



دست‌یابی به چشمه توفان‌های گردو غبار به کمک مدل‌های عددی:

معرفی رویکردی برای پیش‌بینی توفان‌های گردو غبار

محمد رضا محمدپور پنجاه*؛ دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

حسین ملکوتی: استادیار گروه فیزیک دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

سمیرا باباحسینی: کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

وصول: ۱۳۹۳/۲/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۱۷، صص ۵۲-۴۳

چکیده:

توفان گرد و غبار از جمله پدیده‌هایی است که در سال‌های اخیر مشکلات فراوانی را برای مناطق مختلف کشور ایجاد کرده است. شناسایی چشمه این نوع توفان‌ها از اولین گام‌ها در مقابله با این پدیده مخرب است. از جمله روش‌هایی که برای این منظور استفاده می‌شود مدل‌سازی عددی است. در این مطالعه سعی شده است رویکرد مناسبی برای شناسایی چشمه توفان‌های گردو غبار با استفاده از مدل‌های عددی معرفی شود. برای این منظور توفان گردو غبار شدیدی که در روزهای ۱۷-۱۴ تیر ۱۳۸۸ (۸-۵ جولای ۲۰۰۹) انتخاب شد که تقریباً اکثر نقاط کشور را تحت تأثیر قرار داده بود. سپس با استفاده از مدل عددی مطالعه و پیش‌بینی جوی WRF و مدل محاسبه مسیرهای برگشت و پخش HYSPLIT توفان مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مدل WRF برای شبیه‌سازی شرایط جوی حاکم بر توفان اجرا گردید و شرایط هم‌دید حاکم بر این توفان با استفاده از تحلیل خروجی‌های این مدل به دست آمد. سپس خروجی‌های به دست آمده برای دست‌یابی به چشمه‌های احتمالی و تحلیل مسیر انتقال گردو غبار به مدل HYSPLIT داده شد. سرانجام رویکرد پخش ذرات از مناطق احتمالی به دست آمده، برای دقیق‌تر شدن روی مناق چشمه، بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که اغلب مسیرهای به دست آمده، از مناطق شمالی و مرکزی عراق و سوریه گذشته و منشا توفان گردو غبار ذکر شده، مناطق کویری و خشک شمال عراق و سوریه است. این نتایج مطابقت خوبی با مطالعات گذشته بر اساس سنجش از دور داشته و بیانگر این است که مدل‌های عددی ذکر شده توانایی پیش‌بینی توفان‌های گردو غبار را دارند.

واژه‌های کلیدی: توفان گردو غبار، چشمه، WRF، HYSPLIT، مسیر برگشت

مقدمه

تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر بیابان‌ها، مناطق با پوشش گیاهی کم و زمین‌های کشاورزی و بستر دریاچه‌های خشک از جمله مهم‌ترین چشمه‌های گرد

گرد و غبار یکی از پدیده‌های رایج در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که مناطق وسیعی از جهان را

محاسبه مسیر به صورت معمول حدود ۲۰ درصد است (Stohl, 1998) که این خطا را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از مسیرها کاهش داد. مدل‌های پخش، انتقال ذرات را از چشمه تا مکان نمونه‌گیری توصیف می‌کنند. با استفاده از مدل‌های مشابه می‌توان مکان هوای نمونه‌گیری شده را به صورت برگشت در زمان محاسبه کرد (Draxler and Hess, 1997). بنابراین دینامیک باد نقش اساسی را در انتقال و پخش ذرات بازی می‌کند (Salazar et al, 1994). استفاده از مسیرهای برگشت برای رسیدن به چشمه امروزه کاربرد زیادی در سراسر جهان پیدا کرده است که در داخل کشور نیز به کار گرفته شده است. عزیزی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی، سنجنده مادیس و مدل^۱ HYSPLIT چشمه توفان‌های نیمه غربی کشور را بررسی کرده و مناطق مرزی بین کشور عراق و سوریه را مناطق چشمه اصلی برای توفان‌های غرب کشور به دست آوردند. مفیدی و جعفری (۱۳۹۰) نیز با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR، سنجنده TOMS و مدل HYSPLIT منبع اصلی گرد و غبار برای منطقه غرب کشور را محدوده‌ای در حد فاصل مرکز تا شمال عراق، شرق سوریه تا شمال عربستان به دست آوردند. همچنین از اندک مطالعات عددی انجام گرفته در ایران می‌توان به کارهای رضازاده و همکاران (۱۳۹۲) اشاره کرد که با استفاده از نسخه شیمی مدل^۲ WRF و تصحیح داده‌های سطحی درون مدل چشمه‌های توفان گردوغبار در ایران را شناسایی کردند. Ashrafi و همکاران (۲۰۱۴) نیز با استفاده از مدل

و غبار هستند (Lee et al, 2008 و Gillette, 1999). اثرات زیان‌بار گرد و غبارها را نمی‌توان مختص اقلیم خاصی دانست زیرا ذرات ناشی از توفان‌های گرد و غبار می‌توانند تا کیلومترها دورتر از منطقه چشمه رفته و اثرات زیستی و زمین‌شناختی و آب و هوایی روی آن مناطق بگذارند. یکی از پیامدهای زیست محیطی توفان‌های گردوغبار اثراتی است که روی پخش و جذب تابش خورشیدی می‌گذارد که در دراز مدت پیامدهای اقلیمی را بدنبال دارد اما اینکه گرد و غبار باعث گرم شدن یا سرد شدن منطقه شود بستگی به اندازه و خواص شیمیایی ذرات دارد (Goudie and Middleton, 2001). از جمله اثرات زیان‌بار دیگر ناشی از توفان‌های گرد و غبار می‌توان به فرسایش و ویرانی خاک در مناطق چشمه و انتقال ذرات گرد و غبار و مواد معدنی به مناطق مسکونی و مناطق کشاورزی که باعث ایجاد آلودگی در آن مناطق می‌شود، اشاره کرد (Wang et al, 2007). اما یکی از مشکلات اساسی در مطالعه آلودگی‌هایی چون گردوغبار، تعیین کمی رابطه بین کیفیت هوا و چشمه آلودگی است. شناسایی چشمه آلودگی اولین گام در فرایند تعیین استراتژی موثر برای کنترل آلودگی می‌باشد که روش‌های مختلفی چون استفاده از سنجش از دور، بررسی نقشه‌های هواشناسی همدیدی، روش‌های عددی و غیره برای این منظور به کار گرفته می‌شود. یکی از راه‌های یافتن منابع آلودگی استفاده از مسیر انتقال جریان هوا است، در این حالت مسیرهای برگشت از نقطه گیرنده می‌تواند محل چشمه را مشخص کند (Petzold et al, 2009). این روش برای نشان دادن نحوه پخش آلودگی و تعیین چشمه بسیار به کار گرفته شده است (Rousseau, 2004). خطای

^۱HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

^۲Weather Research & Forecasting

طرحواره‌های مختلف و شرایط مرزی متفاوت حل می‌شوند. برای شبیه‌سازی جو واقعی و انجام دادن شبیه‌سازی‌هایی با تفکیک درشت، مجموعه‌ای از مؤلفه‌های فیزیکی، مانند تابش، پارامتری کردن لایه مرزی، پارامتری کردن همرفت، پخش پیچکی ریز شبکه‌ای و خردفیزیک لازم است که در مدل وجود دارد (Skamarocket al, 2008). در این مطالعه برای به دست آوردن داده‌های هواشناسی در مقیاسی مناسب از این مدل استفاده شده است. مدل با یک دامنه با فاصله‌ی شبکه‌ای ۳۰ کیلومتر تعریف شده که بازه طول جغرافیایی ۶۵-۳۰ درجه و عرض جغرافیایی ۴۳-۱۵ درجه را شامل می‌شود. دامنه شامل ایران و کشورهای همسایه غربی آن مانند عراق و عربستان و سوریه می‌شود. داده‌هایی که برای ایجاد شرایط مرزی و جانبی در مدل به کار رفته از نوع NCEP/NL است که دارای تفکیک $1/0 \times 1/0$ درجه بوده و برای هر ۶ ساعت در دسترس است. این داده‌ها توسط سامانه داده‌گواهی جهانی^۳ (GDAS) تولید می‌شوند که به صورت پیوسته داده‌های دیده‌بانی جهان را از سامانه مخابرات جهانی^۴ (GTS) و منابع دیگر برای تحلیل‌های گوناگون دریافت می‌دارد. مدل دارای تنظیمات مختلف برای فیزیک و دینامیک‌پدیده‌های مختلف شامل خردفیزیک، لایه مرزی، تابش طول موج کوتاه و بلند، همرفتکومه‌ای و غیره است که در این مطالعه از طرحواره خردفیزیکی (Lin et al, 1983)، طرحواره پارامتری کردن همرفتی Kain-Fritsch (Kain and Fritsch, 1993)، طرحواره تابش طول موج

HYSPLIT به بررسی توفان‌های گرد و غبار ورودی از غرب کشور پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نتایج مدل HYSPLIT بسیار شبیه به نتایج به دست آمده از بررسی تصاویر ماهواره است

اما برای پیش‌بینی توفان‌های گرد و غبار لازم است که شرایط هوای آینده پیش‌بینی شده و به مدل‌های مسیر و پخش مانند HYSPLIT داده شود تا با استفاده از آن و با توجه به شرایط جوی حاکم، پیش‌بینی صورت گیرد. که در این مطالعه این رویکرد بکار گرفته شده است. ابتدا با استفاده از مدل پیش‌بینی جوی WRF داده‌های هواشناسی مورد نیاز شبیه‌سازی شد. سپس این داده‌ها برای بررسی مسیر برگشت در روزهای ۱۷-۱۳ تیر ۱۳۸۸ به صورت ورودی به مدل HYSPLIT وارد گردید. با دنبال کردن مسیر برگشت جریان در روزهای مورد مطالعه حدود منطقه چشمه برای توفان گرد و غبار به دست آمده است. از نتایج این مطالعه می‌توان در پیش‌بینی توفان‌های گرد و غبار استفاده کرد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه سعی شده است که رویکردی مناسب برای پیش‌بینی توفان‌های گرد و غبار با استفاده از مدل‌های عددی معرفی شود. مدل‌هایی که در این مطالعه به کار گرفته شده‌اند دو مدل WRF و HYSPLIT می‌باشند. مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی جو WRF، نسل جدید از سیستم میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی آب و هوا و اولین مدل پیش‌بینی جوی است که هم پیش‌بینی عملیاتی و هم نیازهای تحقیقاتی جوی را برآورده می‌سازد. در این مدل معادلات حاکم بر جو شامل معادلات تکانه، انرژی و غیره با استفاده از

³Global Data Assimilation System (GDAS)

⁴Global Telecommunications System (GTS)

گام زمانی انتگرال‌گیری برحسب بیشینه سرعت انتقال و طبق رابطه زیر می‌تواند بین ۱ دقیقه تا ۱ ساعت تغییر کند:

$$U_{max}(grid - unitmin^{-1})\Delta t(min) < 0.75(grid - units)$$

برای به دست آوردن مسیرها ابتدا خروجی‌های مدل WRF به فرمت ورودی مدل HYSPLIT تبدیل و سپس با استفاده از مدل HYSPLIT مسیرهای برگشت و پخش ذرات محاسبه شد. مسیرها را می‌توان در ارتفاعات و همچنین ایستگاه‌های مختلف محاسبه کرد. در این مدل پایداری لایه مرزی بوسیله شار گرما و تکانه به دست می‌آید و عمق لایه مرزی از مدل هواشناسی گرفته می‌شود. برای به دست آوردن مکان چشمه‌های احتمالی مسیرها برای ۳ ایستگاه تهران، اصفهان، اهواز محاسبه شده و برای هر ایستگاه در سه ارتفاع ۱۰۰، ۷۵۰ و ۱۵۰۰ مسیرهای برگشت به دست آمده است (چون که مسیرها در ارتفاعات مختلف می‌تواند متفاوت باشد). همچنین برای کاهش خطای مسیرهای به دست آمده برای هر ایستگاه میانگین‌گیری صورت گرفته و مسیرهای میانگین در سه ایستگاه رسم شده است. مکان همگرایی مسیرها دقیقاً مکان چشمه را نشان نمی‌دهد بلکه مساحت پشت نقطه همگرایی می‌تواند نشان‌دهنده وجود مناطق چشمه احتمالی در آن ناحیه باشد (Draxler, 1995). سپس برای دقیق‌تر شدن روی منطقه چشمه مدل به صورت روبه جلو از مناطق چشمه احتمالی اجرا شده تا الگوی پخش از این مناطق به دست آید. این الگوهای پخش باید مطابق با الگوی مسیر برگشت به دست آمده باشد. در این صورت می‌توان عنوان کرد که چشمه اصلی توفان منطقه‌ای است که الگوهای پخش به دست آمده از آن مطابق

بلند RRTM^۵ (Mlawer et al, 1997)، تابش طول موج کوتاه Goddard (Chou and Suarez, 1994) و مدل سطح زمین NOAH (Chen and Dudhia, 2001) استفاده شده است. همچنین مدل از ۰۰ UTC روز ۹ تیر ۱۳۸۸ برای مدت ۸ روز اجرا گردید. برای بررسی شرایط همدیدی حاکم بر توفان از نقشه‌های سطح زمین، ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال خروجی این مدل استفاده شده است.

مدل دیگری که در این مطالعه به کار گرفته شده مدل HYSPLIT است. این مدل یک سامانه کامل برای محاسبه مسیرهای پیچیده پخش و نشست با استفاده از رویکرد ذره‌ای و پوف است که شامل ساختار کتابخانه‌ای با برنامه‌های اصلی برای کاربردهای اصلی شامل مسیرها و پخش آلودگی‌ها است (Draxler and Hess, 1997). مدل HYSPLIT قادر است مسیرهای برگشت برای دست‌یابی به چشمه آلودگی را به دست دهد. مسیرهای برگشت^۶ مسیر لاگرانژی بسته هوا را به دست می‌دهند که از نقطه گیرنده (ایستگاهی که توفان گرد و غبار گزارش شده) در مدت زمان معلوم محاسبه می‌شوند و می‌توانند در یافتن مناطق چشمه بکار روند. در این مدل حرکت فرارفتی ذرات با استفاده از بردار باد سه بعدی در مکان اولیه $P(t)$ و حدس اولیه $P'(t+\Delta t)$ به دست می‌آید. مکان حدس اولیه به صورت زیر بوده:

$$p'(t + \Delta t) = p(t) + V(p, t) \Delta t$$

و مکان نهایی به صورت زیر است:

$$p(t + \Delta t) = p(t) + 0.5[V(p, t) + V(p', t + \Delta t)] \Delta t$$

⁵ Rapid Radiative Transfer Model

⁶ Back Trajectory

خاطر قدرت دینامیکی زیادی که دارد می‌تواند حجم عظیمی از ذرات ریز را از سطح زمین بلند کرده و تا ارتفاع بسیار زیادی به حالت معلق درآورد (Henley, 1990). در توفان به وقوع پیوسته در ششم جولای ۲۰۰۹، استقرار یک کم‌فشار حرارتی روی ایران باعث ایجاد گردبادان فشاری قوی با پرفشار نیمه دائم در منطقه عربستان سعودی شده است. ارتقای منطقه همگرایی بین این دو سامانه فشاری، بادهای متلاطم با سرعت بسیار زیاد ایجاد کرده که باعث نشر و انتقال گردوغبار محلی همزمان با یک همرفت شدید روی دشت آبرفتی دجله و فرات می‌شود که یکی از دلایل همرفتی بودن آن، دمای بالای سطح زمین در خلال روز در این منطقه است (Membery, 1983). شرایط همیدی شبیه‌سازی شده برای ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال و تراز سطح دریا در ساعت ۰۰ UTC، روز ۳۰ام ماه جون (زمان شکل‌گیری اولیه توفان) و ساعت ۰۰ UTC، روز ششم ماه جولای (زمان حضور توفان روی ایران مرکزی) در شکل ۱ نمایش داده شده است. همانطور که از نقشه‌های همیدی دریافت می‌شود، در روز ۲۶ام ماه جولای، مکانیزم تشکیل باد شمال تابستانی روی حوضه‌های دجله و فرات برقرار شده و یک چرخند جبهه‌ای^۶ روی منطقه مدیترانه همراه با واداشت‌های قابل توجه تراز بالا، در حال شکل‌گیری است..

الگوی مسیر برگشت و اندازه‌گیری‌های ایستگاهی باشد.

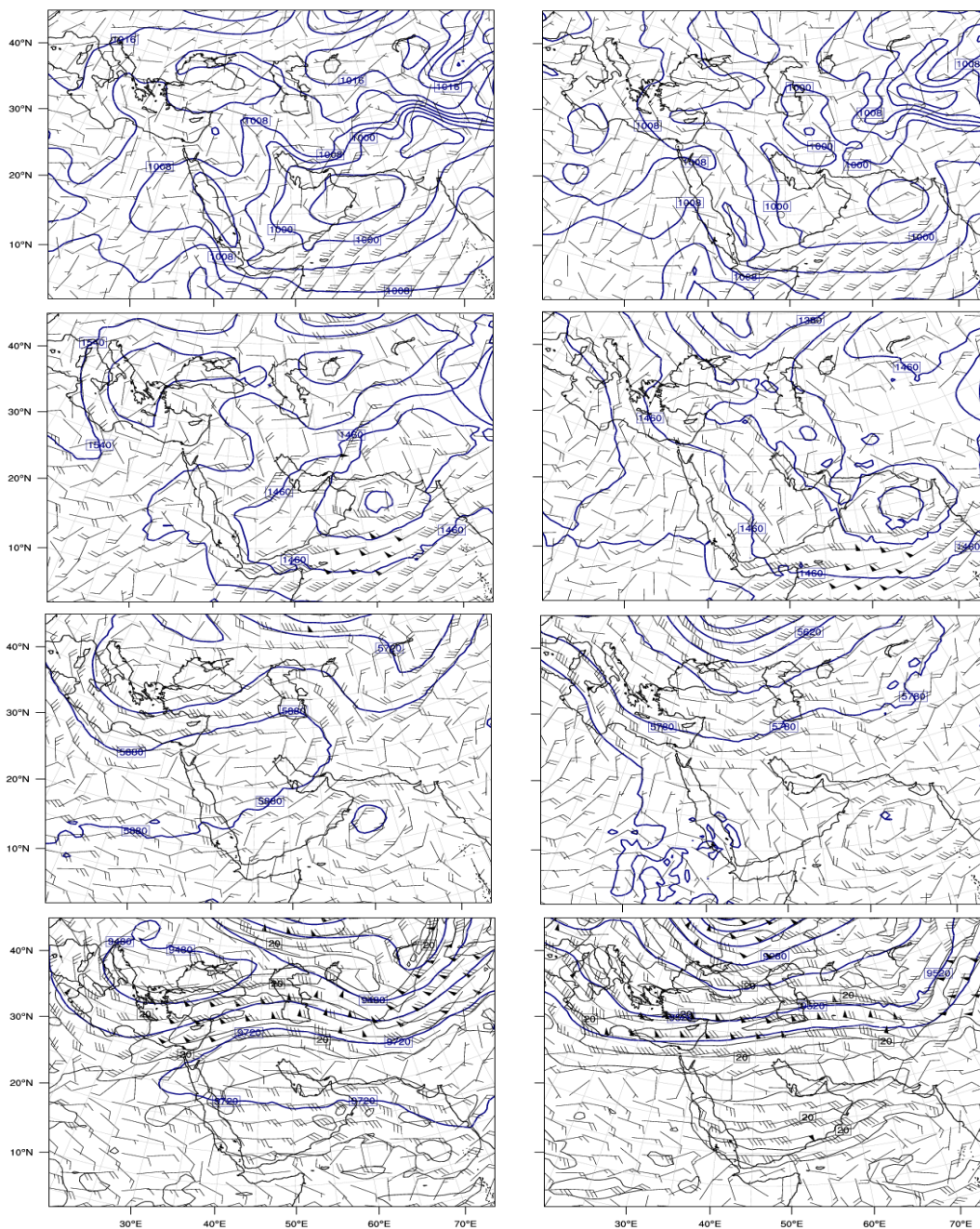
از رویکرد به‌کار گرفته شده در این مطالعه می‌توان در پیش‌بینی توفان‌های گرد و غبار استفاده کرد. بدین ترتیب که مدل WRF را برای پیش‌بینی هوای آینده اجرا کرده و با استفاده از تحلیل خروجی‌های حاصل از آن و رویکرد محاسبه مسیرهای عبور جریان، می‌توان وقوع توفان گرد و غبار را پیش‌بینی کرد.

بحث و نتایج

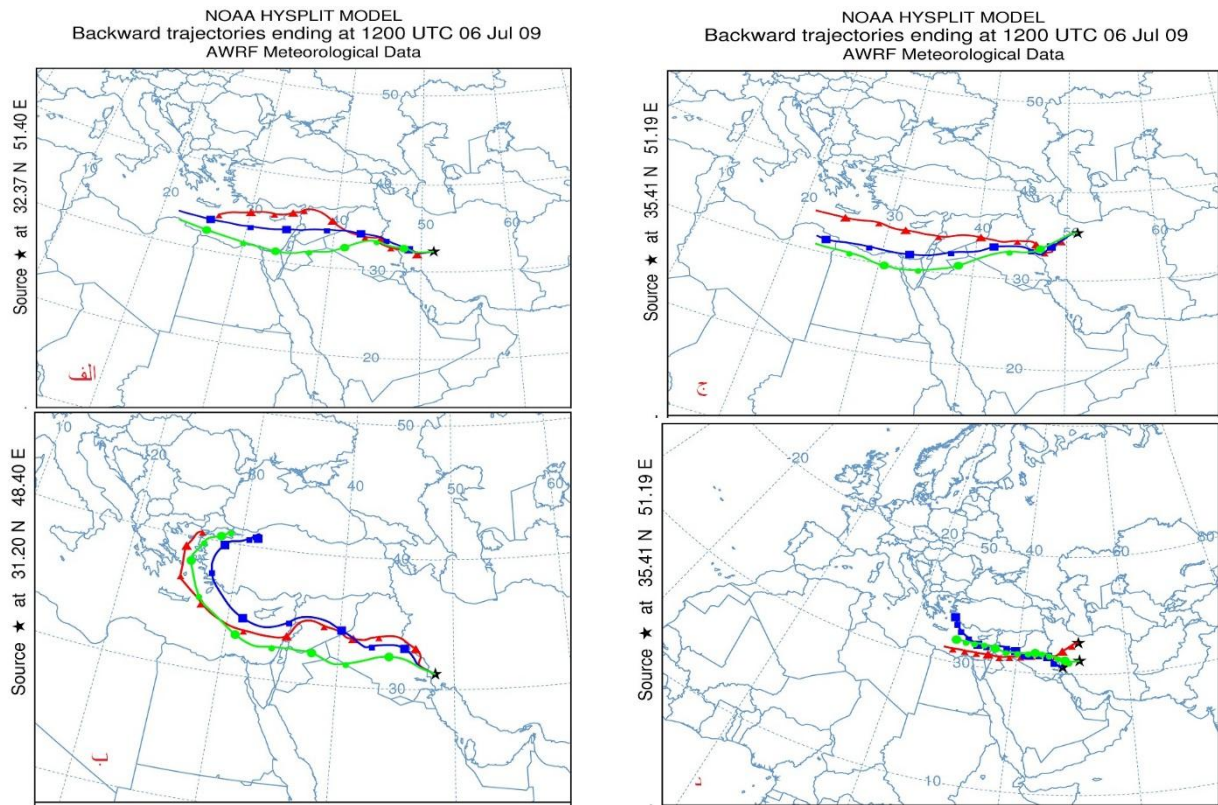
در روز ششم جولای سال ۲۰۰۹، زمانی که توفان به تهران رسیده، دید افقی به کمتر از ۱۰۰ متر رسید و در ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای تهران در بعضی ساعات، غلظت ذرات معلق در برخی ساعات تا بالای $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ گزارش شد و در تمام مدتی که وضعیت غباری حاکم بوده، تعداد زیادی از شهرهای ایران تعطیل و بسیاری از فعالیت‌های انسانی به حالت تعلیق درآمد. جریان غالب در این توفان باد شمال^۷ است. از اواخر ماه می تا اوایل ماه جولای، یکی از پدیده‌های متناوب هواشناسی در منطقه مرکزی خاورمیانه، باد شمال تابستانی است که بطور غالب حدود ۴۰ روز در نوار غربی رشته کوه زاگرس و روی عراق می‌وزد که از اهمیت زیادی در بالا بردن شار غبار سطحی دارد (Membery, 1983). این باد معروفترین باد موسمی عراق است که در اثر تداخل و همگرایی توده هوای گرمی که از سمت جنوب شرقی و از غرب زاگرس با توده هوای سرد قطبی که از سمت شمال و اروپا به کشور عراق وارد می‌شوند، پدید می‌آید و به

^۶Frontal Cyclone

^۷Shamal Wind



شکل ۱. نقشه همدیدی شبیه‌سازی شده در ساعت ۰۰ UTC، روز ۳۰ ماه جون (چپ) و ۰۰ UTC، روز ششم ماه جولای ۲۰۰۹ (راست) (نقشه‌ها از بالا به پایین به ترتیب مربوط به ترازهای سطح دریا، ۸۵۰، ۵۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال هستند).



شکل ۲- مسیرهای برگشت در سه ایستگاه اصفهان (الف)، اهواز(ب) و تهران (ج)، خطوط با رنگ‌های مختلف نشان‌دهنده ارتفاع مختلف هستند. خط قرمز ارتفاع ۱۰۰، آبی ۷۵۰ و سبز ۱۵۰۰ متر را نشان می‌دهد. (د) مسیر میانگین سه ارتفاع را در ایستگاه تهران (قرمز)، اصفهان (سبز) و اهواز(آبی) نشان می‌دهد.

تهران، اصفهان، اهواز و در سه ارتفاع ۱۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰ به دست آمد و برای کاهش عدم قطعیت مسیرهای به دست آمده در هر ایستگاه، میانگین سه ارتفاع برای هر سه ایستگاه مربوطه محاسبه شد. شکل ۲-الف مسیرها در ایستگاه اصفهان را در سه ارتفاع ذکر شده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود مسیرها در هر سه ارتفاع از سمت غرب کشور و با عبور از روی کشورهای عراق و سوریه وارد ایستگاه گیرنده می‌شوند. الگوی مشابهی را نیز برای مسیرها در دو ایستگاه دیگر (ایستگاه اهواز شکل ۲-ب و ایستگاه تهران ۲-ج) می‌توان مشاهده کرد. همچنین از میانگین‌گیری مسیرها برای کاهش خطای محاسبه مسیر استفاده شد. با میانگین‌گیری مسیرها در سه ارتفاع برای

پس از آن در طی تشدید این چرخند جبهه‌ای و ورود آن به شمال سوریه و عراق، شکل‌گیری گردوغبار و صعود آن شتاب گرفته است. گسترش این سیستم، یک غبار تقریباً پس جبهه‌ای^۹ سنگین را شکل داده که در طول مسیر حرکت خود، با عبور از محدوده کوه‌های زاگرس، این گردوغبار سنگین را به ناحیه‌ای وسیع منتقل کرده است

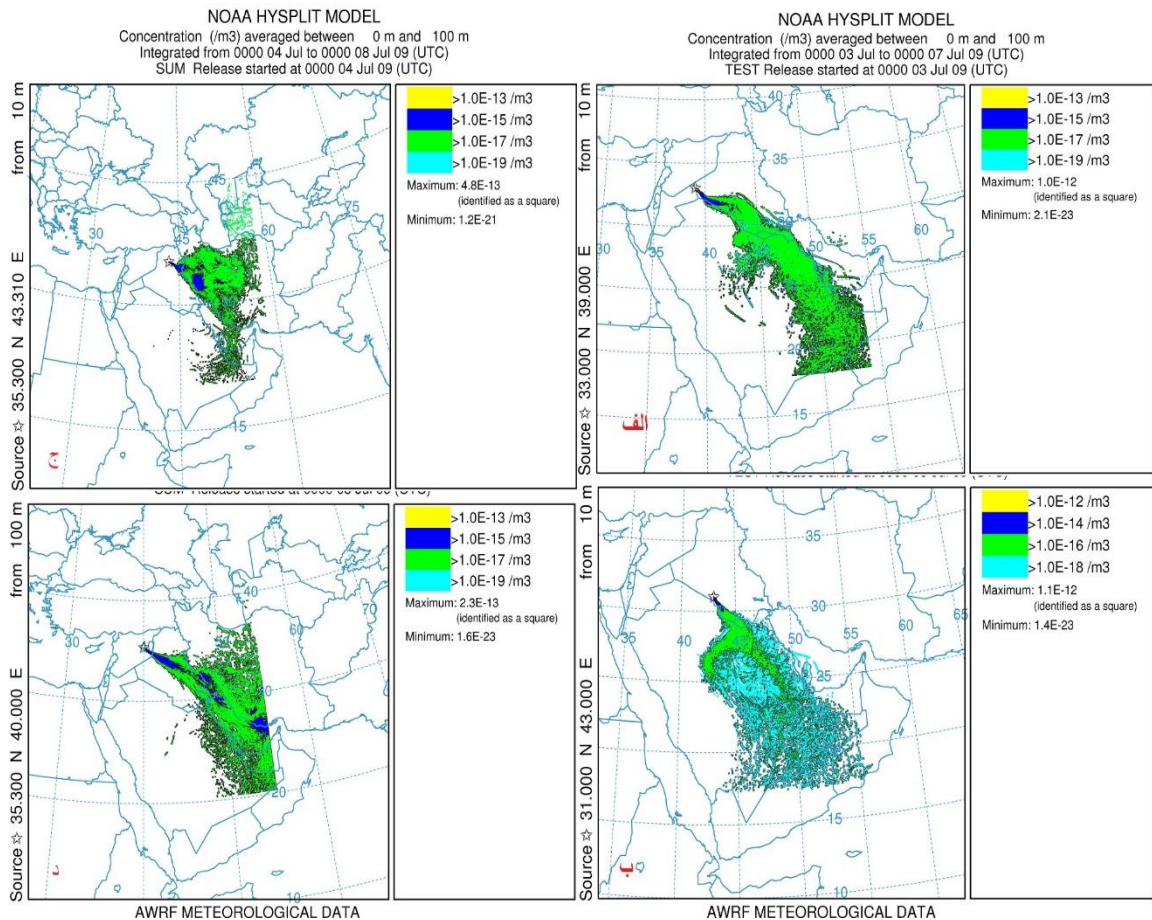
در ادامه خروجی حاصل از مدل WRF برای به دست آوردن مسیرها و نحوه پخش ذرات گرد و غبار به مدل HYSPLIT داده شد تا مسیر انتقال ذرات به دست آید. همان‌طور که اشاره شد مسیرها برای سه ایستگاه

^۹Postfrontal Dust Storm

مناطق چشمه احتمالی در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳ می‌بینیم که چهار منطقه چشمه احتمالی در کشور سوریه و عراق در نظر گرفته و مدل HYSPLIT برای این چشمه‌ها اجرا گردید. همان‌طور که در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب دیده می‌شود، مسیر پخش در بخش‌های جنوبی کشور عراق با مسیرهای برگشت به دست آمده در ایستگاه‌های گیرنده در اصفهان، تهران و اهواز مطابقت ندارد. اما مسیرهای پخشی که از شمال کشور عراق و سوریه (شکل‌های ۳-ج و ۳-د) به دست آمده با الگوی مسیرهای برگشت در سه ایستگاه مورد بررسی همخوانی دارد.

هر ایستگاه یک مسیر میانگین به دست آمده که در شکل ۲-د نشان داده شده است. مکان همگرایی مسیرها در این شکل در غرب کشور و در مرز ایران و عراق دیده می‌شود که نشان‌دهنده وجود مکان احتمالی چشمه در نواحی پشت این نقطه است. مناطق پشت مکان همگرایی شامل بخش‌هایی از کشورهای عراق و سوریه می‌شود که با توجه به اینکه منطقه احتمالی چشمه توفان گردو غبار مناطق خشک و بیابانی است، می‌توان عنوان کرد که مکان چشمه در بخش‌هایی از کشور عراق و سوریه است.

گام بعدی برای دقیق‌تر شدن روی چشمه توفان مورد مطالعه استفاده از روش مسیر پخش ذرات است که از



شکل ۳- مسیر پخش ذرات از مناطق چشمه احتمالی؛ (الف) و (ب) مکان چشمه احتمالی در بخش‌های جنوبی عراق و (ج) و (د) مکان چشمه احتمالی را در شمال عراق و سوریه را نشان می‌دهند.

Journal of Environmental Health Science and Engineering, 12: 1-9.

Azizi. Gh., M. Miri., A. Nabavi., (2012). Tracing of Dust storms in west of Iran, Arid regions Geographic Studies, Issue 2, No. 7: 63-81.

Chen, F., J. Dudhia. (2001). Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: model description and implementation. Monthly Weather Review, 129:569-585.

Chou, M.D., M.J. Suarez. (1994). An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Technology Memory, 104606, 85p.

Draxler, R.R. (1995). Source Location through Radiological Monitoring (System Design and Concept of Operations). Radionuclide Monitoring Workshop, 15-17 November, 1995.

Draxler, R.R., G.D. Hess. (1997). Description of the HYSPLIT_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum. ERL ARL. 224: 1-25.

Gillette, D.A. (1999). A qualitative geophysical explanation for "hot spot" dust emitting source regions. Contributions to Atmospheric Physics 72: 67-77.

Goudie. A.S., N.J. Middleton. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences, Earth-Science Reviews, 56: 179-204.

Henley, P., (1990). Unpublished soil sample report, Remote Sensing Division, Research Institute, U.S Army Engineer Topographic Laboratories, Ft Belvoir, VA, 21 Nov 90.

Kain J.S., J.M. Fritsch. (1993). In: Emanuel KA, Raymond DJ (eds) Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. American Meteorology Society, 246p.

Lee, J.A., T.E. Gill, K.R. Mulligan, M. Domínguez Acosta, and A.E. Perez. (2008). Land use/land cover and point sources of the 15 December 2003 dust storm in southwestern North America.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شده که با استفاده از مدل‌های عددی به بررسی شرایط حاکم بر تشکیل توفان گرد و غبار و نحوه پخش آن پرداخته شده و همچنین عملکرد مدل‌های عددی را در پیش‌بینی این نوع توفان‌ها سنجیده‌شود. برای این منظور یکی از توفان‌های شدید که کشورمان را تحت تاثیر قرار داده بود، انتخاب و مدل WRF برای شبیه‌سازی شرایط جوی حاکم بر آن بکار گرفته شد. نتایج خروجی مدل WRF به خوبی ساختار حاکم بر شکل‌گیری باد شمال که عامل اصلی ایجاد این توفان بوده را پیش‌بینی کرد. سپس بررسی مسیرهای برگشت و مسیر پخش ذرات در روزهای توفانی (۱۸-۱۲ تیر ۱۳۸۸) که توسط مدل HYSPLIT به دست آمده نشان داد که در این روزها شرایط جوی و جریان باد از روی مناطق شمالی کشورهای سوریه و عراق وارد کشور ما شد. با توجه به اینکه مناطق شمالی کشور عراق و سوریه مناطق خشک و بیابانی است، این جریان‌ها گرد و غبار را همراه خود از روی مناطق کویری بلند کرده و به ایران می‌رسانند. با استفاده از نتایج به دست آمده در این مطالعه می‌توان عنوان کرد که از ترکیب کردن مدل پیش‌بینی جوی WRF و مدل پخش HYSPLIT می‌توان شرایط جوی و مسیر حرکت جریان‌ها را به خوبی ارزیابی کرده و توفان‌های گرد و غباری را پیش‌بینی کرد.

منابع

Ashrafi, Kh., M. Shafiepour-Motlagh, A. Aslemand, and S. Ghader. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT.

- and Space Physics, Issue 33, No. 1: 119-212.
- Rousseau, D.D., D.Duzer, J.L. Etienne, G.Cambon, D. Jolly, J.Ferrier, and P.Schevin.(2004). Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *Journal of Geophysical Research*, 109, D06116, doi: 10.1029/2003JD003985.
- Salazar, C., C. Alvarez, H.A. Silva, and C.Dorantes.(1994). Radioactivity in air around nuclear facilities in Mexico. *Environ Int*;20:747-56.
- Skamarock, W.C., J.Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers. (2008). A description of the advanced research WRF version 2. NCAR technical note, NCAR/TN-468+STR. Meso-scale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.
- Stohl, A., (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories - a review and bibliography. *Atmospheric Environment*, 32(6): 947-966.
- Wang, Y., G.Zhuang, A. Tang, W. Zhan, Y.Sun, Z. Wang, and Z. An,(2007). The evolution of chemical components of aerosols at five monitoring sites of China during dust storms. *Atmospheric Environment* 41: 1091-1105.
- Geomorphology.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.016>.
- Lin, Y.L., R.D. Farley, and H.D.Orville. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *Journal of Applied Meteorology*, 22: 1065-1092.
- Membery, D.A. (1983). Low-level wind profiles during the Gulf Shamal. *Weather* 38: 18-24.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough.(1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102:16663-16682.
- Mofidi. A., S. Jafari. (2011). The Role of Regional Atmospheric Circulation over the Middle East on the Occurrence of Summer Dust-storms in Southwest Iran. *Arid Regions Geographic Studies*. 2 (5) :17-45
- Petzold, A., K. Rasp, B.Weinzierl, M. Esselborn, T. Hamburger, and A. Dornbrack.(2009). Saharan dust absorption and refractive index from aircraft-based observation during SAMUM 2006. *Tellus*;618:118-30. doi:10.1111/j.1600-0889.2008.00383.x.
- Rezazadeh, M., P. Irannejad, Y. Shao. (2013). Dust emission simulation with the WRF-Chem model using new surface data in the Middle East region. *Journal of the Earth*