

تحلیل الگوهای همدید موثر بر رخداد توفان‌های گردوخاک استان کردستان

سمیرا قوامی^۱، شهرام کبودوندپور^۲، بختیار محمدی^۳، جمیل امان‌اللهی^{۴*}

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
- ۲- دکتری تخصصی، استادیار گروه محیط‌زیست، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
- ۳- دکتری تخصصی، استادیار گروه آب‌وهوا شناسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
- ۴- دکتری تخصصی، استادیار گروه محیط‌زیست، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۴

تاریخ وصول مقاله: ۹۲/۶/۳۰

چکیده

توفان‌های گردوخاک از جمله مخاطرات محیطی هستند که رخداد آنها بسیاری از فعالیت‌های انسانی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. به منظور شناخت بهتر شرایط ایجاد توفان‌ها این پژوهش با هدف بررسی علل همدید توفان‌های گردوخاک در استان کردستان انجام شد. در این تحقیق داده‌های روزانه ذرات معلق (PM_{10}) مربوط به ایستگاه شهر سنندج (مرکز استان کردستان)، داده‌های فشار تراز دریا (بر حسب هکتوپاسکال) و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب متر) طی دوره زمانی ۲۰۱۲-۲۰۰۹ مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های ذرات معلق در دو گروه روزهای غیرتوفانی (با غلظت ذرات معلق کمتر از ۲۰۰ میکروگرم در متر مکعب) و روزهای توفانی (با غلظت بالاتر از ۲۰۰ میکروگرم در متر مکعب) قرار داده شد. برای درک بهتر الگوهای همدید موثر بر رخداد توفان گردوخاک منطقه وسیعی از صفر تا ۶۵ درجه طول شرقی و صفر تا ۷۰ درجه عرض شمالی مورد بررسی قرار گرفت. برای شناسایی الگوهای اصلی فشار تراز دریا و همچنین الگوهای اصلی ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال از روش تحلیل خوشه‌ای^۲ به روش ادغام وارد^۳ استفاده شد. سپس نقشه‌های مربوط به هر الگو تهیه شد. بررسی نقشه‌های همدید روزهای توفانی نشان داد که سه الگوی فشار تراز دریا و همچنین سه الگوی ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در رخداد این رویدادها موثرند. به طور کلی وجود ناوه نسبتاً عمیق بر روی شرقی‌ترین بخش دریای مدیترانه، گسترش هوا از روی مناطق خشک (بیابان‌های لیبی، مصر، شمال عربستان و عراق) به سوی ایران و پیرارتفاع عربستان نقش مهمی در ایجاد توفان‌های گردوخاک مناطق جنوبی، جنوب غربی و غرب به‌ویژه شهر سنندج دارد. توفان‌های گردوخاکی که استان کردستان را در بر می‌گیرند عمدتاً در نیمه گرم سال رخ می‌دهند. این رویدادها از اواخر زمستان روند افزایشی پیدا می‌کنند و در تیرماه فراوانی و غلظت آنها به اوج می‌رسد.

واژگان کلیدی: توفان گردوخاک، ذرات معلق، PM_{10} ، الگوی گردشی، وزش

*.Email: j.amanollahi@uok.ac.ir

1- Cluster analysis

2- ward Linkage

مقدمه

2008; Sun et al, 2006; Shao and Dong, 2006 شاهسونی و همکاران، ۱۳۸۹). برخی از مطالعات، فراوانی توفان‌های گردو خاک و روند آن‌ها را در طول یک دوره بلندمدت بررسی نموده‌اند (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۶، مفیدی و کمالی، ۱۳۹۱، Orylosky et al, 2004; Youngsin and Lim, 2004) و یا به عبارت دیگر با دید آماری رخداد آنها مورد توجه قرار داده‌اند. اما در این میان مطالعات مربوط به محققان علوم جوی، سازوکار ایجاد این رویدادها را از نظر هم‌دید بررسی نموده‌اند. مطالعاتی نیز به ویژگی‌های فیزیوگرافی موثر بر رخداد آنها توجه کرده‌اند. انگلستادلر (Engelstadler, 2001) در ارتباط با پهنه‌بندی مکانی فراوانی وقوع گردو خاک‌های جهان بر نقش بستر خشک دریاچه‌ها و صحرای بزرگ آفریقا به عنوان تولیدکنندگان اصلی گردو خاک تأکید دارد. ناتساگدرج و همکاران (Natsagdorj et al, 2003) در بررسی توفان‌های گردو خاک کشور مغولستان به این نتیجه رسیدند که توفان‌های گردو خاک اغلب تحت تأثیر بیابان گبی ایجاد می‌شوند و دریاچه‌های غرب مغولستان بیش‌ترین فراوانی وقوع این توفان‌ها را در فصل بهار دارد. وانگ و فانگ (Wang and Fang, 2006) به بررسی انتشار گرد خاک از نظر آماری و هم‌دید در آسیای شرقی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سامانه‌های هم‌دید که به سمت مناطق بیابانی شمال آسیا می‌وزند، اگر در سطح زمین بادهایی با سرعت بیشتر از شش متر بر ثانیه ایجاد کنند، باعث گسترش توفان گردو خاک می‌شوند. بارکان و همکاران (Barkan et al, 2008) الگوهای هم‌دید موثر بر رخداد توفان‌های گردو خاک صحرای آفریقا را در ترازهای ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که توفان گردو خاک منطقه تحت تأثیر یک جریان چرخندی قوی شکل می‌گیرد. این جریان چرخندی همچنین باعث انتقال سرمای شدید و کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل در فصول بهار، تابستان و پاییز در مناطق اروپای غربی و شمال‌غربی

در سال‌های اخیر توفان‌های گردو خاک به عنوان یکی از پدیده‌های زیانبار محیطی بارها بخش‌های وسیعی از ایران را فراگرفته و بسیاری از فعالیت‌های انسانی در منطقه را تحت تأثیر خود قرار داده است (خوش‌کیش و همکاران، ۱۳۹۰، عزیز و همکاران، ۱۳۹۰). پدیده گردو خاک یکی از بلایای جوی- اقلیمی است که وقوع آن باعث وارد شدن خسارت- های زیست محیطی و بروز یا تشدید بیماری‌های تنفسی و قلبی، ترافیک هوایی و زمینی، گردشگری، کشاورزی و غیره می‌شود (رسولی و همکاران، ۱۳۸۹). مدارک مستندی وجود دارد که آئروسل‌های معدنی گردو خاک بر تشکیل ابر، خصوصیات ابر و میزان نزولات جوی تأثیر می‌گذارد و حتی منجر به کاهش اسیدتیه نزولات جوی می‌گردد (Ichoku et al, 2004). حجم فراوان ذرات حمل شده به ورسپهر، بیان انرژی را تحت تأثیر قرار داده و در پی آن شرایط آب‌وهوایی ناحیه نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Takemi and Seino, 2005) شدت توفان‌های گردو خاک با میزان ماندگاری، فراگیری مکانی و میزان کاهش دید تعیین می‌شود و بر حسب تداوم زمانی، به دو نوع توفان‌های گردو خاک کوتاه مدت (تا نیم ساعت) و طولانی مدت (چند ساعت و گاهی یک شبانه‌روز) تقسیم می‌شود (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷). تحقیقات دانشمندان بر روی رسوبات کف اقیانوس‌ها نشان می‌دهد که سابقه بروز توفان‌های گردو خاک به ۷۳ میلیون سال پیش (قبل از دوره کرتاسه زمین شناسی) در کره زمین برمی‌گردد (ندافی و همکاران، ۱۳۸۹)، اما تعداد و دامنه اثرات توفان‌های گردو خاک از سال ۲۰۰۰ میلادی به این طرف در اکثر نقاط قاره آسیا افزایش یافته است (Lim and Chun, 2006).

با توجه به نقش فراوان توفان گردو خاک در بخش‌های مختلف زندگی و فعالیت انسانی، مطالعات بسیاری بر روی این پدیده مخرب محیطی انجام شده است (Merrifield et al, 2013; Carnevale et al, 2012; Meloni et al,

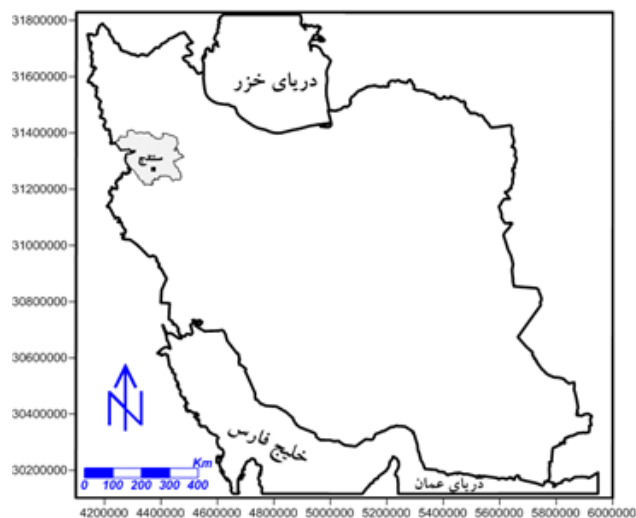
همدید گردوخاک در استان ایلام را برای دوره ۲۰ ساله انجام داده‌اند. طبق نتایج حاصله در ایستگاه ایلام در ماه می (اردیبهشت - خرداد) با ۶۳ روز در طول دوره آماری و در ماه دسامبر (آبان - آذر) با یک روز و در ایستگاه دهلران در ماه جولای (تیر - مرداد) با ۲۲ روز و در ماه دسامبر با ۷ روز در طول دوره آماری به ترتیب بیشترین و کمترین فراوانی گردوخاک مشاهده شد. در ایستگاه ایلام فصل بهار با ۴۵ درصد و در ایستگاه دهلران فصل تابستان با ۴۱ درصد بیشترین توزیع فصلی را در برمی‌گرفتند. در هر دو ایستگاه، همبستگی بین عناصر اقلیمی و تعداد روزهای گردوخاک بسیار بالا بود و از رابطه‌ای منطقی برخوردار بوده‌اند (۷۰ > I). خوشحال دستجردی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، جهت باد، سرعت قائم، دما با رویکرد گردشی تحلیل همدید توفان‌های گردوخاک استان ایلام را انجام دادند. نتایج نشان داد که کم‌فشار سودان، و کم‌فشار گنگ در سطح زمین و ناوه عمیق مدیترانه، ناوه دریای سرخ و پراارتفاع جنب حاره آזור مهم‌ترین سامانه‌های همدید تأثیرگذار و انتقال گردوخاک به غرب ایران و منطقه مطالعاتی هستند. همان‌طور که مطالعات پیشین نشان می‌دهند تعداد وقوع این توفان‌ها در سال‌های اخیر در غرب ایران افزایش داشته است. لذا مطالعه چگونگی این رویداد از نظر همیدی می‌تواند روشن‌کننده نحوه شکل‌گیری آن‌ها باشد. در این تحقیق فرض شده که ناوه نسبتاً عمیق بر روی سوریه باعث ایجاد گردوخاک در شهر سنندج می‌شود. به این منظور الگوهای همدید اصلی فشار تراز دریا و ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال موثر بر رخداد توفان‌های گردو خاک در شهر سنندج طی دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۲ بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در توجیه و تبیین رخداد پدیده‌های محیطی از نظر همدید دو مجموعه داده که مربوط به داده‌های غلظت ذرات

آفریقا می‌شود. در این زمان در شرق و مرکز صحرا و مرکز مدیترانه، جریان و اچرخندی غلبه داشته و گرمای نسبتاً بالا همراه با افزایش ارتفاع ژئوپتانسیلی مشهود است. پی و همکارانش (Pey et al, 2013) نیز سعی بر بررسی علل همدید گردوخاک‌های شمال‌غرب دریای مدیترانه در ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال کرده‌اند. وای هانگ و شینینشی (Weihong and Shaoyinshi, 2001) به بررسی عوامل وقوع توفان‌های گردوخاک در چین پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که عامل اصلی وقوع توفان‌های گردوخاک در چین، گرمایش زمین در بیابان مغولستان و سرمایش زمین در شمال کشور چین به‌خصوص در حوضه تاریم است. ذوالفقاری و عابدزاده (۱۳۸۴) به تحلیل همدید سامانه‌های گردوخاک در غرب ایران در بازه زمانی ۵ ساله از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۷ میلادی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که، ماه ژوئن بیشترین و ماه دسامبر کمترین روزهای گردوخاکی را در این دوره تجربه کرده است. ایستگاه دزفول با ۱۳۷/۴ روز در طول دوره آماری به طور متوسط پر گردوخاک‌ترین و ایستگاه خوی با ۲/۶ روز به طور متوسط کم گردوخاک‌ترین ایستگاه‌ها بوده‌اند. طهماسبی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی چگونگی وقوع توفان گردوخاک و فرسایش بادی در استان خوزستان پرداختند و بر اساس تحلیل جریان‌های گردوخاک و بررسی تصاویر ماهواره‌ای منطقه خاورمیانه عامل اصلی بروز و وقوع گردوخاک در نواحی جنوب غربی کشور را جریانات مربوط به وقوع توفان در کشور عربستان و سپس جنوب عراق عنوان داشتند. لشکری و همکاران (۱۳۸۹) توفان‌های گردوخاک استان خراسان رضوی را از نظر آماری و همدید در فاصله زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۳ مطالعه کردند. نتایج همیدی نشان داد که بر روی نقشه تراز دریا در روز توفان، مرکز کم فشاری در محدوده جنوب خراسان و کشور افغانستان بسته می‌شود و علاوه بر این در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی نیز مرکز چرخندی در بخش شرقی و شمال شرقی افغانستان شکل می‌گیرد. بحیرایی و همکاران (۱۳۹۰) تحلیل آماری و

گردوخاک شهر سنندج (شکل ۱) و داده‌های متغیرهای (۱۳۹۰، دستجردی و همکاران، ۱۳۹۰).
مختلف جو بالا بودند استفاده شد (شمسی‌پور و صفرراد،



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

مجموعه داده‌های محیطی (ذرات معلق (PM) جو در شهر سنندج) به صورت روزانه طی دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲، از اداره کل حفاظت محیط زیست استان کردستان تهیه گردید. واحد متغیر غلظت ذرات معلق، میکروگرم بر متر مکعب (mg/m^3) است. در این پژوهش جهت بررسی بهتر توفان‌های گردوخاک، داده‌های مربوط به ذرات معلق بر اساس میزان غلظت آن‌ها به چند دسته تقسیم شد (جدول ۱)، اما در نهایت گروه روزهای توفانی مطالعه گردید. برای توجیه همدید توفان‌های گردوخاک شهر سنندج از داده‌های فشار تراز دریا (بر حسب هکتوپاسکال) و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (بر حسب متر) استفاده شد. این داده‌ها به صورت روزانه از تارنمای

www.esrl.noaa.gov برای طول دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ تهیه شد. با توجه به این که منشاء توفان‌های گردوخاک شهر سنندج در محدوده‌ای خارج از ایران قرار دارد (حیدری، ۱۳۸۶، ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۰، کریمی احمدآباد و شکوهی رازی، ۱۳۹۰) برای انجام این تحقیق متغیرهای جوی وسیع انتخاب شد. در واقع با انتخاب محدوده وسیع برای مطالعه متغیرهای جوی، امکان شناخت بهتر الگوهای همدید موثر بر رخداد این پدیده فراهم شد. بنابراین چهارچوب مورد مطالعه، منطقه وسیعی از صفر تا ۶۵ درجه طول شرقی و صفر تا ۷۰ درجه عرض شمالی را در بر گرفت.

جدول ۱- دسته‌بندی غلظت ذرات معلق جو در شهر سنندج (در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲)

روزهای توفانی				روزهای غیرتوفانی		غلظت ذرات معلق (بر حسب میکروگرم بر متر مکعب)
گروه پنجم	گروه چهارم	گروه سوم	گروه دوم	گروه اول		
غلظت	غلظت	غلظت	غلظت	غلظت		
>۲۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۰۰-۵۰۰	کمتر از ۲۰۰		

تعداد روزهای مورد مطالعه	۱۰۴۲ روز	۷۹ روز	۶ روز	۸ روز	۱ روز
--------------------------	----------	--------	-------	-------	-------

مکعب (۹۴ روز) تشکیل شد. با توجه به محدوده مورد مطالعه (صفر تا ۶۵ درجه طول شرقی و صفر تا ۷۰ درجه عرض شمالی) پایگاه داده نهایی پژوهش برای روزهای توفانی به اندازه ۹۴×۷۸۳ ایجاد شد. در ماتریس داده‌ها منظور از عدد ۷۸۳ تعداد یاخته‌ها در محدوده مورد مطالعه و منظور از عدد ۹۴ نیز تعداد روزهای توفانی است. در ادامه کار، الگوهای اصلی گردشی جو با ترسیم نقشه‌های هم‌دین برای روزهای توفانی مشخص خواهند شد. همچنین براساس تحلیل خوشه‌ای به روش ادغام وارد الگوهای اصلی فشار تراز دریا و همچنین الگوهای اصلی ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال شناسایی شدند (برای درک و فهم بهتر تحلیل‌های چند متغیری و از جمله تحلیل خوشه‌ای، می‌توان به جانسون و ویچرن، ۱۳۸۴ مراجعه کرد). در میان اعضای هر الگو، روزی به عنوان روز نماینده انتخاب شد. روز نماینده با سایر اعضای گروه بالاترین مقدار همبستگی را نشان می‌دهد. هم‌چنین نقشه‌های مربوط به روز نماینده هر الگو تهیه شد. بنابراین تحلیل توفان‌های گردو خاک شهر سنندج براساس ترسیم الگوهای فشار تراز دریا، ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال روز نماینده هر گروه انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی الگوهای اصلی فشار تراز دریا

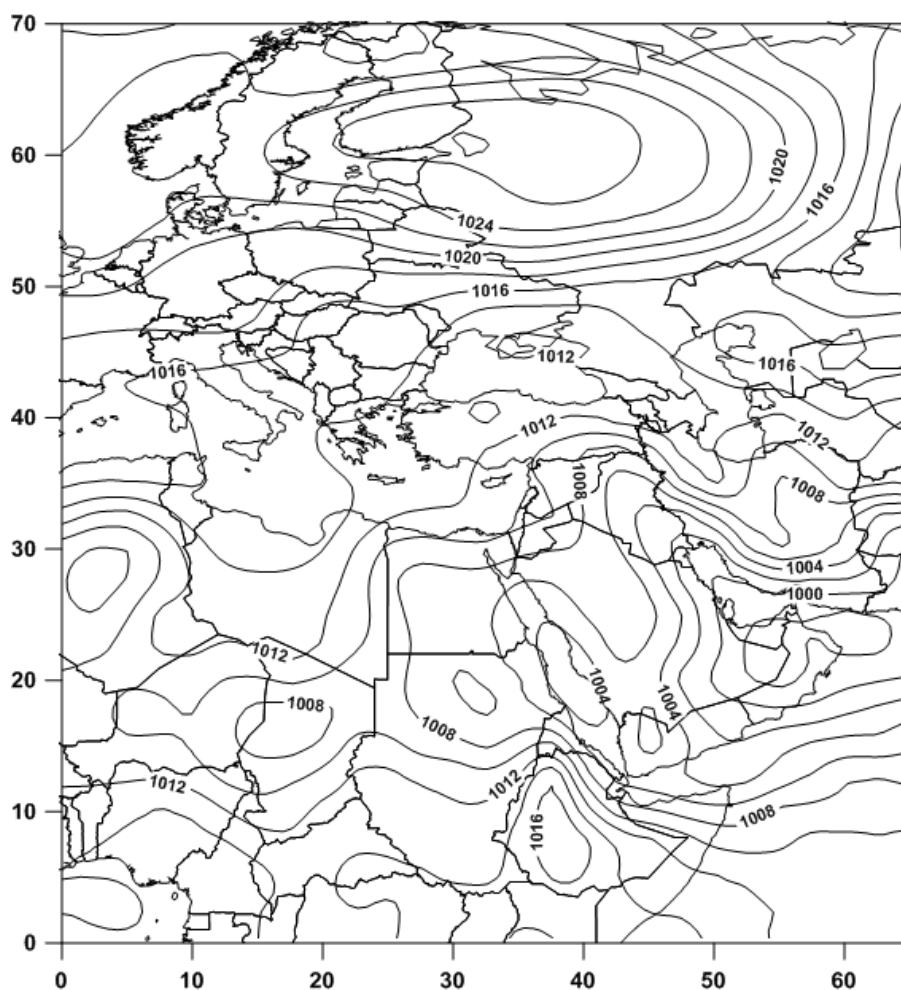
با انجام تحلیل خوشه‌ای به روش ادغام وارد بر روی داده‌های روزانه فشار تراز دریا در روزهای توفانی (۹۴ روز) سه الگوی اصلی فشار تراز دریا مشخص شد. در الگوی اول شرایط دگر فشار (باروکلینیک) شدیدی از شمال غرب تا جنوب شرق ایران دیده می‌شود. محور اصلی ناوه در این منطقه از خلیج فارس به سمت شمال شرق عراق و سوریه امتداد یافته است. با توجه به محور ناوه که کاملاً بر روی بیابان‌های عراق و سوریه است، نیمه شرقی ناوه جنوب

داده‌های مربوط به متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل در ۱۷ تراز داده‌های نم ویژه در ۸ تراز و به صورت شبکه‌بندی منظمی با اندازه یاخته‌های $۲/۵ \times ۲/۵$ درجه جغرافیایی به صورت فایل‌های خود توصیف قابل دسترس هستند. با توجه به موارد ذکر شده، در محدوده مورد مطالعه ۷۸۳ یاخته با ابعاد $۲/۵ \times ۲/۵$ درجه جغرافیایی قرار دارند و داده‌های یاخته‌ای اساس تجزیه و تحلیل هم‌دین متغیرهای جو بالا بودند. این پژوهش در قلمرو علم اقلیم‌شناسی هم‌دین قرار دارد. مطالعات اقلیم‌شناسی هم‌دین براین فرضیه استوارند که رویدادهای محیطی تحت تاثیر الگوهای گردشی جو پدید می‌آیند. بنابراین در مطالعات هم‌دین دو رویکرد عمده وجود دارد. یکی، رویکرد گردشی به محیطی و دیگری، رویکرد محیطی به گردشی (خوشحال دستجردی و همکاران، ۱۳۹۱). روش این پژوهش بر مبنای رویکرد محیطی به گردشی است. بنابراین با توجه به روزهایی که مشخص شده‌اند، باید الگوهای اصلی جو در زمان رخداد این پدیده‌ها مشخص شوند و در نهایت بر مبنای این الگوهای گردشی پدیده گردو خاک توجیه و تبیین شوند. در مطالعات زیست محیطی زمانی که غلظت ذرات کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در متر مکعب باشد اغلب واژه توفان گردو خاک استفاده نمی‌شود و معمولاً این مقدار غلظت را در ارتباط با آلاینده‌های محیطی می‌دانند. در این پژوهش روزهایی که در جدول ۱ به آنها اشاره شده است، نمونه کلی مورد مطالعه هستند.

با توجه به این که هدف اصلی پژوهش شناسایی الگوهای هم‌دین به وجود آورنده توفان‌های گردو خاک است، بنابراین ذرات معلق در جو شهر سنندج به دو دسته کلی (زیر ۲۰۰ و بالای ۲۰۰ میکروگرم در متر مکعب) تقسیم شدند. در واقع زمانی که غلظت ذرات کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در متر مکعب باشد به عنوان روزهای غیر توفانی و روزهای بالای ۲۰۰ میلی‌گرم در متر مکعب به عنوان روزهای توفانی بررسی شدند. بنابراین با توجه به هدف پژوهش یک پایگاه داده از متغیرهای جوی با غلظت‌های بالای ۲۰۰ میلی‌گرم در متر

غرب روسیه نیز شکل گرفته است. به نظر می‌رسد با حرکت و اچرخندی این پرفشار امکان کشیده شدن جریان‌های هوا از عرض‌های پایین به سمت بالاتر فراهم باشد. جریان‌هایی که از شمال خلیج فارس به سمت دریای سیاه امتداد یافته است می‌تواند نتیجه استقرار این سامانه فشار باشد (شکل ۲).

غرب و غرب ایران (به ویژه شهر سنندج) را فرا می‌گیرد. بنابراین از روی بیابان‌های سوریه و عراق جریان هوایی وارد کشور و باز به ویژه غرب می‌شود که می‌تواند توفان گردوخاک و ذرات معلق فراوان جو را در این روزها توجیه نماید. به نظر می‌رسد شرایط چرخندی مثبت در شمال عربستان نیز عامل مهم دیگری باشد که به رخداد توفان گردوخاک غرب ایران کمک می‌کند. در این الگو پرفشار



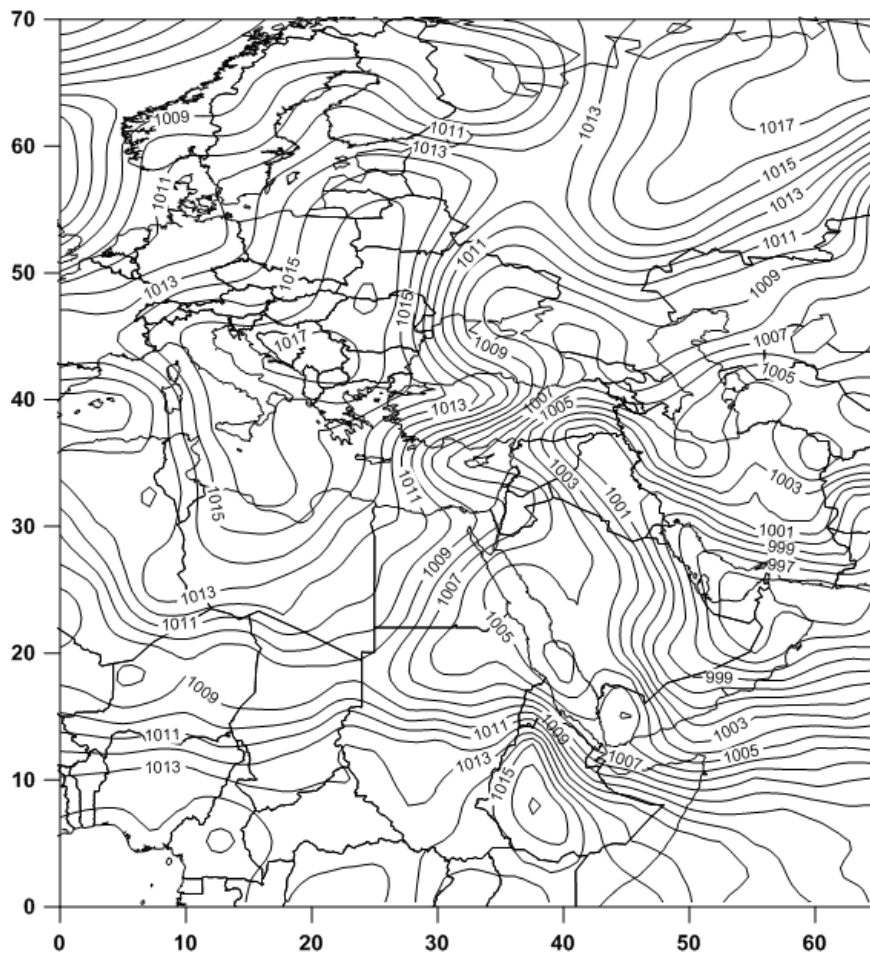
شکل ۲- فشار تراز دریا در روز نماینده الگوی اول توفان گردوخاک در بازه زمانی ۲۰۰۹ - ۲۰۱۲

ناوه عمیقی از شمال خلیج فارس به سمت عراق کشیده شده است. محور این ناه از شمال خلیج فارس در امتداد جنوب شرق عراق تا شمال غرب عراق و شرق سوریه

این الگو در ۲۸/۷ درصد از روزهای مورد مطالعه دیده شده است. روز نماینده این الگو نیز با دیگر اعضای گروه ۶۳ درصد همبستگی نشان داده است (جدول ۲). در الگوی دوم،

دارد باعث کشیده شدن هوای گرم و خشک بیابان‌های عراق، شرق سوریه و شمال عربستان به نیمه غربی کشور خواهد شد (شکل ۳). بیش‌ترین روزهای توفانی (۵۴/۳ درصد) تحت تاثیر این الگو به وجود می‌آیند و روز نماینده این الگو نیز با سایر اعضای گروه ۶۰ درصد همبستگی را نشان داد (جدول ۲).

گسترش یافته است. بر روی عراق به سبب فشار کمی (حدود ۱۰۰۰ هکتوپاسکال) که وجود دارد، چرخش چرخندی شدیدی حاکم خواهد شد که این خود منجر به کشیده شدن هوای خشک و گرم و گردوخاک بیابان‌های عراق و شمال عربستان می‌شود. شیو فشار شدیدی که بین هوای عرض‌های بالا و پایین بر روی نوار غربی ایران وجود

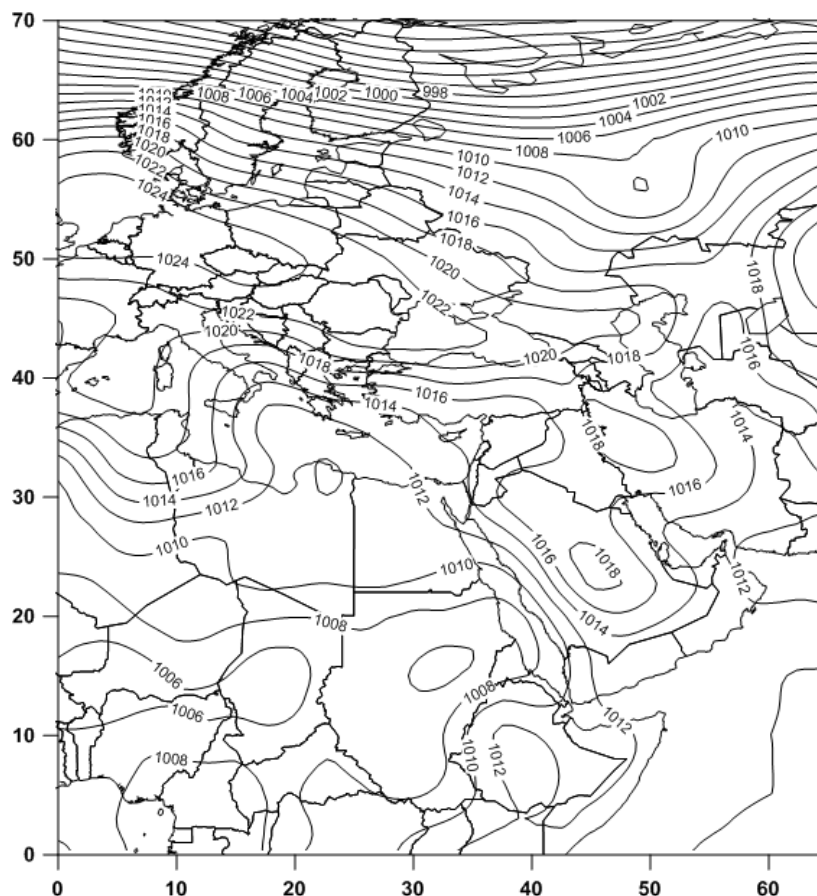


شکل ۳- فشار تراز دریا در روز نماینده الگوی دوم توفان گردوخاک در بازه زمانی ۲۰۰۹ - ۲۰۱۲

شمال عربستان نیز خود تحت تاثیر پرفشاری که بر روی میانه عربستان قرار دارد می‌تواند به سمت جنوب عراق و سپس جنوب غرب و غرب ایران منتقل شود. بنابراین غلظت بالای آلاینده‌های جوی در این الگو نیز قابل توجه است (شکل ۴). البته کمترین توفان‌های گردوخاک دوره

شرایط جوی حاکم در الگوی شماره سه با الگوهای دیگر متفاوت است. برخلاف الگوهای اول و دوم، شمال غرب و غرب ایران، محل قرارگیری هسته پرفشاری است که این پرفشار می‌تواند هوای شمال عربستان و نیمه شرقی عراق را به سمت ایران (به ویژه غرب ایران) گسترش دهد. هوای

مورد مطالعه (۱۷ درصد) تحت تاثیر این الگو ایجاد شده‌اند. گروه بیش از ۶۲ درصد است (جدول ۲).
ضریب همبستگی روز نماینده این الگو با دیگر اعضای



شکل ۴- فشار تراز دریا در روز نماینده الگوی سوم توفان گردوخاک در بازه زمانی ۲۰۰۹ - ۲۰۱۲

جدول ۲- ویژگی‌های الگوهای اصلی فشار تراز دریا شهر سنندج در فاصله زمانی ۲۰۰۹ - ۲۰۱۲

الگوی ۳	الگوی ۲	الگوی ۱	الگوهای اصلی فشار تراز دریا
٪۶۲	٪۶۰	٪۶۳	درصد همبستگی روز نماینده با سایر اعضای گروه
۳۵۷/۹	۴۳۸/۹	۴۲۱/۶	میانگین غلظت ذرات معلق در هر الگو (میلی‌گرم در مترمکعب)
۱۷	۵۴/۳	۲۸/۷	درصد روزهای واقع در هر الگو

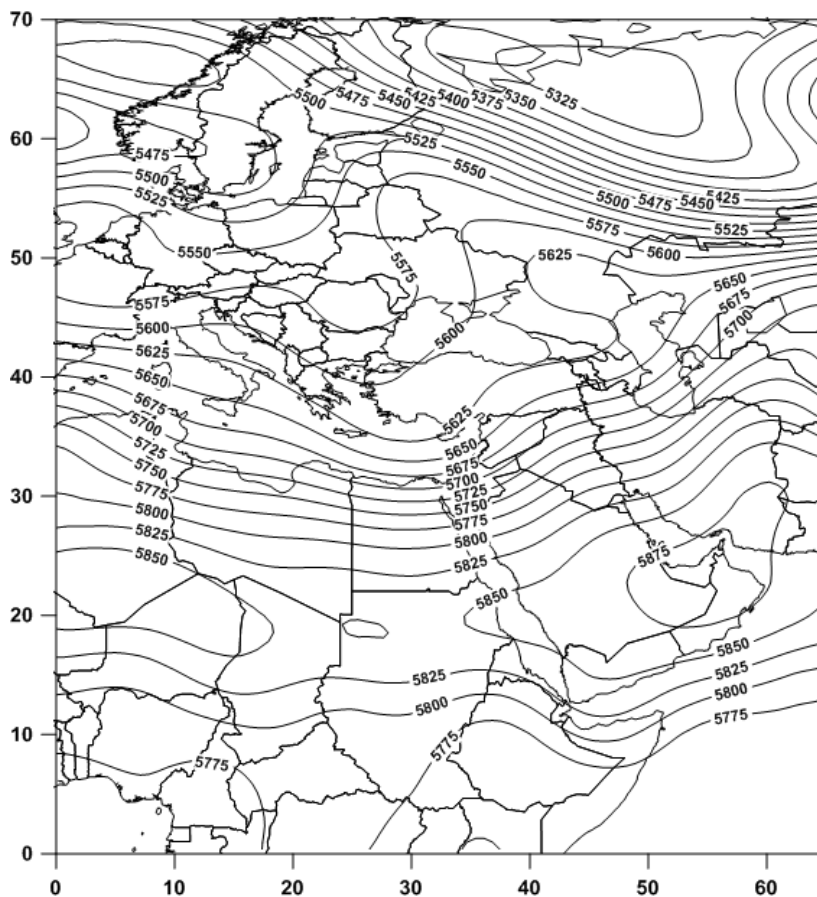
الگوی ضخامت جو مشخص شد. در اولین الگوی ضخامت، ناوه ای با طول موج کوتاه بر روی منتهی‌الیه شرق دریای مدیترانه دیده می‌شود. محور این ناوه بر روی غرب سوریه به طرف جنوب تا شمال دریای سرخ قرار دارد. برخی از جریانات این ناوه از شمال غرب ایران عبور کرده

بررسی الگوهای اصلی ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال

با انجام تحلیل خوشه‌ای بر روی داده‌های ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در زمان روزهای توفانی، سه

می‌رسد چنین جریانی که مسیری طولانی را از روی خشکی‌ها و بیابان‌ها طی کرده است، می‌تواند عامل مؤثری در ایجاد توفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه باشد (شکل ۵). حدود ۳۳ درصد از روزهای توفانی تحت تاثیر چنین الگویی ایجاد می‌شوند. روز نماینده این الگو بیش از ۹۳ درصد با دیگر اعضای گروه خود همبستگی نشان داده است (جدول ۳).

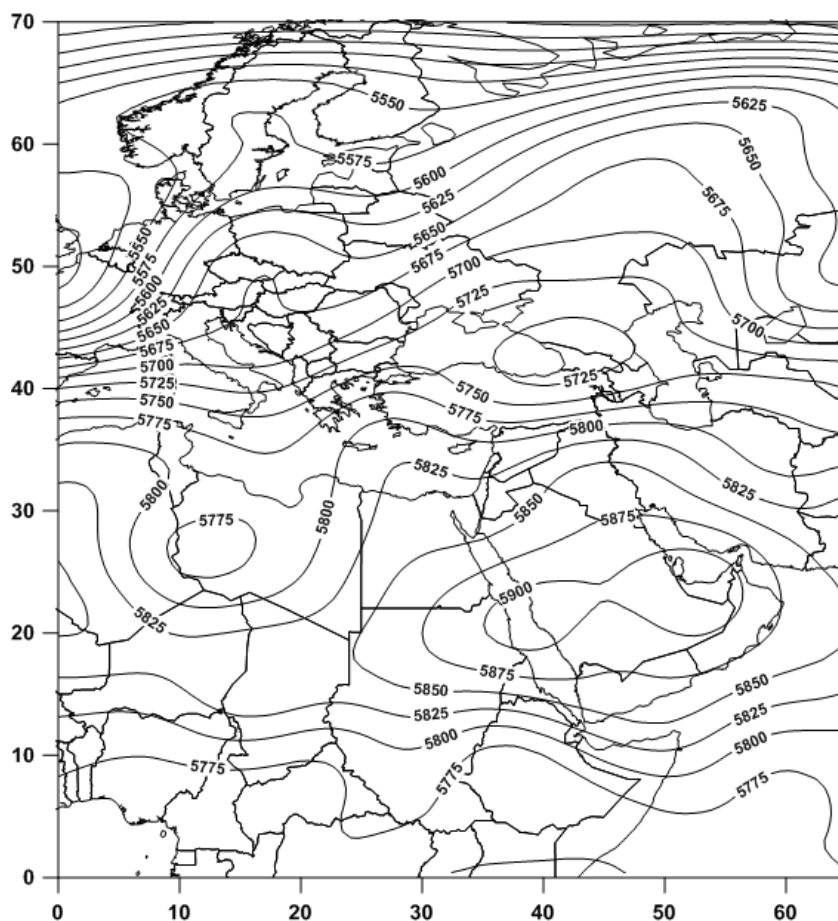
است. به نظر می‌رسد که این جریانات با خود گردوخاک را به شمال غرب ایران منتقل نمی‌کنند یا گردوخاک کمی را به منطقه ارسال می‌کنند. اما نکته مهمی که در این الگو دیده می‌شود جریانات نسبتاً مداری است که از شمال غرب آفریقا به سمت شرق گسترش یافته است و پس از طی مسیر طولانی از شمال عربستان و عراق وارد ایران (به ویژه بخش‌های غرب و جنوب غرب ایران) شده است. به نظر



شکل ۵- ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در روز نماینده الگوی اول در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۲

عربستان، عراق و شرق سوریه فراهم می‌آورد که وارد ایران و به ویژه جنوب غرب و غرب ایران شود (شکل ۶). این الگو در بیشترین توفان‌های گردوخاک شهر سندج (۳۸/۳ درصد) دیده شده است. ضریب همبستگی روز نماینده این الگو با سایر روزهای دیگر گروه بیش از ۹۳ درصد می‌باشد (جدول ۳).

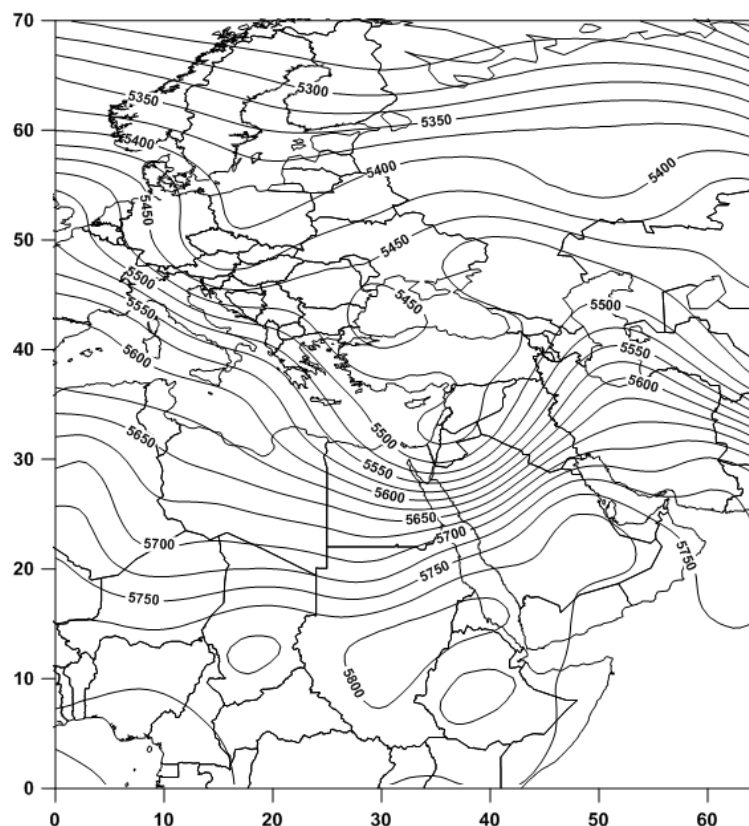
در الگوی دوم ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال یک پراتفاح قوی بر روی شبه جزیره عربستان دیده می‌شود. بر روی قفقاز و شرق دریای سیاه نیز کم ارتفاع شکل گرفته است. پراتفاح شبه جزیره عربستان به سبب چرخش و اچرخندی و کم ارتفاع قفقاز و دریای سیاه به سبب چرخش چرخندی این امکان را برای گسترش هوای شمال



شکل ۶- ضخامت تراز ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در روز نماینده الگوی دوم در بازه زمانی ۲۰۰۹ - ۲۰۱۲

بارش نیستند. بنابراین، ناپایداری‌های شدید بر روی شمال عربستان، عراق و سوریه توفان‌های گردوخاکی را ایجاد می‌کند که ذرات معلق داخل این جریان‌ها، بخش‌های جنوب غربی و غرب ایران (به ویژه شهر سنج) را تحت تاثیر قرار می‌دهد (شکل ۷). این الگو کمترین توفان‌های گردوخاک شهر سنج (۲۸٪ درصد) را ایجاد می‌کند. بالاترین ضریب همبستگی روز نماینده در این الگو (۹۴ درصد) قرار دارد (جدول ۳).

در الگوی سوم، ناوه عمیقی بر روی شرق دریای مدیترانه دیده می‌شود. محور این ناوه از شرق مدیترانه تا میانه دریای سرخ گسترش دارد. شیو ارتفاع شدیدی از مصر به سمت شرق تا نیمه غربی ایران دیده می‌شود و در واقع در این مسیر طولانی ناپایداری شدیدی به ویژه بر روی عراق و شمال عربستان شکل گرفته است. با توجه به این که جریان‌ها مسیری طولانی را از روی خشکی‌ها و بیابان‌ها طی کرده‌اند، پس می‌توان گفت که ناپایداری‌ها همراه با



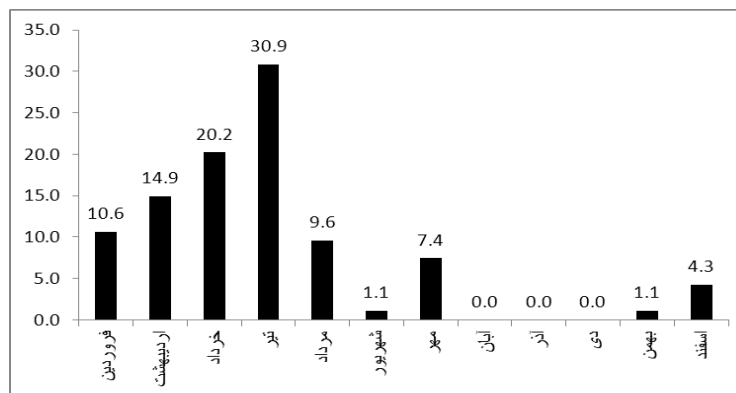
شکل ۷- ضخامت تراز ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال در روز نماینده الگوی سوم در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۲

جدول ۳- ویژگی‌های الگوهای اصلی ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال

الگوی ۳	الگوی ۲	الگوی ۱	الگوهای اصلی ضخامت لایه ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال
٪۹۴	٪۹۳	٪۹۳	همبستگی روز نماینده با سایر اعضای گروه
۴۹۱/۵	۳۵۳/۱	۴۳۵/۹	میانگین غلظت ذرات مواد معلق در هر الگو (میلی‌گرم در مترمکعب)
۲۸/۷	۳۸/۳	۳۳	درصد روزهای واقع در هر الگو

می‌شوند. اما از آنجایی که غرب ایران در اواخر دوره سرد همچنان رطوبت زمستان بادهای غربی و همچنین رطوبت محلی را دارد، رخداد بارش در اواخر دوره سرد و اوایل بهار منجر به کاهش فراوانی روزهای همراه با گردوخاک خواهد شد (شکل ۸).

توفان‌های گردوخاک شهر سنج‌عمدتاً در نیمه گرم سال رخ می‌دهند. این رویدادها از اواخر زمستان روند افزایشی پیدا می‌کنند و در تیرماه فراوانی آنها به اوج می‌رسد (۳۰٫۹ درصد). در مناطق بیابانی عراق، عربستان و سوریه اغلب گرما و خشکی زودتر از مناطق جنوب غربی و غرب و به ویژه شهر سنج‌عمدتاً آغاز می‌شود. بنابراین توفان‌های گردوخاک هم زودتر از فصل گرما (اواخر زمستان) آغاز



شکل ۸- فراوانی توفان‌های گرد و خاک سنندج در بازه زمانی ۲۰۰۹ - ۲۰۱۲

نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های فشار تراز دریا در زمان توفان‌های گردوخاک (روزهای با غلظت ذرات مواد معلق ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ میکروگرم در متر مکعب) سه الگوی اصلی فشار را نشان داد. به طور کلی این رویدادها زمانی ایجاد می‌شوند که کم‌فشار قوی بر روی عراق ایجاد شود و محور ناوه در امتداد جنوب شرق عراق تا شرق سوریه باشد. هر چقدر مقدار فشار این سامانه کمتر باشد، شرایط بر روی این مناطق ناپایدارتر و به سبب چرخش چرخندی آن، امکان گسترش بیشتری از ذرات گردوخاک بیابان‌های عراق، شمال عربستان و سوریه بر روی نیمه غربی ایران وجود دارد. علاوه بر این زمانی که پرفشاری نسبتاً قوی بر روی غرب ایران حاکم شود، امکان گسترش ذرات گردوخاک (به سبب جریان‌های واچرخندی) از روی عراق و شمال عربستان به منطقه مورد مطالعه وجود دارد (خوش‌کیش و همکاران، ۱۳۹۰، کریمی احمدآباد و رازی، ۱۳۹۰). تحلیل‌های انجام شده بر روی داده‌های ارتفاع‌های ژئوپتانسیل ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز سه الگوی اصلی ضخامت این لایه را مشخص کرد. در الگوی اول و سوم ناوه عمیقی بر روی شرقی‌ترین بخش دریای مدیترانه به طرف جنوب تا شمال دریای سرخ قرار دارد. با توجه به موقعیت این ناوه می‌توان گفت که عراق، سوریه، شمال عربستان و حتی بخش‌های زیادی از ایران در منطقه ناپایدار

این ناوه قرار دارند. در نگاه اول انتظار بارش در چنین شرایطی طبیعی به نظر می‌رسد اما داده‌های محیطی (غلظت ذرات معلق ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ میکروگرم در متر مکعب) عدم بارش و رخداد توفان گردوخاک را گزارش کرده‌اند. با توجه به این‌که رخداد بارش نیازمند مهیا شدن شرایط ناپایداری و همچنین رطوبت است؛ به نظر می‌رسد یکی از این دو عامل در زمان وقوع توفان‌های گردوخاک فراهم نبوده است. با نگاهی مجدد به جهت جریان‌های هوا در نقشه‌های ضخامت می‌توان گفت که جریان‌هایی که به ایران (به ویژه جنوب غرب و غرب ایران) وارد شده‌اند مسیری طولانی را از روی خشکی‌ها و به ویژه مناطق بیابانی (لیبی، مصر، شمال عربستان و عراق) طی کرده‌اند. بنابراین کمبود رطوبت در این جریان هوای ناپایدار، طبیعی به نظر می‌رسد. در الگوی اول و سوم، وجود پراارتفاع بر روی شبه جزیره عربستان (که الگوی اول خلیج فارس را هم در بر می‌گیرد) و همچنین کم ارتفاع روی اروپا قابل توجه است. جریان واچرخندی و چرخندی این سامانه‌های جوی نقش مهمی را در گسترش و هدایت جریان هوا از روی بیابان‌های عراق و عربستان و سوریه به ایران دارد. شرایط در الگوی دوم تا حدودی متفاوت از الگوهای اول و سوم است. در این الگو پراارتفاع شبه جزیره عربستان به سبب چرخش واچرخندی و کم ارتفاع قفقاز و دریای سیاه به سبب چرخش چرخندی این امکان را برای گسترش هوای شمال عربستان، عراق و

منابع

1. Alijani, B., 1997, Weather in Iran, Payamenor publication, Tehran. Alles, D. L., 2010, Geomorphology and dust storms in china, web paper, <http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/ChinaDust.pdf>
2. Azizi, Gh., E. A. Shamsipor, M. Miri, and T. Safarzade, 2012, Synoptic statistical analysis of dust phenomenon in the western half of Iran. Arid Regions Geographic Studies, No. 3, pp. 123-143.
3. Azizi, Gh., M. Miri, and A. Nabavi, 2011, Tracking of dust storm phenomenon in the western half of Iran. Journal of Arid Regions Geographic Studies, No. 7, pp. 61-81.
4. Barkan, J., and P. Alpert, 2010, Synoptic analysis of a rare event of Saharan dust reaching the arctic region. weather, No.65, pp. 208
5. Bohiraei, H., M. Ayazi, M. Rajaei, and H. Ahmadi, 2011, Statistical analysis of dust synoptic phenomena in Ilam province. Quarterly Journal of Human Geography, No. 1, pp. 48-67.
6. Carnevale, C., G. Finzi, E. Pisoni, M. Volta, P. Kishcha, and P. Alpert, 2011, Integraing Saharan dust forecasts into a regional chemical transport model: A case study over Northern Italy. Science of the Total Environment, No. 417, pp. 224-231
7. Chen, W., 1996, Wind tunnel test of the influence of moisture on the erdibility of loessial sandy loam soils by wind. Journal of Arid Environments, No. 34, pp. 391-402.
8. Engelstadler, S., 2001, Dust storm frequencies and their relationships to land surface conditions. Freidrich-Schiller university press. Jena. Germany.
9. Haidari, M. T., 2007, Soil and climatic pattern generator in the West Country, Meteorology Journal of Kermanshah, pp. 11-12.
10. Ichoku, C., Y. J. Kaufman, L. A. Remer, and R. Levy, 2004, Global aerosol remote sensing from MODIS. Advances in Space Research, No. 34, pp. 820-827.
11. Karimi Ahmadabad, M., and K. Shokohi Razi, 2009, Interaction of atmospheric circulation and land cover in the mechanism of formation and development of summer dust storms in the Middle East. Physical Geography Research, No. 78, pp. 113-130.
12. Khosh Kaif, A., B. Alijani, and Z. Hajazizade, 2011, Dust synoptic analysis systems in the

شرق سوریه به سمت جنوب غرب و غرب ایران فراهم می‌کند. رویارویی این دو سامانه فشار شرایط ناپایداری را در بیابان‌های عراق، عربستان ایجاد کرده و کمبود رطوبت نیز در این مناطق منجر به ایجاد توفان گردوخاک شده است. این گردوخاک در امتداد جریان‌هایی که در الگوی شماره دو ضخامت دیده می‌شود به سمت ایران و مناطق جنوب و جنوب غرب هدایت می‌شود. در شهر سنندج، تقریباً از اواخر زمستان توفان‌های گردوخاک روند افزایشی را آغاز کرده و این رویدادها در تیر ماه به اوج می‌رسند. به نظر می‌رسد استقرار پرفشار جنب حاره‌ای آזור در ارتباط با فراوانی این رویدادها است. در زمانی که پرفشار جنب حاره‌ای آזור در منطقه حاکم می‌شود آفتابی بودن منطقه منجر به پیدایش کم‌فشار در سطح زمین و ایجاد شرایط ناپایدار می‌گردد. بدیهی است که اغلب این سامانه فشار اجازه صعود هوای کم فشار سطحی را تا مرحله تراکم و تشکیل ابر را نخواهد داد. علاوه بر آن کمبود رطوبت نیز در بیابان‌های عربستان، عراق و سوریه عاملی است که نهایتاً در تشکیل توفان گردوخاک نقش بازی می‌کند. بنابراین همرفت گرمایی که در مناطق بیابانی یاد شده انجام می‌شود به دلیل کمبود رطوبت و استقرار پرفشار جنب حاره‌ای آזור، منجر به شکل‌گیری توفان‌های گردوخاکی خواهد شد که در ادامه بخش‌های زیادی از ایران نیز تحت تاثیر این رویدادها قرار خواهند گرفت. به طور کلی وجود ناوه نسبتاً عمیق بر روی شرقی‌ترین بخش دریای مدیترانه، گسترش هوا از روی مناطق خشک (بیابان‌های لیبی، مصر، شمال عربستان و عراق) به سوی ایران و پرارتفاع عربستان نقش مهمی در ایجاد توفان‌های گردوخاک مناطق جنوبی، جنوب غربی و غرب به‌ویژه شهر سنندج دارد.

نویسندگان از ریاست محترم اداره کل حفاظت محیط زیست استان کردستان جناب آقای مهندس ناصح قادری برای در اختیار قرار دادن داده‌های PM10 مورد نیاز این مقاله تشکر و قدردانی می‌کنند.

- meteorology. Atmospheric Chemistry and Physics, No. 13, pp. 1395-1410
24. Rasoli, E., B. Sariye Saraf, and G. Mohamadi, 2010, Analysis of dust climatic phenomena in west of country in the last 55 years using non-parametric statistical methods. Physical Geography Research Quarterly, No. 9, pp. 15-28.
 25. Shahsavani, E., M. Yarahamadi, N. Jafarzade Haghighi fard, A. Naeim Abadi, H. Mahmoodiyani, H. Saki, M. H. Saulat, Z. Solaymani, and K. Nadafi, 2010, The effects of dust storms on health and the environment. Journal of North Khorasan University of Medical Sciences, No. 4, pp. 45-56.
 26. Shamsipor, E. A., and T. Safarzade, 2011, Satellite synoptic analysis of the dust phenomenon (dust of the July 2009). Physical Geography Research, No. 79, pp. 111-126.
 27. Shao, Y., and C. H. Dong, 2006, A review on East Asia dust storm climate, modeling and monitoring. Global and Planetary, No. 52, pp. 1-22
 28. Sun, J., L. Zhao, S. Zhao, and R. Zhang, 2006, An integrated dust storm prediction system suitable for east Asia and its simulation results. Global and Planetary, No. 52, pp. 71-87
 29. Tahmasebi Bairgni, E., G. Abdinejad, and B. Nosh Afarin, 2009, Survey of occurrences of the dust storms and wind erosion in Khuzestan province and its coping strategies. Journal of Forest and Range, No. 81, pp. 21-25.
 30. Takemi. T., and N. Seino, 2005, Dust storms and cyclone tracks over the arid regions in East Asia in spring. Journal of Geophysical Research, No. 110, pp. 191.-211.
 31. Wang. W., and Z. Y. Fang, 2006, Numerical simulation and synoptic analysis of dust, emission and transport in East Asia. Global and Planetary Change, No. 52, pp. 57-70
 32. Weihong. Q and Shaoyinshi, 2001, Variations of the dust storm in China and its climatic control. Journal of climate, 15
 33. Youngsin. Ch., and Lim. J.Y., 2004, The recent characteristics of Asian dust and haze events in Seoul, Korea. Meteorology and Atmospheric Physics, No. 87, pp. 143-152.
 34. Zolfaghari, H., Abedzadeh, H., 2010, Analysis of synoptic system of the dust in Iran, Geography and development Iranian journal, pp. 173-188.
 13. Lorestan province. Research Quarterly of Applied Geographic Sciences, No. 21. pp. 91-110.
 13. Khoshhal Dastjerdi, J., H. Mosavi, and E. R. Kashaki, 2012, Synoptic analysis of Ilam dust storms (1987-2005). Geography and Environmental Planning, No. 2, pp. 15-34.
 14. Lashkari, H., and Gh. Kikhosravi, 2008, Statistical analysis of dust storm synoptic during the period 1993-2005. Geographic Research, No. 65, pp. 17-33.
 15. Lim. J. Y., and Y. Chun, 2006, The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004. Global and Planetary Change, No. 52, pp. 231-247
 16. Liu. R., and M. A. Huza, 1995, Filtration and indoor air quality: A practical approach. Ashrae Journal, No. 37, pp. 18-23
 17. Meloni, D., A. Sarra, F. Monteleone, G. Pace, S. Piacentino, and D. M. Sferlazzo, 2008, Seasonal transport patterns of intense Saharan dust events at the Mediterranean island of Lampedusa. Atmospheric Research, No. 88, pp. 134-148
 18. Merrifield, A., S. Schindeler, B. Jalaludin, and W. Smith, 2013, Health effects of the September 2009 dust storm in Sydney, Australia: did emergency department visits and hospital admissions increase?, Environmental Health 2013, <http://www.ehjournal.net/content/12/1/32>
 19. Miri, E., A. Pahloakravi, and E. Moghadamniya, 2009, Investigate the dust storm occurrence in the Sistan region after droughts periodic. Iranian journal of range and desert research, No. 3, pp. 329-342.
 20. Mofidi, A., and S. Kamali, 2012, Analysis of dust storm structure in system plain using regional scale climate models RegCM4, 30 July 2001, first national conference of sciences, technology and sustainable development, 16-17 Jun 2012, pp. 1-17.
 21. Natsagdorj. L., D. Jugder, and Y. S. Chung, 2003, Analysis of Dust Storms Observed in Mongolia during 1937-1999. Atmospheric Environment, No. 37, pp. 1401-1411
 22. Orlovsky. N. S., and A. Durdyev, 2005, Dust storms in Turkmenistan. Journal of Arid Environments, No. 60, pp. 83-97
 23. Pey. J, X. Querol, A. Alastuey, F. Forastiere, and M. Stafoggia, 2013, African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001-2011: PM concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale