

نقش جت سطوح پایین و تعیین مسیر ترابرد در گردو خاک خلیج فارس (مطالعه موردی: ۱۹-۱۷ فوریه ۲۰۱۷)

چکیده

گردو خاک یک فرایند طبیعی در مناطق بیابانی و صحراها است. وزش بادهای قوی بر سطح خاک خشک سبب معلق شدن ذرات ریز خاک در هوای نزدیک سطح زمین می‌شود. در سال‌های اخیر، تأثیر عوامل طبیعی متعددی منجر به گسترش بیشتر گردو خاک به بخش‌های غرب و جنوب غرب ایران بوده است. در ۱۷ تا ۱۹ فوریه ۲۰۱۷ توفان گردو خاکی بر روی استان خوزستان و شمال غرب خلیج فارس رخ داد. هدف این تحقیق تعیین منشأ گردو خاک و همچنین بررسی شرایط همدیدی، میدان باد و جت سطوح پایین در شکل‌گیری و انتقال آن به سمت استان خوزستان و خلیج فارس بود. به این منظور داده‌های هواشناسی از سایت ECMWF تهیه شد و توزیع افقی گردو خاک به کمک تصویر ماهواره MODIS و برون داد مدل DREAM بررسی گردید. همچنین مسیر ترابرد گردو خاک توسط برون داد مدل HYSPLIT تعیین شد. بررسی همدیدی نشان داد، بادهای شمال غربی در شرق سوریه و شمال غرب عراق (باد شمال) در حدفاصل ناه ارتفاعی از شرق تا غرب ایران و پشته فشاری از ترکیه تا شمال عربستان شکل گرفته بود. بیشینه سرعت باد شمال در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال به ۱۴ تا ۱۶ متر بر ثانیه (۲۸ تا ۳۲ نات) رسید. افزایش سرعت باد ترازهای پایین جو به افزایش سرعت باد ده متری ۹ متر بر ثانیه (۱۸ نات) منجر شده که در نتیجه آن ذرات گردو خاک به جو انتشار یافتند. در طی روز ۱۸ فوریه در جنوب شرق عراق، جت سطوح پایین در سطح ۹۵۰ هکتوپاسکال توسعه یافت. نتیجه آن افزایش تلاطم و گسترش قائم گردو خاک در لایه‌های پایین جو بود. جهت باد شمال، مسیر پس‌گردی در مدل HYSPLIT و گل باد منطقه هم‌خوانی داشتند. هر سه جهت باد را شمال غربی نشان داده و انتقال گردو خاک از عراق به سمت خلیج فارس را تأیید کردند. منشأ گردو خاک خلیج فارس توسط تصویر ماهواره و مدل DREAM بیابان‌های عراق و شرق سوریه تعیین شد.

واژگان کلیدی: توفان گردو خاک، جت سطوح پایین، خلیج فارس، مدل DREAM، مدل HYSPLIT

مقدمه

توفان‌های گردو خاک یکی از معضلات امروز غرب و جنوب غرب ایران است. شکل‌گیری گردو خاک و انتقال آن از طریق جو به سایر مناطق مجاور پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی بر جای گذاشته و در بخش‌های مختلف از جمله حوزه سلامت، اقتصادی و اجتماعی مشکلاتی را ایجاد می‌نماید. انتقال گردو خاک ایجاد شده در بیابان صحرا (Saharan) واقع در شمال غرب آفریقا به گرینلند رسیده و منجر به افزایش دما تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌شوند که نتیجه آن ذوب شدن یخ‌های منطقه می‌باشد (Francis et al., 2019). همچنین گردو خاک‌های این منطقه به ترکیه نیز رسیده و غلظت PM₁₀ را به بیش از ۵۰ میکروگرم بر مترمکعب افزایش داده است (Kabatas et al., 2018).

الهام مبارک حسن^{۱*}

۱. گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*مسئول مکاتبات:

mobarak_e@yahoo.com

کد مقاله: ۱۳۹۹۰۱۰۷۹۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰

این مقاله برگرفته از سایر فعالیت‌های

پژوهشی است.

علاوه بر تأثیر گردوخاک در بر روی زمین، انتقال آن به سمت منابع آبی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا از طریق آن عناصر بسیاری به دریاها و اقیانوس‌ها وارد می‌شوند (Vink and Measures, 2001). گردوخاکی که وارد آب‌های اقیانوسی می‌شود بر خواص نوری و شیمیایی و زیست دریا تأثیر می‌گذارد (Claustre et al., 2002). گردوخاک غنی از آهن با منشأ بیابان گبی (Gobi)، باعث افزایش وسیعی در فیتوپلانکتون‌های دریایی در اقیانوس آرام شمالی شده است (Gao et al., 2003). ۴۰ درصد فسفری که توسط جریان‌های جوی به غرب دریای مدیترانه وارد شده، منشأ گردوخاک صحرایی داشته است (Gao et al., 2003). انتقال گردوخاک از شمال آفریقا به کارائیب در کاهش مرجان‌های این منطقه دخیل بوده است (Garrison et al., 2003; Shinn et al., 2000). از طرفی نفوذ گردوخاک از شبه‌جزیره عربستان به خلیج فارس، عناصر غذایی کم‌مصرف ولی ضروری برای فیتوپلانکتون‌ها را فراهم می‌نماید (Rao et al., 2001).

گردوخاک ابتدا بر روی مناطق بیابانی شکل گرفته و سپس در حین حرکت، محیط‌های آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد بنابراین شناخت ماهیت و منشأ شکل‌گیری گردوخاک و سازوکار انتقال آن‌ها به سمت منابع آبی اهمیت ویژه‌ای دارد. ایران، عراق و عربستان جز کانون‌های مهم گردوخاک می‌باشند که این گردوخاک می‌تواند به‌سوی خلیج فارس انتقال یابد. با توجه به منشأ مسیر حرکت و شدت گردوخاک تأثیر آن بر مشخصه‌های آبی خلیج فارس متفاوت خواهد بود. ساختار همدیدی عامل مهمی در ایجاد جریان‌های جوی و انتقال گردوخاک با منشأ خارجی به سمت ایران است. تحلیل‌های همدیدی نشان می‌دهد که بادهای سطحی قوی همراه با نزدیک شدن یک چرخند یا عبور جبهه سرد منجر به تولید گردوخاک می‌شود (Tsai et al., 2008). سازوکار سامانه‌های همدیدی (Synoptic) (آب و هوایی) که در غرب آسیا (خاورمیانه) منجر به تولید گردوخاک می‌شوند به سه نوع جبهه‌ای، همرفتی و شمال تقسیم شده‌اند (Wilderson, 1991). با توجه به تفاوت شرایط جوی در دو فصل گرم (شش ماه اول) و سرد (شش ماه دوم) سال، سامانه‌های مؤثر در شکل‌گیری و انتقال گردوخاک در طی این دو بازه با همدیگر تفاوت ویژه‌ای دارند. توفان‌ها در فصل سرد سال ساختار دینامیکی داشته و غالباً از نوع جبهه‌ای می‌باشند. در دوره سرد سال با استفاده از نقشه‌های فشار متوسط تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰، میدان باد، دیده شد که سامانه‌های مهاجر همراه با بادهای غربی و جت قطبی منجر به شکل‌گیری گردوخاک در غرب ایران شده‌اند. (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹). ذوالفقاری و همکاران (۱۳۸۴) در بررسی همدیدی توفان‌های گردوغباری برای چند موج توفانی در دوره سرد سال نشان دادند که فرود تراز میانی جو و سیکلون‌های زمینی در انتقال گردوغبار از بیابان‌های عراق سوریه و اردن، مؤثر هست. در فصل سرد سال هسته کم ارتفاع و امواج غربی بر روی اروپا و دریای مدیترانه شکل گرفته و ناوه از آن‌ها همراه با هوای سرد به خاورمیانه انتقال می‌یابد. (عطایی و احمدی، ۲۰۱۰).

شکل‌گیری شیو فشار افقی در منطقه گذر بین سامانه کم‌فشار و پرفشار باعث افزایش سرعت باد می‌شوند (Xu et al., 2004). در شرایطی که بیشینه سرعت باد در ارتفاع کمتر از ۳۰۰۰ متری از سطح زمین (۷۰۰ هکتوپاسکال) به بیش از ۱۲ متر بر ثانیه برسد به آن جت‌های سطوح پایین (LLJ) (Low level jet) گفته می‌شود (Blackadar, 1957; Bass et al., 2009; Hoecker, 1963). جت‌های سطوح پایین در شکل‌گیری توفان‌های گردوخاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش کلیدی دارند (Fiedler et al., 2013; Heinold et al., 2013; Allen and Washington, 2014; Marsham et al., 2013). باد شمال یکی از مهم‌ترین عامل‌های انتشار گردوخاک در خاورمیانه و عراق است که به‌واسطه الگوهای همدیدی متفاوت در دو فصل زمستان و تابستان می‌گیرد (Rao et al., 2001; Senafi and Anis, 2015; Mambery, 1983). تأثیر باد شمال تابستانی در گردوخاک عراق و خلیج فارس در مطالعه‌های پیشین اشاره شده است (نوری و همکاران، ۱۳۹۶; Yu et al., 2016; Notaro et al., 2015). رابطه باد شمال و بادهای سطحی در انتشار گردوخاک در تابستان ۲۰۱۰ و کاهش دید افقی در مطالعه Francis و همکاران (۲۰۱۷) تأیید شده است.

نقش جت در توسعه توفان‌های گردوخاک توسط Alharbi و همکاران (۲۰۱۱) مطالعه شده است که نتیجه نشان می‌دهد جت جنب حاره هوای فلات عربستان را به سمت عرض‌های بالا کشیده و جت قطبی هوای عرض‌های بالا را به سمت عرض‌های جنوبی‌تر انتقال می‌دهد و برهم‌کنش

آن دو یکی از عامل‌های ایجادکننده جت سطوح پایین است. انتشار گردوخاک در سرتاسر سال در منطقه بودل (Bodele) در کشور چاد عمدتاً به دلیل جت‌های سطوح پایین است (Washington *et al.*, 2006). حدود ۶۵ درصد از فعالیت‌های گردوخاک بر روی صحرا به دلیل شکست جت‌های شبانه است (Schepanski *et al.*, 2009).

در ایران نیز علیزاده و همکاران ۲۰۱۴ نشان دادند که جت‌های سطوح پایین با جهت شمالی در امتداد مرز ایران و افغانستان واقع در ۳۰۰ تا ۵۰۰ متری سطح زمین در ماه جولای و با بیشینه سرعت باد ماهانه با مقدار ۲۰ متر بر ثانیه در میانه‌های شب می‌وزند. Nicholson (۲۰۱۵) به بررسی گردوخاک در مرز ایران و افغانستان پرداخته است. در این مطالعه به نقش جت سطوح پایین اشاره شده است. جت‌ها از ماه می تا سپتامبر و در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شوند. رنجبر و همکاران ۱۳۹۵ به بررسی گردوخاک‌های غرب کشور پرداخته‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که یکی از عوامل مؤثر در گردوخاک جت سطوح پایین است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که در سامانه‌های جوی منجر به تولید و انتقال گردوخاک در منطقه، جتی با جهت شمال غربی و شمالی در نواحی پست مرکزی و شرقی عراق تشکیل می‌شود.

ویژگی‌ها جت سطوح پایین از جمله سرعت باد افقی، تلاطم عمودی و همچنین افزایش سرعت باد سطحی در شدت و انتشار افقی و عمودی گردوخاک نقش ویژه‌ای دارند. یکی از نقش جت سطوح پایین جو انتقال افقی ذره گردوخاک در یک‌لایه عمیق از جو است (مفیدی ۱۳۹۰). سرعت باد افقی در محور جت نقش مؤثری در انتقال افقی گردوخاک به مناطق دورتر دارد. دیگر بادهای سطوح پایین قدرت انتقال ذرات را تا مدت و مسافت زیادی ندارند اما ذره‌های کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون را به مدت چند روز یا هفته و تا چندین کیلومتر دورتر از منطقه شکل‌گیری جابه‌جا می‌نمایند. آستانه بیشینه سرعت باد جت سطوح پایین برای انتشار گردوخاک بیش از ۱۶ متر بر ثانیه تعیین شده است (Allen and Fiedler *et al.*, 2013; Washington, 2014).

یکی از سازوکارهای که منجر به افزایش سرعت باد سطحی (باد ده متری) می‌شود، انتقال تکانه از جت سطوح پایین (Low level Jet) به سطح زمین است (Fiedler *et al.*, 2013; Schepanski *et al.*, 2009; Knippertz, 2008; Washington and Todd, 2005). وقوع بادهای سطحی قوی عامل اصلی انتشار گردوخاک‌ها می‌باشند. اگر سرعت باد در منطقه‌ای با خاک خشک و پوشش گیاهی تنک از حد آستانه‌ای بیشتر شود؛ ذره‌های گردوخاک را با خود وارد جو می‌نماید (Tegen, 2003; Lu and Shao, 1999; Chen *et al.*, 2013; Shao *et al.*, 2001; Westphal *et al.*, 1988). گرچه آستانه سرعت باد سطحی (نزدیک زمین) مؤثر در انتشار گردوخاک در مناطق مختلف و با توجه به شرایط سطحی خاک متفاوت است. در شرایطی که واداشت‌های جوی سرعت باد را افزایش داده و سرعت باد بتواند به سرعت آستانه محلی غلبه نماید منجر به شکل‌گیری گردوخاک می‌گردد (Marticorena and Bergametti, 1995). آستانه سرعت باد در شکل‌گیری گردوخاک در نواحی بیابانی شمال شرق آسیا بیش از ۶ یا ۷ متر بر ثانیه تعیین شده است (Wang and Fang, 2006; Allen and Washington, 2014; Pokharel and Kaplan, 2017).

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موردبررسی در توفان‌های گردوخاک شناخت دقیق منشأ شکل‌گیری آن‌ها است؛ زیرا نوع و اندازه ذره در نوع و میزان آلاینده‌گی و تیرگی جو، تغییر ویژگی منابع آبی و همچنین سلامت انسان و آبزیان تأثیر ویژه‌ای دارد. همچنین با آگاهی از منطقه دقیق تولید گردوخاک می‌توان راه‌کارهای احتمالی پیش‌گیری را ارائه نمود. بر اساس مطالعه زراسوندی و همکاران (۲۰۱۰) منابع و منشأ اصلی گردوغبارهای وارده به استان خوزستان، دریاچه‌های خشک‌شده و نواحی آبرفتی عاری از پوشش گیاهی جنوب عراق، بیابان‌های النفود و دهناء در شمال عربستان، صحرای بادیه الشام در جنوب شرق سوریه می‌باشند. عطایی و احمدی (۲۰۱۰) نیز بر اساس تصویر ماهواره دو کانون اصلی منطقه غرب بغداد و موصل تا بحرالمح و هور العظیم را معرفی نمودند؛ که یکی منشأ خارجی و دیگری منشأ داخلی محسوب می‌شود. مدل HYSPLIT مدل جوی است که توسط آن می‌توان منشأ گردوخاک را تعیین نمود. در این زمینه مطالعه‌های متعددی انجام شده است. ریوندی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل HYSPLIT منابع اصلی گردوخاک جنوب غرب ایران را محدوده‌ای از شمال عراق، شرق سوریه و شمال عربستان تعیین نمودند.

به‌طور کلی بیشتر مطالعه‌های که از مدل HYSPLIT استفاده شده محدود در حدفاصل شمال عراق، شرق سوریه تا شمال عربستان را به‌عنوان کانون‌های گردو خاک غرب ایران تعیین نموده‌اند. به‌منظور جلوگیری از خسارت‌های احتمالی، اعلام هشدار جهت کاهش آسیب‌های توفان‌های گردو خاک، شناخت منشأ (درون یا برون مرزی)، همچنین سرعت و مسیر حرکت آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. گرچه در مطالعه‌های بسیاری سازوکار شکل‌گیری گردو خاک مورد بررسی قرار گرفته، اما تأثیر جت سطوح پایین و تعیین مشخصه‌های آن شامل آستانه سرعت باد، قدرت و عمق جت در انتشار و شدت گردو خاک دور از نظر مانده است. در این تحقیق به بررسی سرعت و جهت باد در لایه‌های زیرین جو و به‌ویژه جت سطوح پایین و مشخصه‌های آن در انتقال گردو خاک به‌سوی خلیج فارس پرداخته می‌شود. به این منظور یک مورد گردو خاک رخ داده در فصل سرد سال (فوریه ۲۰۱۷- بهمن ۱۳۹۵) که خلیج فارس را تحت تأثیر قرارداد، انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل غرب ایران، خلیج فارس و عراق در شکل ۱ آمده است. ایستگاه‌های آبادان و اهواز در جنوب غرب ایران (استان خوزستان) و بوشهر و خارک (استان بوشهر و منطقه خلیج فارس) و برخی ایستگاه‌های واقع در کشور عراق در شکل ۱ ارائه شده است. نقاط شاهد در شکل‌های تحلیل هم‌دیدگی همانند شکل ۱ با دایره سبزرنگ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های شاهد در ایران و عراق.

به‌منظور انتخاب توفان گردو خاک داده‌های دیدبانی از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. مبنای انتخاب توفان کاهش دید افقی گزارش شده توسط سازمان هواشناسی با کد ۰۶ و ۰۷ بود. کاهش دید افقی به معنای افزایش گردو خاک است. بر اساس این داده‌ها گردو خاک ۱۷ تا ۱۹ فوریه ۲۰۱۷

به‌صورت موردی انتخاب شد. وجود گردو خاک توسط برون داد مدل (Dust Regional Atmospheric Model) DREAM و تصاویر دریافتی از ماهواره MODIS مورد تأیید قرار گرفت.

مدل DREAM، مدلی هواشناسی بوده و بر اساس معادله غیرخطی تفاضل متناهی اویلری برای معادله پیوستگی جرم گردو خاک حل می‌شود. غلظت گردو خاک یکی از معادله‌های حاکم پیش‌یابی در مدل‌های پیش‌بینی عددی جوی است. این مدل با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی به‌ویژه دید افقی در کل جهان توسط کشور اسپانیا اجرا می‌شود. خروجی این مدل تصویری بوده و توزیع دید افقی را در بازه زمانی ۶ ساعته نشان می‌دهد.

منشأ یابی گردو خاک و مسیر ترابرد آن به کمک تصاویر حاصل از مدل (Hybrid Single Particle Lagrangian) HYSPLIT (Integrated Trajectory Model) تحلیل شد. مدل HYSPLIT مدلی است با دو رهیافت لاگرانژی و اویلری که توسط آن می‌توان مسیر پیشین ذرات را در جو ردیابی نمود. این مدل برخط (Online) بوده و با تعیین فاصله زمانی، طول و عرض جغرافیایی ایستگاه شاهد و ارتفاع از سطح زمین، مسیر پس‌گردی (Backward trajectory) ذره تعیین می‌شود. به‌منظور بررسی مسیر پس‌گردی ذره گردو خاک در این تحقیق دو ایستگاه شاهد اهواز و جزیره خارک از ساعت ۱۸ UTC روز ۱۸ فوریه تا ۳۶ ساعت قبل و در ارتفاعات ۵۰۰ و ۷۰۰ متری انتخاب شدند. همچنین به‌منظور تحلیل همدیدی از داده‌های برخط موجود در شبکه جهانی (European Centre for Medium-range) ECMWF (European Reanalysis Weather Forecasting) استفاده شده است (تارنما در منابع). این داده‌ها با تفکیک 0.75° درجه برای منطقه مورد مطالعه استخراج شد و بر اساس آن‌ها گرته‌های (Countour) میانگین فشار تراز دریا برحسب هکتوپاسکال (hPa)، از ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال برحسب متر (m)، سرعت باد ده متری و همچنین سرعت افقی برحسب متر بر ثانیه ($\frac{m}{s}$) و سرعت قائم

باد برحسب پاسکال بر ثانیه ($\frac{pas}{s}$) در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال (معادل ۷۶۲ متری) به‌صورت جداگانه ترسیم شد. از آنجایی که شکل‌گیری جت سطوح پایین نقش مهمی در شکل‌گیری و انتقال گردو خاک از سمت عراق به ایران دارد در بررسی‌ها تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال انتخاب شد. این تراز موقعیت و سرعت جت سطح پایین جو را به‌خوبی نشان می‌دهد. سرعت باد در این تراز می‌تواند معرف خوبی برای تغییر سرعت باد در بخش‌های زیرین تروپوسفر است. علاوه بر ساختار همدیدی و به‌منظور تحلیل‌های بیشتر سرعت باد ده متری جهت تعیین آستانه سرعت باد، برش عمودی و افقی جهت نمایش جت سطوح پایین و گل باد جهت معرفی باد غالب منطقه ارائه خواهند شد. در بخش اول یافته‌ها، به بررسی سازوکار شکل‌گیری گردو خاک و استفاده از تصویر ماهواره در آشکارسازی آن پرداخته شد. در بخش دوم فرآیندهای که منجر به ترابرد گردو خاک به سوی استان خوزستان و خلیج فارس شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج

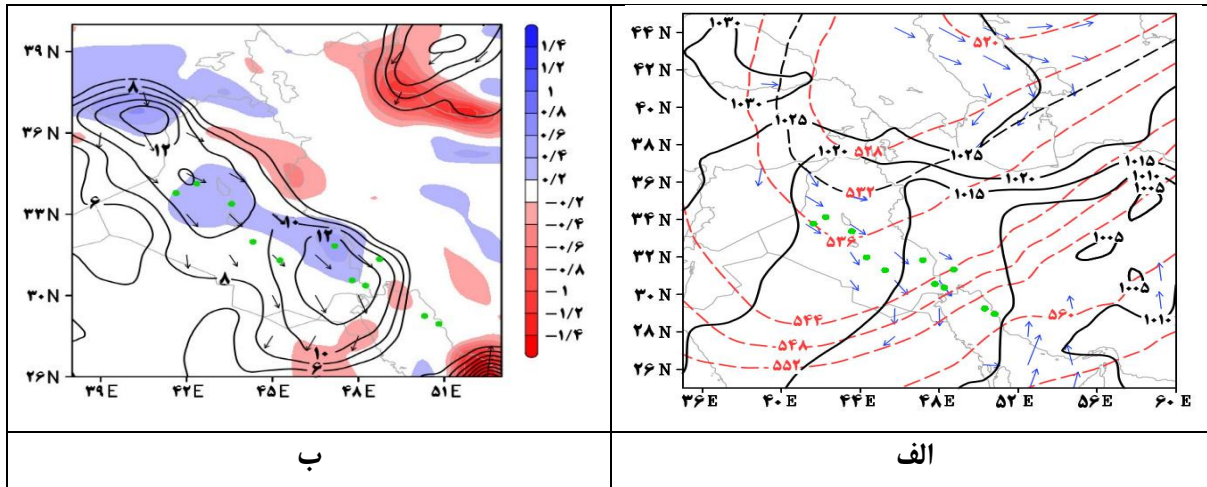
جدول ۱ داده‌های دیدبانی دید افقی را در سه ایستگاه آبادان و اهواز در طی روزهای ۱۸ تا ۱۹ فوریه (۳۰ بهمن و ۱ اسفند ۱۳۹۵) نشان می‌دهد. در روز ۱۸ فوریه ساعت ۰۳ UTC دید افقی در شهرهای اهواز و آبادان به ۳۰۰۰ متر کاهش یافته و در ساعت‌های بعد (۰۶، ۰۹ و ۱۲) دید افقی در شهر اهواز تا ۵۰۰ متر نیز کاهش یافته است. بیشترین کاهش دید در شهر اهواز و در روز ۱۸ فوریه تجربه شده است. در ساعت‌های بعدی دید افقی افزایش یافته که نشان‌دهنده کاهش غلظت آن است اما همچنان تا ساعت ۱۵ روز ۱۹ فوریه در منطقه تداوم دارد در جزیره خارک کاهش دید از ساعت ۱۲ روز ۱۸ فوریه آغاز شده و تا ساعت ۱۵ روز ۱۹ فوریه ادامه دارد. به این ترتیب دید افقی در خارک ۹ ساعت بعد از کاهش دید در اهواز و آبادان مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده ترابرد گردو خاک به خلیج فارس است.

جدول ۱: دیدبانی باد و دید افقی در شهرهای اهواز، آبادان (خوزستان) و جزیره خارک (خلیج فارس) در تاریخ ۱۸ و ۱۹ فوریه ۲۰۱۷.

		آبادان			اهواز			خارک		
روز	ساعت (UTC)	جهت باد	سرعت باد (m/s)	دید افقی (m)	جهت باد	سرعت باد (m/s)	دید افقی (m)	جهت باد	سرعت باد (m/s)	دید افقی (m)
۱۸	۰	NW	۴	۱۰-Km	NE	۱	۱۰-Km			
۱۸	۳	W	۴	۳۰۰۰	NW	۳	۲۵۰۰	NW	۱۲	۱۰-Km
۱۸	۶	W	۴	۵۰۰	W	۲	۵۰۰	NW	۱۰	۱۰-Km
۱۸	۹	NW	۳	۲۰۰۰	NW	۲	۵۰۰	NW	۸	۱۰-Km
۱۸	۱۲	W	۵	۳۰۰۰	W	۲	۷۰۰	NW	۷	۳۰۰۰
۱۸	۱۵	NW	۴	۱۸۰۰	W	۲	۱۰۰۰	NW	۸	۱۰۰۰
۱۸	۱۸	N	۳	۳۰۰۰	NW	۱	۱۰۰۰	-	-	-
۱۸	۲۱	N	۱	۲۵۰۰	NW	۱	۱۴۰۰	-	-	-
۱۹	۰	W	۱	۲۵۰۰	S	۱	۱۵۰۰	-	-	-
۱۹	۳	W	۲	۲۰۰۰	NW	۲	۱۵۰۰	N	۴	۱۲۰۰
۱۹	۶	NW	۳	۵۰۰۰	SE	۱	۱۱۰۰	NW	۶	۱۴۰۰
۱۹	۹	NW	۵	۱۰-Km	N	۲	۲۸۰۰	NW	۷	۱۴۰۰
۱۹	۱۲	NW	۳	۱۰-Km	NW	۳	0	NW	۷	۲۰۰۰
۱۹	۱۵	W	۲	۱۰-Km	W	۲	۷۰۰۰	NW	۶	۴۰۰۰
۱۹	۱۸	-	۰	۱۰-Km	W	۱	۱۰-Km	-	-	-

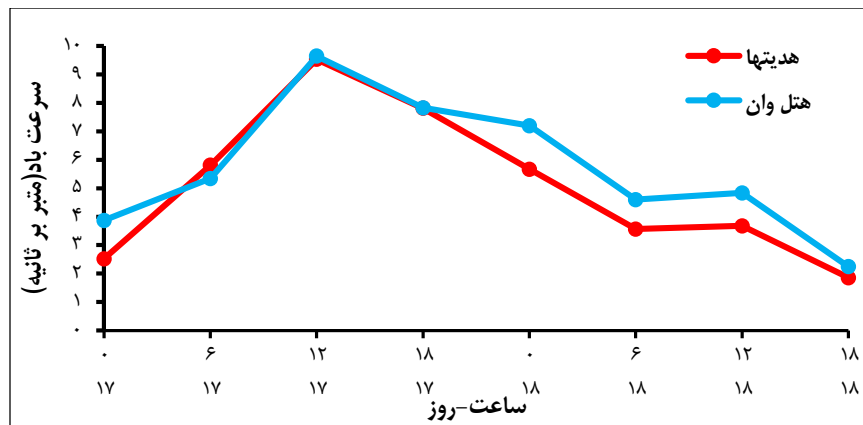
در طی این دو روز جهت باد در هر سه ایستگاه شمال، شمال غرب و غرب است؛ که در بخش بعدی با نتیجه مدل HYSPLIT و گل باد مقایسه خواهد شد. سرعت باد در شهر اهواز نسبت به دو شهر دیگر بسیار کمتر است. سرعت وزش باد در خارک در طی ساعت‌های وقوع گردو خاک کاهش یافته است که نشان‌دهنده برون‌مرزی بودن آن است.

در ساعت UTC ۱۲ روز ۱۷ فوریه، کم‌فشار ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در بخش‌های شرقی ایران به واسطه حضور ناوه ارتفاعی عرض‌های بالاتر فعال شده و ناوه آن تا شمال عراق گسترش یافته است (شکل ۲ الف). مرکز پرفشار ۱۰۳۰ هکتوپاسکال، بر روی دریای سیاه قرار داشته و پشته آن به شمال عربستان گسترش یافته است (شکل ۲ الف). در حدفاصل بین آن دو شیو فشار افزایش یافته و باد از پرفشار به سوی کم‌فشار توسعه یافته است. جهت باد شمال غربی بوده و از شرق سوریه، شمال غرب عراق تا شمال خلیج فارس را در برگرفته است (شکل ۲ الف). این بادهای از نوع باد شمال بوده و یکی از ساختارهای شکل‌گیری گردو خاک در این منطقه هستند. بیشینه سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه (۲۸ نات) در شمال غرب عراق و شرق سوریه در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود (شکل ۲ ب).

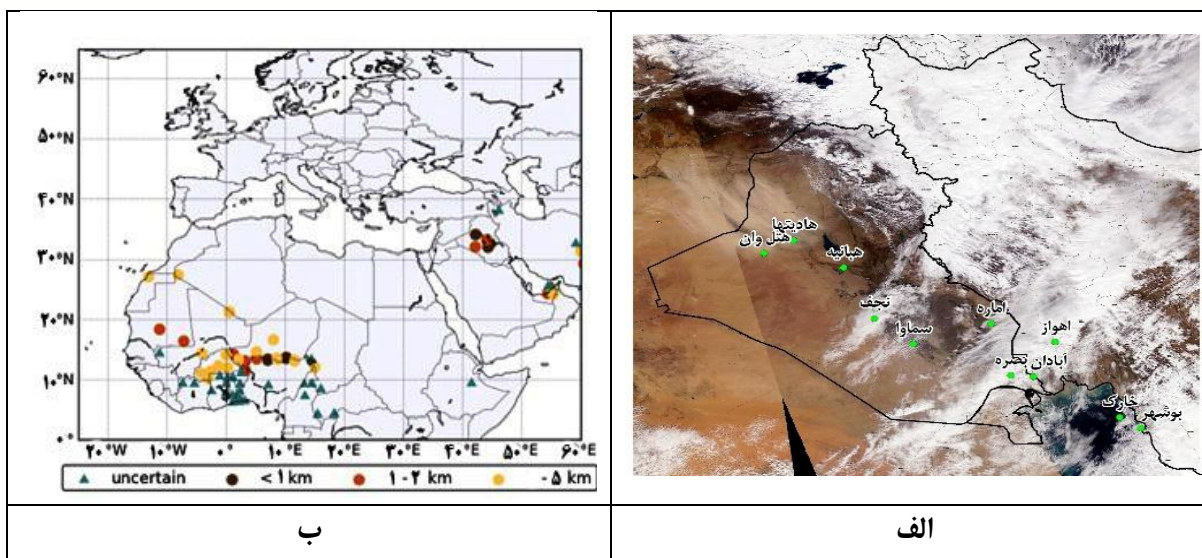


شکل ۲: الف) خط مشکی گرته فشار میانگین تراز دریا (هکتوپاسکال) و خط قرمز ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (متر)، پیکان جهت باد (آبی)، ب) خط مشکی سرعت باد (متر بر ثانیه) و مناطق هاشور خورده سرعت قائم (پاسکال بر ثانیه) سطح ۹۲۵ هکتوپاسکال ۱۸ UTC روز ۱۷ فوریه ۲۰۱۷، عراق و ایران.

سه ایستگاه آنا، هتل وان و هدیتها در مرکز بیشینه سرعت باد قرار دارند. تغییر زمانی سرعت باد ده متری در ایستگاه هتل وان و هدیتها در طی روزهای ۱۷ و ۱۸ فوریه ترسیم شده است (شکل ۳). از ساعت ۰۰ تا ۱۲ UTC روز ۱۷ فوریه در هدیتها سرعت باد از ۲/۵ به ۹/۵ متر بر ثانیه و در هتل وان از ۳/۸ تا ۹/۶ متر بر ثانیه افزایش داشته‌اند (شکل ۳). افزایش سرعت باد ده متری همراه با شکل‌گیری بیشینه سرعت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال است. به کمک تصویر ماهواره MODIS می‌توان مشاهده نمود در شرق سوریه و شمال غرب عراق توده گردو خاکی شکل گرفته شده است (شکل ۴ الف). به این ترتیب شکل‌گیری باد شمال با سرعت ۱۴ متر بر ثانیه در این مناطق منجر به افزایش سرعت باد ده متری تا ۹ متر بر ثانیه شده و انتشار گردو خاک را به دنبال داشته است. در تصویر حاصل از مدل DREAM کاهش دید افقی در طی ساعت‌های ۱۲ تا ۱۸ UTC در بخش‌های مرکزی عراق رخ داده است (شکل ۴ ب) که می‌توان دریافت در این ساعت‌ها توفان گردو خاک به سمت جنوب شرق حرکت نموده و بخش‌های مرکز عراق را در بر گرفته است.



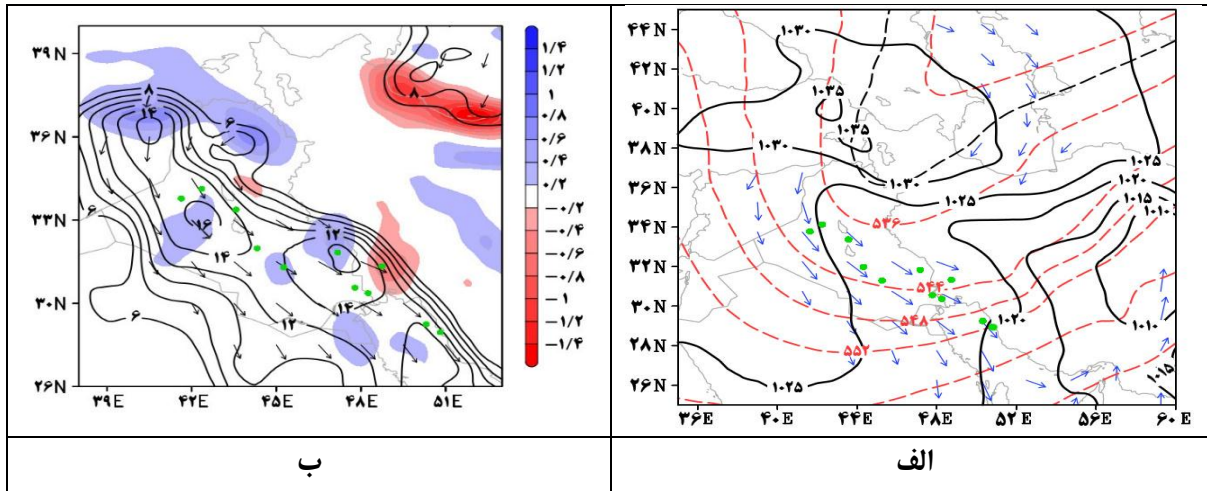
شکل ۳: سرعت باد ده متری در ایستگاه‌های هتل وان و هدیتها در طی روزهای ۱۷ تا ۱۹ فوریه ۲۰۱۷، غرب عراق.



شکل ۴: الف) تصویر ماهواره MODIS روز ۱۷ فوریه عراق و ایران، ب) برون داد دید افقی مدل DEREAM برای ساعت ۱۲ تا ۱۸ UTC روز ۱۷ فوریه، ۲۰۱۷.

در جدول ۱ بیشترین کاهش دید افقی در اهواز و آبادان در ساعت ۰۶ UTC روز ۱۸ فوریه و در خارک در ساعت ۱۵ همان روز رخ داده است که نشان می‌دهد بیشترین شدت گردو خاک به استان خوزستان رسیده و در طی ۹ ساعت بعد به سوی استان بوشهر حرکت نموده است. در این بخش فرآیندهای مؤثر در انتقال گردو خاک به سوی خلیج فارس بررسی می‌شود. در ساختار همیدی، گرته ی فشار سطحی افزایش کم فشار را به ۱۰۱۰ هکتوپاسکال و حرکت به سمت شرق ایران نشان می‌دهد (شکل ۵ الف)، اما پرفشار به ۱۰۳۵ هکتوپاسکال تقویت و به سمت عرض‌های پایین‌تر انتقال یافته است (شکل ۵ الف). گسترش پشته عمیقی از آن به غرب عراق و عربستان منجر به تشدید شیو فشاری و بادها شمال تا ۱۶ متر بر ثانیه در این مناطق شده است (شکل ۵ ب). ایستگاه‌های هبانیه و نجف در عراق در جلوی سلول بیشینه باد قرار دارند. افزایش ۲ متر بر ثانیه‌ای سرعت باد، انتقال بیشینه سرعت باد به بخش‌های غربی عراق و جهت شمال غربی بادها سه عامل مهم در ترابرد گردو خاک به سوی خوزستان و خلیج فارس هستند.

در ساختار باد ۹۲۵ هکتوپاسکال بیشینه سرعت باد دیگری با سرعت ۱۶ متر بر ثانیه در جنوب شرق عراق و جنوب غرب ایران دیده می‌شود که می‌تواند در ترابرد گردو خاک مؤثر باشد. ایستگاه‌های اماره، سماوا، بصره در عراق و اهواز و آبادان در ایران در محدوده آن قرار دارند.

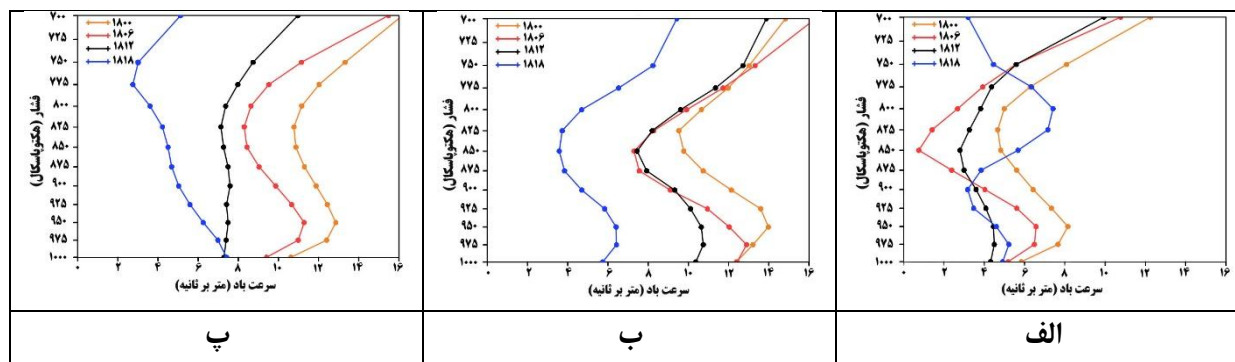


شکل ۵: الف) خط مشکی گرده فشار میانگین تراز دریا (هکتوپاسکال) و خط قرمز ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (متر)، پیکان جهت باد (آبی)، ب) خط مشکی سرعت باد (متر بر ثانیه) و مناطق هاشور خورده سرعت قائم (پاسکال بر ثانیه) سطح ۹۲۵ هکتوپاسکال UTC ۱۸ روز ۱۸ فوریه، ۲۰۱۷، عراق و ایران.

به منظور بررسی نقش جت در ترابرد گردوخاک ایستگاه بصره منطبق بر بیشینه باد دوم، اهواز در استان خوزستان و خارک در خلیج فارس انتخاب شدند. در اهواز و خارک (شکل ۶ الف و ب) سرعت باد در تراز ۹۵۰ هکتوپاسکال به بیشینه مقدار رسیده است. سرعت باد در اهواز ۸/۱۵ و در خارک ۱۳/۹۸ متر بر ثانیه بوده و گردوخاک نیز شکل گرفته است. سرعت باد اهواز از آستانه تعریف شده در جت سطوح پایین کمتر است اما دیگر مشخصه‌های آن را دارد که در ادامه شرح داده می‌شود. در اهواز و خارک مشخصه‌های جت مانند کاهش سرعت باد در لایه‌های بالاتر (برش منفی) در تمام ساعات‌های روز ۱۸ فوریه مشاهده می‌شود گرچه در ۱۲ اندکی ضعیف می‌شود اما مجدداً در ساعت ۱۸ تقویت شده است. نمایه عمودی باد در بصره در ساعت ۰۰ و ۰۶ شکل‌گیری بیشینه باد را در تراز هکتوپاسکال نشان می‌دهد (شکل ۶ پ). ساختار جت سطوح پایین در اهواز و خارک در ساعت ۱۲ و ۱۸ با بصره تفاوت دارد. در بصره از ساعت ۱۲ به بعد جت سطوح پایین شکسته شده و از بین رفته است. در هر سه ایستگاه از ساعت ۰۰ تا ۱۸ UTC تندی باد کاهش یافته است (شکل ۶). مشخصه‌های جت سطوح پایین در جدول ۲ با جزئیات بیشتری ارائه شده است.

در اهواز، خارک و بصره در روز ۱۸ فوریه بیشینه سرعت باد به ترتیب ۸/۱۵، ۱۳/۹۸ و ۱۲/۸۶ متر بر ثانیه هست، همچنین برش مثبت باد در ساعت ۰۰ UTC به ۵/۷۱، ۴/۶۲ و ۸/۷۷ متر بر ثانیه رسیده است که تلاطم سطحی شدیدی را ایجاد می‌کند. وجود تلاطم سطحی شرایط را برای اختلاط عمودی گردوخاک مهیا نموده است. در ساعت ۰۶ UTC بیشینه سرعت باد در هر سه ایستگاه کاهش یافته اما بیشترین برش منفی باد با ۵/۸۲، ۵/۵۹ و ۲/۹۸- شکل گرفته است. برش منفی معرف قدرت جت در لایه‌های بالاتر از محور آن است. جت‌های سطوح پایین با برش منفی قوی پس‌از آن که در میانه روز دچار شکست یا تضعیف شوند، تلاطم جوی را افزایش می‌دهند که در نتیجه آن گردوخاک به ارتفاع‌های بالاتر انتقال یافته و امکان ترابرد افقی و حرکت به فاصله‌های دورتر فراهم می‌شود. به نظر می‌رسد شکل‌گیری جت سطوح پایین در جنوب شرق عراق و جنوب غرب ایران عامل مهمی در توسعه گردوخاک در این منطقه باشد. همچنین با توجه به این که سرعت باد افقی در محور جت نقش مؤثری در انتقال افقی گردوخاک به مناطق دورتر دارد. در تحقیق حاضر دیده می‌شود که شرایط ترابرد گردوخاک به سوی خلیج فارس فراهم شده است.

نتیجه حاضر با نتیجه تحقیق مفیدی ۱۳۹۰ همخوانی دارد. ترابرد گردو خاک در تصویر ماهواره MODIS و مدل DREAM به خوبی دیده می شود (شکل ۷ الف و ب).

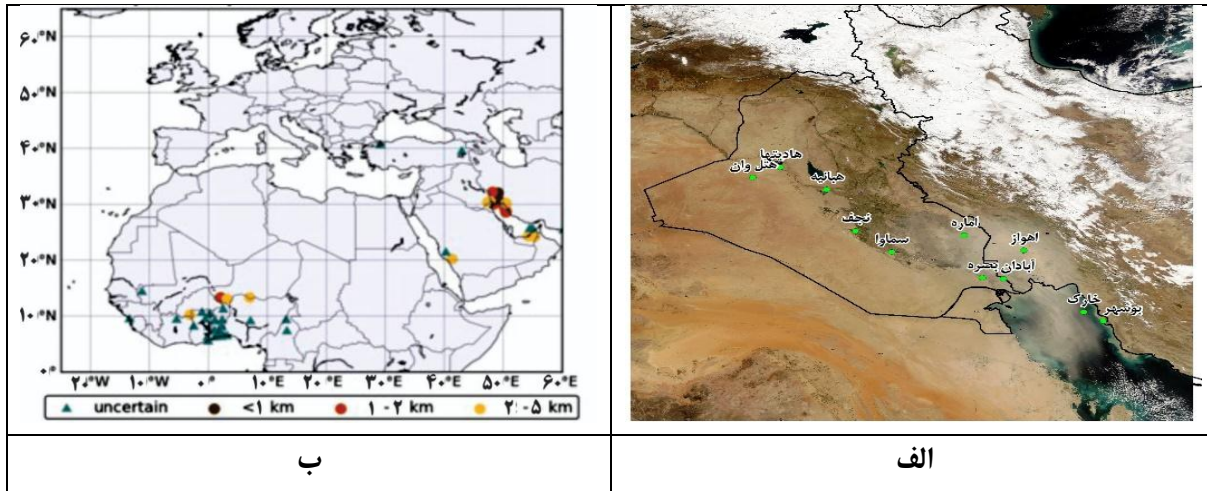


شکل ۶: نمایه عمودی باد (متر بر ثانیه) در ساعت ۰۰، ۰۶، ۱۲، ۱۸ و ۱۸ UTC روز ۱۸ فوریه؛ الف) ایستگاه اهواز (خوزستان)، ب) خارک (خلیج فارس)؛ پ) بصره (عراق).

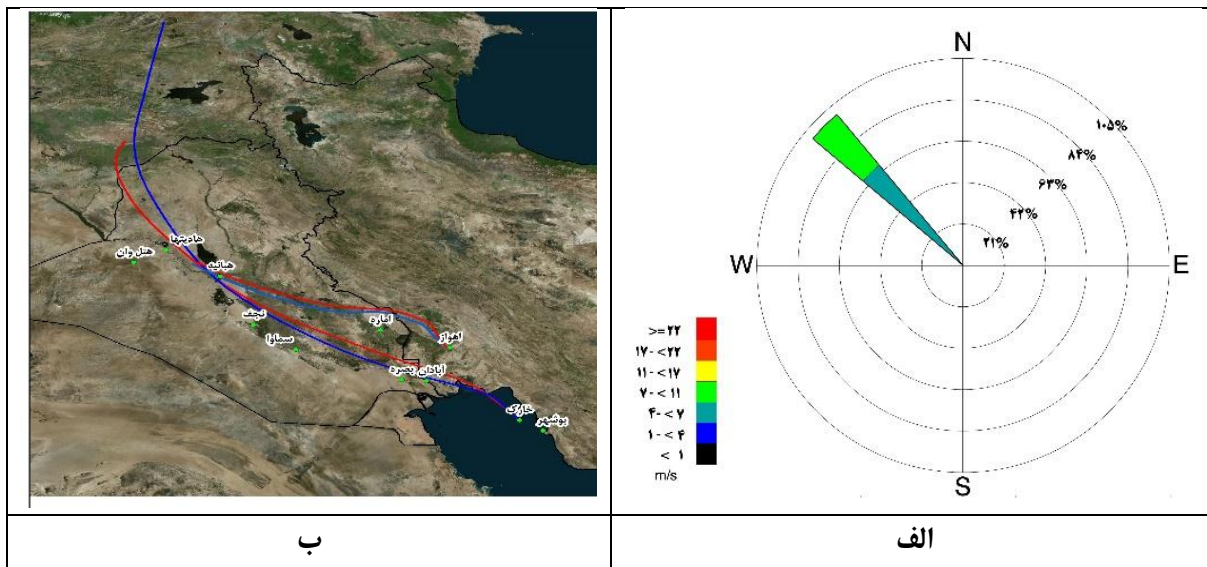
جدول ۲: مشخصه های جت سطوح پایین در اهواز (خوزستان)، خارک (خلیج فارس) و بصره (عراق) در ساعت های ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ روز ۱۸ فوریه.

ایستگاه	ساعت UTC	۰۰	۰۶	۱۲	۱۸
اهواز	بیشینه باد	۸/۱۵	۶/۵۷	۴/۵۰	۵/۲۲
	برش مثبت	۵/۷۱	۴/۶۷	۱/۳۸	۲/۲۸
	برش منفی	-۳/۴۸	-۵/۸۲	-۱/۷۱	-۲/۰۵
خارک	بیشینه باد	۱۳/۹۸	۱۲/۸۹	۱۰/۷۴	۶/۴۳
	برش مثبت	۴/۶۲	۳/۸۱	۲/۷۶	۱/۰۳
	برش منفی	-۴/۴۵	-۵/۵۹	-۳/۲۹	-۲/۸۴
بصره	بیشینه باد	۱۲/۸۶	۱۱/۲۸	۷/۴۹	۶/۹۹
	برش مثبت	۸/۷۷	۵/۹۸	۲/۰۹	۴
	برش منفی	-۲/۰۹	-۲/۹۸	-	-

گل باد ترسیم شده در ایستگاه خارک باد غالب شمال غربی را با سرعت ۱۱ متر بر ثانیه نشان می دهد که با تحلیل های همدیدی هماهنگی داشته و نشان دهنده باد شمال غرب در منطقه است (شکل ۸ الف). همچنین برون داد مدل HYSPLIT (شکل ۸ ب) بادهای شمال غربی را در این ایستگاه تأیید نموده و مسیر حرکت توفان را از عراق به سمت ایران و خلیج فارس به خوبی نشان می دهد. به این ترتیب گل باد و مدل HYSPLIT در تعیین مسیر حرکت باد و ذره هماهنگ هستند.

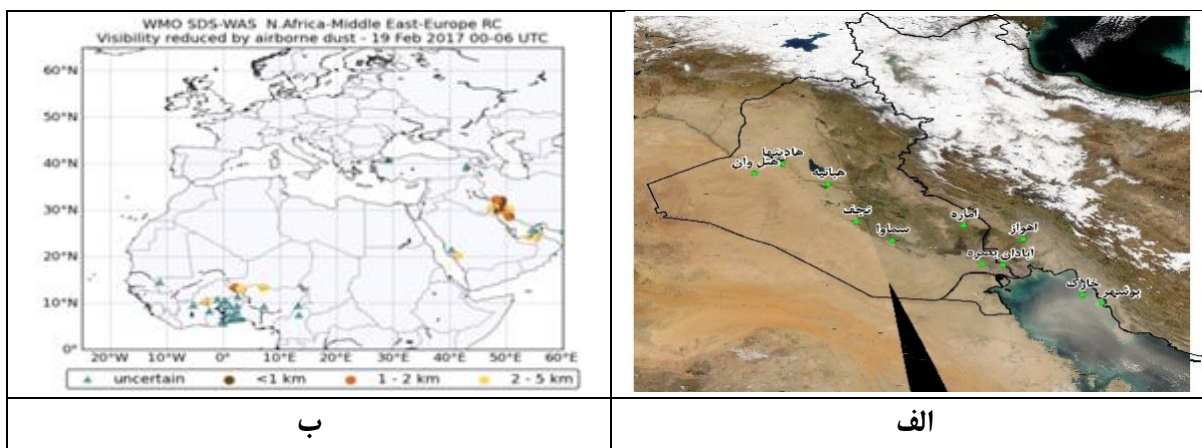


شکل ۷: الف) تصویر ماهواره MODIS روز ۱۷ فوریه (عراق و ایران)، ب) برون داد دید افقی مدل DREAM. ساعت ۱۸ UTC، روز ۱۸ فوریه ۲۰۱۷.



شکل ۸: الف) گل باد جزیره خارک (خلیج فارس)، ب) برون داد مدل HYSPLIT در اهواز (خوزستان) و خارک (خلیج فارس). منتهی به ساعت ۱۸ UTC روز ۱۸ فوریه، بازه زمانی پس گردی ۳۶ ساعت، ارتفاع ذره ۵۰۰ و ۷۰۰ متری، ۲۰۱۷.

تداوم شرایط یادشده و وجود گردو خاک در لایه‌های بالاتر جو منجر به انتقال افقی گردو خاک تا روز ۱۹ فوریه هست که تا میانه‌های خلیج فارس رسیده است (شکل ۹ الف). برون داد مدل DREAM نیز تداوم کاهش دید در استان خوزستان و انتقال گردو خاک را به سمت خلیج فارس نشان می‌دهد (شکل ۹ ب). بر اساس جدول ۱ در روز ۱۹ فوریه از ساعت ۰۰ تا ۰۹ UTC کاهش دید در اهواز، آبادان و بوشهر تداوم داشته است که با شکل ۹ هماهنگی دارد.



شکل ۹: الف) تصویر ماهواره MODIS روز ۱۷ فوریه، عراق و ایران، ب) برون داد دید افقی مدل DEREAM، ساعت ۱۲ UTC روز ۱۹ فوریه.

بحث و نتیجه گیری

به دلیل تأثیر گردو خاک بر کیفیت آب، زیست آبیان و همچنین حمل و نقل دریای و آبی شناخت سازوکار و ترابرد گردو خاک به این مناطق اهمیت ویژه ای دارد. تحقیق حاضر، حاصل بررسی سازوکار همدیدی و جت سطوح پایین در شکل گیری گردو خاک بر روی عراق و ترابرد آن به سوی خوزستان و خلیج فارس هست. گردو خاک ۱۷ تا ۲۰ فوریه سال ۲۰۱۷ سه روز تداوم داشت و نسبتاً شدید بود به طوری که دید افقی در اهواز تا ۵۰۰ متر و در آبادان و بوشهر تا ۱۰۰۰ متر کاهش داشت. سازوکار همدیدی نشان داد که با استقرار کم فشار در بخش های شرقی ایران و گسترش زبانه کم فشار به غرب ایران و بخش های از عراق و همچنین شکل گیری مرکز پرفشار بر روی ترکیه و دریای سیاه با گسترش پشته فشاری آن به سمت غرب و جنوب عراق، بین آن دو شیو فشاری شکل گرفت. شیو فشاری منجر به توسعه بادهای شمالی غربی، در بخش های شمال غرب عراق و شرق سوریه شد، مطابق با Xu *et al.*, 2004 این نوع سازوکار همدیدی به دلیل جهت باد و منطقه شکل گیری به باد شمال شهرت دارد و یکی از سازوکارهای متداول در انتشار گردو خاک در تابستان و زمستان است که در تحقیق های پیشین اشاره شده است (Francis *et al.*, 2017; Rao *et al.*, 2001; Al Senafi and Anis, 2015); بنابراین سازوکار همدیدی منجر به شکل گیری گردو خاک در ۱۷ تا ۲۰ فوریه ۲۰۱۷ باد شمال زمستانی می باشد گرچه در بیشتر مطالعه های پیشین (نوری و همکاران، ۱۳۹۶؛ Notaro *et al.*, 2015؛ Yu *et al.*, 2016) به نقش باد شمال تابستانی در گردو خاک خلیج فارس اشاره نموده اند. در این مطالعه تأثیر باد شمال زمستانی در گردو خاک به خوبی آشکار شده است. به نظر می رسد شکل گیری جت سطوح پایین در جنوب شرق عراق و جنوب غرب ایران عامل مهمی در توسعه گردو خاک در این منطقه باشد که در تحقیق های Heinold و همکاران (۲۰۱۳)؛ Marsham و همکاران (۲۰۱۳)؛ Schepanski و همکاران (۲۰۰۹) و Knippertz (۲۰۰۸) به آن اشاره شده است. در تحقیق های پیشین Fielder و همکاران (۲۰۱۳) و Allen و Washington (۲۰۱۴) آستانه سرعت باد ۱۶ متر بر ثانیه در ترازهای زیرین جو برای شکل گیری گردو خاک تعیین شده است که در تحقیق حاضر نیز بیشینه سرعت باد شمال در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال به ۱۴ تا ۱۶ متر بر ثانیه (۲۸ تا ۳۲ نات) رسید؛ بنابراین افزایش سرعت باد تراز ۹۲۵ به آستانه ۱۶ متر بر ثانیه عامل اولیه شکل گیری گردو خاک بر روی عراق می باشد. در یکی از رویدادها، آستانه سرعت باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکالی ۱۴ متر بر ثانیه بود که ۲ متر بر ثانیه نسبت به آستانه های تعیین شده در تحقیق های دیگر (Allen and Washington, 2014؛ Fiedler *et al.*, 2013) کمتر است.

افزایش سرعت باد در لایه‌های زیر جو (سطح ۹۲۵ هکتوپاسکال) به افزایش سرعت باد ده متری در شمال غرب عراق منجر شد، به طوری که در ایستگاه هتل وان و هدیتها، سرعت باد ده متری در طی ۱۲ ساعت از ۰۰ تا ۱۲ UTC از ۲ به ۹ متر بر ثانیه افزایش یافت. افزایش سرعت باد ده متری به واسطه افزایش سرعت باد در محور جت سطوح پایین در مطالعه‌های پیشین (Fielder et al., 2013; Knippertz, 2008; Schepanski et al., 2009) اشاره شده است که در مطالعه حاضر نیز مشاهده شد؛ بنابراین شکل‌گیری جت سطوح پایین بر روی عراق منجر به افزایش سرعت باد ده متری شده به ۹ متر بر ثانیه شده است. در نتیجه آن ذره‌های گردو خاک از سطح جدا شده (Chen; Shao et al., 2011; Tegen, 2003; Lu and Shao, 1999; et al., 2013) و به لایه‌های زیر جو انتقال می‌دهد (مطابق با مفیدی، ۱۳۹۰).

در طی روز ۱۸ فوریه در جنوب شرق عراق (بصره) و جنوب غرب ایران (اهواز) و خلیج فارس (خارک) مشخصه‌های جت سطوح پایین مشاهده شد. سطح شکل‌گیری جت تراز ۹۵۰ هکتوپاسکال، بیشینه سرعت باد بین ۸/۱۵ تا ۱۳/۹۸، برش مثبت بین ۴/۶۲ تا ۸/۷۷ و برش منفی بین ۲/۹۸- تا ۵/۵۸- متر بر ثانیه تعیین شدند که بر اساس همگی معرف مشخصه‌های جت سطوح پایین هستند. گرچه در اهواز بیشینه سرعت باد از آستانه تعیین شده در تحقیق‌های پیشین کمتر است. در اهواز و خارک در تمام ساعت‌های روز و در بصره فقط در ساعت‌های ۰۰ و ۰۶ UTC مشخصه‌های جت وجود داشت. شکل‌گیری جت سطوح پایین، منجر به افزایش تلاطم شده و شرایط برای انتقال قائم و افقی گردو خاک را شد. به این ترتیب گردو خاک شکل گرفته بر روی عراق تا دو روز بعد تداوم داشته و میانه‌های خلیج فارس انتقال یافت. به طور کلی شکل‌گیری جت سطوح پایین (باد شمال) در تراز ۹۵۰ هکتوپاسکال در نتیجه ساختار همدیدی منجر به افزایش سرعت باد ده متری شده و گردو خاک را در مناطق بیابانی عراق ایجاد می‌نماید. جهت شمال غربی باد توده خاک را به سوی خلیج فارس انتقال می‌دهد.

مدل HYSPLIT مسیر حرکت ذره را در ارتفاع ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال منطبق با بادهای شمال غربی در راستای انتقال گردو خاک به سمت ایران به خوبی تأیید نمود. جهت شمال غربی باد شمال در میدان باد تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال، مسیر پس گردی در مدل HYSPLIT و گل باد منطقه هم‌خوانی داشتند. هر سه جهت باد را شمال غربی نشان داده و انتقال گردو خاک از عراق به سمت خلیج فارس را تأیید کردند. در مطالعه حاضر منشأ گردو خاک ۱۷-۱۹ فوریه ۲۰۱۷ خلیج فارس توسط مدل HYSPLIT شمال غرب عراق و شرق سوریه تعیین شد که با مطالعه ریوندی و همکاران (۱۳۹۲) و نوری و همکاران (۱۳۹۶) هماهنگی دارد؛ بنابراین مدل HYSPLIT مدل مناسبی به منظور منشأ یابی گردو خاک و همچنین مسیر ترابرد آن می‌باشد. گرچه انتخاب بازه زمانی و ارتفاع اهمیت بسیاری در تعیین صحیح مسیر ذره دارد و باید مورد توجه قرار گیرد. در گردو خاک‌های که به ارتفاع‌های بالاتر جو می‌رسند، برای مسیر ذره باید ارتفاع‌های بالاتر تا ۳۰۰۰ متری در نظر گرفت.

علاوه بر مدل HYSPLIT، تصویر ماهواره مودیس و مدل DREAM نیز بیابان‌های عراق و شرق سوریه را عنوان کانون گردو خاک خلیج فارس تأیید نمودند. به دلیل هماهنگی مناسب برون داد مدل DREAM با تصویر ماهواره و با کاهش دید افقی گزارش شده در ایستگاه، مدل قابل اعتمادی در تعیین منطقه گردو خاک هست.

تحقیق حاضر مطالعه موردی بوده و به منظور شناخت دقیق‌تر سازوکار متفاوت که منجر به انتقال گردو خاک به خلیج فارس می‌شوند بهتر است مطالعه‌های بیشتری انجام گیرد.

سپاسگزاری

لازم به ذکر است مقاله حاضر حاصل تحقیق مستقل و شخصی است. از هیچ‌گونه طرح یا پایان‌نامه دانشجویی استخراج نشده است. از ریاست محترم و معاونت پژوهشی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی سپاس گزارم که شرایط و محیط مناسبی در راستای تهیه مقاله برای این‌جانب فراهم نمودند.

منابع

- خسروی، م.، طاووسی، ت. و رئیس پور، ک.، ۱۳۸۹. تحلیل همدیدی سامانه‌های گردوغباری در استان خوزستان. جغرافیا و توسعه، شماره بیستم، صفحات ۱۱۸-۹۷.
- ذوالفقاری، ح. و عابد زاده، حیدر.، ۱۳۸۴. تحلیل سینوپتیکی طوفان‌های گردوغباری در غرب ایران، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۶، صفحات ۱۷۵-۱۷۱.
- رنجبر سعادت‌آبادی، ع.، میهن پرست، م. و نوری، ف.، ۱۳۹۵. بررسی پدیده گردوغبار در غرب ایران از دیدگاه هواشناختی مطالعه بلندمدت و کوتاه‌مدت مجله علمی و ترویجی نیوار، بهار و تابستان، شماره ۹۲، صفحات ۶۶-۵۳.
- ریوندی، ا.، میر رکنی، م. و محمدی‌ها، ا.، ۱۳۹۲. بررسی تشکیل و انتشار توفان‌های گردو خاک ورودی به غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از مدل پخش لاکرانژی ذرات HYSPLIT نشریه پژوهش‌های اقلیمی، ۴(۱۳-۱۴): صفحات ۲۸-۱۵.
- عطایی، ه. و احمدی، ف.، ۲۰۱۰. بررسی گردوغبار به‌عنوان یکی از معضلات زیست‌محیطی جهان اسلام مطالعه موردی: استان خوزستان، مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام (ICIWG, 2010).
- مفیدی، عباس. و جعفری، س.، ۱۳۹۰. بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع توفان‌های گردوغباری تابستانه در جنوب غرب ایران. مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. سال دوم. صفحات ۴۵-۱۷.
- نوری، ف.، رنجبر، ع.، کرمی، س.، صحت، س. و نیک‌فال، ا. ح.، ۱۳۹۶. مطالعه توفان‌های گردو خاک مؤثر بر شمال خلیج فارس در یک دوره آماری ده‌ساله (۲۰۰۷-۲۰۱۷). چهارمین کنفرانس بین‌المللی اقیانوس‌شناسی خلیج فارس، کتابخانه ملی، بهمن ۱۳۹۶، تهران.
- Alharbi, B. H., Maghrabi, A. and Tapper, N., 2013.** The March 2009 dust event in Saudi Arabia: Precursor and supportive environment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(4), pp.515-528.
- Alizadeh-Choozari, O., Zawar-Reza, P. and Sturman, A., 2014.** The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric research*, 143: 328-341.
- Allen, C. J. and Washington, R., 2014.** The low-level jet dust emission mechanism in the central Sahara: Observations from Bordj-Badji Mokhtar during the June 2011 Fennec Intensive Observation Period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6): 2990-3015.
- Al Senafi, F. and Anis, A., 2015.** Shamals and climate variability in the Northern Arabian/Persian Gulf from 1973 to 2012. *International Journal of Climatology*, 35(15): 4509-4528.
- Baas, P., Bosveld, F.C., Klein Baltink, H. and Holtslag, A. A. M., 2009.** A climatology of nocturnal low-level jets at Cabauw. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8): 1627-1642.
- Bishop, J. K., Davis, R. E. and Sherman, J. T., 2002.** Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, 298(5594): 817-821.
- Blackadar, A. K., 1957.** Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 38(5): 283-290.
- Chen, S., Huang, J., Zhao, C., Qian, Y., Leung, L. R. and Yang, B., 2013.** Modeling the transport and radiative forcing of Taklimakan dust over the Tibetan Plateau: A case study in the summer of 2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2): 797-812.
- Claustre, H., Morel, A., Hooker, S. B., Babin, M., Antoine, D., Oubelkheir, K., Bricaud, A., Leblanc, K., Queguiner, B. and Maritorena, S., 2002.** Is desert dust making oligotrophic waters greener?. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 107-1.
- 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.
- Francis, D., Eayrs, C., Chaboureaud, J. P., Mote, T., and Holland, D. M., 2019.** A meandering polar jet caused the development of a Saharan cyclone and the transport of dust toward Greenland, *Adv. Sci. Res.*, 16: 49-56.
- Fiedler, S., Schepanski, K., Heinold, B., Knippertz, P. and Tegen, I., 2013.** Climatology of nocturnal low-level jets over North Africa and implications for modeling mineral dust emission. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12): 6100-6121.

- Gao, Y., Fan, S. M. and Sarmiento, J. L., 2003.** Aeolian iron input to the ocean through precipitation scavenging: A modeling perspective and its implication for natural iron fertilization in the ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D7).
- Garrison, V. H., Shinn, E. A., Foreman, W. T., Griffin, D. W., Holmes, C. W., Kellogg, C. A., Majewski, M. S., Richardson, L. L., Ritchie, K. B. and Smith, G. W., 2003.** African and Asian dust: from desert soils to coral reefs. *BioScience*, 53(5): 469-480.
- Heinold, B., Knippertz, P., Marsham, J. H., Fiedler, S., Dixon, N. S., Schepanski, K., Laurent, B. and Tegen, I., 2013.** The role of deep convection and nocturnal low-level jets for dust emission in summertime West Africa: Estimates from convection-permitting simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10): 4385-4400.
- Hoecker, W. H., 1963.** Three southerly low-level jet systems delineated by the Weather Bureau special pibal network of 1961. *Mon. Wea. Rev.*, 91: 573-582.
- Kabatas, B., Pierce, R. B., Unal, A., Rogal, M. J. and Lenzen, A., 2018.** April 2008 Saharan dust event: Its contribution to PM10 concentrations over the Anatolian Peninsula and relation with synoptic conditions. *Science of the Total Environment*, 633: 317-328.
- Knippertz, P., 2008.** Dust emissions in the West African heat trough—the role of the diurnal cycle and of extratropical disturbances. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(5): 553-563.
- Lu, H. and Shao, Y., 1999.** A new model for dust emission by saltation bombardment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D14): 16827-16842.
- Marsham, J. H., Hobby, M., Allen, C. J. T., Banks, J. R., Bart, M., Brooks, B. J., Cavazos-Guerra, C., Engelstaedter, S., Gascoyne, M., Lima, A. R. and Martins, J. V., 2013.** Meteorology and dust in the central Sahara: Observations from Fennec supersite-1 during the June 2011 Intensive Observation Period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10): 4069-4089.
- Martcorena, B. and Bergametti, G., 1995.** Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D8): 16415-16430.
- Membery, D. A., 1983.** Low level wind profiles during the Gulf Shamal. *Weather*, 38(1): 18-24.
- Milton, S. F., Greed, G., Brooks, M. E., Haywood, J., Johnson, B., Allan, R. P., Slingo, A. and Grey, W. M. F., 2008.** Modeled and observed atmospheric radiation balance during the West African dry season: Role of mineral dust, biomass burning aerosol, and surface albedo. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23).
- Nicholson, S., 2015.** A low-level jet in eastern Iran: a possible factor in dust events in the region. *Desert*, 20(2): 91-99.
- Notaro, M., Yu, Y. and Kalashnikova, O. V., 2015.** Regime shift in Arabian dust activity, triggered by persistent Fertile Crescent drought. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(19), pp.10-229.
- Pokharel, A. and Kaplan, M., 2017.** Dust Climatology of the NASA Dryden Flight Research Center (DFRC) in Lancaster, California, USA. *Climate*, 5(1):15.
- Rao, D. S., Al-Yamani, F. and Rao, C. N., 1999.** Eolian dust affects phytoplankton in the waters off Kuwait, the Arabian Gulf. *Naturwissenschaften*, 86(11): 525-529.
- Rao, P. G., Al-Sulaiti, M. and Al-Mulla, A. H., 2001.** Winter Shamals in Qatar, Arabian Gulf. *Weather*, 56(12): 444-451.
- Rao, P. G., Hatwar, H. R., Al-Sulaiti, M. H. and Al-Mulla, A. H., 2003.** Summer shamals over the Arabian Gulf. *Weather*, 58(12): 471-478.
- Schepanski, K., Tegen, I., Todd, M. C., Heinold, B., Bönisch, G., Laurent, B. and Macke, A., 2009.** Meteorological processes forcing Saharan dust emission inferred from MSG-SEVIRI observations of subdaily dust source activation and numerical models. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 114(D10)
- Shao, Y., Ishizuka, M., Mikami, M. and Leys, J. F., 2011.** Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D8).

- Shinn, E. A., Smith, G. W., Prospero, J. M., Betzer, P., Hayes, M. L., Garrison, V. and Barber, R. T., 2000.** African dust and the demise of Caribbean coral reefs. *Geophysical Research Letters*, 27(19); 3029-3032.
- Tegen, I., 2003.** Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. *Quaternary Science Reviews*, 22(18-19):1821-1834.
- Tsai, F., Chen, G. T. J., Liu, T. H., Lin, W. D. and Tu, J. Y., 2008.** Characterizing the transport pathways of Asian dust. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 113(D17).
- Vink, S. and Measures, C. I., 2001.** The role of dust deposition in determining surface water distributions of Al and Fe in the South West Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(13): 2787-2809.
- Wang, W. and Fang, Z., 2006.** Numerical simulation and synoptic analysis of dust emission and transport in East Asia. *Global and planetary change*, 52(1-4): 57-70.
- Washington, R. and Todd, M. C., 2005.** Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé Depression, Chad: The role of the low level jet. *Geophysical Research Letters*, 32(17).
- Washington, R., Todd, M. C., Lizcano, G., Tegen, I., Flamant, C., Koren, I. and Goudie, A. S., 2006.** Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodélé Depression, Chad. *Geophysical research letters*, 33(9).
- Wilderson, W. D., 1991.** *Dust and sand forecasting in Iraq and adjoining countries* (No. AWS/TN--91/001). Air weather service scott AFB IL.
- Westphal, D. L., Toon, O. B. and Carlson, T. N., 1988.** A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(15): 2145-2175.
- Xu, M.L., Duan, X. and Sun, J. H., 2004.** Diagnostic study on the torrential rains coupling with the lower southwest jets in Yunnan. *Journal-Yunnan university natural sciences*, 26(4), pp.320-324.
- Yu, Y., Notaro, M., Kalashnikova, O. V. and Garay, M. J., 2016.** Climatology of summer Shamal wind in the Middle East. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1): 289-305.
- Zarasvandy, A. and Mokhtari, B., 2008.** Scientific view to 50 dusty days in Khorasan. <http://www.Tariana.ir>
<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>