

## شبیه‌سازی پدیده گردو خاک در منطقه غرب و جنوب غرب کشور در یک مطالعه موردی با مدل‌های WRF/CHEM و EURAD

نسیم حسین حمزه<sup>۱\*</sup>، عباس رنجبر سعادت‌آبادی<sup>۲</sup>، ابراهیم فتاحی<sup>۲</sup>، پروین غفاریان<sup>۳</sup>، مجتبی ذوالجودی<sup>۳</sup>

\*- دانشجوی دکتری، رشته هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی تهران

۲- دانشیار گروه هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی تهران

۳- استادیار هواشناسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی تهران

تاریخ وصول: ۱۳۹۶/۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۸

### چکیده

یکی از مشکلات زیست محیطی کشور ما، وقوع رخداد توفانهای گردو خاک به‌ویژه در استانهای غرب و جنوب غربی کشور است. این مطالعه، به بررسی توفان شدید ۹ تا ۱۲ شهریور ۱۳۹۴ می‌پردازد که بخش وسیعی از کشور را تحت تاثیر قرار داد. بررسی حداقل دید افقی نشان‌دهنده کاهش شدید دید در سراسر ایران به‌ویژه غرب و جنوب غربی کشور است. بررسی‌های همدیدی نشان می‌دهد که وجود کم فشار دینامیکی بر روی کشورهای سوریه و عراق سبب وزش باد شدید در بیابانهای واقع در شرق کشور سوریه و کشور عراق و گسیل گردو خاک می‌شود. از طرف دیگر در سطوح بالا به دلیل وجود یک ناه عمیق در منطقه، گردو خاک تا ارتفاعات بالاتر جوی منتقل شده و توسط بادهای غرب و شمال غربی به داخل ایران وارد شده است. مقادیر مثبت تاوایی نسبی در کشور سوریه و شمال غربی عراق، نشان‌دهنده وجود حرکات صعودی در این منطقه است. خروجی مدل HYSPLIT و تصاویر ماهواره‌ای EUMETSAT نیز چشمه گسیل گردو خاک را در کشور سوریه نشان می‌دهد. خروجی مدل WRF-Chem برای غلظت ذرات گردو خاک نیز شروع گسیل از شرق سوریه و به تدریج انتقال آن به سمت غرب و جنوب غربی و نفوذ آن به مناطق مرزی ایران را به خوبی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل WRF-Chem به خوبی چشمه گسیل، روند افزایش گردو خاک و روز حداکثر گردو خاک را نشان می‌دهد. خروجی غلظت مدل EURAD نشان‌دهنده آن است که گردو خاک از چشمه‌های داخلی نشأت گرفته است که با مدل WRF-Chem و تصاویر ماهواره همخوانی ندارد. این مدل الگوی گردو خاک را به خوبی در غرب و جنوب غربی نشان نمی‌دهد.

**واژگان کلیدی:** توفان گردو خاک، مدل WRF-Chem، مدل EURAD، تصاویر ماهواره، غلظت گردو خاک، دید افقی.

**مقدمه:**

مطالعه موردی شمال‌غرب کشور چین در تاریخ آوریل ۲۰۰۷، میل و همکاران (2014) در بررسی توفان منطقه مولتان پاکستان، الوستا و همکاران (۲۰۱۳) بر روی صحرای آفریقا و صحت کاشانی و همکاران (۱۳۹۵) و (۲۰۱۶) که به مطالعه کیفیت هوا در مناطق غرب و جنوب غرب کشور با استفاده از محصولا ضخامت نوری سنجنده مادیس و ارائه معادله تجربی برای تخمین عمق نوری هواویزها در مناطق غرب و جنوب غرب پرداختند و یا خوش‌سیما و همکاران (۱۳۹۲) که به تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش از دور برای زنجان پرداختند. همچنین در مقالات بسیاری از مدل لاگرانژی <sup>۱</sup> HYSPLIT به روش پسرور برای به‌دست آوردن چشمه ذرات گردو خاک استفاده شده است. اشرفی و همکاران (۲۰۱۴) از این مدل برای ردیابی ذرات گردو خاک ۲ مورد توفان گردو خاکی که در ماه می و جون ۲۰۱۰ در شهر اهواز رخ داده است استفاده کرده‌اند. مسیریابی مدل نشان می‌دهد چشمه هر دو مورد بیابانهای شرق سوریه بوده است. خاموشی و همکاران (۲۰۱۶) با کمک مدل HYSPLIT به بررسی چشمه توفان گردو خاکی جون ۲۰۰۸ که در شهرهای شیراز، فسا و بوشهر رخ داده پرداخته‌اند و مدل چشمه این توفان را بیابانهای شرق سوریه و غرب عراق نشان داده است.

مدل‌های زیادی به منظور پیش بینی غلظت ذرات معلق و چگونگی انتشار و نهشت آن‌ها ارائه شده است مانند مدل‌هایی که نیکویک (Nickovic, 2001)، زاکی و همکاران Zakey (et al, 2006)، کلارکو (Colarco, 2009) و دودارد (Woodward, 2001) ارائه دادند. یکی از این مدل‌ها، مدل <sup>۲</sup> EURAD است. این مدل، یک مدل منطقه‌ای برای پیش-بینی آلاینده‌های گازی مانند  $NO_2$ ،  $SO_2$ ،  $O_3$ ،  $CO$  و همچنین  $PM_{10}$  ذرات گردو خاک است. مدل EURAD برای پیش‌بینی آلاینده‌های اصلی جو در قاره اروپا به کار گرفته می‌شود (Jakobs et al, 2005:11). رضازاده و همکاران در سال ۱۳۹۱ مدل <sup>۳</sup> WRF-Chem را با استفاده از داده‌های جدید پوششی سطح که شامل داده‌های بافت گیاهی و

یکی از پدیده‌های مخرب زیست‌محیطی وقوع توفانهای گردو خاک است که سالانه سبب آلودگی هوا، مشکلات تنفسی و وقوع خسارات فراوانی به سیستم حمل‌ونقل عمومی، و غیره می‌شود (Miller et al., 2008). این پدیده به‌خصوص یکی از معضلات منطقه خاورمیانه است که بخش عمده‌ای از مناطق تولیدکننده گردو خاک در این منطقه قرار گرفته‌اند (Hamidi et al., 2012). صحرای واقع در کشور سوریه، صحرای نفود واقع در شمال شبه جزیره عربستان و جنوب عراق مهمترین منابع تولیدکننده گردو خاک هستند (Shoa et al., 2011). همچنین صحرای واقع در کشور سودان که یکی از منابع اصلی تولیدکننده گردو خاک است در نزدیکی منطقه خاورمیانه قرار دارد (Prospero et al., 2003) کشور ما نیز به علت قرار گرفتن در منطقه خاورمیانه، از این قاعده مستثنی نبوده و تحت‌تاثیر الگوهای همدیدی حاکم بر منطقه است. وجود چشمه‌های گردو خاک در کشورهای اطراف ایران، موجب ایجاد توفانهای گردو خاکی در منطقه و ورود این توفانها به کشورمان شده است. این توفانها عمدتاً مناطق غرب و جنوب‌غربی ایران را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند (Hamidi et al., 2012). برخی از چشمه‌های تولیدکننده گردو خاک بیابانهای مرکزی و شرقی ایران هستند که چشمه‌های داخلی گردو خاک محسوب می‌شوند و در سال‌های اخیر به علت خشکی آب‌وهوا و تغییرات اقلیمی، از نظر تعداد و وسعت در حال افزایش هستند (بحیرایی و همکاران، ۱۳۹۰).

بررسی همدیدی توفانهای گردو خاک روشی متداول برای بررسی آنهاست که در سالهای اخیر به‌طور وسیعی توسط پژوهشگران صورت گرفته است، از جمله آنها می‌توان به بررسی‌های ذوالفقاری و همکاران (۱۳۸۴)، رنجبر و همکاران (۱۳۹۵) و حسین‌حمزه و همکاران (۱۳۹۵) بر روی منطقه غرب و جنوب‌غرب کشور اشاره کرد. همچنین توفانهای گردو خاک با کمک تصاویر ماهواره مودیس مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توان به مطالعات می و همکاران (2006) در

### 3. The Weather Research and Forecasting Model Chemistry

### 1. The Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model

### 2. European Air Pollution Dispersion Model

که در رابطه (۱)  $\xi_{rel}$  مولفه قائم‌تاوایی نسبی،  $\alpha$  مولفه مداری میدان باد و  $\gamma$  مولفه نصف‌النهاری میدان باد می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های دید افقی سازمان هواشناسی با بازه زمانی ۳ ساعته به منظور بررسی شدت توفان گردوخاک در ۵ شهر آبادان، اهواز و دزفول از استان خوزستان، شهر ایلام از استان ایلام و شهر بوشهر از استان بوشهر استفاده شده است. همچنین داده‌های غلظت PM10 سازمان محیط زیست کشور که به صورت ساعتی و روزانه در دسترس می‌باشند، به منظور بررسی خروجی‌های مدل‌ها به کار گرفته شده است. خروجی نهشت گرانثی گردوخاک مدل WRF/CHEM نیز رسم شده است. نهشت گرانثی میزان نهشت گردوخاک در هر ثانیه بر هر مترمربع سطح را نشان می‌دهد.

اطلاعات کامل در ارتباط با مدل WRF-Chem در کارهای گرل و همکاران (Grell et al, 2005:11) و فست و همکاران (Fast et al, 2006:11) ارائه شده است. در این مطالعه طرحواره گسیل ذرات معلق<sup>۱</sup> GOCART تنها با در نظر گرفتن ذرات معلق گردوخاک، استفاده شده است. این طرحواره، چشمه‌های پتانسیلی گردوخاک را بر پایه کسر قابل فرسایش در نظر می‌گیرد. در این طرحواره ۵ اندازه مختلف برای ذرات خاک با شکل ایده‌ال کروی با سایز ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شعاع‌های موثر ذرات عبارتند از: ۰/۷۳، ۱/۴، ۲/۴، ۴/۵ و ۸ میکرومتر که کلیه محاسبات برای هر یک از آن‌ها انجام می‌شود.

مدل زمان واقعی EURAD، آلودگی جو را از نوامبر ۲۰۰۱ تا کنون به صورت عملیاتی پیش‌بینی می‌کند. این مدل انتقال، دگرگونی و نهشت گردوخاک را در بازه زمانی ۷۲ ساعت پیش‌بینی می‌کند. آلاینده‌هایی که این مدل پیش‌بینی می‌کند شامل CO, PM10, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> و بنزن است. این مدل در دانشگاه کلن آلمان توسعه یافت. مزایای اصلی این مدل در موارد زیر است: انعطاف بسیار زیاد در انتخاب دامنه پیش‌بینی، سازوکار شیمیایی ناهمگن با طیف وسیعی از ذرات و پیش‌بینی با دقت و وضوح بالا در حد نیم‌کره یا یک قاره تا یک منطقه محدود با دقت ۱ کیلومتر را نام برد. مدل EURAD از ۳ مولفه اصلی تشکیل شده است: مدل خرد مقیاس MM5

توپوگرافی منطقه خاورمیانه هستند و به کمک سنجنده مودیس و داده‌های USGS تهیه شده‌اند اجرا کردند و نشان دادند که به کمک داده‌های جدید میزان خطا در شناسایی چشمه‌های گردوخاک و تعیین میزان گسیل و نحوه توزیع غبار کاهش یافت. عطایی و همکاران با استفاده از مدل WRF-Chem اثرات گردوخاک را بر روی تابش در طول-موجهای بلند و کوتاه در سطح زمین و سقف جو مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنان نشان می‌دهد که ذرات گردوخاک در تابشهای طول موج کوتاه باعث سردتر شدن جو می‌شوند اما در تابشهای طول موج بلند موجب گرمتر شدن سامانه جو-زمین می‌شوند. نتیجه نهایی آن که تاثیر سردتر شدن قویتر از گرمتر شدن است و گردوخاک موجب سردتر شدن سامانه جو-زمین می‌شوند.

هدف از این مطالعه، ارائه الگوی همدیدی حاکم بر منطقه در زمان وقوع توفان گردوخاک تابستان ۱۳۹۴ و راستی‌آزمایی مدل‌های WRF-Chem و EURAD در شبیه‌سازی توفان گردوخاک منطقه غرب و جنوب‌غربی کشور است. به منظور بررسی بیشتر برای ارائه نتیجه کلی، تصاویر ماهواره‌ای EUMETSAT و سنجنده مودیس بر روی ماهواره آکوا مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

#### مواد و روش‌ها:

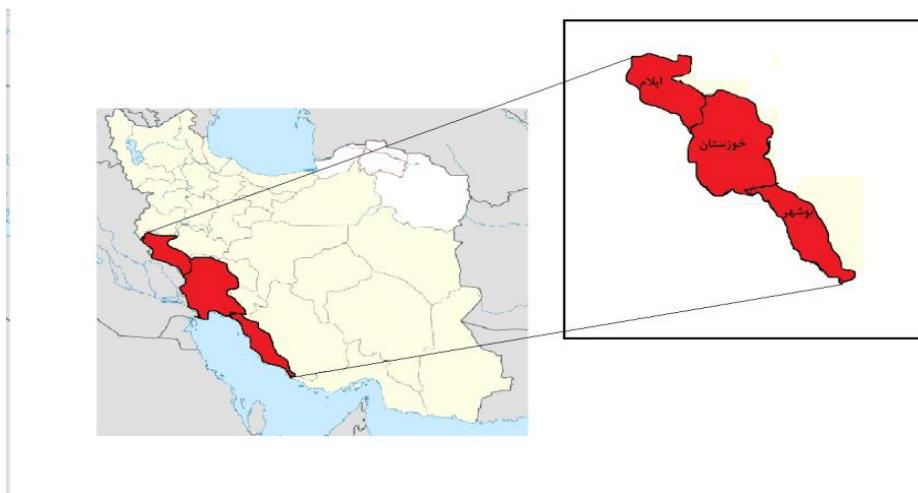
در این مقاله از داده‌های GFS با دقت ۰/۵ درجه به منظور ترسیم نقشه‌های همدیدی و شرایط اولیه و مرزی مدل‌های EURAD و WRF-Chem استفاده شده است. داده‌های GFS مربوط به مراکز ملی پیش‌بینی محیطی-مرکز ملی پژوهش جوی NCEP/NCAR (کالنی و همکاران، ۱۹۹۶) هستند. تعداد زیادی از متغیرهای جوی و خاک مانند دما، باد، رطوبت خاک و غلظت ازن در این داده‌ها وجود دارد. این داده‌ها به صورت عملیاتی توسط هواشناسان برای پیش‌بینی هوا تا ۱۶ روز آینده به کار می‌رود. برای محاسبه مولفه قائم‌تاوایی نسبی مطابق رابطه (۱) از مولفه‌های مداری و نصف-النهاری میدان باد استفاده می‌شود.

$$(1) \quad \xi_{rel} = \hat{k} \cdot (\nabla \times V) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل شهرهای غربی و جنوب‌غربی ایران است. در این میان دید افقی مربوط به ۵ شهر اهواز، آبادان و دزفول از استان خوزستان، شهر بوشهر از استان بوشهر و شهر ایلام از استان ایلام مورد بررسی قرار می‌گیرد.

(Anthes and Warner, 1978; Grell et al., 1994) که متغیرهای هواشناسی را پیش‌بینی می‌کند، مدل گسیل EURAD یعنی EEM (Memmesheimer et al., 1991) که توزیع زمانی و مکانی انتشار آلاینده‌های اصلی را تعیین می‌کند و مدل انتقال شیمی EURAD-CTM که غلظت و نهشت آلاینده‌های اصلی جو را محاسبه می‌کند.

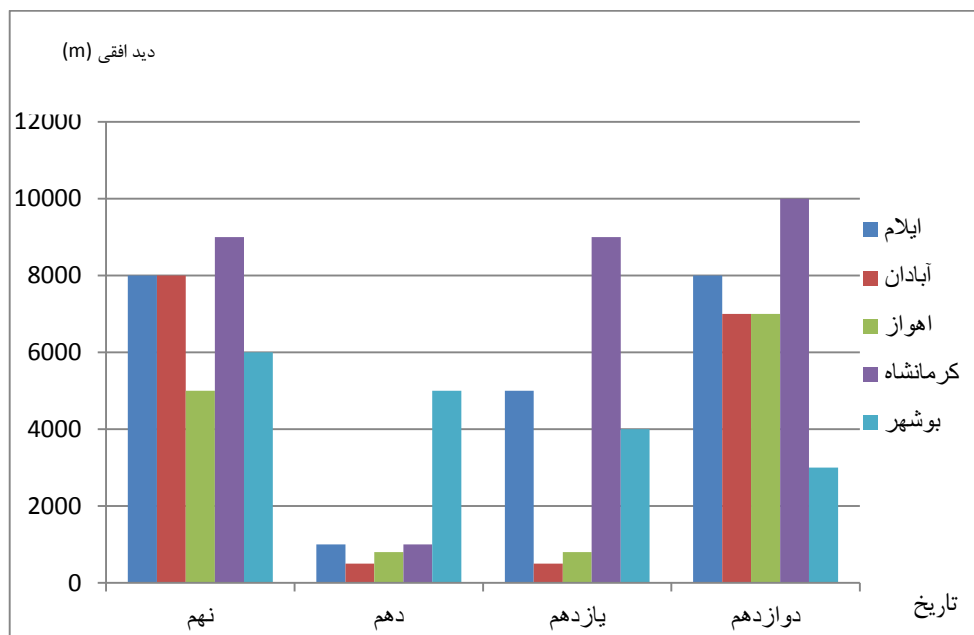


شکل ۱- منطقه مورد مطالعه شامل مناطق غربی و جنوب‌غرب کشور

دید شهر بوشهر رو به کاهش است. در روز ۱۲ شهریور دید افقی در شهرهای غربی افزایش یافته است اما در شهر بوشهر به ۳۰۰۰ متر رسیده است و نسبت به روزهای قبلی کاهش یافته است. به‌طور کلی، دید افقی شهرهای غربی کشور در مدت ۴ روز ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، ولی در شهر بوشهر به علت موقعیت جغرافیایی متفاوت نسبت به ۴ شهر دیگر، دید افقی در مدت ۴ روز در حال کاهش است. ذرات گرد و خاک تولید شده در کشور سوریه و عراق، با تاخیر بیشتری به این شهر می‌رسد.

### نتایج و بحث:

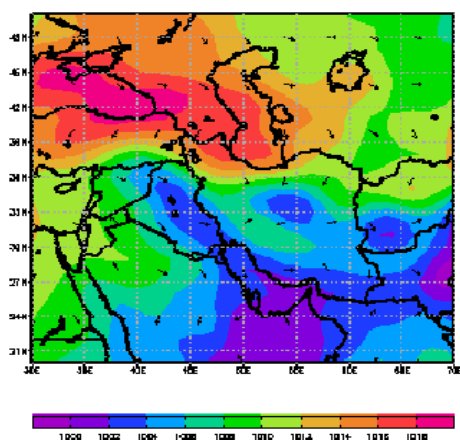
شکل ۲ حداقل دید افقی روزانه ۵ شهر ایلام، آبادان، اهواز، کرمانشاه و بوشهر در تاریخ ۹ تا ۱۲ شهریور را نشان می‌دهد. در روز دهم در هر ۴ شهر غربی ایران دید افقی به زیر ۱۰۰۰ متر می‌رسد، اما در شهر بوشهر در این روز حداقل دید افقی ۵۰۰۰ متر است. در روز ۱۱ شهریور دید افقی در ۲ شهر استان خوزستان همچنان زیر ۱۰۰۰ متر است، اما در شهرهای کرمانشاه و ایلام دید افقی افزایش قابل توجهی یافته است و



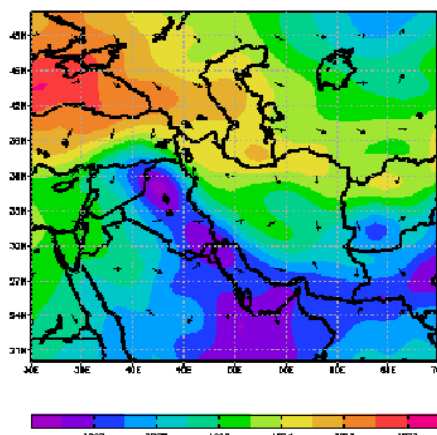
شکل ۲- حداقل دید افقی روزانه برحسب متر در ۵ شهر ایلام، آبادان، اهواز، کرمانشاه و بوشهر بر حسب متر در ۹ تا ۱۲ شهریور ۱۳۹۴

شمال و شمال‌غربی سبب انتقال گردوخاک به مناطق جنوب عراق می‌شود. کم‌فشار گرمایی از سمت جنوب شرقی وارد مناطق جنوب ایران شده و به کم‌فشار دینامیکی واقع بر روی عراق پیوسته است. در روز ۱۰ شهریور (شکل ب) کم‌فشار دینامیکی واقع بر روی عراق تضعیف شده و افت فشار در مناطق مرکزی ایران دیده می‌شود، همچنین پرفشار واقع بر روی دریای سیاه تقویت شده است.

شکل ۳ نقشه میانگین فشار سطح دریا در ساعت ۱۲ UTC روزهای ۹ و ۱۲ شهریور را نشان می‌دهد. در روز ۹ شهریور یک مرکز کم‌فشار دینامیکی بر روی شرق سوریه و عراق واقع شده که سبب گسیل گردوخاک از این مناطق خشک می‌شود. همچنین یک مرکز پرفشار بر روی دریای سیاه واقع شده که زبانه‌های آن از سمت شمال‌غربی وارد ایران شده است. وجود زبانه‌های این دو سامانه سبب وجود گردادگان فشاری شدیدی بر روی عراق و وزش بادهای شدید در این مناطق که مستعد گردوخاک هستند می‌شود. وزش بادهای



(ب)

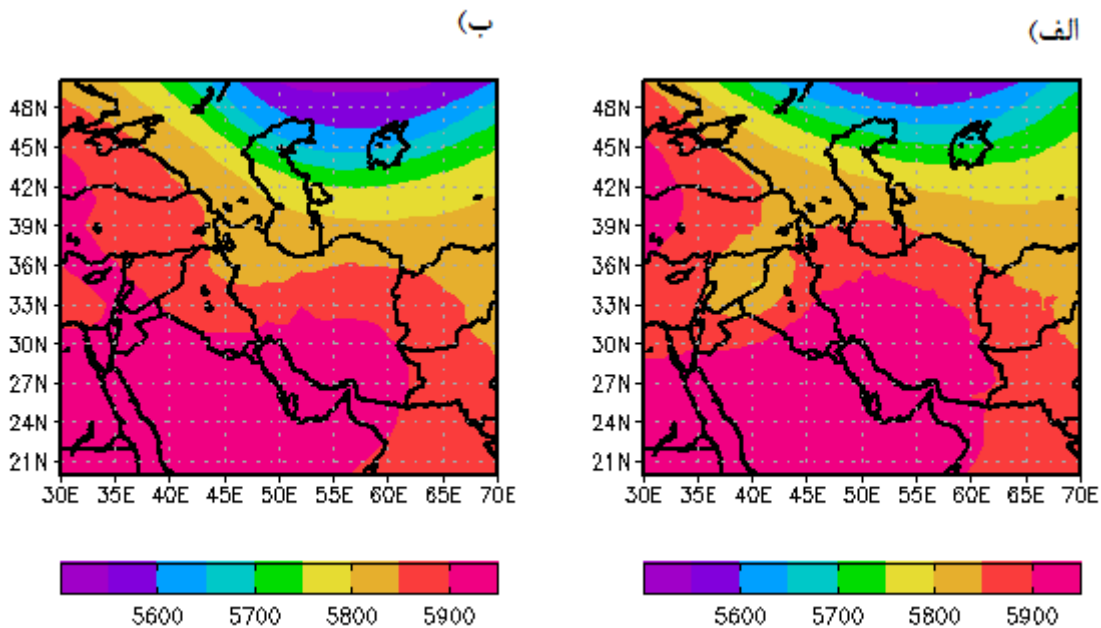


(الف)

شکل ۳- نقشه میانگین فشار سطح زمین بر حسب هکتوپاسکال (hpa) در ساعت روزهای الف) ۹ شهریور ب) ۱۲ شهریور

بر روی عراق تضعیف شده و ناوه روی اروپا پیوسته است. حرکت ناوه به سمت عرضهای پایین‌تر سبب کاهش ارتفاع در نیمه شمالی کشور شده است. سایر مناطق کشور نیز هم-چنان تحت تاثیر پشته هستند.

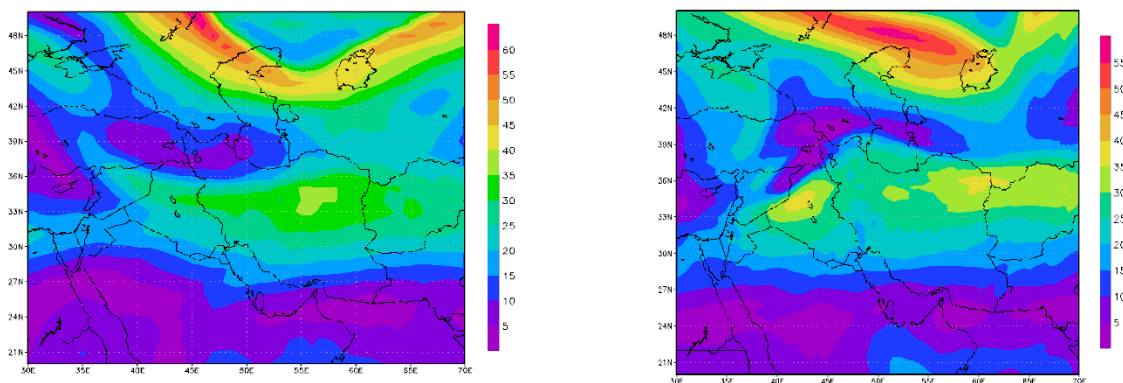
در شکل ۴ میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی روز ۹ و ۱۰ شهریور ساعت ۱۲ رسم شده است. در روز ۹ شهریور ساعت 12 UTC یک مرکز کم‌ارتفاع بر روی عراق و سوریه بالای کم‌فشار سطحی بسته شده است و زبانه‌های کم‌ارتفاع از سمت عربستان وارد ایران شده است و سراسر کشور را دربرگرفته است. در روز ۱۰ شهریور کم‌ارتفاع واقع



شکل ۴- میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی بر حسب متر (m) در الف) ۹ شهریور ب) ۱۰ شهریور ۱۳۹۴

در روز ۱۰ شهریور هسته جت بر روی نواحی مرکزی و شرقی ایران واقع شده است و همچنان به سمت شرق در حال حرکت است و شرایط را برای انتقال گردو خاک تولید شده در کشور عراق و سوریه به کشورمان را فراهم کرده است.

در شکل ۵ مقدار و جهت باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکالی در روزهای برخاستن گردو خاک رسم شده است. در روز ۹ شهریور هسته جت با سرعت ۱۸ متر بر ثانیه به سمت شرق در حال حرکت است و در غرب کشور عراق قرار دارد. در این روز جت دیگری بر روی شرق ایران قرار گرفته است.



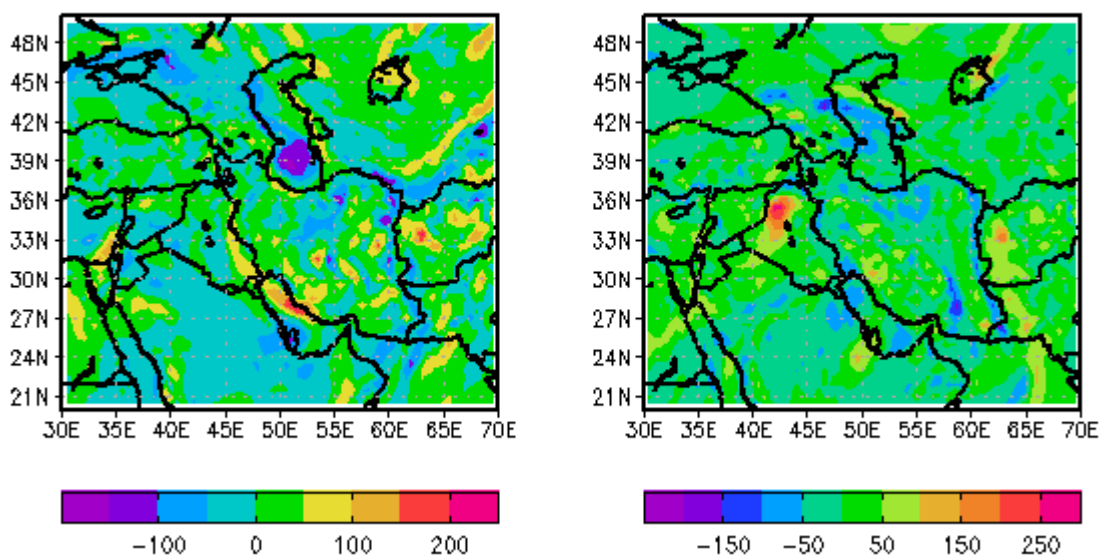
شکل ۵- جت تراز ۳۰۰ هکتوپاسکالی در ساعت ۱۲ روزهای الف) ۹ شهریور ب) ۱۰ شهریور ۱۳۹۴

صعودی و بلند شدن گردوخاک از سطح زمین تا ترازهای بالایی جو است. در روز ۱۰ شهریور مرکز تاوایی مثبت در شمال خلیج فارس مشاهده می‌شود.

شکل ۶ تاوایی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی در ساعت ۱۲ روزهای ۹ و ۱۰ شهریور ۱۳۹۴ نشان می‌دهد. در روز ۹ شهریور مرکز تاوایی مثبت بر روی غرب عراق دارد که نشان دهنده حرکات

(ب)

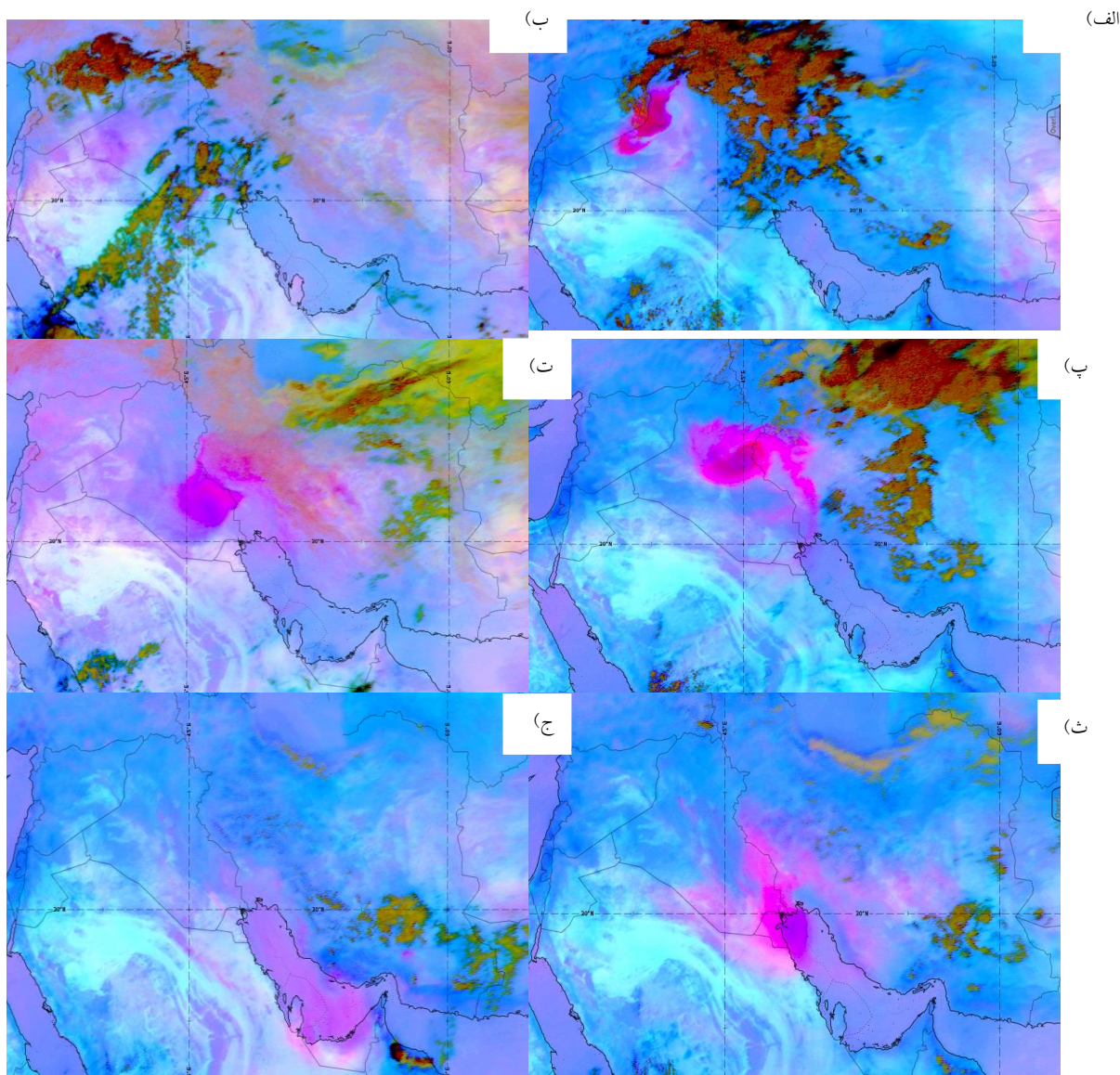
(الف)



شکل ۶- تاوایی نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی برحسب عکس تائیه (1/s) در روزهای ۹ و ۱۰ شهریور ۱۳۹۴ ساعت ۱۲

به توفان گردوخاک جدیدی تزریق می‌شود. در روز ۱۱ شهریور در غرب و جنوب غرب ایران پخش شده است. در روز ۱۲ شهریور اثر آن در غرب کشور به شدت کاهش یافته است و در استان بوشهر و هرمزگان و بر روی خلیج فارس اثر آن مشهود است. تغییرات فوق با دید افقی گزارش شده سازمان هواشناسی کشور هم‌خوانی کامل دارد.

در شکل ۷ تصویر RGB سنجنده MSG در روزهای ۹ تا ۱۲ شهریور ۱۳۹۴ آورده شده است. در روز ۹ شهریور گردوخاک در شرق سوریه و غرب عراق شکل می‌گیرد و در روز ۱۰ شهریور به شهرهای غربی کشور ما رسیده است. در این روز توفان گردوخاک در شرق کشور عراق به دلیل وجود تاوایی مثبت و حرکات صعودی به شدت تقویت می‌شود و

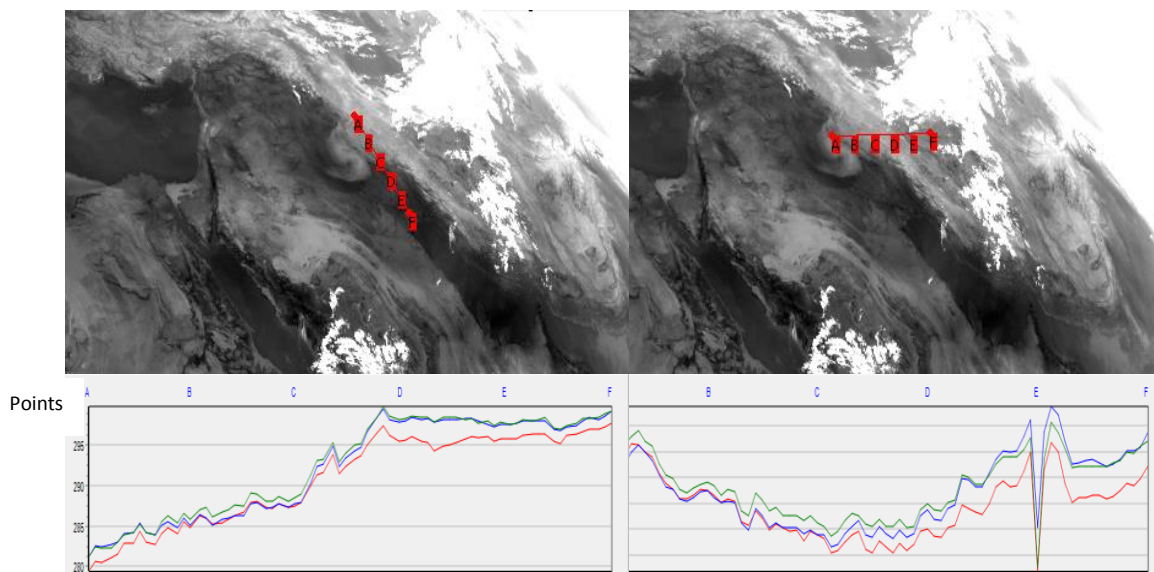


شکل ۷- تصویر ترکیبی RGB سنجنده MSG الف- ۹ شهریور ساعت ۶ ب- ۹ شهریور ساعت ۱۲ پ- ۱۰ شهریور ساعت صفر ت- ۱۰ شهریور ساعت ۱۲ ث- ۱۱ شهریور ساعت ۱۲ ج- ۱۲ شهریور ساعت ۱۲

شکل الف، در نقاط B, C, D گردوخاک وجود دارد، نمودار نشان‌دهنده آن است که ضخامت گردوخاک را در این نقاط زیاد است. در این شکل، در نقاط E و F گردوخاک وجود ندارد. در شکل ب گرد و غبار در نقاط B و C وجود دارد و ضخامت آن نیز زیاد است. اما در نقاط دیگر نمودار گردوخاکی را نشان نمی‌دهد.

شکل ۸ تصویر منطقه خاورمیانه ماهواره METEOSAT 10 در ساعت ۱۸ را نشان می‌دهد. نقاط روی شکل به منظور بررسی گردوخاک در روی شکل انتخاب شده‌اند. خط سبز کانال ۱۰ ماهواره یعنی طول موج ۱۲ میکرومتر است. خط قرمز نشان‌دهنده کانال ۷ یعنی طول موج ۸/۷ میکرومتر و خط آبی کانال ۹ این ماهواره و طول موج ۱۰/۸ میکرومتر است. در





Sun radiation absorption

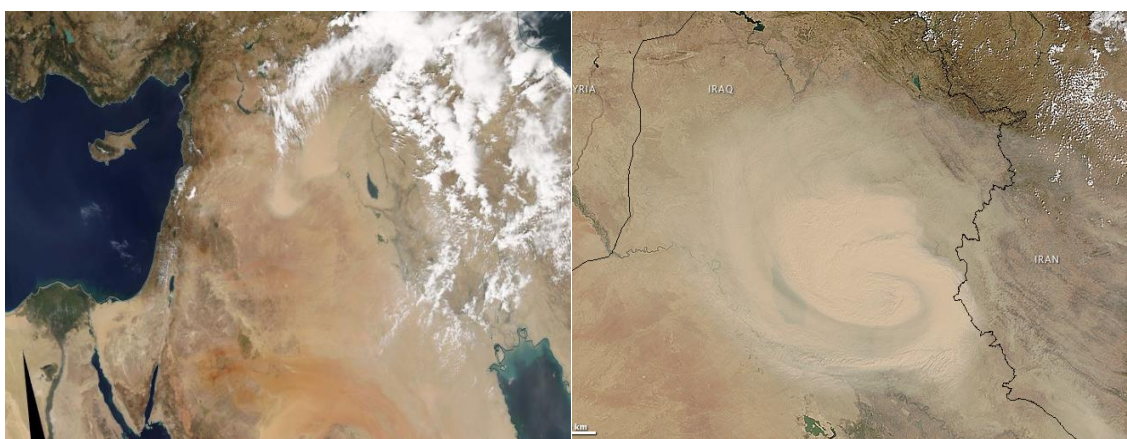
شکل ۸- تصویر خاورمیانه ماهواره METEOSAT10 ۱۰ شهریور ساعت ۱۸ خط سبز طول موج ۱۲ میکرومتر خط قرمز طول موج ۸/۷ میکرومتر و خط آبی طول موج ۱۰/۸ میکرومتر

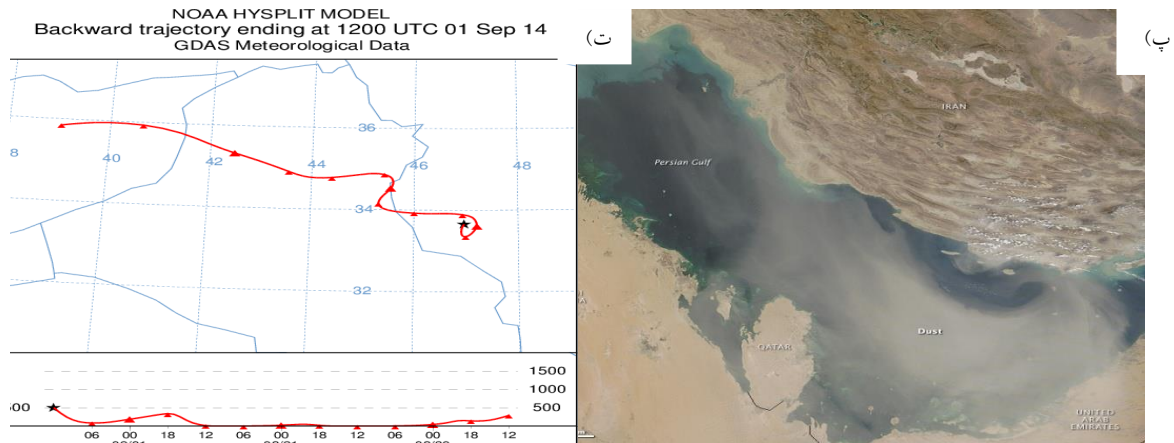
مودیس با داده‌های دید افقی سازمان هواشناسی کشور و تصاویر گردوخاک ماهواره‌ای EUMETSAT منطبق است. در شکل ۸ ت مدل لاگرانژی HYSPLIT به روش پس‌رو (Backward) اجرا شده است. شهر مورد بررسی ایلام در نظر گرفته شده است و مدل چشمه تولید گردوخاک را کشور سوریه نشان می‌دهد.

شکل ۹ تصویر سنجنده مودیس برای روی ماهواره آکوا را در روزهای ۱۰ تا ۱۲ شهریور را نشان می‌دهد. در روز دهم توفان گردوخاک با حرکت و اچرخند به مرزهای شرقی ایران رسیده است. در روز ۱۱ شهریور گردوخاک بر شهرهای غربی کشورمان گسترده شده است و در روز ۱۲ شهریور گردوخاک بر روی خلیج فارس و شهرهای ساحلی جنوب و جنوب‌غربی گسترده شده است و از شدت آن کاسته شده است. تصاویر

(ب)

(الف)

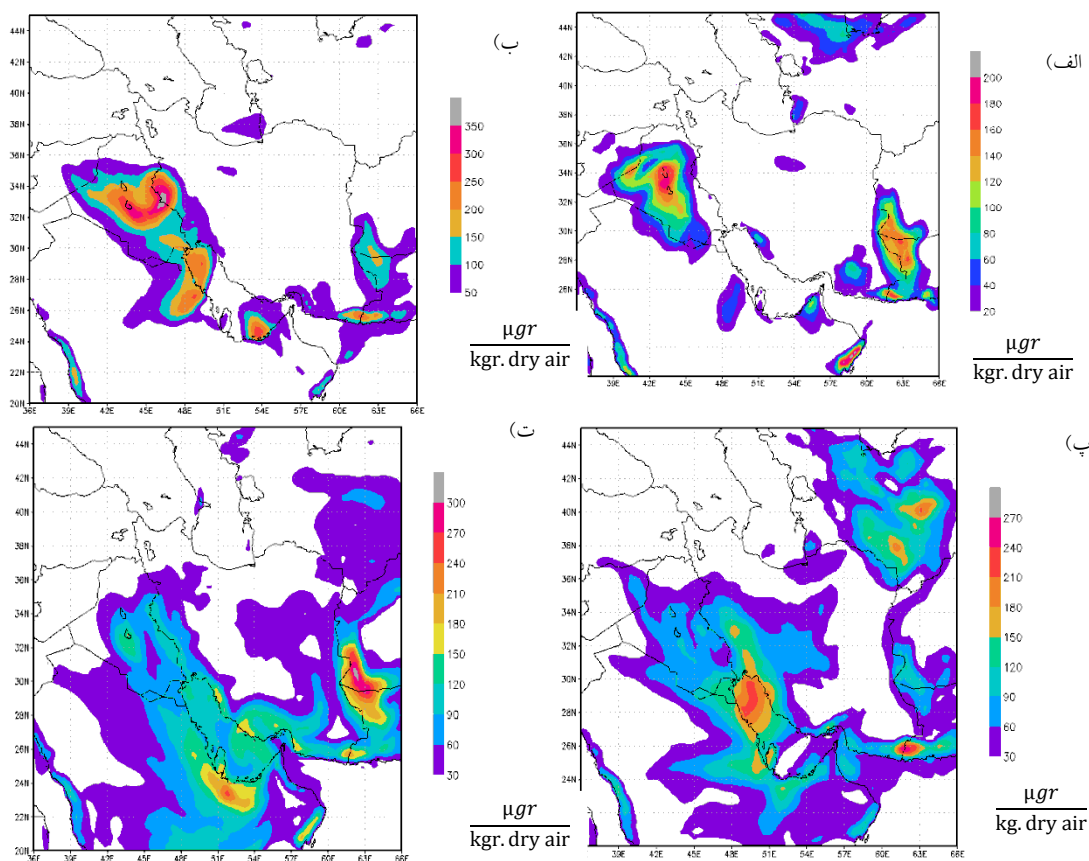




شکل ۹- تصویر مودیس روی ماهواره آکوا برای روزهای الف) ۱۰ شهریور ب) ۱۱ شهریور پ) ۱۲ شهریور ت) اجرای مدل HYSPLIT به روش Backward در روز ۱ سپتامبر (۱۰ شهریور)

گردوخاک بر روی خلیج فارس و استان خوزستان قرار گرفته است که با داده‌های دید افقی همخوانی دارد. در این روز دید افقی در شهرهای ایلام و کرمانشاه افزایش داشته است که با خروجی مدل همخوانی دارد. در روز ۱۲ شهریور از شدت گردوخاک کاسته شده است اما محدوده وسیعتری از کشورمان تحت تاثیر این توفان قرار گرفته است. در این روز، گردوخاک استان بوشهر را بیشتر تحت تاثیر قرار داده است که مدل به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد.

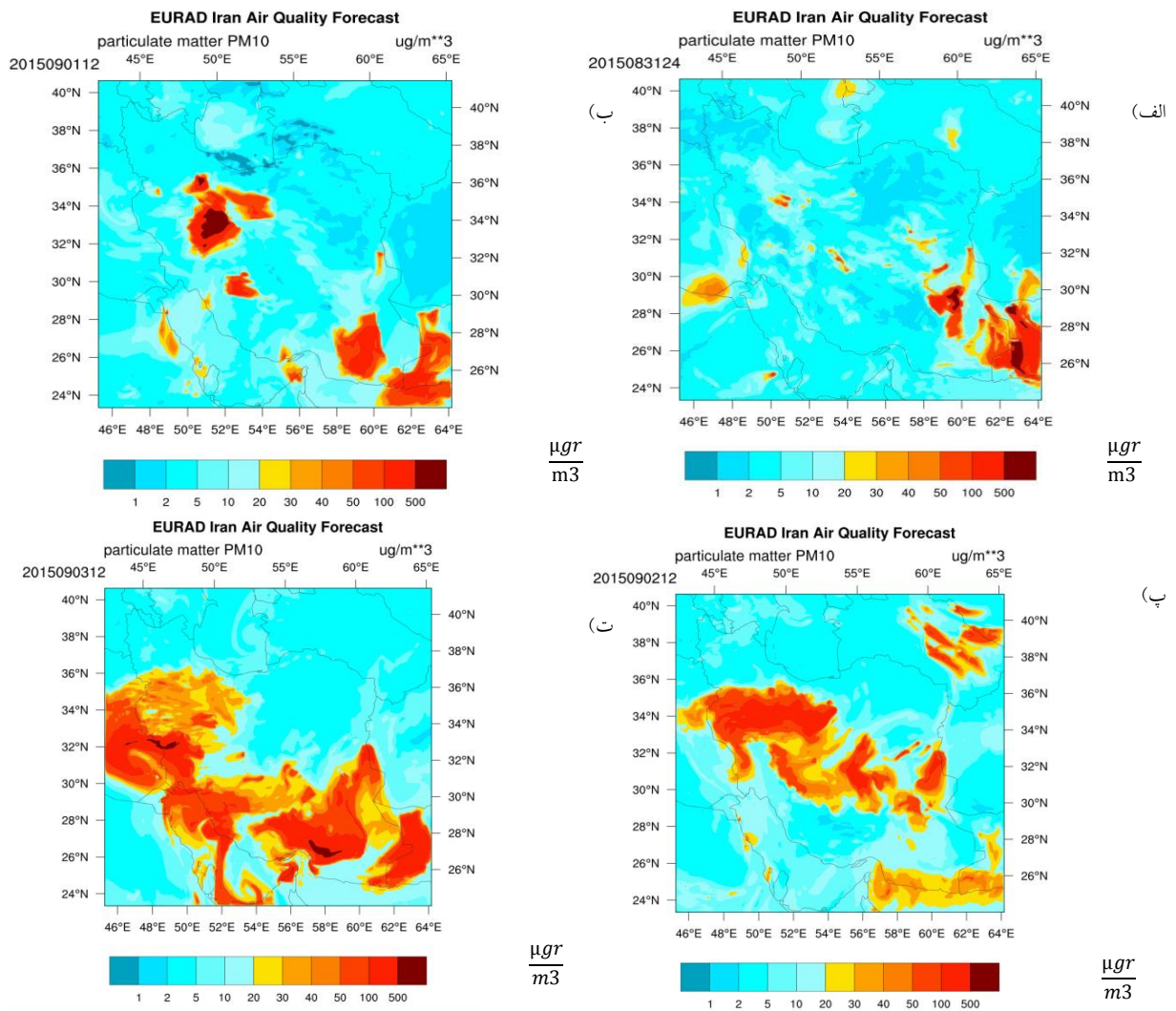
شکل ۱۰ خروجی PM10 مدل WRF-CHEM برای ساعت ۱۲ روزهای ۹ تا ۱۲ شهریور سال ۱۳۹۴ را نشان می‌دهد. در روز ۹ شهریور، گردوخاک تولید شده در کشور عراق و سوریه به مرزهای غربی کشورمان نزدیک شده است. در روز دهم گردوخاک وارد ایران شده است و شهرهای غربی و جنوب غربی ایران را تحت تاثیر قرار داده است. طبق برآورد مدل، بیشینه گردوخاک در استان ایلام و کرمانشاه و تا حدودی استان خوزستان است. در روز یازدهم بیشینه



شکل ۱۰- نقشه غلظت  $PM_{10}$  گردوخاک خروجی WRF-CHEM برحسب میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک ساعت ۱۲ در روزهای الف) ۹ شهریور ب) ۱۰ شهریور پ) ۱۱ شهریور ت) ۱۲ شهریور سال ۱۳۹۴

روز ۱۱ شهریور این گردوخاک در نواحی مرکزی و غربی ایران پخش شده است و انتشار آن را در استانهای کرمانشاه، ایلام و خوزستان نشان می‌دهد. در روز ۱۲ شهریور گردوخاک در استانهای غربی و جنوب‌غربی پخش شده است و خلیج فارس و استان بوشهر را نیز دربرگرفته است.

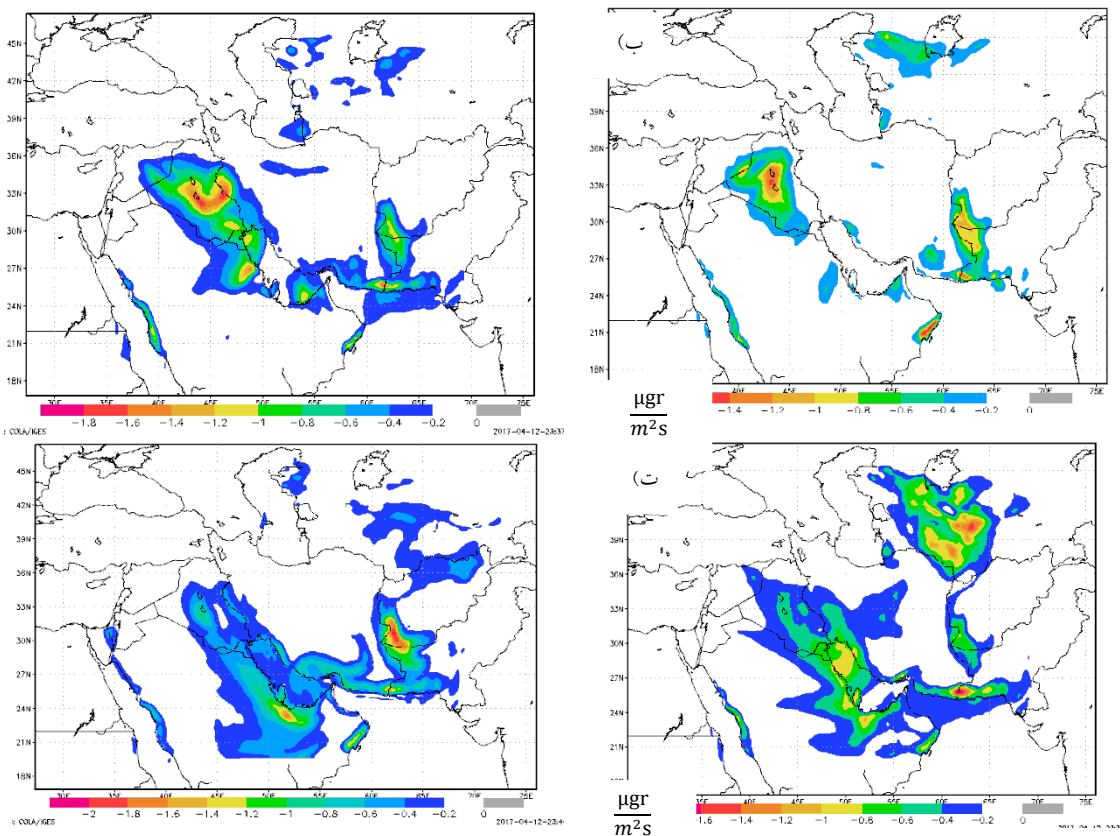
شکل ۱۱ خروجی  $PM_{10}$  مدل EURAD را برای ساعت ۱۲ روزهای ۹ تا ۱۲ شهریور ۱۳۹۴ نشان می‌دهد. در روز ۹ شهریور هیچ گردوخاکی بر روی غرب و مرکز ایران وجود ندارد. در روز دهم گردوخاک در مرکز ایران تولیدشده و شروع به انتشار در نواحی مرکزی و غربی ایران می‌کند. در



شکل ۱۱- نقشه غلظت PM10 گردو خاک خروجی EURAD برحسب میکروگرم بر متر مکعب ساعت ۱۲ در روزهای (الف) ۹ شهریور (ب) ۱۰ شهریور (پ) ۱۱ شهریور (ت) ۱۲ شهریور سال ۱۳۹۴

بوشهر و هرمزگان نیز تحت تاثیر گردو خاک قرار گرفته‌اند. در روز ۱۲ تاثیر توفان بازم کاهش یافته و نهشت گرانشی کمتری در شهرهای غربی و جنوب غربی رخ داده است. همچنین منطقه‌ای که تحت تاثیر نهشت گردو خاک است کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲ نهشت گرانشی کل خروجی مدل WRF-CHEM در ساعتهای ۱۲ روزهای ۱۱ و ۱۲ را نشان می‌دهد. در روز ۱۱ شهریورماه از شدت نهشت گردو خاک کاسته شده است اما در منطقه وسیعتری از کشورمان گسترده شده است. در این روز خلیج فارس و استانهای هم‌جوار آن یعنی استانهای



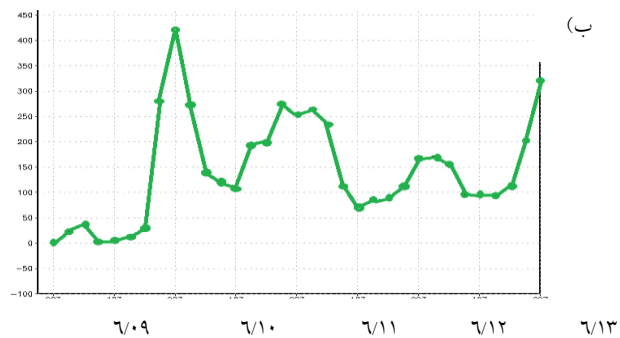
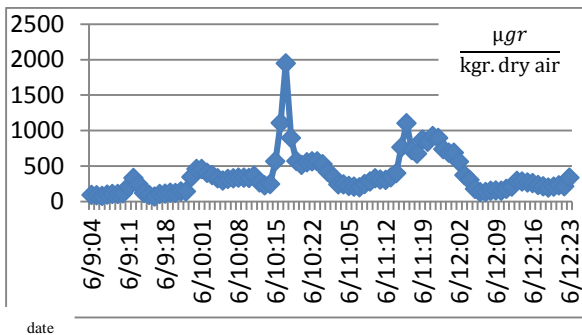
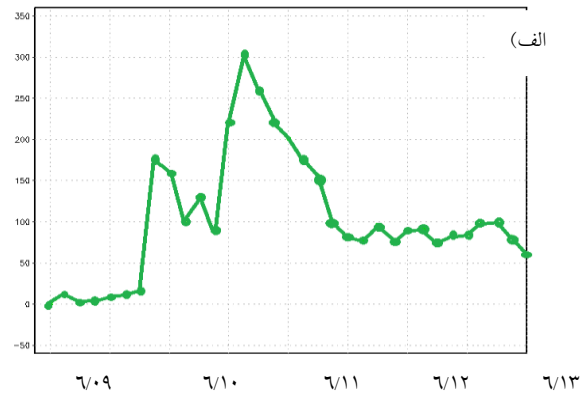
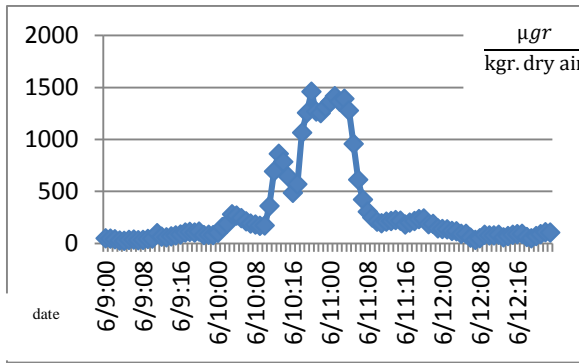
(الف)

(ب)

شکل ۱۲- نهشت گرانثی کل گردو خاک خروجی مدل WRF-CHEM در ساعت‌های ۱۲ روزهای ۱۰ تا ۱۳ شهریور ۱۳۹۴

ج و د نمودار خروجی مدل WRF-CHEM و داده های PM10 گرفته شده از سازمان محیط زیست کشور در روزهای این توفان گردو خاک برای شهر اهواز را نشان می‌دهد. مانند شهر ایلام که روند تغییرات غلظت گردو خاک برای هر دو نمودار مانند هم است و نشان می‌دهد مدل WRF-CHEM به خوبی تغییرات غلظت را برآورد کرده است. اما مقدار حداکثر گردو خاک توسط مدل بسیار کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده سازمان محیط زیست است. داده‌های سازمان محیط زیست کشور حداکثر غلظت گردو خاک را ۲۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک نشان می‌دهد در حالی که مدل WRF-CHEM این مقدار را ۴۲۰ میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک برآورد می‌کند.

شکل ۱۳ الف و ب نمودار PM10 خروجی مدل WRF-CHEM و داده های PM10 گرفته شده از سازمان محیط زیست کشور در روزهای این توفان گردو خاک برای شهر ایلام را نشان می‌دهد. جالب آن است که روند تغییرات غلظت گردو خاک برای هر دو نمودار مانند هم است و نشان می‌دهد مدل WRF-CHEM به خوبی تغییرات غلظت را برآورد کرده است. اما مقدار حداکثر گردو خاک توسط مدل بسیار کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده سازمان محیط زیست است. داده‌های سازمان محیط زیست کشور حداکثر غلظت گردو خاک را ۱۴۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک نشان می‌دهد در حالی که مدل WRF-CHEM این مقدار را ۳۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک برآورد می‌کند. شکل ۱۳



شکل ۱۳- سری زمانی داده‌های PM10 خروجی مدل WRF/CHEM و سازمان محیط زیست کشور بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم هوای خشک برای شهر الف (ایلام ب) اهواز

در جدول ۱ داده‌های PM10 خروجی مدل و سازمان محیط زیست کشور در شهر ایلام بین تاریخهای ۱۰ تا ۱۳ شهریور ۱۳۹۴ ذکر شده است. همبستگی داده‌ها ۰/۶۶ است که نشان‌دهنده همبستگی بالای این داده‌ها است و نشان می‌دهد مدل WRF/CHEM به خوبی روند تغییرات گردو خاک را پیش بینی کرده است.

جدول ۱: مقایسه داده‌های PM10 خروجی مدل (سطر دوم) و سازمان محیط زیست کشور (سطر سوم)

در شهر ایلام از ۱۰ تا ۱۳ شهریور ۱۳۹۴

۱۳۹/۰۶/۱۰:۰۰	۱۳۹/۰۶/۱۰:۱۲	۱۳۹/۰۶/۱۱:۰۰	۱۳۹/۰۶/۱۱:۱۲	۱۳۹/۰۶/۱۲:۰۰	۱۳۹/۰۶/۱۲:۱۲	۱۳۹/۰۶/۱۳:۰۰
۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۱۸۱	۳۲۱/۸	۲۴۳/۲۸	۸۲/۸	۱۴۸/۸	۹۷/۲	۱۷۱/۵
۱۰۱	۶۹۲	۱۳۶۱	۲۰۸	۱۳۷	۷۶	۹۵

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا داده‌های دید افقی ایستگاه‌های هم‌مدیدی سازمان هواشناسی کشور در ۵ شهر غرب و جنوب‌غربی ایران، در زمان وقوع توفان گردو خاک ۹ تا

۱۲ شهریور ۱۳۹۴ مورد بررسی قرار گرفت. این داده‌ها نشان می‌دهند که در شهرهای غربی در روز ۱۰ شهریور دید افقی به زیر ۱۰۰۰ متر رسیده است. در روز ۱۱ شهریور دید افقی در شهرهای استان خوزستان مانند

اهواز و آبادان دید افقی زیر ۱۰۰۰ متر مانده است اما در شهرهای ایلام و کرمانشاه دید افقی به بالاتر از ۴ کیلومتر افزایش یافته است. در روز ۱۲ شهریور در استانهای غربی و خوزستان دید افقی بیشتر از ۶ کیلومتر شده است اما دید افقی در شهر بوشهر از روز ۹ تا ۱۲ شهریور در حال کاهش است که ضمن توافق با خروجی مدل WRF/CHEM و تصاویر ماهواره، نشاندهنده رسیدن توفان گردوخاک به این شهر است. تحلیل همدیدی نشان می‌دهد که الگوهای غالب در زمان وقوع این توفان عبارتند از: در نقشه فشار سطح دریا یک سامانه کم‌فشار بر روی دریای عمان قرار گرفته که زبانه‌های آن تا شمال غرب ایران و کشور ترکیه کشیده شده است. از طرف دیگر یک مرکز پرفشار بر روی اروپا واقع شده که تا شرق مدیترانه را دربر گرفته است. بنابراین گرادیان فشاری شدیدی بر روی کشورهای عراق و سوریه برقرار شده که منجر به وزش بادهای شدید و ورود گردوخاک به داخل ایران می‌شود. همچنین وجود یک مرکز کم‌فشار دینامیکی بر روی شرق سوریه و عراق واقع شده که سبب گسیل گردوخاک از این مناطق خشک می‌شود. در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی، یک پشته بر روی ایران واقع شده که کشورهای عراق و سوریه در پشت محور آن قرار گرفته‌اند، در نتیجه وجود حرکات صعودی در این مناطق سبب نفوذ گردوخاک تا ترازهای بالاتر جوی و انتقال آن تا مسافت بیشتر می‌شود. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکالی، وجود یک جت با هسته ۱۸m/s در روزهای ۱۰ و ۱۱ شهریور موجب انتقال گردوخاک به داخل ایران می‌شود. مولفه قائم تاوایی نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی در روز ۹ شهریور، نشاندهنده تاوایی مثبت بر روی غرب کشور عراق است که نشان‌دهنده حرکات صعودی است و بر روی نواحی غرب و جنوب‌غرب ایران و خلیج-فارس این مقادیر منفی است که بیانگر حرکات نزولی و نهشت گردوخاک در این مناطق است. بررسی تصاویر RGB ماهواره ای EUMETSAT به خوبی تشکیل توفان

گردوخاک در روز ۹ شهریور و ورود آن به ایران از سمت استانهای غربی را در روز ۱۰ شهریور نشان می‌دهد. در روز ۱۱ شهریور این توفان گردوخاک استانهای غربی و جنوب-غربی را تحت تاثیر قرار داده است اما در روز ۱۲ شهریور اثر توفان بر روی کشور از بین رفته است و ذرات گردوخاک بر روی خلیج‌فارس و استانهای هم‌جوار آن پخش شده است. تصاویر سنجنده مودیس بر روی ماهواره آکوا به خوبی ورود گردوخاک را به ایران در روز ۱۰ شهریور نشان می‌دهد. سپس در روز ۱۱ شهریور ۱۳۹۴ این گردوخاک بر نواحی غرب و جنوب‌غربی ایران پخش شده و در روز ۱۲ شهریور فقط آثار آن بر روی خلیج‌فارس و شهرهای هم‌جوار را می‌توان دید. خروجی مدل HYSPLIT برای روز ۱۰ شهریور برای شهر ایلام، چشمه گسیل سوریه را نشان می‌دهد. این مدل به روش Backward اجرا شده است.

خروجی مدل WRF-Chem نشان می‌دهد که چشمه گسیل گردوخاک مناطق خشک و مستعد گسیل در کشور عراق و شرق سوریه است. خروجی این مدل در تطابق بسیار خوبی با تصاویر ماهواره و داده‌های دید افقی سازمان هواشناسی است. این مدل چشمه تولیدکننده و نحوه انتشار گردوخاک را به خوبی نشان می‌دهد. ضعف مدل را می‌توان در تعیین مقدار PM10 گردوخاک دانست. مقایسه نمودار داده‌های غلظت محیط زیست کشور با خروجی مدل WRF-Chem در دو شهر اهواز و ایلام نشان می‌دهد که این دو نمودار توافق خوبی در نمایش تغییرات غلظت گردوخاک دارند اما تفاوت آنها در کمتر برآورد کردن مقادیر غلظت است. خروجی غلظت PM10 مدل EURAD نشان می‌دهد که این مدل چشمه تولیدکننده گردوخاک را در داخل ایران تعیین می‌کند و سپس گردوخاک تولیدشده به سمت نواحی غربی و جنوب‌غربی ایران انتشار می‌یابد. در روز آخر نیز این مدل نشان می‌دهد گردوخاک بر روی خلیج‌فارس و استانهای غربی و جنوب‌غربی پخش شده است. این مدل تولید و نحوه انتشار گردوخاک را در مناطق غرب و جنوب‌غرب کشور را به درستی پیش‌بینی نکرده است.

## منابع

1. Miller, S.D., A.P. Kuciauskas, M. Liu, J.S. Reid, D.W. Breed, A.L. Walker, and A.A. Mandoos, 2008, Haboob dust storms of the

- southern Arabian Peninsula. *Journal of Geophysical research:atmospheres*, No. 113.
2. Hamidi, M., M.R. Kavianpour, Y. Shao, ,2013, Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, No. 49, pp.279-86.
  3. Shao, Y., M. Ishizuka, M. Mikami, J.F. Leys, 2011, Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. No.27, pp.116.
  4. Prospero, J.M., P.J. Lamb, 2003, African droughts and dust transport to the Caribbean. *Climate change implications*, No.302, pp.1024-7.
  5. Ashrafi, K., M. Shafiepour-Motlagh, A. Aslemand, S. Ghader, 2014. Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of environmental health science and engineering*, No.12, pp.1- 9.
  6. Khamooshi, S., F. Panahi, H. Vali Mousavi, 2016, Dust Storm Monitoring Using HYSPLIT Model and NDDI (Case Study: Southern Cities of Shiraz, Bushehr and Fasa, Iran). *ECOPERSIA*, No. 4.
  7. Escudero M., A. Stein, R. R. Draxler, X. Querol, A. Alastuey, S. Castillo, A. Avila, 2006, Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. *Journal Of Geophysical Research*, No. 111.
  8. Shao, Y., K.H. Wyrwoll, A. Chappell, J. Huang, Z. Lin, G.H. McTainsh, M. Mikami, T.Y.,Tanaka, X. Wangh, S. Yoon, 2011, Dust cycle: an emerging core theme in earth. *Aeolian Research*, No. 2, pp.181-204.
  9. Zolfaghari, H., H. Abedzadeh, 1384, Synoptic analysis dust storms systems in West of Iran. *GEOGRAPHY & DEVELOPMENT*, No.188, pp.6- 17.
  10. Melis M.T., F. Locci, F. Dessi, E. Vuillermoz ,2014, Dust storm monitoring with MODIS data on the Multan region (Pakistan). *Società Geologica Italiana*, No. 31, pp.665.
  11. Mei, D., L. Xiushan, S. Lin, W. Ping, 2008, A dust storm process dynamic monitoring with multi temporal Modis dat. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. No. 5.
  12. Lashkari, H., Q. Keikhosravi, ,1387, Statistic and synoptic analysis of dust storms in Khorasan Razavi province in period 1993-2005. *Journal of Physical Geography Researches*, No.65, pp. 17-33.
  13. Ferreira, J., A. Rodriguez, A. Monteiro, A. Miranda, M. Dios, J.A. Souto, G. Yarwood, U. Nopmongcol, C. Borrego, 2012, Air quality simulations for North America - MM5-CAMx modelling performance for main gaseous pollutants. *Atmospheric Environment*, No.53, pp 212-224.
  14. Balkanski, Y. J., D. J. Jacob, G. M. Gardner, W.C. Graustain, K. K. Turekian, 1993, Transport and residence times of tropospheric aerosols inferred from a global three-dimensional simulation of 210Pb. *J. Geophys. No.98*, pp.20573-20586.
  15. Cavazos Guerra, C. D. C., 2011, Modelling the atmospheric controls and climate impact of mineral dust in The Sahara Desert. PhD Thesis. University College London.
  16. Chin, M., P. Ginoux, R. Lucchesi, B. Huebert, R. Weber, T. Anderson, D. Thornton, 2003, A global aerosol model forecast for the ACE-Asia field experiment. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, No.108, pp.23.
  17. Colarco, P., A. da Silva, M. Chin, T. Diehl, 2010, Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *J. Geophys. Res.*, No.115, pp.14.
  18. Fast, J. D., W. I. Gustafson, R. C. Easter, R. A. Zaveri, J. C. Barnard, E. G. Chapmanand, S. E. Peckham, 2006, Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. No. 111, pp.D21.
  19. Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, S. J. Lin, 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J. Geophys. Res.*, *Atmospheres*, No.106, pp.20255-20273.
  20. 10-Ginoux, P., J. M. Prospero, O. Torres, M. Chin, 2004, Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model correlation with North Atlantic Oscillation. *Environmental Modelling & Software*, No.19, pp.113-128.
  21. Ginoux, P., J. M. Prospero, T. E. Gill, N. C. Hsu, M. Zhao, 2012, Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, No.3, pp.50.
  22. Shao, Y., Y. Yang, J. Wang, Z. Song, L. M. Leslie, C. Dong, Y. Chun, 2003, Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, No.22, pp.108.



23. Tegen, I., 2003, Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. *Quaternary Science Reviews*, No.18, pp. 1821-1834
24. Wesely, M. L., 1989, Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environment*, No.6, pp.1293-1304.
25. Woodward, S., 2001, Modeling the atmospheric life cycle and radiative impact of mineral dust in the Hadley Centre climate model. *J. Geophys. Res.*, No.106, pp.16.
26. Zakey, S., F. Solmon, F. Giorgi, 2006, Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmos. Chem. Phys.*, No.6, pp.4687-4704.
27. Choobari, O.A., P. Zawar-Reza, A. Sturman, , 2012, Feedback between windblown dust and planetary boundary-layer characteristics: sensitivity to boundary and surface layer parameterizations. *Atmospheric environment*, No.61, pp.294-304.
28. Choobari, O.A., Zawar-Reza, P. and Sturman, A., 2014. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Atmospheric Research*, 138, pp.152-165.
29. Choobari, O.A., P. Zawar-Reza, A. Sturman, A., 2013, Simulation of the spatial distribution of mineral dust and its direct radiative forcing over Australia. *Tellus B*, No.65, pp.19856.
30. Choobari, O.A., P. Zawar-Reza, A. Sturman, , 2012, Atmospheric forcing of the three-dimensional distribution of dust particles over Australia: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* No.11 , pp.117.
31. Ranjbar Saadat Abadi, A., F. Nouri, 1395, Investigating dust storm in the West of Iran from the Meteorological Perspective (Long-Term and Short Term Study). *Nivar Scientific and Technical Sciences*, No. 92.
32. Hossein Hamzeh, N., E. Fattahi, M. Zoljodi, P. Ghaffarian, A. Ranjbar Saadat-Abadi, 1395, synoptic and dynamic analysis and simulation dust phenomenon in South West Iran in the summer of 1384. *spatial analysis of environmental hazards*, No. 1.
33. Zolfaghari, H, H. Abedzadeh, 2005, Synoptic Analysis of Dust Systems in Western Iran. *Geography and Development Quarterly*, No. 6, pp. 173-188.