهای سال گرم و خشک است. زاهدان از لحاظ مختصات جغرافیایی در ۶۰ درجه و ۵۱ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۳۰ دقیقه و ۴۵ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. ایرانشهر از نظر جغرافیایی در طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و طول جغرافیایی ۲۷ درجه و ۱۲ دقیقه شمالی واقع شده است. این شهر نیز دارای آب و هوای گرم و خشک بوده و سومین شهر پر جمعیت استان است.

### منطقه مورد مطالعه

در این بررسی، منطقه مورد مطالعه شامل جنوب شرق ایران و استان سیستان و بلوچستان است. همچنین برخی از ایستگاه‌های هواشناسی این استان که در تاریخ‌های مورد بررسی گزارش گردوخاک داشته‌اند به عنوان نمونه‌ی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل شهرهای زهک و زابل در شمال استان، زاهدان در شرق استان و ایرانشهر در جنوب استان است. زابل در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان با مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. آب و هوای زابل از نوع بیابانی و گرم و خشک است. جریان باد در شهرستان در کلیه فصول برقرار است، بادهای ۱۲۰ روزه حاصل توده‌های پر فشار غربی است که در فصل تابستان از



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های همدیدی در این منطقه

که در این رابطه  $r_{XY}$  ضریب همبستگی پیرسون است که همبستگی بین دو کمیت  $X$  و  $Y$  را نشان می‌دهد.

همچنین برای بدست آوردن خطای میانگین مربعات از یک مجموعه یا  $n$  داده می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2)$$

که در آن  $(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n)$  عمل میانگین‌گیری را انجام می‌دهد و  $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$  مقدار مربع خطای هر داده را محاسبه می‌کند، پس  $MSE$  میانگین مربع خطاهاست.

### نتایج

در این پژوهش به بررسی توفان گردو خاک شدید و فراگیر گردو خاک آوریل ۲۰۱۷ خواهیم پرداخت که جنوب شرق ایران را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. جدول ۲ گزارش حداقل دید افقی و کد پدیده گردو خاک در ۵ ایستگاه جنوب شرق ایران از ۲۶ تا ۲۸ آوریل ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. شدت توفان گردو خاک در سطح منطقه باعث کاهش شدید دید افقی شده است. در دو ایستگاه نصرت‌آباد و زابل دید افقی به زیر ۱ کیلومتر رسیده است و در زهک حداقل دید افقی به ۴۰۰ متر رسیده است.

در این مطالعه به بررسی گردو خاک در جنوب شرق ایران می‌پردازیم، برای انجام این کار از مدل HYSPLIT و WRF استفاده می‌شود.

در اجرای مدل HYSPLIT از داده‌های GDAS<sup>1</sup> با تفکیک ۰/۵ درجه و به روش پیشرو<sup>۲</sup> استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی این رخداد، همچنین مدل WRF-Chem، با دقت افقی ۳۰ و ۳۰ km<sup>3</sup> و تراز قائم (هکتوپاسکال)، از ساعت ۰۰ UTC<sup>4</sup> روز ۲۶ آوریل تا ساعت ۰۰ UTC<sup>4</sup> روز ۳۰ آوریل ۲۰۱۷ اجرا شد، که برای شرایط اولیه و مرزی مدل، از داده‌های آنالیز GFS<sup>5</sup> با دقت ۰/۵ درجه استفاده شده است. همچنین از داده‌های غلظت سطحی PM10 اندازه‌گیری شده ایستگاه زابل در این مورد مطالعاتی استفاده شد. این داده‌ها به صورت ساعتی اندازه‌گیری می‌شوند و در هر شبانه‌روز ۲۴ بار اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. در این پژوهش ضریب همبستگی و خطای میانگین مربعات مربوط به خروجی غلظت PM10 مدل‌های MERRA2 و WRF-Chem و همچنین غلظت سطحی اندازه‌گیری شده در سازمان حفاظت محیط زیست در ایستگاه‌های زابل و زاهدان نیز مورد بررسی قرار گرفت.

ضریب همبستگی پیرسون میزان همبستگی بین دو متغیر را محاسبه می‌کند و مقدار آن بین +۱ و -۱ متغیر است. اگر مقدار به دست آمده مثبت باشد، به معنی آن است که تغییرات دو کمیت با یکدیگر هم‌جهت است و اگر منفی باشد، بدین معنی است که دو متغیر در جهت عکس هم عمل می‌کنند.

ضریب همبستگی پیرسون در رابطه‌ی ۱ مبتنی بر کوواریانس دو متغیر و انحراف معیارهای آن‌ها می‌باشد، بنابراین می‌توان از برآوردهای آن‌ها برای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون استفاده نمود.

$$r_{xy} = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Global Data Assimilation System

<sup>2</sup> Forward

<sup>3</sup> kilometre

<sup>4</sup> Coordinated Universal Time

<sup>5</sup> Global Forecast System

<sup>6</sup> Particulate Matter Trends

جدول ۱- طرحواره‌های به کار رفته در مدل WRF-Chem

طرحواره‌های مورد استفاده در مدل	
میکروفیزیک	لین (لین و همکاران، ۱۹۸۳)
تابش موج کوتاه	گودارد (ویلند و همکاران، ۲۰۰۰)
تابش موج بلند	RRTM (ویلند و همکاران، ۲۰۰۰)
لایه سطحی	مونین - ابوخوف (ابوخوف، ۱۹۹۳)
تابش سطح- زمین	نوا (چن و دودهیا، ۲۰۰۱ و اک و همکاران ۲۰۰۳)
همرفت کومه‌ای	کاین و فریتچ (کاین، ۱۹۹۳)
طرحواره لایه مرزی	YSU (هونگ، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰)
طرحواره گردوخاک	GOCART (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱)

جدول ۲- گزارش حداقل دید افقی و کد پدیده‌ی گردوخاک در ۵ ایستگاه زاهدان، زابل، زهک، میرجاوه و نصرت‌آباد

۲۰۱۹ از ۲۶ تا ۲۸ آوریل ۲۰۱۷

کد پدیده	حداقل دید افقی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع	نام ایستگاه
۰۷	۴۰۰ m	۳۰/۹	۶۱/۶۸	۴۹۵	زهک
۰۷	۸۰۰ m	۳۱/۰۳	۶۱/۴۸	۴۸۳/۲	زابل
۰۶	۸۰۰ m	۲۹/۸۵	۵۹/۹۸	۱۱۲۷	نصرت‌آباد
۰۶	۱/۵ km	۲۹/۴۷	۶۰/۸۸	۱۳۷۰	زاهدان
۰۶	۱/۵ km	۲۹/۰۲	۶۱/۴۳	۸۳۶	میرجاوه

شکل ۴ تصاویر تصحیح شده بازتابی سنجنده مودیس در روزهای ۲۷ و ۲۸ آوریل ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. این فناوری برای ارائه تصاویر با رنگ حقیقی با حذف اثرات جوی مانند پراکندگی ریلی ذرات ایجاد شده است. همچنین محصول بازتاب سطح تقریباً در زمان واقعی را نیز ارائه می‌دهند. بازتاب سطحی، الگوریتم تصحیح جوی را شامل می‌شود که شامل تصحیح ذرات هواویز است. در این تصاویر، توده‌ی گردوخاک مانند شکل ۲ قابل رویت است، اما مزیت آن نسبت به تصاویر رنگ حقیقی در آن است که در تصاویر تصحیح شده‌ی بازتابی، تصاویر ابرها بسیار واضح‌تر از تصاویر رنگ حقیقی است و به رنگ آبی است و امکان اشتباه گرفتن ابر و مه با توده‌ی گردوخاک بسیار کمتر است. بنابراین، امکان شناسایی توده‌ی گردوخاک بهتر از تصاویر رنگ حقیقی است.

شکل ۵ تصاویر RGB ماهواره MSG<sup>۱</sup> در روزهای ۲۷ و ۲۸ آوریل ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. در این تصاویر، توفان خاک برخاسته از منطقه جازموریان در مرز ایران، افغانستان

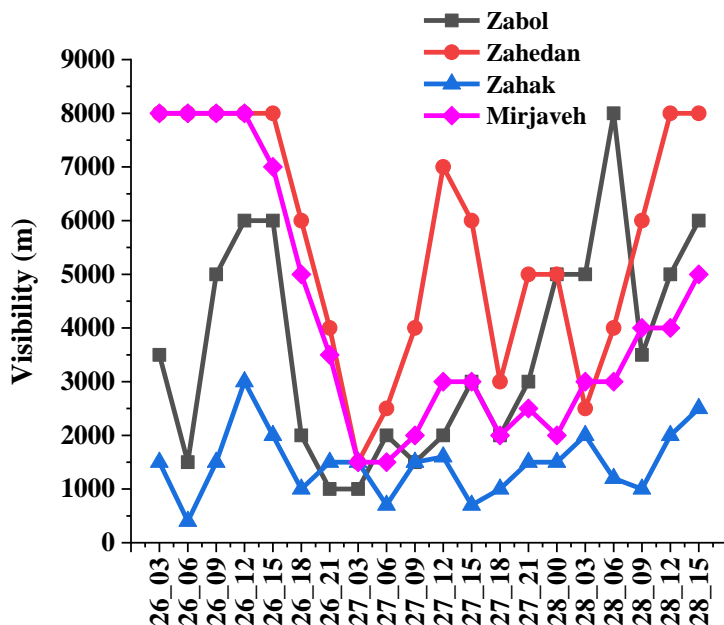
شکل ۲ تغییرات دید افقی در ۴ ایستگاه زابل، زاهدان، زهک و میرجاوه شما در روش ایستگاههای زابل، زهک، زاهدان و ایرانشهر را معرفی کردید. را نشان می‌دهد. توفان خاک در شهر زهک و زابل در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان از روز ۲۶ آوریل آغاز شده است، اما در ۲ ایستگاه زاهدان و میرجاوه، توفان خاک در آخرین ساعت‌های روز ۲۶ آوریل گزارش شده است. هر ۴ ایستگاه وقوع توفان خاک را که همراه با کاهش شدید دیدافقی بوده است را در روز ۲۷ آوریل گزارش کرده‌اند و از ساعت ۰۹ UTC روز ۲۸ آوریل در همه ایستگاه‌ها، دید افقی رو به افزایش گذاشته است.

شکل ۳ تصویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس بر روی ماهواره آکوا در روزهای ۲۷ و ۲۸ آوریل ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. در هر دو تصویر، توده‌ی گردوخاک برخاسته از روی منطقه هامون قابل مشاهده است. در روز ۲۸ آوریل، توده‌ی گردوخاک بر روی منطقه وسیع‌تری پخش شده است. همچنین وجود توده‌ی گردوخاک دیگری بر روی منطقه جازموریان قابل رویت است.

<sup>1</sup> Meteosat Second Generation

سنجنده‌ی مودیس در آن است، که توده گردوخاک در منطقه جازموریان در این تصاویر قابل رویت نیست. تفاوت دیگر، وضوح بالای تصاویر ابر به رنگ قهوه‌ای و تفاوت آن‌ها با تصاویر گردوخاک به رنگ بنفش است.

و پاکستان قابل مشاهده است. در روز ۲۸ آوریل، توده‌ی گردوخاک در منطقه وسیع‌تری پخش شده است. تفاوت این تصاویر با تصاویر رنگ حقیقی و تصحیح شده‌ی بازتابی



شکل ۲- گزارش تغییرات دید افقی در ۴ ایستگاه زاهدان، زابل، زهک و میرجاوه از ۲۶ تا ۲۸ آوریل ۲۰۱۷

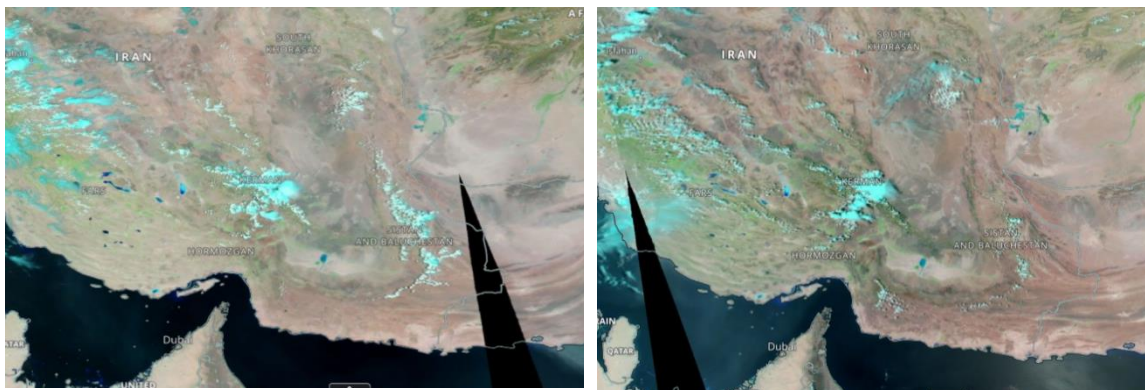


(ب)



(الف)

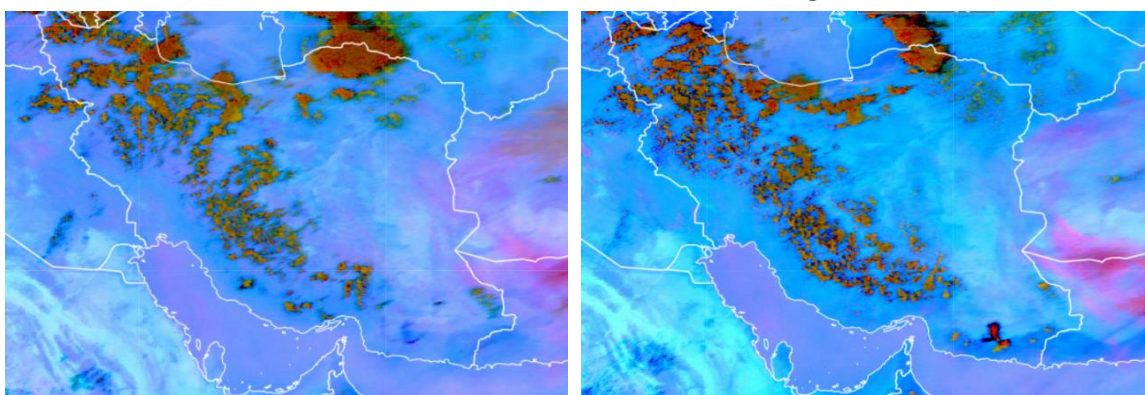
شکل ۳- تصویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس ماهواره آکوا الف (۲۷ آوریل ب) ۲۸ آوریل ۲۰۱۷



(ب)

(الف)

شکل ۴- تصاویر تصحیح شده بازتابی سنجنده مودیس ماهواره آکوا (الف) ۲۷ آوریل (ب) ۲۸ آوریل ۲۰۱۷



(ب)

(الف)

شکل ۵- تصاویر RGB ماهواره MSG (الف) ۲۷ آوریل (ب) ۲۸ آوریل ۲۰۱۷

دو شکل الف و ب، توده‌ی خاک بر روی منطقه جازموریان به خوبی نشان داده شده است.

شکل ۷ عمق نوری ذرات محصولات ۱۰ کیلومتری سنجنده‌ی مودیس ماهواره‌ی ترا را با استفاده از  $AOD^2$  که توسط الگوریتم‌های  $DT^3$  و  $DB^4$  بازیابی شده‌اند را نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهند که محصول ۱۰ کیلومتری  $DT$  بیشتر از محصول ۱۰ کیلومتری  $DB$  با مشاهدات عمق نوری ذرات شبکه  $AERONET^5$  ارتباط دارد. در حالی که الگوریتم  $DB$  مقادیر  $AOD$  را کم برآورد می‌کند، الگوریتم  $DB$  به طور معمول مقادیر عمق نوری ذرات را برای مناطق شهری بیش از حد ارزیابی

برای تشخیص گردوخاک از تعدادی تست تابندگی که کانال‌های طیفی مختلف سنجنده‌ی  $AIRS^1$  را مقایسه می‌کند، تعیین می‌شود. تابندگی اندازه‌گیری شده در کانال‌هایی که به گردوخاک حساس هستند با تابندگی کانال‌هایی که به گردوخاک حساس نیستند مقایسه می‌شود. نمرات بالاتر نشان‌دهنده‌ی اطمینان بیشتر از وجود توده‌ی گردوخاک است. هنگامی که شدت گردوغبار بالاتر از ۳۸۰ باشد، وجود توده‌ی گردوخاک محتمل است. تفکیک این تصاویر ۳۱/۲۵ کیلومتر است. در هر دو تصویر شکل ۵، مقدار تابندگی توده‌ی گردوخاک بالاتر از ۴۰۰ است، اما در شکل ۵ الف، بر روی دریاچه‌ی هامون مقادیر آن، نشان‌دهنده‌ی توده‌ی خاک نیست و با تصاویر رنگ حقیقی سنجنده‌ی مودیس ماهواره‌ی ترا هم‌خوانی ندارد. اما در هر

<sup>2</sup> Aerosol Optical Depth

<sup>3</sup> Dark Target

<sup>4</sup> Deep Blue

<sup>5</sup> Aerosol Robotic Network

<sup>1</sup> The Atmospheric Infrared Sounder

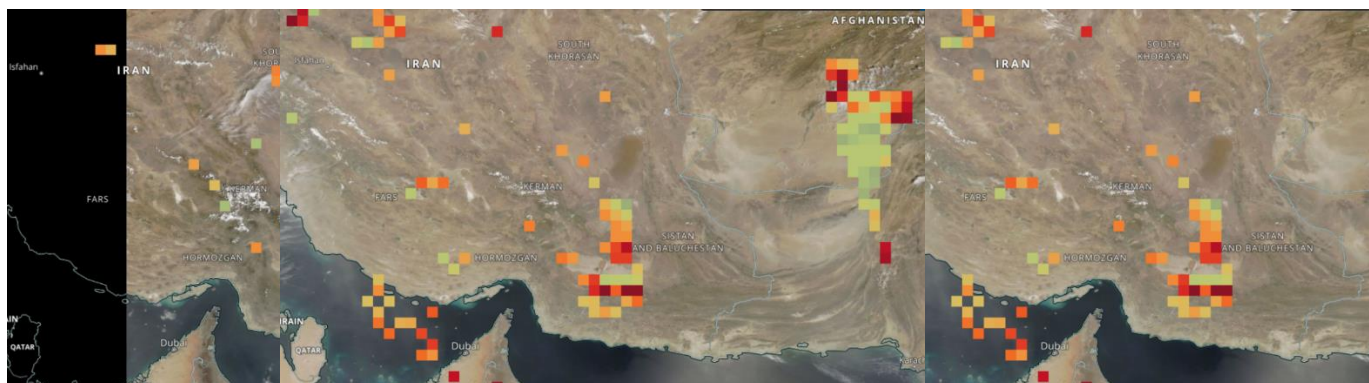


نیمه‌ی شرقی ایران طی دوره‌ی آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ پرداختند. بررسی مسیرهای انتقال ذرات، در استان سیستان نشان داده است که ذرات گردوخاک مسیر مشابهی را به جنوب‌شرق پیموده‌اند.

شکل ۹ مسیر ماهواره کالیپسو و دسته‌بندی ذرات و همچنین پروفایل قائم ذرات در روز ۲۷ آوریل ۲۰۱۷ بین ساعت ۲۱:۵۳ UTC و ۲۲:۰۷ UTC را نشان می‌دهد. در هر دو شکل، ذرات گردوخاک تا ارتفاع ۱۰ کیلومتری بالا رفته‌اند و نشان دهنده وجود چشمه‌ی خاک در این منطقه است. ذرات گردوخاک هنگام انتقال به مناطق دیگر، کاهش ارتفاع می‌دهد. در شکل ۹ ب، ذرات گردوخاک به ارتفاع ابر در این منطقه رسیده‌اند. همچنین خالصی فرد و همکاران (۲۰۱۸)، با بررسی توفان‌های خاک در جنوب فلات ایران با استفاده از ماهواره کالیپسو، دریاچه هامون را یکی از چشمه‌های گردوخاک در منطقه نام برد.

می‌کند (Zhang et al, 2017). در مورد مطالعاتی حاضر، به نظر می‌رسد در بررسی عمق نوری ذرات تلفیق این دو الگوریتم دچار خطای زیاد برآوردی شده‌اند و در هر دو شکل الف و ب، مقادیر عمق نوری ذرات را در نیمه‌ی شرقی ایران بسیار بالا نشان می‌دهند.

شکل ۸ خروجی مدل HYSPLIT را به روش پیشرو و به مدت ۴۸ ساعت از ساعت ۱۲ UTC روز ۲۶ آوریل ۲۰۱۷ در منطقه هامون و در ارتفاع ۲۰۰ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که خروجی مدل نشان می‌دهد، باد غالب در مدت توفان خاک شمال‌غربی بوده و ذرات گردوخاک برخاسته از این منطقه را به بخش‌هایی از کشور افغانستان، پاکستان، هند و دریای سیاه منتقل کرده است. همچنین بخشی از این ذرات به دلیل بادهای شمالی، به نواحی جنوب‌شرقی ایران منتقل شده‌اند و این مناطق را تحت تاثیر توفان خاک قرار داده‌اند. یارمرادی و همکاران (۱۳۹۸) با اجرای این مدل به تعیین منابع گردوغبار و چگونگی حرکت آن‌ها بر فراز

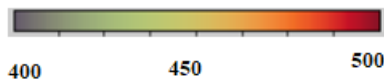
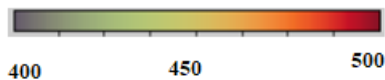


(الف)

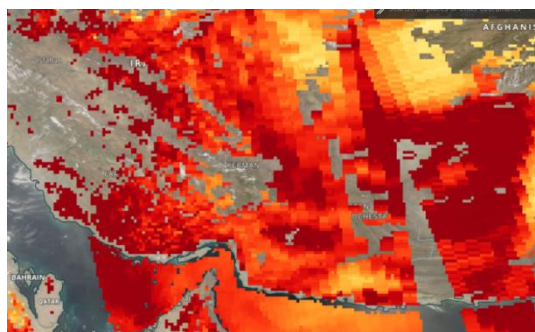
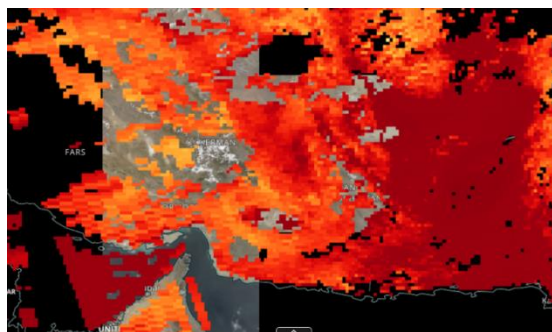
(الف)

(ب)

(ب)

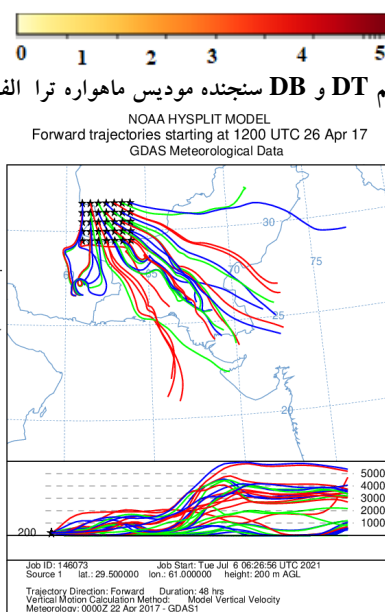


شکل ۶- تصاویر RGB ماهواره MSG (الف) ۲۷ آوریل (ب) ۲۸ آوریل ۲۰۱۷

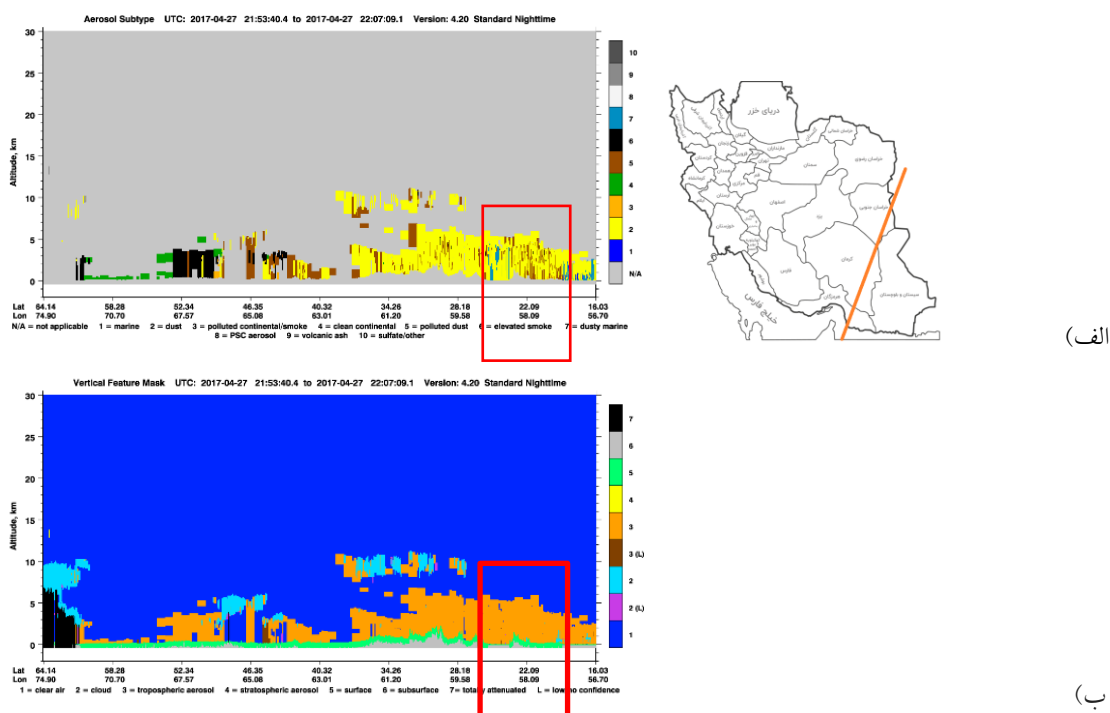


(الف) (ب)

شکل ۷- عمق نوری ذرات الگوریتم DT و DB سنجنده مودیس ماهواره ترا (الف) ۲۷ آوریل (ب) ۲۸ آوریل ۲۰۱۷



شکل ۸- خروجی مدل HYSPLIT به روش پیشرو به مدت ۴۸ ساعت در ساعت 12 UTC روز ۲۶ آوریل ۲۰۱۷



شکل ۹- الف- مسیر ماهواره کالیپسو و دسته‌بندی ذرات. ب- پروفایل قائم ذرات در روز ۲۷ آوریل ۲۰۱۷ بین ساعت ۲۱:۵۳ UTC و ۲۲:۰۷ UTC

روز ۲۸ آوریل کاسته شده است. اما دو مدل مقادیر غلظت سطحی گردو خاک را بسیار متفاوت از یکدیگر برآورد کرده‌اند و مدل WRF-Chem غلظت سطحی گردو خاک را بسیار بیشتر از مدل MERRA2 برآورد کرده است. همچنین مدل WRF-Chem غلظت گردو خاک سطحی را

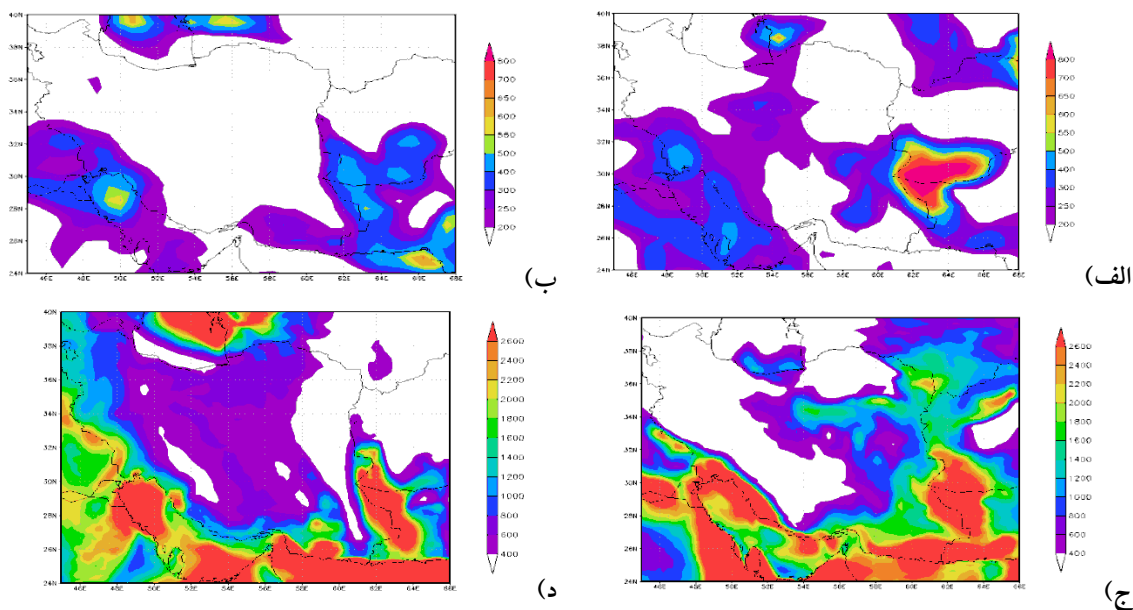
شکل ۱۰ خروجی مدل‌های MERRA2<sup>1</sup> و WRF-Chem را در روزهای ۲۷ و ۲۸ آوریل ۲۰۱۷ را نشان می‌دهند. خروجی دو مدل در دو روز، غلظت بالای گردو خاک در ساعت 09 UTC روز ۲۷ آوریل را نشان می‌دهند که از غلظت PM10 سطحی در 09 UTC

<sup>1</sup> The Modern-Era Retrospective analysis, Version 2

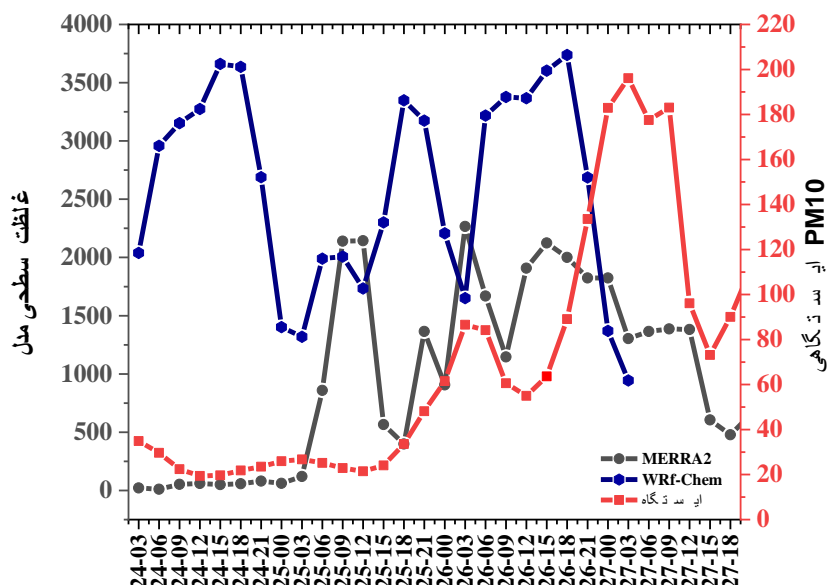
جدول زیر، ضریب همبستگی و خطای میانگین مربعات مربوط به خروجی غلظت PM10 مدل‌های MERRA2 و WRF-Chem و همچنین غلظت PM10 سطحی اندازه‌گیری شده در سازمان حفاظت محیط زیست در ایستگاه‌های زابل و زاهدان را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاهی و مدل WRF-Chem در ایستگاه زابل و مدل MERRA2 در ایستگاه زاهدان در حدود ۰/۳ است که نشانه همبستگی کم بین داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت سطحی و داده‌های خروجی مدل است. اما ضریب همبستگی بین داده‌های غلظت سطحی اندازه‌گیری شده و خروجی مدل MERRA2 در ایستگاه زابل و مدل WRF-Chem در ایستگاه زاهدان، نشان‌دهنده همبستگی متوسط بین داده‌های فوق است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر این دو مدل در این دو ایستگاه در مورد مطالعاتی مورد نظر است. همچنین خطای میانگین مربعات نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل MERRA2 در ایستگاه زاهدان و خطای زیاد برآوردی شدید مدل WRF-Chem در ایستگاه زابل است.

در روی دریای عمان زیاد نشان می‌دهد که در خروجی مدل MERRA2 و تصاویر ماهواره هم مشاهده نمی‌شود.

شکل ۱۱ خروجی غلظت PM10 مدل‌های MERRA2 و WRF-Chem و غلظت سطحی اندازه‌گیری شده ایستگاهی در ایستگاه زابل از ساعت 03UTC روز ۲۴ آوریل تا ساعت 18UTC روز ۲۷ آوریل ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. مقادیر خروجی هر دو مدل بسیار بیشتر از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه زابل است و خروجی PM10 مدل WRF-Chem بیشتر از مدل MERRA2 است. الگوی تغییرات PM10 مدل WRF-Chem شباهت بیشتری با الگوی تغییرات غلظت سطحی گزارش شده ایستگاهی دارد فقط الگوی خروجی مدل کمی جلوتر از داده‌های ایستگاهی است. به نظر می‌رسد داده‌های غلظت سطحی اندازه‌گیری شده در ایستگاه زابل بسیار کم گزارش شده‌اند و در چنین توفان خاک شدیدی، اعداد گزارش شده منطقی به نظر نمی‌رسند.



شکل ۱۰- خروجی غلظت PM10 در ساعت 09UTC الف- روز ۲۷ آوریل مدل MERRA2 (ب) روز ۲۸ آوریل مدل MERRA2 (ج) روز ۲۷ آوریل مدل WRF-Chem (د) روز ۲۸ آوریل سال ۲۰۱۷ مدل WRF-Chem



شکل ۱۱- خروجی غلظت PM10 مدل‌های MERRA2 و WRF-Chem و غلظت سطحی اندازه‌گیری شده ایستگاهی در ایستگاه زابل از ساعت 03UTC روز ۲۴ آوریل تا ساعت 18UTC روز ۲۷ آوریل ۲۰۱۷

جدول ۳. ضریب همبستگی و خطای میانگین مربعات دو مدل WRF-Chem و MERRA2 در دو ایستگاه زابل و زاهدان

مدل	زابل WRF-Chem	زابل MERRA2	زاهدان WRF-Chem	زاهدان MERRA2
ضریب همبستگی با داده‌های ایستگاهی	۰/۳۱	۰/۵	۰/۴۲	۰/۳۳
خطای میانگین مربعات MSE	۴۲۶	۲۳۸	۲۶۴	۴۰

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مورد گردو خاک شدید ۲۶ تا ۲۸ آوریل در منطقه سیستان و دریاچه هامون مورد بررسی قرار گرفته است. در منطقه هامون شدت این توفان تا حدی بود که در بسیاری از ایستگاه‌های منطقه دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده است. منطقه هامون خود به عنوان یکی از چشمه‌های تولید کننده گردو خاک در داخل کشور است. بررسی فوق از آن جهت اهمیت دارد که گردو خاک تولید شده در منطقه اطراف چشمه تولید کننده ذرات خاک را مورد بررسی قرار داده است. در این مورد مطالعاتی، تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مودیس و RGB ماهواره MSG به خوبی توده گردو خاک در منطقه را نشان می‌دهند. استفاده از تصاویر RGB دارای این مزیت است که تعداد زیادی از آن‌ها در یک روز در دسترس هستند، پس به خوبی می‌توان تولید و انتشار توده خاک را مورد بررسی قرار داد. همچنین تصویر

بازتابی تصحیح شده سنجنده مودیس، توده گردو خاک را واضح‌تر نشان داده‌اند. به نظر می‌رسد عمق نوری ذرات با استفاده از الگوریتم DT و DB با قدرت تفکیک ۱۰ کیلومتر، میزان ذرات را بیشتر از مقدار واقعی نشان داده است. همچنین، استفاده از خروجی مدل HYSPLIT به روش پیشرو مناطق تحت تاثیر این توفان خاک را نشان داده است که نشان‌دهنده آن است که باد غالب شمال‌غربی بوده است. مقایسه خروجی مدل WRF-Chem با مدل MERRA2 حاکی از آن است هر دو مدل شدت غلظت سطحی گردو خاک سطحی را در منطقه هامون به خوبی نشان می‌دهند، هر چند مقادیر خروجی مدل WRF-Chem بیشتر از مقادیر غلظت سطحی خروجی مدل MERRA2 است. مقایسه خروجی غلظت سطحی گرد و خاک این دو مدل با غلظت PM10 گزارش شده در ایستگاه زابل، نشان‌دهنده آن است که داده‌های خروجی هر دو مدل، بسیار بیشتر از داده‌های گزارش شده ایستگاهی

- Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 105(D20), 24671–24687.
7. Chen, F., and J. Dudhia, 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), pp.569-585.
  8. Ek, M. B., K.E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno and J.D. Tarpley, 2003, Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
  9. Esmaili, O., M. Tajrishy and P. D. Arasteh, 2006, Evaluation of dust sources in Iran through remote sensing and synoptical analysis. In Atlantic Europe conference on remote imaging and, spectroscopy, pp. 136-43.
  10. Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik and S. J. Lin, 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.106 (D17):20255-73.
  11. Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock and B. Eder, 2005, fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), pp. 6957-6975.
  12. Goudie, A. S, 2019, Dust Storm and Human Health. *Extreme Weather Events and Human Health*, pp 13-24, springer link.
  13. Grasso, L., D. Bikos, J. Torres, J. F. Dostalek, T. C. Wu, J. Forsythe, H. Q. Cronk, C. J. Seaman, S.D. Miller, E. Berndt and H. G. Weinman, 2021, “Satellite imagery and products of the 16–17 February 2020 Saharan Air Layer dust event over the eastern Atlantic: impacts of water vapor on dust detection and morphology. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(2), pp.1615-1634.
  14. Hamzeh, N.H., Karami, S., Kaskaoutis, D.G., Tegen, I., Moradi, M. and Opp, C., 2021. Atmospheric dynamics and numerical simulations of six frontal dust storms in the Middle East region. *Atmosphere*, 12(1), p.125.
  15. Hogan, T.F., and T. E. Rosmond, 1991, the description of the Navy Operational Global 534 Atmospheric Prediction System's است. به نظر می‌رسد در این مورد مطالعاتی، داده‌های غلظت سطحی گردو خاک داده‌های محیط زیست گزارش شده ایستگاهی بسیار کم اندازه‌گیری شده‌اند، زیرا مقادیر گزارش شده با شدت توفان خاک در تصاویر ماهواره، مدل‌های عددی و دیدافتی گزارش شده ایستگاه‌های هواشناسی توافق ندارد. همچنین در این مورد مطالعاتی، خطای میانگین مربعات مدل MERRA2 در ایستگاه زاهدان کم بوده که نشان دهنده عملکرد قابل قبول این مدل در این ایستگاه در مورد مطالعاتی مذکور است. همچنین خطای MSE مدل WRF-Chem در ایستگاه زاهدان بالا بوده که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف و خطای زیاد برآوردی شدید این مدل در ایستگاه زابل در این مورد مطالعاتی گردو خاک است.

#### منابع

1. Alkhatib, M. Q., S.D. Cabrera, and T. E. Gill, 2012, Automated detection of dust clouds and sources in NOAA-AVHRR satellite imagery. In 2012 IEEE. Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, pp. 97-100.
2. Alizadeh-Choobari, O., P. Zavar-Reza, and A. Sturman, 2014, the “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric research*.143, pp.328-341.
3. Abdolkhani., A., 2019, Detection and zoning of dust masses in southwestern Iran using remote sensing and GIS. Master Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.
4. Bullard, E. J., S. P. Harrison, M. C. Baddock, N. Drake, T.E. Gill, G. McTainsh, Y. Sun, 2011, Preferential dust sources: A geomorphological classification designed for use in global dust-cycle models. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface* ,AN AGU JOURNAL, Volume 116, Issue F4.
5. Banks, J.R., K. Schepanski, B. Heinold, Hünerbein, A. and H. E. Brindley, 2018, The influence of dust optical properties on the colour of simulated MSG-SEVIRI Desert Dust infrared imagery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(13), pp.9681-9703.
6. Chin, M., R. B. Rood, S. J. Lin, J. F. Muller, and A. M. Thompson, 2000,

- Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: Forward modeling. *J. Geophys. Res. - Atmos*, 114, D06206, doi: 10.1029/2008JD011235.
25. Middleton, N. J., 2017, Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*, volume 24, pp 53-63, ELSEVIER.
  26. Moridnejad, A., N. Karimi, and P. A. Ariya, 2015, A new inventory for middle east dust source points. *Environmental monitoring and assessment*, 187(9), pp.1-11.
  27. Middleton, N. J., 2017, Desert dust hazards: A global review. *Aeolian research*, 24, pp. 53-63.
  28. Middleton, N., 2019, Visibility and Trends in Dust Storm Frequency on Decadal Timescales: Climatic Drivers and Human Impacts. *Geosciences*. 9(6), 261.
  29. Namdari, S., Kh. Valizadeh Kerman and A. Sorooshian, 2021, Analysis of some factors related to dust storms occurrence in the Sistan region. *Environmental Science and Pollution Research*. Springer link. 28, pp. 45450–45458.
  30. Obukhov, Y.N. and R. Tresguerres, 1993, Hyperfluid—a model of classical matter with hypermomentum. *Physics Letters A*, 184(1), pp. 17-22.
  31. Petzold, A., K. Rasp, B. Weinzierl, M. Esselborn, T. Hamburger and A. Dornbrack, 2009, Saharan dust absorption and refractive index from aircraft-based observation during SAMUM2006. *Journal of Tellus*. 61, pp. 118 - 130.
  32. Rousseau, D. D., D. Duzer, J. L. Etienne, G. Cambon, D. Jolly, J. Ferrier and P. Schevin, 2004, Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 109, D06116, doi: 10.1029/2003JD003985.
  33. Stohl, A., 1998, Computation, accuracy and applications of trajectories - a review and bibliography. *Atmospheric Environment*, 32, pp. 947 - 966.
  34. Shamshiri, S., R. Jafari, S. Soltani and N. Ramezani, 2014, Dust detection and mapping in Kermanshah province using MODIS satellite imagery. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(8), pp. 29-42.
  35. Sharratt, B. and B. Auvermann, 2014, Dust pollution from agriculture. *Encyclopedia of agriculture and food systems*, 2, pp. 487-504.
  36. Wild, O., X. I. N. Zhu and M. J. Prather, 2000, Accurate simulation of in-and below-cloud photolysis in tropospheric chemical spectral forecast model. *Monthly Weather Review*, 119(8), pp.1786-1815.
  16. Hong, S., Y. Noh and J. Dudhia, 2006, a new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.* 134, pp. 2318–2341.
  17. Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. In *The representation of cumulus convection in numerical models*. American Meteorological Society. Boston. MA, pp. 165-170.
  18. Khalesifard, H., and F. Bayat, 2018, CALIPSO RECORDINGS AND MONITORING DUST STORMS OVER THE OPEN SEAS IN SOUTH OF THE IRAN PLATEAU, EPJ Web of Conferences, 176. 05027, ILRC 28.
  19. Karegar, E., N. Hossein Hamzeh, J. Bodagh Jamali, A. Ranjbar Saadat Abadi, M. Moeinaddini and H. Goshtasb, 2019, Numerical simulation of extreme dust storms in east of Iran by the WRF-Chem model, *Natural Hazards*, 99, pp. 769–796.
  20. Kok, J. F., A. A. Adebisi, S. Albani, Y. Balkanski, R. Checa-Garcia, M. Chin, P.R. Colarco, D. S. Hamilton, Y. Huang, A. Ito and M. Klose, 2021, Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), pp. 8169-8193.
  21. Lin, Y. L., R. D Farley and H. D. Orville, 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 22(6), pp. 1065-1092.
  22. Mahowald, N. M., D. R. Muhs, S. Levis, P. J. Rasch, M. Yoshioka, C. S. Zender and C. Luo, 2006, Change in atmospheric mineral aerosols in response to climate: Last glacial period. Preindustrial, modern, and doubled carbon dioxide climates. *J. Geophys. Res.- Atmos*, 111(D10), D10202, doi:10.1029/2005JD006653.
  23. Middleton, N., 2009, *Deserts: a very short introduction*, book. Publisher: Oxford University press, 144pp. DOI:10.1093/actrade/9780199564309.001.0001.
  24. Morcrette, J. J., O. Boucher, L. Jones, D. Salmond, P. Bechtold, A. Beljaars, A. Benedetti, A. Bonet, J. W. Kaiser, M. Razinger, M. Schulz, S. Serrar, A. J. Simmons, M. Sofiev, M. Suttie, A. M. Tompkins and A. Untch, 2009, *Aerosol analysis and forecast in the European*

41. Sobhani, B., B. Salahi and A. Goldoust, 2015, Investigation of dust and evaluation of its predictability based on statistical methods and ANFIS model in Zabol station. *Geography and development*, 38. Pp.123-138.
42. Hamidianpour, M., A. Mofidi and M. Salighe, 2015, Analysis of the nature and structure of Sistan wind. *Iranian Journal of Geophysics*. 10(2), pp. 83-109.
43. Yarmoradi, Z., B. Nasiri, GH. Moammadi and M. Karampour, 2019, Analysis and tracking of dust storm entry routes to eastern Iran using HYSPLIT particle lagrangian distribution model. *Environmental Erosion Research*. 33. (1:9), pp. 27-  
models. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 37(3), pp. 245-282.
37. Wei, T, Zh. Dong, Sh. Kang, X. Qin and Zh. Guo, 2017, Geochemical evidence for sources of surface dust deposited on the Laohugou glacier, Qilian mountains, Volume 79, Pages 1-8.
38. WMO Airborne dust bulletin. No.1, 2017.
39. Zhang, M., B. Huang and Q. He, 2017, An evaluation of four MODIS collection 6 aerosol products in a humid subtropical region. *Remote Sensing*, 9(11), p. 1173.
40. Schlesinger, P., Y. Mamane and I. Grishkan, 2006, Transport of microorganisms to Israel during Saharan dust events. *Aerobiologia*, 22(4), p. 259.