

تحلیل طوفان‌های گرد و غبار استان یزد بر مبنای مدل‌سازی‌های عددی

محمد رضا محمدپور پنجاه^۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد حسین معماریان- استادیار فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

سید مجید میر رکنی- استادیار فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۵

چکیده

استان یزد از جمله استان‌های کم بارش ایران است که تقریباً نیمی از آن را بیابان و دشت کم آب و علف پوشانده و همواره در معرض طوفان گرد و غبار است. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از مدل‌های عددی، رویکردی مناسب برای تحلیل دینامیکی طوفان‌های گرد و غبار استان یزد به کار گرفته شود. ابتدا طوفان‌های گرد و غبار در دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۸۸ بررسی شده و طوفان‌های گرد و غبار شدید (با دید زیر ۱۰۰۰ متر) انتخاب شدند که شامل ۲۰ مورد می‌باشند. از بین تاریخ‌های استخراج شده یکی از شدیدترین طوفان‌های گرد و غبار که در تاریخ ۸ خرداد ۱۳۸۲ اتفاق افتاده و دید را در ایستگاه‌های یزد و میبد و طبس نزدیک به صفر رسانده بود، به تفصیل بررسی گردید. برای این منظور ابتدا با استفاده از خروجی‌های مدل WRF به تحلیل همدیدی و دینامیکی طوفان پرداخته شده است. سپس برای بررسی چشمه طوفان، خروجی‌های مدل WRF به مدل HYSPLIT داده شد و مسیرهای برگشت رسیده به ایستگاه‌ها، به دست آمد. نتایج نشان می‌دهند که عبور سامانه‌های چرخندی از سطوح بالای جو و ریزش هوای سرد ناشی از آن‌ها همراه با گرمایش سطحی در سطح زمین، زمینه ایجاد ناپایداری در منطقه را ایجاد کرده است. این شرایط همراه با وجود لایه آمیخته عمیق در مناطق مرکزی و خشک ایران در ساعت‌های قبل از شروع طوفان و همچنین منطقه بیشینه همگرایی باد و سرعت سطحی قوی در ساعت وقوع طوفان، این طوفان را به وجود آورده است. بررسی مسیرهای برگشت نیز نشان‌دهنده وجود چشمه احتمالی طوفان در مناطق خشک و نمک‌زار حاصل از خشک شدن باتلاق گاوخونی و کویرهای اطراف آن است.

کلیدواژه‌ها: طوفان گرد و غبار، مدل WRF، مدل HYSPLIT، لایه آمیخته، مسیر برگشت.

۱. مقدمه

یکی از عوامل مؤثر بر اقلیم مناطق خشک و نیمه‌خشک، طوفان‌های گردوغبار است. این طوفان‌ها اثرات و آسیب‌های محیطی زیادی دارند. گردوغبار حاصل از این طوفان‌ها، به‌صورت مستقیم از طریق اثرات تابشی و غیرمستقیم از طریق اثراتی که بر خردفیزیک ابرها دارند بر اقلیم منطقه اثرگذارند (شوارتز^۱ و همکاران، ۱۹۹۵؛ تجن^۲ و همکاران، ۱۹۹۶؛ رزنفلد^۳ و همکاران، ۱۹۹۷). از جمله اثرات زیان‌بار دیگر آن‌ها کاهش دید افقی و افزایش تصادفات جاده‌ای می‌باشد؛ برای مثال، ۳۲ تصادف ماشین در اثر طوفان گرد و غبار در سال‌های ۱۹۶۸ تا ۱۹۷۵ در جاده‌های ایالت آریزونا مشاهده شده است (بrazel و سو^۴، ۱۹۸۱). یکی از چشمه‌های اصلی طوفان‌های گرد و غبار بیابان‌ها می‌باشند. بیابان‌ها علاوه بر تأثیر در فرایندهای مهم زمین‌شناختی، در سلامتی و رفاه انسان‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند (داگری و استون^۵، ۲۰۰۷). علاوه بر بیابان‌ها، مناطق گرم و زمین‌های کشاورزی و بستر دریاچه‌های خشک از جمله مهم‌ترین چشمه‌های گرد و غبار هستند (لی^۶ و همکاران، ۲۰۰۹ و ژیلت^۷، ۱۹۹۹). فعالیت‌های بشری به‌ویژه سد سازی‌هایی که در حوزه کشورهای خاورمیانه برای تأمین انرژی مورد نیاز کشورهای منطقه صورت گرفته و باعث خشک شدن دریاچه‌ها و رودخانه‌های مختلف شده، به این امر دامن زده است. از جمله عوامل عمده در شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار جریان باد قوی است که در حضور سامانه‌های کم‌فشار در مناطق پتانسیل چشمه می‌تواند ایجاد شود (ناولن^۸ و همکاران، ۲۰۰۷)؛ بنابراین بررسی و شناسایی الگوهای جوی مؤثر بر مناطق خشک و کویری می‌تواند در پیش‌بینی این طوفان‌ها مؤثر باشد. یکی از روش‌های بررسی طوفان‌های گرد و غبار استفاده از مدل‌های عددی است که می‌تواند حتی برای زمان‌هایی که داده مناسب موجود نبوده و همچنین برای پیش‌بینی این نوع طوفان‌ها بکار رود. تکامل تدریجی پیش‌بینی‌های اقلیمی و هواشناختی در نتیجه پیشرفت و توسعه در تحلیل و فهم پدیده‌ها و از همه مهم‌تر توسعه رایانه‌ها رخ داد. وستفال^۹ و همکاران (۱۹۸۸) اولین تلاش‌ها برای مدل‌سازی پدیده گرد و غبار را انجام دادند که منجر به توسعه و بهبود مدل‌های جهانی، منطقه‌ای و محلی در مطالعه این نوع پدیده شد. آن‌ها با بررسی طوفان گرد و غبار در غرب افریقا برای روزهای ۲۳-۲۸ سال ۱۹۷۴ به کمک مدل عددی نشان داد که طوفان موردنظر وابسته به موج

-
- 1 Schwartz
 - 2 Tegen
 - 3 Rosenfield
 - 4 Brazeland Hsu
 - 5 Dockery and Stone
 - 6 Lee
 - 7 Gillette
 - 8 Novlan
 - 9 Westphal

شرقی سطحی است که از منطقه عبور می‌کند. الگوهای جوی را که منجر به ایجاد طوفان‌های گرد و غبار می‌شوند می‌توان به کمک مدل‌های هواشناسی شبیه‌سازی و پیش‌بینی کرد (ریورا ریورا^۱، ۲۰۰۹). مطالعات عددی مختلفی در این زمینه به صورت جهانی و منطقه‌ای صورت گرفته است (برای مثال، جینوکس^۲ و همکاران، ۲۰۰۱؛ زندر^۳ و همکاران، ۲۰۰۳؛ کیم^۴، ۲۰۰۸).

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 مؤثر برای کنترل آلودگی می‌باشد. یکی از راه‌های یافتن منابع آلودگی استفاده از مسیر انتقال جریان هواست، در این حالت مسیرهای برگشت از نقطه گیرنده می‌تواند محل چشمه را مشخص کند (پتزولد^۵ و همکاران ۲۰۰۹). این روش به نسبت زیاد برای نشان دادن نحوه پخش آلودگی و تعیین چشمه به کار می‌رود (روسو^۶ و همکاران ۲۰۰۴). خطای محاسبه مسیر به صورت معمول حدود ۲۰ درصد می‌باشد که این خطا را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از مسیرها کاهش داد (استال^۷، ۱۹۹۸). مدل‌های آلودگی می‌توانند انتقال ذرات را از چشمه تا مکان نمونه‌گیری توصیف کنند. با استفاده از مدل‌های مشابه می‌توان مکان هوای نمونه‌گیری شده را به صورت برگشت در زمان محاسبه کرد (دراکسلر و هس^۸، ۱۹۹۷)؛ بنابراین دینامیک باد نقش اساسی را در انتقال و پخش ذرات بازی می‌کند (سالازر^۹ و همکاران، ۱۹۹۴). امروزه ترکیب مدل‌های هواشناسی و مسیر یکی از روش‌های متداول در مطالعات عددی طوفان‌های گردوغبار می‌باشد (مانند، یرامیلی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۰؛ زولجودی و همکاران ۲۰۱۳).

در داخل کشور مطالعات مختلفی بر روی این طوفان‌ها صورت گرفته است. خوش‌سیما و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از داده‌های عمق نوری هواویز سنجنده مادیس و دید افقی ایستگاه‌های همدیدی نشان دادند که می‌توان از داده‌های دید به صورت کمی به منزله منبع اطلاعات ثانویه و جایگزین اندازه‌های ماهواره در تحقیقات آلودگی هوا استفاده کرد؛ اما اکثر مطالعات انجام‌شده در کشور به صورت تحلیل‌های آماری و همدیدی است. لشکری و کیخسروی (۱۳۸۴) طوفان‌های گرد و غبار و ماسه در خراسان رضوی را در طی یک دوره آماری ۱۳ ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۳) مورد بررسی آماری و همدیدی قرار داده‌اند. در استان یزد نیز،

1 Rivera Rivera

2 Ginoux

3 Zender

4 Kim

5 Petzold

6 Rousseau

7 Stohl

8 Draxler and Hess

9 Salazar

10 Yerramilli

امیدوار (۱۳۸۴ و ۱۳۸۹) طوفان‌های ماسه و بادهای شدید را در دشت یزد- اردکان در ۱۲ دوره انتخابی موردبررسی همدیدی قرار داده است. چیتی (۱۳۸۹) نیز مطالعات جامعی را روی طوفان‌های گرد و غبار منطقه یزد در دوره تاریخی ۲۰۰۹-۱۹۸۰ انجام داده است که مطالعات او نیز به صورت آماری و همدیدی است. از اندک مطالعات عددی انجام گرفته در ایران می‌توان به کار رضازاده و همکاران (۱۳۹۲) اشاره کرد که با استفاده از نسخه شیمی مدل WRF و تصحیح داده‌های سطحی درون مدل چشمه‌های طوفان گردوغبار در ایران را شناسایی کردند. از این رو با توجه به مطالعات عددی اندک طوفان‌های گرد و غبار در ایران و در منطقه یزد، در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از مدل WRF به بررسی سازوکار این نوع طوفان‌ها پرداخته شده است. سپس با استفاده از مدل HYSPLIT مسیرهای برگشت از منطقه تحت تأثیر طوفان، به دست آمده است که این مسیرها می‌تواند نشان‌دهنده الگوی انتقال و پخش و فهم بهتر چگونگی شکل‌گیری این طوفان‌ها باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار منطقه یزد مورد استفاده قرار گیرد.

معرفی مدل WRF

مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی جو (WRF) نسل جدید از سامانه میان مقیاس پیش‌بینی عددی آب‌وهوا و اولین مدل پیش‌بینی جوی است که هم پیش‌بینی عملیاتی و هم نیازهای تحقیقاتی جوی را برآورده می‌سازد. این مدل تلاش مشترک توسعه مدل، میان چند سازمان، مانند، مرکز ملی تحقیقات جوی (NCAR)، مرکزهای ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP)، آزمایشگاه سامانه‌های پیش‌بینی (FSL)، آژانس هواشناسی نیروی هوایی (AFWA) و تعدادی از مؤسسات و دانشگاه‌های مشارکت‌کننده دیگر است. برای شبیه‌سازی جو واقعی و انجام 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 گنجانده شده است. چون مدل هم برای گروه‌های تحقیقاتی و هم عملیاتی توسعه داده شده است، طرح‌واره‌های فیزیکی در سطح بالا و نیز طرح‌واره‌های فیزیکی ساده، در مدل گنجانده شده است (اسکاماروک^۱ و همکاران ۲۰۰۸).

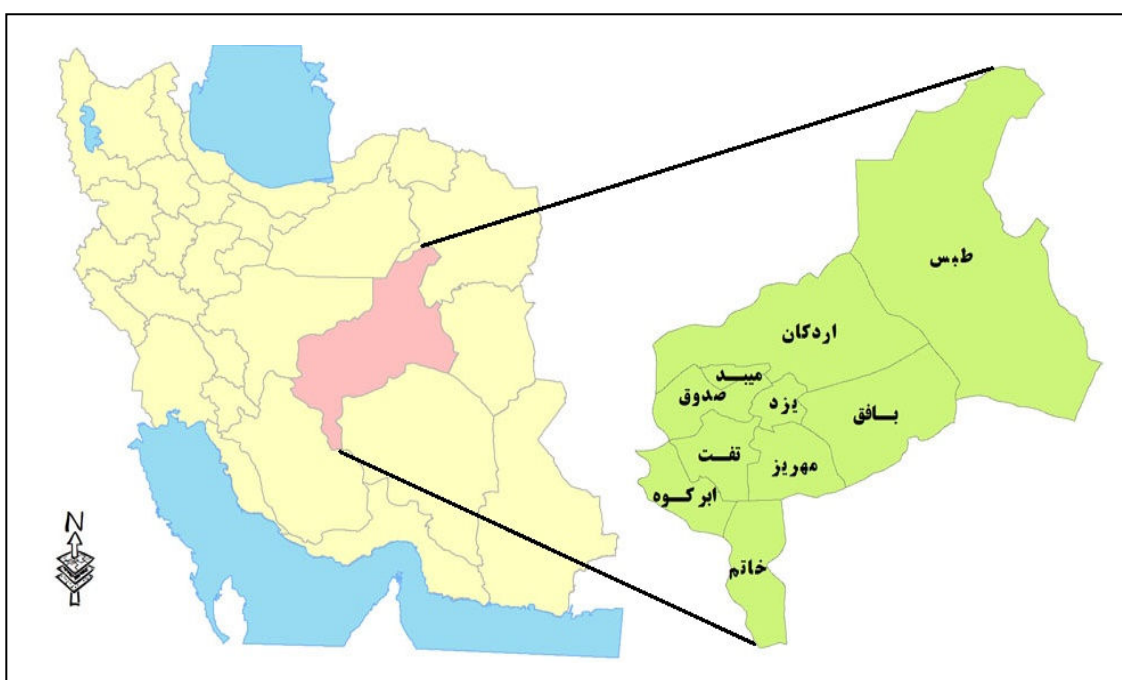
معرفی مدل HYSPLIT

مدل HYSPLIT یک سامانه کامل برای محاسبه مسیرهای پیچیده پخش و نشست با استفاده از رویکرد ذره‌ای و پُف است که شامل ساختار کتابخانه‌ای با برنامه‌های اصلی برای کاربردهای اصلی شامل مسیرها و پخش آلودگی هاست (دراکسلر و هس، ۱۹۹۷). اولین تلاش‌ها برای توسعه این مدل با همکاری NOAA و اداره کل هواشناسی استرالیا صورت گرفت. پخش یک آلودگی به صورت یک پُف یا مجموعه‌ای از ذرات محاسبه می‌شود. یک پُف منبسط شده تا اینکه اندازه‌اش از اندازه سلول هواشناختی بزرگ‌تر شود. در این

حالت پُف به چندین پُف تجزیه می‌شود. یک رویکرد ترکیبی دیگر که در این مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد، با استفاده از توزیع پُفی در راستای افق و توزیع ذره‌ای در راستای قائم است.

۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان یزد است که با توجه به موقعیت جغرافیایی و مجاورت با کمربند خشک جهانی، در مجاورت بیابان و مناطق خشک قرار دارد. با توجه به این شرایط اکثر مناطق این استان دارای زمستان‌های سرد و نسبتاً مرطوب و تابستان‌های گرم و طولانی و خشک است. شکل زیر نمایی از موقعیت جغرافیایی استان یزد را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمایی از موقعیت جغرافیایی استان یزد

۳. مواد و روش‌ها

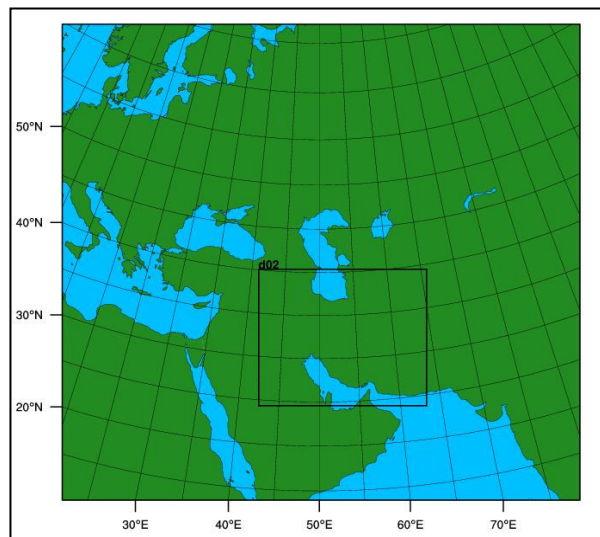
در این مطالعه ابتدا داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های همدیدی استان یزد برای دوره ۱۳۸۸-۱۳۷۹ (۲۰۰۹-۲۰۰۰ میلادی) تهیه شد (ده سال پایانی داده‌های در دسترس انتخاب شده است) و تعداد روزهایی که دید ۱۰۰۰ و زیر ۱۰۰۰ متر بوده و کدهای هوای حاضر ۰۹-۰۶ و ۳۵-۳۰ و ۹۸ گزارش شده بود (این کدها بیانگر هوای گردوغباری در ایستگاه می‌باشد)، استخراج گردید که تعداد ۲۰ روز همراه با طوفان گردوغبار شدید را شامل می‌شود (جدول شماره ۱).

جدول 1 فراوانی روزهای همراه با گرد و غبار شدید در ایستگاه یزد طی دوره ۱۳۷۹-۱۳۸۸

تاریخ	دید افقی	جهت باد (درجه)	سرعت باد (نات)
۱۳۷۹/۰۱/۰۶	۱۰۰	۲۱۰	۱۷
۱۳۸۱/۰۵/۲۲	۱۰۰۰	۲۹۰	۱۶
۱۳۸۱/۱۲/۰۱	۴۰۰	۲۴۰	۴۵
۱۳۸۲/۰۱/۲۸	۸۰۰	۳۱۰	۲۵
۱۳۸۲/۰۳/۰۸	۰	۳۳۰	۳۹
۱۳۸۲/۰۳/۲۹	۱۰۰	۳۲۰	۱۹
۱۳۸۳/۰۱/۲۹	۵۰۰	۲۰۰	۲۹
۱۳۸۳/۰۴/۲۱	۰	۳۲۰	۲۹
۱۳۸۳/۰۹/۰۳	۸۰۰	۱۸۰	۲۹
۱۳۸۵/۱۱/۱۹	۵۰۰	۳۴۰	۱۶
۱۳۸۶/۰۳/۱۳	۱۰۰۰	۲۹۰	۲۳
۱۳۸۶/۱۲/۰۱	۷۰۰	۳۶۰	۱۷
۱۳۸۶/۱۲/۲۴	۱۰۰۰	۱۷۰	۳۱
۱۳۸۷/۰۱/۰۹	۱۰۰۰	۲۱۰	۴
۱۳۸۷/۰۲/۲۱	۱۰۰	۳۳۰	۱۷
۱۳۸۷/۱۰/۱۳	۱۰۰۰	۲۹۰	۱۲
۱۳۸۸/۰۱/۲۴	۲۰۰	۳۳۰	۲۳
۱۳۸۸/۰۲/۰۷	۶۰۰	۳۴۰	۲۱
۱۳۸۸/۰۳/۱۱	۱۰۰۰	۲۵۰	۱۶
۱۳۸۸/۰۴/۱۶	۷۰۰	۳۴۰	۶

پس از بررسی تعداد روزهای همراه با طوفان گرد و غبار شدید در منطقه به بررسی تفصیلی یکی از شدیدترین این طوفان‌ها پرداخته شده که در تاریخ ۱۳۸۲/۰۳/۰۸ در ایستگاه‌های یزد، میبد و طبس گزارش گردیده و دید را در این ایستگاه‌ها به نزدیک صفر رسانده و سرعت باد در این ایستگاه‌ها حدود ۲۰ متر بر ثانیه گزارش شده است. برای بررسی شرایط حاکم بر این طوفان و همچنین یافتن چشمه‌های احتمالی آن از مدل هواشناختی WRF و مدل محاسبه پخش و مسیر جوی HYSPLIT استفاده شده است. داده‌هایی که برای ایجاد شرایط مرزی و جانبی در مدل WRF به کاررفته از نوع NCEP-FNL است که دارای تفکیک $1/0 \times 1/0$ درجه بوده و برای هر ۶ ساعت در دسترس است. این داده‌ها توسط سامانه داده‌گواری جهانی (GDAS) تولید می‌شوند که به صورت پیوسته داده‌های دیدبانی جهان را از سامانه مخابرات

جهانی (GTS) و منابع دیگر برای تحلیل‌های گوناگون دریافت می‌دارد. برای اجرای مدل، ابتدا مطالعات مختلف بر روی فیزیک و دینامیک مختلف موجود در مدل انجام شده است. سپس با استفاده از طرح‌واره‌های مختلف برای تنظیمات فیزیک و دینامیک مسئله، چندین بار مدل اجرا گردید تا تنظیمات قابل قبول به دست آید که تنظیمات به دست آمده در جدول ۲ آورده شده است. پس از به دست آوردن تنظیمات مورد نظر، مدل برای خروجی نهایی اجرا گردید. برای این منظور در مدل دو دامنه تعریف شد که دامنه اول با تفکیک ۴۵ کیلومتر در محدوده ۲۰-۸۰ درجه شرقی طول جغرافیایی و ۱۰-۶۰ درجه شمالی عرض جغرافیایی قرار دارد. این دامنه به منظور به دست آوردن شرایط همدیدی حاکم بر طوفان‌ها تعریف شده است. همچنین دامنه دوم درون دامنه اول و با تفکیک ۱۵ کیلومتر در محدوده ۶۰-۴۰ درجه شرقی و ۲۴-۴۰ درجه شمالی قرار می‌گیرد. در شکل ۲ می‌توان نمایی از محدوده انتخابی برای دو دامنه را مشاهده کرد. این دامنه برای محاسبه نحوه تغییرات کمیت‌های هواشناختی و وضعیت همگرایی و واگرایی در منطقه یزد به کاررفته است.



شکل ۲ نمایی از محدوده انتخابی برای دو دامنه تعریف شده در مدل WRF

جدول ۲ طرح‌واره‌های فیزیکی مورد استفاده در اجرای مدل WRF

پارامتر	میکروفیزیک	تابش موج کوتاه	لایه سطحی	سطح خشکی	لایه مرزی سیاره‌ای	پارامتری کردن کومولوس
طرح‌واره به کاررفته	لین و همکاران	موج کوتاه گدارد	مونین-ابوخوف (جانجیک اتا)	مدل سطحی- نوآ-لند	طرح‌واره دانشگاه یونسی	کین-فریتچ (اتا جدید)

در بررسی نتایج ابتدا با استفاده از خروجی‌های مدل نقشه‌های همدیدی در سطح زمین و سطوح ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال به دست آمده و وضعیت سامانه‌های همدیدی در منطقه تعیین شده است. سپس برای تکمیل

بررسی‌های همدیدی، تشکیل لایه آمیخته در ساعات قبل از طوفان، وضعیت همگرایی باد و همچنین سرعت سطحی باد در ساعت شروع طوفان مورد بررسی قرار گرفته شد. همچنین برای بررسی ناپایداری در منطقه شاخص K (جرج^۱، ۱۹۶۰) به عنوان نمونه‌ای از شاخص‌های ناپایداری در جو انتخاب گردید. این شاخص به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$K=(T_{850}-T_{700}-T_{500})+(T_{d850}-T_{d700}) \quad (1)$$

که مقادیر بزرگ‌تر از ۲۵ همرفت خوب و مقادیر بزرگ‌تر از ۳۰ این شاخص همرفت شدید را نشان می‌دهد. بررسی‌های طوفان‌های گردو خاک منطقه یزد نشان می‌دهد که طوفان‌های این ناحیه حداکثر ۲ تا ۳ ساعت منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ یعنی عوامل محلی نیز نقش اساسی در ایجاد این طوفان‌ها دارند. در کنار جریان باد سطحی قوی، یک همرفت قوی در شکل‌گیری طوفان گرد و غبار نقش اساسی را ایفا می‌کند (تاکمی^۲، ۱۹۹۹). همرفت قوی می‌تواند هوا را آشفته و گرد و غبار را از سطح بلند کند و به سطوح بالای جو برده و معلق کند. تشکیل لایه آمیخته عمیق بر روی مناطق خشک در تشکیل همرفت در این مناطق مؤثر است. لایه آمیخته عمیق نشان‌گر همرفت عمیق در منطقه و انتقال گرد و غبار در ارتفاعات بالای جو می‌باشد که با وجود جریان باد قوی می‌تواند به نقاط دورتر منتقل می‌شوند (گامو^۳، ۱۹۹۶). این لایه معمولاً در روزهای گرم و مناطق کویری دیده می‌شود. روش متداول برای اندازه‌گیری لایه آمیخته بررسی دمای پتانسیل است. لایه آمیخته جو لایه‌ای است که دمای پتانسیل در آن تقریباً ثابت بماند؛ یعنی لایه‌ای که دمای آن با شیوه تقریبی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در هر کیلومتر کاهش یابد. عمق و دمای لایه آمیخته از روزی به روزی دیگر و از فصلی به فصل دیگر متفاوت است.

وجود همگرایی در منطقه نیز به شدت حرکت‌های صعودی افزوده و انتقال گرد و غبار به ارتفاعات بالاتر را منجر می‌شود. برای بررسی شدت همگرایی از کمیت پتانسیل سرعت استفاده شده است. پتانسیل سرعت به صورت کمیت نرده‌ای برای جریان در حال چرخش تعریف می‌شود. این کمیت شاخصی برای سنجش بزرگی همگرایی و واگرایی در جریان به کار می‌رود. مقادیر منفی این کمیت بیانگر وجود واگرایی و مقادیر مثبت آن بیانگر همگرایی در منطقه است.

گام بعد محاسبه مسیرهای برگشت و بررسی چشمه طوفان ذکر شده است. مسیرهای برگشت مسیر لاگرانژی بسته هوا را از نقطه گیرنده تا مدت زمان معلوم به دست می‌دهند که می‌تواند در یافتن مناطق چشمه به کار رود. برای محاسبه مسیرهای برگشت از مدل HYSPLIT استفاده شده است. مدل HYSPLIT محدوده

1 George
2 Takemi
3 Gamo

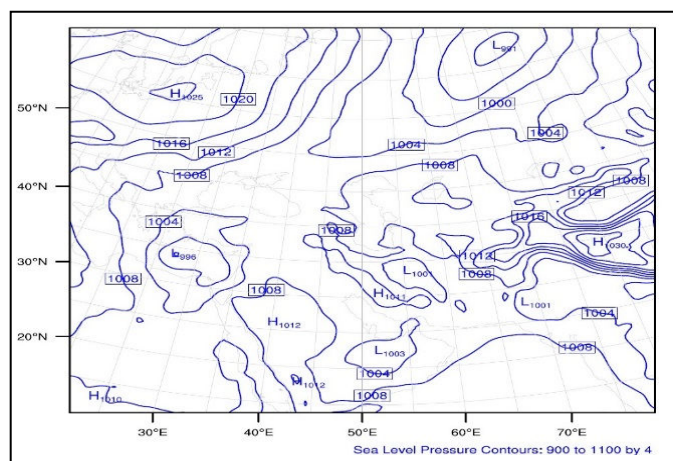
گسترده‌ای از انتقال، پخش و نشست ذرات را پشتیبانی می‌کند. مسیرها را می‌توان در ارتفاعات و همچنین ایستگاه‌های مختلف محاسبه کرد. در این مدل پایداری لایه مرزی با استفاده از شار گرما و تکانه به دست می‌آید و عمق لایه مرزی از مدل هواشناختی گرفته می‌شود. برای این منظور ابتدا خروجی‌های مدل WRF به فرمت ورودی مدل HYSPLIT تبدیل شده است سپس با استفاده از این مدل مسیرهای برگشت را محاسبه می‌شود. چون که مسیرها در ارتفاعات مختلف می‌تواند متفاوت باشد مسیرها در سه ارتفاع ۱۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر محاسبه 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 (دراکسلر^۱، ۱۹۹۵).

۴. بحث و نتایج

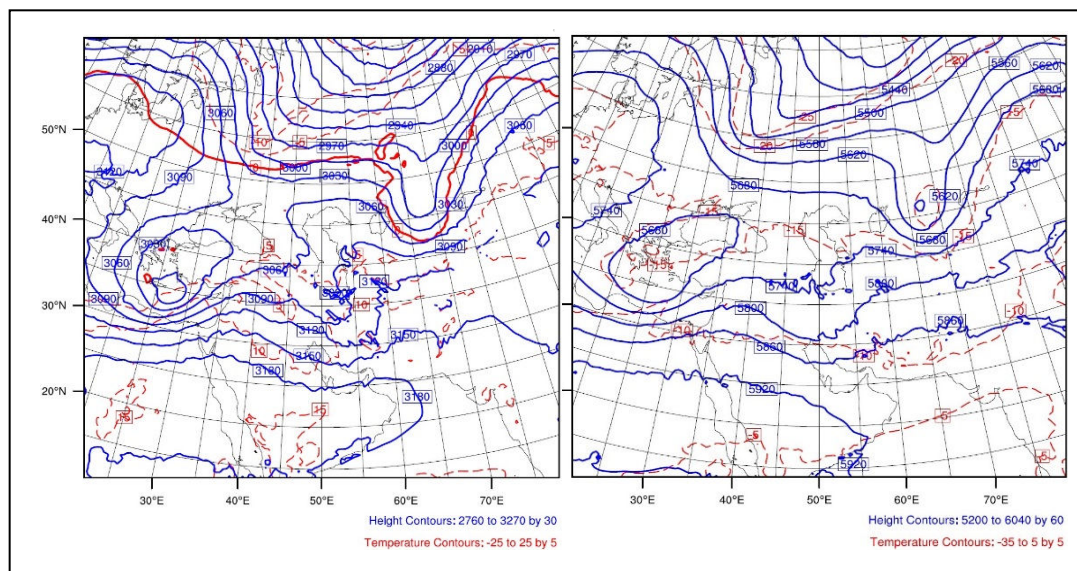
در بخش اول این مطالعه به بررسی فراوانی تعداد روزهای همراه با طوفان گرد و غبار شدیدی که دید افقی را به ۱۰۰۰ و پایین‌تر از آن طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۸۸ در ایستگاه یزد رسانده، پرداخته شده است. در جدول ۲ می‌توان فراوانی این طوفان‌ها را در سال‌های مختلف و میزان دید افقی و سرعت و جهت باد را در این طوفان‌ها مشاهده کرد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، اکثر این نوع طوفان‌ها در ماه‌های بهمن تا تیر در منطقه رخ داده است و همچنین جهت باد غالب در اکثر این طوفان‌ها غربی و شمال‌غربی می‌باشد. بررسی‌های طوفان‌های گرد و غبار این منطقه نشان می‌دهد که طوفان‌های این ناحیه حداکثر ۲ تا ۳ ساعت منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، یعنی می‌توان گفت که عوامل محلی نقش اساسی در ایجاد این طوفان‌ها دارند و چشمه این طوفان‌ها در مناطق مجاور قرار دارد. لذا بررسی عوامل میان‌مقیاس و محلی مانند همرفت و عوامل مؤثر بر تندی افقی باد می‌تواند در شناخت این پدیده‌ها بسیار مؤثر باشد. در ادامه به بررسی یکی از شدیدترین طوفان‌های گردوغباری که چند ایستگاه استان یزد را تحت تأثیر قرار داده، پرداخته شده است.

طوفانی که در این مطالعه شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته، طوفان روز ۸ خرداد ۱۳۸۲ می‌باشد که در حدود ساعت ۱۵ UTC در ایستگاه‌های یزد، میبد، طبس، عقدا و ابرکوه گزارش شده و دید را در ایستگاه‌های یزد، میبد و طبس به نزدیک صفر رسانیده است. در این ساعت در ایستگاه یزد سرعت باد بیش از ۱۸ متر بر ثانیه، دما ۳۱ درجه سانتی‌گراد، دمای نقطه شبنم ۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۶ درصد (که نشان از هوای خشکی دارد) گزارش شده است. برای تحلیل شرایط حاکم بر این طوفان، نقشه‌های همدیدی و شرایط همگرایی و واگرایی که از خروجی مدل به دست آمده از ساعت ۱۲ UTC روز قبل تا ۱۲ UTC روز بعد از طوفان بررسی شده است. در روز قبل طوفان ساعت ۱۲ UTC سامانه پرفشاری در شرق اروپا است و زبانه‌های آن بر روی شمال و مرکز ایران نیز دیده می‌شود. سامانه کم‌فشار دینامیکی

مدیترانه و همچنین سامانه کم فشار دینامیکی قوی روی روسیه نیز در دو طرف این سامانه پرفشار قرار دارند. همچنین کم فشار حرارتی بر روی جنوب ایران دیده می شود که زبانه های آن از طرف جنوب غرب تا عربستان کشیده شده است. ویژگی بارزی که در تمام نقشه های سطح زمین مشاهده می شود، پرفشارهایی است که روی رشته کوه های هیمالیا و روی رشته کوه های زاگرس (در نواحی مرکزی ایران) وجود دارند. این پرفشارها در نقشه های سطوح فوقانی دیده نمی شوند و علت وجود آن ها کوهساری منطقه می باشد. برای بررسی شرایط همرفت از تحلیل های لایه آمیخته در منطقه استفاده شده است؛ یعنی نمودار تغییرات دمای پتانسیل با ارتفاع، نشان دهنده عدم تشکیل لایه آمیخته در این ساعت روی منطقه یزد است. سرعت باد در این ساعت برای مناطق مرکزی ایران در حدود ۴-۷ متر بر ثانیه است که جو نسبتاً آرامی را نشان می دهد. در ساعات بعد، شاهد تضعیف پرفشار شرق اروپا و همچنین تقویت سامانه های کم فشاری روی مدیترانه و روسیه هستیم. به طوری که در ساعت UTC ۱۲ روز ۸ خرداد در نقشه سطح زمین (شکل ۳) می بینیم که سامانه پرفشار روی شرق اروپا به عرض های بالاتر کشیده شده است. در این ساعت بر روی مناطق مرکزی و شرقی ایران کم فشار با مرکز بسته ۱۰۰۱ هکتوپاسکال وجود دارد. در سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۴) ناوه مربوط به چرخند روسیه پایین تر کشیده و ناوه های چرخند مدیترانه نیز با گسترش بر روی ایران، در غرب و مرکز کشور قرار دارد. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال زبانه های ناوه با شدت کمتری دیده می شود (شکل ۴). در این تراز مرکز بسته چرخند مدیترانه کمی عقب تر از تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال دیده می شود که بیانگر تقویت این سامانه در ساعات بعد است که با نزدیک شدن زبانه های این چرخند به منطقه که همراه با ریزش هوای سرد از ترازهای بالای جو همراه است.

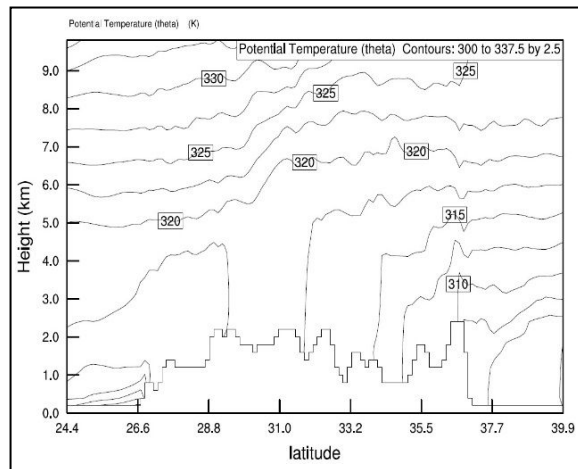


شکل ۳ نقشه سطح زمین ساعت UTC ۱۲ روز ۸ خرداد ۱۳۸۲ در دامنه اول خروجی مدل WRF، خطوط پیوسته برندهای فشاری هستند. محور افقی طول جغرافیایی و محور قائم عرض جغرافیایی را نشان می دهد.

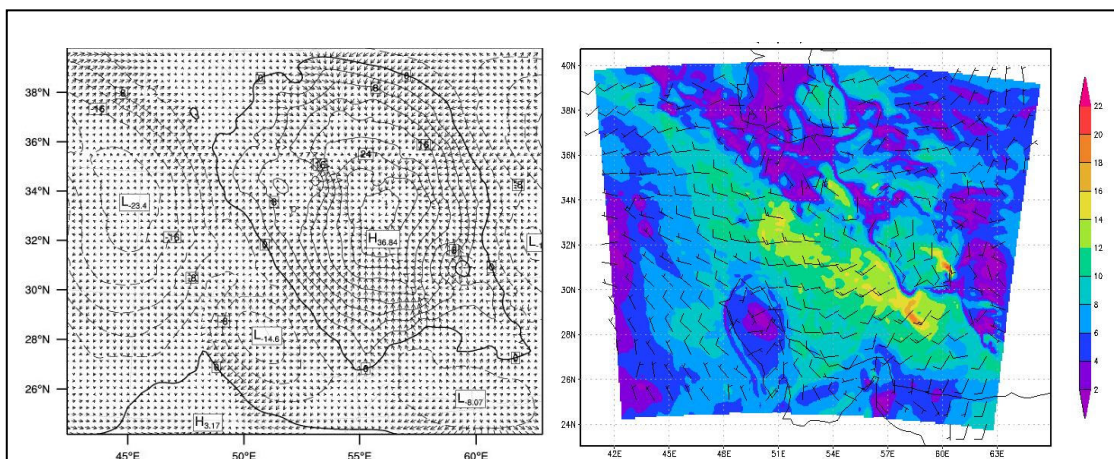


شکل 4 نقشه سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال (سمت چپ) و سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال (سمت راست) ساعت ۱۲ UTC روز ۸ خرداد ۱۳۸۲ در دامنه اول خروجی مدل WRF، خطوط پیوسته پربندهای ارتفاع و خط چین‌ها پربندهای دما هستند.

در شکل ۵ وجود لایه آمیخته نسبتاً عمیقی بر روی مناطق مرکزی ایران مشاهده می‌شود که با توجه به خشکی هوا می‌تواند نشان‌دهنده همرفت قوی در این مناطق باشد. این همرفت انتقال گرد و غبار به ترازهای بالای جو کمک کند. طوفان گرد و غبار در این روز حدود ساعت ۱۵ UTC در ایستگاه یزد گزارش شده است. بررسی نقشه سطح زمین در این ساعت تقویت کم‌فشار حرارتی روی مرکز ایران نسبت به سه ساعت گذشته را نشان می‌دهد. فشار در مرکز این کم‌فشار ۱۰۰۰ هکتوپاسکال است که خط دمای ۳۲ درجه از مرکز آن می‌گذرد. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز در این ساعت، ناوه چرخند مدیترانه تقویت شده که می‌تواند نشان‌دهنده تشدید ریزش هوای سرد از عرض‌های بالاتر در منطقه باشد که با توجه به دمای بالا و خشکی هوا در سطح زمین می‌تواند عامل ایجاد ناپایداری شدید در منطقه شود. شاخص ناپایداری KI در این ساعت برای ایستگاه یزد عدد ۳۱ را نشان می‌دهد که بیانگر ناپایداری شدید در منطقه است. در این ساعت، با نگاهی به تندی باد افقی می‌توان دید که سرعت باد افقی در نواحی مرکزی ایران به بیش از ۱۵ متر بر ثانیه می‌رسد (شکل ۶ راست). این سرعت زیاد باد می‌تواند سبب بلند کردن گرد و غبار و شن از مناطق خشک و کویری مرکزی ایران شود. شکل مربوط به مناطق همگرایی و واگرایی (شکل ۶ چپ)، همگرایی شدیدی را در نواحی مرکزی ایران نشان می‌دهد که به همرفت قوی‌تر در منطقه و انتقال گرد و غبار و شن بلند شده به ترازهای بالای جو کمک می‌کند.



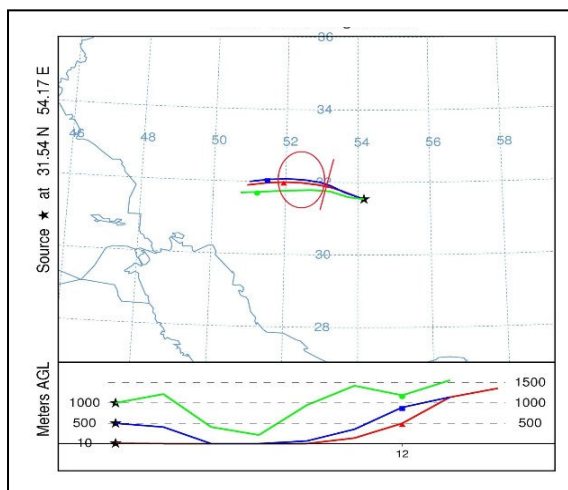
شکل 5 برش قائم دمای پتانسیل روی عرض جغرافیایی در دامنه دوم خروجی مدل WRF، روز ۸ خرداد ۱۳۸۲ ساعت ۱۲ UTC ثابت ماندن دمای پتانسیل با ارتفاع بیانگر ایجاد لایه آمیخته است.



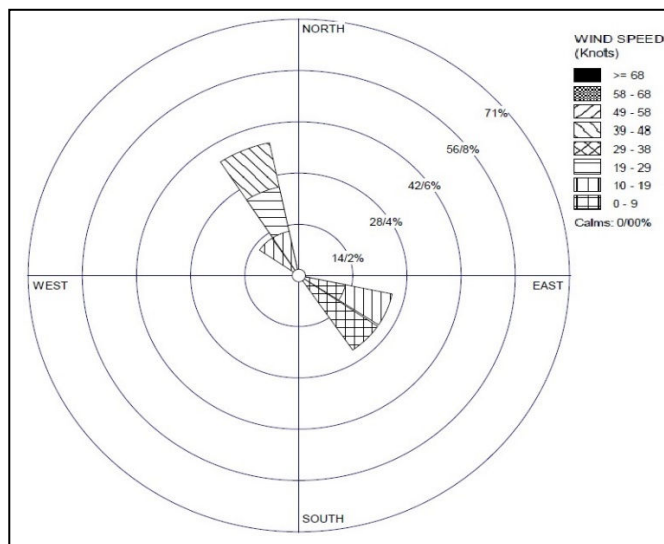
شکل 6 (سمت چپ) همگرایی و واگرایی در دامنه دوم خروجی مدل WRF، پیکان‌ها نشان‌دهنده جهت باد و خطوط پیوسته نشان‌دهنده مناطق همگرایی (مقادیر مثبت) و واگرایی (مقادیر منفی) هستند (سمت راست). سرعت افقی باد، رنگ‌ها بیانگر مقادیر مختلف سرعت باد و پیکان‌ها نشان‌دهنده جهت باد هستند. روز ۸ خرداد ۱۳۸۲ ساعت ۱۵ UTC.

خروجی‌های مدل HYSPLIT برای مسیرهای برگشت از ایستگاه یزد در این ساعت نشان‌گر وجود جریان‌های باد شمال‌غربی است (شکل ۷). گلباد حاصل از داده‌های دیدبانی در این روز نیز تأییدکننده جریان باد غالب شمال‌غربی در این روز در منطقه است (شکل ۸). همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است مسیرها در سه ارتفاع ۱۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری الگوهای مشابهی را نشان می‌دهند. مکان همگرایی مسیرها و مکان‌های احتمالی چشمه در شکل مشخص شده است. با تبدیل خروجی مدل HYSPLIT به فرمت GoogleEarth و

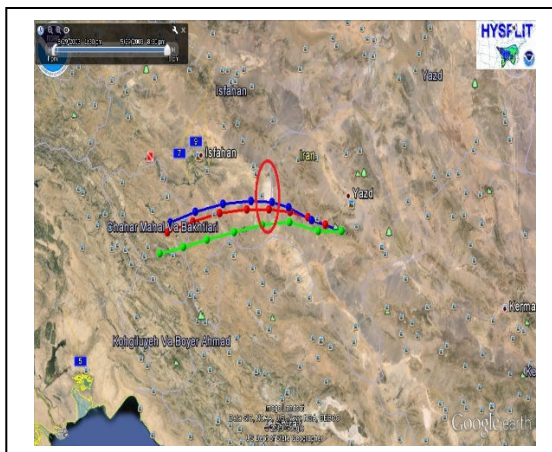
بردن مسیرها به این نرم‌افزار (شکل ۹) به دست آمده است. با توجه رویکرد دراکسلر (۱۹۹۵) و مکان همگرایی مسیرها این شکل می‌تواند نشان‌گر وجود چشمه احتمالی در مناطق خشک و کویری اطراف باتلاق گاوخونی در قسمت جنوبی استان اصفهان و شمال غرب استان یزد باشد. با توجه به عدم بارندگی در روزهای قبل در مناطق ذکر شده، این مناطق می‌توانند برای چشمه طوفان، مناطق مستعدی باشند.



شکل 7 مسیرهای برگشت از ایستگاه یزد در سه ارتفاع ۱۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری از خروجی مدل HYSPLIT، روز ۸ خرداد ۱۳۸۲، خط و دایره نشان‌دهنده مکان همگرایی مسیرها و مکان احتمالی چشمه است.



شکل 8 گلباد روز ۸ خرداد ۱۳۸۲



شکل ۹ خروجی مدل HYSPLIT در GoogleEarth. دایره نشان‌دهنده مکان احتمالی چشمه طوفان است.

در ساعات بعد و در ساعت UTC ۰۰ روز ۹ خرداد ۱۳۸۲ بر روی نقشه سطح زمین در مرکز ایران پرفشاری وجود دارد. فشار، رطوبت نسبی و دما در این ساعت در ایستگاه یزد نسبت به ساعات‌های قبل به سرعت افزایش یافته است. سامانه کم‌فشار مدیترانه در حال نزدیک شدن به سامانه کم‌فشار روسیه است. در سطوح بالای جو نیز روند عبور سامانه‌های دینامیکی چرخندی از مناطق مرکزی به وضوح دیده می‌شود. در ساعت UTC ۱۲ همین روز شاهد جفت شدن دو سامانه کم‌فشار دینامیکی هستیم. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز با عبور ناوه از روی مرکز ایران، پشت‌های بر روی این مناطق حاکم شده است. فشار در ایستگاه یزد در این ساعت ۱۰۱۶ هکتوپاسکال و دما ۱۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۰ درصد را نشان می‌دهد. سرعت باد در این ایستگاه ۷ متر بر ثانیه بود که نشان‌گر جو نسبتاً آرامی در منطقه است. در این ساعت بر روی مناطق مرکزی ایران نیز خط همگرایی صفر عبور می‌کند که عدم وجود همگرایی در این ساعت با عبور سامانه چرخندی از منطقه را بیان می‌دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه نشان داده شد که با استفاده از مدل‌های عددی و رویکردی مناسب می‌توان طوفان‌های گردوغبار را بررسی و پیش‌بینی کرد. مدل‌هایی که در این مطالعه بکار گرفته شدند مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی جو WRF و مدل پخش و محاسبه مسیر HYSPLIT بوده است که برای مطالعه طوفان‌های گرد و غبار استان یزد بکار گرفته شدند. بررسی طوفان‌های گرد و غبار در استان یزد با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی استان طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۸۸ نشان داد که اکثر طوفان در بازه زمانی بهمن تا تیر منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جریان باد نیز در اکثر این طوفان‌ها به صورت غربی و شمال‌غربی بوده است. شبیه‌سازی و بررسی یکی از شدیدترین طوفان‌هایی که چند ایستگاه استان را تحت تأثیر قرارداد توسط مدل میان‌مقیاس

WRF، نشان داد که تحت تأثیر وضعیت همدیدی سامانه‌های فعال، در منطقه شرایط ناپایداری ایجاد شده است. این شرایط بر اثر ریزش هوای سرد در هنگام عبور سامانه‌های چرخندی در ترازهای بالای جو و نیز گرمایش سطحی به وجود آمده است. این ناپایداری‌ها که با سرعت زیاد باد سطحی (بیش از ۱۵ متر بر ثانیه) و ایجاد مناطق همگرایی باد در مناطق بیابانی اطراف استان یزد همراه است منجر به بلند شدن گرد و خاک و شن در هوا شده که با توجه به مساعد بودن شرایط همرفت و وجود لایه آمیخته قوی در ساعت قبل از طوفان گرد و غبار بلند شده توانسته به ارتفاعات بالای جو صعود کند و بدین ترتیب طوفان گرد و غبار در منطقه رخ داده است. بررسی مسیرهای برگشت از ایستگاه یزد توسط مدل HYSPLIT، که ورودی کمیت‌های هواشناسی خود را از مدل WRF دریافت کرده نیز نشان داد که قسمت‌های کویری و خشک شمال و شمال غرب استان یزد و قسمت‌های خشک شده باتلاق گاوخونی می‌تواند چشمه مناسبی برای این طوفان باشد.

کتابنامه

- امیدوار، کمال؛ ۱۳۸۴. بررسی و تحلیل سینوپتیکی توفان‌های ماسه در دشت یزد- اردکان، طرح پژوهشی دانشگاه یزد.
- امیدوار، کمال؛ ۱۳۸۹. تحلیلی از رژیم بادهای شدید و طوفانی یزد. فصلنامه مدرس علوم انسانی. دوره ۱۴. شماره ۱. صص ۸۳-۱۰۵.
- چیتی، منصوره؛ ۱۳۸۹. بررسی و تعیین الگوهای آب و هوایی و جوی حاکم بر توفان‌های گرد و خاک در منطقه یزد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.
- خوش‌سیما، مسعود؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی؛ احمدی گیوی، فرهنگ؛ ۱۳۹۲. تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش‌ازدور در دو منطقه شهری در ایران. مجله فیزیک زمین و فضا. دوره ۳۹. شماره ۱. صص ۱۶۳-۱۷۴.
- رضازاده، مریم؛ ایران‌نژاد، پرویز؛ شائو، یاپینگ؛ ۱۳۹۲. شبیه‌سازی گسیل غبار با مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF-chem و با استفاده از داده‌های جدید سطح در منطقه خاورمیانه. مجله فیزیک زمین و فضا. دوره ۳۹. شماره ۱. صص ۱۱۹-۲۱۲.
- لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم؛ ۱۳۸۷. تحلیل آماری و همدیدی توفان‌های گرد و خاک استان خراسان رضوی در فاصله زمانی (۱۹۹۳-۲۰۰۵). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۶۵. صص ۳۳-۱۷.
- Brazel, A. J., and Hsu, S., 1981. The climatology of hazardous Arizona dust storms. In Desert Dust, T. L. P'ew'e (Ed.). Geological Society of America, Special Paper 186, 293-303.
- Chiti, M., 2010. Investigation of climate and weather pattern of dust storm in Yazd area. MSc. Dissertation, Science and Research Branch Islamic Azad University of Tehran.
- Dockery, D. W., and Stone, P. H., 2007. Cardiovascular risks from fine particulate air pollution. New England Journal of Medicine 356(5), 511-513.

- Draxler, R. R., 1995. Source location through radiological monitoring (System Design and Concept of Operations). Presented at the Radionuclide Monitoring Workshop, ARPA Center for Monitoring Research.
- Draxler, R. R. and Hess, G. D., 1997. Description of the HYSPLIT_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum. ERL ARL-224. P1-25.
- Gamo, M., 1996. Thickness of dry convection and large-scale subsidence above deserts. *Boundary Layer Meteorology* 79, 265–278.
- George, J.J., 1960. *Weather Forecasting for Aeronautics*. Academic Press, 673 pp.
- Gillette, D.A., 1999. A qualitative geophysical explanation for “hot spot” dust emitting source regions: *Contributions to Atmospheric Physics* 72, 67–77.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S. J., 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model: *Journal of Geophysical Research* 106, 20255–20273.
- Khoshsima, M., Bidokhti, A. A., and Ahmadi-Givi, F., 2012. Evaluation of aerosol optical depth using visibility and remote sensing data in urban and semi urban areas in Iran. *Journal of Earth and Space Physics* 39(1), 163-174.
- Kim, J., 2008. Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965–2004). *Atmospheric Environment* 42, 4778–4789.
- Lashkari, H., Keikhosravi, Gh., 2008. Statistical Synoptic Analysis of Dust Storm in Khorasan Razavi Province (1993-2005). *Physical Geography Research Quarterly* 65, 17-33.
- Lee, J.A., Gill, T.E., Mulligan, K.R., Domínguez Acosta, M., Perez, A.E., 2009, Land use/land cover and point sources of the 15 December 2003 dust storm in southwestern North America. *Journal of Geomorphology* 105, 18-27.
- Novlan, D.J., Hardiman, M., Gill, T. E., 2007. A synoptic climatology of blowing dust events in El Paso, Texas from 1932–2005. Presented at the 16th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, no. J3.12.
- Petzold, A., Rasp, K., Weinzierl, B., Esselborn, M., Hamburger, T., Dornbrack, A., 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.
- Omidvar, K., 2005. Synoptic analysis of sand storm of Yazd-Ardakan plane. Final report, Yazd University.
- Omidvar, K., 2010. An analysis of strong and stormy wind of Yazd. *Human Sciences MODARES* 14(1), 83-105.
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., Shao, Y., 2013. Dust emission simulation with the WRF-Chem model using new surface data in the Middle East region. *Journal of Earth and Space Physics* 39(1), 191-212.
- Rivera Rivera I. N, Gill, T. E., Gebhart, K. A., Hand, J. L., Bleiweiss, M. P., Fitzgerald, R. M., 2009. Wind modeling of Chihuahuan Desert dust outbreaks. *Atmospheric Environment* 43, 347–354.
- Rosenfield, J.E., Conside D.B., Meade P.E., Bacmeister J.T., Jackman C. H. and Schoeberl M. R., 1997. Stratospheric effects of Mount Pinatubo aerosol studied with a coupled two-dimensional model. *Journal of Geophysical Research* 102(D3), 3649–70.

- Rousseau, D. D., Duzer, D., Etienne, J. L., Cambon, G., Jolly, D., Ferrier, J., Schevin, P., 2004. Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole: *Journal of Geophysical Research* 109, D06116, doi:10.1029/2003JD003985.
- Salazar, C., Alvarez, C., Silva, H. A., Dorantes, C., 1994. Radioactivity in air around nuclear facilities in Mexico. *Environment International* 20, 747–56.
- Schwartz, S. E., Wagener R., Nemesure S., 1995. Microphysical and compositional influences on shortwave radiative forcing of climate by sulfate aerosols: the American Chemical Society National Meeting 209, 2-ENVR Part 1, DE-AC02-76CH00016.
- Skamarock, WC., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., Powers, J. G., 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.
- Takemi, T., 1999. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China: *Monthly Weather Review* 127, 1301–1309.
- Tegen, I., Lacis A. A., Fung, I., 1996. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. *Nature* 380, 419–22.
- Westphal, D.L., Toon, O. B., Carson, T. N., 1988. A case study of 83obilization and transport of Saharan dust: *Journal of Atmospheric Science* 45(2), 145–2,175.
- Yerramilli, A., Rao Dodla, V. B., Challa, V. S., Myles, L., Pendergrass, W. R., Vogel, C. A. Dasari, H. P., Tuluri, F., Baham, J. M., Hughes, R. L., Patrick, C., Young, J. H., Swanier, S. J., Hardy, M. G., 2011. An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of PM_{2.5} source regions over the Mississippi Gulf Coast region. *Air Quality, Atmosphere, and Health*. DOI 10.1007/s11869-010-0132-1.
- Zender, C. S., Bian, H., Newman, D., 2003. Mineral Dust Entrainment And Deposition (DEAD) model: description and 1990s dust climatology. *Journal of Geophysical Research* 108, 4416. Doi:10.1029/2002JD002775.
- Zoljoodi, M., Didevarasl, A., Montazerzohor, Z., 2013. Application of the dust simulation models in the Middle East, and dust-dispersion toward the western/southwestern Iran (case study: 22-26 June 2010). *Natural Science* 5(7), 818-831.