

ردیابی منابع گرد و غبار سطوح مختلف جو سنندج با استفاده از مدل HYSPLIT به منظور مدیریت مخاطرات محیطی

برومند صلاحی^۱

دکترای تخصصی اقلیم‌شناسی، مدرس گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

احمد نوحه‌گر

استاد ژئومورفولوژی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمود بهروزی

دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲

چکیده

در این پژوهش به منظور ردیابی گرد و غبار در سنندج، ابتدا رخداد‌های توفان گرد و غبار در دوره آماری ۲۴ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۰ میلادی) از داده‌های هواشناسی استخراج و به صورت آماری بررسی شد. در ادامه، یک رخداد گرد و غبار که در نیمه گرم سال اتفاق افتاده و به مدت ۱۰ روز طول کشیده بود انتخاب و با استفاده از مدل HYSPLIT ذرات غبار در اتمسفر ردیابی شد. سپس به منظور واکاوی رخداد توفان‌های گرد و غبار در سنندج به صورت کلان‌مقیاس از علم همدید و به صورت میان‌مقیاس از علم دینامیک بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که تعداد توفان‌های گرد و غبار در سنندج سیر صعودی داشته و هر ساله بر تعداد این رخدادها افزوده می‌شود؛ اوج آن‌ها در فصل بهار و تابستان بوده و در خردادماه بیش‌ترین توفان اتفاق افتاده است. خروجی‌های مدل HYSPLIT نشان داد که در توفان گرد و غبار، ذرات غبار از سمت بیابان‌های سوریه و شمال عراق وارد اتمسفر سنندج شده‌اند و صحرای عربستان نقشی در آن نداشته و هم‌چنین ذرات غبار در سطوح ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ از یک مسیر و آن‌هم از سمت سوریه و شمال عراق وارد سنندج شده است. بررسی نقشه‌های تراز ۷۰۰ ژئوپتاسیل‌متر و فشار سطح زمین نشان داد صعود ترازهای میانی جو به ارتفاعات بالاتر باعث تشکیل پشته در عرض‌های پایین جغرافیایی شده و اتمسفر ایران، سوریه و عراق در سیطره پرفشار جنب حاره بوده که این شرایط موجب تشکیل سیستم کم‌فشار حرارتی سطوح پایین اتمسفر شده و موجب صعود هوا شد.

واژگان کلیدی: گرد و غبار، ردیابی، مدل HYSPLIT، سنندج

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

یکی از مهم‌ترین بحران‌ها و مشکلات زیست‌محیطی در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک، رخداد پدیده خطرناک بیابان‌زایی است که وقوع توفان‌های گرد و غبار و حرکت ریزگردها را به دنبال دارد (توفان، ۱۳۸۹: ۹۴۳). گرد و غبارها عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک رخ می‌دهند و جزئی از ویژگی‌های اقلیمی آن‌ها محسوب می‌شود. بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی، هرگاه در ایستگاهی سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه بیشتر شده و دید افقی به‌واسطه وجود ذرات گرد و غبار به کمتر از یک کیلومتر برسد، توفان گرد و غبار گزارش می‌شود (مفیدی و کمالی، ۱۳۹۱) (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶). هنگامی که خشکی طولانی‌مدت حاکم بوده و سطح خاک کاملاً خشک باشد و نیز کمبود رطوبت سبب ناپایداری هوا گردد توفان‌های بزرگ پدیدار خواهند شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۹)؛ ایجاد گرد و غبار در حقیقت نوعی واکنش به تغییرات گسترده‌ی پوشش گیاهی زمین است (انگستادلر، ۲۰۰۱). شدت و سرعت باد، خشک بودن هوا و مشخصات ذرات، نقش مهمی در وقوع توفان‌ها دارند (علی‌جانی، ۱۳۷۶). سرعت باد و جریان‌های شدید لایه زیرین تروپوسفر از عوامل مهم در رخداد توفان‌های گرد و غبار است (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷: ۱۷).

ذرات گرد و غبار هنگام طی مسافت‌های طولانی، تحت تأثیر فرایندهای فیزیکی و شیمیایی، با ذرات آلاینده دیگر ترکیب شده و ترکیبات جدیدی را پدید می‌آورند که به‌نوبه‌ی خود می‌توانند خطرناک باشند. این مواد سمی حمل شده با ذرات غبار می‌توانند با نشستن روی پوست و ورود به مجاری تنفسی موجبات آسیب‌های پوستی و ریوی زیادی را فراهم کنند (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶). گرد و غبار اثر عمده‌ای بر اقلیم دارد و می‌تواند بر روی دما، جذب و پخش تابش (با تغییر در تابش موج کوتاه و بلند) اثر بگذارد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۰۳).

در سال‌های اخیر، شناسایی منابع گرد و غبار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مناطق غرب و جنوب غرب ایران به‌طور متناوب با پدیده گرد و غبار دست و پنجه نرم می‌کند. در غرب ایران مناطق بیابانی همچون بیابان‌های جنوب عراق و عربستان سعودی و در فاصله دورتر سوریه و شمال آفریقا قرار دارد. موقعیت جغرافیایی خاص نیمه غربی ایران و مجاورت آن با بیابان‌های جنوب عراق و عربستان سعودی و نیز شمال آفریقا باعث وقوع مکرر توفان گرد و غبار در طول سال می‌شود. وقوع خشک‌سالی در جنوب غرب ایران و کشور عراق و به تبع آن کاهش رطوبت سطحی و زیرسطحی خاک و نیز از بین رفتن پوشش گیاهی در این مناطق از مهم‌ترین عوامل ایجاد و تشدید گرد و غبار است. احداث سدهای عظیم بر روی رودخانه‌های منتهی به حوضه آبریز بین‌النهرین به عنوان عوامل انسانی از دیگر عوامل تأثیرگذار بر وقوع پدیده گرد و غبار است.

پژوهشگران زیادی به بررسی توفان‌های گرد و غبار پرداخته‌اند. ویهونگ و همکاران (۲۰۰۱: ۲۳۲۷) با استفاده از نقشه‌های هوا در ترازهای ۸۵۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، توفان‌های گرد و غبار در چین را مورد بررسی قرار دادند. انگستادلر (۲۰۰۱) معتقد است بستر دریاچه‌ها و صحرای بزرگ آفریقا تولیدکنندگان اصلی توفان‌های گرد و غبار در جهان هستند. وانگ (۲۰۰۵) سیستم‌های همدید مؤثر در تشکیل توفان‌های گرد و غبار شمال شرق آسیا را مورد بررسی قرار داد. اسکودرو و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل HYSPLIT به واکاوی توفان‌های وارد شده به

اسپانيا با منشأ صحراي آفريقا پرداختند. دراکسلر و همکاران (۲۰۰۹: ۱) مسيریابی توفان‌های گرد و خاکی عراق و کويت را با مدل HYSPLIT انجام دادند.

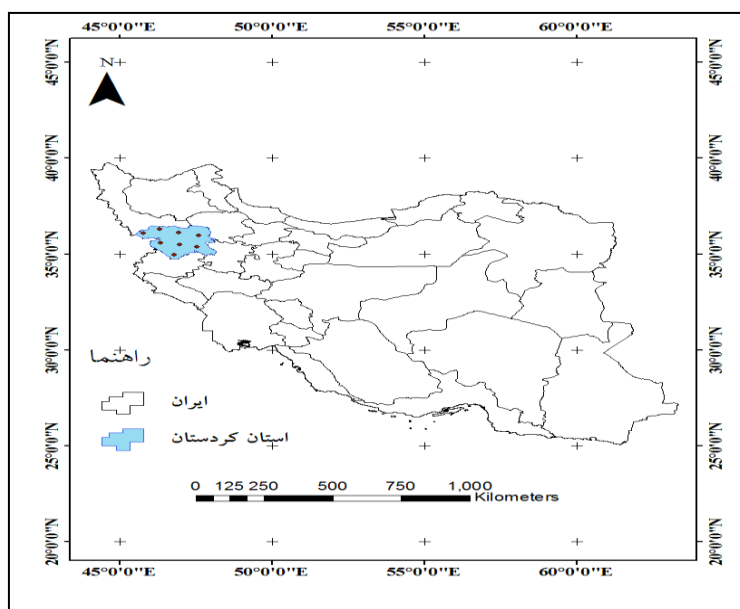
عبدی ویشکایه و همکاران (۲۰۱۱: ۱۱۶) با تحليل انتشار گرد و غبار و منشأ آن در تابستان ۲۰۰۷ بر روی شمال غرب ايران با استفاده از مدل HYSPLIT ثابت کردند که منابع گرد و غبار ايران در ماه اوت از سوریه، عراق و دریاچه نمک در نزدیکی دشت کویر ايران است. مفیدی و جعفری (۱۳۹۰: ۱۷) معتقدند که تراف موج بادهای غربی، سبب انتقال گرد و غبار به مناطق جنوب غرب ايران است. اشرفی و همکاران (۱۳۹۰: ۲۶) در بررسی مسير توفان‌های گرد و غبار بر فراز ايران از مدل HYSPLIT استفاده نمودند. محمدی حسین زاده و مرادیان (۱۳۹۴: ۳۵) از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای مودیس، پدیده گرد و غبار برای دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ در شهر مشهد را انجام دادند. محمدی و همکاران (۱۳۹۴: ۳۹) منابع ایجاد گرد و غبار در سطوح مختلف هوای تهران را با استفاده از مدل HYSPLIT ردیابی کردند. علی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۴) منابع اصلی توفان‌های گرد و غباری غرب و شمال‌غرب ايران را با بهره‌گیری از مدل لاگراژنی HYSPLIT و با استفاده از روش ردیابی پسگرد تعیین کردند. علیجانی و رئیس پور (۱۳۹۰)، قویدل رحیمی (۱۳۹۰)، اشرفی و همکاران (۱۳۹۲)، آروین و همکاران (۱۳۹۲)، مفیدی و همکاران (۱۳۹۲)، طاووسی و زهرایی (۱۳۹۲)، چان و همکاران (۲۰۰۱) و پروسپرو و همکاران (۲۰۰۲) نیز در مطالعات خود به شاخص‌های ناپایداری و تحليل توفان‌های گرد و غبار پرداختند.

گسترش وسیع مکانی پدیده گرد و غبار در سال‌های اخیر در بخش‌های غربی و شمالی ايران ضرورت انجام این تحقیق را دوچندان می‌کند. با انجام تجزیه و تحليل داده‌های آماری طولانی‌مدت پدیده گرد و غبار و شناسایی مناطق منشأ و مسيرهای ورودی آن و نیز پیش‌بینی زمان وقوع گرد و غبار می‌تواند اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای و ایجاد آمادگی برای مقابله با اثرات آن داشته باشد. استان کردستان در مسير ورود گرد و غبار از سمت بیابان‌های عراق و سوریه است و این منطقه از کشور در سال‌های اخیر با این پدیده اقلیمی دست‌به‌گریبان است و در این پژوهش سعی بر این است با شناخت مسير حرکت گرد و غبار به سندج، اطلاعات مفیدی در اختیار برنامه‌ریزان محیطی قرار بگیرد.

مواد و روش تحقیق

استان کردستان با اقلیم نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای در بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ با وسعت ۲۸۲۰۳ کیلومترمربع قرار دارد. این استان در غرب کشور ايران و در بین استان‌های آذربایجان غربی، زنجان، همدان و کرمانشاه قرار دارد و از غرب با کشور عراق هم‌مرز می‌باشد (شکل ۱). سندج در ۴۷ درجه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۱۳۷۳/۴ متر از سطح دریا مرکز سیاسی- اداری استان کردستان است (حنفی و حاتمی، ۱۳۹۲: ۲۴). در این پژوهش، به منظور بررسی توفان‌های گرد و غبار در ایستگاه سندج، ابتدا کدهای هواشناسی مربوط به گرد و غبار (کدهای ۰۶، ۰۷، ۰۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۳۵) در بازه زمانی ۲۴ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۰) از داده‌های سه ساعته سازمان هواشناسی کشور استخراج و در صفحه گسترده اکسل ذخیره شد و در ادامه وقوع توفان‌های گرد و غبار به صورت روند سری زمانی سالانه، میانگین فصلی و ماهانه بررسی شد. پس از بررسی‌های آماری، یک رخداد توفان

گرد و غبار از بین توفان‌ها انتخاب و به صورت دینامیک-همدیدی بررسی و با استفاده از مدل HYSPLIT ذرات غبار در اتمسفر ردیابی شد. روز گرد و غباری مورد بررسی به مدت ۹ روز متوالی از ۳ ژوئیه تا ۱۱ ژوئیه ۲۰۰۹ در جو منطقه حاکم بود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی استان کردستان (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)

به منظور بررسی دینامیکی توفان‌های گرد و غبار ایستگاه سنندج، از نمودار اسکیتوی و شاخص‌های ناپایداری دینامیکی از قبیل شاخص شولتر، شاخص ویتینگ، شاخص بالاروی، خط تراکم بالارونده و شاخص مجموع مجموع‌ها استفاده شد. به منظور بررسی همدیدی توفان‌های گرد و غبار ایستگاه سنندج، از نقشه‌های جوی سطوح همفشاری و داده‌های روزانه بازتحلیل شده مرکز محیطی (NCEP^۱) استفاده شد. داده‌های روزانه فراسنج‌های اقلیمی مؤثر در رخداد این پدیده از قبیل شیو افقی فشار تبدیل شده به سطح دریا، میدان ژئوپتانسیل تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، سرعت قائم هوا (امگا)، بردار حرکتی باد و نم و ویژه از پایگاه داده‌های NCEP/ NCAR استخراج و نقشه‌ها در محیط پردازشی GRADS^۲ ترسیم شدند.

در این پژوهش، از مدل HYSPLIT برای ردیابی ذرات معلق گرد و غبار اتمسفری استفاده شد. این مدل، مدلی دوگانه برای محاسبات خط سیر حرکت گرد و غبار است^۳ (دراکسلر و همکاران، ۲۰۰۹: ۱). در این مدل با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی در محاسبه مسیر و غلظت آلاینده بهره گرفته می‌شود (اسکودرو و همکاران، ۲۰۰۶). روش محاسبه مدل، ترکیبی میان دیدگاه‌های اوپلری و لاگرانژی است^۴ و به همین دلیل HYSPLIT را مدلی دوگانه می‌نامند (شان و همکاران، ۲۰۰۹: ۷۶۷).

1 - National Center for Environmental Prediction

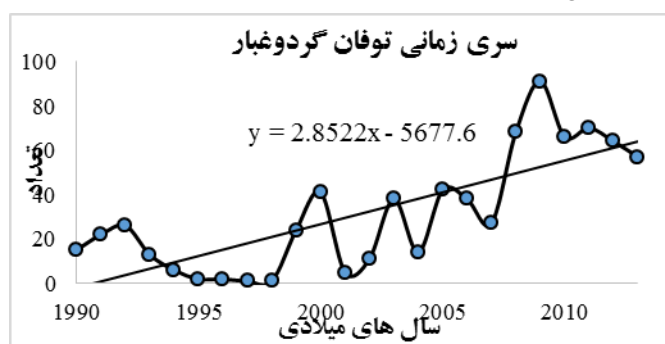
2 - Grid Analysis and Display System

3 - <http://climatology.ir/?p=11379>

4 - <http://iaca.mihanblog.com/post/1994>

یافته‌های تحقیق

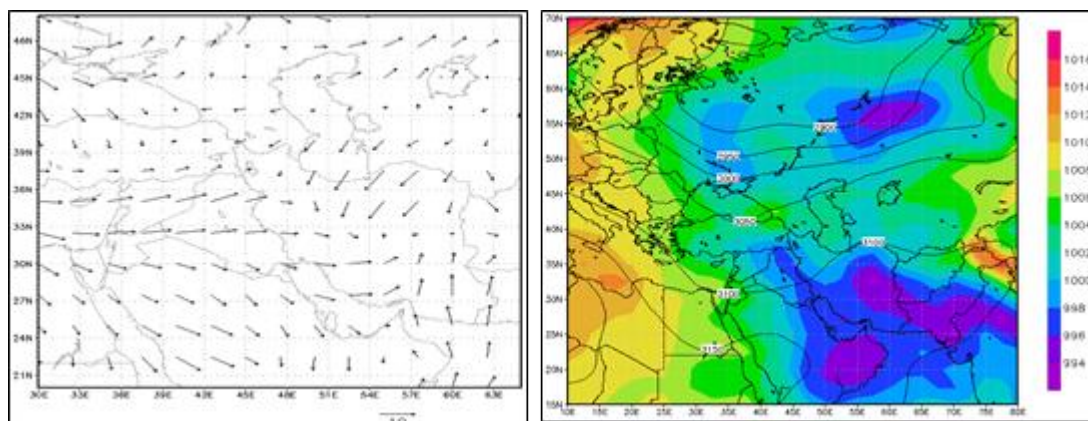
نتایج حاصل از بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که در طول بازه زمانی ۲۴ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۰)، ۷۴۴ روز در ایستگاه سنندج توفان گرد و غبار رخ داده و سیر صعودی داشته است، به طوری که سال به سال بر وقوع این توفان‌ها افزوده شده و تا سال ۲۰۰۰ سال‌هایی مشاهده شد که گرد و غبار حتی یکبار هم اتفاق نیفتاده بود، اما از سال ۲۰۰۰ به بعد در هر سال رخداد توفان‌ها مشاهده شد و کم‌ترین آن در سال ۲۰۰۱ بود که ۵ بار توفان اتفاق افتاد و بیش‌ترین آن در سال ۲۰۰۹ که ۹۱ روز توفان گرد و غبار در ایستگاه سنندج گزارش شد (شکل ۲). بر اساس داده‌های هواشناسی سه ساعته ایستگاه سنندج در طول دوره آماری ۲۴ ساله، ۷۰۰۸۰ بار داده‌های هواشناسی گزارش شده که از این تعداد، ۲۷۸۵ بار آن کدهای مربوط به گرد و غبار بود و بیش‌ترین کد هواشناسی مربوط به گرد و غبار در سال ۲۰۰۹ بوده که ۴۴۸ بار کد هواشناسی گرد و غبار گزارش شد.



شکل ۲: روند و سری زمانی توفان‌های گرد و غبار سنندج در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۳ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)

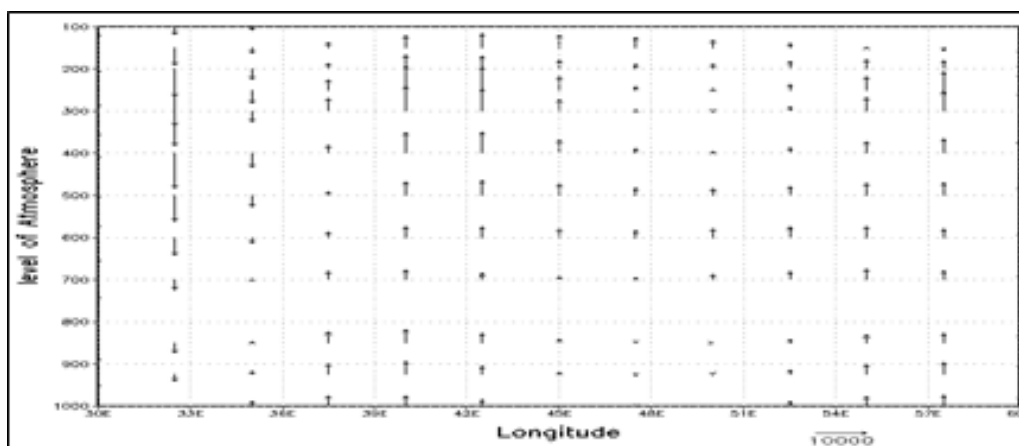
در تابستان سال ۲۰۰۸ میلادی (۱۳۸۷ خورشیدی)، توفان گرد و غبار با دوام ۱۲ روزه در اواخر ماه می (اردیبهشت-ماه) و اوایل ماه ژوئن (خردادماه) در غرب ایران اتفاق افتاد (۲۴ می تا ۰۴ ژوئن) که اتمسفر تمام استان‌های غربی ایران را آلوده کرد. در این مطالعه، شرایط اتمسفری دخیل در این رخداد که اتمسفر ایستگاه سنندج را فرا گرفته بود، بررسی شد. در ماه ژوئیه سال ۲۰۰۹ توفان گرد و غبار در ایستگاه سنندج در روزهای بین ۳ تا ۱۱ ژوئیه گزارش شد که ذرات غبار به مدت ۹ روز در اتمسفر استان کردستان معلق بود. در شکل ۳، نقشه تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل متر به صورت کنتور و فشار سطح دریا به صورت رنگی برای روز ۵ ژوئیه ۲۰۰۹ نشان داده شده است. با توجه به گرمایش اتمسفر نیمکره شمالی در فصل تابستان، پرفشار جنب حاره آזור به سمت عرض‌های بالاتر جغرافیایی حرکت کرده و در این روز از سال حتی به عرض ۴۵ درجه شمالی نیز رسیده و جنوب ایتالیا و خاورمیانه را تحت تأثیر قرار داده است. منحنی تراز ۳۱۰۰ دکامتر کل ایران را در بر گرفته است و ارتفاع بیشتر تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل متر در ایران نشان از پایداری اتمسفر در ایران دارد. موج بادهای غربی با پیشروی پرفشار آזור به سمت عرض‌های بالاتر عقب‌نشینی کرده و در عرض‌های بالاتر از ۴۵ درجه شمالی و در غرب و مرکز روسیه موجب تشکیل ناوه کم-ارتفاعی شده است. توپوگرافی منحنی‌های تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل متر اتمسفر سطوح زیرین خود را تحت تأثیر قرار داده؛ به طوریکه پرفشار آזור در شمال آفریقا و دریای مدیترانه منجر به تشکیل پرفشار فشار دینامیکی قوی با مرکزیت ۱۰۱۴ میلی بار در دریای مدیترانه شده است؛ اما ورود زبان‌های پرفشار آזור به ایران اتمسفر سطوح بالایی را پایدار کرده و هیچ‌گونه حرکات عمودی در جو مشاهده نمی‌شود. با این وجود به دلیل گرمایش سطوح زیرین

جو، در سطح زمین کم‌فشار حرارتی قوی با مرکزیت ۹۹۴ میلی بار در ایران تشکیل شده است. در عرض‌های بالاتر، استقرار ناوه در روسیه موجب تشکیل پرفشار دینامیکی در عقب ناوه و کم‌فشار دینامیکی در جلوی ناوه شده است. شرایط فشار در سطح زمین به گونه‌ای شده که در طول جغرافیایی بین ۱۰ تا ۴۰ درجه شرقی، پرفشار دینامیکی آזור در عرض‌های پایین و پرفشار دینامیکی شمال اروپا در عرض‌های بالاتر تداخل یافته و موجب واگرایی و خروج شدید بادها از این مراکز پرفشار به سمت شرق شده است؛ اما از طول جغرافیایی ۴۰ تا ۸۰ درجه شرقی، کم‌فشار حرارتی ایران مرکزی با کم‌فشار دینامیکی روسیه تداخل یافته و منجر به همگرایی و ورود بادها از اطراف به این مراکز شده است. در خاورمیانه، هر چه به سمت شرق و ایران حرکت کنیم از مقدار فشار هوا کاسته شده تا به ایران مرکزی برسد که کمترین فشار را در منطقه دارد و این شرایط موجب حرکت بادها از پرفشار دینامیکی شمال آفریقا و دریای مدیترانه به سمت ایران شده است. شکل (۳) نقشه حرکت بادها در تراز ۱۰۰۰ ژئوپتانسیل‌متر را نشان می‌دهد و در نقشه نیز جهت بادها به گونه‌ای است که بادها با شدت زیاد با خروج از دریای مدیترانه و آفریقا از بیابان‌های اردن، سوریه و عراق عبور کرده و وارد ایران شده‌اند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که در یک ماه اخیر هیچ‌گونه بارشی در منطقه رخ نداده و سطوح بیابان‌های مذکور خشک و عاری از هرگونه رطوبت سطحی می‌باشد و این شرایط منجر به انفصال ذرات خاک سطحی این بیابان‌ها شده است. عبور بادهای قوی از روی این بیابان‌ها، ذرات خاکی سطحی را برداشته و با خود به مسافت‌های طولانی حمل کرده است و مسیر ورود این ذرات غبار معلق در بادهای قوی، غرب ایران است و استان‌های کردستان، کرمانشاه، ایلام و خوزستان اولین مناطقی هستند که تحت تأثیر توفان گرد و غبار قرار گرفته‌اند. شکل (۴) جریان بالاسو و پایین‌سو بادها را برای عرض جغرافیایی ثابت ۳۵ درجه شمالی نشان می‌دهد و در نقشه پیکان‌های باد نوع حرکات عمودی باد را در ارتفاعات مختلف جو نشان می‌دهد. در طول جغرافیایی ۳۰ تا ۳۶ درجه شرقی به دلیل وجود پرفشار آזור حرکات پایین‌سو و نزولی باد دیده می‌شود اما از عرض ۳۶ تا ۸۰ درجه شرقی به دلیل استقرار سامانه کم‌فشار حرارتی ایران مرکزی، بادها حرکات بالاسو و صعودی دارد. عبور بادهای قوی از روی بیابان‌های سوریه و عراق، خاک سطحی را حمل کرده و به سمت ایران حرکت کرده و با توجه به حالت همگرایی جو در ایران، ذرات غبار معلق در جو به سطوح بالاتر اتمسفر در غرب ایران انتقال یافته است.



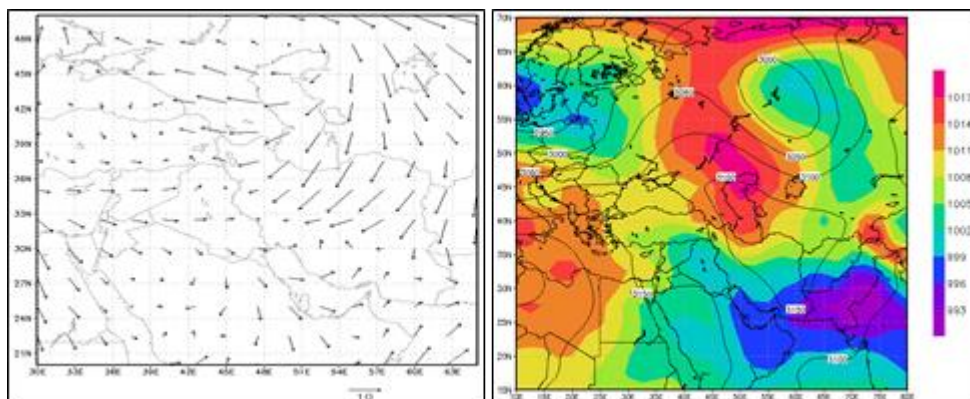
شکل ۳) تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل‌متر (کنتور) و فشار سطح زمین (رنگی) روز ۵ ژوئای ۲۰۰۹ و وزش باد تراز ۱۰۰۰ ژئوپتانسیل‌متر روز ۵ ژوئای ۲۰۰۹ (منبع:

نویسندگان، ۱۳۹۶)

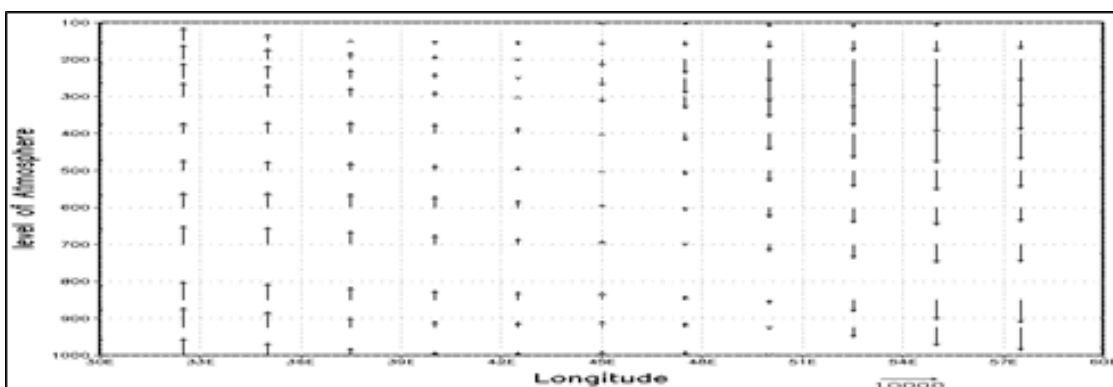


شکل ۴) حرکات بالاسو و پایین سو باد برای عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمال (ایستگاه سنندج) در روز ۵ ژوئای ۲۰۰۹ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)

سه روز بعد در تاریخ ۸ ژوئای ۲۰۰۹ که همچنان ذرات گرد و غبار در اتمسفر غرب ایران معلق بود، در تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل متر (شکل ۵) پرفشار آזור قوی تر شده و تا عرض جغرافیایی ۵۰ درجه شمالی نیز امتداد یافته است و بادهای غربی به عرض های بالاتر پسروی کرده است. به طور کلی، بر ارتفاع ترازهای میانی جو افزوده شده و در ایران منحنی ۳۱۰۰ دکامتر سه روز پیش به عرض های بالاتر حرکت کرد و جای خود را به ارتفاع ۳۱۵۰ دکامتر داد و این منحنی در ایران بسته شده و به پشته تبدیل است. در عرض های بالاتر در ناوه سه روز قبل منحنی ۳۰۰۰ دکامتری بسته شده و به صورت بریده کم فشار درآمده است. ناوه کم فشار دیگری در شمال اروپا تشکیل شده است. این شرایط فشار در تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل متر اتمسفر سطوح زیرین را متأثر ساخته و پرفشار دینامیکی سطح زمین در شمال آفریقا و دریای مدیترانه قوی تر شده و فشار مرکزی آن به ۱۰۱۷ میلی بار رسیده است و این موجب عقب نشینی کم فشار حرارتی ایران مرکزی به سمت پاکستان شده است. کم فشار دینامیکی روسیه به سمت شرق حرکت کرده و جای خود را به پرفشار دینامیکی داده است که در عقب سردچال (بریده کم فشار) قرار دارد. زبانه های پرفشار مدیترانه و شمال آفریقا با زبانه های پرفشار دینامیکی روسیه در دریای سیاه و ترکیه به هم متصل شده و منجر به واگرایی شدید بادها در این مراکز پرفشار شده است. گرادیان شدید فشار در ایران و کشور عراق موجب تشدید بادهای سطحی در منطقه شده است و بادها با خروج از مرکز پرفشار آفریقا و دریای مدیترانه به سمت شرق حرکت کرده و با عبور از بیابان های سوریه و شمال عراق، ذرات خاک سطحی را حمل کرده و به صورت توفان گرد و غبار در غرب ایران مشاهده شد. در پرفشار روسیه که تا شمال دریای خزر نیز امتداد یافته است، بادها با عبور از دریای خزر و رشته کوه البرز با مسیر شمال شرقی - جنوب غربی به سمت غرب ایران حرکت کرده است و گرادیان شدید فشار و باد را در غرب ایران باعث شده است (شکل ۵). شکل ۶، بادهای بالاسو و پایین سو برای عرض جغرافیایی ثابت ۳۵ درجه را نشان می دهد، از طول ۳۰ تا ۴۵ درجه شرقی به دلیل وجود شرایط کم فشار در عراق، حرکات عمودی باد به صورت بالاسو یا صعودی است، اما در عرض های شرقی به دلیل نفوذ زبانه پرفشار دریای خزر و روسیه حرکات عمودی باد از نوع پایین سو یا نزولی است. در ایستگاه سنندج جریان بادها به صورت بالاسو بوده و بادهای حامل ذرات غبار به ارتفاعات بالاتر جو صعود کرده اند.

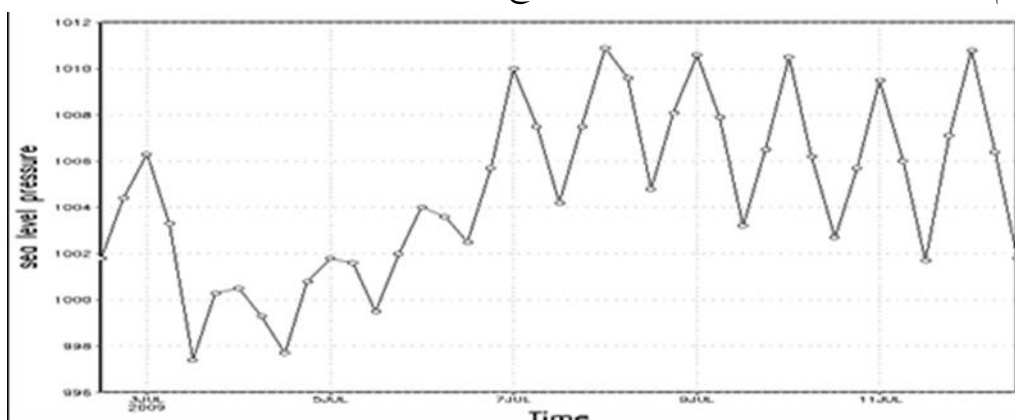


شکل ۵) تراز ۷۰۰ ژئوپتانسیل متر (کتور) و فشار سطح زمین (رنگی) روز ۸ ژوئای ۲۰۰۹ و وزش باد تراز ۱۰۰۰ ژئوپتانسیل متر روز ۸ ژوئای ۲۰۰۹ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)



شکل ۶) حرکات بالاسو و پایین‌سو باد برای عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمال (ایستگاه سنندج) در روز ۸ ژوئای ۲۰۰۹ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)

مقدار فشار سطح زمین در ایستگاه سنندج در طی دوره ۹ روزه تغییراتی را داشته است و شکل (۷) نشان می‌دهد در روزهای آغازین توفان گرد و غبار به دلیل وجود کم‌فشار حرارتی ایران مرکزی و نفوذ زبان‌های آن به مناطق اطراف، فشار در ایستگاه سنندج تا ۱۰۰۴ رسید اما از ۷ تا ۱۱ ژوئای به دلیل نفوذ زبان‌های پرفشار دینامیکی شمال آفریقا و دریای مدیترانه به سمت ایران و عراق، بر مقدار فشار هوای این مناطق افزوده شده و در ایستگاه سنندج حتی فشار هوا به ۱۰۱۱ میلی بار نیز رسید. این تغییرات فشار در طول ۹ روز دلیل بر افزایش شدت باد در منطقه بوده که با توجه به عدم بارش و نقصان رطوبت سطحی، موجب وقوع توفان گرد و غبار در منطقه شده است.



شکل ۷) میزان فشار سطح زمین ایستگاه سنندج در طی روزهای وقوع گرد و غبار ۳ تا ۱۱ ژوئای ۲۰۰۹ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)

شاخص‌های ناپایداری که از نمودار اسکیوتی ایستگاه کرمانشاه محاسبه شد، ترمودینامیک جو را در طول این ۹ روز نشان می‌دهد (جدول ۱). شاخص شوالتر در این دوره ۱۰ روزه همیشه بیشتر از ۵ درجه بوده و نشان می‌دهد ناپایداری شدید همراه با توفان رعدوبرق در اتمسفر رخ نداده است. شاخص بالاروی به همراه شاخص ویتینگ و مجموع بالاروی‌ها نیز مؤید پایداری در اتمسفر غرب ایران است که دلیل این پایداری جو سطوح میانی جو پرفشار دینامیکی آزر است. به دلیل کمبود آب قابل بارش جو در طول این ۱۰ روز و تفاوت دمای شب‌ها با دمای بسته هوا، هیچ‌گونه بارش یا توفان تندری در غرب ایران اتفاق نیفتاد و این ناپایداری هوا با توجه به خشکی هوا و همچنین ذرات معلق در هوای ورودی از سمت غرب به ایران منجر به توفان گرد و غبار در ایستگاه‌های غرب ایران به خصوص در ایستگاه سنندج شد. تراز تراکم هوای بالارونده نیز در طول این دوره ۱۰ روزه در ارتفاعات بین ۴۵۰ تا ۶۰۰ ژئوپتانسیل متر قرار داشته است. شاخص‌های ترمودینامیکی شرایط پایداری اتمسفر در کرمانشاه را نشان می‌دهند که دلیل اصلی آن پرفشار دینامیکی آزر بوده است.

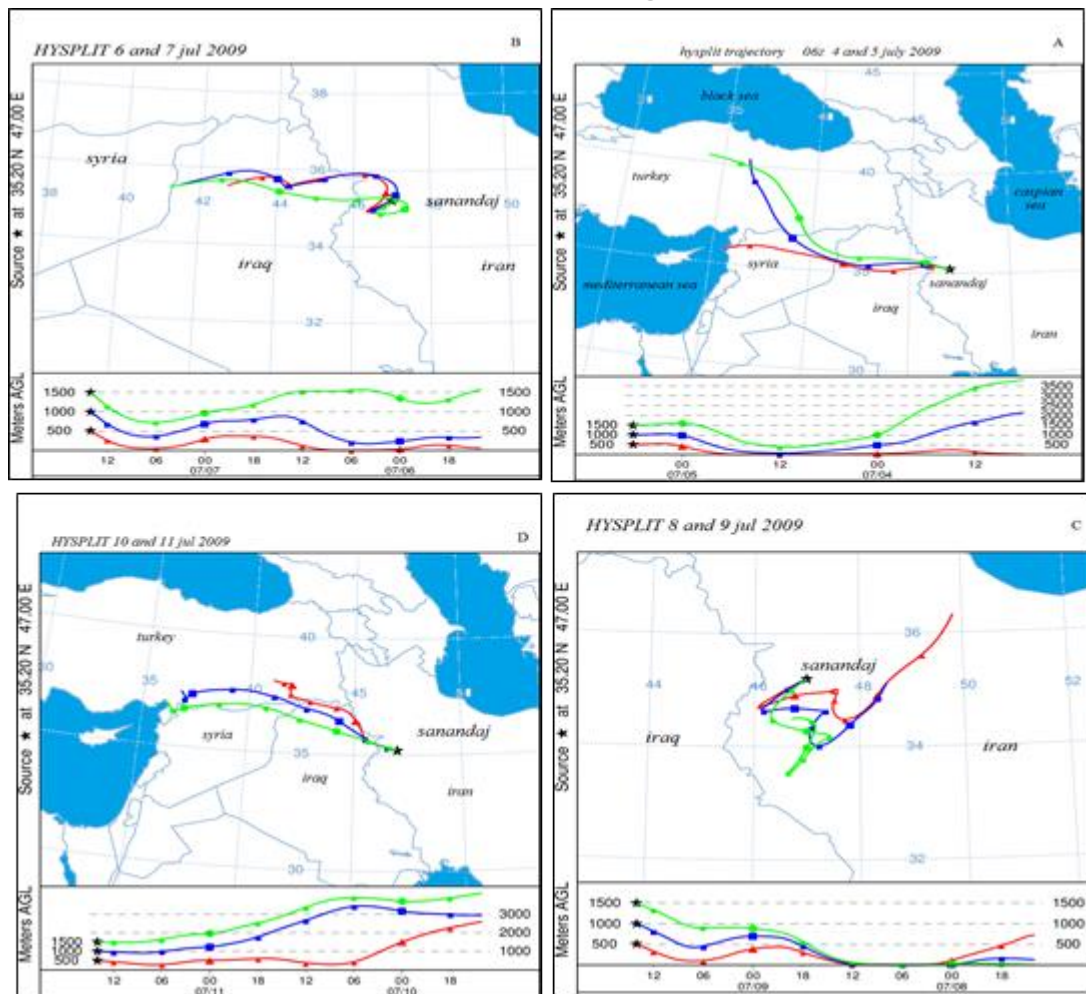
جدول ۱) شاخص‌های ناپایداری در روزهای وقوع گرد و غبار در سنندج (۲۰۰۹/۰۷/۱۱ - ۲۰۰۹/۰۷/۰۳)

روز وقوع	SI	LI	K	TTI	PR	LCL
۳ ژوئای ۲۰۰۹	۱۵/۱	۱۵/۷	-۱۶	۲۴	۵	۵۱۳
۴ ژوئای ۲۰۰۹	۵/۱	۱۰/۷	۲/۵	۲۶	۸/۴	۴۸۵
۵ ژوئای ۲۰۰۹	۹/۳	۸/۸	۱۲/۵	۳۱	۱۱/۶	۵۳۵
۶ ژوئای ۲۰۰۹	۷/۵	۶/۸	۹/۵	۳۴	۸/۹	۵۱۸
۷ ژوئای ۲۰۰۹	۶	۵/۳	۱۳/۵	۳۷	۹/۹	۵۱۳
۸ ژوئای ۲۰۰۹	۱۰/۲	۹	-۸	۲۳	۴/۹	۴۱۷
۹ ژوئای ۲۰۰۹	۶/۲	۵/۶	۱۱/۳	۳۷	۹/۵	۴۹۰
۱۰ ژوئای ۲۰۰۹	۶/۶	۵/۸	۱۱/۷	۳۶	۱۰/۲	۴۹۷
۱۱ ژوئای ۲۰۰۹	۵/۴	۵/۳	۱۱/۷	۳۹	۱۱/۴	۵۹۰

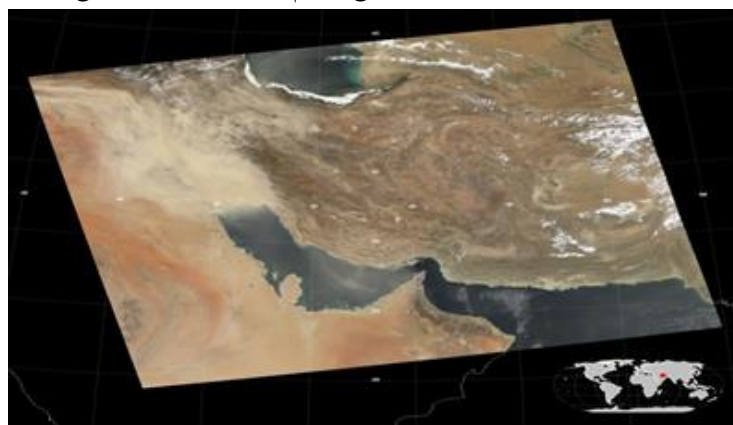
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۶

شکل (۸) مسیر ورود ذرات غبار به ایستگاه سنندج در طی روزهای رخداد گرد و غبار نشان می‌دهد. در روز ۴ و ۵ ژوئای، ذرات غبار در ارتفاع ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری در سنندج، ابتدا در سوریه در ارتفاع ۲۰۰۰ متری بوده اما با عبور از روی بیابان عراق به سطح زمین نزدیک شده و با تغلیظ ذرات غبار در ارتفاع ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری وارد سنندج شده است. حتی ذرات غباری که در ارتفاع ۱۵۰۰ متری در سنندج دیده می‌شود، در بیابان عراق در ارتفاع ۵۰۰ قرار داشته و در ادامه مسیر که به سمت سنندج آمده، مقدار ذرات بیشتری دریافت شده و به ارتفاعات بالاتر ایستگاه سنندج رسیده است. در روز ۶ و ۷ ژوئای ذرات غبار از شمال عراق عبور کرده و از سمت شمال وارد ایستگاه سنندج شده است؛ در این روزها ذرات غبار از بیابان شمال عراق وارد بادهای توفانی شده و به سمت ایران انتقال یافته است و بیابان سوریه نقشی در آن نداشته است. ذرات غبار ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری همه از بیابان شمال عراق حمل شده و وارد ایستگاه سنندج شده است؛ اما در روزهای ۸ و ۹ ژوئای ذرات غبار منشأ داخلی داشته و از کرمانشاه وارد سنندج شده است. همانطور که در مسیر ذرات غبار نمایان است، در روز ۸ ژوئای ذرات غبار از سطح زمین کرمانشاه وارد بادهای توفانی شده و به سمت سنندج انتقال یافته است و بیابان عراق نقشی در آن نداشته است. در نهایت، در روزهای ۱۰ و ۱۱ ژوئای، کانون ذرات غبار در ایستگاه سنندج منشأ خارجی داشته و از سمت شمال

عراق و شرق سوریه وارد ایران شده است. تصویر ماهواره‌ای (شکل ۹) نیز مسیر شمال‌غربی-جنوب‌غربی ذرات غبار را از سمت شمال عراق نشان می‌دهد که وارد سندج شده است.



شکل ۸ (A,B,C,D,E نقشه مسیر ذرات گرد و غبار در سندج (ترسیم با مدل HYSPLIT) (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)



شکل ۹ (تصویر ماهواره‌ای MODIS روز ۸ ژوئیه ۲۰۰۹ (منبع: نویسندگان، ۱۳۹۶)

نتیجه‌گیری

رخدادهای گرد و غبار در ایستگاه سندج سیر صعودی دارد و هرساله بر تعداد رخدادهای این توفان‌ها افزوده می‌شود که عوامل مختلفی در این سیر صعودی دخیل هستند که می‌توان این دلایل را در گرمایش جهانی خلاصه کرد. در طول

سال با نزدیک شدن به فصل‌های گرم سال، توفان‌های گرد و غبار نیز افزایش می‌یابد و در ایستگاه سنندج توفان‌ها در بهار و تابستان به حداکثر خود می‌رسند، ولی در نیمه سرد سال از رخداد این توفان‌ها کاسته می‌شود. اردیبهشت، خرداد و تیرماه که اوج گرما در ایران و خصوصاً ایستگاه سنندج می‌باشد، رخداد گرد و غبار نیز به حداکثر خود می‌رسد که دلیل آن گرمای بیش‌ازحد و از دست دادن رطوبت خاک سطحی و وزش بادهای گرم و خشک و عبور آن‌ها از روی بیابان عراق و سوریه می‌باشد. به منظور واکاوی علت رخداد توفان گرد و غبار در ایستگاه سنندج از علوم ترمودینامیک، هم‌دید و مدل‌های دینامیکی استفاده شد و نتایج آن به خوبی شرایط اتمسفری و مسیر ذرات غبار در ایستگاه سنندج را نشان داد. رخداد توفان گرد و غبار که در این پژوهش بررسی شد ماندگاری هرکدام ۱۰ روز داشت. مدل خروجی HYSPLIT ذرات گرد و غبار در سنندج را ردیابی کرده و نشان داد که ذرات غبار در سنندج از سمت سوریه و شمال عراق بوده است. توفان گرد و غبار در ژولای ۲۰۰۹ واکاوی شد و نتایج این بررسی نشان داد که با عمود شدن زاویه خورشید، اتمسفر عرض‌های پایین گرم شده که موجب بالارفتن ترازهای میانی جو شده و در ایران منحنی ۳۱۵۰ ژئوپتانسیل متر بسته شده و پشته تشکیل شد. در غرب و شمال اروپا نیز بالارفتن تراز میانی جو باعث تشکیل پشته شد و در بین این دو پشته، ناوهای در مدیترانه تشکیل شد که حاصل ریزش هوای سرد از پشته اروپا بود. این شرایط باعث خشکی پرفشار دینامیکی دریای سیاه و کم‌فشار حرارتی در ایران شد که ریزش هوای سرد از سمت دریای سیاه به علت گرادیان شدید فشار به سمت ایران، بادها با عبور از بیابان شمال عراق و سوریه، باعث رخداد توفان گرد و غبار در ایستگاه سنندج شد. پس می‌توان نتیجه گرفت توفان گرد و غباری که در ایستگاه سنندج گزارش می‌شود، به‌علت کم‌فشار حرارتی ایران و پرفشار دینامیکی اروپاست که با عبور از بیابان‌های عراق و سوریه باعث توفان در سنندج می‌شود و بیابان عربستان هیچ نقشی در رخداد گرد و غبار ایستگاه سنندج ندارد نتایج این پژوهش با نتایج کارهای برومندی^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، لی یو^۲ و همکاران (۲۰۰۴)، الجومایلی و ابراهیم^۳ (۲۰۱۳)، فرانسیس^۴ و همکاران (۲۰۱۷)، سیساکیان^۵ و همکاران (۲۰۱۳)، محمدی و همکاران (۱۳۹۴)، ریوندی و همکاران (۱۳۹۲) و مفیدی و جعفری (۱۳۹۰) که ورود توده‌های عظیم گرد و غبار از سمت شرق سوریه و بیابان‌های مرکزی عراق و رسوبات آبرفتی دجله و فرات را از یک طرف و از طرف دیگر استقرار سیستم پرفشار دریای سیاه و کم‌فشار حرارتی ایران را دلیل عمده وقوع پدیده گرد و غبار در غرب و جنوب غرب ایران می‌دانند همخوانی دارد.

منابع

اشرفی، خسرو؛ شفیعی‌پور مطلق، م؛ اصلمند، علیرضا (۱۳۹۰). بررسی مسیرهای توفان‌های گرد و غبار بر روی ایران با به‌کارگیری مدل-سازی عددی و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: ژوئن ۲۰۱۰). اولین کنگره بین‌المللی پدیده گرد و غبار و مقابله با آثار زیان‌بار آن.

۲۶-۲۸.

-
- 1 - Broomandi
 - 2 - Liu
 - 3 - Al-Jumaily and Ibrahim
 - 4 - Francis
 - 5 - Sissakian

- اشرفی، خسرو؛ شفیعی‌پور مطلق، مجید؛ اصلمند، علیرضا (۱۳۹۲). بررسی مسیرهای توفان‌های گرد و غبار بر روی ایران با به‌کارگیری مدل‌سازی عددی و تصاویر ماهواره‌ای. فصلنامه علمی محیط‌زیست. ش ۵۶: ۱۲-۳.
- آروین، عباسعلی؛ چراغی، صدیقه؛ چراغی، شهرام (۱۳۹۲). بررسی اثر گرد و غبار بر روند کمی و کیفی رشد نیشکر. نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۳: ۱۰۶-۹۵.
- حنفی، علی؛ حاتمی، ایرج (۱۳۹۲). تهیه نقشه اقلیمی استان کردستان با سیستم اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه سپهر، ش ۸۷: ۲۸-۲۴.
- ریوندی، ا.، میررکنی، م.، و محمدی‌ها، ا. (۱۳۹۲). بررسی تشکیل و انتشار طوفان‌های گردوغبار ورودی به غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از مدل پخش لاگراژی ذرات HYSPLI. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۴(۱۳-۱۴)، ۱-۱۶.
- طاووسی، تقی؛ زهرایی، اکبر (۱۳۹۲). مدل‌سازی سری‌های زمانی پدیده گرد و غبار شهر اهواز. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ش ۲: ۱۷۰-۱۵۹.
- طوفان، مسعود (۱۳۸۹). چالش‌ها و چشم‌انداز همکاری‌های منطقه‌ای در مهار ریزگردها. فصلنامه سیاست خارجی، ش ۴: ۹۵۸-۹۴۳.
- عزیزی، قاسم؛ میری، مرتضی؛ نبوی، سید امید (۱۳۹۱). ردیابی پدیده گرد و غبار در نیمه غربی ایران. فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ش ۷: ۱۱۸-۱۰۳.
- علی‌آبادی، کاظم، اسدی زنگنه، محمدعلی، داداشی رودباری، عباسعلی (۱۳۹۴). ارزیابی و پایش توفان گرد و غبار با استفاده از روش‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: غرب و جنوب غرب ایران)، امداد و نجات ۱: ۲۰-۱.
- علیجانی، بهلول (۱۳۷۶). آب و هوای ایران. چاپ سوم. انتشارات دانشگاه پیام نور تهران.
- علیجانی، بهلول؛ رئیس‌پور، کوهزاد (۱۳۹۰). تحلیل آماری، هم‌مدیدی طوفان‌های گرد و خاک در جنوب شرق ایران (مطالعه موردی: منطقه سیستان). نشریه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال دوم، شماره پنجم، ۱۳۲-۱۰۷.
- کویدل رحیمی، یوسف (۱۳۹۰). کاربرد شاخص‌های ناپایداری جوی برای آشکارسازی و تحلیل دینامیک توفان تندری روز ۵ اردیبهشت ۱۳۸۹ تبریز. فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی اهر، ش ۳۴: ۲۰۸-۱۸۲.
- لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم (۱۳۸۷). تحلیل آماری سینوپتیکی توفان‌های گرد و غبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی (۲۰۰۵-۱۹۹۳). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۳۳-۱۷: ۶۵.
- محمدی مرادیان، جمیله؛ حسین‌زاده، سیدرضا (۱۳۹۴). پایش ماهواره‌ای و تحلیل هم‌مدید پدیده گرد و غبار در کلان‌شهر مشهد طی دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۰۹. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ش ۱۴: ۵۷-۳۵.
- محمدی، فهیمه؛ کمالی، سمیه؛ اسکندری، مریم (۱۳۹۴). ردیابی منابع گرد و غبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ش ۱۶: ۵۴-۳۹.
- مفیدی، عباس؛ جعفری، سجاد (۱۳۹۰). بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع توفان‌های گرد و غباری تابستانه در جنوب غرب ایران. مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۵: ۴۵-۱۷.
- مفیدی، عباس؛ کمالی، سمیه (۱۳۹۱). بررسی و تحلیل ساختار توفان‌های گرد و غباری در دشت سیستان با استفاده از مدل اقلیمی مقیاس منطقه‌ای RegCM4؛ مطالعه موردی ۳۰ جولای ۲۰۰۱، اولین همایش ملی بیابان، تهران، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان دانشگاه تهران، تهران.
- مفیدی، عباس؛ کمالی، سمیه؛ زرین، آذر (۱۳۹۲). ارزیابی توان مدل RegCM4 پیوند خورده با طرح‌واره غبار در آشکارسازی ساختار توفان‌های گرد و غباری تابستانه در دشت سیستان. فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۳: ۶۹-۵۱.
- Abdi Vishkaee, F., Flamant, J., Cuesta, P., Flamant, Kholesifard, H.R. (2011). Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime. Journal of Geophysical Research. 116, 1-13.*
- Al-Jumaily, K.J. and Ibrahim, M.K., 2013. Analysis of synoptic situation for dust storms in Iraq. Int. J. Energ. Environ5, pp.851-858.*

- Broomandi, P., Dabir, B., Bonakdarpour, B. and Rashidi, Y., 2017. Identification of dust storm origin in South–West of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 1,16.
- Chun, Y.S., Boo, K.O., Kim, J., Park, S., Lee, M., (2001). Synopsis, Transport and Physical Characteristics of Asian Dust in Korea. *Journal of Geophysical Research*,. 106,.18461-18469.
- Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., & Taylor, A. (2009). *HYSPLIT4 user's guide*, 4, 1-231.
- Engelstadler, S. (2001). *Dust storm frequencies and their relationships to land surface conditions*. Freidrich-Schiller university press, Jena.Germany. 26.
- Escudero, M., Stein, A., Draxler, R.R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S., & Avila, A. (2006). Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. *Journal of Geophysical Research*. 111.
- Francis, D.B.K., Flamant, C., Chaboureaud, J.P., Banks, J., Cuesta, J., Brindley, H. and Oolman, L., 2017. Dust emission and transport over Iraq associated with the summer Shamal winds. *Aeolian Research* 24, 15-31.
- Goudie, A., Mideleton, NJ. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer, Heidelberg. 1-90.
- Liu, X., Yin, Z.Y., Zhang, X. and Yang, X., 2004. Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D16).
- Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., & Gill, T. E. (2002). Environmental Characterization of Global Sources of Atmospheric Soil Dust Identified with the NIMBUS7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Absorbing Aerosol Product. *Journal of American Geophysical Union*. 40, 2-31.
- Shan, W., Yin, Y., Lu, H., & Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*. 93, 767–776.
- Sissakian, V., Al-Ansari, N. and Knutsson, S., 2013. Sand and dust storm events in Iraq. *Journal of Natural Science* 10, 1084-1094.
- Wang, W. (2005). *A synoptic model on East Asian dust emission and Transport*. Atmospheric science and air quality conference, Beijing. China.
- Weihong, Q., Lingshen, Q., Shaoyin, S. (2001). Variations of the Dust Storm in China and its Climatic Control, *Journal of Climate* 26, 2327-2339.