

Spatiotemporal Zoning of Dust Storm Intensity in Golestan Province Using the Dust Storm Index (DSI)

Esmaeil Valizadeh¹, Ali Mohammadian Behbahani^{2*} , Chooghi Bairam Komaki³, Khalil Ghorbani⁴

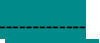
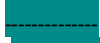
1. PhD student, Department of Desert Region Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Email: ali.mohammadian@gau.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4813-8151>

3. Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4. Professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Golestan Province has experienced an increasing occurrence of dusty days in recent years. This study aimed to analyze the spatial distribution and intensity zoning of dust events in the province using the Dust Storm Index (DSI). Three-hourly observations from synoptic meteorological stations, including present-weather codes and horizontal visibility, were collected and analyzed. Dust events were identified based on World Meteorological Organization (WMO) present-weather codes and classified into three intensity categories: weak dust events, moderate dust storms, and severe dust storms. The DSI was calculated on monthly, seasonal, and annual temporal scales. Temporal trends were then assessed using the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator, whereas abrupt changes in the time series were examined using the Pettitt change-point test. The results revealed pronounced spatial heterogeneity and a multi-centered pattern of dust activity across Golestan Province. The Gorgan Airport Station, with an annual mean DSI of 4.47, was identified as the most persistent and prominent dust hotspot. The Gonbad-e Kavus, Maraveh Tappeh, and Kalaleh Airport stations were classified as secondary active hotspots. In contrast, the Bandar-e Gaz, Bandar-e Torkaman, and Aliabad stations recorded the lowest DSI values. On a seasonal scale, dust activity peaked mainly in spring in the eastern part of the province, whereas the central areas experienced higher activity during autumn and winter. Trend analysis indicated significant increasing trends at Gorgan Airport and Kalaleh stations; significant decreasing trends at Gonbad-e Kavus, Maraveh Tappeh, and Bandar-e Gaz stations; and no significant trends at the remaining stations. Overall, dust activity in Golestan Province appears to result from the combined influence of local dust sources, land surface conditions, and transboundary dust transport.
Article history:	
Received: 	
Revised: 	
Accepted: 	
Published: 	
Keywords: Dust storm, DSI index, Mann-Kendall, Sen's slope, zoning, Golestan Province.	

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ---.



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 000000000000000000

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Dust storms are among the most significant atmospheric and climatic hazards in arid and semiarid regions. Increasing drought, declining soil moisture, vegetation degradation, land-use change, wind erosion, and strong winds are the primary drivers of this phenomenon. The consequences include reduced air quality, decreased horizontal visibility, transportation disruption, public health threats, reduced agricultural yields, and impacts on radiation and climate cycles. According to the World Meteorological Organization (WMO), a dust event is defined as a reduction in horizontal visibility to below 10 km, accompanied by a registered dust-related weather code. Golestan Province, despite being influenced by Caspian systems, is also affected by internal dust sources and transboundary dust transport from the Karakum Desert and arid regions of Turkmenistan and Central Asia. Simple counts of dusty days are insufficient for assessing the true severity of a phenomenon because events differ in intensity, visibility reduction, and environmental impact. Previous studies have demonstrated that the DSI, by simultaneously combining the frequency and intensity of dust events, is a more precise tool than simple day counting. O’Loingsigh et al. (2014) reported a correlation exceeding 93% between this index and observational data from 110 Australian stations, and a subsequent study (2015) confirmed increased dust events during low-precipitation years. McTainsh and Tews (2007) demonstrated the effectiveness of DSI in producing wind erosion maps at various temporal and spatial scales. In Iran, Khusfi et al. (2020) found a significant relationship between summer wind speed, winter precipitation, and DSI in central arid regions, whereas Vali and Roustaei (2017) reported a more than threefold increase in the index over three recent decades. Despite this body of work, most DSI-based studies have focused on central, eastern, and southwestern Iran. Despite its exposure to internal sources and transboundary dust transport from the Karakum Desert and Turkmenistan, Golestan Province has received limited attention. Furthermore, simultaneous analyses of spatiotemporal dust patterns and identification of abrupt change points across the province’s stations have not been conducted. Therefore, this study aims to analyze the spatiotemporal pattern and map the intensity of dust storms in Golestan Province using the Dust Storm Index (DSI).

DATA AND METHODOLOGY

The data used included three-hourly synoptic observations from Golestan Province stations over a long-term period from 2006 to 2025. The stations studied are: Gorgan Airport, Gonbad-e Kavus, Maraveh Tappeh, Kalaleh Airport, Aliabad, Bandar-e Gaz Incheh Borun, Minudasht, Hashemabad Gorgan, and Bandar-e Torkaman. After initial quality control, incomplete records or those with apparent errors were identified, corrected, or removed. Dust events were extracted based on the WMO standard codes (05–09, 30–35, and 98). A dusty day is defined as one in which horizontal visibility falls below 10 km and at least one related code is recorded during the 24 hours. DSI was applied to simultaneously evaluate the frequency and intensity of events. The events were classified into three categories: weak, local, suspended, or transported events (LDE; codes 05–09), moderate dust storms (MDS; codes 30–32 and 98), and severe dust storms (SDS; codes 33–35). The formula is:

$$(1) \quad DSI = \sum_{i=1}^n [(5 \times SDS) + MDS + (0.05 \times LDE)]i$$

The advantage of this index over simple counting is the assignment of different weights to each category, so that severe storms contribute more to the final index value. For temporal trend analysis, the non-parametric Mann-Kendall test, Sen’s slope estimator, and Pettitt’s test for abrupt change-point detection were used. Analyses were performed using the XLSTAT add-in (version 2022.3.1) in Excel.

RESULTS AND DISCUSSION

Monthly and seasonal analyses revealed that the dust pattern of the province is not uniform and exhibits considerable spatiotemporal variability. Gorgan Airport recorded high DSI values throughout

all months of the year and displayed behavior distinctly different from other stations. The persistence of dust during humid months was attributed to stable local sources and the flat, low-roughness terrain characteristics of the airport surroundings. Maraveh Tappeh showed the highest DSI values primarily from March to May, associated with spring synoptic systems and transboundary dust transport from Turkmenistan. Gonbad-e Kavus and Kalaleh exhibited intermediate and transitional patterns, with a relative increase in DSI during the warm season. Aliabad, Bandar-e Gaz, and Bandar-e Torkaman recorded low and relatively uniform DSI values, which were attributed to higher humidity, Hyrcanian forest cover, and the moderating effect of the Caspian Sea (Figure 1).

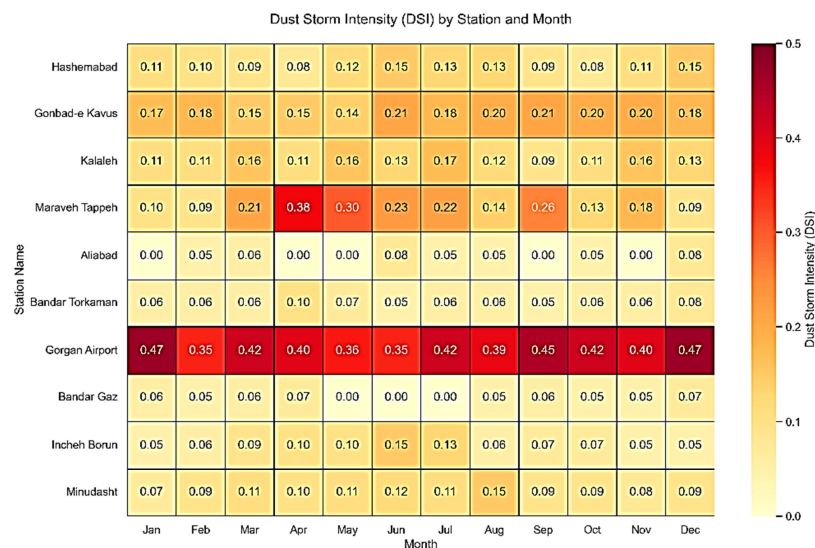


Figure 1: Heat map of monthly variations in the Dust Storm Index at synoptic stations of Golestan Province

Annual mean DSI revealed a heterogeneous, multi-focal pattern: Gorgan Airport (4.47) as the primary and persistent hotspot; Gonbad-e Kavus (1.81) and Maraveh Tappeh (1.74) as active secondary hotspots; and Kalaleh (1.15) as a secondary center. Bandar-e Torkaman, Bandar-e Gaz, and Aliabad, with values below 0.25, fell within low-dust zones (Figure 2). The trend analysis results showed a significant increasing trend at Gorgan Airport and Kalaleh stations, a significant decreasing trend at Gonbad-e Kavus, Maraveh Tappeh, and Bandar-e Gaz, and no significant trend at the remaining stations (Figure 3).

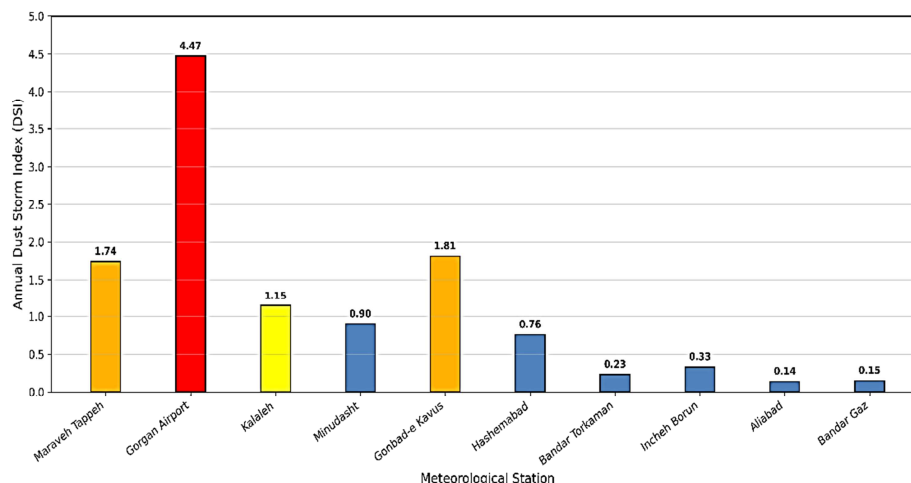


Figure 2: Annual trend of the Dust Storm Index at synoptic stations of Golestan Province

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

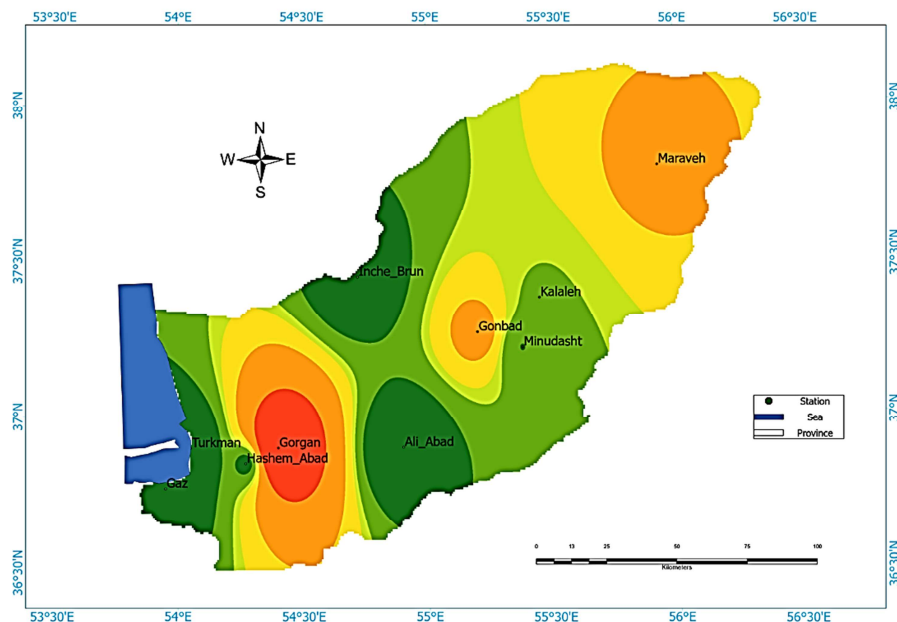


Figure 3: Annual zoning of the Dust Storm Index in Golestan Province

CONCLUSION

Dust activity in Golestan Province does not follow a uniform pattern and results from the interaction of local dust sources, land surface conditions, soil moisture, vegetation cover, wind erosion, local winds, and transboundary transport from the arid regions of Turkmenistan and Central Asia. Gorgan Airport is the most important and persistent dust hotspot in the province, while Kalaleh, Gonbad-e Kavus, and Maraveh Tappeh are secondary centers. The coastal and southwestern areas of the province experienced lower dust intensity. The trend findings indicate that dust management must be conducted in a zone-specific manner tailored to the conditions of each station.

REFERENCES

References [in Persian]

- Alipour, N., Mesbahzadeh, T., Ahmadi, H., Malekian, A., Jafari, M. (2018). 'Synoptic analysis of dust events and its relation with drought in Alborz and Qazvin provinces', *Geography and Regional Planning*, 8(30), pp. 59-68. [In Persian]
- Arab Ameri, F., Mohammadian Behbahani, A., Ownegh, M., Arami, S. H. (2024). 'Statistical Analysis of Spatio-Temporal Variations of Dust Occurrences in Golestan Province', *Desert Ecosystem Engineering*, 12(40), pp. 59-72. [In Persian]
- Babouei, H., Mohammadian Behbahani, A., Hosseinalizadeh, M., Sadoddin, A., Boali, H. (2026). 'A Bayesian Network Approach for Modeling Wind Erosion Intensity in Golestan Province', *Geography and Development*, 24(82), pp. 233-254. [In Persian]
- Bamerinejad, F., Mohammadian Behbahani, A., Komaki, Ch. B., Papi, R., Darvishi Boloorani, A. (2025). 'Evaluation of Machine Learning Algorithms for Dust Source Susceptibility Mapping by Integrating Remote Sensing and Environmental Parameters (Case Study: Kara-Bogaz- Gol Basin)', *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 29(2), pp. 85-107. [In Persian]
- Jannat Rostami, M., Rahimi, M., Kaboli, S.H. (2021). 'Analysis of Trend Dust Index Changes (DSI) and Evaluation of its Relationship with Drought in the southern slope of Alborz', *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 12(43), pp. 19-40. [In Persian]
- Khansalari, S., Majidi Dashli Brun, O., Nikzadfar, M., Mollaarazi, 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), pp. 517-540. [In Persian]
- Naeimi, M., Mirakbari, M., Khosroshahi, M., Zandifar, S., Ghasemi Aryan, Y. (2022). 'Analyzing the effects of climate change on dust events, a case study: Khorasan Razavi province', *Desert Ecosystem Engineering*, 10(33), pp. 65-78. [In Persian]

Vali, A., Roustaei, F. (2017). Investigation of the wind erosion trend in central Iran using dust storm index in the last fifty years. *Journal of Water and Soil Science*, 21(4), 189–200. [In Persian]
Yousefi Mobarhan, E., Khaleghi, A. (2024). 'Analyzing the Trend of Changes in the Dust Storm Index (DSI) and Its Relationship with the Meteorological Drought in the Arid Climate (Case Study: Semnan Province)', *Advanced Environmental Sciences*, 22(2), pp. 289-304. [In Persian]

References [in English]

- Ebrahimi Khusfi, Z., Khosroshahi, M., Roustaei, F., & Mirakbari, M. (2020). Spatial and seasonal variations of sand-dust events and their relation to atmospheric conditions and vegetation cover in semi-arid regions of central Iran. *Geoderma*, 365, 114225.
- Goudie, A. (2018). Dust storms and ephemeral lakes. *Desert*, 23(1), 153–164.
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3–4), 350–363.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (5th ed.). Charles Griffin and Company Ltd.
- McTainsh, G., & Tews, E. (2007). *Soil Erosion by Wind: Dust Storm Index (DSI)*. National Land and Water Resources Audit, Canberra.
- McTainsh, G. H. (1998). Dust storm index. *SCARM Technical Report*, 70, 65–72.
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: a global review. *Aeolian Research*, 24, 53–63.
- O’Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Parsons, K., Strong, C. L., Shinkfield, P., & Tapper, N. J. (2015). Using meteorological observer data to compare wind erosion during two great droughts in eastern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 123–130.
- O’Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Tews, E. K., Strong, C. L., Leys, J. F., Shinkfield, P., & Tapper, N. J. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research*, 12, 29–40.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Tabari, H., Marofi, S., Amini, A., Hosseinzadeh, P., Talaei, Kurosh & Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151 (2), 128-136.
- Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., Ren, M., & Wang, G. (2020). Re-evaluation of the Power of the Mann-Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series. *Front. Earth Sci.* 8(14), 1-12.
- World Meteorological Organization (WMO). (2019). *Manual on Codes: International Codes Volume 1.1* (WMO No. 306).

پهنه‌بندی شدت غبارناکی در استان گلستان با استفاده از شاخص DSI

اسماعیل ولی زاده^۱، علی محمدیان بهبهانی^{۲*} , چوقی بایرام کمکی^۳، خلیل قربانی^۴

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (نویسنده مسئول)

ایمیل: ali.mohammadian@gau.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4813-8151>

۳. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ---/---/--- تاریخ ویرایش: ---/---/--- تاریخ پذیرش: ---/---/--- تاریخ انتشار: ---/---/--- واژه‌های کلیدی: گردوغبار، شاخص DSI، من-کندال، شیب سن، پهنه‌بندی، استان گلستان.	استان گلستان در سال‌های اخیر با پدیده روزهای گرد و غباری به صورت فزاینده‌ای مواجه بوده است. لذا پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوی مکانی و پهنه‌بندی شدت غبارناکی در استان گلستان بر پایه شاخص طوفان گردوغبار (DSI) انجام گردید. بدین منظور، داده‌های سه‌ساعته ایستگاه‌های سینوپتیک استان شامل کدهای هواشناسی و دید افقی گردآوری و تحلیل شد. رخدادهای گردوغبار بر اساس کدهای استاندارد سازمان جهانی هواشناسی استخراج و در سه طبقه رخدادهای ضعیف، طوفان‌های متوسط و طوفان‌های شدید دسته‌بندی شدند. سپس شاخص DSI در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه و روند زمانی آن با آزمون من-کندال، شیب سن و آزمون پتیت ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که الگوی غبارناکی استان کاملاً ناهمگن و چندکانونی است. ایستگاه هواشناسی فرودگاهی گرگان با میانگین سالانه ۴/۴۷ به‌عنوان کانون پایدار و اصلی گردوغبار شناسایی شد و ایستگاه‌های سینوپتیک گنبدکاوس، مراوه‌تپه و ایستگاه هواشناسی فرودگاهی کلاله در رده کانون‌های فعال ثانویه قرار گرفتند. در مقابل، ایستگاه‌های سینوپتیک بندرگز، بندرترکمن و علی‌آباد کمترین مقادیر DSI را ثبت کردند. از نظر فصلی، شرق استان بیشینه غبارناکی را عمدتاً در فصل بهار و مرکز استان در فصول پاییز و زمستان تجربه می‌کند. تحلیل روند نیز نشان‌دهنده روند افزایشی معنادار غبارناکی در ایستگاه‌های سینوپتیک فرودگاهی گرگان و کلاله، روند کاهشی معنادار در ایستگاه‌های سینوپتیک گنبدکاوس، مراوه‌تپه و بندرگز، و نبود روند معنادار در سایر ایستگاه‌ها بود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که غبارناکی استان گلستان حاصل برهم‌کنش منابع محلی، شرایط سطح زمین و انتقال فرامرزی گردوغبار است.

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، ---، ---، ---.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

گردوغبار یکی از مهم ترین مخاطرات جوی و اقلیمی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است که در دهه های اخیر، به دلیل تشدید خشکسالی ها، کاهش رطوبت خاک، تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی، نوسانات اقلیمی و وزش بادهای شدید، از نظر فراوانی و شدت گسترش یافته است (میدلتون، ۲۰۱۷؛ گودی، ۲۰۱۸). این پدیده از طریق کاهش کیفیت هوا، افت دید افقی، اختلال در حمل و نقل، تهدید سلامت انسان، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و تأثیرگذاری بر چرخه های تابشی و اقلیمی، پیامدهای گسترده ای بر محیط زیست و جوامع انسانی بر جای می گذارد. ذرات گردوغبار پس از برخاستن از سطح زمین می توانند به وسیله جریان های جوی در مقیاس های محلی، منطقه ای و حتی فرامنطقه ای جابه جا شوند و مناطق دور از کانون های تولید را نیز تحت تأثیر قرار دهند (علی پور و همکاران، ۱۳۹۷). بر اساس دستورالعمل های سازمان جهانی هواشناسی، زمانی که حضور ذرات معلق گردوغبار در جو موجب کاهش دید افقی به کمتر از ۱۰ کیلومتر شود، رخداد گردوغبار گزارش می گردد. همچنین در شرایطی که همزمان با تشدید میدان باد و افزایش سرعت آن، دید افقی به کمتر از یک کیلومتر کاهش یابد، این وضعیت در رده طوفان گردوغبار قرار می گیرد. از سوی دیگر، شدت گردوغبار بر پایه میزان دید افقی به چهار طبقه شامل گردوغبار بسیار رقیق با دید افقی بیش از ۱۰ کیلومتر، گردوغبار رقیق با دید افقی بین ۱ تا ۱۰ کیلومتر، طوفان گردوغبار ملایم تا متوسط با دید افقی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر، و طوفان گردوغبار شدید با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر تقسیم بندی می شود (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۱۹). در شمال شرق ایران، استان گلستان با وجود برخورداری از تنوع اقلیمی و تأثیرپذیری از سامانه های خری، در سال های اخیر از نفوذ توده های گردوغبار منشأ گرفته از بیابان قره قوم و نواحی خشک ترکمنستان و همچنین برخی کانون های داخلی و منطقه ای متأثر بوده است (بامری نژاد و همکاران ۱۴۰۴؛ بابویی و همکاران ۱۴۰۵). کاهش رطوبت سطحی، افت پوشش گیاهی در برخی نواحی، فرسایش بادی و ناپایداری های جوی، شرایط را برای بروز و تشدید رخداد های گردوغباری در این استان فراهم کرده اند. از این رو، بررسی تغییرات زمانی و مکانی شدت فعالیت های گردوغبار در استان گلستان، به ویژه در مقیاس ایستگاهی و استانی، می تواند نقش مهمی در شناخت رفتار اقلیمی این پدیده و مدیریت پیامدهای زیست محیطی و انسانی آن داشته باشد (خان سالاری و همکاران، ۱۴۰۲). در مطالعات اقلیم شناسی، صرف شمارش تعداد روزهای گردوغباری نمی تواند شدت واقعی فعالیت های گردوغبار را به طور کامل نشان دهد؛ زیرا رخداد های گردوغبار از نظر شدت، گستره مکانی و میزان کاهش دید افقی تفاوت های قابل توجهی با یکدیگر دارند. به همین دلیل، استفاده از شاخص های ترکیبی برای سنجش همزمان فراوانی و شدت رخداد ها اهمیت زیادی دارد. یکی از این شاخص ها، شاخص طوفان گردوغبار^۱ است که با وزن دهی متفاوت به رخداد های گردوغبار محلی و انتقالی، طوفان های گردوغبار ملایم و متوسط و طوفان های شدید، امکان ارزیابی دقیق تر فعالیت گردوغبار را فراهم می کند (اولینگسی و همکاران، ۲۰۱۴). این شاخص به منظور مطالعه فرسایش بادی از سوی شورای حفاظت محیط زیست استرالیا تأیید شده و در برنامه همکاری ملی بررسی شاخص ها برای کشاورزی پایدار این کشور به کار گرفته شده است (مک تاینش، ۱۹۹۸). مطالعات مختلفی در داخل و خارج از کشور کارایی شاخص DSI را در پایش فرسایش بادی و ارزیابی شدت گردوغبار تأیید کرده اند. اولینگسی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شاخص گردوغبار و بررسی همبستگی آن با مقادیر گردوغبار جمع آوری شده در ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی، به این نتیجه رسیدند که میزان همبستگی این شاخص با داده های

^۱ _ Dust Storm Index (DSI)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مشاهداتی بیش از ۹۳ درصد است. همچنین اولینگی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص DSI و داده‌های هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۱، به پایش فرسایش بادی در استرالیا پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که بارش تأثیر زیادی بر وقوع گردوغبار دارد؛ به‌طوری‌که در سال‌هایی که میزان بارش کاهش یافته، رخداد طوفان‌های گردوغبار افزایش پیدا کرده است. این پژوهشگران DSI را مناسب‌ترین شاخص برای پایش بلندمدت فرسایش بادی با تفکیک زمانی متوسط و تفکیک مکانی منطقه‌ای بر پایه داده‌های هواشناسی معرفی کردند. مک‌تاینش و توژ (۲۰۰۷) نیز همبستگی شاخص DSI را با غلظت گردوغبار جمع‌آوری‌شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری استرالیا طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۲ بررسی کردند و کارایی بالای این شاخص را در تهیه نقشه‌های فرسایش بادی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف تأیید نمودند. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی با استفاده از این شاخص انجام شده است. ابراهیمی خوسفی و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از روش رگرسیون پشته و با هدف بررسی رابطه میان پارامترهای هواشناسی و شاخص طوفان گردوغبار در مناطق خشک ایران مرکزی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ نشان دادند که در یک دوره، تغییرات دمای هوا تأثیر مثبت و معنی‌داری بر تغییرات DSI داشته و در دوره‌های دیگر، کاهش بارش و افزایش سرعت باد از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات این شاخص بوده‌اند. نتایج مطالعه بیانگر وجود همبستگی قوی بین سرعت باد تابستانه، بارش زمستانه و شاخص طوفان گردوغبار، و در مقابل، رابطه‌ای ضعیف‌تر میان دما و شاخص پوشش گیاهی تقویت‌شده در دیگر فصول در مناطق نیمه‌خشک ایران مرکزی است. ولی و روستایی (۱۳۹۶) با استفاده از شاخص DSI، روند فرسایش بادی در ایران مرکزی را طی دوره ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۴ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار این شاخص در ۳۰ سال اخیر، یعنی از ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴، بیش از سه برابر نسبت به ۲۰ سال پیش از آن افزایش یافته است. با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه گردوغبار و شاخص DSI، بیشتر این پژوهش‌ها بر مناطق مرکزی، شرقی و جنوب‌غربی ایران متمرکز بوده‌اند و استان گلستان، با وجود قرارگیری در معرض نفوذ منابع گردوغبار برون‌مرزی و تغییرپذیری شرایط اقلیمی، کمتر مورد توجه پژوهش‌ها در این زمینه بوده است. این در حالی است که شناخت روندهای زمانی، تفاوت‌های مکانی و شدت رخداد‌های گردوغبار در سطح ایستگاه‌های استان گلستان می‌تواند در شناسایی پهنه‌های حساس، درک بهتر سازوکارهای اقلیمی مؤثر بر غبارناکی و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش آسیب‌پذیری منطقه مؤثر باشد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پایش آماری و پهنه‌بندی شدت غبارناکی در استان گلستان با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک بر پایه شاخص DSI انجام شده است تا ضمن شناسایی روندهای غالب، تصویری روشن از شدت و پراکنش فضایی گردوغبار در سطح استان ارائه گردد. این پژوهش علاوه بر ارزیابی ایستای سالانه، بر پایش تفکیک‌شده چندمقیاسی (ماهانه، فصلی و سالانه)، لحاظ جامع کدهای دیده‌بانی گردوغبار WMO (به‌ویژه کد ۰۵)، و بررسی پویایی کانون‌های غبارناکی در ناحیه گذر اقلیمی شکننده و متغیر خزر تا بیابان قره‌قوم استوار است؛ امری که می‌تواند امکان جداسازی مکانیسم‌های سینوپتیکی فرامرزی از بازخیزش‌های زراعی و محلی را در استان گلستان به عنوان یکی از استان‌های نوظهور تحت تأثیر پدیده گرد و غبار در کشور فراهم سازد.

داده و روش‌ها

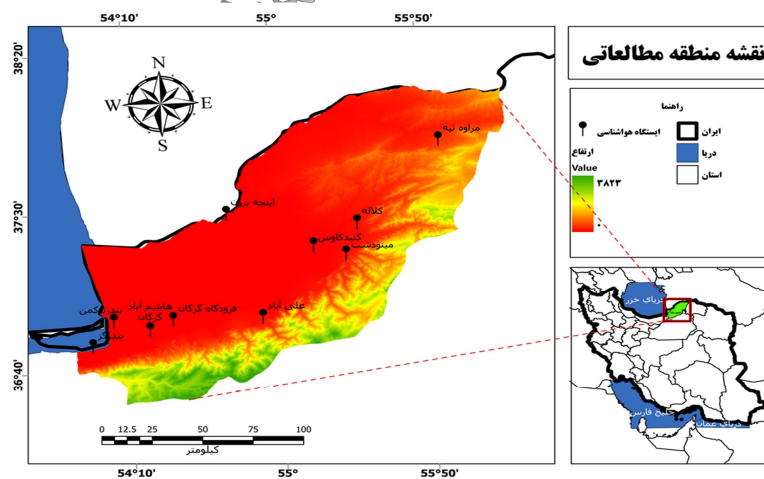
استان گلستان در شمال‌شرق ایران و در حاشیه جنوب‌شرقی دریای خزر قرار دارد. این استان به‌دلیل ناهمگونی توپوگرافی، تغییرات مکانی رطوبت، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، و همچنین مجاورت با نواحی خشک و بیابانی

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

آسیای مرکزی، از مناطق مستعد وقوع و همچنین تأثیرپذیری از رخدادهای گردوغبار محسوب می‌شود. در این پژوهش، برای پایش زمانی و مکانی غبارناکی در مقیاس استانی، از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان استفاده شد. متغیرهای مورد استفاده شامل کدهای پدیده هوای حاضر مرتبط با گردوغبار و دید افقی بود. اطلاعات مکانی ایستگاه‌ها شامل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و دوره آماری داده‌ها در جدول (۱) و پراکنش فضایی آن‌ها در شکل (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: توصیف موقعیت و داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان

ایستگاه	مختصات جغرافیایی						ارتفاع از سطح دریا (متر)
	عرض			طول			
	ثانیه	دقیقه	درجه	ثانیه	دقیقه	درجه	
کلاله	۰۴	۲۲	۳۷	۳۵	۲۹	۵۵	۱۲۸/۸
گرگان	۲۵	۵۴	۳۶	۲۴	۳۴	۵۴	۲
مراوه تپه	۰۶	۴۸	۳۷	۵۸	۵۶	۵۵	۴۵۰
گنبد کاووس	۰۱	۱۶	۳۷	۰۰	۱۲	۵۵	۳۷/۲
مینودشت	۴۶	۱۳	۳۷	۰۳	۲۳	۵۵	۲۲۳
اینچه برون	۱۲	۲۷	۳۷	۱۰	۴۳	۵۴	۷
علی آباد	۰۷	۵۴	۳۶	۲۶	۵۴	۵۴	۱۸۴
هاشم آباد	۰۰	۵۱	۳۶	۰۰	۱۶	۵۴	۱۳/۳
بندر ترکمن	۱۸	۵۴	۳۶	۳۵	۰۳	۵۴	-۲۰
بندرگز	۴۵	۳۶	۳۶	۲۵	۵۷	۵۳	-۱۶



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مطالعاتی

داده‌ها در مقیاس زمانی سه‌ساعته و از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۲۵ میلادی دریافت و پس از کنترل اولیه کیفیت، برای تحلیل‌های بعدی آماده‌سازی شدند؛ به‌نحوی که رکوردهای ناقص یا دارای خطاهای آشکار شناسایی و اصلاح و یا حذف گردید. شناسایی رخدادهای گردوغبار بر پایه کدهای هوای حاضر استاندارد سازمان جهانی هواشناسی^۱ برای پدیده گردوغبار انجام گرفت. بدین منظور، کدهای ۰۵، ۰۶، ۰۷، ۰۸، ۰۹، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸ به‌عنوان کدهای شاخص

1 _ World Meteorological Organization (WMO)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

طوفان گردوغبار استخراج شدند (جدول ۲). در این مطالعه، روز گردوغباری، روزی تعریف شد که در آن دید افقی کمتر از ۱۰ کیلومتر بوده و هم‌زمان، دست‌کم، یک کد مرتبط با گردوغبار در طول شبانه‌روز ثبت شده باشد (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۱۹). این تعریف، امکان استانداردسازی شناسایی روزهای گردوغباری در ایستگاه‌های مختلف و مقایسه‌پذیری نتایج را فراهم می‌کند.

جدول ۲: کدهای هواشناسی برای شناسایی و گزارش رخداد‌های گردوغبار (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۱۹).

کد	توصیف وضعیت جوی	کد	توصیف وضعیت جوی
۰۵	غبار	۳۱	طوفان گردوغبار یا ماسه ملایم یا متوسط، طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییری نکرده است. دید افقی بین ۲۰۰ متر تا ۱۰۰۰ متر
۰۶	گردوغبار معلق (فرامحلی)	۳۲	طوفان گردوغبار یا ماسه ملایم یا متوسط، طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است. دید افقی بین ۲۰۰ متر تا ۱۰۰۰ متر
۰۷	گردوغبار (محلی)	۳۳	طوفان گردوغبار یا ماسه شدید، طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است. دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۰۸	گردباد	۳۴	طوفان گردوغبار یا ماسه شدید، طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییری نکرده است. دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۰۹	طوفان	۳۵	طوفان گردوغبار یا ماسه شدید، طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است. دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۳۰	طوفان گردوغبار یا ماسه ملایم یا متوسط، طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است. دید افقی بین ۲۰۰ متر تا ۱۰۰۰ متر	۹۸	رعد و برق همراه با طوفان گردوغبار یا ماسه

به‌منظور ارزیابی هم‌زمان فراوانی و شدت رخداد‌های گردوغبار، از شاخص تجربی طوفان گردوغبار^۱ استفاده شد. این شاخص که نخستین بار توسط مکتاینش و همکاران (۱۹۹۸) معرفی و توسط اولینگسی و همکاران (۲۰۱۴) برای پایگاه داده‌های دیده‌بانی مدرن توسعه یافت که بر اساس رخداد‌های ثبت‌شده توسط کدهای وضع هوای حاضر سازمان جهانی هواشناسی و آستانه‌های دید افقی استاندارد تعریف شده است. مزیت اصلی این شاخص نسبت به شمارش ساده روزهای گردوغباری آن است که رخدادها را صرفاً بر حسب تعداد وقوع نمی‌سنجد، بلکه با وزن‌دهی متفاوت به طبقات شدت، سهم طوفان‌های قوی‌تر را در مقدار شاخص افزایش می‌دهد؛ بنابراین، شاخص DSI نمایه‌ای حساس‌تر برای توصیف وضعیت غبارناکی و تغییرات آن در زمان و مکان ارائه می‌کند. بر این اساس، کدهای گردوغبار بر حسب شدت در سه طبقه اصلی دسته‌بندی شدند: گروه اول مربوط به رخداد‌های ضعیف، محلی، معلق یا انتقالی (LDE)^۲ شامل کدهای هوای حاضر ۰۵، ۰۶، ۰۷، ۰۸ و ۰۹، گروه دوم مربوط به طوفان‌های متوسط گردوغبار (MDS)^۳ شامل کدهای ۳۰ هوای حاضر، ۳۱، ۳۲ و ۹۸ با دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر و گروه سوم شامل طوفان‌های شدید گردوغبار (SDS)^۴ شامل کدهای هوای حاضر ۳۳، ۳۴ و ۳۵ با دید افقی کمتر از ۲۰۰ می‌باشند. سپس، با شمارش رخداد‌های هر طبقه در بازه زمانی مورد نظر، شاخص DSI مطابق رابطه (۱) محاسبه شد:

¹ Dust Storm Index (DSI)

² Local Dust Events

³ Moderate Dust Storms (MDS)

⁴ Severe Dust Storms (SDS)

$$DSI = \sum_{i=1}^n [(5 \times SDS) + MDS + (0.05 \times LDE)]i \quad (1)$$

در این رابطه، SDS_i ، MDS_i و LDE_i به ترتیب تعداد رخدادهای شدید، متوسط و ضعیف گردوغبار در بازه زمانی i (ماهانه/فصلی/سالانه) هستند و n تعداد بازه های زمانی مورد بررسی است (مک تاینش، ۱۹۹۸؛ اولینگسی و همکاران ۲۰۱۴؛ رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰). پس از استخراج و تفکیک کدهای گردوغبار از دیده بانهای سه ساعته ایستگاههای سینوپتیک استان، تعداد رخدادهای هر طبقه شمارش و شاخص DSI با اعمال ضرایب وزنی متناظر محاسبه گردید. همان گونه که اشاره شد، بر خلاف رویکردهای سنتی مبتنی بر شمارش صرف تعداد روزهای گرد و غباری، این شاخص قادر است شدت غبارناکی جوی رخدادها را از نظر توان فرسایشی و بار غبار تفکیک کند؛ از این رو کارایی برجسته ای در تمایز ریزگردهای معلق در جو از طوفان های ماسه و گردوغبار شدید و فرساینده در مقیاس های مختلف زمانی دارد. جهت واکاوی جامع دینامیک زمانی پدیده، شاخص DSI در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه شد؛ به طوری که مقیاس سالانه برای ارزیابی روندهای بلندمدت و پایداری اقلیمی، مقیاس فصلی برای آشکارسازی رژیم چرخه فصلی و فازهای فعال فرسایش بادی، و مقیاس ماهانه به منظور شناسایی پنجره های زمانی بحرانی و ماه های اوج غبارناکی به کار رفت. در مجموع، چارچوب روش شناسی پژوهش شامل کنترل کیفی داده های سینوپتیک، استخراج رخدادها بر مبنای کدهای WMO، رده بندی شدت رویدادها، محاسبه DSI و تحلیل همگنی و روندهای زمانی بود که تصویری جامع، کمی و واقع بینانه از پویایی گردوغبار در استان گلستان فراهم می سازد.

آزمون های آماری

پس از استخراج روزهای گردوغباری و به منظور بررسی رفتار زمانی و شناسایی روند تغییرات شاخص فراوانی رخدادهای گردوغبار و مؤلفه های دید افقی، از آزمون ناپارامتریک من-کندال^۱ همراه با برآوردگر شیب سن^۲ استفاده شد. این روش ها به دلیل عدم وابستگی به فرض توزیع نرمال داده ها و مقاومت در برابر ناهنجاری ها و مقادیر پرت، از متداول ترین و پایاترین ابزارهای تحلیل روند در مطالعات هیدرواقلیمی به شمار می روند (کندال، ۱۹۷۵؛ سن، ۱۹۶۸؛ طبری، ۲۰۱۱). یکی از چالش های ساختاری در سری های زمانی دید افقی، تکرار فراوان مقادیر سقف دیده بانی (۱۰ کیلومتر در شرایط جوی آرام) است که اصطلاحاً به پدیده گره های آماری موسوم است. حضور این داده های هم ارز با تفاضل صفر، می تواند واریانس آزمون من-کندال را تحت تأثیر قرار داده و منجر به ناهمبستگی در برآورد روند گردد؛ از این رو، واریانس آماره من-کندال با اعمال تصحیح اثر گره ها تعدیل گردید تا پایداری آماره آزمون تضمین شود. همچنین، جهت آشکارسازی سال های وقوع جهش ناگهانی و شناسایی نقاط شکست ساختاری در رژیم گردوغبار منطقه، آزمون ناپارامتری پتیت^۳ به کار گرفته شد. به منظور حصول اطمینان از دقت نتایج، تمامی محاسبات بر مبنای یک دوره زمانی مشترک و همگن (۲۰۰۶-۲۰۲۵) برای ایستگاه های منتخب استان انجام و پردازش نهایی داده ها با استفاده از افزونه آماری XLSTAT در محیط نرم افزار Excel صورت پذیرفت. به منظور دستیابی به دیدگاه جامع از توزیع فضایی شدت گردوغبار در استان گلستان، داده های حاصل از شاخص DSI در ایستگاه های سینوپتیک وارد محیط ArcGIS Pro شدند. برای پهنه بندی دقیق شدت غبارناکی، از روش درون یابی وزن دهی معکوس فاصله^۴

¹ Mann-Kendall

² Sen's Slope

³ Pettitt

⁴ Inverse Distance Weighting (IDW)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

استفاده شد. انتخاب این روش به دلیل ماهیت قطعی و دقت بالای آن در حفظ مقادیر ایستگاه‌های مرجع صورت گرفت. پهنه‌بندی مکانی شاخص DSI با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله انجام شد. در این فرآیند، با ارزیابی متقاطع و کمینه‌سازی خطای میانگین مربعات^۱، توان وزنی برابر با ۲ انتخاب گردید. همچنین از جستجوی متغیر بر پایه ایستگاه‌های همسایه استفاده شد تا ناهمگنی پراکنش ایستگاه‌ها در سطح استان به حداقل برسد. همچنین، به‌منظور ارائه تحلیل خوشه‌ای، نقشه‌های حرارتی^۲ بر اساس مقادیر نرمال‌سازی‌شده شاخص DSI تولید شدند. در تولید این نقشه‌ها، تراکم رخدادهای گردوغبار با وزن‌دهی به کدهای هواشناسی (شامل کد ۰۵ WMO و کدهای ۳۰-۳۵) محاسبه گردید تا مناطق کانونی^۳ که بیشترین فراوانی و شدت رخداد را دارند، به‌صورت بصری تفکیک شوند. این رویکرد اجازه می‌دهد تا نوسانات مکانی شاخص DSI را در مقیاس‌های فصلی و سالانه با دقت بالاتری تحلیل شوند.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل ماهانه شاخص طوفان گردوغبار

بررسی تغییرات ماهانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان، که در قالب نمودار حرارتی در شکل (۲) ارائه شده است، نشان می‌دهد که رفتار زمانی گردوغبار در استان از الگوی یکنواختی تبعیت نکرده و دارای تفاوت‌های آشکار مکانی-فصلی است. برخلاف میانگین‌های سالانه که نوسانات کوتاه‌مدت را هموار می‌کنند، تحلیل ماهانه امکان شناسایی رژیم‌های زمانی گردوغبار و دوره‌های اوج فعالیت غباری را فراهم می‌سازد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، ایستگاه فرودگاه گرگان در تمام ماه‌های سال مقادیر بالای DSI را ثبت کرده و نسبت به سایر ایستگاه‌ها رفتار متفاوتی دارد. تداوم این وضعیت، حتی در ماه‌های مرطوب سال، بیانگر غلبه شرایط غبارناکی محلی و پایداری منابع تولید ذرات معلق در محدوده مرکزی استان است. استقرار ایستگاه در اراضی هموار و کم‌زبری، حساسیت بالای ثبت دید افقی در ایستگاه‌های هوانوردی و نقش آشفته‌گی‌های مکانیکی ناشی از جریان باد در محدوده فرودگاهی، از مهم‌ترین عوامل تشدید این وضعیت محسوب می‌شوند. در مقابل، ایستگاه مراوه‌تپه الگوی کاملاً فصلی را نشان می‌دهد. مقادیر DSI در این ایستگاه طی ماه‌های مارس تا می به‌طور محسوسی افزایش یافته و سپس در تابستان کاهش می‌یابد. این رفتار با فعالیت سامانه‌های بهاره و انتقال فرامرزی گردوغبار از بیابان‌های ترکمنستان و آسیای میانه ارتباط مستقیم دارد. وقوع اوج ثانویه در اواخر تابستان و اوایل پاییز نیز می‌تواند ناشی از خشکی شدید سطح زمین و افزایش استعداد فرسایش بادی در نواحی مرزی و شرق استان گلستان باشد. ایستگاه‌های گنبدکاووس و کلاله نیز رفتاری میانی و انتقالی را نشان می‌دهند. اگرچه شدت DSI در این ایستگاه‌ها به اندازه ایستگاه سینوپتیک فرودگاه گرگان نیست، اما افزایش نسبی شاخص در فصل گرم سال، به‌ویژه از ژوئن تا سپتامبر، بیانگر تأثیر هم‌زمان شرایط نیمه‌خشک شرق استان و فعالیت بادهای محلی است. موقعیت جغرافیایی این ایستگاه‌ها در حفاصل نواحی کوهپایه‌ای و دشت‌های باز شرقی سبب شده است که این ایستگاه‌ها نسبت به تغییرات رطوبت خاک و نوسانات سرعت باد حساسیت بیشتری داشته باشد. سایر ایستگاه‌ها مانند علی‌آباد، بندرگز و بندرترکمن عمدتاً مقادیر پایین و نسبتاً یکنواخت DSI را ثبت کرده‌اند که نشان‌دهنده غلبه شرایط پس‌زمینه و نبود

¹ RMSE

² Heatmaps

³ Hotspots

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

رخدادهای شدید گردوغباری است. مجاورت این نواحی با پوشش جنگلی هیرکانی، رطوبت بالاتر و اثر تعدیل کننده دریای خزر، نقش مهمی در کاهش خیزش و ماندگاری ذرات معلق ایفا می کند. در مجموع، الگوی ماهانه DSI در استان گلستان نشان می دهد که غبارناکی منطقه حاصل برهم کنش هم زمان عوامل محلی، ویژگی های سطح زمین و انتقال فرامرزی توده های گردوغبار است؛ به طوری که به نظر می رسد شرق استان بیشتر تحت تأثیر فرایندهای انتقالی و مرکز استان تحت تأثیر منابع محلی تر قرار دارد.



شکل ۲: نقشه حرارتی تغییرات ماهانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه های سینوپتیک استان گلستان

در ادامه به منظور تعیین دوره های بحرانی غبارناکی، مقادیر ماهانه و فصلی شاخص DSI در ایستگاه های سینوپتیک استان مقایسه شد. نتایج نشان داد که اوج ماهانه غبارناکی در استان رفتار یکنواختی ندارد و بسته به موقعیت ایستگاه، در دو الگوی اصلی ظاهر می شود. در ایستگاه مراوه تپه، بیشینه های ماهانه عمدتاً در ماه های مارس تا می مشاهده شد که به نظر می رسد بیانگر نقش غالب انتقال بهاره گردوغبار از نواحی خشک آسیای میانه و ترکمنستان است. در مقابل، ایستگاه سینوپتیک فرودگاه گرگان در بیشتر ماه های سال مقادیر بالای شاخص را حفظ کرده و به جای یک اوج منفرد، دارای رژیم غبارناکی پایدار و مزمین است. ایستگاه های کلاله و گنبد کاووس نیز افزایش نسبی شاخص را در ماه های گرم سال، به ویژه ژوئن تا سپتامبر، نشان دادند که می تواند با خشکی سطح، کاهش رطوبت و افزایش قابلیت بازخیزش ذرات مرتبط باشد.

نتایج تحلیل فصلی شاخص طوفان گردوغبار

نقشه های پهنه بندی فصلی شاخص طوفان گردوغبار با توجه به شکل (۳) در استان گلستان نشان می دهند که الگوی غبارناکی استان، نه یک میدان یکنواخت، بلکه یک سامانه فضایی ناهمگن و وابسته به فصل است که در آن، شدت و

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

گستره پهنه‌های غباری با تغییر فصل، جابه‌جا و بازسازمان‌دهی می‌شود. این جابه‌جایی فصلی، بیانگر تعامل پیچیده بین منابع محلی تولید غبار، انتقال فرامرزی، توپوگرافی، خشکی سطح، و رژیم بادهای غالب است.

فصل بهار

پهنه‌بندی فضایی شاخص طوفان گردوغبار در فصل بهار، نمایانگر یک الگوی فضایی دوقطبی و بسیار ناهمگن در سطح استان گلستان است که از دو سازوکار دینامیکی متمایز منشأ می‌گیرد. برخلاف فرض‌های سنتی مبنی بر غلبه یک‌طرفه کانون‌های شرقی در فصول مرطوب، تحلیل جریان‌های غبار فصلی نشان می‌دهد که شدیدترین هسته غبارناکی استان در این فصل به‌صورت یک آنومالی نقطه‌ای و کاملاً متمرکز بر روی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه گرگان در مرکز-غرب استان ظاهر شده است که با استقرار در بالاترین کلاس شاخص طوفان گردوغبار خودنمایی می‌کند. شکل‌گیری این هسته حاد در بخش غربی دشت گرگان، بیانگر فعالیت شدید کانون‌های محلی پنهان، خشکی تالاب‌ها، اراضی حاشیه آن و تخریب اراضی زراعی و همچنین فعال بودن کانون‌های فرامحلی است که حتی در بهار نیز به‌دلیل وزش بادهای محلی غربی و شمال‌غربی و حساسیت بالای بافت خاک، قابلیت بازخیزش ذرات سطحی را حفظ کرده و رژیم غبارناکی پایداری را به نمایش می‌گذارد. هم‌زمان با فعالیت این هسته محلی در غرب، کانون دومی با ماهیت منطقه‌ای و فرامرزی در بخش شمال‌شرقی استان و در محدوده ایستگاه مراوه‌تپه استقرار یافته است که با رنگ نارنجی و در محدوده شاخص متوسط تا بالا مشخص می‌شود. این کانون شرقی عمدتاً تحت تأثیر ناپایداری‌های جوی بهاره، عبور سامانه‌های سینوپتیکی مقیاس متوسط و تشدید گرادیان فشار سطحی شکل می‌گیرد که با تسهیل انتقال گردوغبار از بیابان‌های مجاور به‌ویژه صحرای قره‌قوم و منطقه بالکان ترکمنستان، بخش‌های وسیعی از سیمای طبیعی شرق استان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نکته حائز اهمیت در رفتار فضایی بهاره، گسستگی ساختاری میان این دو هسته فعال است؛ به‌طوری که حدفاصل این دو کانون شدید در نواحی کوهپایه‌ای و جنوبی استان به‌ویژه در محدوده ایستگاه علی‌آباد کتول، کمترین میزان غبارناکی با شاخص بسیار پایین و به رنگ سبز تیره ثبت شده است. این منطقه مرطوب کوهپایه‌ای به‌همراه پوشش جنگلی متراکم البرز شرقی، مانند یک سد زیستی-فیزیکی منسجم عمل کرده و با افزایش زبری سطح و تعدیل رطوبتی، مانع از پیوستگی فضایی دو کانون غبار شرقی و غربی استان می‌شود. بنابراین، رژیم غبارناکی فصل بهار در استان گلستان را باید برآیند تقابل هم‌زمان و موازی دو سازوکار کاملاً متفاوت دانست که در آن هسته غربی تحت کنترل عوامل فرساینده محلی و هسته شرقی بازتابی از پویایی سامانه‌های انتقالی فرامرزی است.

فصل تابستان

در فصل تابستان، ساختار فضایی DSI نسبت به بهار تغییر محسوسی پیدا می‌کند. در این فصل، با افزایش دما، کاهش رطوبت خاک و افت پوشش گیاهی، نقش عوامل محلی در تولید گردوغبار پررنگ‌تر می‌شود. بنابراین، پهنه‌های دارای DSI بالا بیشتر در نواحی مرکزی و دشت‌های داخلی استان دیده می‌شوند. در تابستان، ایستگاه فرودگاه گرگان و محدوده‌های مرکزی استان به‌عنوان کانون‌های پایدار غبارناکی ظاهر می‌شوند. این وضعیت را می‌توان ناشی از ترکیب عواملی مانند: خشکی شدید سطح زمین، افزایش تبخیر، کاهش رطوبت نسبی، و آشفستگی خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی و کشاورزی دانست. برخلاف بهار که انتقال فرامرزی نقش اصلی را داشت، در

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تابستان سامانه غبار استان بیشتر ماهیت درون منطقه‌ای پیدا می‌کند. در این شرایط، دشت گرگان به یک محیط مستعد برای بازخیزش ذرات سطحی تبدیل می‌شود. از نظر فضایی، نقشه تابستان احتمالاً بیشترین همگرایی پهنه‌های DSI بالا را در مرکز استان نشان می‌دهد؛ موضوعی که بیانگر تمرکز تنش اقلیمی و خشکی سطح در این ناحیه است. یک نکته بسیار مهم در تحلیل تابستان این است که تابستان فصل پایداری غبار است، نه الزاماً فصل بیشینه انتقال؛ یعنی حتی اگر منشأهای بیرونی ضعیف‌تر شوند، شرایط محلی استان توان کافی برای حفظ غبارناکی را دارد.

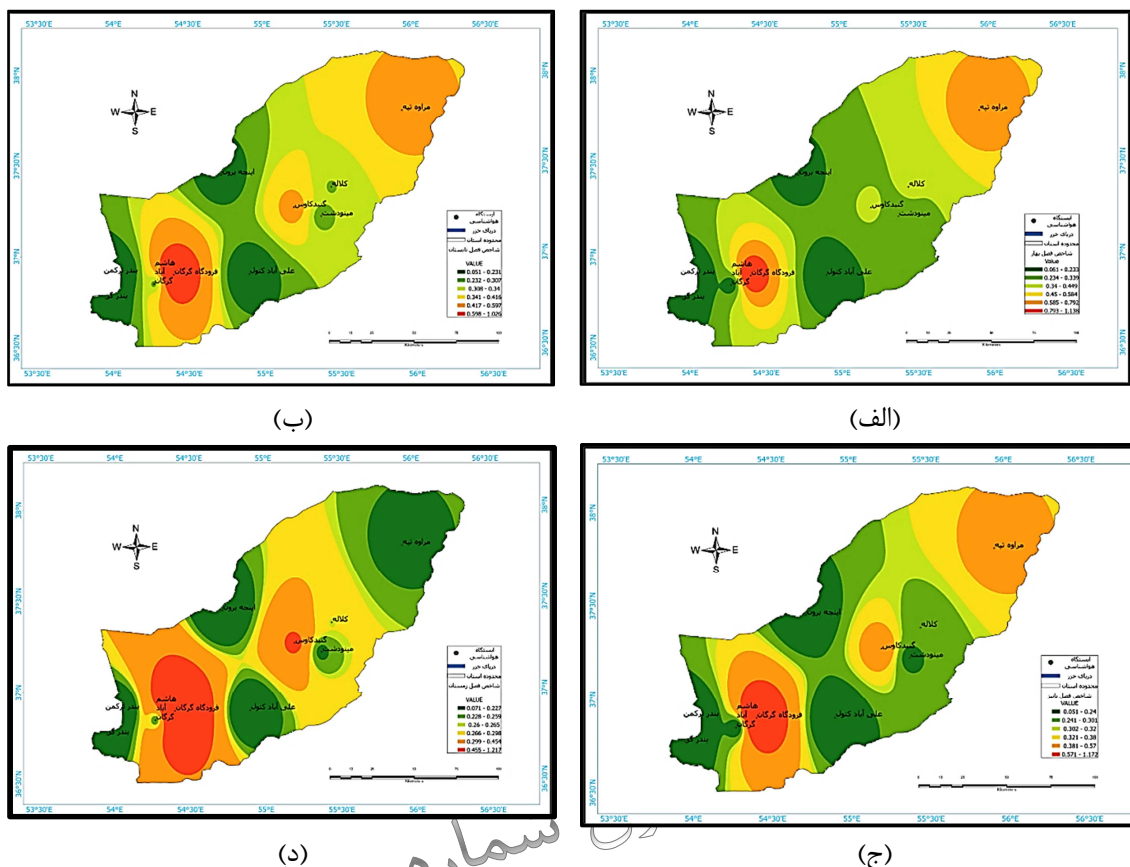
فصل پاییز

بر اساس نقشه پاییز، دامنه شاخص DSI حدود ۰/۰۵۱ تا ۱/۱۷ است که بیانگر ناهمگنی فضایی قابل توجه در این فصل است. در پاییز، الگوی غبارناکی استان وارد مرحله‌ای از بازآرایی فضایی می‌شود؛ به گونه‌ای که پهنه‌های غبارخیز نسبت به تابستان جابه‌جا شده و کنتراست فضایی شاخص افزایش می‌یابد. در این فصل، مناطق مرکزی استان، به‌ویژه پیرامون گرگان، همچنان مقادیر بالای DSI را حفظ می‌کنند؛ اما هم‌زمان نواحی شرقی و شمال شرقی نیز تحت تأثیر جریان‌های انتقالی پاییزی فعال می‌شوند. به همین دلیل، پاییز را می‌توان فصل هم‌پوشانی عوامل محلی و منطقه‌ای وقوع گرد و غبار در استان گلستان دانست. از نظر اقلیمی، پاییز با کاهش تدریجی رطوبت پوشش گیاهی، آغاز ناپایداری‌های فصلی و تغییر الگوی باد همراه است. این شرایط موجب می‌شود هم کانون‌های محلی فعال بمانند و هم انتقال غبار از نواحی مرزی تقویت شود. در این فصل، تضاد آشکاری میان نواحی مرطوب غربی، هسته‌های مرکزی غبار، و پهنه‌های انتقالی شرق استان شکل می‌گیرد که نشان‌دهنده افزایش پیچیدگی ساختار فضایی گردوغبار در گلستان است. در واقع پاییز فصل گذار سامانه غبار از الگوی تابستانه محلی به رژیم زمستانه پایدار است.

فصل زمستان

در فصل زمستان، پهنه‌بندی DSI نشان می‌دهد که بسیاری از مناطق استان کاهش نسبی غبارناکی را تجربه می‌کنند؛ اما برخی هسته‌های مرکزی، به‌ویژه در بخش‌هایی از دشت گرگان، همچنان مقادیر نسبتاً بالای شاخص را حفظ می‌کنند. این مسئله از دیدگاه اقلیم‌شناسی بسیار قابل توجه است؛ زیرا انتظار عمومی آن است که افزایش رطوبت زمستانه موجب افت کامل غبارناکی شود، اما تداوم مقادیر بالای DSI در مرکز استان نشان می‌دهد که این مناطق دارای پایداری ساختاری غبار هستند. در زمستان، نواحی شرقی مانند مراوه‌تپه معمولاً کاهش DSI را تجربه می‌کنند؛ زیرا سامانه‌های انتقالی بهاره و تابستانه تضعیف می‌شوند و رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. بنابراین سهم گردوغبار فرامرزی کاهش پیدا می‌کند. اما در نواحی مرکزی و ارونگی دما، پایداری جو، کاهش اختلاط قائم، و باقی‌ماندن ذرات معلق در لایه‌های نزدیک سطح می‌تواند باعث تداوم غبار و افت دید افقی شود. به همین دلیل زمستان را می‌توان فصل ماندگاری غبار در هسته‌های مرکزی استان دانست.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۳: پهنه‌بندی فضایی-فصلی شاخص طوفان گردوغبار در استان گلستان؛ (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز، (د) زمستان.

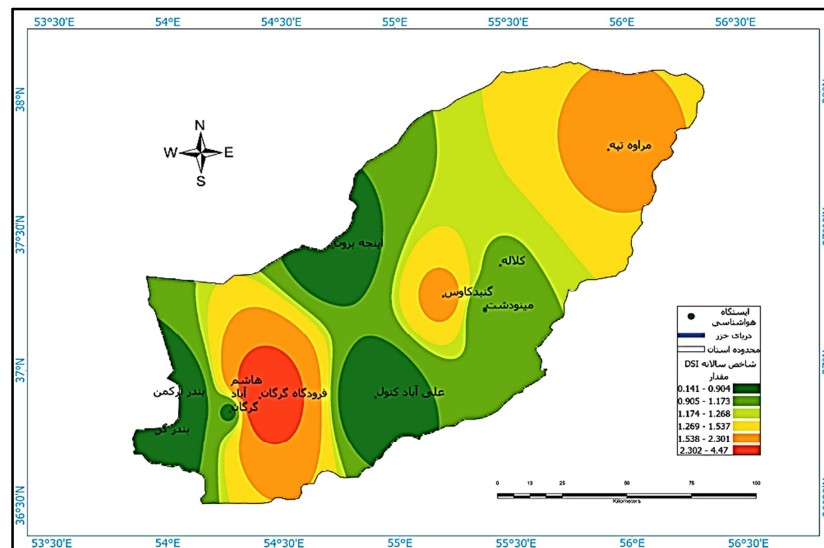
بررسی میانگین فصلی شاخص DSI نشان می‌دهد که الگوی اوج غبارناکی در استان گلستان ماهیت دوگانه دارد. در نیمه شرقی استان، به‌ویژه مراوه‌تپه، فصل بهار با مقدار $0/72$ به‌عنوان فصل اوج غبارناکی شناسایی می‌شود که تحت تأثیر استقرار کم‌فشارهای حرارتی صحرای قره‌قوم ترکمنستان و عبور جبهه‌های سرد غربی رخ می‌دهد که با تقویت گرادیان فشار، سبب فرسایش و انتقال گردوغبار فرامرزی می‌گردد و بیانگر نقش غالب جریان‌های انتقالی فرامرزی در این بخش است. در مقابل، در نواحی مرکزی و غربی و به‌ویژه در ایستگاه فرودگاه گرگان، فصل زمستان بالاترین مقدار شاخص را ثبت کرده است ($1/22$). ثبت بالاترین شاخص فصلی در فرودگاه گرگان طی زمستان، ناشی از ریزش زبانه پرفشار سیبری، سرمایش شدید تابشی سطح و تشکیل وارونگی‌های دمایی کم‌عمق است. این وارونگی با کاهش ارتفاع لایه مرزی، آئروسول‌های معلق و کدهای غبار رطوبتی ناشی از اراضی دیم و بستر خشک تالاب‌های مجاور را به دام انداخته و موجب تشدید شاخص در فصل سرد شده است. در کنار دو ایستگاه مذکور، ایستگاه گنبدکاووس نیز بیشینه فصلی خود را در پاییز و زمستان ($0/50$) تجربه می‌کند. ایستگاه‌های ساحلی و مرطوب مانند بندرترکمن، بندرگز و علی‌آباد در تمامی فصول کمترین مقادیر DSI را داشته و رفتار پس‌زمینه‌ای و کم‌غبار دارند. این الگو تأیید می‌کند که اوج غبارناکی شرق استان در بهار و اوج غبارناکی در مناطق مرکز-غرب در زمستان رخ می‌دهد.

نتایج تحلیل سالانه شاخص طوفان گردوغبار

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

شکل (۴) نقشه پهنه‌بندی سالانه شاخص طوفان گردوغبار در استان گلستان، را به صورت یک الگوی ناهمگن، متمرکز و چندکانونی نشان می‌دهد که بیانگر وجود هم‌زمان هسته‌های پایدار غبارناکی و پهنه‌های کم‌غبارتر در سطح استان است. دامنه شاخص در این نقشه از حدود ۰/۱۴۱ تا ۴/۴۷ متغیر است که خود نشان‌دهنده گستره بسیار بالای تغییرپذیری فضایی گردوغبار در سطح سالانه است. در مقیاس سالانه، الگوی DSI در استان یکنواخت نیست، بلکه به‌صورت یک موزاییک اقلیمی-غبارشناختی سازمان یافته است. این موزاییک از پهنه‌های با DSI پایین در بخش‌هایی از غرب، مرکز و حتی بخشی از شرق استان تشکیل شده، در حالی که هسته‌های با DSI بالا عمدتاً در مرکز، غرب استان، اطراف گرگان و فرودگاه گرگان و نیز در شمال شرق، پیرامون مراوه‌تپه برجسته‌اند. این توزیع نشان می‌دهد که گردوغبار در گلستان نه صرفاً یک پدیده نقطه‌ای، بلکه یک سیستم فضایی چندمنشأیی است؛ یعنی هم منابع محلی و هم انتقال فرامرزی در شکل‌دهی الگوی سالانه نقش دارند. یکی از بارزترین ویژگی‌های نقشه سالانه، تمرکز مقادیر بالای DSI در مناطق مرکزی و غربی استان است. نواحی پیرامون گرگان و فرودگاه گرگان احتمالاً نقش هسته پایدار غبارناکی را ایفا می‌کنند. این هسته‌ها را می‌توان حاصل عواملی مانند: خشکی و حساسیت سطح زمین، فعالیت‌های انسانی و کشاورزی، شرایط خاص زون دشت گرگان و تکرار بادهای مؤثر در بازخیزش ذرات سطحی دانست. وجود این هسته پایدار نشان می‌دهد که حتی در مقیاس سالانه نیز، اثرات محلی به‌قدری قوی هستند که میانگین DSI را در این بخش بالا نگه می‌دارند. از نظر تحلیلی، این ناحیه به‌عنوان کانون مزمن غبارناکی شناخته می‌شود. بخش دیگری از مقادیر بالای شاخص در شمال شرق استان، به‌ویژه اطراف مراوه‌تپه، دیده می‌شود. این بخش از استان به‌دلیل مجاورت با مرز ترکمنستان و قرارگیری در مسیر جریان‌های انتقالی، به‌عنوان زون پذیرنده گردوغبار فرامرزی قابل تفسیر است. برخلاف هسته مرکزی غربی که بیشتر ماهیت محلی تر دارد، مراوه‌تپه و نواحی همجوار آن بیشتر با ورود گردوغبار از فواصل دورتر برون مرزی و تجمع آن در سطح سالانه مرتبط‌اند. بنابراین، نقشه سالانه گلستان دو منشأ متفاوت محلی/داخلی در مرکز-غرب و انتقالی/مرزی در شمال شرق را هم‌زمان نمایش می‌دهد. این دوگانه، یکی از مهم‌ترین یافته‌های علمی نقشه سالانه است. در مقابل، مقادیر پایین‌تر DSI در بخش‌هایی از غرب، مرکز و حتی بخشی از شرق استان دیده می‌شوند. این مناطق احتمالاً تحت تأثیر رطوبت بیشتر، پوشش گیاهی مناسب‌تر، نزدیکی نسبی به دریای خزر، و کاهش حساسیت سطحی قرار دارند. این نواحی را می‌توان به‌عنوان پهنه‌های پس‌زمینه غبارناکی پایین در نظر گرفت که نقش تعدیل‌کننده دارند و شدت میانگین سالانه را در سطح استان متعادل می‌کنند.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۴: پهنه‌بندی سالانه شاخص طوفان گردوغبار در استان گلستان

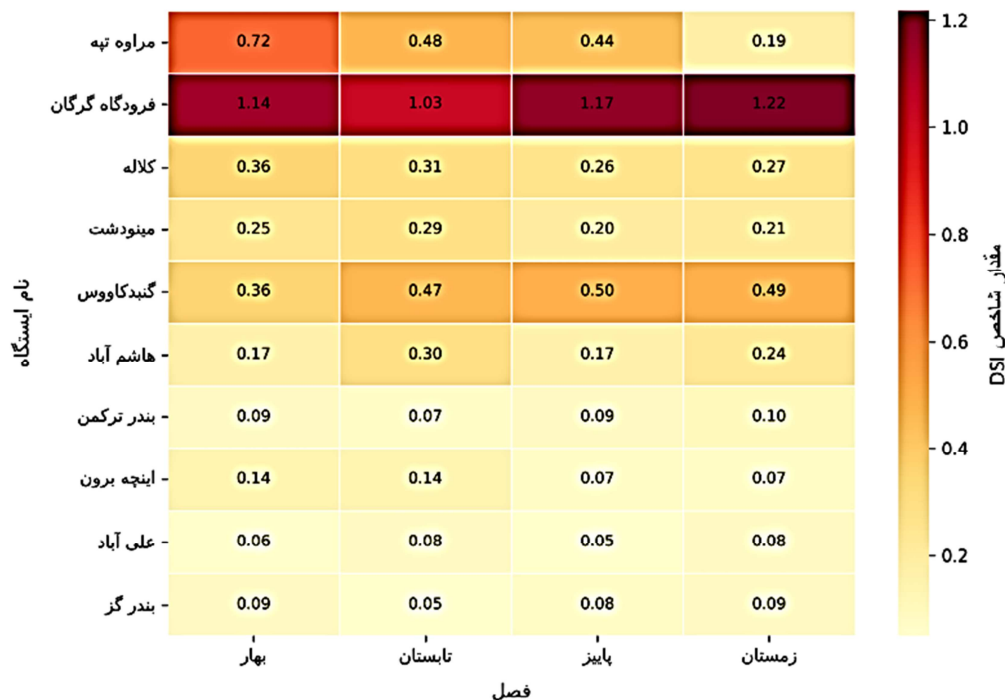
میانگین سالانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های استان گلستان نشان‌دهنده یک الگوی کاملاً ناهمگن و چندکانونی است. بالاترین مقدار سالانه شاخص غبارناکی در ایستگاه فرودگاه گرگان (۴/۴۷) ثبت شده و این ایستگاه را به‌عنوان هسته اصلی و پایدار غبارناکی استان معرفی می‌کند. پس از آن، ایستگاه‌های گنبدکاووس (۱/۸۱) و مراوه‌تپه (۱/۷۴) و کلاله (۱/۱۵) به‌عنوان کانون‌های ثانویه بارنقش ترکیبی محلی-انتقالی قرار می‌گیرند. در مقابل، ایستگاه‌های جنوب‌غربی و ساحلی از جمله بندرترکمن، بندرگز و علی‌آباد کمترین مقادیر سالانه (کمتر از ۰/۲۵) را داشته و نمایانگر نواحی کم‌غبار استان هستند. این الگو نشان می‌دهد که غبارناکی سالانه از تجمع هم‌زمان فعالیت کانون‌های محلی در مرکز استان و کانون‌های انتقالی در شمال‌شرق آن ناشی می‌شود. به نظر می‌رسد گسستگی کانون‌های غبار در نوار جنوبی و مقادیر ناچیز شاخص در ایستگاه‌های علی‌آباد، تبیین‌کننده نقش حفاظتی اکوسیستم جنگل‌های هیرکانی، توپوگرافی و شیب‌های شمالی البرز است. این موانع با تعدیل تنش برشی باد، انرژی جنبشی جریانات محلی را مستهلک ساخته و به‌عنوان یک سد بیوفیزیکی مانع از الحاق هسته غبار شرقی به دشت مرکزی می‌گردد.

نتایج شناسایی و طبقه‌بندی کانون‌های بحرانی^۱ غبارناکی بر اساس شاخص DSI

به منظور ارزیابی فضایی شدت غبار در استان گلستان، ایستگاه‌ها بر اساس رفتار زمانی و مقدار شاخص DSI در قالب سه گروه شامل کانون‌های پایدار، کانون‌های فصلی و پهنه‌های کم‌غبار طبقه‌بندی شدند. با توجه به نقشه حرارتی شکل (۵)، بررسی شاخص DSI نشان داد که ایستگاه فرودگاه گرگان در همه فصل‌ها بالاترین مقدار شاخص را به خود اختصاص داده و به‌عنوان کانون پایدار و اصلی غبارناکی در استان گلستان قابل شناسایی است.

¹ Hotspots

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

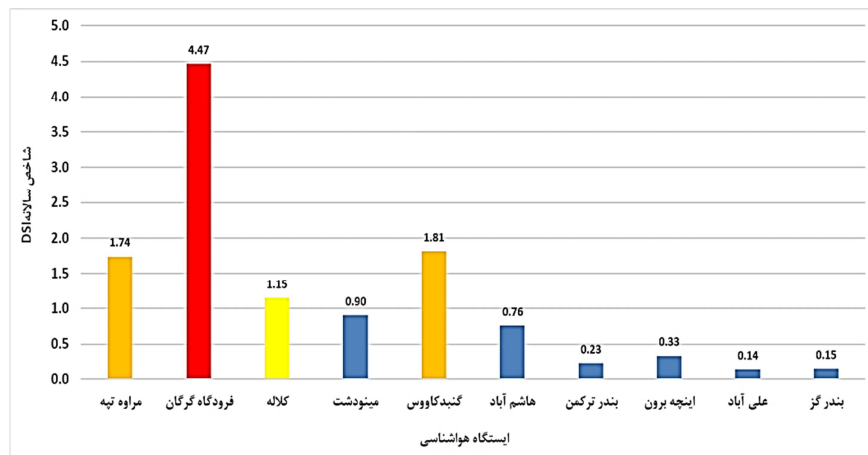


شکل ۵: نقشه حرارتی تغییرات فصلی شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان

بیشینه مقدار DSI در این ایستگاه در زمستان (۱/۲۲) و سپس در پاییز (۱/۱۷) و بهار (۱/۱۴) ثبت شد که بیانگر تداوم و شدت بالای شرایط غبارآلود در این پهنه است. پس از آن، گنبدکاووس، مراوه تپه و کلاله در رده‌های بعدی قرار گرفتند و به‌عنوان کانون‌های ثانویه و فعال شناخته شدند. گنبدکاووس در فصل پاییز و زمستان مقادیر نسبتاً بالاتری نشان داد، در حالی که مراوه تپه در فصل بهار بیشترین مقدار خود را ثبت کرد و در تابستان و پاییز نیز همچنان در سطوح بالاتر از میانگین استانی قرار داشت. در مقابل، ایستگاه‌های بندرگز، بندر ترکمن، علی آباد و اینچه برون کمترین مقادیر DSI را نشان دادند و در زمره پهنه‌های کم‌غبار استان قرار گرفتند. این الگو بیانگر آن است که شدت غبارناکی در استان گلستان از یک الگوی مکانی-فصلی مشخص پیروی می‌کند؛ به‌طوری که نواحی مرکزی و شرقی استان، به‌ویژه محدوده فرودگاه گرگان، بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به رخدادهای غباری دارند، در حالی که نواحی ساحلی و برخی بخش‌های جنوب‌غربی استان شرایط ملایم‌تری را تجربه می‌کنند.

در ادامه بر اساس مقادیر میانگین سالانه شاخص طوفان گردوغبار، طبق شکل (۶)، الگوی کانون‌های گردوغبار در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان به‌صورت متمایز قابل تشخیص است. ایستگاه فرودگاه گرگان با مقدار ۴/۴۷ بالاترین مقدار را ثبت کرده و به‌عنوان کانون داغ غالب و پایدار گردوغبار در مقیاس سالانه شناسایی می‌شود. پس از آن، گنبدکاووس با مقدار ۱/۸۱ و مراوه تپه ۱/۷۴ و کلاله با مقدار ۱/۱۵ در جایگاه‌های بعدی قرار دارند و به‌عنوان کانون‌های فعال و ثانویه مطرح هستند. در مقابل، مقادیر پایین‌تر DSI در ایستگاه‌های ساحلی و غربی-شمال‌غربی استان شامل بندرگز (۰/۱۵)، علی آباد (۰/۱۴)، بندر ترکمن (۰/۲۳) و ایستگاه اینچه برون (۰/۳۳) نشان‌دهنده یک پهنه کم‌غبار نسبت به بخش‌های داخلی استان است. به‌طور کلی، این نتایج بیانگر تمرکز نسبی شدت گردوغبار در نواحی داخلی استان به‌ویژه پیرامون گرگان و محور شرقی و کاهش آن به سمت نوار ساحلی است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۶: نمودار تغییرات سالانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان

تحلیل ماهانه روند زمانی شاخص طوفان گردوغبار (DSI) در استان گلستان

به منظور بررسی تغییرات زمانی شاخص DSI در طول دوره آماری، آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال، جهت تعیین معنی‌داری و جهت روند، شیب‌ساز سن، جهت تخمین نرخ تغییرات ماهانه و آزمون پتیت به منظور شناسایی نقاط شکست ساختاری (تغییر ناگهانی رژیم گردوغبار) بر روی داده‌های ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان اعمال گردید. نتایج حاصل از این آزمون‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج روندیابی تغییرات ماهانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان

وضعیت روند	نقطه جهش	پتیت	شیب سن	آماره Z	ضریب کندال	P_value	ایستگاه هواشناسی
کاهشی معنادار	جهش صعودی - جولای ۲۰۲۱	<0.001	۰	-۱۳/۲۳	-۰/۲۳۷	<0.001	مراوه تپه
افزایشی معنادار	جهش نزولی - آگوست ۲۰۱۴	<0.001	۰/۰۰۱	۵/۲۱	۰/۱۷۴	<0.001	فرودگاه گرگان
افزایشی معنادار	جهش صعودی - دسامبر ۲۰۱۳	۰/۰۰۱	۰	۲/۰۳	۰/۱۱۲	۰/۰۴۳	کلالة
نوسان بدون روند مشخص	بدون جهش	۰/۲۵۷	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۳	۰/۹۷۵	مینودشت
کاهشی معنادار	جهش نزولی - فوریه ۲۰۱۳	<0.001	-۰/۰۰۱	-۱۱/۳۹	-۰/۴۶۱	<0.001	گنبدکاوس
نوسان بدون روند مشخص	جهش نزولی - آوریل ۲۰۲۰	۰/۰۲۷	۰	-۱/۰۴	-۰/۰۷	۰/۲۹۶	هاشم آباد گرگان
نوسان بدون روند مشخص	بدون جهش	۰/۱۰۶	۰	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۹۸	بندر ترکمن
نوسان بدون روند مشخص	بدون جهش	۰/۶۱۲	۰	-۰/۹۸	-۰/۱۱	۰/۳۲۷	اینچه برون
نوسان بدون روند مشخص	بدون جهش	۰/۶۱۸	۰	۱/۴۰	۰/۳۴۷	۰/۱۶۱	علی آباد
کاهشی معنادار	جهش نزولی - مارس ۲۰۱۴	۰/۰۰۳	۰	-۳/۱۵	-۰/۴۶۵	۰/۰۰۲	بندر گز

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بر اساس نتایج جدول ۲، آزمون ناپارامتری پتیت و من-کندال رفتار مکانی-زمانی دوگانه‌ای را در سطح ایستگاه‌های استان گلستان آشکار می‌سازد. در ایستگاه‌هایی نظیر گنبدکاوس و بندرگز، جهش نزولی پتیت (به ترتیب در فوریه ۲۰۱۳ و مارس ۲۰۱۴) همگام با روند کاهشی معنادار شاخص DSI رخ داده است که نشان‌دهنده کاهش پایدار در رخدادهای گردوغبار محلی است. در مقابل، در ایستگاه‌های مراوه‌تپه و فرودگاه گرگان، ناهمگنی ظاهری میان جهت روند بلندمدت (من-کندال) و نقطه جهش ساختاری (پتیت) مشاهده می‌شود؛ بدین صورت که در فرودگاه گرگان، با وجود جهش نزولی میانگین پایه شاخص در آگوست ۲۰۱۴، دارای روند بلندمدت افزایشی معنادار است. همچنین در مراوه‌تپه، با وجود روند کلی کاهشی ماهانه، یک جهش صعودی در جولای ۲۰۲۱ ثبت شده است. از دیدگاه سینوپتیکی، این پدیده بیانگر غلبه رخدادهای حدی بر رفتار میانگین است؛ به این معنا که کاهش فراوانی غبارهای با شدت ملایم در سطح استان با تشدید شدت و تمرکز طوفان‌های ورودی فرامرزی در سال‌های اخیر همراه بوده و اثر تجمعی این جهش‌های ناگهانی، جهت روندهای کلان را شکل داده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار زمانی غبارناکی در پهنه جغرافیایی استان یکنواخت نبوده و به سه الگوی متمایز قابل تقسیم است. اولین الگو، روند افزایشی و تشدید غبارناکی است که به طور مشخص در ایستگاه فرودگاه گرگان و با شدت کمتر در کلاله مشاهده می‌شود. وقوع نقطه شکست ساختاری معنادار در آزمون پتیت برای این ایستگاه‌ها، تاییدکننده یک جهش ناگهانی در فراوانی رخدادهای گردوغبار است که به نظر می‌رسد عمدتاً به دلیل خشکی تالاب گمیشان تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی دیم در شمال دشت گرگان و ورود جریان‌های غبارساز فرا منطقه‌ای به ویژه از منطقه بالکان ترکمنستان رخ داده است. الگوی دوم، روند کاهشی و بهبود نسبی شاخص در ایستگاه‌های گنبدکاوس، مراوه‌تپه و بندرگز است. در این میان، صفر بودن شیب من در ایستگاه مراوه‌تپه با وجود روند کاهشی بسیار معنادار، پدیده‌ای ناشی از ساختار رتبه‌ای آزمون من-کندال در مواجهه با تورم داده‌های صفر در ماه‌های غیر غبارآلود است؛ به طوری که آزمون روند کاهشی را در فراوانی رخدادهای ثبت کرده، اما نرخ عددی تغییرات ماهانه به هفتر متمایل شده است. به نظر می‌رسد مشاهده روند کاهشی معنادار ماهانه در ایستگاه مراوه‌تپه در کنار روند افزایشی مقیاس سالانه، یک تناقض صوری است که ریشه در تغییر رژیم رخدادهای دارد. در واقع پدیده غبار در شمال‌شرق استان از وضعیت پیوسته با شدت کم به سوی رخدادهای گسسته و موردی، متمرکز و حدی تغییر ماهیت داده است؛ بدین معنا که فراوانی ماه‌های غبارآلود کاهش یافته (افزایش گره‌های آماری صفر در مقیاس ماهانه)، اما وقوع طوفان‌های بسیار شدید بهار به وزن بالا در فرمول محاسباتی DSI (طوفان‌های شدید با ضریب ۵)، برآیند انباشت سالانه را افزایشی ساخته است. الگوی سوم، ثبات اقلیمی و عدم وجود روند معنادار در ایستگاه‌های بندر ترکمن، اینچه برون، علی‌آباد، هاشم‌آباد و مینودشت است. به نظر می‌رسد عدم معناداری روند در ایستگاه مرزی اینچه برون نشان‌دهنده ماهیت مستمر، فصلی و ساختاریافته گردوغبار فرامرزی (برخاسته از دشت قره‌قوم) است که بدون تغییر بلندمدت و با الگویی پایدار تکرار می‌شود. همچنین در ایستگاه علی‌آباد، علی‌رغم بالا بودن ضریب کندال، به دلیل نوسانات شدید بین‌سالی و ناهمگنی واریانس، روند از نظر آماری معنادار تلقی نگردید. در مجموع، همزمانی نقاط شکست ساختاری (آزمون پتیت) در اکثر ایستگاه‌های واجد روند، فرضیه تأثیرپذیری شدید غبارناکی استان از شوک‌های اقلیمی ناگهانی (نظیر خشکسالی‌های شدید دهه اخیر و نوسانات تراز دریای خزر) را به جای تغییرات تدریجی خطی تقویت می‌کند که این نتایج با مطالعات نعیمی و همکاران (۱۴۰۰)، یوسفی مبرهن (۱۴۰۳)، عرب‌عامری و همکاران (۱۴۰۲)، بامری نژاد و همکاران (۱۴۰۴)، بابویی و همکاران (۱۴۰۵) همراستا است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نتایج تحلیل فصلی روند زمانی شاخص طوفان گردوغبار در استان گلستان

نتایج آزمون من-کندال فصلی برای شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های هواشناسی استان گلستان در جدول (۳) نشان داد که الگوی روند این شاخص از ناهمگنی مکانی و فصلی قابل توجهی برخوردار است. به‌طور کلی، ایستگاه‌های مراوه‌تپه، کلاله و فرودگاه گرگان گرایش غالب افزایشی را نشان دادند، در حالی که گنبدکاووس در تمامی فصول سال دارای روند کاهشی معنادار بود. در مقابل، برخی ایستگاه‌ها نظیر مینودشت، بندر ترکمن، اینچه‌برون، علی‌آباد و بندرگز بیشتر رفتار پایدار یا گذار داشته و در اغلب فصول فاقد روند مشخص بودند که این نتایج با مطالعه عرب عامری و همکاران (۱۴۰۲) همراستا می‌باشد. از نظر فصلی، تابستان و زمستان بیشترین نمود روندهای افزایشی را در برخی ایستگاه‌ها نشان دادند که می‌تواند با خشکی سطح خاک، ضعف پوشش گیاهی، تشدید فرسایش بادی و وقوع جریان‌های باد غبارخیز مرتبط باشد. در مقابل، کاهش معنادار و یکنواخت در گنبدکاووس بیانگر آن است که عوامل محلی یا منطقه‌ای در این بخش از استان در جهت کاهش شدت گردوغبار عمل کرده‌اند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که تغییرات DSI در گلستان از الگوی یکنواختی تبعیت نمی‌کند و رفتار آن تحت تأثیر شرایط محیطی، اقلیمی و کاربری اراضی در مقیاس محلی و ناحیه‌ای قرار دارد.

جدول ۳: نتایج روندیابی تغییرات فصلی شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان

ایستگاه هواشناسی	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
مراوه‌تپه	روند افزایشی	روند افزایشی معنادار	بدون روند	روند افزایشی معنادار
فرودگاه گرگان	روند افزایشی معنادار	روند افزایشی	روند افزایشی معنادار	روند افزایشی معنادار
کلاله	روند افزایشی	روند افزایشی	روند افزایشی	روند افزایشی معنادار
مینودشت	بدون روند	روند افزایشی	بدون روند	نوسان بدون روند مشخص
گنبدکاووس	کاهشی معنادار	کاهشی معنادار	کاهشی معنادار	کاهشی معنادار
هاشم‌آباد گرگان	بدون روند	روند کاهشی	روند کاهشی	روند کاهشی غیرمعنادار
بندر ترکمن	بدون روند	بدون روند	بدون روند	روند کاهشی غیرمعنادار
اینچه‌برون	روند کاهشی	بدون روند	بدون روند	نوسان بدون روند مشخص
علی‌آباد	روند کاهشی	بدون روند	بدون روند	نوسان بدون روند مشخص
بندرگز	روند کاهشی	بدون روند	بدون روند	نوسان بدون روند مشخص

نتایج تحلیل سالانه روند زمانی شاخص طوفان گردوغبار در استان گلستان

بررسی نتایج سالانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های استان گلستان نشان می‌دهد که الگوی تغییرات این شاخص در سطح استان از یک رفتار یکنواخت تبعیت نمی‌کند و ناهمگنی مکانی آشکاری دارد (جدول ۴).

نتایج تحلیل روند سالانه شاخص طوفان گردوغبار در جدول ۴ نشان می‌دهد که در مقیاس کلان سالانه، رفتار غبارناکی استان به سمت یک دوقطبی مکانی آشکار همگرا شده است. کانون‌های غبارخیز و در معرض خطر استان شامل فرودگاه گرگان و مراوه‌تپه همگی روندهای افزایشی و از نظر آماری معنادار را با شیب‌های مثبت سن تجربه کرده‌اند. بالاترین نرخ تشدید سالانه در فرودگاه گرگان به ثبت رسیده است که نقش تشدید کانون‌های انسان‌ساخت، پسروی تالاب گمیشان و دشت گرگان و مناطق منشا فرمرزی با فاصله نزدیک مانند منطقه بالکان ترکمنستان را تصریح می‌کند. مقایسه تطبیقی نتایج سالانه (جدول ۴) با نتایج ماهانه (جدول ۲)، مکانیزم فیزیکی رخدادها را

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بهروشنی آشکار می سازد؛ به ویژه در ایستگاه مراوه تپه که با وجود روند کاهشی در مقیاس ماهانه (ناشی از افزایش ماه های فاقد گردوغبار)، برآیند شاخص در مقیاس سالانه با نرخ $0/036$ در سال، دارای روند افزایشی معنادار است. این رفتار تأیید می کند که غبارناکی سالانه این منطقه متأثر از انباشت ناشی از طوفان های سهمگین، ناگهانی و با شدت بالا است که عموماً از صحرای قره قوم ترکمنستان وارد حوضه آبریز اترک می شوند. در قطب مقابل، ایستگاه گنبدکاووس با روند کاهشی بسیار معنادار و شیب سن $0/107$ - در سال، تداوم افت سطح غبار محلی را نشان می دهد. در سایر ایستگاه ها نظیر بندر ترکمن، هاشم آباد، بندر گز و علی آباد، روندها معنادار نبوده و ایستگاه اینچه برون با ضریب کندال نزدیک به صفر و شیب سن صفر، وضعیت پایداری از گردوغبار فرامرزی مداوم و پایا را در طول دوره آماری به تصویر می کشد. بر اساس آزمون من-کندال در مقیاس سالانه، ایستگاه های مراوه تپه، فرودگاه گرگان و کلاله دارای روند افزایشی معنادار بوده اند که بیانگر تشدید تدریجی شدت گردوغبار در این ایستگاه ها طی دوره ساله مورد بررسی است. در مقابل، ایستگاه گنبدکاووس تنها ایستگاهی است که کاهش سالانه بسیار معنادار و شدیدی را نشان می دهد؛ نتیجه ای که آن را از سایر ایستگاه ها متمایز می سازد و بر وجود تفاوت های بارز فضایی در رفتار گردوغبار دلالت دارد. در سایر ایستگاه ها شامل مینودشت، هاشم آباد گرگان، بندر ترکمن، اینچه برون، علی آباد و بندرگز، اگرچه در برخی موارد علامت ضریب کندال و شیب سن از گرایش افزایشی یا کاهشی حکایت دارد، اما به دلیل بزرگ تر بودن مقدار p_value از سطح خطای $0/05$ ، این تغییرات از نظر آماری معنادار نبوده و بنابراین باید با احتیاط به عنوان تفسیر بین سالی بدون روند قطعی تفسیر شوند. مقایسه این یافته های سالانه با الگوهای فصلی نشان می دهد که در اغلب ایستگاه ها جهت روند فصلی با نتیجه سالانه سازگاری قابل قبولی دارد. به عنوان مثال، در مراوه تپه روند افزایشی سالانه با وجود روند افزایشی در بهار و روند افزایشی معنادار در تابستان و زمستان هماهنگ است و تنها پاییز فاقد روند مشخص بوده است؛ الگویی که در مجموع می تواند به شکل گیری یک روند افزایشی معنادار در مقیاس سالانه منجر شود. در ایستگاه فرودگاه گرگان نیز هم سویی روندهای فصلی در هر چهار فصل، به ویژه معناداری آن ها در بهار، پاییز و زمستان، به خوبی نتیجه سالانه افزایشی و معنادار این ایستگاه را توجیه می کند. ایستگاه کلاله نیز از همین منطق پیروی می کند؛ به گونه ای که گرچه شدت و معنی داری روند در همه فصول یکسان نیست، اما غلبه روند افزایشی در طول سال و معنادار شدن آن در زمستان، با نتیجه سالانه افزایشی معنادار کاملاً سازگار است. در مقابل، گنبدکاووس نمونه ای بارز از هماهنگی کامل میان مقیاس فصلی و سالانه است، زیرا کاهش معنادار در تمامی فصول به صورت طبیعی به یک روند سالانه کاهشی بسیار معنادار منجر شده است. در ایستگاه های دارای روند سالانه غیرمعنادار نیز مقایسه فصلی نشان می دهد که نبود معناداری سالانه عمدتاً ناشی از ضعف پراکندگی یا عدم تداوم روند در فصول مختلف است. برای نمونه، در مینودشت فقط در تابستان گرایش افزایشی دیده می شود و در سایر فصول روند مشخصی مشاهده نمی گردد؛ از این رو غیرمعنادار بودن روند سالانه این ایستگاه قابل انتظار است. در ایستگاه هاشم آباد گرگان نیز مشاهده روندهای کاهشی غیرمعنادار در تابستان، پاییز و زمستان در کنار نبود روند در بهار، با الگوی سالانه کاهشی ولی غیرمعنادار در دوره آماری مورد بررسی هم خوانی دارد. به همین ترتیب، در بندر ترکمن تنها زمستان گرایش کاهشی نشان می دهد و در سه فصل دیگر روندی مشاهده نمی شود؛ بنابراین طبیعی است که برآیند سالانه نیز به صورت کاهش ضعیف و غیرمعنادار ظاهر شود. در اینچه برون نیز وجود یک کاهش ضعیف در بهار و فقدان روند در سایر فصول، با نتیجه سالانه بدون روند سازگار است. بندرگز نیز با وجود روند کاهشی در بهار و نبود روند در سایر فصول، در مقیاس سالانه یک الگوی کاهشی مرزی را نشان می دهد که از نظر جهت تغییر با نتایج فصلی هماهنگ است، هرچند هنوز به سطح معنی داری متعارف نرسیده است. با این حال،

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

در میان ایستگاه‌ها، علی‌آباد خروجی قابل توجهی از خود نشان داده است؛ در حالی که نتیجه سالانه این ایستگاه نشان‌دهنده گرایش افزایشی غیرمعمول است، در جدول فصلی برای بهار روند کاهشی و برای سایر فصول نبود روند گزارش شده است.

جدول ۴: نتایج روندیابی تغییرات سالانه شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان گلستان

ایستگاه هواشناسی	P_value	ضریب کندال	آماره Z	شیب سن	وضعیت روند
مراوه تپه	۰/۰۳۳	۰/۲۶۹	۲/۱۳	۰/۰۳۶	افزایشی معنادار
فرودگاه گرگان	۰/۰۰۲	۰/۳۴۵	۳/۰۹	۰/۱	افزایشی معنادار
کلاله	۰/۰۲۱	۰/۳۸۳	۲/۳۱	۰/۰۵۱	افزایشی معنادار
مینودشت	۰/۲۱۴	۰/۲۹۵	۱/۲۴	۰/۰۲۶	افزایشی غیرمعمول
گنبد کاووس	<۰/۰۰۱	۰/۶۹۵	۴/۳۸	۰/۱۰۷	کاهشی معنادار
هاشم آباد گرگان	۰/۲۷۶	۰/۱۹۱	۱/۰۹	۰/۰۱۹	کاهشی غیرمعمول
بندر ترکمن	۰/۴۰۳	۰/۱۶۲	۰/۸۴	۰/۰۰۷	کاهشی غیرمعمول
اینچه برون	۱	۰/۰۱۶	۰	۰	نوسان بدون روند مشخص
علی آباد	۰/۴۳۶	۰/۳۵۸	۰/۷۸	۰/۰۰۷	افزایشی غیرمعمول
بندرگز	۰/۰۷	۰/۴۱۲	۱/۸۱	۰/۰۱۳	کاهشی غیرمعمول

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار شاخص طوفان گردوغبار در استان گلستان در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه یکنواخت و همگن نیست و از یک ساختار چندکانونی و وابسته به شرایط مکانی-زمانی تبعیت می‌کند. از منظر روندهای بلندمدت، می‌توان ایستگاه‌های استان را در سه گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) ایستگاه‌های با غلبه روند افزایشی که نشانه‌ای از تشدید نسبی غبارناکی در طول دوره مطالعه است (به‌ویژه مراوه تپه، فرودگاه گرگان و کلاله)، (۲) ایستگاه‌های با غلبه روند کاهشی که شاخص‌ترین نمونه آن گنبد کاووس است و کاهش قابل توجهی را در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد، و (۳) ایستگاه‌هایی با وضعیت پایدار یا نوسانی که در آن‌ها تغییرات DSI عمدتاً به صورت نوسانات بین‌ساله و بدون روند قطعی بروز می‌یابد (از جمله مینودشت، بندر ترکمن، اینچه برون و تا حدودی هاشم‌آباد گرگان و بندرگز). این ناهمگنی مکانی بیانگر آن است که تغییرات DSI در گلستان صرفاً تابع یک عامل واحد نیست و تحت تأثیر هم‌زمان مؤلفه‌های محلی و منطقه‌ای مانند تفاوت در کاربری/پوشش اراضی، شرایط رطوبتی سطح، ویژگی‌های توپوگرافی، و میدان بادهای غالب و مسیرهای انتقال ذرات قرار دارد. در مقیاس مکانی شدت، نتایج پهنه‌بندی و مقادیر سالانه DSI نشان داد که ایستگاه فرودگاه گرگان به‌عنوان کانون غالب و نسبتاً پایدار گردوغبار در استان قابل شناسایی است؛ به‌گونه‌ای که تداوم رخدادهای گردوغبار و برآیند سالانه DSI در این ایستگاه از سایر نقاط بیشتر بوده و نقش آن در شکل‌دهی به الگوی سالانه استان پررنگ‌تر است. در کنار آن، ایستگاه‌های گنبد کاووس، مراوه تپه و کلاله به‌عنوان کانون‌های فعال (ثانویه) مطرح می‌شوند که سهم آن‌ها بیشتر در قالب رخداد‌های فصلی و اپیزودیک قابل توضیح است. از سوی دیگر، پایین‌تر بودن مقادیر DSI در ایستگاه‌های ساحلی و نواحی غربی/شمال‌غربی استان (مانند بندرگز، علی‌آباد و بندر ترکمن) حاکی از شکل‌گیری یک پهنه کم‌غبار در مجاورت دریای خزر است که می‌تواند با اثر تعدیل‌کنندگی رطوبت، ویژگی‌های سطحی و تفاوت در رژیم باد و انتقال

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مرتبط باشد. تحلیل فصلی نیز نشان داد که تغییرات DSI در استان تابع برهم‌کنش فرآیندهای انتقالی و بازخیزش محلی است. در بهار، با تقویت شرایط سینوپتیکی و افزایش قابلیت انتقال، افزایش نسبی DSI به‌ویژه در شرق و شمال‌شرق بیشتر مشاهده می‌شود. در تابستان، هم‌زمان با تشدید خشکی سطح و فراهم شدن بستر مناسب برای بازخیزش، نقش عوامل محلی در پهنه‌های داخلی—به‌خصوص در نواحی مرکز-غرب—برجسته‌تر می‌گردد. نتایج نشان داد که فصل پاییز در استان گلستان از نظر شاخص غبارناکی یک دوره گذار با رفتار ترکیبی است و در زمستان، با وجود کاهش کلی شدت گردوغبار، استمرار نسبی مقادیر DSI در کانون مرکزی همچنان قابل مشاهده است. از این رو، الگوی سالانه DSI را باید برآیند تغییرات فصلی و فراوانی/شدت رخدادها دانست؛ برآیندی که ساختار چندکانونی گردوغبار در استان گلستان را آشکار می‌کند. در مجموع، یافته‌های این تحقیق تأکید می‌کند که غبارناکی استان گلستان حاصل تعامل هم‌زمان کانون‌های داخلی نسبتاً پایدار و کانون‌های فعال با نقش پررنگ‌تر در فصول خاص و شرایط انتقالی است. از منظر کاربردی، تفکیک کانون غالب (گرگان) از کانون‌های فعال شرقی/شمال‌شرقی (مراوه‌تپه، گنبدکاووس و کلاله) می‌تواند مبنایی برای پایش هدفمند، اولویت‌بندی مدیریت ریسک گردوغبار و برنامه‌ریزی محیطی در مناطق حساس استان فراهم آورد و مسیر مطالعات بعدی را به سمت شناسایی محرک‌های محلی (مانند تغییر کاربری اراضی و وضعیت رطوبت خاک) و نیز تحلیل مسیرهای انتقال در رخداد‌های شاخص هدایت کند. تطبیق یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین در سایر مناطق کشور نشان‌دهنده همگرایی اقلیمی در تشدید کانون‌ها و در عین حال، وجود رفتار مکانی-زمانی ویژه در حوضه جنوب‌شرق خزر است. روند افزایشی معنادار شاخص DSI در فرودگاه گرگان و کلاله، هم‌راستا با نتایج بوسفی‌مهرن و خالقی (۱۴۰۳) در استان سمنان و ولی و روستایی (۱۳۹۶) در حوضه مرکزی ایران است که تشدید شدت غبارناکی را ناشی از تداوم خشکسالی‌های پی‌پی، پسروری منابع آبی و تخریب پوشش گیاهی دانسته‌اند. همچنین اوج‌گیری بهاره شاخص در ایستگاه فرامرزی مراوه‌تپه با یافته‌های نعیمی و همکاران (۱۴۰۰) در خراسان رضوی و عرب‌عامری و همکاران (۱۴۰۲) در مناطق همجوار کویر قره‌قوم مطابقت کامل دارد و نقش چرخندهای حرارتی بهاره آسیای میانه را به عنوان محرک مشترک منطقه‌ای اثبات می‌کند. با این حال، ثبت رژیم اوج زمستانه در فرودگاه گرگان پدیده‌ای متمایز از الگوهای غالب مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران (نظیر پژوهش‌های خوزستان و یزد که اوج گردوغبار را عمدتاً در بهار و تابستان گزارش کرده‌اند) است؛ این تفاوت ساختاری تأیید می‌کند که غبارناکی در غرب استان گلستان بیش از آنکه متأثر از طوفان‌های سنتی همرفتی باشد، تحت کنترل سازوکارهای میکروکلیمایی محلی، پایداری استاتیکی ناشی از زبانه پرفشار سیبری و به دام افتادن آئروسول‌ها در لایه وارونگی تابشی شکل می‌گیرد. هر چند تحلیل نتایج تابع پراکنش ایستگاه‌ها در استان و ماهیت ثبت داده‌ها در ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی است که در آینده می‌تواند با نتایج مقادیر غلظت گرد و غبار نیز برازش گردد. برای بهره‌برداری مدیریتی از نتایج این پهنه‌بندی، اجرای اقدامات حفاظتی متناسب با شرایط هر پهنه ضروری است؛ به‌گونه‌ای که در پهنه شرق و شمال‌شرق (مراوه‌تپه، کلاله و گنبدکاووس) توسعه دیپلماسی محیط‌زیستی با کشور ترکمنستان، احداث بادشکن‌ها و احیای مراتع، در پهنه دشت گرگان توسعه کشاورزی حفاظتی، احداث شبکه بادشکن اطراف اراضی زراعی و جلوگیری از سوزاندن بقایای گیاهی، و از همه مهم‌تر در پهنه ساحلی تثبیت بستر تالاب‌ها و خلیج گرگان با تأمین حقابه پایدار در اولویت قرار گیرد. از سوی دیگر، یافته‌های این پژوهش با محدودیت‌هایی نظیر عدم توزیع متقارن ایستگاه‌ها در نوار مرزی و اتکا به دید افقی و کدهای دیده‌بانی (از جمله کدهای گردوغباری WMO مانند کد ۰۵) به‌جای سنجش مستقیم غلظت جرمی ذرات معلق همراه بوده است؛ لذا پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، شاخص‌های ایستگاهی با داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور (نظیر AOD)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

و مدل سازی های لاگرانژی مسیر انتقال ذرات (مانند HYSPLIT) و تحلیل نتایج غلظت گرد و غبار و ژئوشیمیایی عناصر آن جهت تفکیک دقیق تر سهم کانون های محلی از فرامرزی و سنجش پیامدهای اکولوژیک و بهداشتی آن تلفیق گردد.

منابع

- بابویی، هانیه؛ محمدیان بهبهانی، علی؛ حسینعلی زاده، محسن؛ سعدالدین، امیر؛ بوعلی، حسین. (۱۴۰۵). کاربرد رویکرد شبکه بیزی برای مدل سازی شدت فرسایش بادی در استان گلستان. نشریه جغرافیا و توسعه. شماره ۸۲، صص ۲۳۳-۲۵۴.
- بامری نژاد، فریده؛ محمدیان بهبهانی، علی؛ کمکی، چوقی بایرام؛ پاپی، رضا؛ درویشی بلورانی، علی. (۱۴۰۴). ارزیابی الگوریتم های یادگیری ماشین در تهیه نقشه حساسیت کانون های گردوغبار با تلفیق سنجش از دور و پارامترهای محیطی (مطالعه موردی: حوضه قره باغزگل). نشریه برنامه ریزی فضایی و ژئوماتیک. دوره ۲۹، شماره ۲، صص ۸۵-۱۰۷.
- خان سالاری، سکینه؛ مجیدی داشلی برون، عثمان؛ نیکزادفر، مریم؛ ملاعرازی، عبدالجبار. (۱۴۰۲). تغییرات زمانی و مکانی گردوغبار در استان گلستان با استفاده از عمق نوری هواویزها (AOD) و تأثیرپذیری این استان از بیابان های ترکمنستان. فیزیک زمین و فضا، ۲۹(۲)، ۵۴۰-۵۱۷.
- رحیمی، محمد؛ جنت رستمی، مجتبی؛ کابلی، سید حسن. (۱۴۰۰). تحلیل روند تغییرات شاخص گردوغبار (DSI) و ارزیابی ارتباط آن با خشک سالی در دامنه جنوبی البرز. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. دوره یازدهم، شماره چهل و سوم، بهار ۱۴۰۰، صص ۱۹-۴۰.
- عرب عامری، فائزه؛ محمدیان بهبهانی، علی؛ اوفق، مجید؛ آرامی، سید حسین. (۱۴۰۲). تحلیل آماری تغییرات زمانی-مکانی رخداد های گردوغبار در استان گلستان. مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صص ۵۹-۷۲.
- علی پور، ناهید؛ مصباح زاده، طیبه؛ احمدی، حسن؛ ملکین، آرش؛ جعفری، محمد. (۱۳۹۷). تحلیل سینوتیکی وقایع گرد و غبار و ارتباط آن با خشک سالی در استان های البرز و قزوین. فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا، دوره ۸، شماره ۲، صص ۵۲ تا ۶۸.
- نعیمی، مریم؛ میر اکبری، مریم؛ خسروشاهی، محمد؛ زندی فر، سمیرا؛ قاسمی ارین، یاسم. (۱۴۰۰). تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر فراوانی رخدادهای گردوغبار، مطالعه موردی: استان خراسان رضوی. مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، سال دهم، شماره سی و سوم، زمستان ۱۴۰۰، صص ۶۵-۷۸.
- ولی، عباسعلی؛ روستایی، فاطمه. (۱۳۹۶). بررسی روند فرسایش بادی در ایران مرکزی با استفاده از شاخص طوفان گرد و غبار در پنجاه سال اخیر. علوم آب و خاک. ۲۱(۴). صص ۱۸۹-۲۰۰.
- یوسفی مبرهن، ابراهیم؛ خالقی، علی. (۱۴۰۳). بررسی روند تغییرات شاخص گردوغبار (DSI) و ارتباط آن با وضعیت خشک سالی هواشناسی در اقلیم خشک کشور (مطالعه موردی: استان سمنان). فصلنامه علوم محیطی. ۲۲(۲). صص ۲۸۹-۳۰۴.

Ebrahimi Khusfi, Z., Khosroshahi, M., Roustaei, F. and Mirakbari, M. (2020). Spatial and seasonal variations of sand-dust events and their relation to atmospheric conditions and vegetation cover in semi-arid regions of central Iran. *Geoderma*, 365, 114225.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114225>

Goudie, A. (2018). Dust storms and ephemeral lakes. *Desert*, 23(1), 153-164.

<https://doi.org/10.22059/JDESERT.2018.66370>

Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3-4), 350-363.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>

Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods. Fifth Edition. Charles Griffin and Company Ltd. Publishers, London, UK. 202 pp.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1997061>

McTainsh, G. and Tews, E. (2007). Soil Erosion by Wind: Dust Storm Index (DSI). National Monitoring and Evaluation Framework, prepared for the National Land and Water Resources Audit (NLWRA), Canberra. 20.

McTainsh, G. H. (1998). Dust storm index. Sustainable Agriculture: Assessing Australia's Recent Performance, A Report of the National Collaborative Project on Indicators for Sustainable Agriculture, SCARM Technical Report, 70, 65-72.

Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: a global review. *Aeolian Research*, 24, 53-63.

<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- O'Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Parsons, K., Strong, C. L., Shinkfield, P. and Tapper, N. J. (2015). Using meteorological observer data to compare wind erosion during two great droughts in eastern Australia: the World War II Drought (1937–1946) and the Millennium Drought (2001–2010). *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 123–130.
<https://doi.org/10.1002/esp.3668>
- O'Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Tews, E. K., Strong, C. L., Leys, J. F., Shinkfield, P. and Tapper, N. J. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research*, 12, 29–40.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Tabari, H., Marofi, S., Aeni, A., Hosseinzadeh, P., Talaei, Kurosh & Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151 (2), 128–136.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.009>
- Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., Ren, M., & Wang, G. (2020). Re-evaluation of the Power of the Mann-Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series. *Front. Earth Sci.* 8(14), 1–12.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>
- World Meteorological Organization (WMO). (2019). Manual On Codes: International Codes Volume 1.1 Annex II To The WMO Technical Regulations Part A-Alphanumeric Codes WMO No. 306 (2019 Edition). <https://community.wmo.int/site/>.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)