

مدل سازی گردش منطقه‌ای جو در رخدادهای شدیدترین توفان ریزگرد بهاره غرب ایران

محمدقاسم ترکاشوند^۱، استادیار گروه جغرافیا (آب و هواشناسی)، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶

چکیده

توفان گرد و غبار جزو آن دسته مخاطرات طبیعی است که بطور جدی شرایط جوی، اکوسیستم‌ها و سلامت انسان را تحت تأثیر خود قرار داده است. لذا بررسی چرخه‌های توفان‌های گرد و غبار و واکاوی شرایط هواشناسی (همدیدی و دینامیکی) و فرآیندهای آن می‌تواند منجر به پیش‌آگاهی و در فازهای بعدی کنترل این پدیده مخرب جوی منتهی گردد. به منظور دست‌یابی به هدف حاضر، توفان ریزگرد ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۴ هجری خورشیدی به‌عنوان توفان شاخص بهاره غرب ایران انتخاب شد. جهت واکاوی ساختار توفان، یک مطالعه ترکیبی با بهره‌گیری از داده‌های رقومی باز تحلیل‌شده *NECP / NCAR* و خروجی مدل‌های منطقه‌ای و دینامیکی انجام شد. همچنین به منظور ساختار گردش منطقه‌ای جو در زمان رخداد توفان از داده‌های مؤلفه مداری و نصف‌النهاری باد، به همراه متغیرهای سمت و سرعت، فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، تاوایی نسبی و فرارفت عمودی هوا استفاده شده است. نتایج بیانگر آن بوده است که در روز وقوع توفان، شیب فشار در محدوده غرب ایران افزایش یافته و از سوی دیگر همزمانی تسلط تاوایی‌های مثبت و منفی در یک فاصله نزدیک و فعال شدن جت تراز زیرین جو باعث شکل‌گیری توفان‌های گردوغبار شده است. نتایج عمق نوری و غلظت گرد و غبار سطحی با مدل *NAAPS* نشان داده است که غلظت ذرات غبار بین ۶۴۰ تا ۱۲۶۰ میکروگرم بر مترمکعب در غرب کشور متغیر بوده است. خروجی دو مدل *DREAM Bb* و *NMMB/BSC* ضمن تأیید عمق نوری بالای ذرات نشان دادند که عوامل محلی و فاصله نزدیک تا مراکز چرخه غبار نقش بسزایی در رخداد پدیده حاضر برای غرب ایران دارند. شبیه‌سازی مسیر حرکت توفان نیز نشان از دو مسیر اصلی انتقال ذرات ریزگرد بهاره به غرب کشور؛ یعنی مسیر شمال غرب - جنوب شرق و مسیر غرب - شرق بوده است.

واژه‌های کلیدی: توفان گردوغبار بهاره، مدل‌سازی منطقه‌ای، مدل *HYSPLIT*، عمق نوری ذرات، غرب ایران

مقدمه

پدیده گردوغبار یک رخداد طبیعی است که بطور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌ویژه در عرض‌های جنب استوایی رخ می‌دهد و در ردیف بزرگترین مشکلات زیست‌محیطی جهان بشمار می‌رود (Arimoto, 2001). انتشار این پدیده مخرب آب و هوایی بصورت پراکنده در جو زمین است که از نظر اندازه، زمان و غلظت متفاوت است (Herman et al., 1997). از آنجایی که این پدیده متأثر از شرایط خاص جوی است، اثرات آن ممکن است تا فاصله ۱۶ هزار کیلومتری از چشمه نیز تداوم داشته (Dareмова, et al., 2005) و سبب بروز اثرات نابهنجار زیستی محیطی از یک‌سو و خسارات بی‌شماری درزمینه‌های کشاورزی، صنعت، حمل‌ونقل و سامانه‌های مخابراتی گردد (لشکری، ۱۳۸۷).

ذرات معلق در هوا در مقیاس جهانی نقش مهمی را در کیفیت هوا بازی می‌کنند. بعضی از این آلاینده‌ها خطر چندان موثری بر شرایط زیست و انسان ندارند اما بعضی از آنها بسیار خطرناکند (علی‌جانی، ۱۳۸۱: ۲۲۰). برآوردها حاکی از انتقال سالیانه ۱ تا ۳ میلیارد تن از ذرات گرد و غبار به هوا سپهر است (IPCC, 2001; 2007). این ذرات معلق تا حد زیادی از بیابان‌ها و مناطق نیمه بیابانی (به‌عنوان مثال، صحرا در آفریقا و بیابان‌های مرکزی و غرب آسیا) سرچشمه می‌گیرند. منابع گردوغبار انسانی از زمان انقلاب صنعتی رو به افزایش بوده که عمدتاً به دلیل بیابان‌زایی و سایر دخالت‌های مستقیم و غیرمستقیم انسان بوده است (Zhang, et al., 2008). ریزگرد‌ها با وجود عمر جوی کوتاه خود (۱-۲ هفته)، بطور منظم طی مسافت‌های طولانی در مقیاس بین‌قاره‌ای جابجا می‌شوند (Chin, et al., 2007)؛ و گاهی اوقات یک مدار کامل در سراسر جهان را درمی‌نوردند (Uno, et al., 2009). از سوی دیگر چرخه حیات توفان‌های گردوغبار (انتشار، حمل‌ونقل و رسوب) با گردش جوی و دینامیکی آب‌وهوا مرتبط است (Salvador, et al., 2014; Pey et al., 2013). مطالعه پدیده گرد و غباری و سازوکار آن (نحوه تشکیل، شرایط معلق شدن، حمل و رسوب‌گذاری) ازجمله موضوعاتی است که از اهمیت شایان توجهی در پژوهش‌های مربوط به تغییرات زیست‌محیطی و آب و هوایی برخوردار است، چراکه گرد و غبار اثرات قابل توجهی را بر محیط‌زیست و ساکنان انسانی دارد (Ding, et al., 2002). با وجود اینکه پیشینه رخداد توفان‌های گرد و غباری توسط فرسایش مواد سطحی در مناطق خشک جهان تولید می‌شود، اما این مناطق بیابانی هستند که بعنوان سرچشمه اصلی گرد و غبار شناخته شده‌اند (Park, et al., 2005). همان‌طور که پیش‌تر بدان اذعان شده است خواستگاه اصلی ذرات ریزد گرد مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان می‌باشد که از فراوانی بالایی در آسیا برخوردار می‌باشند. از سایر اثرات سوء ریزگردها می‌توان به عفونت دستگاه تنفسی فوقانی، التهاب ریه، افزایش فشارخون و افزایش مراجعات منجر به بستری روزانه در طول ۳-۶ روز پس از وقوع رخداد توفان ریزگرد اشاره کرد (Lu, et al., 2004).

مطالعات قبلی که به‌اندازه‌گیری‌های زمینی، داده‌های ماهواره‌ای و ارزیابی مدل‌های منطقه‌ای و دینامیکی پرداخته‌اند و منجر به شناسایی منابع اصلی ذرات معلق در هوا و گرد و غبارهای معدنی و مسیره‌های حمل‌ونقل آن شده است بسیار است که به چند مورد اشاره می‌گردد. استفاده از فناوری لیدار (CALIOP^۱) با روش متعامد قطبش برای منطقه شرق آسیا، پژوهشی است که توسط هوانگ و همکاران (Huang et al, 2008) انجام شده است. نامبردگان که وقایع گرد و غبار مکرر منطقه تاکلماکان^۲ را مطالعه کرده‌اند نشان داده‌اند که منشأ رخداد شدیدترین توفان‌های ریزگرد در منطقه صحرای گبی می‌باشد. همچنین نتایج آنها نشان داد که ذرات معلق در هوا می‌توانند به ارتفاع ۹ کیلومتر رانده شده و

¹ Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP)

² Taklimakan

توسط جت‌های غربی وردسپهر فوقانی تا شرق چین و در سراسر اقیانوس آرام برسند. تجزیه و تحلیل اولین سری کامل از مجموعه داده‌های CALIOP توسط لیو و همکاران (Liu, et al, 2008) نشان داد که اوج بهاره فعالیت گرد و غبار در فلات تبت، با رسیدن به ارتفاع ۱۱-۱۲ کیلومتری و نفوذ ذرات معلق در هوا بر روی سیستم آب و هوایی و خواص ابرهای موجود در منطقه تأثیر بسزایی دارد. ارزیابی چشمه‌های غبار در صحرای آفریقا پژوهش دیگری است که توسط اسکپنسکی و همکاران (Schepanski, et al, 2012) انجام شده است. در این پژوهش که با استفاده از شاخص‌های AI و OMI انجام گردیده است، نگارندگان به این نتیجه رسیدند که توپوگرافی نقش قابل توجهی را در ایجاد و انتقال گردوغبار در منطقه بازی می‌کند. بر این اساس نامبردگان مناطق جنوبی ساحلی صحرای آفریقا را بعنوان منشأ اصلی توفان‌های ریزگرد معرفی کردند. کاستوکیوس و همکاران (Kaskaoutis, et al, 2016) با مطالعه منطقه‌ای نقش سامانه‌های هندوکش و دریای خزر به این نتیجه رسیدند که بخش اعظم ریزگردهای غرب آسیا ناشی از سازوکار حاضر هست.

از جمله مطالعات مرتبط با پدیده گردوغبار که توسط محققین کشورمان برای مناطق غرب، جنوب غرب و جنوب برای توفان‌های مختلف گردوغبار انجام شده است می‌توان به مطالعه عزیززی و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد. در این مطالعه که به ردیابی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران پرداخته شده است منطقه‌ای بین سوریه و عراق را بعنوان مسیر اصلی ورود گرد و غبار برای نیمه غربی ایران معرفی کرده است. در پژوهشی دیگر مفیدی و جعفری (۱۳۹۰) به بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع توفان‌های گرد و غبار تابستانه در جنوب غرب ایران پرداختند. در این پژوهش با استفاده از بهره‌گیری از داده‌های شبکه‌بندی NCEP/NCAR و شاخص آئروسول TOMS ویژگی‌های دینامیکی و همدیدی هر یک از توفان‌های گرد و غباری از دو روز قبل از وقوع توفان تا زمان اوج در مقیاس ۶ ساعته مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بیانگر آن بود که پرفشار عربستان و زبانه کم‌فشار زاگرس بیش از هر مؤلفه‌ی گردشی دیگری در شکل‌گیری توفان‌های مقیاس منطقه‌ای در منطقه‌ی خلیج فارس و جنوب غرب ایران نقش دارند.

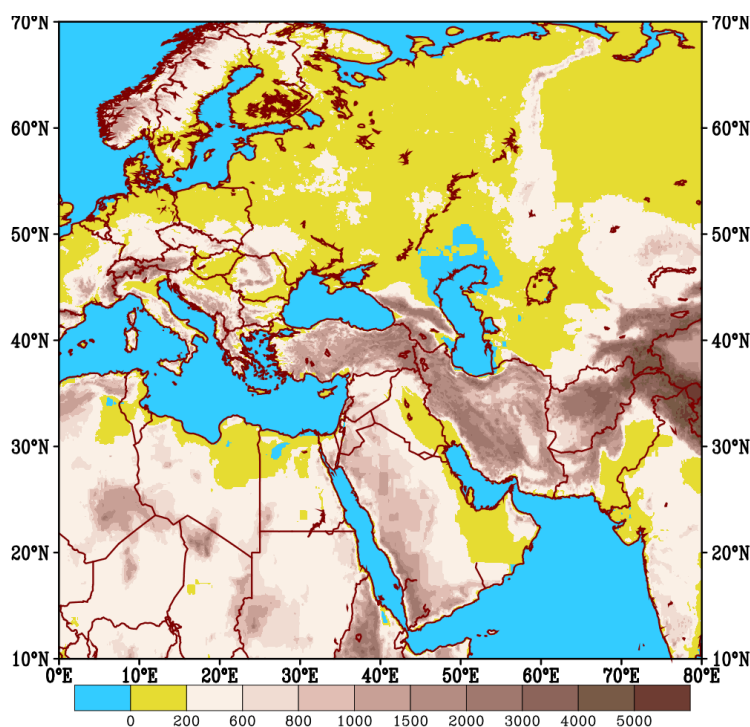
در جدیدترین پژوهشی که در خصوص ریزگردهای غرب و جنوب غرب ایران انجام شده است می‌توان به پژوهش علی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) که به ارزیابی و پایش توفان گردوغبار با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور در غرب و جنوب غرب پرداختند اشاره کرد. در این پژوهش توفان‌های گرد و غباری با بهره‌گیری از مدل لاگرانژی HYSPLIT، مدل DREAM 8b و مقادیر ضخامت نوری هواویز (AOT¹) مدل‌سازی شدند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که بطور کلی گرد و غبارها از دو مسیر به کشور منتقل می‌گردند. الف) از مناطق شمال غرب عراق و شرق سوریه؛ ب) از مرکز عراق. همچنین مشخص شد که ذرات گردوغبار در لایه‌ای کم‌عمق و در پایین‌ترین لایه‌ی جو به منطقه منتقل می‌گردند.

توفان‌های ریزگرد بعنوان یک پدیده مخرب جوی اثرات نامطلوب زیست‌محیطی را برای غرب ایران بجای گذاشته و مشکلات بسیاری را برای ساکنان این ناحیه از ایران به وجود آورده است، بنابراین مطالعه این پدیده جهت دستیابی به یک رویکرد همه‌جانبه به‌منظور مقابله با آن ضروری است. لذا پژوهش حاضر باهدف شناخت شرایط لحظه‌ای جو، هدایت و منشأ توفان‌های ریزگرد با یک رویکرد مدل‌سازی همدیدی به رشته تحریر درآمده است.

¹ Aerosol Optical Thickness

داده‌ها و روش کار

در این پژوهش به منظور بررسی ساختار توفان‌های گرد و غبار جنوب غرب ایران توفان ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۴ هجری خورشیدی انتخاب شده است. علت انتخاب روز حاضر به استناد گزارش‌های مرکز نظارت و پایش اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان ایلام، این روز آلوده‌ترین روز سال ۱۳۹۴ بوده است بطوریکه در شهرستان مرزی مهران میزان ثبت‌شده ذرات معلق در هوای این شهر ۱۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب بوده است. شکل (۱) محدوده مورد مطالعه جهت ارزیابی و مدل‌سازی همدیدی توفان حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

جهت واکاوی ساختار توفان منتخب، یک مطالعه ترکیبی با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاهی، داده‌های باز تحلیل‌شده *NCEP / NCAR* و داده‌های خروجی دو گروه مدل به انجام رسید. گروه اول شامل سه مدل منطقه‌ای *NAAPS*، *DREAM 8b* و *NMMB/BSC* می‌باشد و مدل دینامیکی *HYSPLIT* با روش پسگرد (Backward) استفاده شده است. از داده‌های *NCEP / NCAR* جهت تحلیل مقیاس همدید توفان استفاده شده است. در ادامه به شرح جزئیات هر یک از مدل‌های منتخب پرداخته شده است.

سامانه پیش‌بینی و تحلیل آئروسول‌های نیروی دریایی^۱ یک سامانه کاربردی برای پیش‌بینی گرد و غبار، سولفات و آئروسول‌های دود با استفاده از امکانات ماهواره ای مختلف است که توسط آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی ایالات متحده آمریکا در مونتری کالیفرنیا (NRL^۲) تهیه و توسعه داده شده است (Witek et al., 2007). این مدل امکان بررسی دقیق و شبیه‌سازی حرکت گرد و غبار، جهت‌های اصلی باد، تغییرات لایه‌مرزی و عبور یک مسیر جبهه‌ای را می‌دهد (NRL،

^۱. The Navy Aerosol Analysis and Prediction System (NAAPS)

^۲. Naval Research Laboratory in Monterey

2008). کاربست‌های نسخه فعلی مدل NAAPS شامل گاز SO_2 ، چهار آئروسول: گرد و غبارهای معدنی، نمک دریا، ذرات سولفات (SO_4) و دود است. در NAAPS هر یک از منابع انتشار بطور جداگانه برای هر یک از اجزاء سازنده آئروسول‌ها تعریف شده است؛ برای مناطق انتشار گردوغبار و مواد معدنی از پایگاه پوشش زمین سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استفاده گردیده است. گرد و غبار در هر سطح و در هر زمان با حذف اثر اصطکاک با آستانه سرعت ۶۰ سانتی بر ثانیه و رطوبت سطحی کمتر از ۳۰ درصد، ضمن انتشار متناسب با سرعت باد به توان ۴ تعریف می‌گردد (Westphal et al., 1988).

برای ارزیابی غلظت مقادیر گرد و غبار از خروجی‌های مدل DREAM^۱ 8b نیکویچ^۲ و همکاران (۲۰۰۱) استفاده گردید. این یک مدل منطقه‌ای طراحی شده برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی چرخه جوی هواویز گرد و غباری معدنی و همه فرایندهای اصلی چرخه گرد و غبار جوی است و معادله غیرخطی دیفرانسیل جزئی اویلر را برای پیوستگی جرم گردوغبار حل می‌کند. در طول انتگرال‌گیری مدل، محاسبه شارهای وارد شده گرد و غبار از طریق نقاط مدل که همان مناطق خشک، نیمه‌خشک و بیابانی هستند صورت می‌گیرد. (علی‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۴). به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر رسوبات گرد غبار از مدل چند مقیاسی غیر هیدرو استاتیکی NMMB/BSC که توسط مرکز بارسلونا در کاتالونیا اسپانیا توسعه داده شده است بهره برده شد (Algarni & Nutter, 2015).

برای تعیین منابع اصلی گرد و غبار برای توفان گردوغبار مورد مطالعه از مدل لاگرانژی با امکان ردیابی پس‌گرد ذرات در ترازهای مختلف جو موسوم به HYSPLIT استفاده گردید (Draxler & Rolph, 2011). مدل HYSPLIT در حقیقت مدلی دوگانه^۳ برای محاسبات حرکت گرد و غبار، پراکندگی و شبیه‌سازی ته‌نشینی آن با استفاده از رویکردهای پف و ذرات است (Draxler, et al., 2009). همچنین این مدل اطلاعات با ارزشی را در خصوص لایه‌مرزی جوی (ABL^۴) در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد (Rashki, et al., 2015).

برای مسیریابی پس‌گرد، ذرات در ایستگاه مرزی مهران در زمان اوج توفان‌های گرد و غباری در نظر گرفته شد (ساعت ۱۲ گرینویچ). در این مطالعه ذرات در سطح ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپا سکال در حدفاصل زمانی ۶ ساعته تا ۲۴ ساعت قبل ردیابی شدند. برای اجرای مدل از مجموع داده‌های FNL استفاده گردید. داده‌های پایگاه (Final) FNL داده‌های باز پردازش شده NCEP هستند که توسط آزمایشگاه هوا وابسته به NOAA ارائه شده است (Rolph, 2016). در نهایت به‌منظور مطالعه شرایط اتمسفری لحظه وقوع توفان به بررسی پارامترهای مختلف هواشناسی از قبیل فشار سطح دریا، نقشه‌های سطوح فوقانی جو به‌ویژه تراز ۵۰۰ هکتوپا سکال، تراز نقشه سطح ۱۰۰۰ هکتوپا سکال، مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد، دمای سطح ۸۵۰ هکتوپا سکال و تاوایی نسبی سطح ۵۰۰ هکتوپا سکال با استفاده از سیستم تحلیل و نمایش شبکه GRADS^۵ برای تجزیه و تحلیل هم‌دید استفاده شده است. داده‌های مذکور برای روز وقوع توفان با مشاهدات چهار بار در روز با دقت فضایی $2/5 \times 2/5$ درجه از مرکز پیش‌بینی‌های محیطی موسوم به NCEP از تارگاه مرکز ملی اقیانوس و جو (NOAA) تهیه شده است. به‌منظور ارزیابی شرایط جوی و مدل‌سازی عددی توفان گرد و غبار مورد مطالعه، از نرم‌افزارهای HYSPLIT V4، MATLAB و GRADS استفاده شده است.

¹.Dust Regional Atmospheric Model

².Nickovic

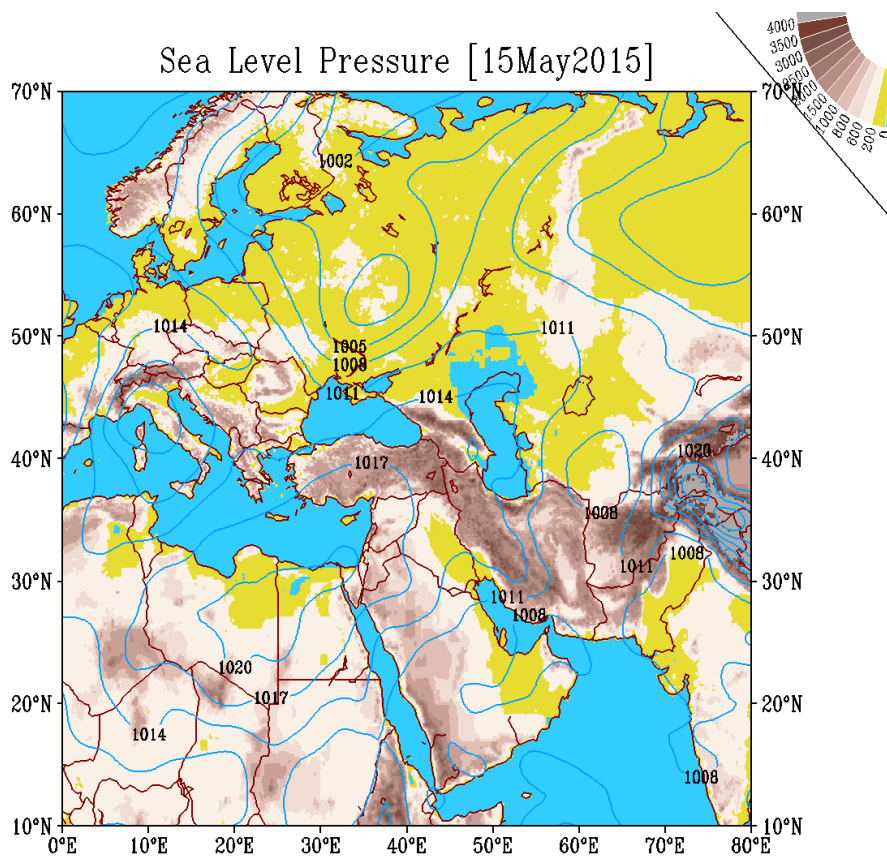
³.Hybrid

⁴.Atmospheric Boundary Layer

⁵.Grid Analysis and Display System

شرح و تفسیر نتایج

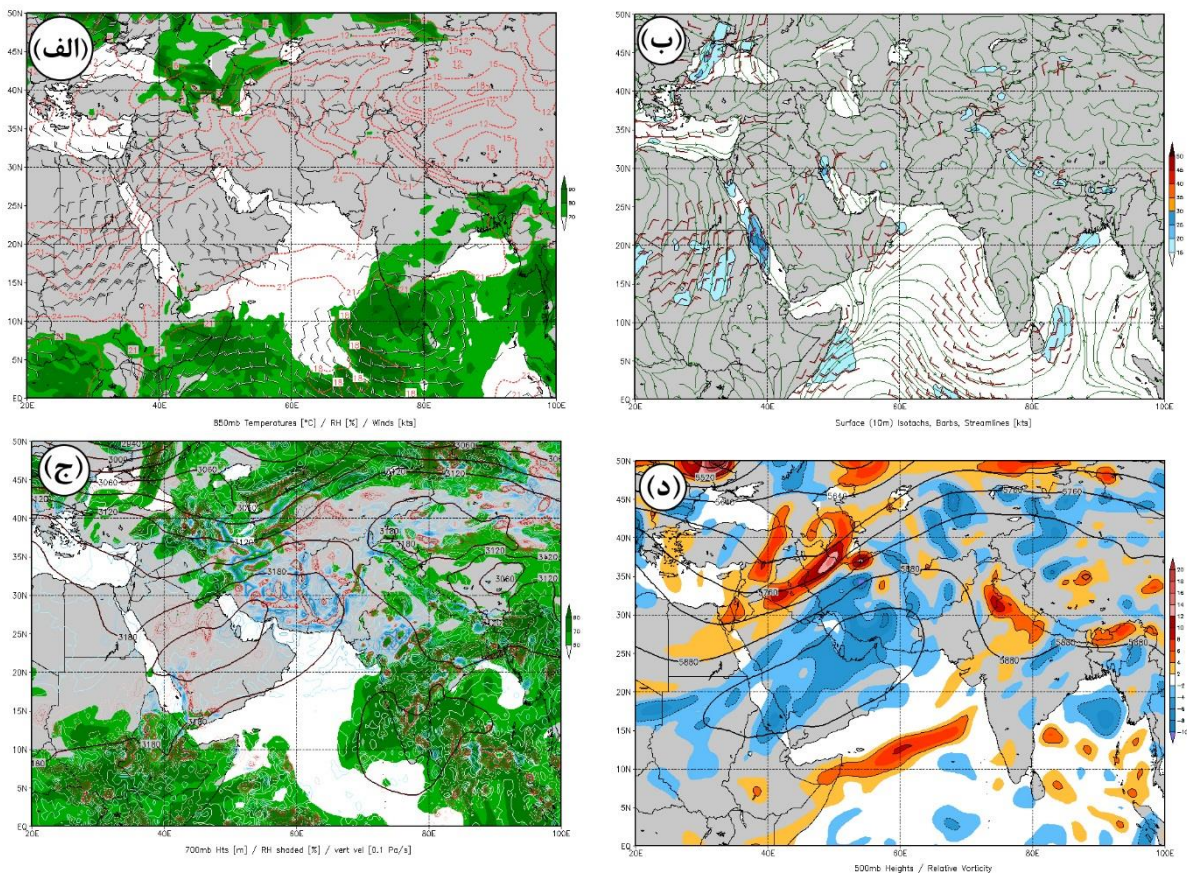
وضعیت متوسط فشار هوا در تراز دریا در زمان وقوع توفان گردوغبار با تفکیک افقی $2/5 \times 2/5$ درجه قوسی در شکل (۲) نشان داده شده است. بر این اساس شیب فشار در محدوده غرب ایران افزایش یافته و یک اختلاف فشار برجسته ۲۰ هکتوپاسکال بین شرق و غرب ایران مشاهده می‌شود. بر این اساس می‌توان به نقش بسیار مهم و تأثیرگذار عوامل محلی و پستی و بلندی‌ها در تشکیل مراکز متفاوت فشاری اذعان نمود. در بخش شرقی کشور، بسته شدن همفشار ۱۰۲۸ هکتوپاسکال بیانگر شکل‌گیری یک مرکز پرفشار بر روی این منطقه است. در مقابل، یک مرکز کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۰۸ هکتوپاسکال در بخش شمالی دریای مدیترانه استقرار یافته است. استقرار دو مرکز فشار یادشده و کشیدگی زبانه‌های آن روی ایران، همراه با اختلاف فشار زیاد بین آن‌ها و الگوی خاص خطوط هم‌فشار در مرزهای جنوب غرب ایران، همگی بر شکل‌گیری بادهای شدید و متعاقب آن توفان‌های گرد و غباری دلالت دارند.



شکل ۲- وضعیت متوسط فشار سطح دریا در روز وقوع توفان (۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۴)

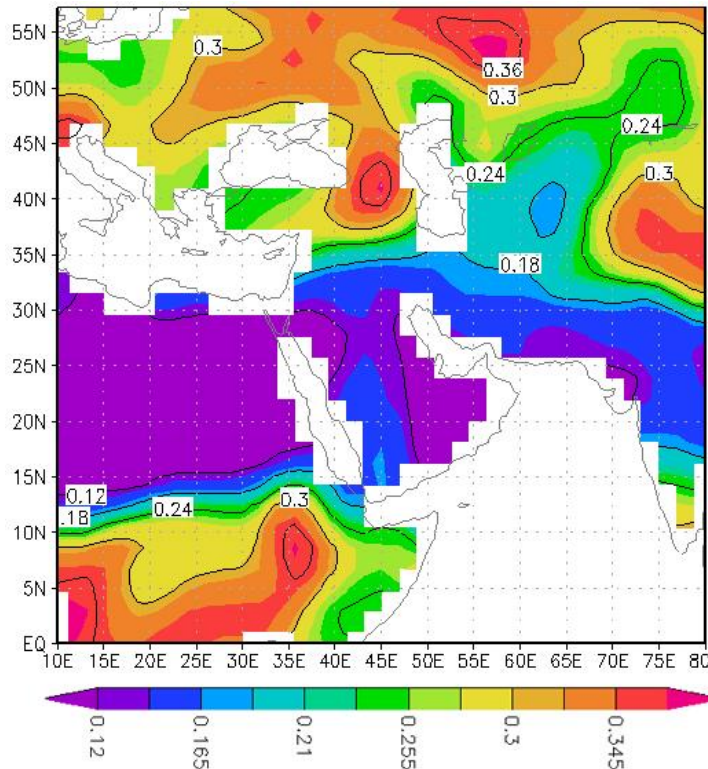
به جهت ارزیابی شرایط جوی روز وقوع توفان، دمای هوا، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد، فرارفت عمودی و تاوایی نسبی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۳ نشان داده شده است. میانگین دمای هوا همان‌طور که در شکل (۳-ب) مشخص شده است طی روز وقوع توفان بسیار بالا بوده است. بطوری که حتی در این ماه از سال (اردیبهشت‌ماه) دمای سطح زمین در منطقه‌ای که گرد و غبارها از آنجا نشأت گرفته‌اند به بالاتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز رسیده است. ارزیابی ترکیبی نقشه‌های شکل ۳ الگوی گردش جو را زمان وقوع توفان در منطقه غرب ایران نشان می‌دهد که حضور سامانه

چرخند در غرب و سامانه واچرخندی در شرق و کشیدگی زبانه‌های آن به سمت غرب ایران باعث تنش قابل‌ملاحظه جریان هوا در منطقه غرب شده است. بیشینه باد در شکل ۵-ب مورد ارزیابی قرارگرفت که بر این اساس هسته بیشینه شدت باد در حوالی شمال غرب کشور عراق و شرق کشور سوریه بسته‌شده است. شکل ۵-ج فرارفت عمودی هوا همراه با رطوبت نسبی را نشان می‌دهد، که علت فرارفت بالا در بخش‌های غربی ایران را می‌توان با تغییر تراکم و وزن معینی از هوا با حرارت مرتبط دانست، بطوری‌که وقتی هوا حرارت دید، منبسط و در نتیجه از تراکم و فشردگی آن کاسته و وزن آن کاهش می‌یابد و به تبع آن حرکات چرخشی هوا در سطح زمین خیلی سریع و شدید خواهد بود که خود عاملی مهم در بروز پدیده ریز گرد در این روز خاص است. تحلیل میدان تاوایی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۳-د نشان داده‌شده است؛ بر این اساس تسلط جریانات هوا در غرب ایران و تا کشورهای عراق و سوریه مؤید شکل‌گیری تاوایی مثبت بوده است؛ این در حالی است که در بخش اعظم ایران مرکزی و جنوب غرب کشور شاهد شکل‌گیری تاوایی منفی هستیم که این همزمانی تسلط تاوایی‌های مثبت و منفی در یک‌فاصله‌نه‌چندان قابل‌توجه، شکل‌گیری جت تراز زیرین و وقوع توفان را در منطقه تبیین می‌کند، لذا با در نظر گرفتن بستر خشک کشورهای عراق، سوریه و غرب ایران با جریان یافتن هوا از غرب به شرق این جریانات باعث شکل‌گیری توفان‌های گردوغبار با منشأ مناطق نامبرده می‌باشد.



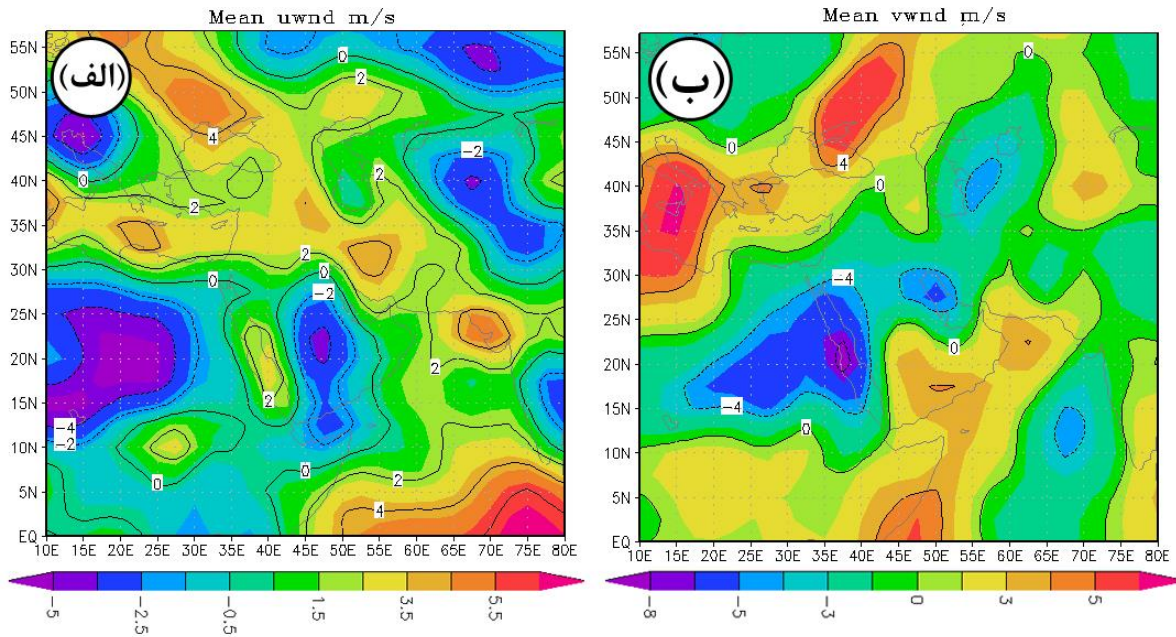
شکل ۳- (الف) دمای سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی (%). و سرعت باد (کیلومتر بر ساعت)؛ (ب) خطوط جریان باد (۱۰ متری سطح زمین)؛ (ج) ارتفاع ژئوپتانسیل ۷۰۰، فرارفت عمودی و رطوبت نسبی (%).؛ (د) تاوایی نسبی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال

همزمان با بالا رفتن دمای سطح خاک می‌توان انتظار داشت که میزان رطوبت سطح خاک نیز کاهش یابد؛ شکل (۴) شار رطوبت سطحی خاک برای روز وقوع توفان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، میزان رطوبت سطح خاک در مناطقی که گرد و غبار از آنجا ناشی می‌شود به مقدار قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر مناطق موجود در شکل کاهش یافته است.



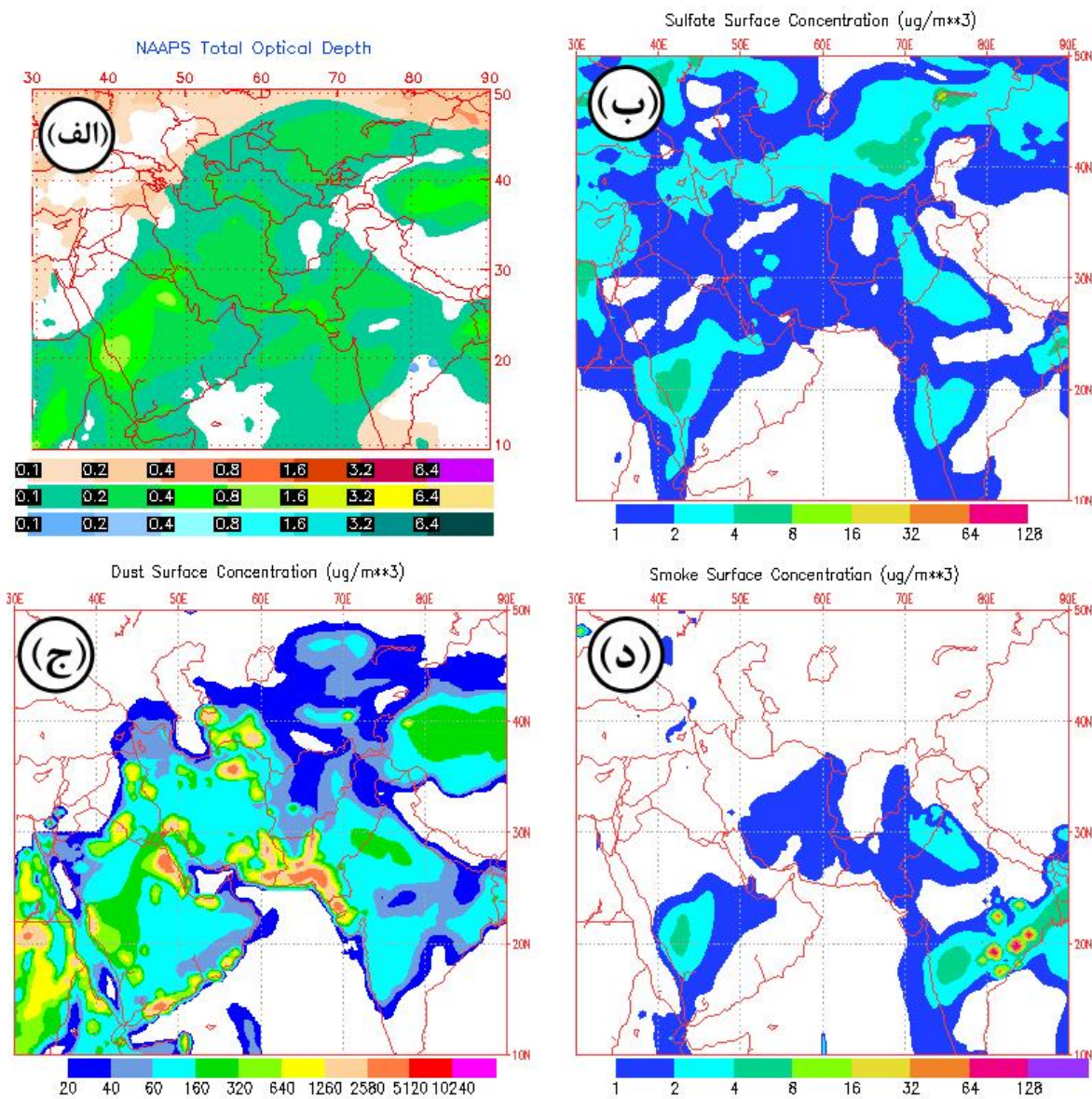
شکل ۴- میانگین دمای سطح زمین در روز وقوع توفان (۱۳۹۶/۰۲/۲۵)

همان‌طور که مورد بحث واقع شده است، مهمترین پارامتر مؤثر در وقوع توفان‌های گرد و غبار، باد است که در روز وقوع توفان گرد و غبار، مؤلفه مداری باد دارای جهت غربی (در صورت منفی بودن، جهت وزش باد شرقی است و در صورت مثبت بودن، جهت وزش باد غربی است) و سرعت آن در مرزهای غربی کشور بیش از ۵ متر بر ثانیه بوده است (شکل ۵-الف). مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد نیز در جهت شمالی (در صورت مثبت بودن مقادیر سرعت باد) و جنوبی (در صورت منفی بودن مقادیر سرعت باد) بر روی غرب ایران، جنوبی است لذا تأثیر الگوی حاضر بر غرب ایران در طی روز وقوع توفان گرد و غبار نقش بسزایی داشته است. (شکل ۵-ب).



شکل ۵- الگوی آرایش مؤلفه مداری باد (الف) و مؤلفه نصف‌النهاری باد (ب) برای روز وقوع توفان

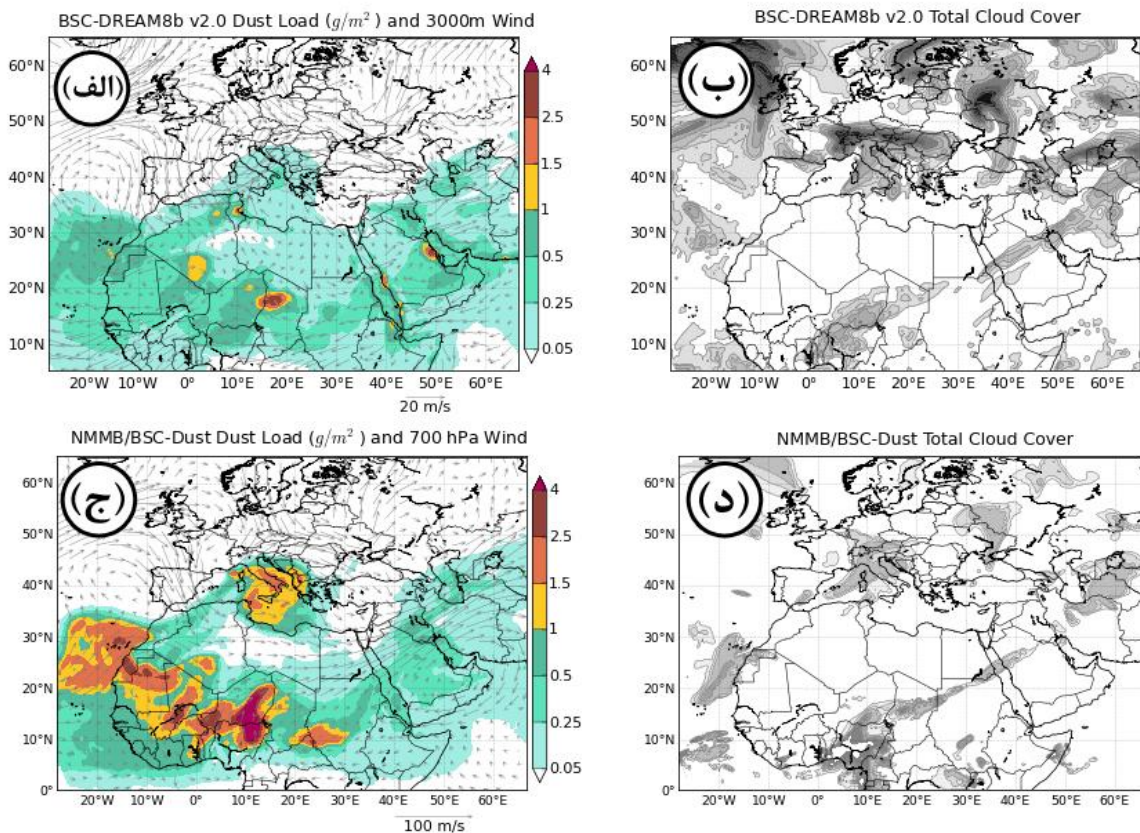
شاخص عمق نوری و غلظت گرد و غبار سطحی در مدل NAAPS شکل (۶) نشان می‌دهد که؛ در روز ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۴ عمق نوری و غلظت گرد و غبار در منطقه غرب ایران بالاست، لذا با حرکت توده‌ی حامل گرد و غبار به سمت شرق، در روز مذکور عمق نوری ذرات در منطقه مورد مطالعه به شدت افزایش می‌یابد. در شکل ۶-الف مناطق نارنجی و قرمز: سولفات؛ سبز و زرد: گرد و غبار و مناطق آبی‌رنگ دود می‌باشد. مقادیر تراکم گرد و غبار به میکروگرم در مترمکعب برای روز وقوع توفان ارائه شده است. نتایج کاربست سولفات برای این روز (شکل ۶-ب) نشان داده است که در منطقه بین ۱ تا ۲ میکروگرم بر مترمکعب متغیر است، کاربست گرد و غبار در شکل (۶-ج) نشان می‌دهد که بر این اساس غلظت ذرات غبار بین ۶۴۰ تا ۱۲۶۰ میکروگرم بر مترمکعب برای غرب متغیر است. در پایان کاربست دود نیز در شکل (۶-د) ارائه شده است که نشان داده می‌دهد دودی در جو منطقه وجود نداشته است. مقدار بسیار بالای ذرات غبار در منطقه را می‌توان به نقش عوامل انسانی نسبت داد، چراکه دخالت انسان از قبیل از بین رفتن پوشش گیاهی، سدسازی را نمی‌توان نادیده گرفت و کانون‌های سرچشمه گرد و غبار پژوهش حاضر نیز ناشی از دخالت انسان بوده است.



شکل ۶- نتایج مدل NAAPS برای عمق نوری کل (سولفات، گردوغبار و دود) (الف)؛ غلظت سولفات سطحی (ب)؛ غلظت سولفات سطحی (ج)؛ غلظت دود سطحی (د)

بررسی خروجی دو مدل DREAM Bb و NMMB/BSC (شکل شماره ۷) نشان از افزایش مقادیر غلظت بر واحد سطح گرد و غبار در روز وقوع توفان بوده است. مدل DREAM Bb در شکل ۷- الف نشان داده شده است؛ که بر این اساس جریان باد در سطح ۳۰۰۰ متری زمین در مدل نشان از مقدار غبار ورودی به منطقه ۲ گرم بر مترمکعب بوده است. شکل ۸- ب کل پوشش ابری منطقه را توسط مدل DREAM Bb نشان می‌دهد که با توجه به فصل مورد مطالعه (بهار) امری کاملاً بدیهی است. در گام بعدی از مدل چند مقیاسی غیر هیدرو استاتیکی NMMB/BSC بهره برده شد. شکل ۸- ج همانند شکل ۸- الف مقدار غبار ورودی به منطقه را برحسب گرم بر مترمربع نشان می‌دهد، با این تفاوت که ارتفاع قائم مدل افزایش یافته است (سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال برابر ۳۱۳۷ متری از سطح زمین). همان طور که پیداست از سطح تحت پوشش و غلظت ذرات در جنوب غرب و غرب ایران نیز کاسته شده است. بر اساس خروجی

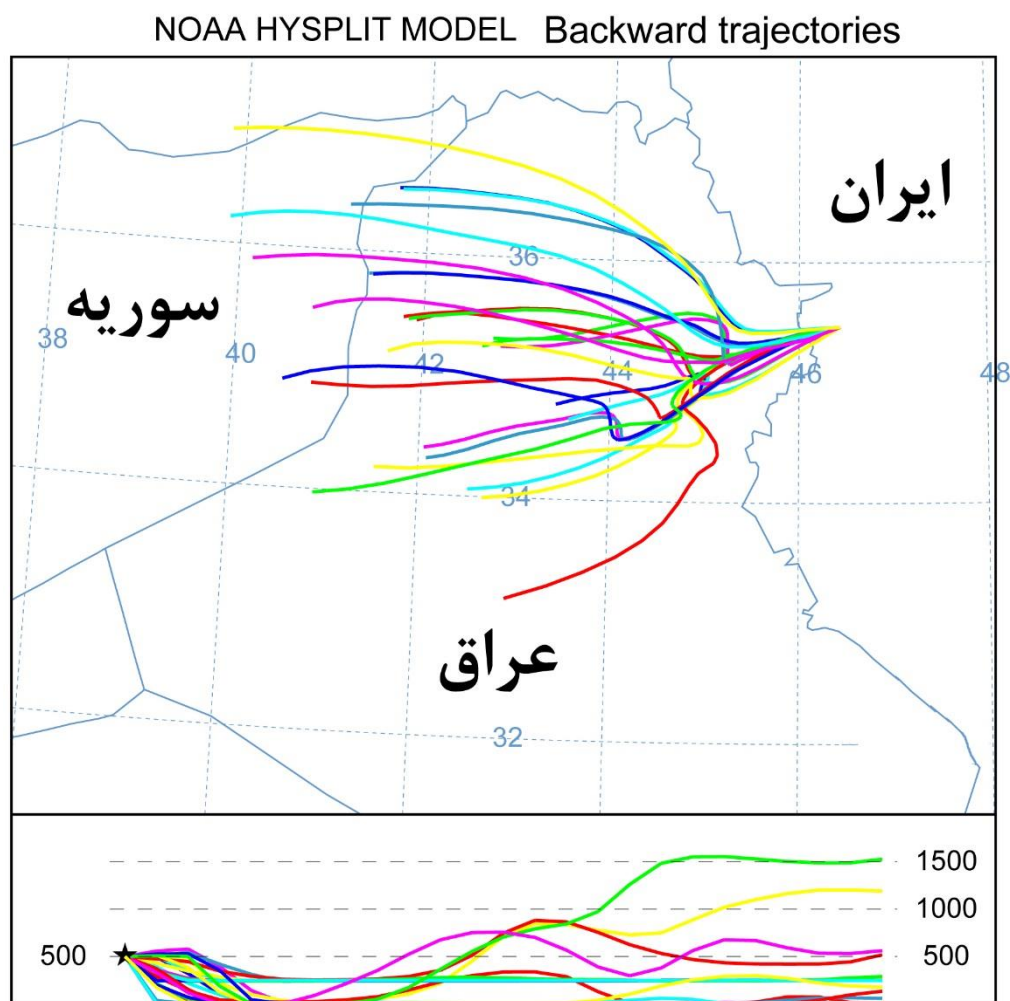
دو مدل حاضر می‌توان در خصوص گرد غبارهای غرب ایران به این نتیجه رسید که نقش عوامل محلی و فاصله نزدیک تا مراکز چشمه غبار نقش بسزایی در رخداد پدیده حاضر برای غرب ایران دارند.



شکل ۷- خروجی مدل DREAM 8b برای روز وقوع توفان گردوغبار (الف و ب)، مدل چند مقیاسی غیر هیدرو استاتیکی

(ج و د) NMMB/BSC

شبه‌سازی مسیر حرکت غبار برای روز ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۴ از مدل دینامیکی HYSPLIT با روش پسگرد (Backward) استفاده شده است (شکل ۸)؛ بطوریکه همزمان با آغاز گرد و غبار در منطقه‌ی مورد مطالعه مسیر باد با گام زمانی شش‌ساعته تا ۲۴ ساعت قبل از آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که دو مسیر، گرد و غبار را به غرب کشور منتقل می‌کنند، (۱) مسیر شمال غرب- جنوب شرق؛ (۲) مسیر غرب به شرق. کانون‌های اصلی مسیر شماره یک: شمال غرب عراق و شرق سوریه؛ و مسیر شماره دو: مرکز عراق می‌باشد که با نتایج علی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴: ۱۵) نیز همخوانی دارد. همچنین نتایج نشان داده است که فراوانی مسیر دوم برای این روز نسبت به مسیر اول بیشتر بوده است. ارتفاع نمایش داده شده در پایین نقشه ۸ ارتفاع مسیر طی شده از سطح زمین بر حسب متر است.



شکل ۸- ردیابی پسگرد مسیرهای گردوغبار با گام زمانی ۶ ساعته تا ۲۴ ساعت قبل از ورود اولین گرد و غبار

نتیجه‌گیری

اثرات سوء توفان‌های گرد و غبار در سال‌های اخیر مشهودتر شده است، بطوری‌که یافته‌های بیشتری در مورد منشأ، مسیر و نحوه انتقال، پیامدهای زیست‌محیطی، اثرات مخرب بر روی سلامتی انسان و تعدد دفعات وقوع آن در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف به دست آمده است. مدل سازی الگوهای گردشی انتقال‌دهنده‌ی گرد و غبار به غرب کشور به جهت مسیر ورود و عبور سامانه‌های جوی به داخل کشور از یک سو و همچنین نخستین منطقه‌ای است که اولین و بیشترین تأثیر را از این سامانه‌ها می‌پذیرد از اهمیت شایان توجهی برخوردار است. توفان‌های گرد و غبار با توجه به ماهیت بزرگ‌مقیاس خود به بررسی جامعی نیاز دارند که ضمن شناخت عوامل تأثیرگذار در افزایش این پدیده، مناطق مولد آن نیز باید شناخته شوند تا در نهایت به راهکارهای عملی برای کاهش آن منجر شود. به‌منظور واکاوی شرایط منجر به رخداد توفان‌های ریزگرد در غرب ایران توفان گرد غبار ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۴ هجری خورشیدی که از یکی شدیدترین موارد گرد و غبارهای بهاره طی سال‌های اخیر در نوار غربی است گزینش شد تا ضمن ارزیابی همه‌جانبه رخداد حاضر بتوان الگوی جوی سازوکار حاضر را بازسناسی نموده و در نهایت به ردیابی بادهای حامل ذرات گرد و غبار منتهی شود. بررسی الگوهای جوی طی روز وقوع توفان (۱۳۹۴/۰۲/۲۵) نشان از افزایش شیب فشار در

محدوده غرب ایران بوده است که نمایانگر شکل‌گیری بادهای شدید و متعاقب آن توفان‌های گرد و غباری در غرب ایران بوده است. فرارفت بالا در بخش غربی ایران با تغییر تراکم و وزن هوا با حرارت همراه بوده است که به موجب آن حرکات چرخشی هوا در سطح زمین خیلی سریع و شدید شده؛ از سوی دیگر همزمانی تسلط تاوایی‌های مثبت و منفی در یک فاصله نه‌چندان قابل توجه در شکل‌گیری جت تراز زیرین موجب پیدایش توفان ریزگرد در روز نامبرده شده است. شاخص عمق نوری و غلظت گرد و غبار سطحی در مدل NAAPS نشان داده است که غلظت ذرات غبار بین ۶۴۰ تا ۱۲۶۰ میکروگرم بر مترمکعب برای غرب کشور متغیر بوده است. همچنین مقدار سولفات در منطقه بین ۱ تا ۲ میکروگرم بر مترمکعب برآورد گردید. مقایسه خروجی مدل‌های DREAM Bb و NMMB/BSC نشان از افزایش مقادیر غلظت بر واحد سطح گرد و غبار در روز وقوع توفان بوده است. بر اساس خروجی دو مدل حاضر می‌توان در خصوص گرد و غبارهای غرب ایران به این نتیجه رسید که عوامل محلی و فاصله نزدیک تا مراکز چشمه غبار نقش بسزایی در رخداد پدیده حاضر برای غرب ایران دارند. شبیه‌سازی مسیر حرکت توفان گرد و غبار با مدل دینامیکی HYSPLIT و با روش پسگرد (Backward) دو مسیر، گرد و غبار را به غرب کشور نشان داده است؛ (۱) مسیر شمال غرب- جنوب شرق؛ (۲) مسیر غرب به شرق. کانون‌های اصلی مسیر شماره یک: شمال غرب عراق و شرق سوریه و مسیر شماره دو: مرکز عراق بوده است. با توجه به غلظت بسیار بالای گرد و غبار در استان‌های غربی و به ویژه استان ایلام، همچنین اثرات مضر آن بر سلامت ساکنین این مناطق لزوم تحقیق بیشتر و پیگیری مسئولان در رفع این معضل زیست‌محیطی آشکارتر می‌گردد. لذا به منظور مدیریت و پایش این پدیده اقلیمی راهکارهایی ارائه می‌گردد:

- ظرفیت‌سازی و آموزش بهره‌برداران اراضی کشاورزی و منابع طبیعی؛
- اصلاح الگوی کشت و حفاظت پایدار منابع طبیعی؛
- ایجاد سامانه پایش و هشدار؛
- تقویت تشکلهای جوامع محلی در امر حفاظت و احیا منابع طبیعی و ۵- توسعه پایدار منطقه‌ای برای سازگاری با مقابله اثرات مخرب تغییرات اقلیمی.

منابع

- لشکری، حسن. ۱۳۸۷. تحلیل آماری سینوپتیکی توفان‌های گردوغبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی (۱۹۹۳-۲۰۰۵). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۶۵: ۱۷-۳۳
- عزیزی، قاسم؛ مرتضی میری و سید امید نبوی. ۱۳۹۱. ردیابی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۷: ۸۱-۶۳
- علی‌آبادی، کاظم؛ محمدعلی اسدی زنگنه و عباسعلی داداشی رودباری. ۱۳۹۴. ارزیابی و پایش توفان گرد و غبار با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور (مطالعه موردی غرب و جنوب غرب ایران). *فصلنامه علمی پژوهشی امداد و نجات*، ۱: ۱-۲۰
- علیجانی، بهلول. ۱۳۸۱. *آب و هواشناسی سینوپتیک*، چاپ اول. انتشارات سمت، تهران.
- مفیدی، عباس و سجاد جعفری. ۱۳۹۰. بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع توفان‌های گردوغبار تابستانه در جنوب غرب ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۵: ۴۵-۱۷

Algarni, S. and D. Nutter. 2015. Influence of dust accumulation on building roof thermal performance and radiant heat gain in hot-dry climates. *Energy and Buildings*, **104**: 181-190.

Arimoto, R. 2001. Eolian dust and climate: relationships to sources, tropospheric chemistry, transport and deposition. *Earth-Science Reviews*, **54(1)**: 29-42.

- Chin, M.; T. Diehl, P. Ginoux, and W. Malm. 2007. Intercontinental transport of pollution and dust aerosols: implications for regional air quality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7(21)**: 5501-5517.
- Darmenova, K.; I. N. Sokolik, and A. Darmenov. 2005. Characterization of East Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **110(D2)**.
- Ding, Z. L.; V. Ranov, S. L. Yang, A. Finaev, J. M. Han, and G. A. Wang. 2002. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. *Earth and Planetary Science Letters*, **200(3)**: 387-400.
- Draxler, RR. and GD. Rolph. 2011. HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory), *NOAA Air Resources Laboratory*, Silver Spring, MD.
- Draxler, R.; B. Stunder, G. Rolph, A. Stein, and A. Taylor. 2009. Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories 4 user's guide. *NOAA Tech. Memo*, ERL-ARL.
- Herman, J. R.; P. K. Bhartia, O. Torres, C. Hsu, C. Seftor, and E. Celarier. 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **102(D14)**: 16911-16922.
- Huang, J.; P. Minnis, B. Chen, Z. Huang, Z. Liu, Q. Zhao, and J. K. Ayers. 2008. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113(D23)**.
- IPCC, Houghton, J. T.; Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds). 2001. *IPCC. Climate Change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, 291-348.
- IPCC, Solomon, S.; D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds). 2007. *IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, 996.
- Kaskaoutis, D. G.; E. E. Houssos, A. Rashki, P. Francois, M. Legrand, D. Goto, and T. Takemura. 2016. The Caspian Sea-Hindu Kush Index (CashKI): A regulatory factor for dust activity over southwest Asia. *Global and Planetary Change*, **137**: 10-23.
- Liu, Z.; D. Liu, J. Huang, M. Vaughan, I. Uno, N. Sugimoto, and D. Winker. 2008. Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8(16)**: 5045-5060.
- Lu, H.; F. Zhang, X. Liu, and R. A. Duce. 2004. Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China. *Quaternary Science Reviews*, **23(18)**: 1891-1900.
- Nickovic, S.; G. Kallos, A. Papadopoulos, and O. Kakaliagou. 2001. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, **106(D16)**: 18113-18129. DOI: 10.1029/2000JD900794
- NRL. 2008. Navy Aerosol Analysis and Prediction System. Available in <http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/Docs/nrlmryonrprop.html>.
- Park, S. U.; L. S. Chang, and E. H. Lee, 2005. Direct radiative forcing due to aerosols in East Asia during a Hwangsa (Asian dust) event observed on 19-23 March 2002 in Korea. *Atmospheric Environment*, **39(14)**: 2593-2606.
- Pey, J.; X. Querol, A. Alastuey, F. Forastiere, and M. Stafoggia. 2013. African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM 10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13(3)**: 1395-1410.
- Rashki, A.; D. G. Kaskaoutis, P. Francois, P. G. Kosmopoulos, and M. Legrand. 2015. Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas. *Aeolian Research*, **16**: 35-48.
- Rolph, G.D. 2016. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://www.ready.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD.

- Salvador, P.; S. Alonso-Pérez, J. Pey, B. Artíñano, J. J. de Bustos, A. Alastuey, and X. Querol. 2014. African dust outbreaks over the western Mediterranean Basin: 11-year characterization of atmospheric circulation patterns and dust source areas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14(13)**: 6759-6775.
- Schepanski, K.; I. Tegen, and A. Macke. 2012. Comparison of satellite based observations of Saharan dust source areas. *Remote Sensing of Environment*, **123**: 90-97.
- Uno, I.; K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, and N. Sugimoto. 2009. Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geoscience*, **2(8)**: 557-560.
- Westphal, D. L.; O. B. Toon, and T. N. Carlson. 1988. A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45(15)**: 2145-2175.
- Witek, M. L.; P. J. Flatau, P. K. Quinn, and D. L. Westphal. 2007. Global sea-salt modeling: Results and validation against multicampaign shipboard measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, **112(D8)**.
- Zhang, X.; X. Wang, and P. Yan, 2008. Re-evaluating the impacts of human activity and environmental change on desertification in the Minqin Oasis, China. *Environmental Geology*, **55(4)**: 705-715.