

Investigating the Wind Erosion Affecting the Activation of Dust Genesis over South-Eastern of Iran

Sehat Kashani, S.¹  | Rahnama, M.²  | Karami, S.⁴  | Ranjbar, A.³  | Khoddam, N.⁴ 

1. **Corresponding Author**, Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: Savizsehat@yahoo.com
2. Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: meh.rahnama@gmail.com
3. Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: aranjbar@gmail.com
4. PhD in Meteorology, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran. E-mail: karamis.62@gmail.com, noushin_khoddam@ut.ac.ir

(Received: 20 Apr 2022, Revised: 28 Aug 2022, Accepted: 13 Sep 2022, Published online: 13 Sep 2022)

Abstract

In this article, the observed data related to the synoptic stations of Sistan and Baluchestan province, Southeastern Iran in the period 2018-2009 as well as the re-analyzed data of ERA5 have been used. Using MODIS sensor images along with the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and also its relationship with the fraction of vegetation cover as well as the amount of vegetation and bare soil, the degree of vegetation was determined. The results showed that there are four dust sources in Sistan and Baluchestan province and two dust Sources in Afghanistan and Pakistan, which affect areas in eastern Iran according to the seasonal dust flux and the prevailing wind direction over each source. One of the main factors activating dust sources is relatively strong winds on these areas, which together with the upward movement of air due to atmospheric systems, provide vertical transport of dust to higher levels of the atmosphere. Mean sea level pressure and temperature are other meteorological factors that affect the activity of dust sources. The study of dust events in the study area showed that in general, the formation of pressure gradient accompanied with in mean sea level pressure due to the entrance of atmospheric systems or surface temperature variation increases wind speed near the ground level and in the case of the favorable land surface conditions cause dust emission. The wind direction plays a key role on the dust transfer path affecting the downstream areas.

Keywords: Dust, Southeast of Iran, Wind Speed, Vegetation, Sistan-Baluchestan.

Cite this article: Sehat Kashani, S., Rahnama, M., Karami, S., Ranjbar, A., & Khoddam, N. (2022). Investigating the Wind Erosion Affecting the Activation of Dust Genesis over South-Eastern of Iran. *Journal of the Nivar*, 46(116-117), 94-109. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2022.338531.1218>



بررسی نقش پوشش گیاهی در شکل‌گیری گردوخاک جنوب شرق ایران

ساویز صحت کاشانی^۱ | مهدی رهنما^۲ | سارا کریمی^۴ | عباس رنجبر^۳ | نوشین خدام^۴

۱. نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: Savizsehat@yahoo.com
۲. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: meh.rahnama@gmail.com
۳. دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: aranjbar@gmail.com
۴. پژوهشگر پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: karamis.62@gmail.com و noushin_khoddam@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲)

چکیده

در این مقاله چشمه‌های گردوخاک و عوامل موثر بر وقوع پدیده‌های گردوخاک در جنوب شرق ایران بررسی شد. بدین منظور از داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های همدیدی استان سیستان و بلوچستان، داده‌های بازتحلیل ERA5 و داده‌های ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۹ استفاده شد. با استفاده از مدل چگونگی انتقال گردوخاک، سامانه‌های همدیدی حاکم بر منطقه به صورت فصلی بررسی شد. همچنین میانگین فصلی شاخص SAVI برای بررسی پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه و تغییرات فصلی آن ارائه شد. نتایج نشان داد چهار چشمه گردوخاک در استان سیستان و بلوچستان و دو چشمه در کشورهای افغانستان و پاکستان وجود دارد که بر این استان اثر می‌گذارد. یکی از اصلی‌ترین عوامل فعال‌سازی چشمه‌های گردوخاک، وزش بادهای شدید بر روی این مناطق بویژه در فصل تابستان است، به گونه‌ای که میانگین سرعت باد بر روی مرز ایران و افغانستان به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد. وجود سامانه‌های کم‌فشار بر روی شرق ایران و غرب افغانستان و پرفشار بر روی هندوکش سبب ایجاد گردآیدان فشاری قابل توجه در منطقه مرزی دو کشور می‌شود. بررسی یک رخداد گردوخاک شدید در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ذرات گردوخاک از مناطق اطراف دریاچه هامون و مرز افغانستان و پاکستان گسیل شده و تحت تأثیر جریان‌های شمال و شمال شرقی وارد مناطقی از افغانستان، پاکستان و جنوب شرقی ایران شده‌اند. در این مورد مطالعاتی دیدافتی در دو ایستگاه زابل و زهک به کمتر از ۱ کیلومتر رسیده و سرعت وزش باد نیز به بیش از ۲۴ متر بر ثانیه رسیده است.

کلمات کلیدی: گردوخاک، جنوب شرق ایران، سرعت باد، پوشش گیاهی، سیستان و بلوچستان.

۱. مقدمه

گردوخاک در جو به‌عنوان یکی از آلاینده‌های طبیعی بر جنبه‌های مختلف زندگی انسانی از جمله سلامت، زیست‌بوم، حمل‌ونقل، صنعت، انرژی و سایر موارد تأثیرگذار است (کاظم و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۶). کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران، همواره با پدیده گردوخاک درگیر بوده‌اند. وقوع خشکسالی‌های مکرر طی سال‌های اخیر و پیامدهای احتمالی تغییرات اقلیمی در ارتباط با بیابان‌زایی سبب شده توفان‌های گردوخاک مورد توجه بسیاری از محققان قرار

بنابر تعریف سازمان جهانی هواشناسی (WMO) کاهش دید به کمتر از ۱۰۰۰ متر ناشی از حضور ذرات گردوخاک در جو که بر اثر وزش باد از سطح زمین برخاسته است، توفان گردوخاک اطلاق می‌شود (UNCCD, WMO, UNEP, ۲۰۱۶). این پدیده هواشناسی متأثر از استقرار سامانه‌های جوی خرد، میان و بزرگ مقیاس بوده و شرایطی مانند افزایش سرعت باد، سطح بدون پوشش گیاهی و هوای خشک باعث ایجاد آن می‌شود. علاوه بر این، وجود

استناد: صحت، ساویز؛ رهنما، مهدی؛ کریمی، سارا؛ رنجبر، عباس و خدام، نوشین. (۱۴۰۱). بررسی نقش پوشش گیاهی در شکل‌گیری گردوخاک جنوب شرق ایران، مجله

نیوار، ۴۶ (۱۱۶-۱۱۷)، ۹۴-۱۰۹. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2022.338531.1218>



گیرد (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۰). با توجه به وجود صحراهای وسیع در بخش‌های بزرگی از فلات ایران، این کشور به‌طور بالقوه توانایی تولید و یا تقویت توفان‌های گردوخاک را در صورت فراهم بودن شرایط محیطی و جوی دارد (فرح‌بخشی و همکاران، ۱۳۹۴). از عوامل مؤثر بر ایجاد و انتقال پدیده گردوخاک می‌توان به الگوهای جوی و شرایط هواشناختی اشاره کرد. بر این اساس، در صورت وجود شرایط مساعد جوی، توفان‌های گردوخاک اغلب در زمین‌های خشک و نیمه‌خشک که رطوبت کافی برای پایداری خاک وجود ندارد، رخ داده و بر اساس الگوهای فشاری حاکم بر منطقه این توفان‌ها حرکت نموده و مناطق هم‌جوار را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهند. استقرار الگوهای فشاری در سطح زمین متأثر از عوامل مختلفی است و پدیده‌های سطح زمین به همراه جریان‌های سیاره‌ای به میزان متفاوت در پیدایش و استقرار این الگوها نقش دارند. خشک شدن تالاب‌ها و دریاچه‌ها و نیز خشک شدن رودخانه‌های فصلی در شرق و جنوب شرق ایران، علاوه بر از بین رفتن شرایط زیست‌محیطی منطقه، افزایش و تشدید چشمگیر توفان‌های گردوخاک را به‌همراه دارد. طی وزش بادهای ۱۲۰ روزه در سیستان، قطع منابع بارش و خشکی فیزیکی محیط باعث مهیا شدن شرایط جوی مناسب برای افزایش تندی بادهای شده و با وجود کاهش رطوبت خاک امکان تغذیه توفان‌های گردوخاک را فراهم می‌سازد. از طرف دیگر اختلاف فشار بین ارتفاعات افغانستان و دشت سیستان از عوامل به وجود آورنده و تشدیدکننده بادهای گردوخاک در دشت سیستان می‌باشند. این توفان‌ها از ارتفاعات شمال شرق به طرف جنوب شرق ایران پس از عبور از بیابان‌ها در دشت سیستان به یک باد گرم و خشک تبدیل می‌شوند و خسارات فراوانی را به مزارع کشاورزی و پوشش گیاهی وارد می‌نمایند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰).

به‌طور کلی توفان‌های گردوخاک را می‌توان به دودسته تقسیم کرد که شامل توفان‌های همدیدی مقیاس و توفان‌های میان‌مقیاس (محلی) می‌شود (کریمی و همکاران، ۲۰۲۱). این توفان‌ها تا کیلومترها دورتر از چشمه خود

منتقل شده و اثرات آن‌ها تا کیلومترها دیده می‌شود؛ اما توفان‌های میان‌مقیاس دارای منشأ محلی می‌باشند که از مناطق کویری و خشک اطراف محل مشاهده توفان برخاسته‌اند. عوامل مؤثر بر ایجاد گردوخاک شامل وضعیت سرزمین، وضعیت آب‌های منطقه و شرایط اقلیمی می‌باشند. نوع خاک و دانه‌بندی آن، میزان رطوبت نوع خاک، تراکم پوشش گیاهی، تأثیر کوهستان‌های منطقه بر الگوهای جوی می‌تواند وضعیت سرزمین را توصیف کنند. از شرایط اقلیمی نیز می‌توان به قرار گرفتن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، کم‌بارشی و وقوع خشکسالی، وجود شرایط لازم هواشناسی برای انتقال ذرات معلق، وزش بادهای نسبتاً شدید روی بیابان‌های با خاک نرم و خشک، انتقال ذرات معلق توسط جریان‌های سطوح فوقانی جو به نقاط دورتر اشاره کرد (موسوی، ۱۳۹۰). حسین زاده (۱۳۷۶) نشان داد که عامل اصلی ایجاد توفان‌های گردوخاک منطقه سیستان بادهای ۱۲۰ روزه است. همچنین جهت بادهای توفان‌های منطقه سیستان به‌طور عمده بین ۳۳۹ تا ۳۴۶ درجه است که با جهت عمومی بادهای در ایستگاه زابل هماهنگی دارد (ایرانمنش و همکاران، ۱۳۸۴). بررسی‌ها نشان داد که منشأ توفان‌های ماسه‌ای دشت سیستان، سه منطقه در محل ورود رودخانه هیرمند به هامون است (فیاض، ۱۳۸۴). یکی از ویژگی‌های اقلیمی بارز شرق فلات ایران، وزش بادهای مداوم و شدید است (میدلتون، ۱۹۸۶؛ گودی و میدلتون، ۲۰۰۱). در واقع باد ۱۲۰ روزه سیستان یک پدیده میان‌مقیاس جوی است که با وزش خود سبب افزایش غلظت گردوخاک در جو و در نتیجه کاهش دید در مناطق وسیعی از سیستان و بلوچستان و غرب افغانستان و شمال‌غربی پاکستان می‌شود (خسروی، ۱۳۸۹) که دارای وسیع‌ترین پهنه در سطح ایران است (گندمکار، ۱۳۸۹). این بادهای می‌توانند ذرات گردوخاک را در مناطق خشک حرکت دهند و به سمت جنوب یعنی دریای عمان منتقل کنند (والترس و اسجورگ، ۱۹۹۰). کارگر و همکاران (۱۳۹۴) توفان‌های شدید گردوخاک را در منطقه سیستان با استفاده از مدل WRF-Chem شبیه‌سازی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که منطقه سیستان، به‌ویژه بستر

SAVI با واقعیت میدانی، استفاده از این شاخص ترجیح داده

شد. شاخص‌های مختلفی مانند

(Perpendicular Vegetation Index) PVI-
(Difference Vegetation Index) DVI-
(Fraction Vegetation Cover) FVC
(Perpendicular Vegetation Index) PVI-
(Modified soil adjusted vegetation index) MSAVI-
(Soil Adjusted Vegetation Index) SAVI-

وجود دارند که مبتنی بر خط خاک هستند. خط خاک عبارت از خط فرضی رگرسیونی در فضای طیفی بازتاب خاک در باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز است. این خط بر روی بازتاب‌های خالص خاک در دو باند قرمز و مادون قرمز نزدیک ترسیم می‌گردد. نتایج حاصل از این بخش به‌عنوان نقشه‌های خروجی اطلاعات پوشش گیاهی در قالب واحدهای کاری ارائه شد. در ارتباط با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با دقت مکانی زیاد مانند Landsat، با توجه به وسعت محدوده مورد مطالعه و بازه زمانی ۱۰ ساله و تکرار زمانی ماهانه و تعدد فریم‌های مورد نیاز این ماهواره امکان موزاییک و تحلیل، استخراج شاخص‌ها بسیار مشکل بوده و با در نظر گرفتن تجربیات گذشته امکان‌پذیر نبود. محصولات شاخص NDVI نسبت به رنگ، رطوبت خاک و مقادیر پوشش گیاهی مقادیر ناپایداری نشان می‌دهد؛ از این رو به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک از شاخص‌های پوشش گیاهی خط خاک یا شیب محور به‌منظور بررسی پوشش گیاهی استفاده می‌شود.

در این شاخص‌ها با اعمال شیب خط خاک و عرض از مبدأ، اثر خاک لخت کمتر می‌شود؛ بنابراین در این مقاله از این شاخص‌ها استفاده خواهد شد. یکی از شاخص‌های پیشنهاد شده برای مناطق خشک و نیمه‌خشک شاخص SAVI است که بر اساس عامل L، خاک پشت‌زمینه تعدیل می‌شود.

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲، L فاکتور تصحیح است که از صفر برای منطقه با پوشش گیاهی بالا تا ۱ برای مناطق با پوشش گیاهی خیلی کم تغییر می‌کند و برای مناطق با پوشش گیاهی متوسط ۰/۵

، مقدار پوشش گیاهی و خاک لخت برای تعیین درجه پوشش گیاهی استفاده شد. نخست با استفاده از مدل GOCART میزان کمی گسیل گردوخاک از مناطق مختلف با تعیین شار قائم گردوخاک تعیین شده است. داده‌های مورد نیاز جهت محاسبه شار قائم گردوخاک، درصد پوشش گیاهی، بافت خاک، رطوبت خاک، سرعت اصطکاکی و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری است که از داده‌های زمینی و داده‌های جوی بر روی یک شبکه محاسباتی که در مراحل قبل آماده‌سازی شده، به‌دست آمده است. مدل GOCART، چشمه‌های بالقوه گردوخاک را بر پایه کسر فرسایش‌پذیر در نظر می‌گیرد (کاوزوس گوئروا، ۲۰۱۱). شار قائم گردوخاک از سطح به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (ژینو و همکاران، ۲۰۰۱، ۲۰۰۴).

$$F = c S s_p u_{10}^2 (u_{10} - u_{tp}), \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$u_{10} > u_{tp}$$

که c ثابتی تجربی است و برابر $\frac{1}{9} \frac{\mu\text{gs}^2}{\text{m}^5}$ در نظر گرفته شده، u_{10} سرعت باد تراز ۱۰ متر، u_{tp} سرعت آستانه برای فرسایش بادی ذره به اندازه p است که در سرعت‌های پایین تر از آن هیچ گسلی صورت نمی‌گیرد. s_p کسر هر دسته گردوخاک و S کسر نشست جمعی در مناطقی که سطوح فرسایش‌پذیر کمی دارند، است (چین و همکاران، ۲۰۰۳). در این طرح‌واره پنج اندازه مختلف برای ذرات گردوخاک به شکل آرمانی کروی با شعاع‌های ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شعاع‌های مؤثر ذرات عبارت‌اند از: ۰/۷۳، ۱/۴، ۲/۴، ۴/۵ و ۸ میکرومتر که تمامی محاسبات برای هر یک از آن‌ها انجام می‌شود. برای تعیین سامانه‌های جوی مؤثر بر فعال‌سازی چشمه‌های گردوخاک، الگوهای میانگین برخی کمیت‌های هواشناسی مانند فشار میانگین سطح دریا، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و دما در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله برای تعیین درصد پوشش گیاهی از تصاویر مودیس (محصول MOD13) همراه با شاخص SAVI و ارتباط آن با فاکتور کسر پوشش گیاهی استفاده شد. همچنین به دلیل تطابق مقادیر پیش‌بینی فاکتور L در شاخص

مناطق منشاء توفان‌های گردو خاک را دارا است. به‌طور کلی ۴ چشمه اصلی گردو خاک که با اعداد ۱ تا ۴ در نشان داده شده‌اند، در منطقه شناسایی شده است.

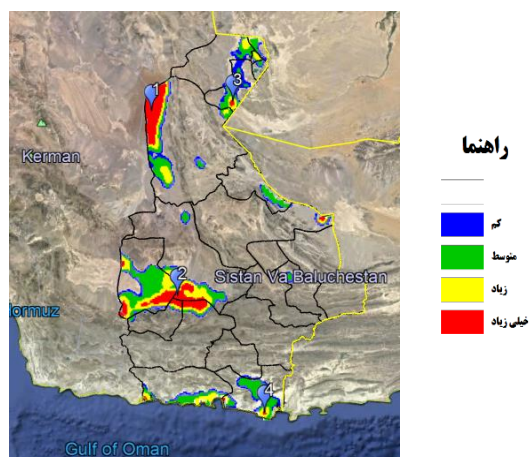
با توجه به میزان شار گردو خاک فصلی هر چشمه، باد غالب منطقه و نیز شدت‌های متفاوت فعالیت چشمه در فصول مختلف، مناطقی که تحت تأثیر هر یک از این چشمه‌ها قرار می‌گیرند تعیین می‌شود. چشمه‌های شماره ۱ و ۲ که در جنوب غربی افغانستان قرار دارند و بخش وسیعی از کشورهای افغانستان و پاکستان و همچنین دریای مکران را تحت تأثیر قرار می‌دهند، در فصل‌های تابستان و بهار با شدت خیلی زیاد، فعال بوده‌اند. چشمه شماره ۱ در برخی موارد ممکن است بخش‌هایی از استان سیستان و بلوچستان واقع در جنوب شرقی کشور و استان خراسان جنوبی در شرق ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. باد غالب در منطقه شامل چشمه ۱ در فصل بهار به ترتیب شمال غربی و غربی و در فصل تابستان شمال غربی و شمالی است. چشمه شماره ۳ نیز که در غرب پاکستان واقع شده، افغانستان، پاکستان، بخش‌هایی از هند و دریای مکران را متأثر می‌سازد. باد غالب در منطقه‌ای که چشمه ۳ در آن واقع شده، در فصل بهار به ترتیب شمال غربی، غربی و جنوب غربی و در فصل تابستان شمال غربی و غربی است. چشمه شماره ۴ واقع در شمال افغانستان، کشورهای ترکمنستان، ازبکستان، تاجیکستان و افغانستان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعات نشان داد که در مناطق دارای گسیل گردو خاک، عوامل مؤثر محیطی (اقليمی و زمینی) بر تشدید فعالیت چشمه‌های گردو خاک حائز اهمیت هستند. این عوامل مانند میزان بارش، رطوبت خاک، دما، پوشش گیاهی، سرعت باد و سامانه‌های جوی می‌توانند در زمان‌های مختلف از سال سبب فعال شدن و تقویت چشمه‌های گردو خاک شوند و مسیر انتقال گردو خاک گسیل‌شده را تعیین کنند. یکی از اصلی‌ترین عوامل فعال‌سازی چشمه‌های گردو خاک، وزش بادهای به نسبت شدید بر روی این مناطق است. این عامل به همراه حرکت صعودی هوای ناشی از سامانه‌های جوی انتقال قائم ذرات

است. RED و NIR به ترتیب بازتاب نور در طیف الکترومغناطیسی سرخ و فرسرخ هستند.

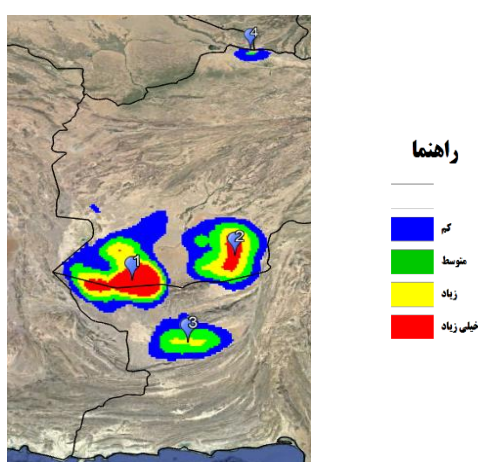
سپس یک رخداد بحرانی گردو خاک که دارای بیشترین مقدار و مدت گردو خاک بوده انتخاب شده است. الگوهای همدیدی در طی دوره رخداد به همراه تصاویر ماهواره‌ای و خروجی مدل HYSPLIT تهیه و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

۳. بحث و نتایج

در این بخش به معرفی چشمه‌های فعال گردو خاک تأثیر گذار بر نیمه شرقی ایران پرداخته شده است. با توجه به وجود چشمه‌های گردو خاک در داخل و خارج از کشور، چشمه‌های گردو خاک را به دو گروه محلی و غیر محلی تقسیم‌بندی کرده و هر کدام به‌طور جداگانه بررسی شده‌اند. به‌طور کلی در استان سیستان و بلوچستان ۴ چشمه دارای شدت خیلی زیاد هستند که با اعداد ۱ تا ۴ بر روی نشان داده شده‌اند. چشمه شماره ۱ که دارای بیشترین وسعت است، در شمال غربی استان سیستان و بلوچستان واقع شده و در تمام فصول با شدت خیلی زیاد فعال است. با توجه به جهت باد غالب در این چشمه، استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و خراسان جنوبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. چشمه شماره ۲ در شرق این استان در حوضه جازموریان قرار گرفته است. این چشمه نیز در تمام فصول با شدت خیلی زیاد فعال است و مناطقی از استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان را متأثر می‌سازد. چشمه شماره ۳ در شمال شرقی استان در منطقه سیستان واقع شده، در فصول بهار و تابستان با توجه به بادهای غالب در این منطقه فعال بوده و علاوه بر استان‌های سیستان و بلوچستان و گاهی استان کرمان، می‌تواند مناطق مرزی ایران و افغانستان را تحت تأثیر قرار دهد. چشمه شماره ۴ نیز در جنوب شرقی استان سیستان و بلوچستان در سواحل مکران واقع شده و در تمام فصول با شدت خیلی زیاد فعال است. این چشمه استان‌های سیستان و بلوچستان و هرمزگان و نیز مناطق مرزی ایران و پاکستان را متأثر می‌سازد. بررسی‌ها نشان داد که سطح کشورهای پاکستان و افغانستان دارای مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی متعددی است که پتانسیل



شکل ۲. نقشه چشمه‌های گردوخاک استان سیستان و بلوچستان به همراه کد چشمه‌ها

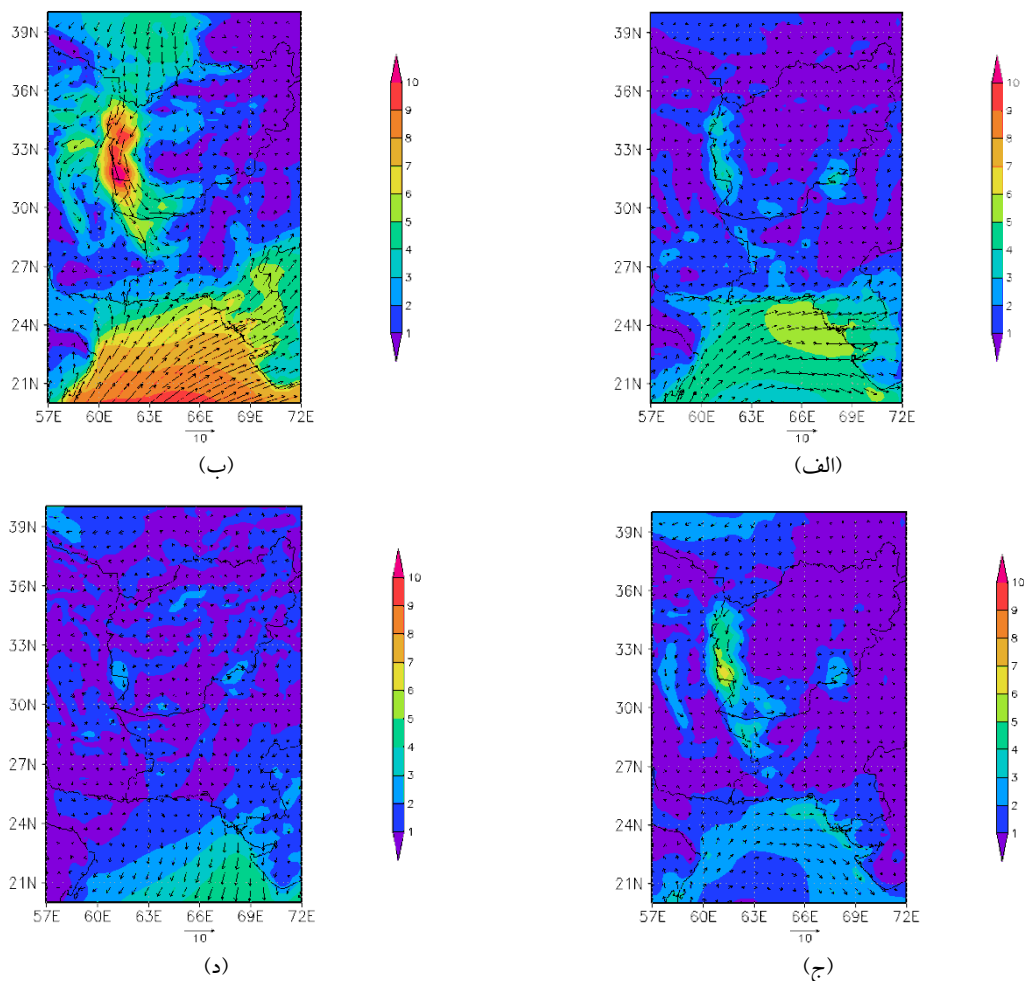


شکل ۳. نقشه چشمه‌های گردوخاک واقع در افغانستان و پاکستان به همراه کد چشمه‌ها.

جریان‌های هوا در آن ترازها به حرکت درآمده و مناطق وسیعی را پوشش می‌دهند. بنابراین سامانه‌های جوی و فرسایش بادی به‌خصوص هنگامی که خاک دارای بافت نرم بدون پوشش گیاهی باشد، می‌تواند در ایجاد پدیده گردوخاک نقش موثر داشته باشد. الف تا د میانگین فصلی داده‌های باد در ارتفاع ۱۰ متری را نشان می‌دهد. در فصل بهار بیشترین مقادیر سرعت باد بر روی خشکی، در مرز کشورهای ایران و افغانستان مشاهده می‌شود.

مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی در منطقه مورد مطالعه بیشترین سرعت باد ۱۰ متری در فصل تابستان مشاهده می‌شود. در این فصل بیشینه مقادیر سرعت باد بر روی اقیانوس هند و مرز کشورهای ایران و افغانستان نشان داده شده است. وزش بادهای شدید از سمت اقیانوس هند به سمت سواحل نیز سبب مشاهده مقادیر قابل توجه سرعت باد در

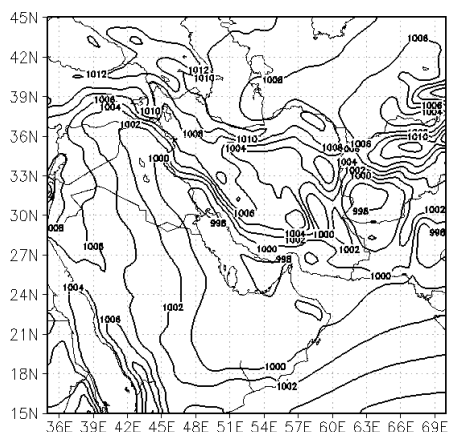
گردوخاک معلق به ترازهای بالاتر جو را فراهم می‌کند. مطالعات نشان داد که در مناطق دارای گسیل گردوخاک، عوامل مؤثر محیطی (اقلیمی و زمینی) بر تشدید فعالیت چشمه‌های گردوخاک حائز اهمیت هستند. این عوامل مانند میزان بارش، رطوبت خاک، دما، پوشش گیاهی، سرعت باد و سامانه‌های جوی می‌توانند در زمان‌های مختلف از سال سبب فعال شدن و تقویت چشمه‌های گردوخاک شوند و مسیر انتقال گردوخاک گسیل‌شده را تعیین کنند. یکی از اصلی‌ترین عوامل فعال‌سازی چشمه‌های گردوخاک، وزش بادهای به نسبت شدید بر روی این مناطق است. این عامل به همراه حرکت صعودی هوای ناشی از سامانه‌های جوی، انتقال قائم ذرات گردوخاک معلق به ترازهای بالاتر جو را فراهم می‌کند. ذرات معلق برحسب اندازه قطر آن‌ها در لایه‌ها، به ترتیب از پایین به بالا قرار گرفته و سپس با



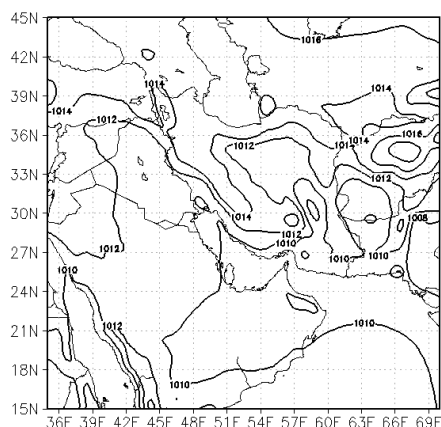
شکل ۴. میانگین سرعت باد ارتفاع ۱۰ متری فصل الف) بهار (مارس، آوریل و مه) ب) تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) ج) پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) د) زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸

می‌دهد الگوی میانگین فصلی کمیت میانگین فشار سطح زمین را نشان می‌دهد. در فصل بهار یک سامانه کم فشار در جنوب غربی افغانستان و شمال غربی پاکستان و همچنین یک سامانه کم فشار در شرق ایران مشاهده می‌شود. از طرف دیگر بر روی کوه های هندوکش، سامانه پرفشار مستقر است. الف). در فصل تابستان که در ب نشان داده شده، با توجه به گرمایش سطحی سامانه‌های کم فشار واقع در شرق ایران و غرب افغانستان تقویت شده‌اند. سامانه پرفشار واقع بر روی کوه های هندوکش نیز توسعه یافته و زبانه‌های آن به غرب افغانستان نزدیک مرز ایران

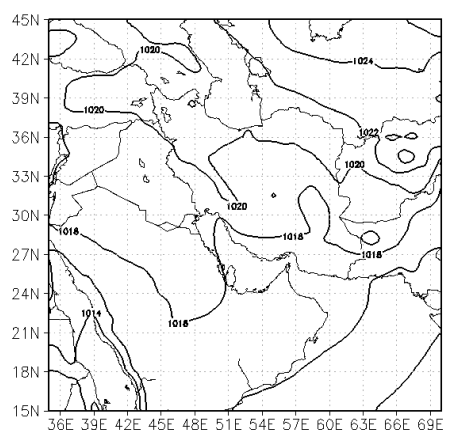
مناطق ساحلی کشورهای ایران، پاکستان و عمان شده است. در فصل تابستان سرعت باد در مناطق مرکزی ایران قابل توجه است. جهت باد میانگین در فصل تابستان بر روی مرز ایران و افغانستان، شمالی، در مناطق مرکزی ایران، شمالی، شمال شرقی و شرقی و در کشور ترکمنستان، شمالی و شمال شرقی است. در فصل پاییز مقادیر سرعت باد نسبت به فصل تابستان به شدت کاهش یافته است؛ اما همچنان سرعت باد در مناطق شرق و جنوب شرقی ایران قابل توجه است. در فصل زمستان، سرعت باد در غرب ترکمنستان و مناطق شمالی دریای خزر افزایش یافته و در سایر مناطق کاهش نسبی نشان



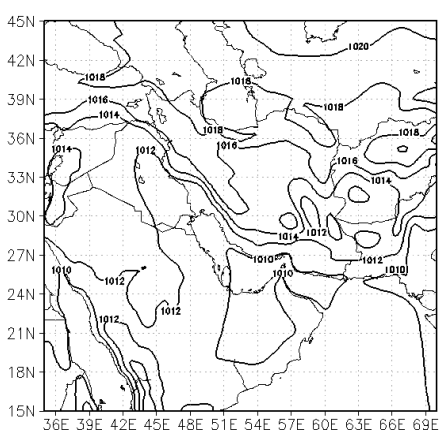
(ب)



(الف)



(د)

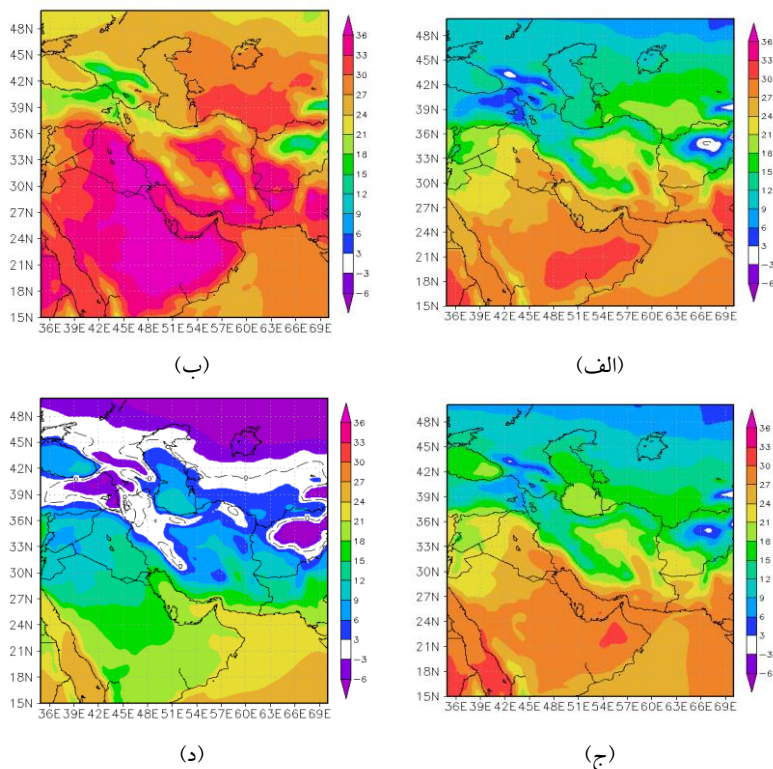


(ج)

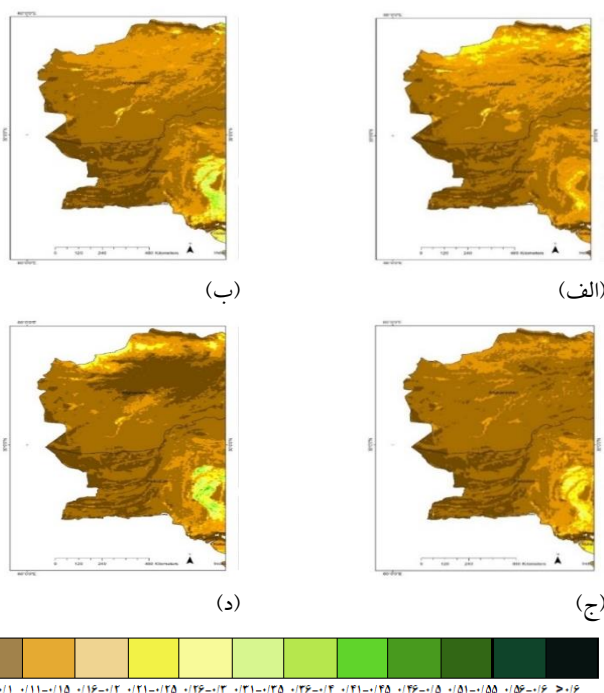
شکل ۵. الگوی بلندمدت میانگین فشار سطح زمین فصل الف) بهار (مارس، آوریل و مه) ب) تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) ج) پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) د) زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.

ایران یک هسته بیشینه دما با دمای ۲۷ تا ۳۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. در شمال شرقی افغانستان و بر روی کوه‌های هندوکش مرکز کمینه دما با دمایی کمتر از دو درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. در فصل تابستان با توجه به ب، افزایش دما در شرق ایران و غرب افغانستان بسیار قابل توجه است. با توجه به وجود توده هوای سرد بر فراز کوه‌های هندوکش با دمایی بین ۷ تا ۱۲ درجه سلسیوس، گرادیان دما در این مناطق قابل توجه است. در فصل پاییز با توجه به آغاز روند کاهش دما، در اکثر مناطق با کاهش دما روبه‌رو هستیم (ج). با نفوذ هوای سرد از عرض‌های بالاتر به داخل کشور دما کاهش می‌یابد. در فصل زمستان، مطابق با د، کاهش محسوس دما در تمام نقاط مشاهده می‌شود.

رسیده‌اند. در نتیجه گرادیان فشاری شدیدی در این منطقه حاکم است که سبب وزش بادهای شدید می‌شود. این بادهای به عنوان بادهای ۱۲۰ روزه شناخته می‌شوند. البته اثرات ناهموازی مناطق مجاور نیز در کانالیزه شدن جریان و شکل‌گیری این بادهای موثر است (علی‌زاده چوپری و همکاران، ۲۰۱۴). در فصل پاییز با توجه به روند کاهش دما، در اکثر مناطق افزایش فشار مشاهده می‌شود (ج). با تضعیف سامانه‌های کم فشار واقع در شرق ایران و غرب افغانستان، گرادیان فشاری در منطقه مشاهده نمی‌شود. در فصل زمستان با تقویت پرفشار سبیری، بخش وسیعی از کشور افغانستان و مناطق شمال شرقی ایران تحت تاثیر زبانه‌های آن قرار دارد (د). الف الگوی میانگین فصل بهار دمای ۲ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد. در فصل بهار در نواحی جنوب شرقی



شکل ۶. الگوی بلندمدت میانگین دمای ۲ متری سطح زمین در الف) فصل بهار (مارس، آوریل و مه) ب) فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) ج) فصل پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) د) فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.



شکل ۷. میانگین شاخص SAVI فصل الف) بهار (مارس، آوریل و مه) ب) تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) ج) پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) د) زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸.

پوشش گیاهی خط خاک یا شیب محور) به منظور بررسی پوشش گیاهی استفاده می شود. در این شاخص ها با اعمال شیب خط خاک و عرض از مبدأ، اثر خاک لخت کمتر

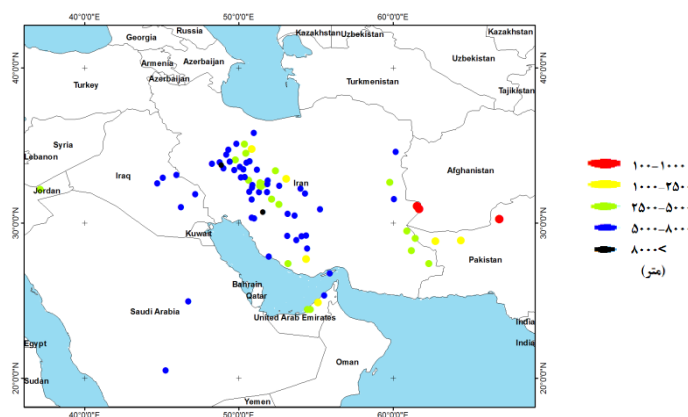
محصولات شاخص NDVI نسبت به رنگ، رطوبت خاک و مقادیر پوشش گیاهی مقادیر ناپایداری نشان می دهد؛ از این رو بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک از شاخص های

شرق و جنوب شرق گزارش شده است. دید افقی ایستگاه‌های همدیدی کشور و برخی از کشورهای هم‌جوار که با کد پدیده‌های مرتبط با گردوخاک همراه بوده را در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۴ ژوئیه ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. در این روز در اغلب ایستگاه‌های واقع در شرق و جنوب شرق ایران، پدیده گردوخاک گزارش شده است. دید افقی در ایستگاه‌های همدیدی زابل و زهک به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده است. همچنین کاهش شدید دید افقی در برخی از ایستگاه‌های کشور پاکستان مشهود است. تصاویر ماهواره‌ای توده گردوخاک را در طی روزهای ۱۳ تا ۱۵ ژوئیه سال ۲۰۱۶ در مناطق شرق و جنوب شرق ایران نشان می‌دهد. در الف الگوی فشار سطح زمین در روز ۱۳ ژوئیه سال ۲۰۱۶ ساعت ۱۲:۰۰ UTC را مشاهده می‌کنیم. در این روز یک مرکز کم‌فشار با هسته کمتر از ۹۹۴ میلی بار در غرب افغانستان شکل گرفته است؛ هم‌زمان با آن زبانه‌های سامانه پرفشار روی دریای خزر تا مناطق شرقی ایران نفوذ کرده است که سبب شکل‌گیری گردادیان فشاری قابل توجهی در مرز ایران و افغانستان شده است. در روز ۱۴ ژوئیه، همان‌طور که در ب دیده می‌شود، سامانه پرفشار روی دریای خزر به سمت شرق جابجا شده و زبانه‌های آن تا جنوب شرقی ایران نیز نفوذ کرده اند.

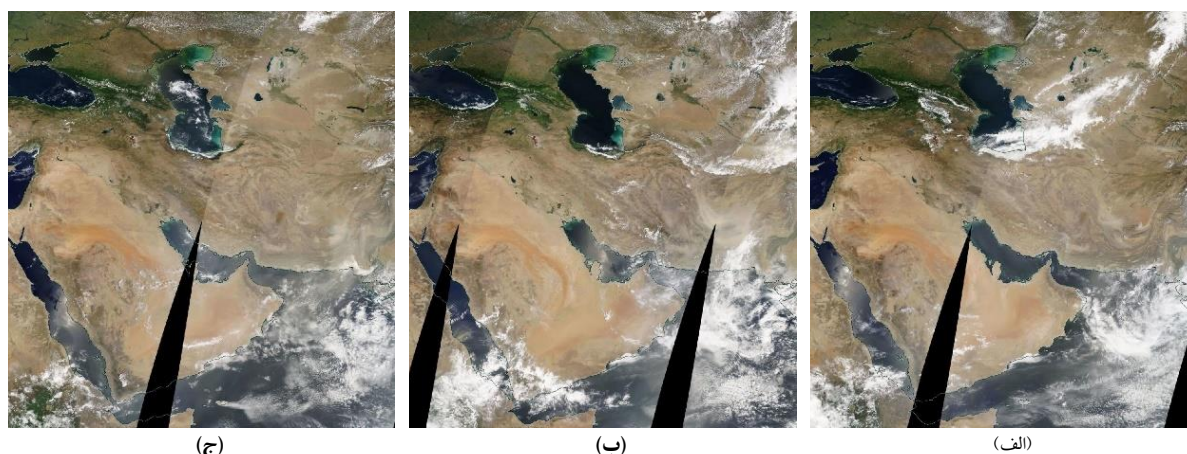
می‌شود؛ بنابراین در این مطالعه از این شاخص‌ها استفاده خواهد شد. از شاخص‌های پیشنهاد شده برای مناطق خشک و نیمه‌خشک شاخص SAVI است که بر اساس فاکتور L، خاک پشت‌زمینه تعدیل می‌شود، در این مطالعه با توجه به تطابق مقادیر پیش‌بینی فاکتور L با واقعیت میدانی ترجیح استفاده از این شاخص بود. تغییرات شاخص SAVI در میانگین بلندمدت فصل بهار (الف) برای محدوده مورد مطالعه در بازه ۰/۵ تا ۰/۴ قرار دارد. بیشترین مقادیر این شاخص در شمال افغانستان و جنوب پاکستان مشاهده می‌شود. بیشترین میزان تغییر فصلی شاخص SAVI نیز در این دو منطقه مشاهده می‌شود. در شمال افغانستان بیشترین مقدار این شاخص در فصل بهار و در جنوب پاکستان در فصل تابستان مشاهده می‌شود. فعالیت موسمی هند در این منطقه از عوامل موثر بر افزایش پوشش گیاهی جنوب پاکستان در فصل تابستان است. کمترین مقدار شاخص SAVI در غرب افغانستان و پاکستان و مناطق مرزی این کشورها با ایران است که نشان می‌دهد این مناطق فاقد پوشش گیاهی قابل توجهی هستند.

۳-۱. مطالعه موردی

در روز ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶ کاهش دید قابل توجهی در بسیاری از ایستگاه‌های همدیدی کشور به‌خصوص در منطقه



شکل ۸. دید افقی در ایستگاه‌های همدیدی منطقه که با کد پدیده مرتبط با گردوخاک در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶.

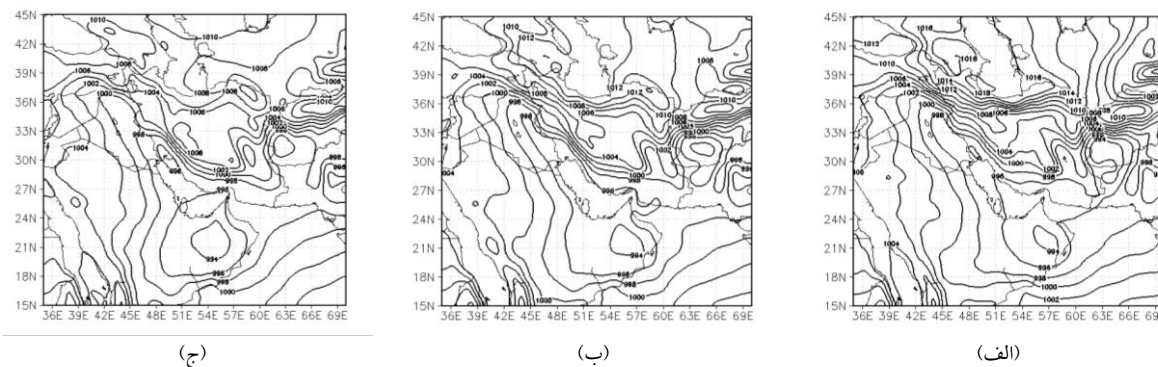


شکل ۹. تصویر True Colour سنجنده مودیس MODIS برای روز الف (۱۳، ب) ۱۴ و ج) ۱۵ ژوئیه سال ۲۰۱۶.

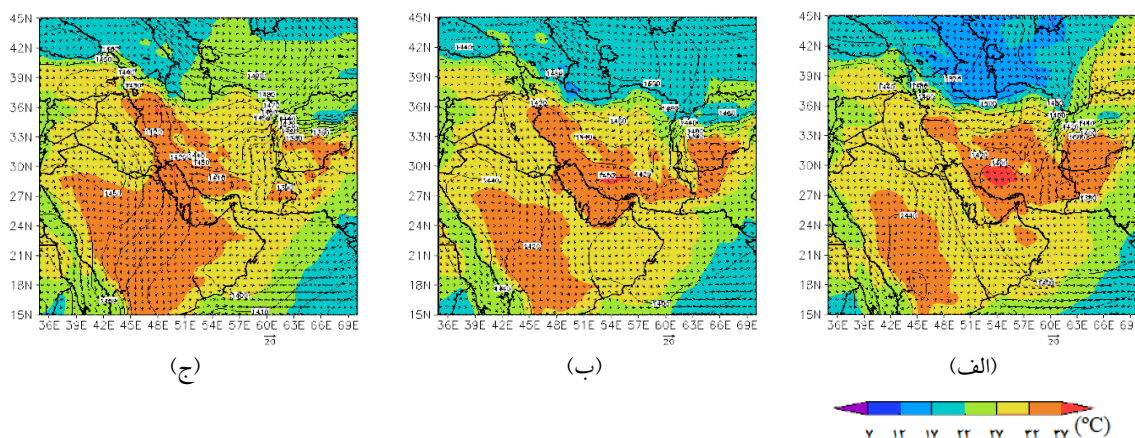
شمالی افزایش یافته که از نواحی شمال شرق و شرق وارد ایران شده‌اند. در روز ۱۴ ژوئیه، مرکز کم‌ارتفاع در غرب افغانستان تقویت شده، همچنین همراه با کاهش دما، پشته مستقر در شمال شرق عمیق‌تر شده و تراکم پربندهای هم‌ارتفاع مبین تقویت گرادیان فشاری در این مناطق و تقویت سرعت باد در مرزهای شرقی کشور هستند به گونه‌ای که بیشینه سرعت باد از ۲۰ متر بر ثانیه در روز قبل به ۲۴ متر بر ثانیه رسیده است. (ب). با توجه به ج، تراکم پربندهای هم‌ارتفاع نشان می‌دهد که گرادیان ارتفاع در روز ۱۵ ژوئیه با شدت کمتر ادامه پیدا می‌کند و جریان‌های شمالی با کاهش سرعت، نیمه شرقی کشور را دربر گرفته و گسیل و ترابرد گردو خاک به سمت عرض‌های جنوبی کشور ادامه پیدا می‌کند. الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ میلی بار در الف تا ج نشان می‌دهد که یک پشته در روز ۱۳ ژوئیه از شمال شرقی وارد شده که هم‌زمان با آن یک مرکز پرا ارتفاع در مناطق مرکزی کشور شکل گرفته و در روز ۱۴ ژوئیه زبانه این پرا ارتفاع به سمت جنوب شرق کشور کشیده شده است. در این روز یک ناوه از شمال افغانستان وارد شده، سپس در روز ۱۵ ژوئیه از مرزهای شرقی به داخل ایران نفوذ کرده و مرکز کم‌ارتفاع به سمت شمال غرب جابه‌جا شده است.

این امر سبب تقویت جریان بادهای شمالی و شمال شرقی در نیمه شرقی ایران و پیدایش توفان گردو خاک در مناطق مستعد شده است. در روز ۱۵ ژوئیه با افزایش فشار در اکثر مناطق روبه‌رو هستیم که کاهش شدت گرادیان فشاری و در نتیجه تضعیف سرعت باد را به همراه دارد (ج).

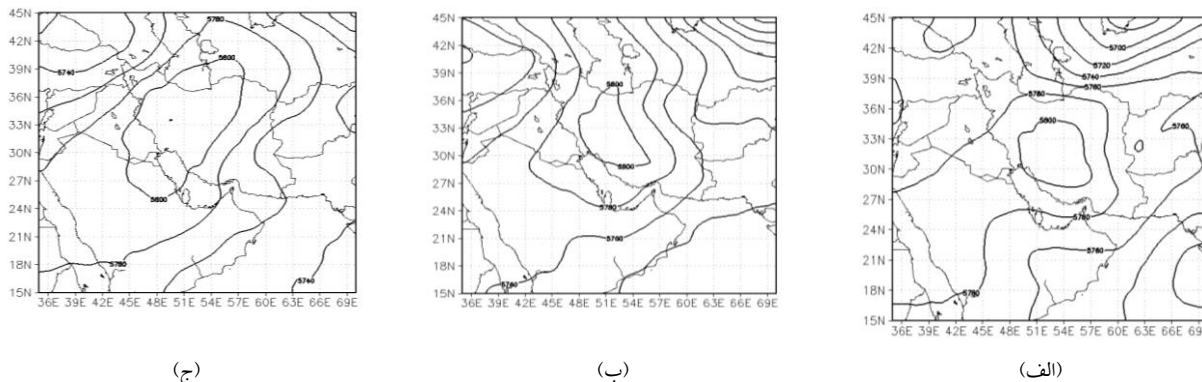
در روز ۱۳ ژوئیه سال ۲۰۱۶ ساعت ۱۲:۰۰ UTC، در تراز ۸۵۰ میلی بار، مطابق با الف، یک مرکز کم‌ارتفاع در غرب و جنوب افغانستان منطبق با مرکز بیشینه دما با دمای بیش از ۳۵ درجه سلسیوس شکل گرفته است. همچنین در نواحی جنوب شرق ایران مراکز کم‌ارتفاع در مناطقی که با بیشینه دما روبه‌رو هستیم، در حال شکل‌گیری هستند. علاوه بر این، یک پشته از مرزهای شمال شرق کشور وارد شده و به سمت شرق کشیده شده است که سبب تشکیل گرادیان ارتفاع در مناطق مرزی ایران و افغانستان شده است. در شمال افغانستان بر روی هندوکش یک مرکز پرا ارتفاع مستقر شده که باعث ایجاد شیو فشاری در شمال افغانستان نیز شده است که با الگوی فشاری سطح زمین همخوانی دارد؛ بنابراین شرایط برای افزایش سرعت باد و گسیل گردو خاک در این نواحی فراهم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در غرب افغانستان و روی نواحی مرزی ایران و افغانستان شدت بادهای



شکل ۱۰. الگوی فشار سطح زمین (میلی بار) برای روز الف (۱۳، ب) ۱۴، و ج) ۱۵ ژوئیه ۲۰۱۶ ساعت ۱۲:۰۰ UTC.



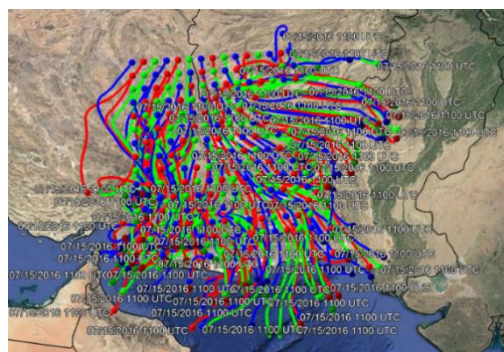
شکل ۱۱. الگوی وضعیت همبندی در تراز ۸۵۰ میلی بار برای روز الف (۱۳، ب) ۱۴ و ج) ۱۵ ژوئیه ۲۰۱۶ ساعت ۱۲:۰۰ UTC.



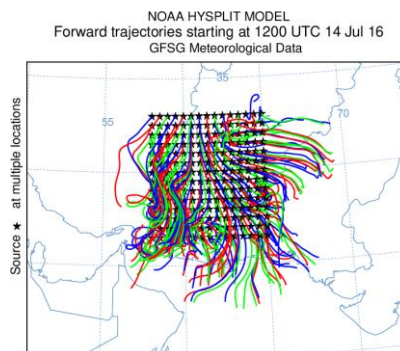
شکل ۱۲. الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی (متر) در تراز ۵۰۰ میلی بار برای روز الف (۱۳، ب) ۱۴ و ج) ۱۵ ژوئیه ۲۰۱۶ ساعت ۱۲:۰۰ UTC.

گردوخاک به جنوب‌شرقی افغانستان و غرب پاکستان می‌شوند. چشمه‌های گردوخاک واقع در غرب افغانستان و پاکستان نیز نیمه جنوبی افغانستان و نیمه غربی پاکستان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. **Error! Not a valid bookmark self-reference.** خروجی مدل HYSPLIT برای منطقه شرق و جنوب‌شرقی ایران و بخش‌هایی از افغانستان و پاکستان به مدت ۱۲ ساعت به روش پس‌رو در ارتفاع ۱۰۰۰ متری رانشان می‌دهد.

خروجی مدل HYSPLIT به روش پیش‌رو که در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶ برای مدت ۲۴ ساعت در ارتفاع ۱۰۰ متری در منطقه شرق و جنوب‌شرقی ایران و بخش‌هایی از افغانستان و پاکستان اجرا شده، در نشان داده شده است. در این مورد مطالعاتی ذرات گردوخاک از چشمه‌های واقع در شرق و جنوب‌شرقی ایران تحت تأثیر جریانات شمالی به جنوب ایران و دریای مکران منتقل می‌شوند. در منطقه زابل جریانات شمال غربی سبب انتقال



شکل ۱۳. خروجی مدل HYSPLIT به روش پیش‌رو برای ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶.



شکل ۱۴. خروجی مدل HYSPLIT به روش پس‌رو برای ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶.

قرار می‌دهد. چشمه شماره ۲ واقع در شرق این استان در حوضه جازموریان در تمام فصول با شدت خیلی زیاد فعال است و مناطقی از استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان را متأثر می‌سازد. چشمه شماره ۳ در شمال شرقی استان در منطقه سیستان در فصول بهار و تابستان با توجه به بادهای غالب در این منطقه فعال بوده و علاوه بر استان‌های سیستان و بلوچستان و گاهی استان کرمان، می‌تواند مناطق مرزی ایران و افغانستان را تحت تأثیر قرار دهد. چشمه شماره ۴ نیز در واقع در جنوب شرقی استان سیستان و بلوچستان در سواحل مکران، در تمام فصول با شدت خیلی زیاد فعال است و می‌تواند استان‌های سیستان و بلوچستان و هرمزگان و نیز مناطق مرزی ایران و پاکستان را متأثر می‌سازد. چشمه‌های غیرمحلی که این بخش از کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد در کشورهای افغانستان و پاکستان قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی ۴ چشمه اصلی گردو خاک در این مناطق شناسایی شدند. چشمه‌های شماره ۱ و ۲ که در جنوب غربی افغانستان قرار دارند و بخش وسیعی از کشورهای افغانستان و پاکستان و همچنین دریای مکران را

این مدل در ساعت ۱۲:۰۰ UTC روز ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶ اجرا شده است. جریانات غالب در منطقه، شمالی، شمال غربی و شمال شرقی هستند.

۴. جمع‌بندی

در این مقاله به شناسایی چشمه‌های فعال گردو خاک و عوامل تأثیرگذار بر فعالیت آن‌ها در شرق ایران پرداخته شده است. به این منظور، نخست چشمه‌های گردو خاک در این منطقه شناسایی شده و به دو گروه محلی، واقع در داخل کشور و غیرمحلی، واقع در خارج از کشور تقسیم‌بندی شده‌اند. چشمه‌های محلی گردو خاک شناسایی شده در استان سیستان و بلوچستان شامل ۴ چشمه با شدت فعالیت خیلی زیاد هستند که با توجه به میزان شار گردو خاک فصلی و جهت باد غالب در هر چشمه مناطقی را در داخل و خارج از کشور تحت تأثیر قرار می‌دهند. چشمه شماره ۱ واقع در شمال غربی استان سیستان و بلوچستان و دارای فعالیت خیلی شدید در تمام فصول است. این چشمه گردو خاک استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و خراسان جنوبی را تحت تأثیر

۵. منابع

۱. حسین زاده، ر.، ۱۳۷۶: بادهای ۱۲۰ روزه سیستان. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال دوازدهم، ۴۶، ۱۲۷-۱۰۲.
 ۲. خدام، ن.، س. تاجبخش، ع.ع. علی‌اکبری بیدختی، س. صحت کاشانی، ع. رنجبرسعدت آبادی، ۱۳۹۹: مطالعه گردش‌های بزرگ‌مقیاس تابستانی و ساختار لایه‌مرزی جوی در روزهای همراه با گردوخاک در جنوب شرق ایران (۲۰۱۶-۱۹۸۷). فیزیک زمین و فضا، ۴۶ (۲)، ۲۹۵-۳۱۲.
 ۳. خسروی، م.، ۱۳۹۸: بررسی توزیع عمودی گردوخاک ناشی از توفان در خاورمیانه با استفاده از مدل NAAPS در منطقه سیستان ایران. مجموعه مقالات چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام (ICIWG, 2010)، ایران، زاهدان، ۲۵-۲۷ فروردین.
 ۴. ذوالفقاری، ف.، ع.ر. شهریاری، ا. فخریه، ع.ر. راشکی، س. نوری، ح. خسروی، ، ۱۳۹۰: ارزیابی شدت بیابان‌زایی دشت سیستان با استفاده از مدل IMDPA. فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۹۱. تابستان ۱۳۹۰.
 ۵. فرحبخشی، م.، ب. علیجانی، ا. فتاحی، ۱۳۹۴: تحلیل سینوپتیکی مخاطره گردوخاک ۱۲-۱۰ مرداد ۱۳۹۲. مدیریت مخاطرات محیطی، (۲) ۵، ۲۰-۵.
 ۶. فیاض، م.، ۱۳۸۴: بررسی منشا توفان‌های ماسه‌ای دشت سیستان با استفاده از اطلاعات دورسنجی، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران. شماره ۱۰، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع.
 ۷. کارگرا، ج.، بداق جمالی، ع. رنجبر، م. معین‌الدینی، ح. گشتاسب، ۱۳۹۴: شبیه‌سازی توفان ماسه و گردوخاک شدید شرق ایران با استفاده از مدل WRF_Chem. علوم و مهندسی محیط زیست - سال دوم - شماره ۳.
- تحت تأثیر قرار می‌دهند، در فصل‌های تابستان و بهار با شدت خیلی زیاد، فعال بوده‌اند. منطقه شرق و جنوب‌شرقی ایران شامل استان‌های خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان در فصول مختلف سال و تحت شرایط جوی متفاوت می‌تواند تحت تأثیر چشمه شماره ۱ قرار گیرد. باد غالب در منطقه شامل چشمه ۲ در فصول بهار و تابستان، غربی است که می‌تواند نواحی مرزی ایران و شرق و شمال‌شرقی استان سیستان و بلوچستان را تحت تأثیر قرار دهد. چشمه شماره ۳ نیز که در غرب پاکستان واقع شده، افغانستان، پاکستان، بخش‌هایی از هند و دریای مکران را متأثر می‌سازد. چشمه شماره ۴ واقع در شمال افغانستان، کشورهای ترکمنستان، ازبکستان، تاجیکستان و افغانستان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کشور ایران از این چشمه متأثر نمی‌شود. در ادامه این مقاله عوامل مؤثر بر فعالیت و تشدید چشمه‌های گردوخاک این منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. وزش بادهای شدید ناشی از گرادیان فشار بر روی این مناطق اصلی‌ترین عامل فعال‌سازی چشمه‌های گردوخاک است. کمترین مقدار شاخص SAVI در نواحی غربی کشور افغانستان و شمال غربی پاکستان مشاهده می‌شود که نشان دهنده ضعف پوشش گیاهی در این مناطق است. الگوی به‌دست‌آمده از میزان گسیل گردوخاک در فصول مختلف نیز نشان داد که مقدار شار گردوخاک در این مناطق قابل توجه است. در بخش پایانی این مقاله به مطالعه یک مورد بحرانی رخداد گردوخاک در این منطقه در ۱۴ ژوئیه سال ۲۰۱۶ پرداخته شده است. بررسی تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که در این مورد مطالعاتی، چشمه‌های گردوخاک اطراف دریاچه هامون و مناطق مرزی افغانستان و پاکستان فعال بوده‌اند. نفوذ زبانه پرفشار روی دریای خزر به مناطق شرقی ایران و حضور سامانه کم فشار در غرب افغانستان سبب ایجاد گرادیان فشار و وزش بادهای شدید شمال و شمال شرقی در این مناطق شده است. مدل HYSPLIT نیز انتقال ذرات گردوخاک از این چشمه‌های گردوخاک به سمت مناطق جنوب شرقی ایران، دریای مکران و مناطق جنوبی افغانستان و پاکستان را نشان می‌دهد.

16. Kazem, A.A., M.T. Chaichan, H.A. Kazem, 2014: Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 37, pp.734-749.
17. Middleton, N.J., 1986: A geography of dust storms in South-west Asia. *International Journal of Climatology*, 6(2), pp.183-196.
18. Rashki, A., D.G. Kaskaoutis, C.J.D. Rautenbach, P.G. Eriksson, M. Qiang, P. Gupta, 2013: Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Journal of Aeolian Research*, 5: 51-62.
19. Rashki, A., D.G. Kaskaoutis, P. Francois, P.G. Kosmopoulos, M. Legrand, 2015: Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas. *Aeolian Res.* 16, 35-48.
20. UNEP, WMO, UNCCD, 2016: Global Assessment of Sand and Dust Storms. United Nations Environment Programme, Nairobi.
21. Walters Sr, K.R. and Sjoberg, W.F., 1990. The Persian Gulf Region. A Climatological Study (No. USAFETAC/TN-88/002). AIR FORCE ENVIRONMENTAL TECHNICAL APPLICATIONS CENTER SCOTT AFB IL.
22. Walters Sr, K.R. and Sjoberg, W.F., 1990 : The Persian Gulf Region. A Climatological Study. DOI: [10.21236/ada222654](https://doi.org/10.21236/ada222654)
23. Zhang, X., L. Zhao, D.Q. Tong, G. Wu, M. Dan, B. Teng, , 2016: A systematic review of global desert dust and associated human health effects. *Atmosphere*, 7(12), p.
۸. کریمی، م.، م.ح. یزدانی، ا. نادری، ۱۳۹۲: تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه بر امنیت منطقه سیستان. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۴، ۵۰، (۲)، ۱۱۱-۱۲۸.
۹. گندمکار، ا.، ۱۳۸۹، تعیین گستره افقی باد سیستان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۲، ۶۷-۷۶.
۱۰. موسوی، ط.، ۱۳۹۰: خوزستان و فاجعه ریزگردها، سو مدیریت دولت‌ها. فصلنامه چشم اندازان.
11. Alizadeh Choobari, O., P. Zavar-Reza, A. Sturman, 2014: The wind of 120 days and dust storm activity over the Sistan Basin. *Journal of Atmospheric Research*, 143, 328-341.
12. Goudie, A. S., N. J. Middleton, , 2001: Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth Sci Rev*, 56, 179-204.
13. Iranmanesh F., M. Arabkhedri., 2005: Study on the Feasibility of Erosive Wind Directions Determination Using Storm Tracing on Satellite Images. *Pajouhesh Va Sazandg Journal*, 1(67), 25.
14. Karami, S., D.G. Kaskaoutis, S.S. Kashani, M. Rahnema, A. Rashki, 2021: Evaluation of nine operational models in forecasting different types of synoptic dust events in the Middle East. *Geosciences*, 11(11), p.458.
15. Kaskaoutis, D.G., A. Rashki, E.E. Houssos, A. Mofidi, D. Goto, A. Bartzokas, P. Francois, M. Legrand, 2015: Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. *Clim. Dyn.* 45 (1-2), 407-424.