نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال سوم، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۵

صفحات ۱۱۹- ۱۰۱

شبیه سازی و تحلیل عددی طوفان گرد و غبار شدید شرق ایران

الهام کارگر [۱]، کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران.

جواد بداق جمالی، دانشیار محیط زیست، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران.

عباس رنجبر سعادت آبادی، استادیار هواشناسی، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران.

مظاهر معین الدینی، استادیار آلودگیهای محیط زیست، پردیس دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

حمید گشتاسب، استادیار محیط زیست، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۸ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۹/۲۰

چکیده

قرار گرفتن کشور ایران در کمربند بیابانی سبب افزایش فرکانس رخداد طوفان های گرد و غبار بخصوص در نواحی شرقی و جنوبی آن و تاثیرات نامطلوب محیط زیستی شده است. هدف این تحقیق کاربرد مدل جفت شده پیش بینی عددی وضع هوا-شیمی۳,۶,۱WRF-(Chem.) (، برای شبیه سازی رخداد طوفان گرد و غبار (شرق ایران) و دستیابی به روشی جهت پایش، پیش بینی و هشدار وضعیت رخداد طوفان است. علاوه بر اجرای مدل با استفاده از داده های غلظت گرد و غبار سازمان محیط زیست، داده های سرعت و جهت باد سازمان هواشناسی و تصاویر ماهواره ای MODIS امکان تعیین مسیر حرکت ذرات و هشدار و ارائه پیش بینی بهتر بررسی شده است. نتایج مدل نشان داد که منطقه سیستان بخصوص بستر خشک تالاب هامون، چشمه اصلی طوفان گرد و غبار بوده است. هم چنین در طول رخداد، با همگرا شدن جریانات شمالی-جنوبی بر روی شرق ایران، ایجاد بادهای شدید در ترازهای زیرین جو، انتشار و افزایش غلظت گرد و غبار و انتقال آنها به نواحی جنوبی تا دریای عمان را در پی داشته است. مقایسه ها نشان داد که مدل WRF-Chem از نظر مقیاس زمانی، تا حدودی برآورد منطقی از گرد و غبار در محدوده مطالعاتی به دست می دهد. به دلیل استفاده از داده های پیش بینی جهانی بعنوان ورودی مدل وقوع خطا در برآورد غلظت امری بدیهی است. اجرای مدل با قدرت های تفکیک ۱۰ و ۳۰ کیلومتری بیانگر این واقعیت است که شکل گیری طوفان های منطقه سیستان بشدت از ویژگی های جغرافیایی محلی، بویژه توپوگرافی متأثر می گردد.

واژه های کلیدی: شبیه سازی گرد و غبار، طوفان سیستان، سنجنده MODIS، WRF-Chem، SDS

[۱]. **نویسنده مسئول:** Email: elham.karegar۹۲@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

مقدمه

هوای پاک و عاری از آلودگی یکی از حیاتی ترین نیاز های انسان است و گرد و غبار یکی از منابع آلوده کننده آن بشمارمی رود. ذرات گرد و غبار تحت تاثیر عوامل گوناگون از جمله شرایط جوی (باد، بارش و دما)، مشخصات سطح زمین (توپوگرافی، رطوبت سطح، طول زبری و پوشش گیاهی) و ویژگی های خاک (بافت، تراکم و ترکیب) و کاربری اراضی (کشاورزی) وارد جو می شوند (رضازاده *و همکاران*، ۱۳۹۲). منابع انتشار ذرات گرد و غبار به دو دسته، طبیعی و انسانی تقسیم می شوند (Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۴). گرد و غبار بیشتر از منابع طبیعی آن واقع در کمربند بیابانی، در شرایط ناپایدار و خشک و توأم با باد رخ می دهد (اردبیلی، ۱۳۸۹). مناطق خشک و نیمه خشک جهان در عرض های ۲۰ تا ۴۵ درجه شمالی و جنوبی واقع شده اند. منابع انسانی شامل دخالت انسان در تنوع سطح زمین، تغییرات کاربری زمین از طریق کشاورزی، جنگل زدایی، چرای بیش از حد، مدیریت ضعیف منابع آبی (رمضانی و جعفری، ۱۳۸۹) مانند ایجاد سدهای متعدد مهم ترین منابع تأمین گرد و غبار و ... است (Rashki et al., ۲۰۱۲). مناطق خاورمیانه، شمال آفریقا (صحرای بزرگ آفریقا) و آسیای میانه با تولید سالیانه ۱۵۰۰ میلیون تن گرد و غبار، منبع اصلی ذرات معلق در جو کره زمین است (علیدادی، ۱۳۹۰). اداره هواشناسی مرکز چین، طوفان های ماسه و گرد و غبار (SDS[۲]) را بر اساس نوع ذرات، قابلیت دید و سرعت طوفان ها در ۴ دسته بدین شرح قرار می دهد: ۱- گرد و غبار معلق (دید افقی کمتر از ۱۰۰۰۰ متر) ۲- وزش گرد و غبار (دید افقی بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر) ۳- طوفان ماسه/گرد و غبار (دید افقی بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر) ۴- طوفان شدید ماسه/گرد و غبار (دید افقی کمتر از ۵۰۰ متر) (Yang et al., ۲۰۰۸). بطور کلی تأثیرات طوفان های گرد و غبار را در ۷ بخش محیط زیستی (انتقال ذرات به نقاط دور، تأثیر ذرات گرد و غبار بر مواد، آب و هوا، اقیانوس ها و بیابان ها)، بهداشت عمومی و سلامت، اقتصادی، کشاورزی و دامداری، اجتماعی-فرهنگی و نظامی-امنیتی می توان بررسی نمود (شاهسونی *و همکاران*، ۱۳۸۹: فاضل نیا *و همکاران*، ۱۳۹۰: علیجانی و رئیس پور، ۱۳۹۰: عزیزی *و همکاران*، ۱۳۹۱: طاووسی و زهرایی، ۱۳۹۲: کریمی *و همکاران*، ۱۳۹۲: توکلی و رضایی کیخا، ۱۳۹۳: El-Askary et al., Zhang et al., ۲۰۰۶; Azizi et al., ۲۰۱۲; TaheriShahriayni et al., ۲۰۱۴؛ ۲۰۰۴). رویدادهای گرد و غبار مهیب ایران اغلب دارای مقیاس منطقه ای هستند. از این رو برای بررسی این رویدادها لازم است از ابزارها و روش هایی که قابلیت مطالعه ابعاد مختلف این رویداد را در مقیاس منطقه ای دارند استفاده شود. امروزه شبیه سازی عددی بعنوان یکی از مناسب ترین ابزارهای افزایش آگاهی نسبت به پدیده های گرد و غبار شناخته می شود و در بسیاری از پژوهشگاه ها و ارگان های اجرایی مورد استفاده محققین و بهره برداران قرار گرفته و می تواند برای پیش بینی زمان، شدت و ابعاد مختلف رویدادهای گرد و غبار مورد استفاده قرار گیرد. چرخه گرد و غبار شامل ۳ بخش، انتشار گرد و غبار[۳]، انتقال گرد و غبار[۴] و فرونشست گرد و غبار[۵] است که می توان آنرا از طریق مدل های مختلف شبیه سازی نمود (Baldasano, ۲۰۱۳). از آنجا که طوفان های گرد و غباری پدیده های جوی هستند، می توانند با استفاده از مدل های مختلف جوی در مقیاس های جهانی، منطقه ای و محلی شبیه سازی و پیش بینی شوند (Shaw, ۲۰۰۸). بررسی رضازاده *و همکاران* (۱۳۹۲) برای شبیه سازی گسیل غبار با مدل پیش بینی عددی وضع هوا WRF-Chem و داده های جدید سطح در منطقه خاورمیانه به کمک داده های

[۲] Sand and Dust Storm

[3] Dust Emission

[4] Dust Transportation

[5] Dust Deposition

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

ماهواره ای MODIS و داده های USGS نشان داد که طوفان غبار بر فراز چشمه سودان شکل گرفته و با جریانهای جنوب غربی به سمت شمال شرق ایران و ترکمنستان کشیده شده است. نیکفال *و همکاران* (۱۳۹۳) با شبیه سازی غلظت $PM_{۱۰}$ توسط مدل جفت شده WRF-Chem در منطقه ایران به این نتیجه رسیدند که مدل فوق از نظر مقیاس و تغییرات زمانی، برآوردی منطقی از هواویزها در محدوده مطالعاتی بدست می دهد. کانگ *و همکاران* (۲۰۱۱) طی مقایسه تغییرات عمودی گرد و غبار با ۳ طرح انتشار گرد و غبار در WRF-Chem دریافتند که شبیه سازی الگوی تولید و حمل گرد و غبار رضایت بخش بوده اما برآورد مقدار انتشار گرد و غبار در هر طرح بویژه در مناطق دارای خاک لومی متفاوت است. لیو *و همکاران* (۲۰۱۱) با شبیه سازی عمق نوری ذرات معلق توسط WRF-Chem و GIS دریافتند، شبیه سازی AOD تجزیه و تحلیل ذرات معلق و پیش بینی های بعدی را بهبود می بخشد. علیزاده جویباری *و همکاران* (۲۰۱۴) طی تحقیق بادهای ۱۲۰ روزه و طوفان گرد و غبار سیستان و بلوچستان، توسط مدل WRF-Chem دریافتند که بادهای قوی نزدیک سطح زمین در انتشار گرد و غبار در مسیر طولانی تأثیر بسزایی دارند. هدف اصلی این تحقیق کاربرد ویرایش سوم سامانه WRF-Chem به همراه طرحواره گسیل GOCART در شبیه سازی رخداد گرد و غبار شرق ایران بوده و اهداف فرعی همچون، پیش بینی و هشدار رخداد گرد و غبار، برآورد غلظت گرد و غبار در آن بررسی می شود.

ماهواره ها به تنهایی می توانند مشاهدات محلی، منطقه ای و جهانی قابل اعتماد و فروانی فراهم نمایند. بنابراین برای پایش و آشکارسازی منابع جوشش ریزگردی ضروری هستند. تولیداتی که از تصاویر ماهواره ای بدست می آیند نقش مهمی در اجرا و اعتبارسنجی مدلهای منطقه ای، مدلهای انتقال جهانی و مدلهای گردش کلی ریزگردها همراه با دیگر هواویزهای عمده دارند. از این تولیدات برای شبیه سازی توزیع مکانی و زمانی ریزگردها استفاده می شود. در مواردی که مشاهدات زمینی و نمونه برداری مکانی ضعیف است این تولیدات می توانند داده های باارزشی از چرخه فصلی و تغییرات ریزگردها فراهم نمایند. تحقیقات بعمل آمده نشان می‌دهد که تصاویر ماهواره های Terraو Aqua با سنجنده MODIS یکی از بهترین داده های ماهواره ای جهت بررسی مشخصات و مسیر حرکت گرد و غبار و طوفانهای مذکور محسوب می گردد. راشکی *و همکاران* (۲۰۱۳) خشک شدن دریاچه ها و گرد و غبار ناشی از آن (حوضه هامون) را با استفاده از مدل GLADS-Noah۱۰ و تصاویر ماهواره ای مودیس و تامز و... مورد بررسی قرار داده و دریافتند که سطح آب دریاچه هامون دارای تنوع سالانه در طول دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۵ بوده که به ناهنجاری های بارش مربوط می شود. مقایسه نقشه های حاصل از مدل با تصاویر ماهواره ای نشان داد که خشک شدن دریاچه هامون در سال های خاص سبب افزایش تعداد و شدت طوفان های گرد و غباری، مشکلات و آسیب هایی بر آب و هوا، اکوسیستم ها و سلامت انسان در منطقه شده است. با توجه به بررسی های بعدی توسط راشکی *و همکاران* (۲۰۱۳) بروی ویژگی های شیمیایی و کانی شناسی گرد و غبار هوای منطقه سیستان از طریق دستگاه پراش سنج ایکس[6] به این نتیجه رسیدند که این گرد و غبارها دارای منبع مشترک از فرسایش مناطق رسوبی بستر خشک تالاب هامون واقع در شمال سیستان بوده که نتایج کارهای قبلی آنها را تایید می نماید. در مقاله دیگری عزیزی *و همکاران* (۲۰۱۲) به تحلیل همدیدی و سنجش از دور رویدادهای گرد و غبار در جنوب غرب ایران پرداخته و برای ردیابی طوفان های گرد و غبار از تصاویر ماهواره ای مودیس استفاده کردند. نتایج نشان داد، بالاترین مقدار گرد و غبار ساعتی در بعد از ظهر رخ

[6] X-Ray Diffraction (XRD)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

داده و پایین ترین مقدار در UTC۰۰ (زمان محلی ۰۳:۳۰) است که در ارتباط با سطح حرارت (گرمایش) و وقوع ناپایداری خشک محلی ایجاد شده است. تجزیه و تحلیل داده ها نشان داد که میزان گرد و غبار در تمام ایستگاه ها، دو قله (اوج) آب و هوایی دارند. این قله ها را می توان به عوامل مختلف انسانی مانند جنگ، فعالیت های کشاورزی، ساخت سد و خشکسالی های گسترده ارتباط داد.

هدف این تحقیق، با توجه به رخدادهای طوفان های گرد و غبار در شرق ایران، کاهش کیفیت هوا و بوجود آمدن خسارات زیست محیطی و اقتصادی فراوان بررسی گرد و غبار از نظر مقیاس و تغییرات زمانی در محدوده مطالعاتی شرق ایران می باشد .

داده ها و روش کار

منطقه مورد مطالعه

منطقه سیستان با مساحتی بالغ بر ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع در ناحیه شمال شرق استان سیستان و بلوچستان، حد فاصل ۳۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی (شکل ۱)، با ۲ شهر، ۵ بخش، ۱۷ دهستان، ۹۸ روستا و جمعیت حدودا ۴۰۰۰۰۰ نفری در شرق ایران و هم مرز با کشورهای افغانستان و پاکستان قرار دارد (Rashki et al., ۲۰۱۳). اقلیم سیستان، گرم و خشک با میانگین دمای سالانه ۲۱ درجه سانتی گراد، میانگین بارش سالانه ۶۱/۴ میلی لیتر، میانگین رطوبت نسبی ۳۸ درصد، تبخیر و تعرق بالقوه ۴۱۹۶ میلی متر تا ۵۷۰۰ میلی متر است (Kaskaoutis et (al., ۲۰۱۴. رودخانه هیرمند و دریاچه هامون (تالاب های ۳ گانه هیرمند، صابری، پوزک) منبع اصلی آب دشت سیستان بوده اما با احداث سد بر روی رودخانه هیرمند و بروز خشکسالی های مکرر سبب خشک شدن تالاب و افزایش فرکانس طوفان های ماسه و گرد و غبار در منطقه شده است (Rashki et al., ۲۰۱۳).

شکل۱: نقشه منطقه سیستان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

داده ها

شبیه سازی میدان های هواشناسی با شرایط آغازین و مرزهای جانبی گرفته شده از داده های باز تحلیل شده FNL[۷] که از بایگانی مرکز پیش بینی محیطی آمریکا (NCEP)[۸] و مرکز تحقیقات جوی آمریکا (NCAR)[۹] با گام زمانی شش ساعته و تفکیک مکانی یک درجه (GRIB-۱) در مقیاس طول و عرض جغرافیایی تامین شده است.

توصیف و پیکربندی مدل

در این پژوهش از ویرایش سوم مدل جفت شده پیش بینی عددی وضع هوا-شیمی (WRF_Chem)، برای شبیه سازی طوفان ماسه و گرد و غبار شدید منطقه سیستان استفاده شده است (Peckham et al., ۲۰۱۴). مدل WRF_Chem به عنوان بخشی از مدل WRF می باشد که همان طور که از نام آن مشخص است، کاربرد اصلی آن در بررسی شیمی جو می باشد از این مدل می توان به منظور شبیه سازی و پیش بینی غلظت ذرات معلق موجود در جو ناشی از مکانیسم های طبیعی، فعالیت های بشری (آلاینده ها) و گردوغبار در اندازه های مختلف، نحوه انتشار و نهشت آنها استفاده کرد. همانطور که قبلا بیان شد برای پدیده گردوخاک سه فاز گسیل، انتقال و نهشت در نظر گرفته می‌شود که در هر یک از این فازها داده‌های مختلفی مورد نیاز است، بنابراین برای پیش بینی پدیده گردوخاک عمدتاً چندین مدل با یکدیگر جفت می‌شوند. بطورکلی این مدل از سه قسمت؛ سیستم پیش پردازش مدل (WPS[۱۰])، سیستم داده گواری (WRF-VAR) و سیستم پس پردازش و ابزارهای تصویرسازی تشکیل شده است. هسته دینامیکی مدل به دو صورت، هسته دینامیکی تحقیقاتی پیشرفته ARW (هسته دینامیکی مختصات جرمی اویلری) و هسته دینامیکی مدل میان مقیاس غیرهیدرستاتیک NMM است. بخش شیمی مدل، محاسبات مربوط به ساز و کارهای شیمیایی، تجزیه نوری ذرات هواویز، فرآیندهای گسیل ذرات هواویز از سطح به جو، فرآیندهای مربوط به حذف ذرات و طرحواره های پارامترسازی فرآیندهای میکروفیزیکی، دینامیکی، ترمودینامیکی ذرات هواویز را در بر می گیرد. نسخه ۳,۶,۱ مدل WRF_Chem برای کشور ایران به طول جغرافیایی ۴۲ تا ۶۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۳ تا ۴۱ درجه شمالی با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر و برای ۲۴ تراز قائم در تاریخ ۱۴ و ۱۵ جولای ۲۰۱۱ تنظیم شده است. نقشه های مربوط به پارامترهای مختلف جوی توسط نرم افزار Grads ترسیم شده اند. طرحواره بکار رفته در مدل WRF_Chem از نوع GOCART بوده که در آن ۵ اندازه مختلف برای ذرات خاک با شکل ایده آل کروی با اندازه ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است (Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۴) شعاع های موثر ذرات عبارتند از: ۰/۵، ۱/۴، ۲/۴، ۴/۵ و ۸ میکرومتر و کلیه محاسبات برای هر یک از آنها انجام می شود. این طرحواره، چشمه های پتانسیلی گرد و خاک را بر پایه کسر قابل فرسایش در نظر می گیرد. شار گرد و خاک قائم از سطح با معادله ۱ محاسبه می گردد.

معادله ۱ $$F=cSs_p u_{10}^2(u_{10}-u_{tp}) \qquad u_{10}>u_{tp}$$

در این فرمول c یک ثابت تجربی و برابر ۱/۹ $ugs^2\ m^{-5}$، u_{10} سرعت باد ۱۰ متری، u_{tp} سرعت آستانه فرسایش بادی اندازه ذره p که در سرعت های پایین تر از آن هیچ گسیلی صورت نمی گیرد. s_p کسر هر دسته اندازه گرد و خاک و S کسر نشست تجمعی در مناطقی با سطوح قابل فرسایش کم است (Alizadeh .(Choobari et al., ۲۰۱۴

[7] Final Reanalysis

[8] National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

[9] National Center for Atmospheric Research (NCAR)

[10] WRF Preprocessing System

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

داده های مشاهده ای

داده های سازمان محیط زیست

داده های مربوط به میزان غلظت گرد و غبار و ذرات PM_{10} برای تاریخ و منطقه مورد نظر جهت مقایسه از سازمان محیط زیست دریافت گردید.

داده های سازمان هواشناسی

به منظور انجام پژوهش حاضر داده های مربوط به حداقل دید، کد های مربوط به طوفان گرد و غبار، سمت و سرعت باد حداکثر، ایستگاه زابل از اداره هواشناسی کاربردی استان سیستان و بلوچستان برای مقایسه با خروجی مدل اخذ گردید.

تصاویر ماهواره ای سنجنده MODIS

جهت شناسایی منشأ گرد و غبار از تصاویر ماهواره ای اخذ شده توسط سنجنده MODIS ماهواره Terra و ماهواره Aqua، ناسا با قدرت تفکیک زمینی ۵۰۰ متر در تاریخ مورد نظر استفاده شد. این سنجنده بر روی سیستم (Earth Observing System) EOS و ماهواره های گردنده Aqua و Terra نصب گشته و امکان آنالیز دقیق فعالیت های توده های گرد و غباری را در مکان های خاص فراهم نموده است. سنجنده MODIS تمامی سطح زمین را در یک یا دو روز پوشش می دهد و داده ها را در ۳۶ باند مختلف جمع آوری می کند، که این ۳۶ باند از ناحیه مرئی (۰/۴۱۵ میکرومتر) آغاز و تا باند فروسرخ (۱۴/۲۳۵ میکرومتر) ادامه دارد و دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ متر است. وضوح مکانی و طیف بسیار بالای این سنجنده قابلیت دید انتقال گرد و غبار توسط هوا بر روی آب و خشکی را افزایش داده، که اجازه تحلیل و بررسی دقیق نحوه فعالیت طوفان گرد و غبار را در منطقه مورد مطالعه فراهم می کند. ذرات گرد وغبار در دو ناحیه مرئی و فرو سرخ گرمایی تصاویر ماهواره ای، کاملاً از دیگر پدیده های هواشناسی قابل تشخیص هستند.

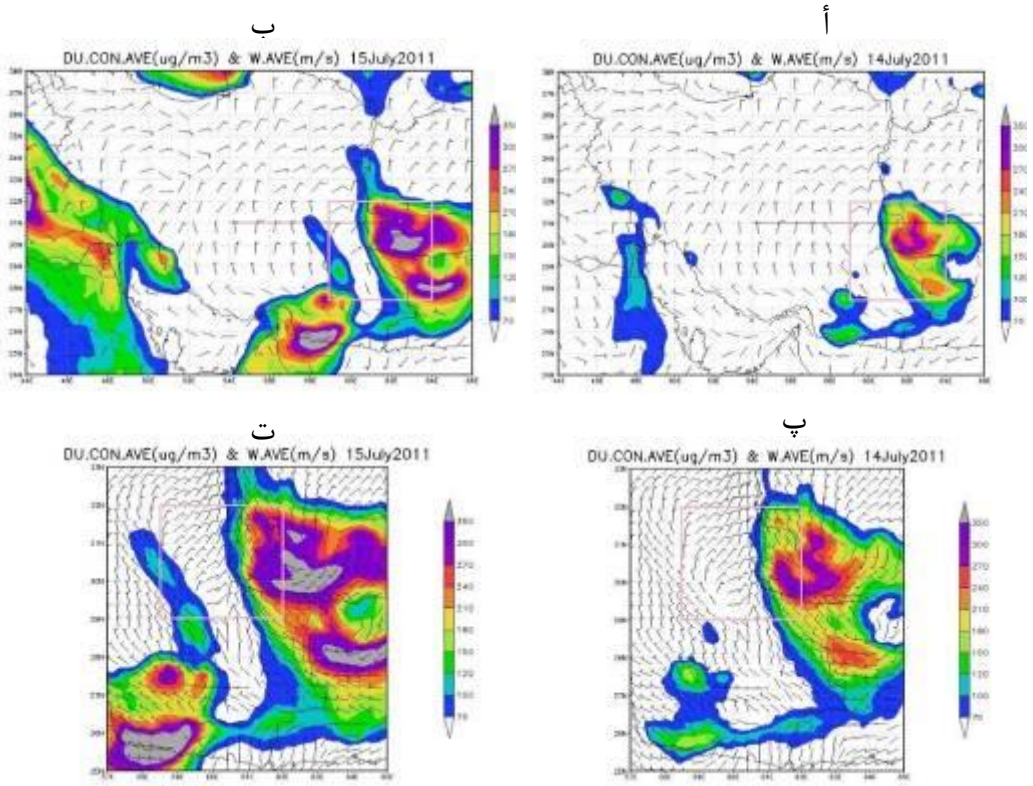
شرح و تفسیر نتایج

در پژوهش حاضر مدل WRF-Chem برای دو دامنه (قدرت تفکیک) ۱۰ و ۳۰ کیلومتر به اجرا درآمد تا در این حالت امکان بررسی میزان نقش و تأثیر عوامل محلی در شکل گیری طوفان های گرد و غباری فراهم گردد. به این ترتیب، درحالیکه در اجرای ۱۰ کیلومتر طرحواره مدل در حل معادلات خود، بنا به قدرت تفکیک بالای داده های ورودی، برهمکنش سطح زمین (توپوگرافی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و ...) و اتمسفر را با جزئیات بیشتر و بطور دقیق تر نشان می دهد. در مقابل در اجرای ۳۰ کیلومتر، بواسطه کاهش قدرت تفکیک داده های ورودی، طرحواره در حل معادلات از آشکارسازی برخی ویژگی ها و پدیده های کوچک مقیاس تا میان مقیاس بازمانده است. اجرای مدل در دو قدرت تفکیک متفاوت (۱۰ و ۳۰ کیلومتر)، به نحو بهتری میزان نقش توپوگرافی و عوامل محلی را در ایجاد طوفان ها آشکار می سازد. علاوه بر این غلظت گرد و غبار در ابتدای شبیه سازی توسط مدل به صورت مقدار بسیار جزئی(تقریبا صفر) در نظر گرفته می شود و هیچ گونه شارش جانبی گرد و غبار به داخل آشیانه وجود ندارد، به گونه ای که مدل فرض می کند که تمام گرد و غبارها از داخل آشیانه شبیه سازی ایجاد شده اند، اما گرد و غبارها می توانند زمانی که به مرزها می رسند، آزادانه به سمت خارج فرارفت یابند. این فرضیات به این معنی است که مدل از توزیع چشمه های خارجی گرد و غبار و هواویزهای زمینه صرف نظر می کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

نقشه های متوسط توزیع غلظت گرد و غبار (میکروگرم/مترمکعب) و سرعت باد (متر/ثانیه) برای نمونه طوفان شدید گرد و غبار ۱۴ و ۱۵ جولای ۲۰۱۱ توسط مدل WRF-Chem (هر دو دامنه) در شکل ۲ شبیه سازی شده است. مطابق شکل، تقابل سیستم کم فشار حاره ای و پرفشار جنب حاره ای در مورد مطالعه شده سبب ایجاد برش باد سطحی قوی در منطقه سیستان و انتقال گرد و غبار تا مسافت های بسیار دور تا دریای عمان شده است. خروجی های مدل بیانگر آن است که تقویت جریانات حاصل از مراکز فشاری فوق موجب گسترش و تداوم باد ۱۲۰ روزه در منطقه سیستان شده و به علت خشکی هوا امکان برداشت ذرات ماسه و گرد و غبار از منابع تأمین کننده را فراهم کرده و طوفان ماسه و گرد و غبار شدید این روز را بوجود آورده است.

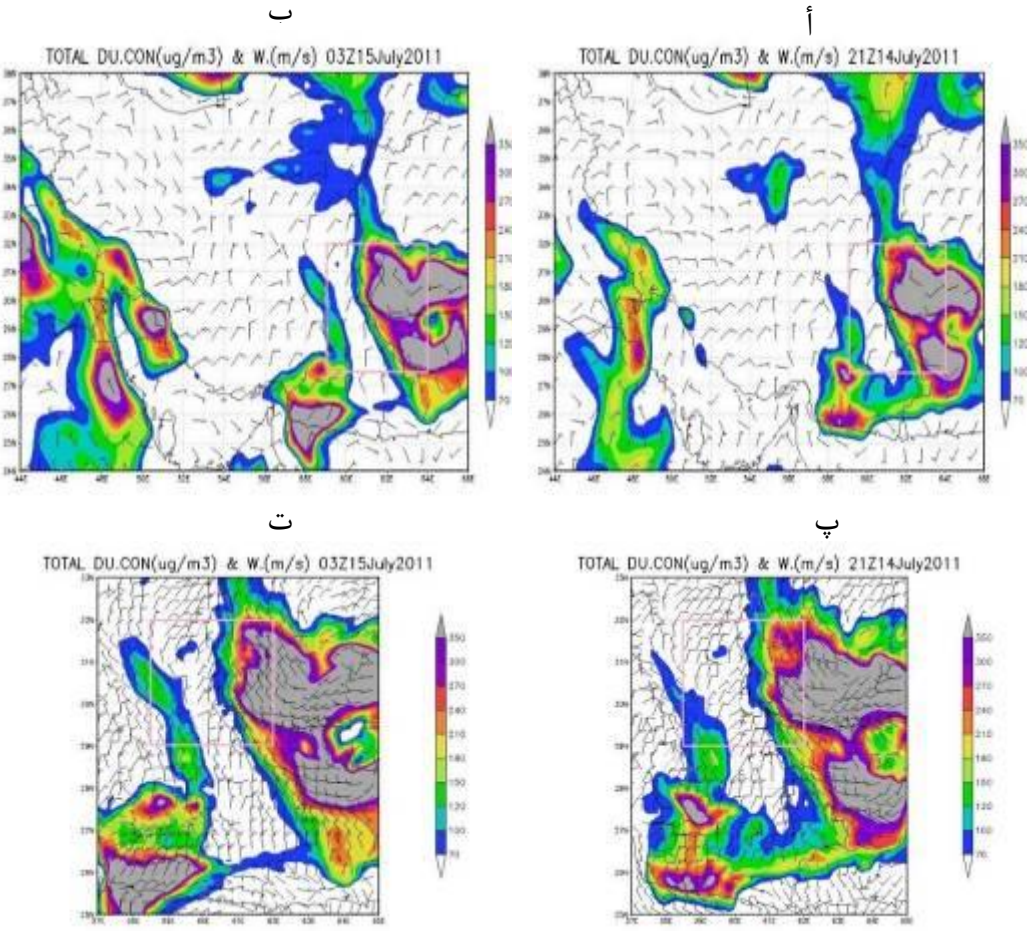


شکل ۲: نقشه های دامنه اول (قدرت تفکیک ۳۰ کیلومتر، أ و ب) **و دامنه دوم (قدرت تفکیک ۱۰ کیلومتر،** پ و ت) **متوسط توزیع غلظت گرد و غبار و سرعت باد خروجی مدل** WRF-Chem **برای تاریخ ۱۴ (نقشه سمت راست) و ۱۵ جولای (نقشه سمت چپ) ۲۰۱۱.**

شکل ۳ نتایج شبیه سازی حداکثر میزان توزیع غلظت گرد و غبار (پیک) هر دو دامنه را برای ساعت ۲۱ روز ۱۴ جولای و ساعت ۰۳ روز ۱۵ جولای ۲۰۱۱ نشان می دهد. در خروجی های مدل در مقیاس ۳۰ کیلومتر (شکل های أ و ب) نیز شاهد بروز طوفان های گرد و غبار هستیم. اما گستره و ساختار طوفان بطور محسوسی در قیاس با قدرت تفکیک ۱۰ کیلومتر (شکل های ب و پ) تغییر نموده و کمی از واقعیت خود دور شده است. در واقع مقایسه دو خروجی ۳۰ و ۱۰ کیلومتر ماهیت محلی طوفان ها و تأثیرپذیری شدید آنها از ویژگی های جغرافیایی شرق فلات ایران را به نمایش می گذارد. می توان عامل مهم این تفاوت را در نقش عوامل سطحی و توپوگرافی محلی دانست که در نقشه های ۱۰ کیلومتر نمایان تر است. در شکل ۳ بیشینه غلظت گرد و غبار عمدتاً در نواحی شرق و جنوب شرق ایران

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

دیده می شود. مقادیر بیشینه گسیل گرد و غبار برآورد شده (حدود ۴۲۵ میکروگرم/مترمکعب) مطابق جدول ۱ با میزان غلظت ذرات $PM_{۱۰}$ (۲۰۰۶/۵ میکروگرم/مترمکعب) دریافتی از ایستگاه سازمان محیط زیست (زابل) فاصله زیادی داشته اما همچنان غلظت ذرات گرد و غبار را بالا نشان میدهد. در هنگام طوفان گرد و غبار شدید در چشمه شرق ایران (منطقه سیستان) سرعت باد ۲۰ متر/ثانیه بود که جهت شمال غربی به جنوب شرقی داشته و با داده های هواشناسی (زابل) در جدول ۲ انطباق دارد. شکل های ۲ و ۳ نشان می دهند که جهت جریان باد در منطقه چشمه سیستان، به شکلی است که گرد و غبار گسیل شده را به خارج از کشور یعنی غرب افغانستان و پاکستان و در نهایت دریای عمان هدایت می کند. جهت های باد شمال غرب و شمالی عامل اصلی حرکت گرد و غبار بوده است.



شکل ۳: نقشه‌های (أ، ب، پ و ت) زمان حداکثر توزیع غلظت گرد و غبار به همراه سرعت باد برای هر دو دامنه در ساعت ۲۱ روز ۱۴ (سمت راست) و ساعت ۰۳ روز ۱۵ جولای (سمت چپ) ۲۰۱۱ مربوط به خروجی مدل WRF-Chem.

جدول ۱: میزان غلظت ذرات $PM_{۱۰}$ در ایستگاه زابل.

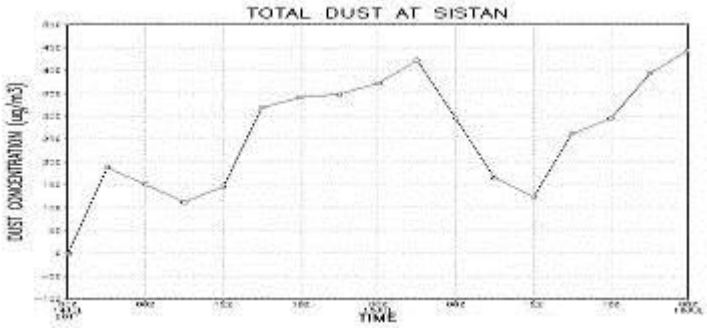
غلظت ذرات $PM_{۱۰}$ (میکروگرم/مترمکعب)	تاریخ
۹۹۶	۱۳۹۰/۴/۲۲
۲۰۰۶/۵	۱۳۹۰/۴/۲۳
۱۵۶۴/۰۹۹	۱۳۹۰/۴/۲۴

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

جدول ۲: داده های ایستگاه هواشناسی زابل بصورت میانگین روزانه در محدوده زمانی مورد مطالعه.

حداقل دید (متر)	سرعت باد حداکثر (متر/ثانیه)	سمت باد حداکثر (متر/ثانیه)	روز	ماه	سال خورشیدی
۳۰۰	۲۶	۳۳۰	۲۳	۴	۱۳۹۰
۵۰	۳۴	۳۳۰	۲۴	۴	۱۳۹۰

می‌توان نمودار خطی سری زمانی را با قرار دادن زمان بر روی محور افقی و متغیر مورد نظر بر روی محور عمودی رسم کرد. هدف تجزیه و تحلیل سری های زمانی معمولاً درک یا به مدل در آوردن مکانیسم تصادفی که منجر به مشاهده، سری می شود و پیش بینی مقادیر آینده سری، بر مبنای گذشته آن است. سری زمانی شبیه سازی شده در شکل ۴ تغییرات میزان غلظت گرد و غبار در طول رخداد در منطقه سیستان را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود اوج میزان غلظت گرد و غبار در ساعت ۲۱ روز ۱۴ جولای (۳۵۰ میکروگرم بر متر مکعب) و ساعت ۰۳ روز ۱۵ جولای (۴۲۵ میکروگرم بر مترمکعب) ۲۰۱۱ ایجاد شده است.

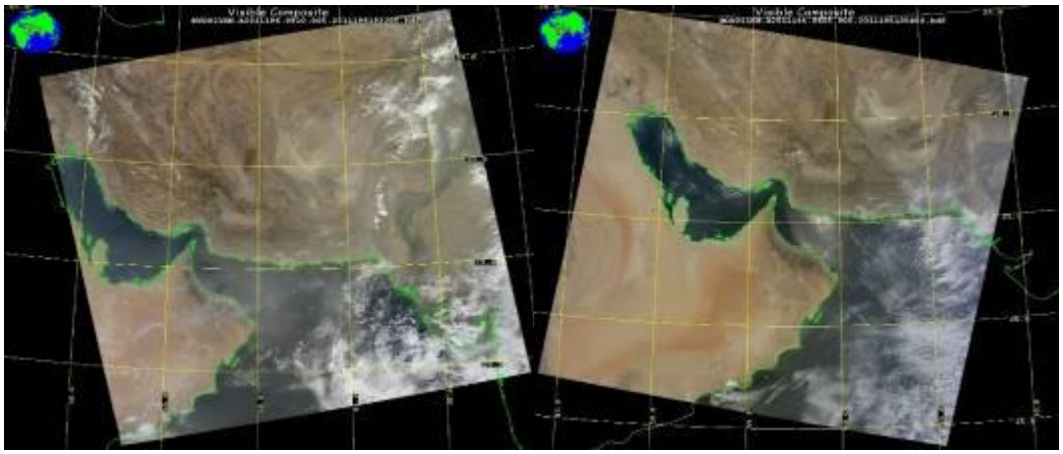


شکل ۴: سری زمانی تغییرات غلظت گرد و غبار در طول روزهای ۱۴ و ۱۵ جولای ۲۰۱۱ خروجی مدل WRF-Chem.

شکل های ۵ تصاویر ماهواره ای MODIS، رخداد شدید گرد و غبار ۱۴ و ۱۵ جولای ۲۰۱۱ را نمایش می دهد. در شکل ۵ این نکته قابل تشخیص است که در روزهای ۱۴ و ۱۵ جولای ۲۰۱۱، غلظت بالای گرد و غبار وجود دارد که می تواند بدلیل باد شمالی و شمال غربی و برش باد سطحی باشد. توزیع گرد و غبار تفسیر شده توسط تصویر مرئی سنجنده MODIS بطور کامل با توزیع مکانی غلظت گرد و غبار شبیه سازی شده توسط مدل WRF-Chem انطباق دارد (شکل۵). این رخداد شدید گرد و غبار نشان داده شده در تصویر ماهواره ای یکی از شدیدترین طوفان های گرد و غبار دشت سیستان و غرب افغانستان است، بطوریکه مطابق جدول ۲ دید افقی را به ۵۰ متر تقلیل داده است. بستر تالاب های خشک از خاکهای ریزدانه ای تشکیل شده اند که آب در دوره های گذشته با فرسایش آنها را در دورن بستر تالاب شکل داده است. وقتی تالاب خشک میشود، رسوبات ریزدانه و اغلب شور، مانع رشد گیاه شده و منبعی برای تولید گرد و غبار ایجاد می شود (سیستان). دوره های خشکسالی که باعث خشک شدن تالابها می شود و بر روی تولید زمینهای کشاورزی اثر می گذارد، اغلب باعث گسترش منابع تولید گرد و غبار می شود. منطقهٔ مرزی ایران، افغانستان و پاکستان به "دشت مارگو " مشهور است. قسمت‌های پست این منطقهٔ کوهستانی مثل حوضهٔ سیستان، منطقهٔ برداشت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

گرد و غبار است. این منطقه (حوضهٔ سیستان) چالهٔ بزرگ بسته ای است که ۴۵۰ کیلومتر طول دارد. رسوبات مستعد بادرفتگی از کوه‌های اطراف به داخل حوضهٔ وارد می‌شوند. مناطق برداشت، مخروط افکنه‌ها و دریاچه‌های موقتی اند. در واقع، تصاویر MODIS از منطقه نشان می‌دهند که بستر دریاچهٔ هامون و دلتای بزرگ رودخانهٔ هیرمند جزء مناطق برداشت ریزگرد هستند (بادهای ۱۲۰ روزه). تقریباً تمامی منابع تغذیه ماسه و گرد و غبار شامل؛ بسترهای خشکیده هامون های پوزک، صابری و شرق هامون هیرمند و بستر اکثر شاخه های هیرمند و رود سیستان در تغذیه طوفان سهیم بوده اند. مرز جنوبی طوفان بخش های وسیعی از ایالت بلوچستان پاکستان را پوشانده است و نواحی جنوبی مرز حوضه آبریز هیرمند در افغانستان پوشیده از گرد و غبار است. کوه های سیاهان با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی مانع از گسترش بیشتر ماسه به سمت جنوب شده ولی طوفان تا محل اتصال رود ارغنداب در منطقه بست بشدت گسترش یافته است.



شکل ۵: تصاویر مربوط به طوفان شدید گرد و غبار برای تاریخ ۱۴ جولای توسط ماهواره Terra (شکل سمت راست) و تاریخ ۱۵ جولای ۲۰۱۱ توسط ماهواره Aqua (شکل سمت چپ) در منطقه سیستان.

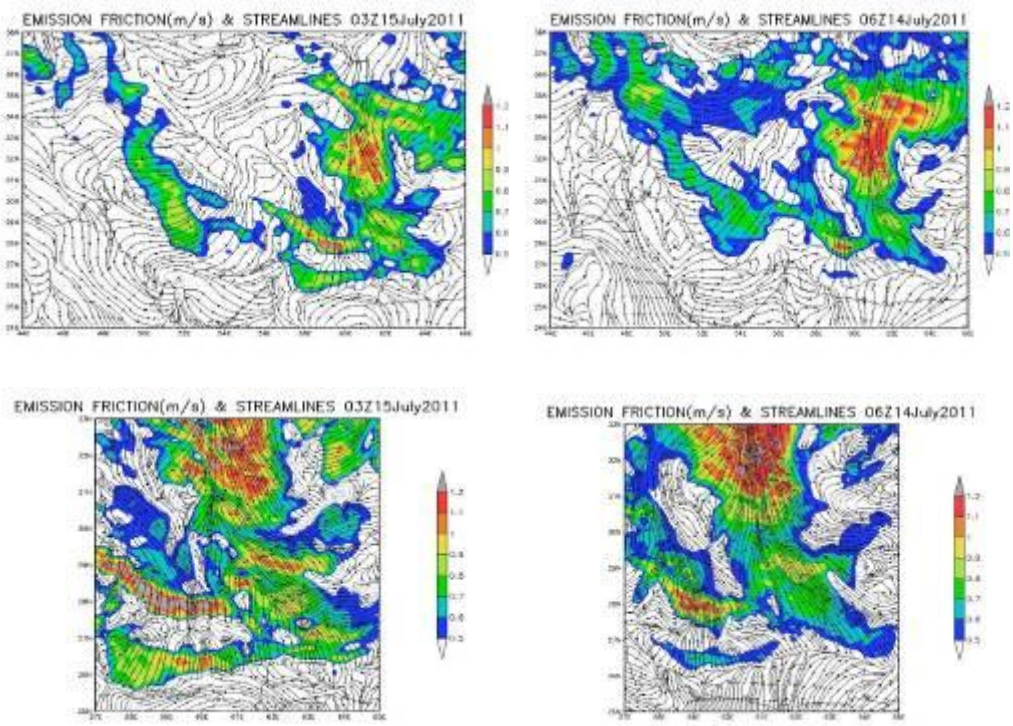
منبع: http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/realtime.cgi

یکی از پارامترهای مهم در جداسازی و انتقال ذرات، سرعت اصطکاکی است. جابجای ذرات گرد و غبار تابعی از شدت نیروی حرکت یا تنش وارده به زمین (سرعت اصطکاکی) است. براساس شکل ۶ میزان بیشینه سرعت اصطکاکی در منطقه سیستان (هر دو دامنه ۱۰ و ۳۰ کیلومتری) بیش از ۱/۲ متر/ثانیه است (شکل های مربوط به خروجی سه ساعته مدل در پیوست شماره ۱ آمده است). در اکثر موارد این میزان به قطر ذرات و مقادیر توربولنتی (آشفتگی) بستگی دارد اما بطور عموم این مقدار در حدود ۰/۶ متر/ثانیه است. این پارامتر که به دلیل اختلاف سرعت روی سطح زبر و لایه بالایی ایجاد می شود، تولید یک برش قائم کرده که در اثر آن پیچک هایی ایجاد می شوند که انرژی، گاز و ذرات گرد و غبار را در راستای قائم انتقال می دهد. وقوع طوفان گرد و غبار در سیستان را باید به الگوی خاص جریان باد نسبت داد. می توان گفت باد غالب در این منطقه از نوع باد شکافی است. باد شکافی یا جریان شکافی یک باد محلی است که در بین شکاف کوه و دره جریان می یابد. بادهای شکافی، بادهای تراز پایینی هستند و می توانند تا حدود ۲۰ تا ۴۰ نات و در مواردی بیش از ۵۰ نات بوزند. این بادها عموماً نزدیک به خروجی شکاف قوی تر می شوند. مطابق شکل ۶ (هر دو دامنه) خطوط جریان باد راستای شمال غربی را نشان می دهد که هنگام رسیدن به شمال منطقه سیستان و جنوب غرب افغانستان فشرده تر شده و سرعت باد افزایش یافته است. این جریانات با عبور از منطقه سیستان به سمت جنوب غرب منحرف شده اند. خطوط جریان، خطوط پیوسته ای هستند که جهت باد ناشی از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

جریانات همگرایی و واگرایی در منطقه را نشان می دهند. فشردگی خطوط جریان هوا، بیانگر سرعت زیاد باد در منطقه مورد مطالعه است. از طرف دیگر خروجی های مدل بیانگر تقویت سامانه واچرخندی (جریان ساعت گرد هوا) در قسمت شمال شرق ایران و تقویت قابل ملاحظه جریان هوا بصورت گردش چرخندی (جریان ساعت گرد) در منطقه سیستان است که پیدایش یک جت تراز زیرین را در شرق فلات ایران و در محدوده مرزی ایران و افغانستان در امتداد شمالی-جنوبی (از روی دریای خزر و ارتفاعات هندوکش بسمت چرخند) به نمایش گذاشته است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، بیشینه فرسایشی بر اثر سرعت اصطکاکی در ناحیه منشأ غبار با همرفت قوی در توده هوای مستقر در سامانه های چرخندی همراه بوده و باعث ایجاد جریان باد سطحی قوی بر روی منطقه سیستان شده است. چشمه گرد و غبار (منطقه سیستان) پتانسیل بالایی در فرسایش شدید خاک در زمان فعالیت باد شمال غربی (در طول بهار و تابستان) و فعالیت شدید چرخند جبهه ای در طول شرایط بسیار گرم و خشک دارد. بتدریج با گسترش طوفان گرد و غبار به سمت جنوب ایران، چشمه های دیگر غبار با سرعت های کمتر نیز قابلیت گسیل را نشان می دهند که نشان دهنده قابلیت فرسایش بالای خاک در این مناطق است. شکل ۶ همچنین وضعیت منطقه ای جریان هوا را در تراز زیرین در اجرای مدل با قدرت تفکیک ۱۰ کیلومتر (شکل های پ و ت) نشان می دهد. تسلط همزمان چرخند و واچرخند بر روی مرزهای شرقی و دشت سیستان، شکل گیری جت تراز زیرین و وقوع طوفان را در منطقه تبیین می نماید. در مقابل کاهش قدرت تفکیک داده ها در اجرای ۳۰ کیلومتر (شکل های أ و ب) سبب ناپایدار شدن مرکز گردش واچرخندی بر روی کوه های خراسان جنوبی از یک سو و کاهش محسوس شدت گردش چرخندی در مرکز کم فشار سیستان گردیده است. با در نظر گرفتن بستر خشک دریاچه های هامون در منطقه دشت سیستان و با جریان یافتن هوا از شمال به جنوب، این جریان از روی بستر خشک هامون ها عبور نموده و طوفان های گرد و غبار با منشأ این دریاچه ها شکل می گیرد.



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

شکل ۶. نقشه های حداکثر سرعت سایشی و کانال های جریان باد در دو قدرت تفکیک افقی ۱۰ کیلومتری (پ و ت) و ۳۰ کیلومتری (أ و ب)، خروجی مدل WRF-Chem.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از خروجی های مدل WRF-Chem به شناسایی پدیده گرد و غبار و خصوصیات آن در منطقه دشت سیستان (ایران) پرداخته شده است. با توجه به نتایج، مدل WRF-Chem از نظر مقیاس و تغییرات زمانی برآوردی منطقی از هواویزها در محدوده مطالعاتی بدست میدهد. با تولید نقشه های توزیع غلظت ذرات گرد و غبار، مناطقی از حوضه شبیه سازی که دارای حداکثر غلظت ذرات هستند بعنوان چشمه های اصلی گسیل ذرات شناسایی شدند. شبیه سازی ذرات گرد و غبار در دو قدرت تفکیک ۱۰ و ۳۰ کیلومتری، دشت سیستان در شرق ایران را بعنوان چشمه اصلی منطقه نمایش می دهد. یافته ها حاکی از انطباق محدوده های با حداکثر غلظت بر چشمه شناخته شده ذرات (دشت سیستان بویژه بستر خشک تالاب های هامون) است. اجرای مدل با قدرت های تفکیک ۱۰ و ۳۰ کیلومتری نیز بیانگر این واقعیت است که شکل گیری طوفان های گرد و غباری در دشت سیستان بشدت از ویژگی های جغرافیایی محلی، بویژه توپوگرافی متأثر می گردد. بطوریکه با کاهش قدرت تفکیک مدل به واسطه کاهش نقش عوامل محلی، شدت جت تراز زیرین در مرزهای شرقی ایران و به تبع آن شدت و گستره طوفان های گرد و غباری در دشت سیستان به شدت کاهش می یابند. حداکثر غلظت گرد و غبار در نیمه های روز و حداقل آن در نیمه های شب مشاهده می شود. به دلیل استفاده از داده های تجربی سازمان محیط زیست به منظور مقایسه با نتایج مدل جفت شده، دقت داده های مشاهداتی و دستگاه های اندازه گیری و وقوع خطای انسانی با توجه به حساسیت بالای دستگاه های اندازه گیری گرد و غبار، می تواند از موارد احتمالی در وجود خطا بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی باشد. به لحاظ تطابق در زمان وقوع پدیده های گرد و غبار شدید تطابق قابل قبولی با داده های ایستگاه زابل دارد. غلظت های شبیه سازی شده، اعتبار خوبی را از توزیع زمانی و مکانی غلظت گرد و غبار با توجه به تصاویر مرئی ماهواره ای سنجنده مودیس نشان داده بود. بررسی نقشه های سرعت سایشی نشان داد که چشمه گرد و غبار در منطقه سیستان، بویژه بستر خشک تالاب هامون پتانسیل بالایی در فرسایش شدید خاک در زمان فعالیت باد ۱۲۰ روزه در طول شرایط بسیار گرم و خشک دارد و ذرات سیلت و رس را تا هزاران کیلومتر دورتر از چشمه های خود انتقال میدهد. خطوط برداری در نقشه های سرعت سایشی، حاکی از همگرا شدن جریانات شدید شمالی-جنوبی و وقوع طوفان گرد و غبار شدید در این تاریخ ها است. با توجه به اینکه ایجاد زبری در سطح خاک یکی از عوامل کاهش دهنده فرسایش بادی بشمار می رود، لذا پیشنهاد می گردد که از روش های مناسب جهت ایجاد زبری در سطح خاک مطابق با وضعیت منطقه (مانند ایجاد بادشکن های مصنوعی)، استفاده گردد. هم چنین بهتر است از انواع مدل های پیش بینی رخدادهای گرد و غبار و سامانه های هشدار سریع برای مناطق طوفان خیز استفاده گردد. بهتر است، دیگر طرحواره های گرد و غبار(MAD/SORGAM, MADE/VBS, MAM, MOSAIC) در مدل WRF-Chem برای مطالعه میزان حساسیت شبیه سازی و پیش بینی طوفان های گرد و غبار آزمون شود.

منابع

اردبیلی، لیلا. ۱۳۸۹. بررسی فرآیندهای موثر در تشدید گرد و غبار سال های اخیر ایران. *مجموعه مقالات همایش ملی فرسایش بادی و طوفان های گرد و غبار*، یزد-ایران، ۲۷-۲۸ بهمن، **۲**: ۴۵-۵۳.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

توکلی، مرتضی و عبدالمجید رضایی کیخا. ۱۳۹۳. اثرات بادهای ۱۲۰ روزه بر محیط زیست سیستان. *همایش ملی افق های نوین در توانمندسازی و توسعه چایدار معماری، عمران، گردشگری، انرژی و محیط زیست شهری و روستایی*، ایران-همدان، ۹ مرداد، **۱**: ۱-۹.

رضازاده، مریم؛ پرویز ایران نژاد و یاپینگ شائو. ۱۳۹۲. شبیه سازی گسیل غبار با مدل پیش بینی عددی وضع هوا WRF-Chem و با استفاده از داده های جدید سطح در منطقه خاورمیانه. *مجله فیزیک زمین و فضا*، **۱**: ۱۹۱-۲۱۲.

رمضانی، نفیسه و رضا جعفری. ۱۳۸۹. تغییرات کاربری اراضی در ایجاد طوفان های گرد و غبار و تاثیر آن بر تغییرات اقلیمی. *مجموعه مقالات همایش ملی فرسایش بادی و طوفان های گرد و غبار، یزد-ایران*، ۲۷-۲۸ بهمن، **۲**: ۱۰۰-۱۱۰.

شاهسونی، عباس؛ مریم، یاراحمدی؛ نعمت ال... جعفرزاده حقیقی فرد؛ ابوالفضل نعیم آبادی؛ محمد حسن محمودیان؛ حامد صاکی؛ محمد حسین صولت؛ زهرا سلیمانی و کاظم ندافی. ۱۳۸۹. اثرات طوفان های گرد و غباری بر سلامت و محیط زیست. *مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی*، **۲ (۴)**: ۴۵-۵۶.

طاووسی، تقی و اکبر زهرایی. ۱۳۹۲. مدلسازی و پیش بینی پدیده گرد و غبار استان سیستان و بلوچستان بر اساس مدل برون یابی منحنی روند سری های زمانی. *مجله کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی*، **۱ (۱)**: ۱۳۹-۱۵۷.

عزیزی، قاسم؛ مرتضی میری و سید امیر نبوی. ۱۳۹۱. ردیابی پدیده گرد و غبار در نیمه غربی ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، **۲ (۷)**: ۶۳-۸۱.

علیدادی، حسین. ۱۳۹۰. *منابع آلاینده هوا و اثر آن بر محیط زیست*. چاپ ۱. انتشارات دانشگاه علوم پزشکی مشهد.

علیجانی، بهلول و کوهزاد رئیس پور. ۱۳۹۰. تحلیل آماری، همدیدی طوفان های گرد و خاک در جنوب شرق ایران (مطالعه موردی منطقه سیستان). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، **۲ (۵)**: ۱۰۷-۱۳۲.

فاضل نیا، غریب؛ اکبر، کیانی؛ محمود علی خسروی و میثم بندانی. ۱۳۹۰. بررسی انطباق الگوی بومی توسعه کالبدی-فیزیکی روستای تمبکاء شهرستان زابل با جهت حرکت طوفان های شن و ماسه. *مجله مسکن و محیط روستا*، **۱ (۱۳۶)**: ۳-۱۶.

کریمی، مرتضی؛ محمد حامد یزدانی و افشین نادری. ۱۳۹۲. تاثیر بادهای ۱۲۰ روزه بر امنیت منطقه سیستان. *مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، **۲۴ (۲)**: ۱۱۱-۱۲۸.

نیکفال، امیرحسین. ۱۳۹۳. شبیه سازی غلظت ذرات $PM_{۱۰}$ توسط مدل جفت شده WRF-Chem در منطقه ایران. *کنفرانس ژئوفیزیک ایران*، ایران، ۲۳-۲۵ اردیبهشت، **۱۶**: ۷۷-۸۱.

Alizadeh Choobari, O.؛ Zawar-Reza, P. and Sturman, A. ۲۰۱۴. A global satellite view of the seasonal distribution of mineral dust and its correlation with atmospheric circulation. Journal of Dynamics of Atmospheres and Oceans, **۶۸**: ۲۰-۳۴.

Alizadeh Choobari, O.؛ Zawar-Reza, P. and Sturman, A. ۲۰۱۴. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. Journal of Atmospheric Research, **۱۳۴**: ۱۵۲-۱۶۵.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

Alizadeh Choobari, O.؛ Zawar-Reza, P. and Sturman, A. ۲۰۱۴. The wind of ۱۲۰ days and dust storm activity over the Sistan Basin. Journal of Atmospheric Research, **۱۴۳**: ۳۲۸-۳۴۱.

Azizi, G.؛ Shamsipour, A.؛ Miri, M. and Safarrad, T. ۲۰۱۲. Synoptic and remote sensing analysis of dust events in southwestern Iran. Natural Hazards, **۶۴**: ۱۶۲۵-۱۶۳۸.

Baldasano, J.M. ۲۰۱۳. Mineral dust modeling from meso to global scale. Barselona Supercomputing Center, Evora-Portugal, ۱-۳ July, ۱-۷۷, Website: www.bsc.es.

COMET Program. ۲۰۱۲. Atmospheric Dust. University Corporation for Atmospheric Research, **۱**, Website: www.geos-r.gov/...dust/navmenu.php_tab_۱_age_۲,۱,۲_type.

El-Askary, H.؛ Gutam, R. and Kafatos, M. ۲۰۰۴. Remote sensing of dust storms over the Indo-Gangetic basin. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, **۳۲**: ۱-۱۲.

Http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/realtime.cgi

Kaskaoutis, D.G.؛ Rashki, A.؛ Houssos, E.E.؛ Goto, D. and Nastos, P.T. ۲۰۱۴. Extremely hight aerosol loading over Arabian Sea during June ۲۰۰۸: the specific role of the atmospheric dynamics and Sistan dust storms. Journal of Atmospheric Environment, Doi. **۱۰,۱۰۱۶**/j.atmosenv. **۲۰۱۴,۰۵,۰۱۲**: ۱-۲۷.

Kang, J.؛ Yoon, S.C.؛ Shao, Y. and Kim, S.W. ۲۰۱۱. Comparsion of vertical dust flux by implementing three dust emission schems in WRF-Chem . Journal of Geophysical Research, **۱۱۶** (Do**۹۲۰۲**): ۱-۱۸.

Kok, J.F.؛ Parteli, E.J.R.؛ Michaels, T.I. and Bou Karam, Diana. ۲۰۱۲. The physics of wind-blown sand and dust. Journal of Rep. Prog. Phys, **۷۵**: ۱-۱۱۹.

Liu, Z.؛ Liu, Q.؛ Lin, H.C.؛ Schwarts, C.S. and Lee, Y.H. ۲۰۱۱. Assimilating MODIS aerosol optical depth using WRF-Chem and GIS: Application to a Chinese dust storm. ۱۲th WRF Users Workshop, Boulder, USA, ۲۰-۲۴ June, **۱۲** (**۱۲**): ۱-۱۱.

Peckham, S.E.؛ Grell, G.A.؛ Mckeen, S.A.؛ Ahmadov, R.؛ Fast, J.D.؛ Gustafson, W.I.؛ Ghan, S.J.؛ Zaveri, R.؛ Schmitz, R. et al. ۲۰۱۴. WRF-Chem Version ۳,۶ Users Guide. NOAA, ۸ July ۲۰۱۴, ۶ Vols., Website: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users.

Rashki, A.؛ Kaskaoutis, D.؛ Rautenbach, C.J.D.؛ Eriksson, P. ۲۰۱۲. Changes of Permanent Lake Surface, and Their Consequences for Dust Aerosol and Air Quality: The Hamoun Lakes of the Sistan Area, Iran. Journal of Atmospheric Aerosol-Regional Characteristics-Chemistry and Physics, **۶**, ۱۶۳-۲۰۲, Website: http://dx.doi.org/۱۰,۵۷۷۲/۴۸۷۷۶.

Rashki, A.؛ Kaskaoutis, D.G.؛ Rautenbach, C.J.D.؛ Eriksson, P.G.؛ Qiang, M.؛ Gupta, P. ۲۰۱۲. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Journal of Aeolian Research, **۵**: ۵۱-۶۲.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

Rashki, A.؛ Eriksson, P.G.؛ Rautenbach, C.J.D.؛ Kaskaoutis, D.G.؛ Grote, W. and Dykstra, J. ۲۰۱۳. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. Journal of Chemosphere, **۹۰**: ۲۲۷-۲۳۶.

Rashki, A.؛ Kaskaoutis, D.G.؛ Gouide, A.S. and Kahn, R.A. ۲۰۱۳. Dryness of ephemeral lakes and cosequences for dust activity: The case of the Hamoun drainage basin, Southeastern Iran. Journal of Science of the Total Environment, **۴۶۳**: ۵۵۲-۵۶۴.

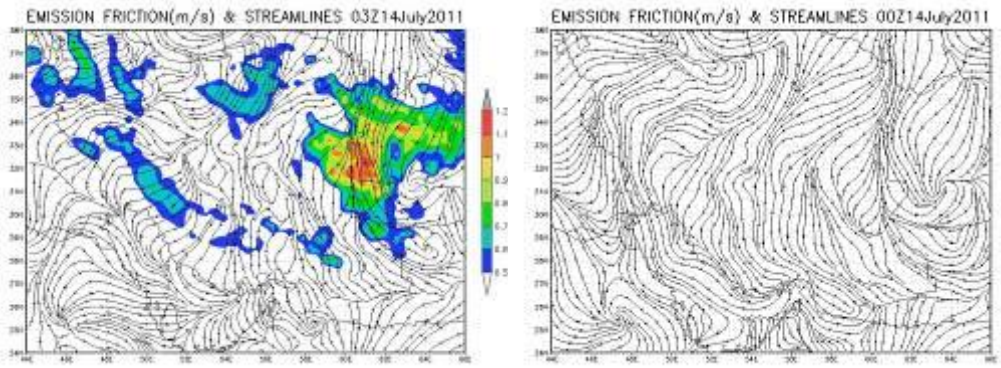
Shaw, P. ۲۰۰۸. Aplication of aerosol speciation data as an insitu dust proxy for validation of the Dust Regional Atmospheric Model (DREAM). Journal of Atmospheric Environment, **۴۲**: ۷۳۰۴-۷۳۰۹.

TaheriShahriayni, H.؛ Karimi, K.؛ HabibiNokhandan, M. and HafeziMoghadas, N. ۲۰۱۴. Monitoring of dust storm and estimation of aerosol concentration in the Middle East using remotely sensed images. Arab J Geosci, ۱-۹.

Yang, X.؛ Zhu, B.؛ Wang, X.؛ Zhou, L.Z.؛ Chen, J.؛ Yin, J. and Lu, Y. ۲۰۰۸. Late Quaternary environmental changes and organic carbon density in the Hunshandake Sandy land, eastern Inner Mongolia, China, Global and Planetary Change, **۶۱**: ۷۰-۷۸.

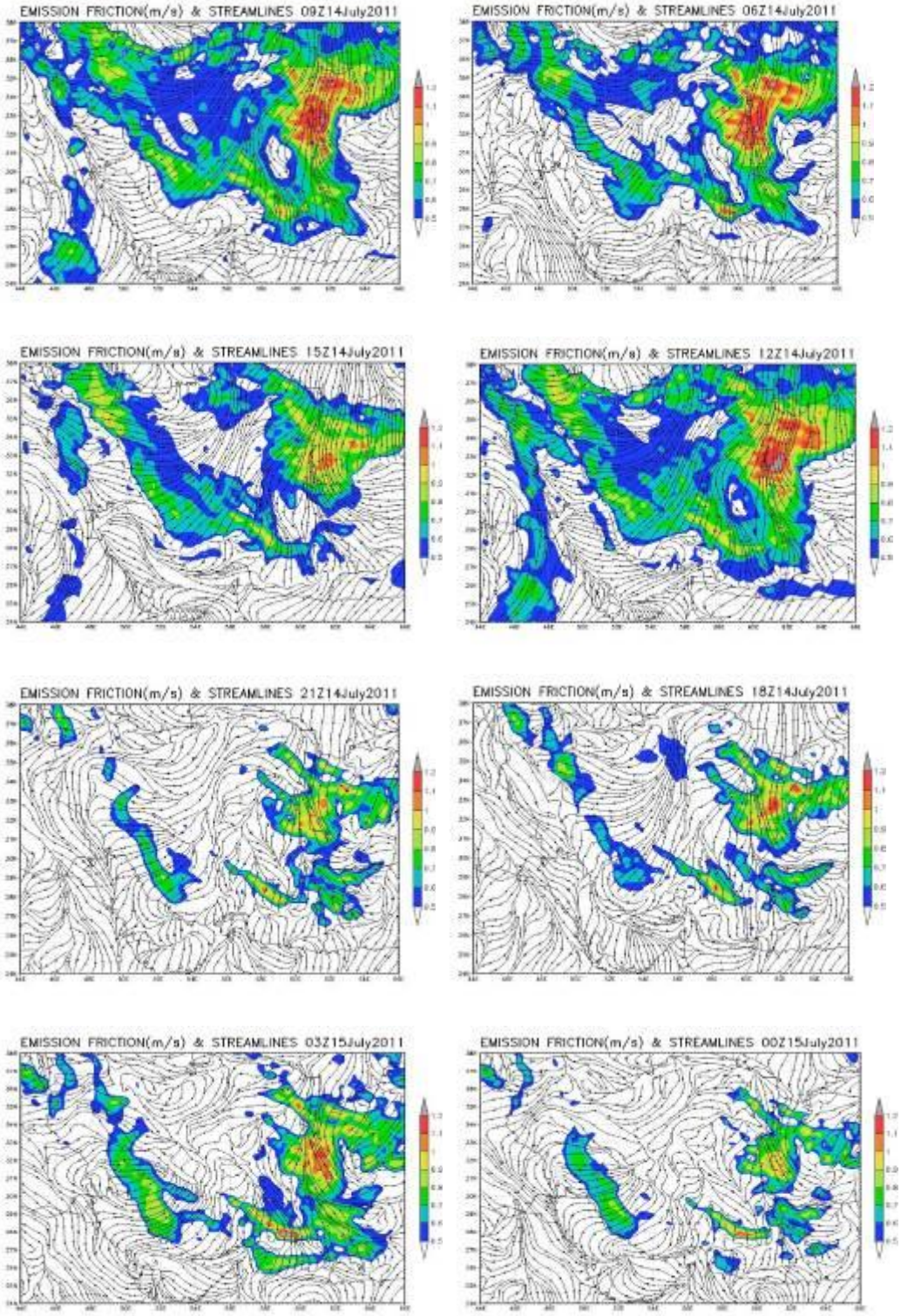
Zhang, P.؛ Lu, N.؛ Hu, X. and Dong, C. ۲۰۰۶. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels. Global and Planetary Change, **۵۲**: ۱۹۷-۲۰۶.

پیوست ۱. نقشه های سرعت سایشی و کانال های جریان باد در دو تفکیک افقی ۱۰ و ۳۰ کیلومتری، خروجی مدل WRF-Chem.



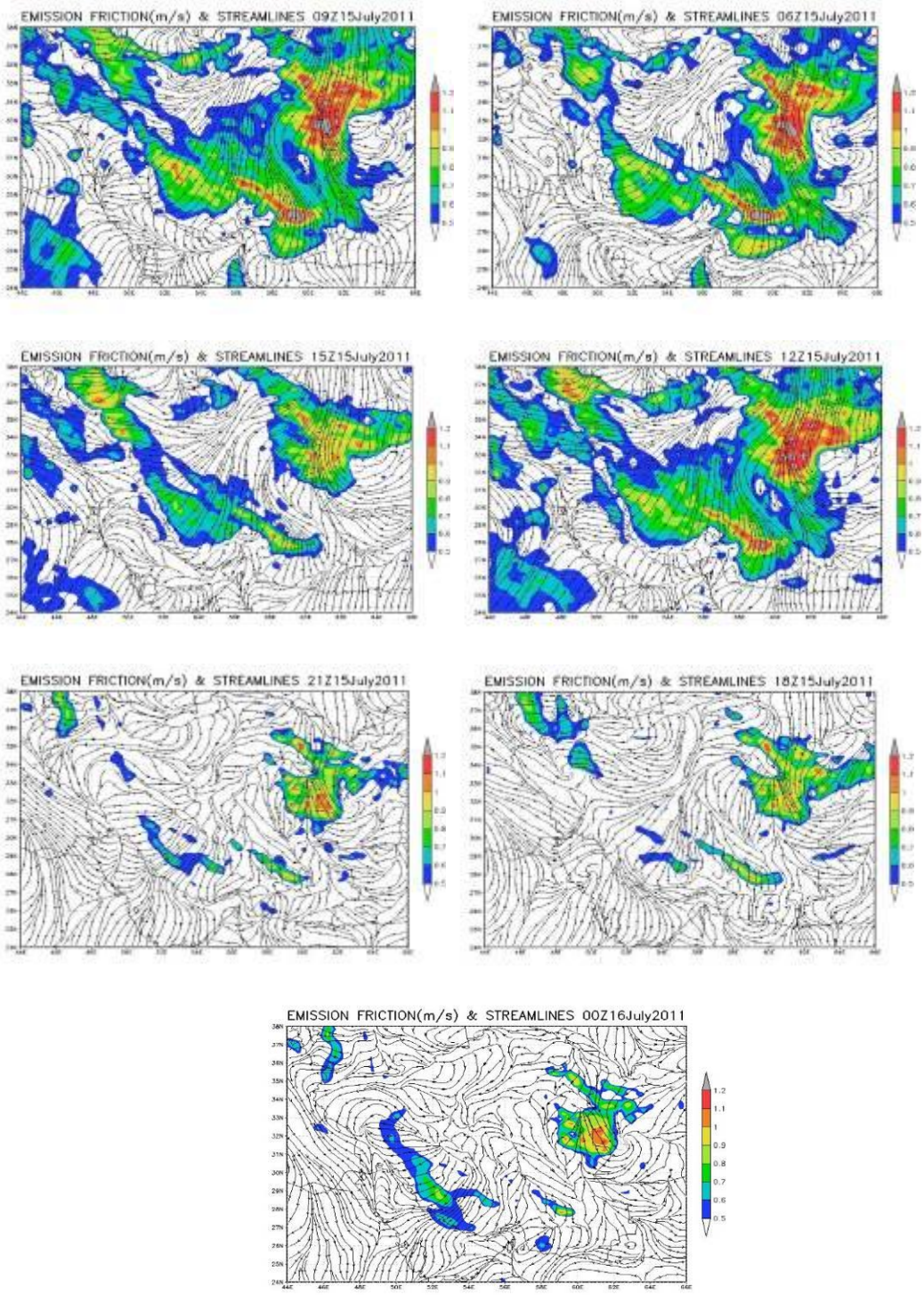
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]



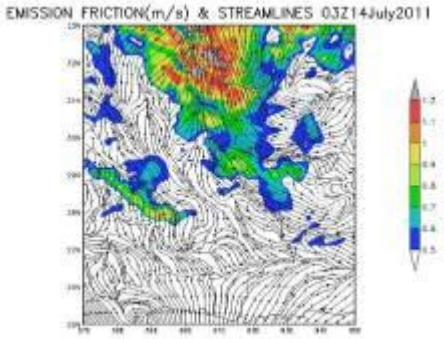
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

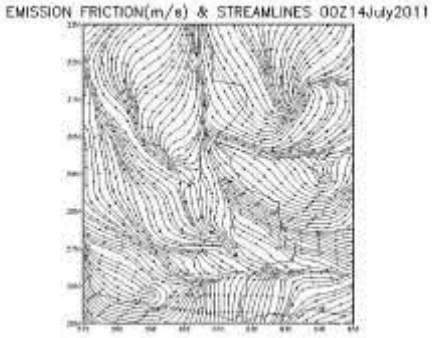
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

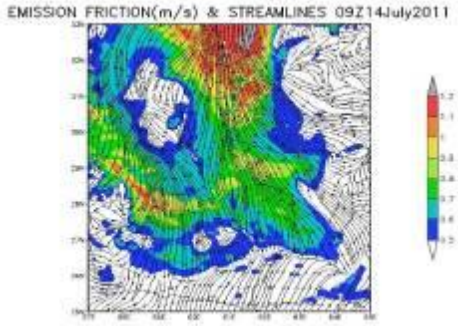


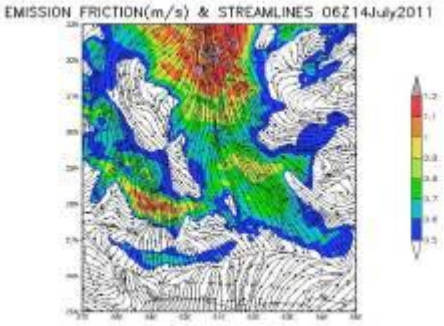
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

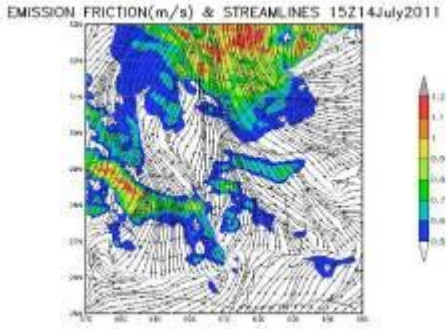
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

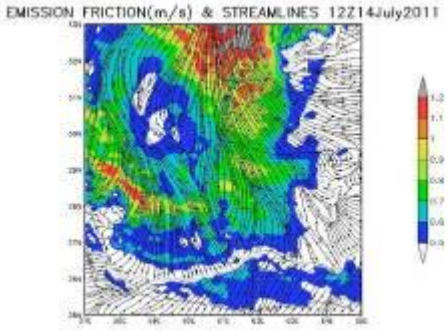


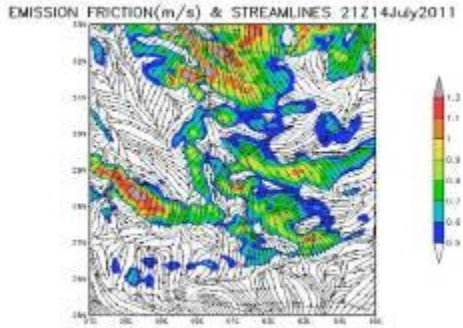


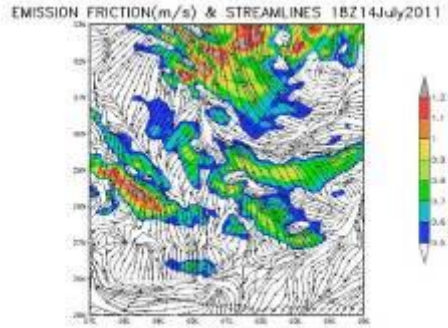






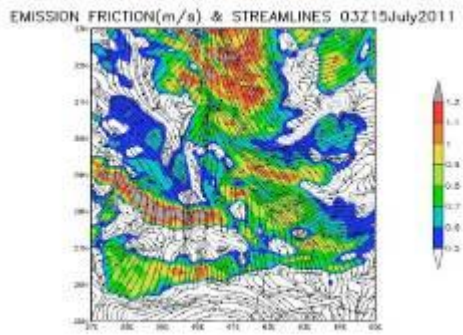


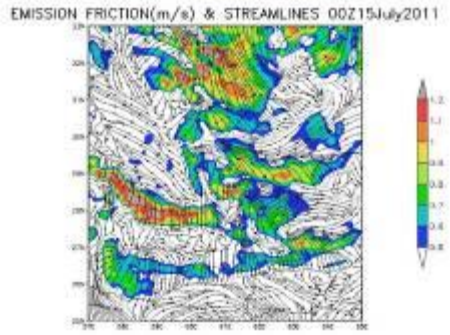


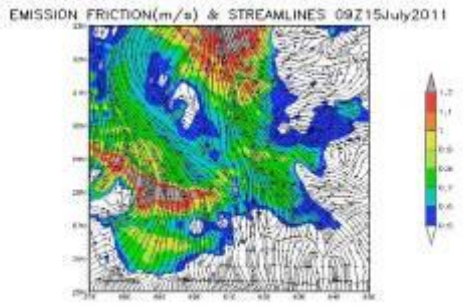


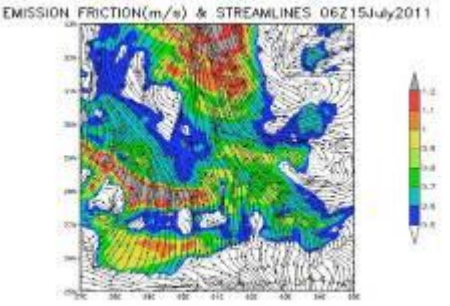
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

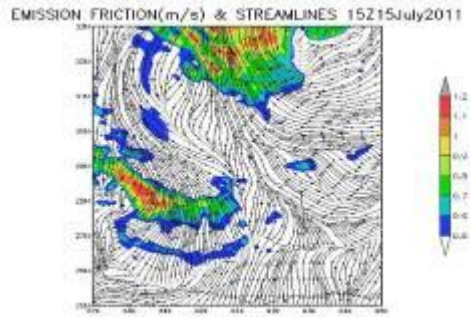
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]

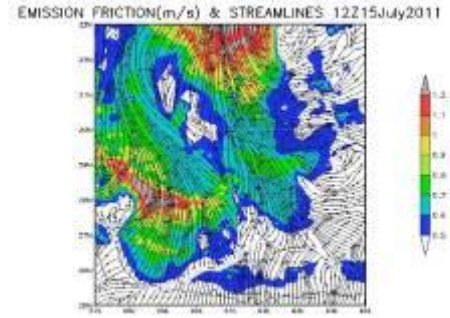


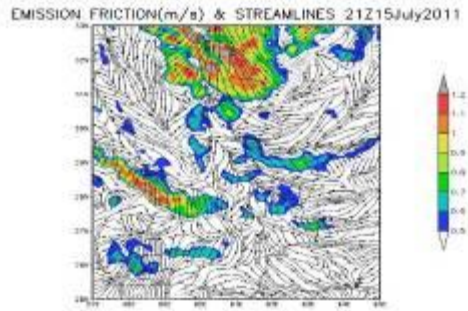


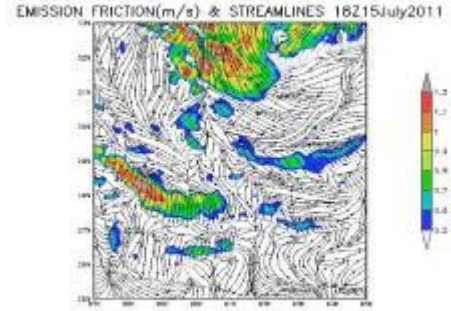


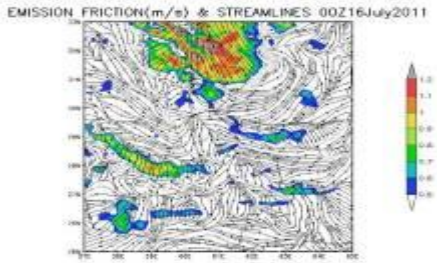












[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.3.4.101]