

Temporal and spatial changes of dust in Golestan province using AOD (Aerosol Optical Depth) and the affectability of this province from the deserts of Turkmenistan

Khansalari, S.¹  | Majidi Dashli Brun, O.²  | Nikzadfar, M.²  | Mollaaarazi, A.² 

1. Atmospheric Sciences and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.

2. Golestan province Meteorological Administration, Gorgan, Iran.

Corresponding Author E-mail: khansalari@yahoo.com

(Received: 17 Oct 2022, Revised: 19 Oct 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 30 Aug 2023)

Summary

One of the effects of drought is the loss of vegetation, drying of wetlands, and desertification, which in turn can create an appropriate substrate for the dust and increase the concentration of aerosol. In this research, with the aim of understanding the spatial and temporal changes of dust storms in Golestan province over a period of 20 years (2000 to 2020), AOD (Aerosol Optical Depth) data from MODIS were used. So, dust detection when the AOD value was greater than 0.5, was considered a dust event. Also, the monthly horizontal visibility data of 10 synoptic stations with appropriate distribution in the province were used to validate the AOD product. Monthly horizontal visibility data is obtained by averaging three-hour horizontal visibility at 10 synoptic stations in Golestan province. With the aim of investigating the annual and seasonal distribution of dust in the Golestan province, a diagram of the number of days with dust in the study time was obtained. Then, the map of the spatial changes of dust was also presented. To investigate the intensity of influence of Golestan province from the deserts of Turkmenistan, in addition to tracking the dust transfer path using the output of the HYSPLIT model for a selected event from each season, synoptic analysis was also performed using ERA5 data. Also, the trend of dust changes in the Golestan province and deserts of Turkmenistan was investigated. The validation results with a correlation of 0.66 show the ability of AOD data to present the dust distribution in Golestan province. According to the obtained results, in fact, there are two time periods with low occurrences of a dust storm (2000 to 2007 (except 2003) and 2016 to 2020) and one-time period with high occurrences of a dust storm (2008 to 2015). The highest number of days with dust is in the summer season and the lowest is in the winter season. In terms of spatial distribution, the northern regions of the province, i.e., Gonbad-e kavus, Aqqala, and Gomishan, are more involved in dust phenomena than other parts of the province. During the statistical period, the highest AOD value occurred on 7th September, 2020 with a value of 4.1. Tracing the dust transfer path using the output of the HYSPLIT model in the region showed that the main source of dust in the province was from Turkmenistan and especially the deserts of the Balkan province. Tracking the dust transfer route using the output of the HYSPLIT model in the region showed that the main source of dust in the province is mainly from the desert areas of Turkmenistan. The synoptic analysis of the selected day from each season generally indicates a strong pressure gradient in the region of Turkmenistan and north of Iran in such a way that the northerly winds in Golestan and the east of the Caspian Sea are significant, which causes the soil to rise, and it is transported to Golestan province. Also, on the selected days of spring, summer, and autumn, there is a ridge pattern and stable atmospheric conditions in the middle level of the troposphere, leading to dust persistence. In the winter, due to the presence trough of low in the middle of the troposphere and the occurrence of precipitation, the intensity of the dust is weaker. Also Comparing the annual and seasonal distribution of dust storms in the Golestan province and Turkmenistan shows the simultaneity of events.

Keywords: Dust, Aerosol Optical Depth (AOD), MODIS, Golestan Province, HYSPLIT Model.

Cite this article: Khansalari, S., Majidi Dashli Brun, O., Nikzadfar, M., & Mollaaarazi, A. (2023). Temporal and spatial changes of dust in Golestan province using AOD (Aerosol Optical Depth) and the affectability of this province from the deserts of Turkmenistan. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 517-540. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462>

E-mail: (2) g_gonbad@yahoo.com | anikzad_far@yahoo.com | arazi73@yahoo.com



Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تغییرات زمانی و مکانی گردوخاک در استان گلستان با استفاده از عمق نوری هواویزها و تأثیرپذیری این استان از بیابان‌های ترکمنستان

سکینه خان سالاری^۱ | عثمان مجیدی داشلی برون^۲ | مریم نیکزادفر^۲ | عبدالجبار ملاعرازی^۲

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

۲. اداره هواشناسی استان گلستان، گرگان، ایران.

ایانامہ نویسندہ مسئول: khansalari@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۶/۸)

حکیدہ

در این پژوهش با هدف بررسی نحوه توزیع سالانه و فصلی گردوخاک در استان گلستان و نحوه تأثیرپذیری آن از بیابان‌های ترکمنستان، نمودار تعداد روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از داده‌های AOD (دارای همبستگی ۰/۶۶) با داده‌های دید افقی ایستگاه‌های همدیدی) بزرگ‌تر از ۰/۵ سنجنده MODIS، در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ مورد مطالعه و همچنین نقشه تغییرات مکانی تعداد روزهای همراه با گردوخاک بررسی شد. به‌منظور بررسی شدت تأثیرپذیری استان گلستان از بیابان‌های ترکمنستان علاوه بر رهگیری مسیر انتقال گردوخاک با استفاده از خروجی مدل HYSPLIT برای یک رویداد منتخب از هر فصل، تحلیل همدیدی توسط داده‌های ERA5، نیز انجام شد. شرایط همدیدی در روز منتخب از هر فصل بیانگر جریانات شمالی و وزش باد قابل توجه در منطقه بیابانی واقع در شرق دریای خزر است که این مطلب موجب خیزش خاک در بیابان‌های ترکمنستان و انتقال آن می‌شود و با استقرار پشته در تراز میانی و ردسپهر، ماندگاری بیشتر گردوخاک رخ می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در حقیقت دو بازه زمانی با رخداد کم (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷) (به‌جز سال ۲۰۰۳) و سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰) و یک بازه زمانی با رخداد زیاد (سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵) وجود دارد که رابطه مستقیمی بین افزایش گردوخاک در بیابان‌های ترکمنستان و استان گلستان وجود دارد. در طول دوره آماری بیشترین مقدار AOD در هفتم سپتامبر سال ۲۰۲۰ با مقدار ۴/۱ رخ داده است. رهگیری مسیر انتقال گردوخاک با استفاده از خروجی مدل HYSPLIT نشان داد که منشأ عمده گردوخاک استان از مناطق بیابان ترکمنستان و خصوصاً بیابان‌های بالکان، می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گردوخاک، عمق نوری هواویزها (AOD)، MODIS، استان گلستان، مدل HYSPLIT.

١. مقدمه

در سال‌های اخیر پدیده گرد و خاک می‌باشد. این پدیده امروزه به یکی از مشکلات اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد که بسامد و شدت توفان‌های گرد و خاک افزایش یافته است (تقوی و همکاران، ۱۳۹۲). آسیای مرکزی شیوع بالایی از بلایای توفان گرد و خاک جهانی را نشان می‌دهد و سهم نسبتاً زیادی در سطح هواویزهای گرد و خاک جهانی دارد (قورابویف و مولداشف، ۲۰۱۸). منبع هواویزهای شن و ماسه در آسیای مرکزی در قسمت بالایی گردش غربی قرار دارد. بنابراین، حمل و نقل از راه دور گرد و خاک در این منطقه نه تنها اثرات منفی بر

علاوه بر تأثیرات گسترده ذرات گرد و خاک بر سازوکارهای تابشی جو و همچنین تغییر در اقلیم کره زمین، در تحقیقات مختلفی به اثرات زیان بار آنها بر سلامتی انسان نیز اشاره شده است که از آن جمله می توان به افزایش چشمگیر خطر ابتلا به بیماری های قلبی - عروقی، سرطان ریه و حتی مرگ های نابهنگام اشاره کرد که به طور وسیعی در کشورهای واقع در کمربند غبار از جمله مصر، پاکستان، چین و بخش هایی از ایران دیده می شود (جیاناداکي و همکاران، ۲۰۱۴؛ سوجاریت پونگ و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی به وجود آمده در منطقه خاورمیانه و ایران

استناد: خان سالاری، سکینه؛ محمّدی داشلی، برون، عثمان؛ نیکزادفر، مریم و ملاعزای عبدالجبار (۱۴۰۲). تغییرات زمانه و مکان، گردو خاک در استان گلستان، با استفاده از عمق

DOI: ۵۴۰-۵۱۷، (۲)۴۹، فصل، زمین و فضا، مجله فیزیک زمین و فضا، ترکمستان، بیان‌های استان از بیان‌های استان، ترکمستان، مجله فیزیک زمین و فضا، (۲)۴۹، فصل، زمین و فضا، DOI: ۵۴۰-۵۱۷.

<http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462>

arazi73@yahoo.com | anikzad_far@yahoo.com | g_gonbad@yahoo.com (۲) | اماننامه:

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.349946.1007462>

روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. عموماً این مطالعات بر اساس استفاده از تکنیک سنجش از دور، شبیه‌سازی عددی و پیش‌بینی رویدادهای گردو خاک، تحلیل آماری و یا همدیدی است. به‌ویژه آن‌که با پیشرفت علم، داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های انتقال و داده‌های جو بالا در دسترس هستند و شرایط را به‌گونه‌ای فراهم کرده‌اند که امکان مطالعات علمی در این خصوص با دقت مناسبی فراهم شده است.

امروزه پیشرفت‌های زیادی در زمینه سنجش از دور به‌وسیله ماهواره‌ها ما را در زمینه محاسبه غیر مستقیم غلظت PM (Particulate Matter) در سطح زمین یاری می‌کند و تاکنون اقدامات مختلفی جهت تعیین غلظت ذرات با استفاده از سنجش از دور صورت گرفته است. هر چند با توجه به پیچیدگی رفتار ذرات معلق و تنوع ترکیبات و خصوصیات آنها، کماکان خطاهای زیادی در انجام این تخمین‌ها وجود دارد (ستودیان و ارحامی، ۱۳۹۰). در خصوص لزوم اندازه‌گیری سنجش از دور در این‌باره باید گفت که اگرچه اندازه‌گیری در سطح زمین به‌عنوان روشی دقیق جهت جمع‌آوری اطلاعات، مورد استفاده قرار می‌گیرد اما این اندازه‌گیری‌ها بیشتر نشان‌دهنده محیط نسبتاً محدود اطراف ایستگاه نقطه‌ای می‌باشد. با مقایسه داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای در زمینه مقدار ذرات معلق هوا با ایستگاه‌های زمینی یک منطقه، می‌توان دقت آنها را در اندازه‌گیری دقیق مقدار ذرات معلق (هواویزها) مورد بررسی قرار داد و دقیق‌ترین سنجنده یا روش را انتخاب و آن روش را به سایر نقاط منطقه تعمیم داد. سنجنده MODIS داده‌های قابل استنادی از عمق نوری هواویزها AOD (Aerosol Optical Depth) از هر دو بخش زمین و آب را فراهم می‌کند. با انجام پایش مکانی-زمانی و بررسی منشأ جریانات هوایی وارد شده به منطقه در فصول و سال‌های مختلف، می‌توان دوره‌های بحرانی گردو خاک در منطقه را شناسایی کرد و با شناخت منشأ عمده ذرات گردو خاک، نسبت به انجام اقدامات پیش‌گیرانه و مدیریت بحران بهتر در مناطق بحرانی گردو خاک اقدام کرد.

کیفیت هوای محیط در کشورهای اطراف ایجاد می‌کند، بلکه تأثیر عمیقی بر آب‌وهوای جهانی و تغییرات محیطی خواهد داشت (ایندویتو و همکاران، ۲۰۱۲؛ چن و سوردلیک، ۲۰۰۷؛ چن و همکاران، ۲۰۱۷؛ اوپ و همکاران، ۲۰۱۶). در سال‌های اخیر، وقوع مکرر توفان‌های گردو خاک ناشی از صحرای تکلامکان، همراه با همراه با آلاینده‌های جوی ساطع شده از کشاورزی، تولید صنعتی و فعالیت‌های حمل‌ونقل انسانی، منجر به سطوح هواویز در سراسر آسیای مرکزی با تفاوت‌های قابل‌توجه از نظر توزیع مکانی و زمانی شده است (ولف و همکاران، ۲۰۱۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعه تغییرات زمانی و مکانی داده AOD در آسیای مرکزی (ونگ و همکاران، ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که استفاده از این محصول از ماهواره آکوا سنجنده MODIS، این امکان را فراهم می‌سازد که تغییرات سالانه، ماهانه و فصلی غلظت گردو خاک در سطح منطقه مورد بررسی با دقت ارزیابی شود. ونگ و همکاران (۲۰۲۰)، نشان دادند که AOD متوسط سالانه در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ در منطقه آسیای مرکزی از ۰/۱۸۳ تا ۰/۲۳۲ متغیر است. گسیل آلاینده‌های جوی به سرعت در جنوب آسیا در حال افزایش است. شهید و همکاران (۲۰۲۲) تغییرات مکانی و زمانی هواویزها را در منطقه جنوب آسیا بررسی کردند. در این مطالعه تغییرات فصلی در غلظت هواویزها در جنوب آسیا در برخی از شهرهای بزرگ در دشت هند و گنگ (Plain Indo-Gangetic) را با استفاده از MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2) و MODIS برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش قابل‌توجهی در غلظت هواویزها در این منطقه رخ داده است.

با توجه به تغییر اقلیم جهانی و افزایش خشکسالی و بیابان‌زایی و در نتیجه افزایش گسترش مکانی رخدادهای پدیده گردو خاک و اثرات مخرب آن بر سلامت و اقتصاد جامعه، مطالعات در این زمینه در سرتاسر جهان رو به افزایش است. موضوع مهم رخداد گردو خاک بر اساس

پیشینه مطالعات علمی در مورد رخداد گردوخاک به سه قرن پیش برمی‌گردد؛ اما در سال‌های اخیر به دنبال رخداد‌های مکرر توفان‌های همراه با گردوخاک، بسیاری از دانشمندان از علوم مختلف مطالعه هواویزها را مورد توجه قرار داده و از دیدگاه‌های مختلف آنها را مورد پژوهش قرار داده‌اند. بسیاری از مطالعات در خصوص ارتباط و همبستگی بین داده‌های عمق نوری حاصل از سنجنده MODIS و مقادیر دید افقی دیدبانی شده یا غلظت ذرات معلق حاصل از داده‌های زمینی است (مانند مباحثی و همکاران، ۱۳۹۰؛ خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعات بسیاری در زمینه منشاء (برای مثال ارجمند و همکاران، ۱۳۹۷) و تغییرات زمانی و مکانی گردوخاک در مناطق مختلف کشور (برتینا و همکاران، ۱۳۹۳؛ نامداری و همکاران، ۲۰۱۶) انجام شده است. از مطالعات اخیر در کشور می‌توان به مطالعه احمدی و همکاران (۱۳۹۸) اشاره کرد. در این پژوهش محصول سطح ۶ سنجنده MODIS را برای ارزیابی مقادیر AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI Normalized Difference Vegetation Index) و (Enhanced Vegetation Index) در مقیاس زمانی فصلی طی دوره‌های آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در ایران استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مناطق جنوب غرب، شرق و سواحل خلیج فارس بالاترین و نواحی شمال غرب و زاگرس دارای کمترین مقدار AOD می‌باشند. نبوی و همکاران (۲۰۱۹) غلظت ذرات معلق PM_{2.5} را توسط داده‌های AOD و چهار الگوریتم یادگیری ماشین (Machin Learning) در شهر تهران ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد همبستگی بالایی بین داده‌های PM_{2.5} و داده‌های نرمال شده AOD وجود دارد. یوسفی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای روند تغییرات بلندمدت عمق نوری ذرات معلق در سرتاسر ایران طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۱۸ توسط داده‌های AOD سنجنده MODIS را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد روند تغییرات عمق نوری ذرات معلق در جنوب غربی کشور مثبت و در مناطق شمالی منفی است. محمدپور و همکاران (۱۳۹۹) به

واکاوی و مقایسه محصولات ماهواره‌ای AOD به منظور تحلیل گردوخاک‌های غرب کشور پرداختند. توزیع سالانه AOD نشان داد غلظت ذرات گردوخاک در محدوده مورد مطالعه دارای یک دوره فعال (۲۰۱۰-۲۰۰۰) و یک دوره غیرفعال (۲۰۱۸-۲۰۱۰) است. همچنین بر اساس توزیع ماهانه AOD، منطقه مورد مطالعه در ماه‌های آوریل تا اوت دارای بالاترین غلظت گردوخاک است. همچنین میراکبری و ابراهیمی خوسفی (۱۳۹۹)، به بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق جو با استفاده از عمق نوری هواویزها در جنوب شرق ایران پرداختند. برای این کار از داده‌های روزانه AOD متعلق به سطح ۴ سنجنده MODIS برای دوره زمانی ۱۸ ساله (۱۳۹۷-۱۳۸۰) استفاده کردند. به منظور اعتبارسنجی داده‌های AOD سنجنده MODIS، از داده‌های غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر (PM₁₀) که در ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها به ثبت رسیده بود استفاده کردند. در ادامه به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت هواویزها، نقشه‌های پهنه‌بندی AOD با استفاده از میانگین مقادیر استخراج شده طی دوره آماری، به روش وزن دهی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighted) IDW را تهیه کردند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی AOD، حاکی از وجود ارتباط قوی و معنی‌دار، بین عمق نوری ذرات معلق سنجنده MODIS و غلظت ذرات معلق (PM₁₀) در سطح اطمینان ۹۵ درصد آماری بود. لذا داده‌های AOD از دقت قابل قبولی برای بررسی و تحلیل تغییرات ذرات معلق جو برخوردار بود. استان گلستان به دلیل نزدیکی به مناطق خشک و بیابانی در منطقه آسیای مرکزی دارای رخداد‌های گردوخاک قابل توجهی است که سبب مشکلات بسیاری در این منطقه می‌شود. با این وجود بررسی مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های انگشت‌شماری در این منطقه انجام شده است و این مطالعات عمدتاً مربوط به شمال شرق و استان خراسان رضوی است. برای مثال لشکری و کیخسروی (۱۳۸۷) و دوستان (۱۳۹۷) با استفاده از تحلیل همیدی به شناسایی الگوهای جوی گردوخاک در استان خراسان رضوی و

غلظت گردوخاک را داراست و بیشترین غلظت گردوخاک استان گلستان مربوط به فصل تابستان و به‌ویژه ماه‌های تیر-مرداد می‌باشد.

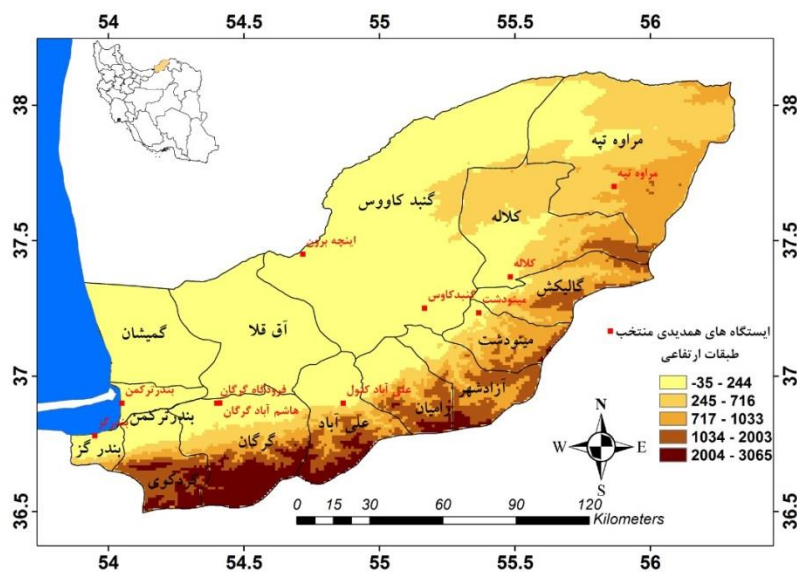
در طی سال‌های اخیر استان گلستان از پدیده خشکسالی در امان نبوده و خسارت‌های فراوانی را در این زمینه متحمل شده است. استان گلستان به سبب قرار گرفتن در موقعیت جغرافیایی خاص دارای تنوع زیاد آب و هوایی می‌باشد. در مناطق شمالی استان به سبب قرار گرفتن در کنار بیابان‌های بالکان و قره‌قوم در شمال آن و همچنین خشکسالی‌های متعدد در این بخش از استان، رخداد پدیده گردوخاک بسیار مشاهده می‌شود. با توجه به این مطلب که نقاطی در استان وجود دارند که دارای توفان‌های گردوخاکی بسیار زیادی هستند اما در این مناطق ایستگاه سنجش ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ وجود ندارد، برای برآورد این رخدادها می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای بهره برد. بنابراین پایش تغییرات زمانی و مکانی گردوخاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بررسی تأثیرپذیری گردوخاک در استان گلستان از بیابان‌های ترکمنستان از اهداف این پژوهش می‌باشد.

۲. داده‌ها و روش پژوهش

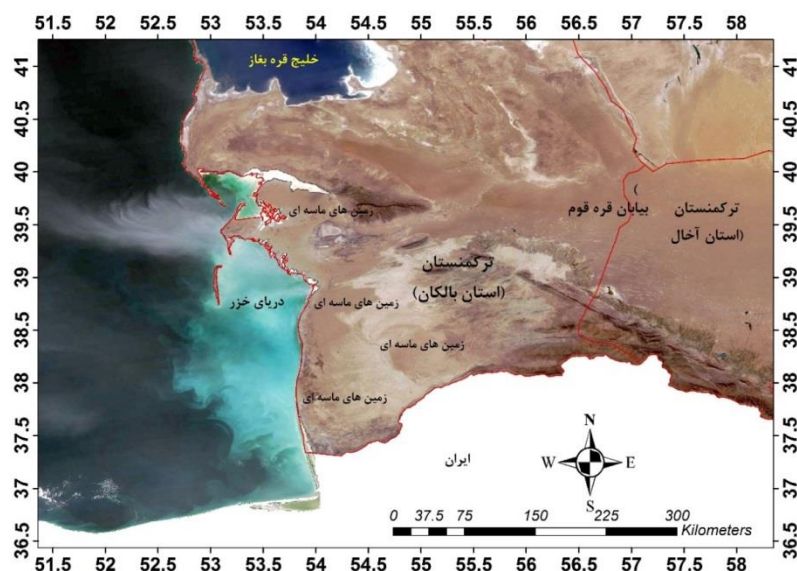
۲-۱. منطقه مورد مطالعه

استان گلستان (شکل ۱-الف) در جنوب شرقی دریای خزر واقع شده است. از ویژگی‌های مهم جغرافیایی که بر شرایط اقلیمی استان تأثیر می‌گذارد وجود منطقه کوهستانی در قسمت جنوبی، گسترش کوه‌های البرز در سراسر این قسمت و همچنین مجاورت شمال آن با زمین‌های پست و فراخ‌شک دریای خزر و بیابان‌های ترکمنستان است. بخش‌های جنوبی تحت تأثیر شرایط کوهستانی و بخش‌های شمالی تحت تأثیر شرایط خشک و بیابانی می‌باشد (مساعدی و همکاران، ۱۳۸۷).

شمال‌شرق کشور پرداخته‌اند. همچنین بروغنی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از شاخص SPI، نقش خشکسالی بر فراوانی وقوع گردوخاک در استان خراسان رضوی را مطالعه کردند که ارتباط مستقیمی بین آنها یافتند. تحلیل آماری توفان‌های گردوخاک در استان خراسان رضوی در بازه زمانی ۱۳۳۱-۱۳۹۸ نیز توسط عراقی‌زاده و مسعودیان (۱۴۰۰) انجام شده است که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد بیشترین رخداد گردوخاک در این استان به ترتیب در سبزوهر، سرخس و گناباد رخ داده است. کرمی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی همدیدی و شبیه‌سازی موردی توفان گردوخاک در مناطق شرق و شمال‌شرق کشور با استفاده از مدل BSC-DREAM پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش بیانگر وجود شیو فشاری شدید در منطقه و کانون گردوخاک در اطراف دریاچه‌های هامون و آرال و مناطق شمال کشور ترکمنستان است. زرین و همکاران (۱۴۰۱)، نیز به بررسی فصلی گردوخاک در شمال‌شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخدادهای فرین گردوخاک با استفاده از مدل WRF-CHEM پرداخته‌اند که بر اساس نتایج این مطالعه طی دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۴) بیشینه رخداد گردوخاک در فصل بهار و تابستان و عملکرد بهتر طرحواره GOCART در شبیه‌سازی گردوخاک در شمال‌شرق کشور است. در استان گلستان مطالعات بسیار محدودی انجام شده است که می‌توان به مطالعه همدیدی کردجری و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد. در این مطالعه به این مطلب اشاره شده است که رخداد وزش باد نسبتاً شدید ناشی از ناپایداری محلی و یا سیستمی، سبب رخداد گردوخاک محلی و یا انتقال گردوخاک از ترکمنستان است. همچنین رضوی‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) به مطالعه پدیده گردوخاک و روند تغییرات سالانه و فصلی آن در استان گلستان با استفاده از داده‌های AOD، در یک بازه زمانی ۱۸ ساله (۱۳۹۶-۱۳۷۹) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دو فصل پاییز و زمستان سهم کمی از



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه های همدیدی منتخب ب: موقعیت بیابان های ترکمنستان.

۲-۲. داده های مورد استفاده

در این تحقیق از دو دسته داده در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ استفاده شده است. دسته اول شامل داده های دید افقی ایستگاه های هواشناسی همدیدی استان می باشد. از این داده ها به منظور بررسی صحت محصول AOD استفاده شده است. داده های دید افقی ماهانه از تبدیل داده های سه ساعته دید افقی به داده های میانگین ماهانه در ۱۰ ایستگاه همدیدی در استان گلستان که موقعیت آنها در شکل ۱ نشان داده شده است، به دست می آید. دسته دوم شامل داده های ماهواره ای است. سنجنده MODIS توسط

ناسا در سال ۱۹۹۹ بر روی ماهواره Terra و در سال ۲۰۰۲ نیز این سنجنده بر روی ماهواره Aqua قرار گرفته است. ماهواره Terra قبل از ظهر در ساعت ۱۰:۳۰ به وقت محلی و ماهواره Aqua بعد از ظهرها در ساعت ۱۳:۳۰ به وقت محلی از سطح زمین تصویربرداری می کنند. این سنجنده ها در ۳۶ باند طیفی که از ۰/۴ میکرومتر تا ۴/۴ میکرومتر متغیر است، تصویربرداری را انجام می دهند. تصویربرداری از سطح کره زمین هر ۱ تا ۲ روز به طور کامل انجام می شود. سنجنده MODIS دارای تفکیک های مکانی ۲۵۰ متر در باندهای ۱ و ۲، ۵۰۰ متر در باندهای ۳ تا ۷ و ۱

در مرحله بعد پس از تعیین اعتبار داده‌های ماهواره، لازم است تا با استفاده از این داده‌ها تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه AOD بررسی و مطالعه شود. سپس به منظور تعیین نحوه شکل‌گیری گردوخاک در استان گلستان، علاوه بر بررسی و تحلیل نقشه‌های همدیدی با استفاده از داده‌های بازتحلیل (ECMWF, 2017)، ERA5 رهگیری مسیر انتقال گردوخاک با استفاده از خروجی مدل HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) انجام شد. بررسی حرکت ذرات گردوخاک برای تعیین مسیر انتقال گردوخاک بسیار حائز اهمیت است. مدل HYSPLIT از جمله مدل‌های پخش و انتقال ذره‌ها و آلاینده‌های جوی است که کاربرد گسترده‌ای در حوزه علوم جوی دارد. این مدل توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا (NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration)، طراحی و توسعه داده شده است. در این مدل از دو رهیافت لاگرانژی و اویلری استفاده شده است. با توجه به این مطلب که در رهیافت لاگرانژی هر ذره در زمان‌های مختلف، موقعیت‌های متفاوتی دارد، بنابراین رهیافت لاگرانژی این امکان را فراهم می‌آورد که مدل‌های پایه لاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی و زمانی خاص، حرکت آن را در گام‌های زمانی دلخواه به سمت زمان‌های آینده (پیشرو) و یا به سمت زمان‌های گذشته (پسرو (Backward)) ردیابی کنند (درکسلر و رولف، ۲۰۱۲). در این تحقیق برای یافتن مسیر انتقال گردوخاک از رهیافت لاگرانژی استفاده شده است. رهگیری مسیر انتقال گردوخاک در چهار روز مختلف در فصول متفاوت شامل ۲۸ مارس ۲۰۰۸ (فصل بهار)، هفتم ژوئن ۲۰۱۵ (فصل تابستان)، ۲۳ سپتامبر ۲۰۱۴ (فصل پاییز) و ۲۹ ژانویه ۲۰۱۸ (فصل زمستان) انجام شد تا نمونه‌ای از منشأ گردوخاک در هر فصل بررسی شده باشد. برای اجرای مدل HYSPLIT از داده‌های GDAS (Global Data Assimilation System) استفاده شد و مدل در ارتفاع ۵۰۰ متری اجرا شد.

کیلومتر در باندهای ۸ تا ۳۶ می‌باشد. این سنجنده‌ها طوری طراحی شده‌اند تا بتوانند تغییرات سطح و جو پایین کره زمین را در مقیاس نسبتاً بزرگ ثبت کنند.

۳-۲. روش کار

با توجه به این مطلب که در استان گلستان مناطقی وجود دارد که دارای تعداد قابل توجهی از رخداد توفان‌های گردوخاک هستند اما در این مناطق ایستگاه سنجش ذرات معلق PM₁₀ و PM_{2.5} وجود ندارد، در این پژوهش برای برآورد شدت و فراوانی این توفان‌های گردوخاک از عمق نوری هواویزها از سنجنده MODIS استفاده شده است. بنابراین برای تشخیص گردوخاک با استفاده از مقدار AOD، زمانی که مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵ (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>) به عنوان رخداد گردوخاک تلقی شد. البته برای این آستانه در منابع مختلف، مقادیر متفاوتی ذکر شده است؛ به طور مثال الطایی و همکاران (۲۰۲۰) که به طبقه‌بندی هواویزها بر اساس عمق نوری در مناطق منتخب عراق پرداخته است، عمق نوری بزرگ‌تر از ۰/۴ را به عنوان گردوخاک معرفی کرده است. همچنین قادری و رهنما (۱۳۹۷) مقادیر بالای ۰/۷ را نشان‌دهنده گردوخاک بیان کرده‌اند. پس از تعیین تعداد روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵، لازم است با توجه به این مطلب که در طول دوره آماری مورد بررسی (۲۰۲۰-۲۰۰۰) ایستگاه سنجش ذرات معلق وجود ندارد (تنها مراوه تپه از سال ۲۰۲۱ شامل ایستگاه سنجش ذرات معلق PM₁₀ و PM_{2.5} است) این داده‌ها با استفاده از داده‌های دید افقی دیدبانی شده، اعتبارسنجی شوند. از آنجاکه جنس این دو نوع داده یکی نیست بنابراین استفاده از شاخص‌های تحلیل خطا امکان‌پذیر نیست و باید از روش بررسی همبستگی داده‌ها استفاده کرد. بر این اساس پس از تعیین تعداد روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از اطلاعات دیدبانی و ماهواره، نمودار پراکنش همبستگی این دو نوع داده، در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. اعتبارسنجی محصول AOD

اعتبارسنجی محصول AOD بر اساس داده‌های زمینی (دید افقی) انجام شد. پس از تأیید نرمال بودن داده‌های میانگین ماهانه دید افقی و AOD آزمون همبستگی پیرسون برای تعیین میزان همبستگی بین داده‌های میانگین ماهانه دید افقی و AOD ماهانه انجام شد. داده‌های دید افقی ماهانه از تبدیل داده‌های سه‌ساعته دید افقی به داده‌های میانگین ماهانه ایستگاه‌های همدیدی در استان گلستان به دست آمد و سپس با AOD مطابق با آن ایستگاه مطابقت داده شد. در شکل ۱ ایستگاه‌های به کار گرفته شده برای داده‌های دید افقی نشان داده شده است.

نمودار پراکنش همبستگی تعداد روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از اطلاعات دیدبانی و داده‌های ماهواره در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این که داده‌های دید افقی در ایستگاه‌های دیدبانی هواشناسی با کمک ابزارهای دقیق صورت نگرفته است و صرفاً بر اساس مقدار دید در راستای افق بیان می‌شود بنابراین ممکن است گردوخاک رخ داده باشد اما در دید افقی

تأثیر قابل توجهی نگذاشته باشد. از این رو انتظار می‌رود که تعداد روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از داده‌های ماهواره (AOD بیشتر از ۰/۵) که بر اساس اطلاعات در ستون جو است، بیشتر از تعداد روزهای همراه با گردوخاک دیدبانی شده باشد که این مطلب در روزهای همراه با گردوخاک با تعداد بیشتر، بارزتر است.

نتایج نشان داد مقدار همبستگی ۰/۶۶ می‌باشد، به‌طوری که با $P\text{-Value} < 0.01$ این همبستگی مثبت بسیار معنادار می‌باشد. با توجه به این مطلب که محصول AOD دارای تفکیک مکانی ۱ کیلومتر می‌باشد و مقایسه آن با ایستگاه‌های هواشناسی که دید افقی را به صورت نقطه‌ای بیان می‌کنند انجام می‌شود، انتظار می‌رود همبستگی چندانی نداشته باشند. همچنین داده‌های دید افقی در ایستگاه‌های دیدبانی هواشناسی خود کمیت تخمینی می‌باشند و سنجش آن با کمک ابزارهای دقیق صورت نگرفته است. بنابراین مقدار همبستگی ۰/۶۶ نشان‌دهنده ارتباط معنادار آماری این دو دسته داده می‌باشد.



شکل ۲. نمودار پراکنش همبستگی داده‌های فراوانی وقوع گردوخاک دیدبانی و ماهواره در استان گلستان.

استان گلستان، تعداد روزهای همراه با گردوخاک (بدون در نظر گرفتن نحوه گسترش مکانی گردوخاک) در بازه زمانی مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. این تعداد روزها بر اساس AOD بزرگ‌تر از ۰/۵ حاصل شده است.

بر اساس این نمودار در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک مشاهده می‌شود. روند تغییرات رخداد گردوخاک نشان‌دهنده آن است که از سال ۲۰۰۷ تعداد روزهای همراه با گردوخاک افزایش یافته است و تا سال ۲۰۱۵ این حالت حفظ شده است و از سال ۲۰۱۶ به بعد تعداد روزهای همراه با گردوخاک کاهش یافته است و تا سال ۲۰۲۰ این حالت برقرار مانده است.

۲-۳. بررسی تغییرات زمانی پدیده گردوخاک طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی

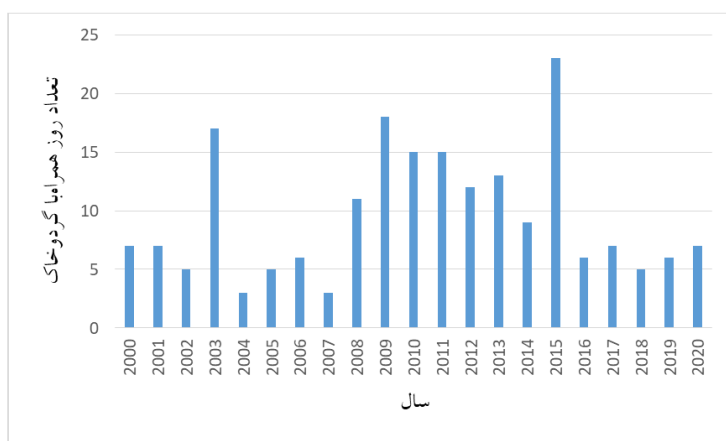
همان‌طور که پیش‌تر بیان شد بر اساس مقادیر AOD بزرگ‌تر از ۰/۵، تعداد روزهای همراه با رخداد گردوخاک در استان گلستان تحلیل و بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل در بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۲۰-۲۰۰۰)، مقادیر بیشینه AOD در هر سال، در جدول ۱ نشان داده شده است. بر این اساس بیشترین مقدار AOD در هفتم سپتامبر سال ۲۰۲۰ با مقدار ۴/۱ رخ داده است.

۳-۲-۱. روند تغییرات سالانه فراوانی تعداد روزهای همراه با گردوخاک

با هدف بررسی نحوه توزیع فراوانی سالانه گردوخاک در

جدول ۱. بیشینه مقدار AOD در هر سال از یازده زمانی مورد مطالعه (۲۰۲۰-۲۰۰۰) در استان گلستان.

سال	تاریخ رخداد بیشینه AOD	بیشینه مقدار AOD	سال	تاریخ رخداد بیشینه AOD	بیشینه مقدار AOD
۲۰۰۰	۴ اوت	۳/۹	۲۰۱۱	۱۳ آوریل	۳/۹
۲۰۰۱	۱۲ سپتامبر	۴/۱	۲۰۱۲	۳ اوت	۳/۷
۲۰۰۲	۱۴ ژوئن	۳/۹	۲۰۱۳	۵ ژوئن	۳/۹
۲۰۰۳	۵ آوریل	۳/۹	۲۰۱۴	۲۶ فوریه	۳/۹
۲۰۰۴	۳ آوریل	۱/۶	۲۰۱۵	۲۴ آوریل	۳/۹
۲۰۰۵	۵ اوت	۲	۲۰۱۶	۱۸ دسامبر	۲/۸
۲۰۰۶	۲ سپتامبر	۲/۱	۲۰۱۷	۲۱ ژانویه	۲/۶
۲۰۰۷	۱۱ اوت	۳/۹	۲۰۱۸	۲۸ مه	۳/۹
۲۰۰۸	۲۹ مارس	۳/۹	۲۰۱۹	۹ اوت	۱/۸
۲۰۰۹	۶ ژوئیه	۴	۲۰۲۰	۷ سپتامبر	۴/۱
۲۰۱۰	۲۷ نوامبر	۲/۳			



شکل ۳. تعداد روزهای همراه با گردوخاک در هر سال (بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰) در استان گلستان با استفاده از AOD بیشتر از ۰/۵.

۲-۲-۳ روند تغییرات ماهانه فراوانی تعداد روزهای همراه با گردوخاک

در ادامه با هدف استخراج تغییرات درون سالانه و مقایسه رخداد متفاوت گردوخاک برای هر ماه در سالهای مختلف الگوی تغییرات هر ماه در طول دوره مطالعاتی ترسیم شده است (شکل ۴). این تعداد روزها بر اساس مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵ استخراج شده است.

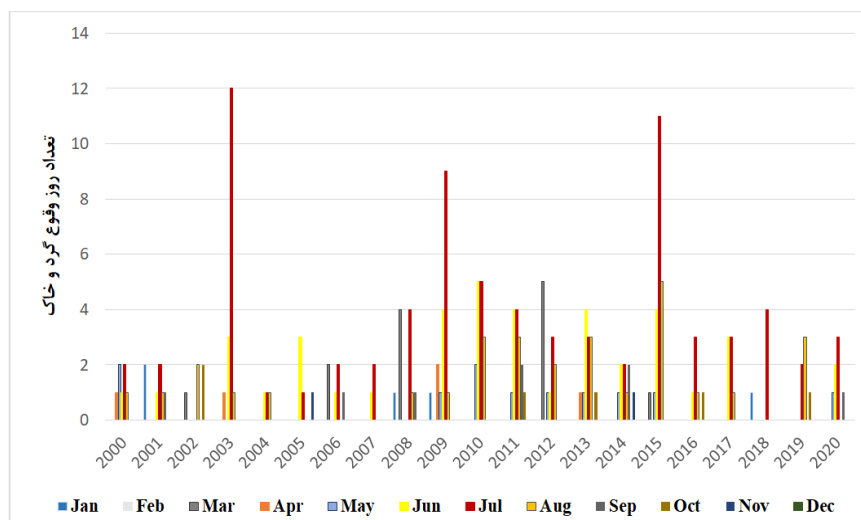
در ماههای ژوئن، ژوئیه و اوت در مقایسه با ماههای دیگر (شکل ۴)، بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک ثبت شده است. پس از آنها ماههای مه و مارس بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک را داشته‌اند. در سایر ماهها تعداد رخدادهای گردوخاک مساوی و یا کمتر از ۲ مورد بوده است.

۳-۲-۳ گسترش مکانی پدیده گردوخاک به صورت سالانه

به منظور بررسی توزیع مکانی تعداد روزهای همراه با رخداد گردوخاک (بر اساس مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵) در هر سال در استان گلستان، چون در محدوده مورد مطالعه تقریباً در تمام ماههای سال پدیده گردوخاک ثبت شده است، برای ترسیم نقشه‌های توزیع مکانی گردوخاک، تمامی ماهها در نظر گرفته شد. در فراخوانی

مربوط به رخداد گردوخاک، حد آستانه ۰/۵ میکرومتر که در بخش اعتبارسنجی نیز به این مطلب اشاره شد، اعمال شده است.

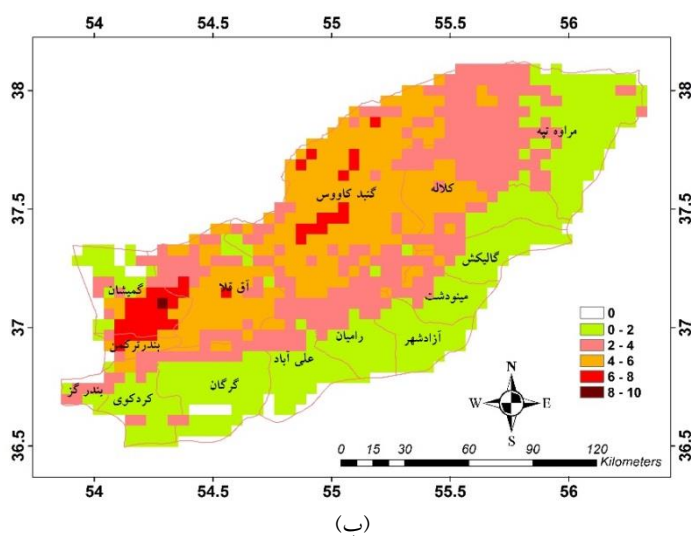
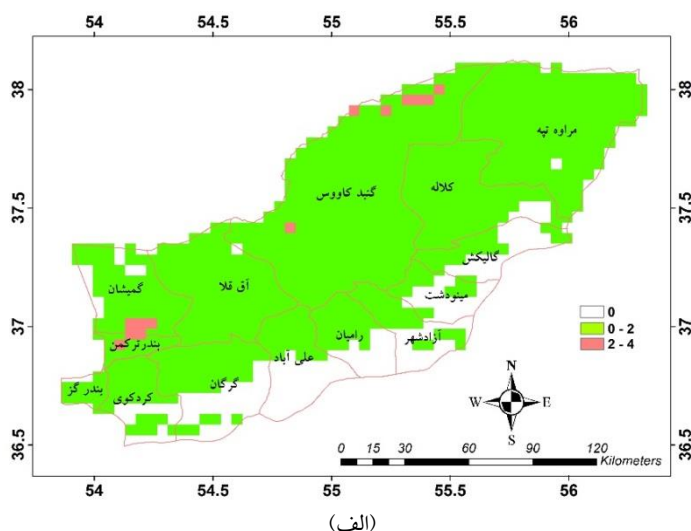
نقشه تغییرات مکانی تعداد روزهای همراه با گردوخاک که بر اساس مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵، شناسایی شده است در مقیاس سالانه در محدوده مورد مطالعه برای بازه زمانی سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ ترسیم و بررسی شد. با توجه به نقشه‌های به دست آمده (نشان داده نشده است) و انبوه اطلاعات در این پژوهش توزیع مکانی متوسط سالانه تعداد روزهای همراه با گردوخاک در محدوده مورد مطالعه برای سه بازه زمانی به دست آمده از شکل ۳، یعنی سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷، سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵، و سالهای ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ در شکل ۵ نشان داده شده است. روز بیشینه و کمینه هر یک از سه بازه مورد بررسی (بر اساس شکل ۳) در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در هر یک از سه بازه سالهایی که تعداد روزهای همراه با رخداد گردوخاک در آنها (بر اساس شکل ۳) از متوسط گروه بسیار بیشتر است، در الگوی متوسط دخالت داده نشده است و الگوی سال حذف شده به تنهایی آورده شده است. به این ترتیب در بازه اول سال ۲۰۰۳ و در بازه دوم سالهای ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ در الگوی متوسط بازه دخالت داده نشده‌اند.

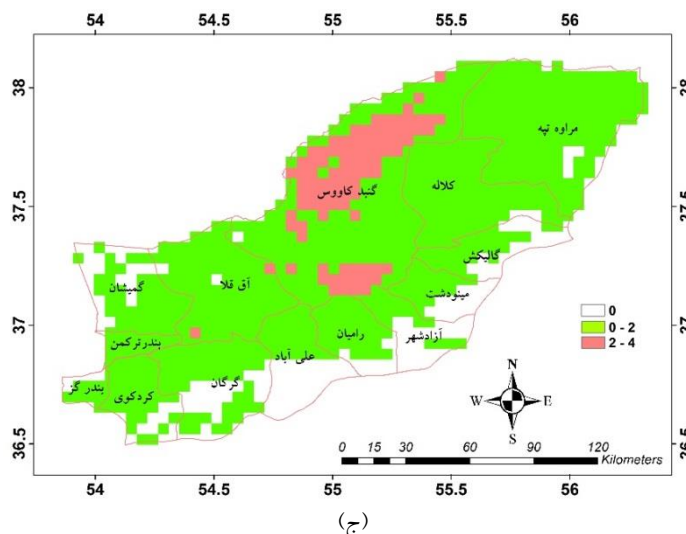


شکل ۴. نمودار تعداد روزهای همراه با گردوخاک در ماههای مختلف دوره مورد مطالعه با استفاده از AOD بیشتر از ۰/۵.

بخش‌های استان درگیر گردوخاک می‌شود. بیشینه تعداد روزهای همراه با رخداد گردوخاک به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۳ (شکل ۶-الف) و ۲۰۰۰ (شکل ۶-ب) رخ داده است که تعداد رخداد پدیده گردوخاک در سال ۲۰۰۳ از متوسط این بازه زمانی بسیار بیشتر است؛ بنابراین این سال از الگوی متوسط این بازه زمانی حذف شده است. کمینه تعداد روزهای همراه با گردوخاک بر اساس شکل ۳ در این بازه زمانی در سال ۲۰۰۴ رخ داده است که الگوی مکانی آن در شکل ۶-ج نشان داده شده است.

در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ (به استثنای ۲۰۰۳) (شکل ۵-الف) تقریباً تفاوت بارزی میان تعداد روزهای همراه با گردوخاک وجود ندارد و عمدتاً شهرستان‌های گنبد کاووس، آق‌قلا، گمیشان، کلالة و مراوه تپه را درگیر کرده است. در سال ۲۰۰۳ (شکل ۶-الف) هم بر تعداد روزهای همراه با گردوخاک افزوده می‌شود هم پهنه‌های بیشتری از استان را درگیر می‌کند به طوری که علاوه بر بخش‌های شمالی استان، شهرستان‌های جنوبی استان را نیز درگیر کرده است. این نشان می‌دهد که در شرایطی که شدت گردوخاک بیشتر باشد، تقریباً تمامی





(ج)

شکل ۵. توزیع مکانی متوسط سالانه تعداد روزهای همراه با گردوخاک که بر اساس مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵، شناسایی شده است در محدوده مورد مطالعه برای سه بازه زمانی الف) سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ به جز سال ۲۰۰۳، ب) سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ به جز سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵، ج) سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰.

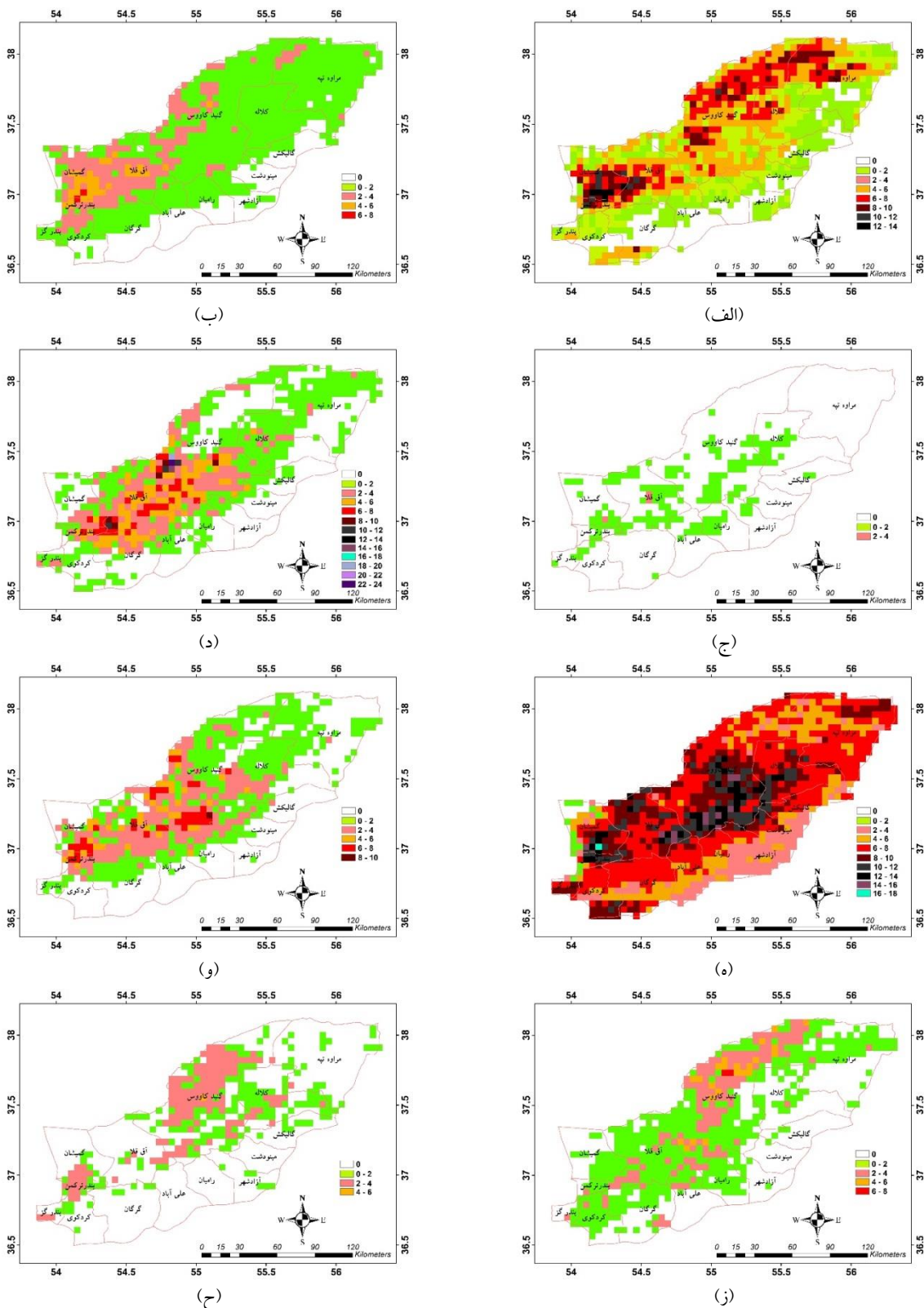
تعداد روزهای همراه با گردوخاک بر اساس شکل ۳ در این بازه زمانی در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ رخ داده است که الگوی مکانی رخداد تعداد روزهای همراه با گردوخاک به ترتیب در شکل ۶-ح و شکل ۶-ز نشان داده شده است.

۳-۲-۴. گسترش مکانی پدیده گردوخاک به صورت

فصلی

الگوی فصلی تغییرات مکانی رخداد گردوخاک در بازه زمانی مورد مطالعه، بررسی و تحلیل شد (شکل نشان داده نشده است). همان‌گونه که در شکل ۴ نیز مشخص و بارز است بیشترین فراوانی تعداد رخداد گردوخاک مربوط به فصل تابستان و سپس به ترتیب مربوط به فصل‌های بهار، پاییز و زمستان است. همچنین در حالت‌های فرین نسبت به حالت متوسط هر یک از سه بازه زمانی، بیشترین رخداد مربوط به فصل تابستان است.

در بازه زمانی سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ (شکل ۵-ب) نسبت به بازه زمانی اول هم بر تعداد وقوع گردوخاک افزوده می‌شود و هم تقریباً در این سال‌ها به جز مناطق جنوبی (جنگلی استان) همه شهرستان‌های استان درگیر پدیده گردوخاک هستند. بر اساس شکل ۳ در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۰۹ بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک ثبت شده است اما سال ۲۰۱۵ از لحاظ گستردگی مکانی تقریباً مشابه سال ۲۰۱۴ می‌باشد. الگوی مکانی کمینه (سال ۲۰۱۴) و بیشینه تعداد رخداد گردوخاک که بر اساس شکل ۳ به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۰۹ رخ داده است در شکل ۶-و، شکل ۶-د و شکل ۶-ه قابل مشاهده است. از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ از شدت گردوخاک در استان کاسته می‌شود و نکته قابل توجه در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، تغییرات مکانی شدت و تعداد وقوع گردوخاک می‌باشد که بیشتر در محدوده بخش‌های شمالی استان و به خصوص شهرستان گنبد کاووس متمرکز شده است. کمینه و بیشینه



شکل ۶. توزیع مکانی سالانه تعداد روزهای همراه با گردوخاک که بر اساس مقادیر AOD بیشتر از ۰/۵، شناسایی شده است در محدوده مورد مطالعه برای (الف) سال ۲۰۰۳ بیشینه اول رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ که از متوسط بازه بسیار بزرگتر است (ب) سال ۲۰۰۰ بیشینه دوم رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ (ج) سال ۲۰۰۴ کمینه رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ (د) سال ۲۰۱۵ بیشینه اول رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ که از متوسط بازه بسیار بزرگتر است (ه) سال ۲۰۰۹ بیشینه دوم رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ که از متوسط بازه بسیار بزرگتر است (و) سال ۲۰۱۴ کمینه رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ (ز) سال ۲۰۲۰ بیشینه رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ (ح) سال ۲۰۱۸ کمینه رخداد سالانه بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰.

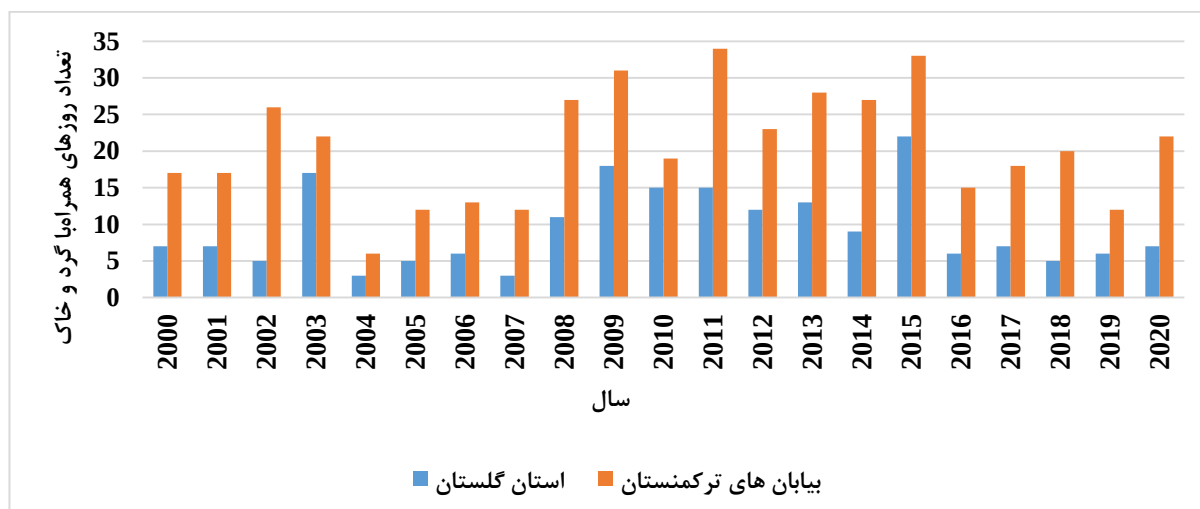
۳-۳. بررسی نحوه تأثیرپذیری استان گلستان از بیابان‌های ترکمنستان

در سال‌های اخیر بحث‌های زیادی در رابطه با علل و منشأ پدیده گردوخاک در استان گلستان مطرح شده است که یکی از علل اصلی بیابان‌های ترکمنستان مطرح شده است (شکل ۱-ب). بنابراین با هدف تحلیل میزان تأثیرگذاری بیابان‌های ترکمنستان در رخدادهای گردوخاک در استان گلستان، مجموع سالانه تعداد رخدادهای گردوخاک در محدوده مطالعاتی استان گلستان و بیابان‌های ترکمنستان در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این نمودار تطابق زمان وقوع بین رخدادهای گردوخاک در بیابان‌های ترکمنستان و گلستان مشاهده می‌شود. در بیابان‌های ترکمنستان دقیقاً سه بازه زمانی مورد بررسی در استان گلستان، قابل تشخیص است. به عبارت دیگر دو بازه زمانی با رخداد کمتر پدیده گردوخاک (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ و سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰) و یک بازه زمانی با رخداد بیشتر پدیده گردوخاک (سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵) وجود دارد.

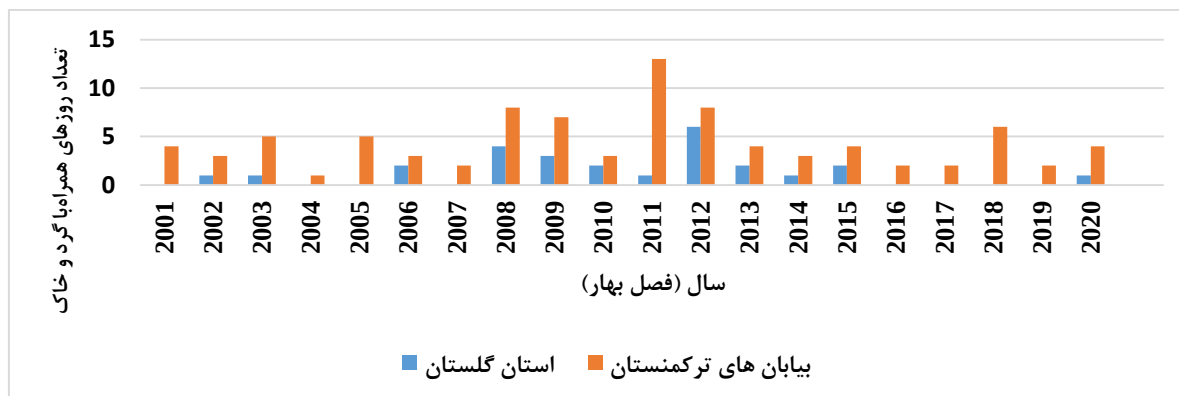
در ادامه میزان تأثیرپذیری استان گلستان از بیابان‌های ترکمنستان (بیابان استان بالکان) در فصول مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۸). آن چه مشخص است در فصول مختلف به علت رفتار متفاوت گردش

جوی، رفتار و نحوه تأثیرپذیری استان از بیابان‌های ترکمنستان (بیابان استان بالکان) متفاوت خواهد بود. بنابراین مقایسه روند تغییرات گردوخاک در فصول مختلف امکان تحلیل این تأثیرپذیری‌ها را با استفاده از مقدار گردوخاک و نه توسط رفتارهای جوی فراهم خواهد کرد.

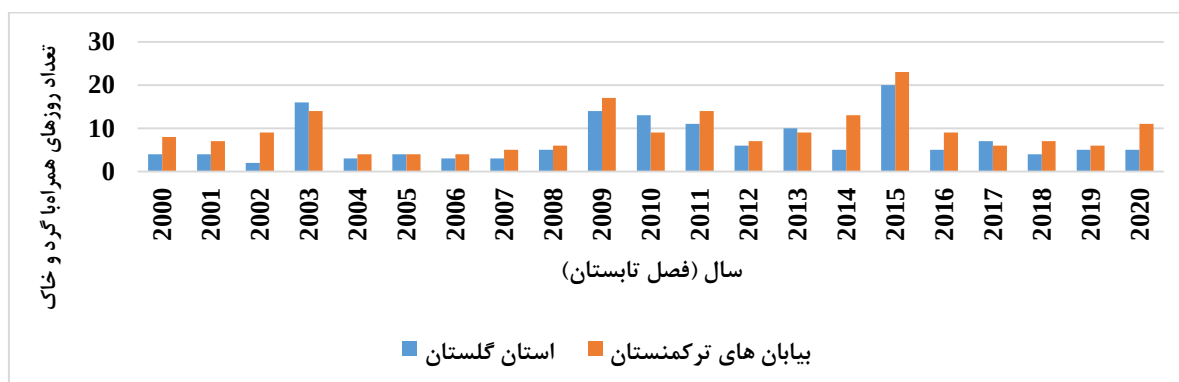
در ترکمنستان تقریباً در تمام فصول رخداد گردوخاک وجود دارد؛ اما در فصل تابستان (شکل ۸-ب) این تعداد بیشتر است. در استان گلستان بیشتر رخدادهای گردوخاک در فصل تابستان وجود دارد که نوسانات آن با ترکمنستان همخوانی و مطابقت خوبی دارد. در بازه زمانی دوم (سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵) که هم تعداد روزهای همراه با گردوخاک سالانه در استان گلستان و هم در ترکمنستان بیشتر است ناشی از این مطلب است که، در این سال‌ها در فصل بهار (شکل ۸-الف) رخداد گردوخاک در ترکمنستان و استان گلستان بیشتر بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد سامانه‌های جوی در فصل تابستان و بهار و توپوگرافی منطقه طوری است که با رخداد گردوخاک در ترکمنستان این گردوخاک به استان گلستان انتقال می‌یابد. البته با توجه به نمودار فصل تابستان در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۰ به نظر می‌رسد منابع داخلی در رخداد گردوخاک استان گلستان نیز تأثیر داشته‌اند.



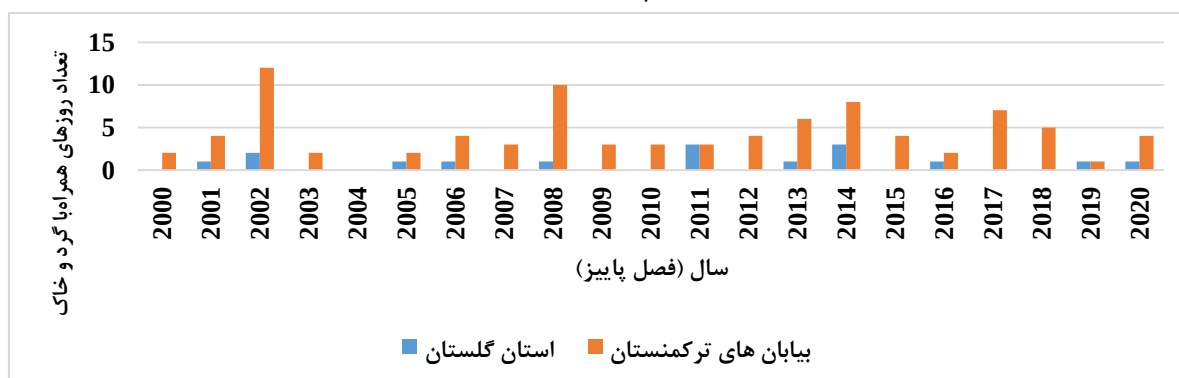
شکل ۷. مقایسه تعداد روزهای همراه با گردوخاک در هر سال (بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰) در استان گلستان و بیابان‌های ترکمنستان.



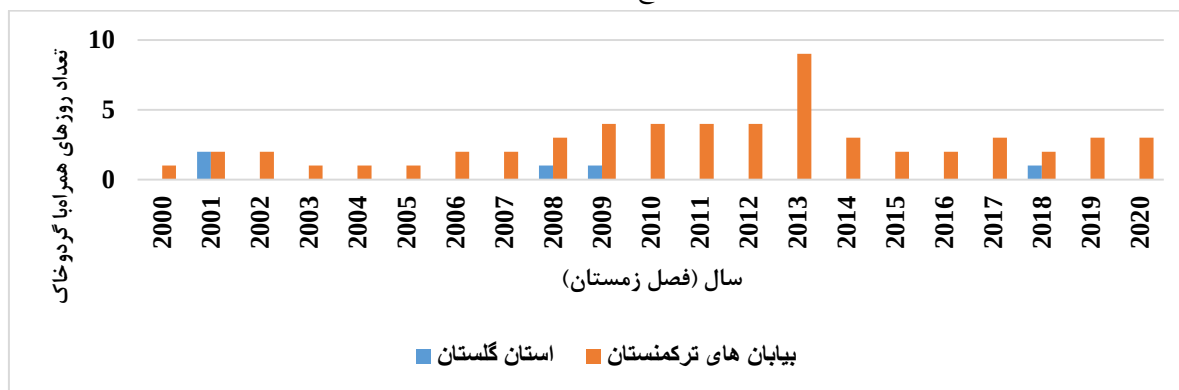
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۸. مقایسه تعداد روزهای همراه با گردو خاک در هر سال (بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰) در استان گلستان و بیابان های ترکمنستان: (الف) فصل بهار، (ب) فصل تابستان، (ج) فصل پاییز، (د) فصل زمستان.

۳-۴. تحلیل همدیدی روز منتخب از هر فصل و رهگیری مسیر انتقال گردوخاک با استفاده از خروجی

مدل HYSPLIT

در این بخش به منظور بررسی با جزئیات بیشتر وقوع گردوخاک در استان گلستان رهگیری مسیر انتقال گردوخاک در چهار روز مختلف در فصول متفاوت شامل ۲۸ مارس ۲۰۰۸ (فصل بهار)، هفتم ژوئن ۲۰۱۵ (فصل تابستان)، ۲۳ سپتامبر ۲۰۱۴ (فصل پاییز) و ۲۹ ژانویه ۲۰۱۸ (فصل زمستان) انجام شد تا نمونه‌ای از منشأ گردوخاک در هر فصل بررسی شده باشد. همچنین توزیع مکانی عمق نوری هواویزها (AOD) و تحلیل همدیدی با استفاده از داده‌های ERA5، در هر یک از این چهار روز ارائه شده است.

الف) فصل بهار: در فصل بهار در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ در استان گلستان بیشترین گردوخاک ثبت شده است که گستره مکانی آن‌ها نیز بیشتر شهرستان گنبد کاووس و آق‌قلا را درگیر کرده است. به همین منظور ردیابی مسیر حرکت گردوخاک برای شهرستان گنبد کاووس به عنوان نمونه برای بهار سال ۲۰۰۸ انجام شد. بنابراین در روز ۲۸ مارس سال ۲۰۰۸ که در استان گلستان گردوخاک ثبت شده است (شکل ۹-الف)، با استفاده از مدل رهگیری جریان باد و روش پسرو، رهگیری جریان باد انجام شد. رهگیری جریان باد با روش پسرواز شهر گنبد کاووس و آق‌قلا در ۲۸ مارس شروع و با عقب رفتن در زمان به مدت ۱۰ ساعت ادامه یافت (شکل ۹-ب). در این روز شهرستان گنبد کاووس و آق‌قلا تحت تأثیر بسته هوایی قرار دارد که از شمال و از روی بیابان‌های ترکمنستان نشأت گرفته است. از این رو می‌توان توده‌های گردوخاک را نشأت گرفته از بیابان ترکمنستان در شمال استان گلستان دانست که با جهت شمالی و شمال غربی وارد استان گلستان شده است. از دیدگاه همدیدی نقشه‌های همدیدی میانگین روز ۲۸ مارس و یک روز قبل از آن (شکل ۱۰) بیانگر استقرار پرفشار سبیری با مرکز ۱۰۳۸ هکتوپاسکال بر مرکز سبیری است که زبانه آن تا دریای خزر و دریای سیاه کشیده شده

است و مرکز پرفشار ۱۰۲۰ هکتوپاسکال بر روی شمال دریای خزر بسته شده است (شکل ۱۰-الف) و بنابراین بر شرق دریای خزر جریانات شمالی حاکم شده است (شکل‌های ۱۰-ج، ۱۰-د). همان‌طور که در شکل ۱۰-ج و شکل ۱۰-د مشخص است این جریانات شمالی از سطح زمین تا ارتفاع حدود ۵۰۰ متری از سطح زمین در شرق دریای خزر برقرار است. در تراز میانی وردسپهر نیز در شرق و مرکز ایران پشته و حالت پایدار حاکم است (شکل ۱۰-ب). بنابراین با وزش باد در مناطق بیابانی ترکمنستان و همگرایی باد (شکل‌های ۱۰-ج، ۱۰-د) در این منطقه در لایه‌های زیرین وردسپهر گردوخاک در این منطقه مستعد شکل گرفته و با جریانات شمالی وارد مناطق شمالی استان گلستان شده است.

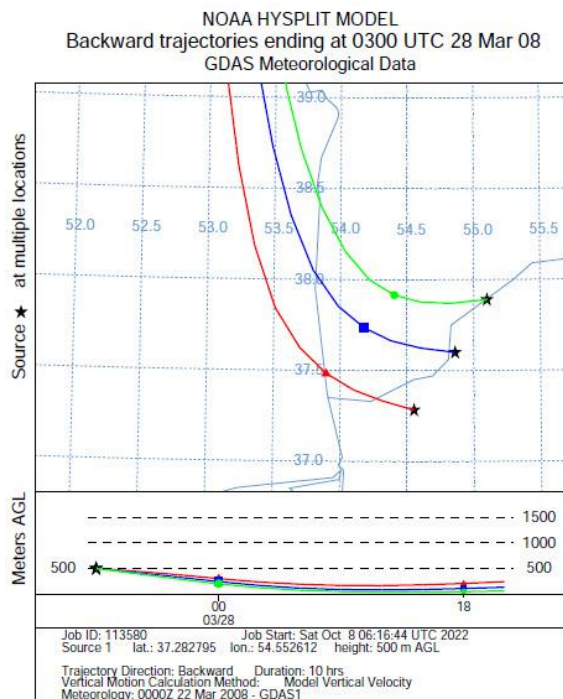
ب) فصل تابستان: در فصل تابستان در استان گلستان در سال ۲۰۱۵ بیشترین تعداد گردوخاک ثبت شده است که گستره مکانی آن‌ها نیز بیشتر در شهرستان گنبد کاووس و آق‌قلا می‌باشد. در این فصل به عنوان نمونه هفتم ژوئن سال ۲۰۱۵ جهت بررسی مسیر حرکت توده گردوخاک انتخاب شد (شکل ۱۱-الف). با توجه به ردیابی جریان پسرو به مدت ۱۰ ساعت (شکل ۱۱-ب)، در این روز شهرستان گنبد کاووس تحت تأثیر بسته هوایی قرار دارد که از شمال غرب از روی بیابان‌های ترکمنستان نشأت گرفته است. از این رو می‌توان توده‌های گردوخاک را به مانند فصل بهار نشأت گرفته از بیابان ترکمنستان در شمال استان گلستان دانست که با جهت شمالی و شمال غربی در منطقه در حرکت هستند. با توجه به شکل ۱۲-الف در تاریخ منتخب در فصل تابستان کم‌فشار با مرکز ۱۰۰۴ هکتوپاسکال بر سبیری و پرفشار شرق اروپا با مرکز ۱۰۲۶ هکتوپاسکال بر شمال دریای سیاه قرار دارد. با توجه به الگوی توصیف شده و شکل ۱۲-الف جریانات کاملاً شمالی بر دریای خزر و استان گلستان در تاریخ منتخب تابستان، بسیار قوی‌تر از نمونه مورد بررسی در فصل بهار است و در نتیجه وزش باد شدیدتر و همگرایی قوی‌تر میدان باد افقی در ترکمنستان (شکل‌های ۱۲-ج، ۱۲-د)

آلودگی و گردوخاک در منطقه می‌شود.

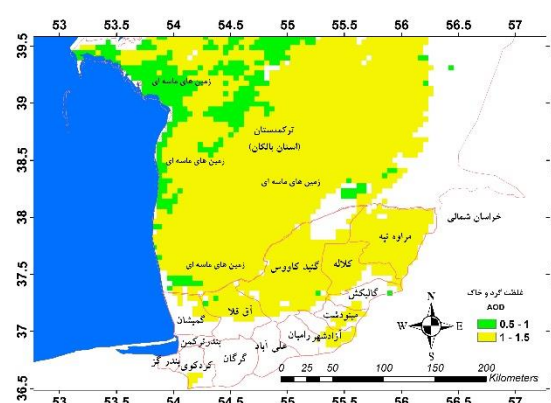
(د) فصل زمستان: در فصل زمستان روز ۲۹ ژانویه ۲۰۱۸ (شکل ۱۵-الف) جهت رهگیری مسیر حرکت توده به‌عنوان نمونه انتخاب شد. با توجه به مسیر رهگیری شده برای ۲۰ ساعت قبل برای این تاریخ، مسیر حرکت این توده هوا نیز از روی بیابان‌های ترکمنستان می‌باشد (شکل ۱۵-ب). در این روز پرفشار قوی با مرکز ۱۰۴۸ هکتوپاسکال بر سبیری قرار دارد که در منطقه مورد مطالعه شیوفشاری زیادی را به وجود آورده است (شکل ۱۶-الف). در تراز میانی وردسپهر نیز در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ناوه با الگوی واچرخندی LC1 (Life Cycle 1) (تورن کرافت و همکاران، ۱۹۹۳) بر ترکمنستان و شمال شرق و مرکز ایران حاکم است (شکل ۱۶-ب). بنابراین با وجود رطوبت کافی در ترازهای زیر ۷۰۰ هکتوپاسکال این الگو منجر به رخداد بارش در منطقه شمال شرق و مرکز کشور ایران شده است (شکل ۱۷) و با وجود وزش باد شدید (شکل‌های ۱۶-ج، ۱۶-د) و رخداد گردوخاک در ترکمنستان و فرارفت آن به استان گلستان میزان گردوخاک انتقالی چندان قابل توجه نبوده است.

منجر به رخداد گردوخاک شدیدتر در ترکمنستان و انتقال قوی تر آن به استان گلستان شده است. با توجه به الگوی تراز میانی وردسپهر نیز استقرار الگوی پشته و حالت پایدار در منطقه (شکل ۱۲-ب) منجر به تداوم حضور گردوخاک در منطقه شده است.

(ج) فصل پاییز: در فصل پاییز جهت رهگیری مسیر توده گردوخاک روز ۲۳ سپتامبر ۲۰۱۴ که گردوخاک گستره زیادی از استان را درگیر کرده است (شکل ۱۳-الف) به‌عنوان نمونه انتخاب شد. با توجه به مسیر رهگیری شده برای ۲۰ ساعت قبل از این تاریخ، مسیر حرکت توده هوا نیز از روی بیابان‌های ترکمنستان می‌باشد (شکل ۱۳-ب). در این روز زبانه ضعیف پرفشار سبیری با مرکز ۱۰۲۴ هکتوپاسکال (شکل ۱۴-الف) بر روی دریای خزر نفوذ کرده است و جریانات شمالی را بر روی منطقه و استان گلستان در ترازهای زیرین وردسپهر (در حدود ۵۰۰ متری از سطح زمین) به وجود آورده است (شکل‌های ۱۴-ج، ۱۴-د). در تراز میانی وردسپهر الگوی متوسط زمانی تقریباً ساختار مداری را نشان می‌دهد (شکل ۱۴-ب) و حالت پایدار در منطقه کمتر برقرار است که منجر به تداوم کمتر

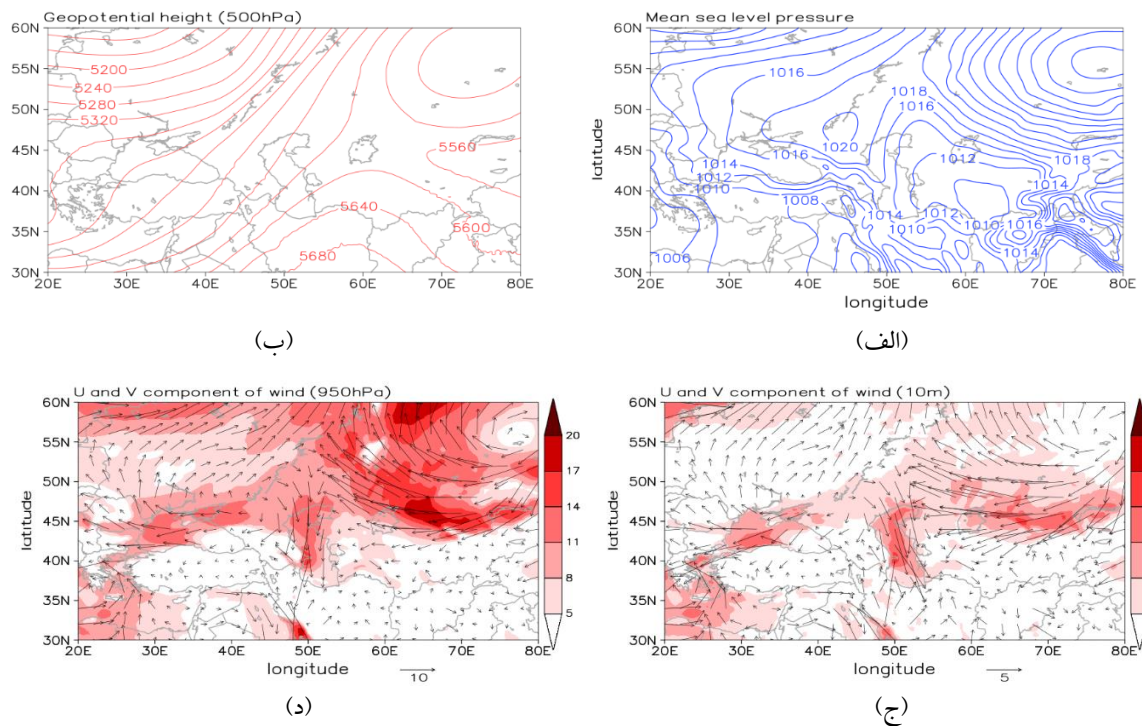


(ب)

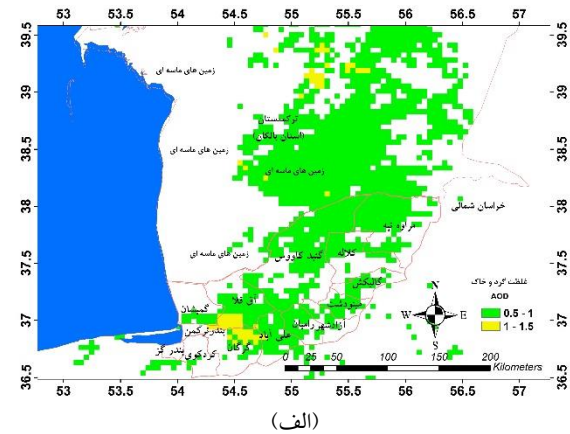
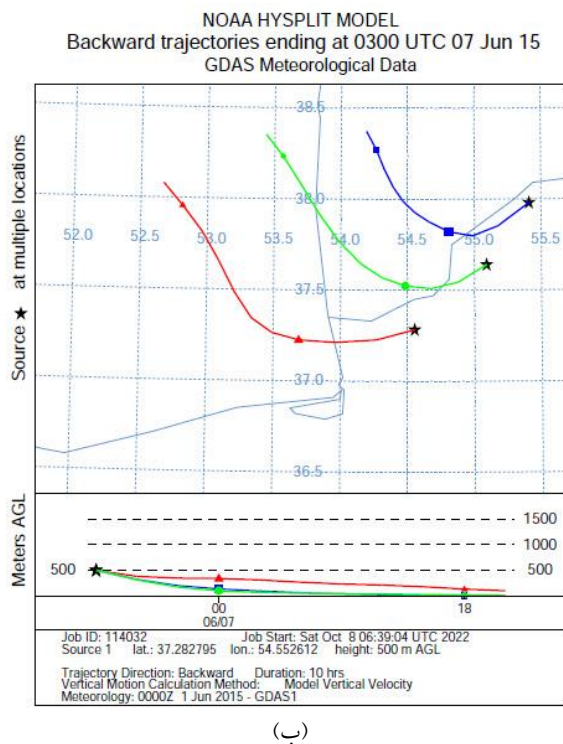


(الف)

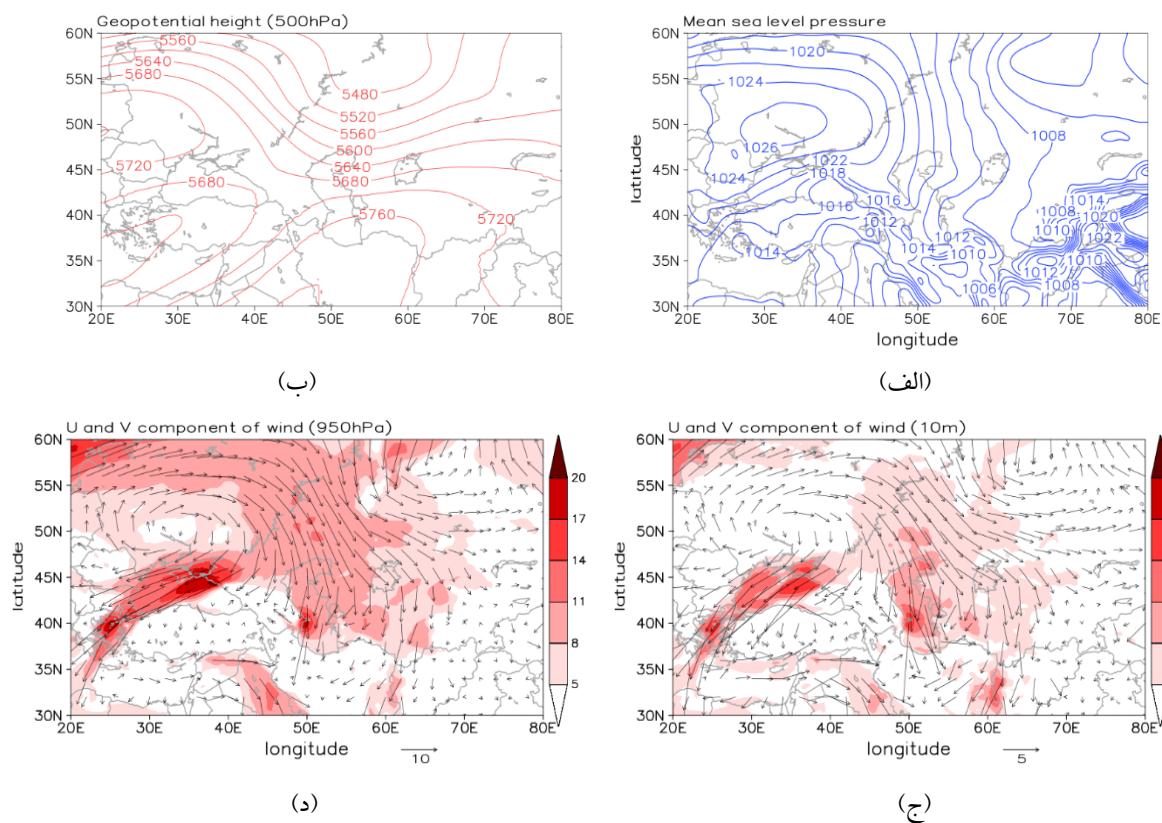
شکل ۹. الف) توزیع مکانی عمق نوری هواویزها (AOD) در منطقه استان گلستان و ترکمنستان در روز ۲۸ مارس ۲۰۰۸ (فصل بهار، ب) خروجی مدل HYSPLIT در ارتفاع ۵۰۰ متر از سطح زمین در همان روز.



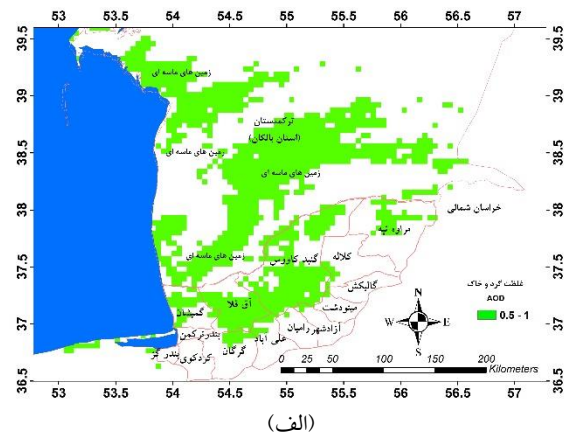
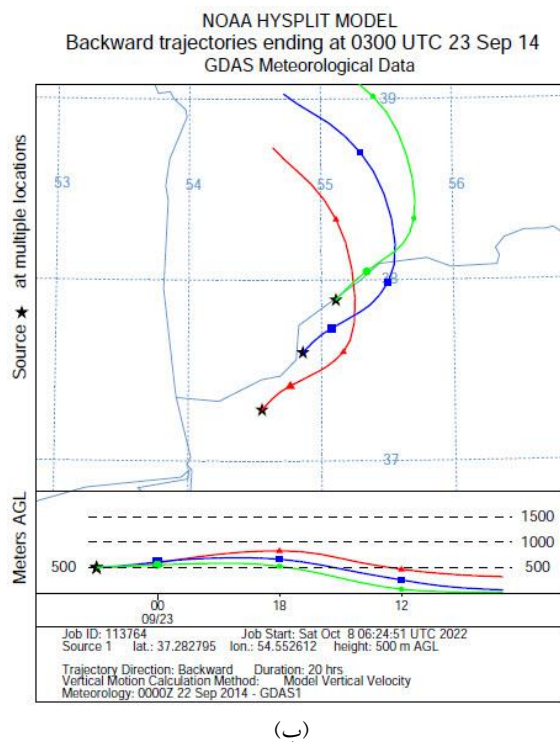
شکل ۱۰. نقشه‌های همدیدی در منطقه مورد مطالعه به صورت میانگین زمانی در روز ۲۸ مارس سال ۲۰۰۸ و یک روز قبل از آن به عنوان نمونه در فصل بهار (الف) فشار متوسط سطح دریا بر حسب هکتوپاسکال (ب) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوپتانسیل متر (ج) باد مداری در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه (د) باد مداری تراز ۹۵۰ هکتوپاسکال (تقریباً معادل ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین) بر حسب متر بر ثانیه.



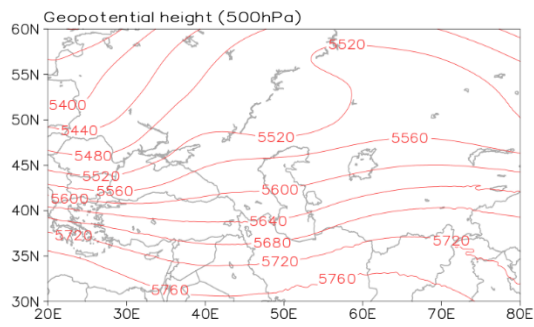
شکل ۱۱. مانند شکل ۹ اما در روز هفتم ژوئن سال ۲۰۱۵ به عنوان نمونه در فصل تابستان.



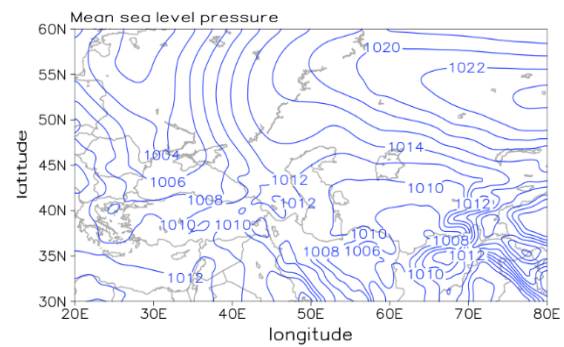
شکل ۱۲. مانند شکل ۱۰ اما در روز هفتم ژوئن سال ۲۰۱۵ و یک روز قبل از آن به عنوان نمونه در فصل تابستان.



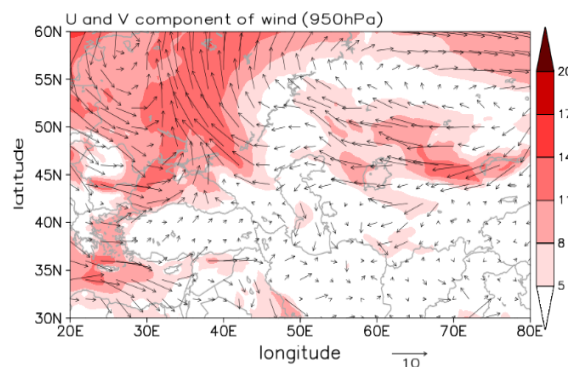
شکل ۱۳. مانند شکل ۹ اما در روز ۲۳ سپتامبر سال ۲۰۱۴ به عنوان نمونه در فصل پاییز.



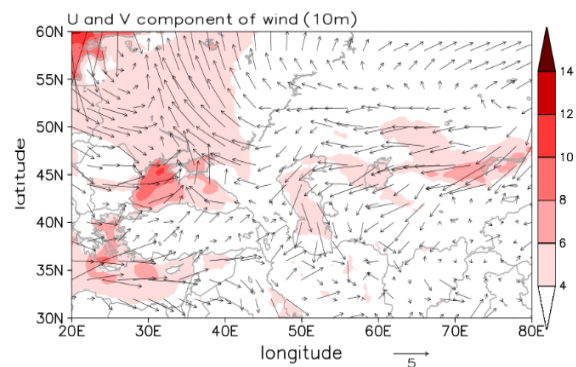
(ب)



(الف)

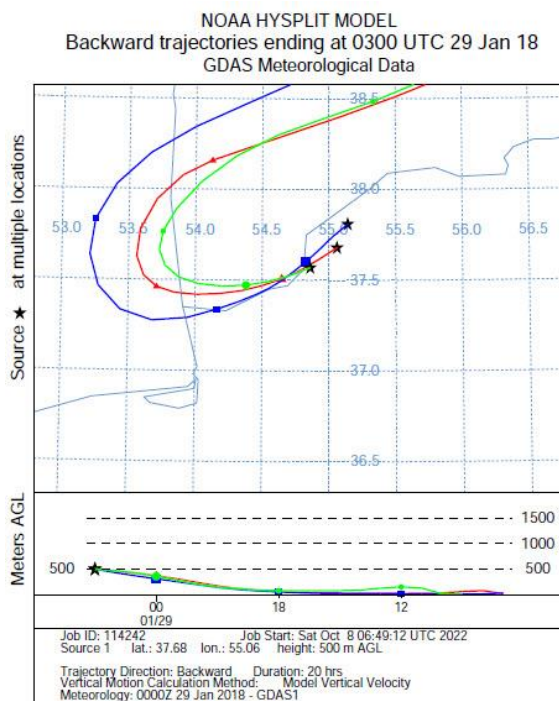


(د)

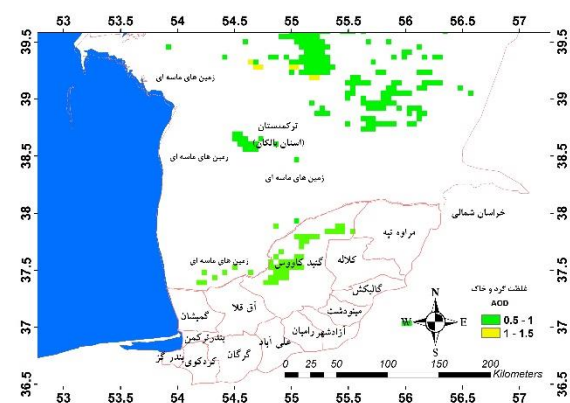


(ج)

شکل ۱۴. مانند شکل ۱۰ اما در روز ۲۳ سپتامبر سال ۲۰۱۴ و یک روز قبل از آن به عنوان نمونه در فصل پاییز.

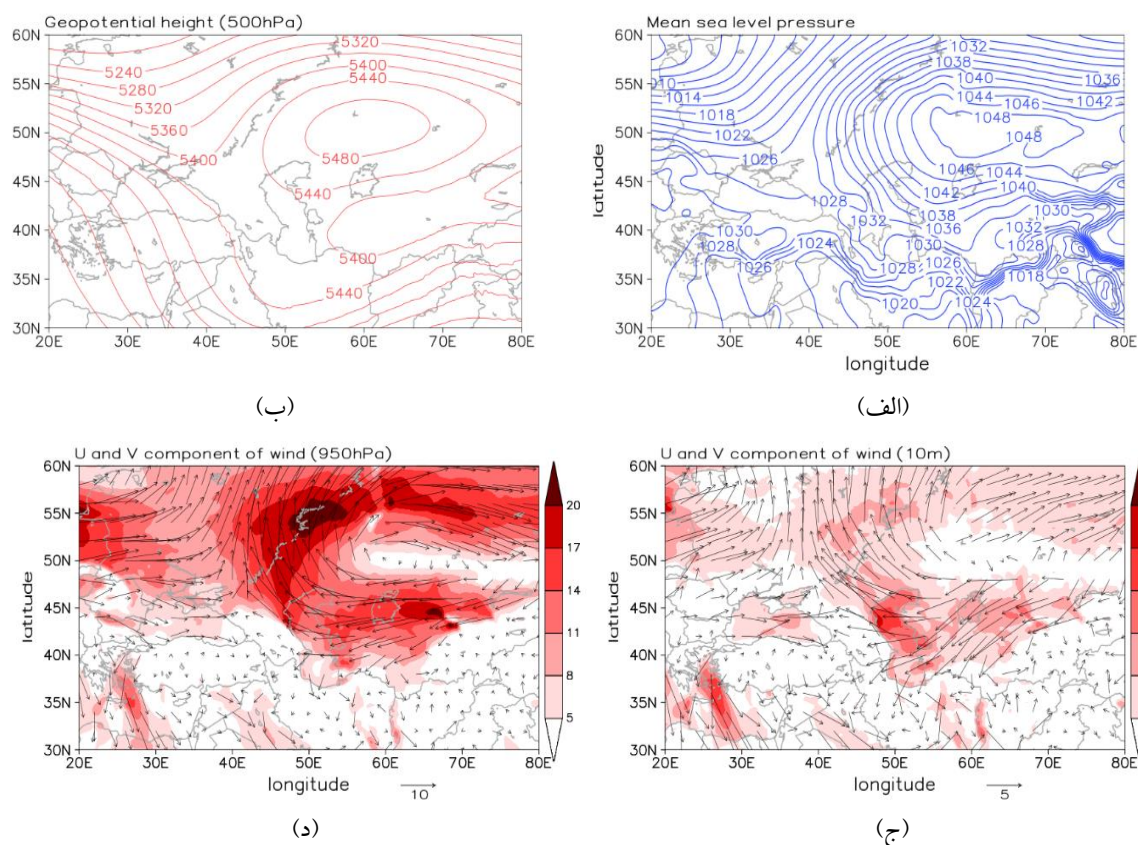


(ب)

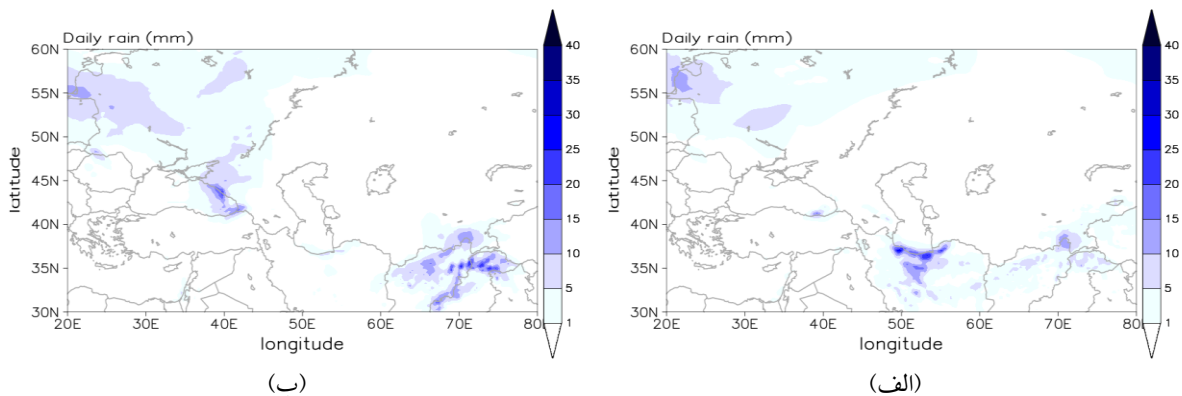


(الف)

شکل ۱۵. مانند شکل ۹ اما در روز ۲۹ ژانویه سال ۲۰۱۸ به عنوان نمونه در فصل زمستان.



شکل ۱۶. مانند شکل ۱۰ اما در روز ۲۹ ژانویه سال ۲۰۱۸ و یک روز قبل از آن به عنوان نمونه در فصل زمستان.



شکل ۱۷. بارش روزانه بر حسب میلی متر (الف) ۲۸ ژانویه (ب) ۲۹ ژانویه سال ۲۰۱۸ (مربوط به روز منتخب در فصل زمستان).

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش تغییرات مکانی و زمانی فراوانی توفان های گردو خاک استان گلستان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، با استفاده از داده های AOD سنجنده MODIS با مقادیر بزرگ تر از ۰/۵، که توسط داده های دیدبانی اعتبارسنجی شدند (همبستگی ۰/۶۶)، بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل در بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۲۰-۲۰۰۰)، مقادیر بیشینه AOD در هر سال، که در جدول ۱ نشان داده شده

است، بیشترین مقدار AOD در هفتم سپتامبر سال ۲۰۲۰ با مقدار ۴/۱ رخ داده است. بررسی نحوه توزیع سالانه و فصلی فراوانی توفان های گردو خاک در استان، بیانگر دو بازه زمانی با تعداد رخداد کم توفان گردو خاک (سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ (به جز سال ۲۰۰۳) و سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰) و یک بازه زمانی با تعداد رخداد زیاد توفان گردو خاک (سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵) است. نتایج بررسی فصلی بیانگر بیشترین تعداد روزهای همراه با گردو خاک

در فصل تابستان و کمترین آن در فصل زمستان است. همچنین بررسی نحوه گسترش مکانی تعداد رخداد توفان گردوخاک در استان گلستان نشان‌دهنده بیشینه رخداد در مناطق شمالی استان یعنی شهرستان‌های گنبد کاووس، آق‌قلا و گمیشان است. بیشینه فراوانی گردوخاک‌های شهرستان‌های گنبد کاووس، آق‌قلا و گمیشان نیز به دلیل قرارگیری آنها در مسیر عبور جریان‌های جوی و نزدیکی آنها به مناطق منشأ و چشمه گردوخاک می‌باشد. در واقع رهگیری مسیر حرکت و انتقال گردوخاک با استفاده از خروجی مدل HYSPLIT در منطقه نشان داد که منشأ عمده گردوخاک استان از کشور ترکمنستان و به خصوص بیابان‌های استان بالکان است و رابطه مستقیمی بین افزایش گردوخاک در بیابان‌های ترکمنستان و استان گلستان وجود دارد. بررسی همدیدی روز منتخب از هر فصل به طور کلی بیانگر شیو فشاری شدید در منطقه ترکمنستان و شمال ایران است، به گونه‌ای که جریانات در منطقه گلستان و شرق دریای خزر شمالی و وزش باد قابل توجه است که این مطلب موجب خیزش خاک و انتقال آن می‌شود. همچنین در روزهای منتخب فصل بهار، تابستان و پاییز در تراز میانی وردسپهر الگوی پشته و شرایط پایدار جوی حاکم است که منجر به ماندگاری بیشتر گردوخاک رخ داده می‌شود. در فصل زمستان با گذر امواج تراز میانی وردسپهر شدت گردوخاک رخ داده بدلیل ناپایداری جو و وقوع بارش ضعیف تر است.

منابع

احمدی، م.؛ شکبیا، ع. ر. و داداشی‌رودباری، ع. ع. (۱۳۹۸)، بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مولفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری هواویزهای فصلی ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۱)، ۲۳۳-۲۱۱.

ارجمند، م.؛ راشکی، ع. ر. و سرگزی، ح. (۱۳۹۷). پایش زمانی و مکانی پدیده گردوغبار با استفاده از داده‌های

ماهواره‌ای در جنوب شرق ایران، با تاکید بر منطقه جازموریان. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۲۷(۱۰۷)، ۱۶۸-۱۵۳.

برتینا، ه. ا.؛ صیاد، غ. ع.؛ متین‌فر، ح. ر. و حجتی، س. (۱۳۹۳). توزیع زمانی-مکانی ذرات معلق اتمسفری در غرب کشور بر مبنای داده‌های طیفی سنجنده MODIS. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۱(۴)، ۱۳۷-۱۱۹.

بروغنی، م.؛ مرادی، ح.؛ زنگنه‌اسدی، م. و پورهایمی، س. (۱۳۹۸). ارزیابی نقش خشک‌سالی بر فراوانی وقوع گردوغبار در استان خراسان رضوی. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۱(۵)، ۱۲۱-۱۰۹.

تقوی، ف.؛ اولاد، ا.؛ صفرزاد، ط. و ایران نژاد، پ. (۱۳۹۲). تشخیص و پایش گردوغبار غرب ایران با استفاده از روش‌های سنجش از دور. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۷۶(۳)، ۹۶-۸۳.

خوش‌سیما، م.؛ علی‌اکبری‌بیدختی، ع. ع. و احمدی‌گیوی، ف. (۱۳۹۲). تعیین عمق نوری هواویزها با استفاده از داده‌های دید افقی و سنجش از دور در دو منطقه شهری در ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۹(۱)، ۱۷۴-۱۶۳.

دوستان، ر. (۱۳۹۷). تحلیل همدید گردوغبار شمال شرق ایران. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۷(۱۶)، ۴۴-۲۳.

رضوی‌زاده، س.؛ عباسی، ح. ر. و درگاهیان، ف. (۱۴۰۰). بررسی پدیده گردوغبار در استان گلستان، با تاکید بر شاخص عمق اپتیکی و سمت و سرعت باد. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۵(۵۳)، ۶۷-۵۸.

زرین، آ.؛ صالح‌آبادی، ن.؛ مفیدی، ع. و داداشی‌رودباری، ع. ع. (۱۴۰۱). بررسی فصلی گردوخاک در شمال شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخداد‌های گردوخاک فرین با مدل WRF-CHEM. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۸(۲)، ۴۴۰-۴۲۱.

ستودیان، س. و ارحامی، م. (۱۳۹۰). بررسی داده‌های ماهواره‌ای در توسعه مدل جهت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در سطح زمین: مطالعه موردی تهران،

شبییه سازی ۲ توفان هم زمان گردوخاک در مناطق شرق و شمال شرقی ایران. کنفرانس بین المللی گردوغبار در جنوب غرب آسیا، زابل، دانشگاه زابل. لشکری، ح. و کیخسروی، ق. (۱۳۸۷). تحلیل آماری سینوپتیکی توفان های گردوغبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی (۲۰۰۵-۱۹۹۳). نشریه پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۴۰(۶۵)، ۳۳-۱۷.

محمدپور، ک.؛ سلیقه، م.؛ درویشی بلورانی، ع. و رضیئی، ط. (۱۳۹۹). واکاوی و مقایسه تولیدات ماهواره ای و شبیه سازی شده AOD در تحلیل گردوغبارهای غرب ایران (۲۰۰۰-۲۰۱۸). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۷(۱)، ۳۲-۱.

مساعدی، ا.؛ خلیلی زاده، م. و محمدی استادکلاهی، ا. (۱۳۸۷). پایش خشکسالی هواشناسی در سطح گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۲)، ۱۸۲-۱۷۶.

میراکبری، م. و ابراهیمی خوسفی، ز. (۱۳۹۹). بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق جو با استفاده از شاخص عمق اپتیکی آتروسول ها در جنوب شرق ایران. مجله سنجش از دور و سامانه های اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۱(۳)، ۱۸-۱۷.

پنجمین همایش ملی مهندسی محیط زیست، تهران. عراقی زاده، م. و مسعودیان، ا. (۱۴۰۰). تحلیل اقلیمی و بررسی توفان های گردوغبار در خراسان رضوی. نشریه پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۳)، ۳۱۸-۳۰۵.

قادری نسب، ف. و رهنما، م. ب. (۱۳۹۷). آشکارسازی گردوغبار در حوضه آبریز جازموریان با استفاده از تکنیک های چندطیفی در تصاویر سنجنده مادیس. نشریه پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۳)، ۵۶۲-۵۴۵.

مباشری، م. ر.؛ غلامی، ن. ا. و فرج زاده، م. (۱۳۹۰). ارتقاء الگوریتم آشکارسازی ابر با استفاده از تصویر همزمان MODIS و ASTER، مطالعه موردی: شهر دامغان. نشریه برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، ۱۵(۲)، ۹۹-۸۱.

کردجی، م.؛ داداشی، ن. و رحمن نیا، م. ر. (۱۳۹۶). بررسی عوامل ایجاد پدیده گردوغبار در استان گلستان. دومین همایش ملی مدیریت منابع آب نواحی ساحلی، ساری، دانشگاه علوم کشاورزی طبیعی ساری.

کریمی، س.؛ حسین حمزه، ن.؛ نوری، ف. و رنجبر سعادت آبادی، ع. (۱۳۹۸). بررسی همدیدی و

Al-Taie, K. B., Rajab, J. M., & Al-Salihi, A. M. (2020). Climatology and classification of aerosols based on optical properties over selected stations in Iraq. AIP Conference Proceedings 2290:050041, <https://doi.org/10.1063/5.0031471>.

Chen, S., Huang, J. P., Jia, R., Jiang, N. X., Kang, L., Ma, X., & Xie, T. T (2017). Comparison of dust emissions, transport, and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011. *Science China-Earth Sciences*, 60(1), 1338-1355 CNKI: SUN:JDXG.0.2017-07-011.

Chen, B., & Sverdluk, L. (2007). Optical and microphysical characteristics of aerosol structures in central Asia, *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 67330S-67330S-7.

Draxler, R. R., & Rolph, G. D. (2012). HYSPLIT (hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory) model access via NOAA ARL, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

ECMWF, (2017). ERA5 data documentation. European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF). <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation>.

Giannadaki, D., Pozzer, A., & Lelieveld, J. (2014). Modeled global effects of airborne desert dust on air quality and premature mortality. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 957-968.

Indoitu, R., Orlovsky, L., & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in Central Asia: spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85(none), 62-70, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.03.018>

Liu, Y., Wu, C., Jia, R., & Huang, J. (2018), An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semiarid region of Central and East Asia. *Science China Earth Sciences*, 61(9), 31-42. CNKI: SUN:JDXG.0.2018-09-003.

Nabavi, S. O., Haimberger, L., & Abbasi, E. (2019). Assessing PM2.5 concentrations in Tehran, Iran, from space using MAIAC, deep

- blue, and dark target AOD and machine learning algorithms. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 889-903.
- Namdari, S., Valizade, K. K., Rasuly, A. A., & Sari Sarraf, B. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 191, doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-015-2029-7>.
- Opp, C., Groll, M., Aslanov, I., Lotz, T., & Vereshagina, N. (2016). Aeolian dust deposition in the southern Aral Sea region (Uzbekistan): groundbased monitoring results from the LUCA project, Quaternary International, S104061821600224X, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.103>.
- Qoraboyev, I., & Moldashev, K. (2018). The belt and road initiative and comprehensive regionalism in Central Asia. *Social Science Electronic Publishing*, 9(8), 115-130, https://doi.org/10.1007/978-981-10-5915-5_7.
- Shahid, I., Shahid, M. Z., Chen, Z., & Asif, Z. (2022). Long-Term Variability of Aerosol Concentrations and Optical Properties over the Indo-Gangetic Plain in South Asia, *Atmosphere*, 13, 1266. <https://doi.org/10.3390/atmos13081266>.
- Sujaritpong, S., Dear, K., Cope, M., Walsh, S., & Kjellstrom, T. (2014). Quantifying the health impacts of air pollution under a changing climate—a review of approaches and methodology. *International Journal of Biometeorology*, 58(2), 149-160, <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0625-8>.
- Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., & McIntyre, M. E. (1993). Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behavior. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119, 17-56.
- Wang, D., Zhang, F., Yang, S., Xia, N., & Ariken, M. (2020). Exploring the spatial-temporal characteristics of the aerosol optical depth (AOD) in Central Asia based on the moderate resolution imaging spectra radiometer (MODIS), *Environmental monitoring and assessment*, 192, 1-15.
- Wolff, C., Plessen, B., Dudashvilli, A. S., Breitenbach, S. F. M., Cheng, H., Edwards, L. R., & Strecker, M. R. (2017). Precipitation evolution of Central Asia during the last 5000 years, *Holocene*, 27(1), 0959683616652711, <https://doi.org/10.1177/0959683616652711>.
- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., & Shaheen, A. (2020). Long-term aerosol optical depth trend over Iran and identification of dominant aerosol types. *The Science of the Total Environment*, 722, 137906, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137906>.