

Seasonal and spatial variations of Aerosol Optical Depth (AOD) in Golestan Province with emphasis on land cover and emerging hotspots (2001-2024)

Ayoub Tavakoli Dashliboroun¹ , Abdolazim Saman^{*2}

1- Master student of climatology, Golestan University, Gorgan, Iran. Email: aiub.tavakkoli@gmail.com

2- (*Corresponding author) Associate professor of climatology, Department of geography, Golestan University, Gorgan, Iran.
Email: a.ghangherme@gu.ac.ir

Article Info

Date of receive:

2025/06/08

Date of last review:

2025/09/28

Date of accept:

2025/09/29

Date of online publication:

2025/09/29

Keywords:

Aerosol Optical Depth,
Dust,
Land cover,
Emerging hotspots,
Golestan

Extended Abstract

Introduction

Dust storms, a significant environmental challenge in arid and semi-arid regions, profoundly impact air quality, public health, ecosystems, and economies. Golestan Province, located in northern Iran, is vulnerable to dust storms due to its proximity to the Caspian Sea, Turkmenistan's deserts, and diverse land cover, including Hyrcanian forests, wetlands, and extensive croplands. Elevated concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5}, particularly during dry seasons, exacerbate respiratory and cardiovascular issues, imposing substantial economic burdens on healthcare systems. Dust sources include local bare lands and transboundary inputs from Turkmenistan's deserts, transported by seasonal winds. Dust accumulation threatens ecosystems such as the Hyrcanian forests by reducing photosynthesis and biodiversity. Additionally, the Caspian Sea's receding water levels and drying margins have created new dust hotspots. Land-use changes, such as deforestation for agriculture, have intensified these effects. Aerosol Optical Depth (AOD) serves as a critical indicator of suspended particle concentration, influencing Earth's radiative balance and precipitation patterns through light absorption and scattering. Climatic factors (e.g., reduced soil moisture and vegetation) and anthropogenic activities (e.g., unsustainable agriculture and lake desiccation) drive AOD increases in arid regions. This study aims to analyze the seasonal and spatial patterns of AOD in Golestan, identify dust sources, and evaluate the roles of land cover and climatic conditions. Leveraging satellite data and spatiotemporal analysis, it seeks to detect emerging hotspots and propose management strategies. ... ► Page 120

How to Cite:

Tavakoli Dashliboroun, A. Saman, A. (2025). Seasonal and spatial variations of Aerosol Optical Depth (AOD) in Golestan Province with emphasis on land cover and emerging hotspots (2001-2024). Scientific -Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 34(135), 119-142.

Data and Methodology

To monitor dust events from 2001 to 2024, daily MOD08_D3 data from the MODIS sensor at 550 nm wavelength with 1000-meter spatial resolution were retrieved from Google Earth Engine, employing the Deep Blue algorithm. AOD thresholds (0.3, 0.4, 0.5, and 0.6) were evaluated, with 0.5 validated as optimal for detecting significant dust events while minimizing atmospheric noise, confirmed using synoptic station data from Gorgan, Hashemabad, Maravetappeh, Kalaleh, Gonbad, and Incheboroun. Maximum AOD intensities within 1, 5, and 10 km radii of stations were extracted, supporting the 0.5 threshold. Land cover analysis utilized the Dynamic World V1 product from Sentinel-2 (10 m resolution), comprising nine classes (bare land, cropland, forest, salt flats, water, urban, rangeland, wetland, snow/ice). Data for 2024 were extracted to assess seasonal land cover changes and their relation to AOD frequency. AOD values were categorized into four quartile classes to examine spatiotemporal patterns. The Overlay Raster (Combine) function in ArcGIS Pro was used to integrate land cover and AOD data, identifying unique combinations. Spatiotemporal analyses were conducted using the Space Time Pattern Mining module in ArcGIS Pro. Seasonal AOD data were converted into a space-time cube, and EHSA, employing the Getis-Ord Gi* statistic, identified hot and cold clusters. Parameters included the K_ NEAREST_ NEIGHBORS method (8 neighbors), annual time steps, and a 1 km neighborhood distance. The Mann-Kendall test analyzed temporal AOD trends, detecting significant increasing or decreasing trends at 90%, 95%, and 99% confidence levels.

Results

Summer emerged as the most critical season for dust events, with 51% of the province in high-frequency classes (>21.471 days), driven by high temperatures, low soil moisture, and local winds. Spring and autumn showed moderate to high activity (50.4% and 52% in mid-to-high frequency classes, respectively), while winter had minimal activity (89.59% dust-free), attributed to high precipitation and humidity. Spatially, dust events concentrated in northern and eastern bare lands. Land cover analysis for 2024 revealed bare lands as the dominant aerosol source, covering 48.85% in summer and 43.76% in spring. Croplands peaked in winter (36.66%) and spring

(27.48%), declining to 22.06% in summer. Forests were most extensive in summer (18.79%) and autumn (18.18%), reducing to 10.1% in winter. Snow (15.35% in winter) and water/wetland covers were prominent in colder seasons, reflecting climatic and agricultural influences. Bare lands, particularly in high AOD classes (up to 21.97% in spring, 21.59% in summer), were the primary aerosol sources. Vegetative covers (forests, croplands) reduced AOD in lower classes but were less effective in severe dust conditions. Agricultural activities, such as plowing in spring and autumn, increased AOD in croplands. Urban areas had a minimal role in aerosol production. EHSA showed summer with the largest hotspot coverage (4785 km², mostly sporadic at 4274 km²), followed by autumn (3552 km²) and spring (2878 km²). Winter had the least (384 km²). New hotspots were prominent in autumn (428 km²) and summer (315 km²), indicating dynamic dust sources. Intensifying hotspots appeared in winter and spring, while persistent hotspots were notable in autumn. No cold spots were identified, likely due to overall aerosol increases or analysis constraints. The Mann-Kendall test indicated AOD stability across >90% of the province, with significant increasing trends in autumn (4.38%, 95% confidence) and summer (1.90%, 90% confidence), concentrated in central and Caspian coastal areas. Decreasing trends (<0.5%) were limited to Alborz forested margins.

Discussion and Conclusion

Summer's dry conditions and strong winds make it the most critical season for dust events, with bare lands in northern and eastern Golestan as primary aerosol sources, consistent with regional studies. Vegetative covers mitigate AOD in non-critical conditions but are limited during severe dust events. EHSA highlighted widespread hotspots in summer and new hotspots in autumn, linked to Caspian Sea level decline and land-use changes. The Mann-Kendall test confirmed long-term AOD stability, with localized increases in autumn and summer, necessitating targeted management. This study underscores the influence of land cover, climate, and human activities on AOD patterns. Restoration of vegetative cover, sustainable agricultural practices, and continuous remote sensing monitoring are recommended to mitigate dust impacts, enhancing natural resource management and reducing health and economic consequences in Golestan.



صفحات ۱۴۲ - ۱۱۹

فصلنامه علمی - پژوهشی

اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره ۳۴، شماره ۱۳۵، پاییز ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2063058.3144>

بررسی تغییرات فصلی و مکانی عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان با تأکید بر پوشش زمین و نقاط داغ نوظهور (۲۰۰۱-۲۰۲۴)



ایوب توکلی داشلی برون^۱، عبدالعظیم سامان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی دانشگاه گلستان، گرگان، ایران aiub.tavakkoli@gmail.com

۲- (*نویسنده مسئول) دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران a.ghangherme@gu.ac.ir

چکیده

پدیده گردوغبار به عنوان یک چالش زیست محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک، تأثیرات گسترده‌ای بر کیفیت هوا، سلامت عمومی، اکوسیستم‌ها و اقتصاد دارد. افزایش غلظت ذرات معلق به ویژه در فصول خشک، مشکلات تنفسی و قلبی عروقی را تشدید کرده و هزینه‌های اقتصادی قابل توجهی به نظام سلامت تحمیل می‌کند. این پژوهش به تحلیل الگوهای فصلی و مکانی عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ و نقش پوشش زمین و نقاط داغ نوظهور گردوغبار پرداخته است. با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده MODIS و محصول Dynamic World V1 از Sentinel-2 در پلتفرم Google Earth Engine، آستانه AOD ۰/۵ برای شناسایی رویدادهای گردوغباری تأیید شد. تحلیل‌ها با توابع روش‌های طبقه‌بندی چارکی و تناسب پوشش سطحی از همپوشانی رستری، آزمون من-کندال و تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHSA) در ArcGIS Pro انجام شدند. نتایج نشان داد تابستان با ۵۱٪ مساحت در کلاس‌های بالای فراوانی (بیش از ۲۱/۴۷۱ روز) بحرانی‌ترین فصل برای گردوغبار است، در حالی که زمستان با ۸۹/۵۹٪ مساحت بدون رویداد، کمترین فعالیت را دارد. اراضی بایر (تا ۴۸/۸۵٪ در تابستان) منبع اصلی آئروسول‌ها هستند، در حالی که پوشش‌های گیاهی مانند جنگل‌ها و اراضی کشاورزی در طبقه‌های پایین AOD نقش کاهشی دارند. تحلیل EHSA نشان داد تابستان با ۴۷۸۵ کیلومتر مربع بیشترین نقاط داغ (عمدتاً پراکنده) و زمستان با ۳۸۴ کیلومتر مربع کمترین نقاط داغ را دارد. نقاط داغ جدید در پاییز (۴۲۸ کیلومتر مربع) و تابستان (۳۱۵ کیلومتر مربع) برجسته بودند. آزمون من-کندال ثبات نسبی AOD را نشان داد، اما روندهای افزایشی در پاییز (۴/۳۸٪ با اطمینان ۹۵٪) و تابستان (۱/۹٪ با اطمینان ۹۰٪) در نواحی مرکزی و حاشیه خزر مشاهده شدند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۱۸

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۰۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۷/۰۷

واژه‌های کلیدی:

عمق نوری آئروسول؛

گردوغبار؛

پوشش زمین؛

نقاط داغ نوظهور؛

گلستان

استناد به این مقاله:

توکلی داشلی برون، الف؛ سامان، ع (۱۴۰۴) بررسی تغییرات فصلی و مکانی عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان با تأکید بر پوشش زمین و نقاط داغ نوظهور (۲۰۰۱-۲۰۲۴)؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۴(۱۳۵)، ۱۴۲- ۱۱۹.

مقدمه

گردوغبار ناشی از باد شمال در غرب ایران در زمستان با شیب تاوایی و سرعت باد بیشتری نسبت به تابستان رخ می‌دهند. در تابستان، پرفشار جنب‌حاره‌ای و تعامل آن با ناوه موسمی باد شمال را شکل می‌دهد، در حالی که در زمستان، ناوه‌های عرض‌های میانی در سطوح بالای جو ناپایداری و توفان‌های گردوغبار را تقویت می‌کنند. تغییرات کاربری اراضی، نظیر تبدیل جنگل‌ها به اراضی کشاورزی، این اثرات را در گلستان تشدید کرده است (Afzalizadeh et al., 2025). عمق نوری آئروسول (AOD)^۱ به‌عنوان شاخصی کلیدی در سنجش غلظت ذرات معلق، نقش مهمی در ارزیابی شدت گردوغبار ایفا می‌کند (Kaufman et al., 2002). گردوغبار با جذب و پراکندگی نور خورشید، تعادل تابشی زمین را تغییر داده و الگوهای بارش را تحت تأثیر قرار می‌دهد که تأثیرات اقلیمی عمیقی در پی دارد (Koren et al., 2004; Huang et al., 2014). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خاورمیانه و آسیای مرکزی، این پدیده‌ها به‌واسطه کاهش رطوبت خاک و تخریب پوشش گیاهی شدت می‌یابند (Al-Hemoud et al., 2017; Gherboudj et al., 2022). عوامل انسانی نظیر کشاورزی ناپایدار و خشک شدن دریاچه‌ها، در کنار تغییرات اقلیمی، این مناطق را به کانون‌های اصلی گردوغبار تبدیل کرده‌اند (Alizadeh-Choozari et al., 2014; Rupakheti et al., 2019; Xi & Sokolik, 2015). افزایش AOD با کاهش کیفیت هوا، کاهش دید و اثرات منفی زیست‌محیطی و بهداشتی همراه است که مطالعات متعددی این موضوع را تأیید کرده‌اند (Che et al., 2019; Wei et al., 2021). تغییرات فصلی AOD با پوشش زمین رابطه‌ای معنادار دارد.

احمدی و همکارانش (۱۳۹۸) نقش شاخص پوشش گیاهی و پارامترهای جغرافیایی را بر عمق نوری ریزگردهای ایران مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که حداکثر وقوع ریزگردها در بهار و حداقل آن در پاییز، مطابق با تغییرات شاخص پوشش گیاهی، مشاهده می‌شود. همچنین کاهش پوشش گیاهی در اراضی کشاورزی و نواحی بایر گلستان،

ریزگردها به‌عنوان پدیده‌ای زیست‌محیطی با پیامدهای گسترده، موجب کاهش کیفیت هوا در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تهدید سلامت جوامع محلی، برهم زدن تعادل اکوسیستم‌ها و بروز خسارات اقتصادی قابل توجه می‌شوند (Khaniabadi et al., 2017; Miri et al., 2021; Sternberg & Edwards, 2017; Al-Taei et al., 2024). استان گلستان، واقع در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز و هم‌مرز با دریای خزر و بیابان‌های خشک ترکمنستان، به‌واسطه تنوع پوشش سطحی شامل جنگل‌های هیرکانی، تالاب‌های بین‌المللی مانند گمیشان و اراضی کشاورزی گسترده، در برابر طوفان‌های گردوغبار آسیب‌پذیر است (Yousefi Kebriya et al., 2025). افزایش غلظت ذرات معلق (PM10 و PM2.5)، به‌ویژه در فصول خشک، منجر به تشدید بیماری‌های تنفسی و قلبی عروقی و تحمیل بار اقتصادی سنگین بر نظام سلامت شده است (Khaniabadi et al., 2017; MalAmiri et al., 2025; Goudarzi et al., 2019). منشأ این ذرات، منابع محلی نظیر اراضی بایر و منابع فرامنطقه‌ای همچون بیابان‌های ترکمنستان است که با وزش بادهای فصلی به گلستان منتقل می‌شوند (Rashki et al., 2021). انباشت گردوغبار بر اکوسیستم‌های طبیعی، از جمله جنگل‌های هیرکانی، تالاب‌ها و اراضی بایر، با اختلال در فرآیند فتوسنتز، تنوع زیستی را تهدید می‌کند (Miri et al., 2021; Indoitu et al., 2012; Middleton, 2017). نواحی بایر، به‌ویژه در فصول خشک، از منابع اصلی انتشار گردوغبار هستند و موجب افزایش غلظت آئروسول‌ها در جو می‌شوند (Yousefi et al., 2020; Gholami et al., 2021). کاهش سطح آب دریای خزر و خشک شدن حاشیه‌های آن، به ایجاد نقاط داغ جدید گردوغبار در سواحل گلستان انجامیده است (Papi et al., 2022). این طوفان‌ها با کاهش بهره‌وری کشاورزی و شیلات، آسیب به زیرساخت‌های شهری و روستایی و افزایش هزینه‌های نگهداری، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی داشته‌اند (Al-Taei et al., 2024; Esmaili et al., 2023).

بر اساس مطالعه بیرانوند و همکاران (۱۴۰۳)، توفان‌های

1- Aerosol Optical Depth

فناوری‌های سنجش‌ازدور، ازجمله محصولات MODIS با الگوریتم‌های Dark Target و Deep Blue، امکان پایش دقیق AOD را فراهم کرده‌اند (Zhou et al., 2020; Hsu et al., 2013). این داده‌ها ابزار مؤثری برای تحلیل روندهای زمانی و مکانی AOD در مناطق خشک هستند (Wang et al., 2020; Wei et al., 2021). همچنین، پلتفرم Google Earth Engine با پردازش داده‌های ماهواره‌ای، تحلیل پوشش زمین و AOD را تسهیل کرده است (Gorelick et al., 2017). آزمون من-کندال (Mann-Kendall) در شناسایی روندهای آماری و تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHSA)^۱ در شناسایی الگوهای مکانی-زمانی منابع گردوغبار بسیار مؤثرند (Hamed & Rao, 1998; Ghanghermeh et al., 2024). مدل‌های ردیابی نظیر HYSPLIT نیز در بررسی مسیر انتقال گردوغبار به گلستان کاربرد دارند (Rashki et al., 2021; Gholami et al., 2020). هدف تحقیق حاضر، تحلیل الگوهای مکانی و فصلی عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان و شناسایی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و گسترش گردوغبار، ازجمله تغییرات پوشش زمین و شرایط اقلیمی است. این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های تحلیل مکانی-زمانی، به شناسایی منابع محلی و فرامنطقه‌ای گردوغبار، نقاط داغ انتشار و روندهای فصلی کمک می‌کند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی، کاهش اثرات بهداشتی و اقتصادی طوفان‌های گردوغبار و ارتقاء مدیریت پایدار منابع طبیعی در استان گلستان منجر شوند.

داده‌ها و روش

برای پایش رویدادهای ریزگردي در بازه زمانی سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۲۴ در استان گلستان (۳۶/۵ تا ۳۸/۵ درجه عرض شمالی و ۵۳/۵ تا ۵۶/۵ درجه طول شرقی)، از محصول روزانه MOD08_D3 سنجنده MODIS در طول موج ۵۵۰ نانومتر با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر استفاده شد که از مجموعه MODIS/006/MOD08_D3 در پلتفرم (GEE)^۲ استخراج شده

به‌ویژه در تابستان، به دلیل کاهش رطوبت خاک و وزش بادهای محلی، با افزایش گردوغبار همبستگی دارد (Yousefi Salajegheh et al., 2025). مطالعات مختلف (مانند، Afzalizadeh et al., 2024; Gan et al., 2024; Rahdari et al., 2025; al., 2025) بر نقش کاهندگی پوشش گیاهی، کاهش رطوبت خاک و تغییرات کاربری اراضی در افزایش AOD در فصول گرم تأکید دارند. همچنین، تحقیقات متعددی به تأثیر فعالیت‌های انسانی، خشک شدن دریاچه‌ها و الگوهای باد در افزایش AOD در ایران، آسیای مرکزی و چین اشاره دارند (Li & Sokolik, 2018; Sokolik et al., 2020; Wang et al., 2020; Shen et al., 2021; Nobakht et al., 2016; al., 2016). پوشش زمین تأثیر مستقیمی بر فرسایش بادی و انتشار آئروسول‌ها دارد (Ginoux et al., 2012; Prospero et al., 2002). خشک شدن دریاچه‌هایی نظیر آرال و هامون، با ایجاد شوره‌زارهای وسیع، منابع اصلی گردوغبار را شکل داده‌اند (Sokolik et al., 2020; Boloorani et al., 2022). کاهش رطوبت خاک، وزش بادهای قوی و فعالیت‌های انسانی در مناطق هم‌مرز گلستان، ازجمله ترکمنستان، قزاقستان و تاجیکستان، منابع مهم گردوغبار منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای را پدید آورده‌اند (Indoitu et al., 2012; Rupakheti et al., 2019; Papi et al., 2022). تخریب زمین، جنگل‌زدایی و کشاورزی ناپایدار از دیگر عوامل مؤثر در گسترش این پدیده هستند (Zucca et al., 2022; Gholami et al., 2020; Esmaili et al., 2023). تغییرات اقلیمی، ازجمله افزایش دما و کاهش بارش، به افزایش طوفان‌های گردوغبار در منطقه منجر شده‌اند (Alizadeh-Chooabari et al., 2014; Cao et al., 2015).

رهنما و همکارانش (۱۴۰۴) تغییرات بلندمدت طوفان گردوغبار در نیمه شرقی کشور را مشخص کردند که در یک دوره ۲۱ ساله، شاخص طوفان در ۸ ماه اول سال میلادی یعنی از ژانویه تا اوت از روند افزایشی پیروی می‌کند. کاهش رطوبت خاک، تبخیر بالا و تداوم خشک‌سالی‌ها، به‌ویژه در خاورمیانه و آسیای مرکزی، موجب گسترش نقاط داغ گردوغبار و افزایش آثار زیست‌محیطی و بهداشتی شده‌اند (Miri et al., 2021; Middleton, 2017; Goudarzi et al., 2019).

1- Emerging Hot Spot Analysis

2- Google Earth Engine

هاشم آباد (۶۵ روز، ۲۱ سال)، مراوه تپه (۲۳۲ روز، ۲۱ سال)، کلاله (۵۴ روز، ۱۶ سال)، فرودگاه گرگان (۶۰ روز، ۱۴ سال) و اینچه برون (۶۵ روز، ۸ سال) ثبت شده است (جدول ۱).

جدول ۱: رخداد روزهای غباری در ایستگاه‌های سینوپتیک

استان گلستان بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱

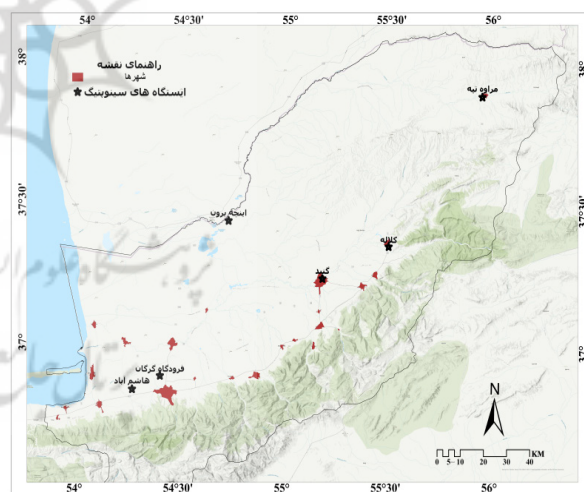
نام ایستگاه	دوره مشاهداتی	طول دوره به سال	تعداد رخداد
اینچه برون	۲۰۰۱-۲۰۲۱	۸	۶۵
فرودگاه گرگان	۲۰۰۸-۲۰۲۱	۱۴	۶۰
کلاله	۲۰۰۶-۲۰۲۱	۱۶	۵۴
گنبد	۲۰۰۱-۲۰۲۱	۲۱	۶۰
هاشم آباد	۲۰۰۱-۲۰۲۱	۲۱	۶۵
مراوه تپه	۲۰۰۱-۲۰۲۱	۲۱	۲۳۲

تحلیل حداکثر شدت AOD نشان داد که در شعاع ۱ کیلومتری، بیشترین شدت در بازه‌های ۰/۴ و ۰/۵ و در شعاع‌های ۵ و ۱۰ کیلومتری در بازه ۰/۵ مشاهده شده است که حاکی از مناسب بودن آستانه ۰/۵ برای شناسایی و تفکیک روزهای ریزگردی از سایر پدیده‌های جوئی است (نگاره ۲). بر این اساس، فراوانی رویدادهای ریزگردی برای چهار فصل (زمستان: دی-اسفند، بهار: فروردین-خرداد، تابستان: تیر-شهریور، پاییز: مهر-آذر) محاسبه شد.

برای تحلیل پوشش زمین، از محصول Dynamic World V1 مبتنی بر تصاویر Sentinel-2 با تفکیک مکانی ۱۰ متر در GEE استفاده شد (Gorelick et al., 2017). این مجموعه شامل نه کلاس پوشش زمین (اراضی بایر، کشاورزی، جنگل، شوره‌زار، آب، مناطق شهری، مرتع، تالاب، برف و یخ) است. داده‌های سال ۲۰۲۴ برای بررسی رابطه تغییرات فصلی پوشش زمین با فراوانی ریزگردها استخراج و به صورت GeoTIFF تنظیم شدند. در ادامه، برای تحلیل‌های فصلی، مقادیر AOD با استفاده از روش طبقه‌بندی چارکی^۱ برای هر فصل به چهار طبقه تقسیم شدند. این تقسیم‌بندی، باوجود تفاوت قابل توجه در فراوانی وقوع ریزگردها در فصول مختلف، امکان

و از الگوریتم Deep Blue بهره می‌گیرد (Remer et al., 2005; Sayer et al., 2014; Gorelick et al., 2017; Hsu et al., 2013; Filonchyk et al., 2020). برای تعیین آستانه بهینه شناسایی رویدادهای ریزگردی، آستانه‌های پیشنهادی مطالعات پیشین ارزیابی شدند: آستانه ۰/۳، مناسب برای شناسایی منابع گردوغبار اما ممکن است نویزهای جوی را شامل شود (Rahmati et al., 2020)؛ آستانه ۰/۴، پیشنهادی برای گردوغبار با شدت متوسط در آسیای مرکزی (Rupakheti et al., 2019)؛ آستانه ۰/۵، برای تشخیص رویدادهای قابل توجه با حذف آتروسول‌های غیرگردوغباری و ایجاد تعادل مناسب (Hamzeh et al., 2021) و آستانه ۰/۶، مناسب برای طوفان‌های شدید اما ممکن است برخی رویدادها را نادیده بگیرد (Rashki et al., 2021).

برای تعیین یا تأیید آستانه‌های مناسب شناسایی رویدادهای ریزگردی در گلستان از روزهای رخدادی غبار ثبت سازمان هواشناسی گلستان بهره گرفته شد (نگاره ۱).

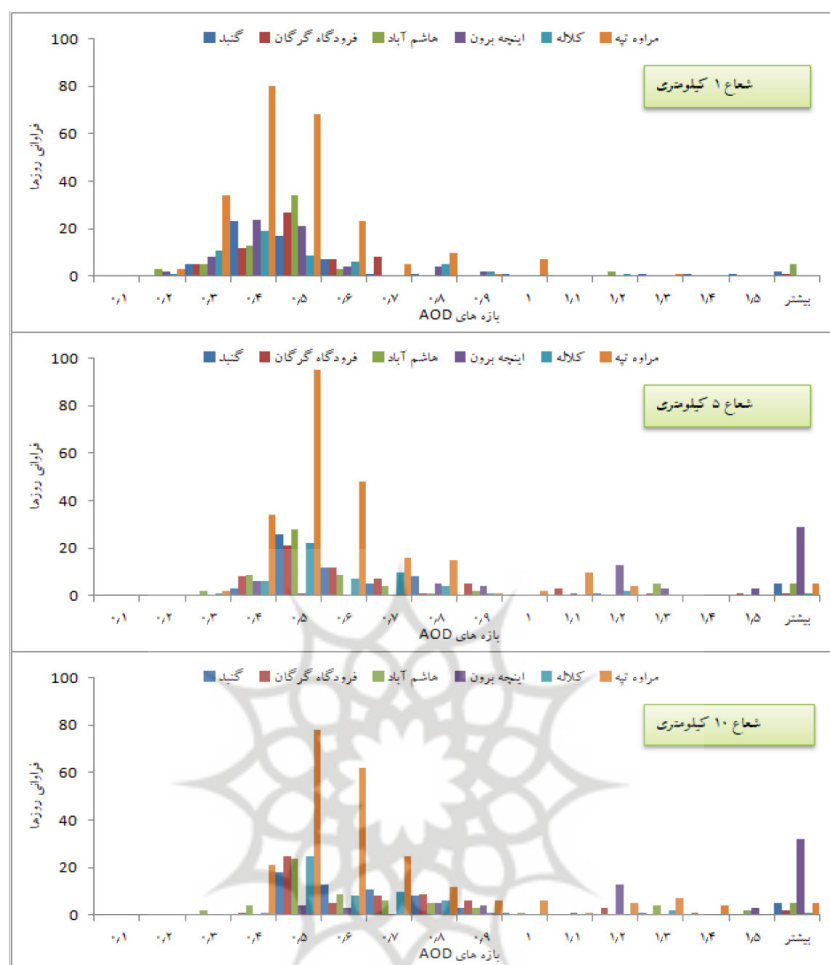


نگاره ۱: نقشه موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک نمونه استان گلستان

در ادامه برای بررسی هم‌زمانی رویدادهای ریزگردی با مشاهدات ایستگاه‌های سینوپتیک، حداکثر مقادیر AOD در شعاع‌های ۱، ۵ و ۱۰ کیلومتری ایستگاه‌ها استخراج شد. بر اساس داده‌ها در بازه زمانی سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۲۱، تعداد روزهای غباری در ایستگاه‌های گنبد (۶۰ روز، ۲۱ سال)،

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

بررسی تغییرات فصلی و مکانی عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان ... / ۱۲۵



نگاره ۲: حداکثر شدت AOD هم‌زمان با مشاهده رخداد غبار در ایستگاه‌های سینوپتیک در شعاع ۱، ۵ و ۱۰ کیلومتری

بررسی ارتباط بین الگوهای مکانی-زمانی AOD و انواع پوشش زمین را فراهم کرد. این روش به‌ویژه برای شناسایی مناطق با بیشترین یا کمترین فراوانی وقوع گردوغبار فصلی مفید است (Zhang et al., 2023). به‌منظور بررسی رابطه میان تغییرات پوشش زمین و الگوهای فصلی AOD، نقشه‌های فصلی محصول Dynamic World V1 با داده‌های AOD ترکیب شدند. برای تلفیق این داده‌ها از تابع (Combine Overlay Raster) در نرم‌افزار ArcGIS Pro استفاده شد. این تابع ترکیب‌های منحصربه‌فردی از کلاس‌های مختلف پوشش زمین و سطوح فراوانی AOD را تولید کرد و امکان شناسایی فضایی و زمانی مشترک را فراهم نمود. در ادامه، برای تحلیل مکانی-زمانی و شناسایی نقاط داغ نوظهور گردوغبار، از

ماژول Space Time Pattern Mining در ArcGIS Pro استفاده شد. در گام نخست، داده‌های فصلی AOD با استفاده از تابع Create Space Time Cube by Aggregating Points به مکعب فضایی-زمانی (Space-Time Cube) تبدیل شدند. این ساختار سه‌بعدی (طول، عرض، زمان) امکان تحلیل دقیق‌تر روندها و خوشه‌های مکانی-زمانی را فراهم کرد. سپس از تکنیک تحلیل نقاط داغ نوظهور (Emerging Hot Spot Analysis - EHSA) برای شناسایی خوشه‌های داغ و سرد استفاده شد. این تکنیک با بهره‌گیری از آماره $Getis-Ord\ Gi^*$ ، روندهای مکانی-زمانی تغییرات AOD را تحلیل و مناطقی با الگوهای پایدار، در حال ظهور یا زوال گردوغبار را مشخص کرد (Ghanghermeh et al., 2024). پارامترهای این تحلیل شامل روش

K_NEAREST_NEIGHBORS با هشت همسایه، گام‌های واحد فضایی-زمانی موردبررسی قرار گرفتند. جدول ۲ زمانی یک‌ساله و فاصله همسایگی ۱ کیلومتر تعیین شدند. الگوهای فضایی و زمانی برای تحلیل نقاط داغ نوظهور در مجموع، از ۲۰,۴۴۴ موقعیت مکانی، بیش از ۴۹۰,۶۵۶ نشان می‌دهد.

جدول ۲: الگوهای فضایی و زمانی برای تحلیل نقاط داغ نوظهور (Emerging Hot Spot Analysis)

نام الگو (Pattern Name)	تعریف (Definition)
بدون الگو (No Pattern Detected)	در هیچ‌یک از الگوهای نقاط داغ یا سرد تعریف‌شده قرار نمی‌گیرد.
نقطه داغ جدید (New Hot Spot)	مکانی که در گام زمانی نهایی به‌طور آماری نقطه داغ معنی‌دار است و قبلاً هرگز نقطه داغ معنی‌دار نبوده است.
نقطه داغ متوالی (Consecutive Hot Spot)	مکانی با یک دوره بدون وقفه از نقاط داغ معنی‌دار در گام‌های زمانی نهایی که قبلاً هرگز نقطه داغ معنی‌دار نبوده و کمتر از ۹۰٪ کل بین‌ها نقاط داغ معنی‌دار هستند.
نقطه داغ تشدید شونده (Intensifying Hot Spot)	مکانی که در ۹۰٪ گام‌های زمانی، شامل گام نهایی، نقطه داغ معنی‌دار بوده و شدت خوشه‌بندی مقادیر بالا در هر گام زمانی به‌طور کلی در حال افزایش است و این افزایش از نظر آماری معنی‌دار است.
نقطه داغ پایدار (Persistent Hot Spot)	مکانی که در ۹۰٪ گام‌های زمانی نقطه داغ معنی‌دار بوده و هیچ روند قابل تشخیصی در افزایش یا کاهش شدت خوشه‌بندی در طول زمان وجود ندارد.
نقطه داغ کاهشی (Diminishing Hot Spot)	مکانی که در ۹۰٪ گام‌های زمانی، شامل گام نهایی، نقطه داغ معنی‌دار بوده و شدت خوشه‌بندی در هر گام زمانی به‌طور کلی در حال کاهش است و این کاهش از نظر آماری معنی‌دار است.
نقطه داغ پراکنده (Sporadic Hot Spot)	مکانی که به‌صورت متناوب نقطه داغ است. کمتر از ۹۰٪ گام‌های زمانی نقاط داغ معنی‌دار بوده و هیچ‌یک نقطه سرد معنی‌دار نبوده‌اند.
نقطه داغ نوسانی (Oscillating Hot Spot)	نقطه داغ معنی‌دار در گام زمانی نهایی که در گذشته نقطه سرد معنی‌دار نیز بوده است. کمتر از ۹۰٪ گام‌های زمانی نقاط داغ معنی‌دار هستند.
نقطه داغ تاریخی (Historical Hot Spot)	دوره اخیر داغ نیست، اما حداقل ۹۰٪ گام‌های زمانی نقاط داغ معنی‌دار بوده‌اند.
نقطه سرد جدید (New Cold Spot)	مکانی که در گام زمانی نهایی به‌طور آماری نقطه سرد معنی‌دار است و قبلاً هرگز نقطه سرد معنی‌دار نبوده است.
نقطه سرد متوالی (Consecutive Cold Spot)	مکانی با یک دوره بدون وقفه از نقاط سرد معنی‌دار در گام‌های زمانی نهایی که قبلاً هرگز نقطه سرد معنی‌دار نبوده و کمتر از ۹۰٪ کل بین‌ها نقاط سرد معنی‌دار هستند.
نقطه سرد تشدید شونده (Intensifying Cold Spot)	مکانی که در ۹۰٪ گام‌های زمانی، شامل گام نهایی، نقطه سرد معنی‌دار بوده و شدت خوشه‌بندی مقادیر پایین در هر گام زمانی به‌طور کلی در حال افزایش است و این افزایش از نظر آماری معنی‌دار است.
نقطه سرد پایدار (Persistent Cold Spot)	مکانی که در ۹۰٪ گام‌های زمانی نقطه سرد معنی‌دار بوده و هیچ روند قابل تشخیصی در افزایش یا کاهش شدت خوشه‌بندی در طول زمان وجود ندارد.
نقطه سرد کاهشی (Diminishing Cold Spot)	مکانی که در ۹۰٪ گام‌های زمانی، شامل گام نهایی، نقطه سرد معنی‌دار بوده و شدت خوشه‌بندی مقادیر پایین در هر گام زمانی به‌طور کلی در حال کاهش است و این کاهش از نظر آماری معنی‌دار است.
نقطه سرد پراکنده (Sporadic Cold Spot)	مکانی که به‌صورت متناوب نقطه سرد است. کمتر از ۹۰٪ گام‌های زمانی نقاط سرد معنی‌دار بوده و هیچ‌یک نقطه داغ معنی‌دار نبوده‌اند.
نقطه سرد نوسانی (Oscillating Cold Spot)	نقطه سرد معنی‌دار در گام زمانی نهایی که در گذشته نقطه داغ معنی‌دار نیز بوده است. کمتر از ۹۰٪ گام‌های زمانی نقاط سرد معنی‌دار هستند.
نقطه سرد تاریخی (Historical Cold Spot)	دوره اخیر سرد نیست، اما حداقل ۹۰٪ گام‌های زمانی نقاط سرد معنی‌دار بوده‌اند.

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از معادلات (۵) محاسبه می شود:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{for } n > 10$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - (n2+5)}{18} \quad \text{for } n < 10$$

معادله (۵)

که n و m معرف تعداد دنبال‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله است و در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از معادلات (۶) استخراج می شود:

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{for } S > 0$$

$$Z = 0 \quad \text{for } S = 0$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{for } S < 0$$

معادله (۶)

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می شود که شرط معادله (۷) برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad \text{معادله (۷)}$$

که a سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری a است که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده می شود. البته لازم به ذکر است که این خروجی لایه نقشه به روش من-کندال در قالب هفت طبقه (bin) هست که مقادیر منفی روند کاهشی و مثبت نیز روند افزایشی را نشان می دهند در کل بدون روند با طبقه (۰)، روند افزایش / کاهشی با ± 1 در سطح ۹۰٪، ± 2 با ۹۵٪ و ± 3 با ۹۹٪ اطمینان قابل تشخیص است.

برای محاسبه آماره Gi^* Getis-Ord از معادله (۱) بهره گرفته شد.

$$Gi^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{i,j} x_j \bar{X} \sum_{j=1}^n \omega_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n \omega_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله؛ x_j : مقدار ویژگی برای عارضه j ، w_{ij} : وزن فضایی بین عوارض i و j و n: تعداد کل عوارض همچنین، مقادیر $\bar{X}$ و S به صورت معادله (۲) تعریف می شوند.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad \text{معادله (۲)}$$

مقدار Gi^* به صورت امتیاز Z محاسبه شده و نیازی به تخمین اضافی ندارد. در ادامه، با استفاده از نرم افزار ArcGIS Pro تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHSA) برای بررسی الگوهای فضایی-زمانی در دوره مطالعه به کار گرفته شد.

همچنین، برای تحلیل روندهای زمانی آزمون من-کندال مورد استفاده قرار گرفت (Ghanghermeh et al., 2024; Chen et al., 2018). بر این اساس روند تغییرات در هر کلاس (bin) مکعب، به صورت نقاط شمارش می شوند و در نهایت روند مقادیر bin در طول زمان در هر مکان با استفاده از آماره Mann-Kendall برآورد می شود. در روش من-کندال ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق معادله (۳) به دست می آید (قائقرمه و همکاران ۲۰۲۴).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{معادله (۳)}$$

که n تعداد مشاهدات سری و x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند تابع sgn نیز به صورت معادله (۴) قابل محاسبه است:

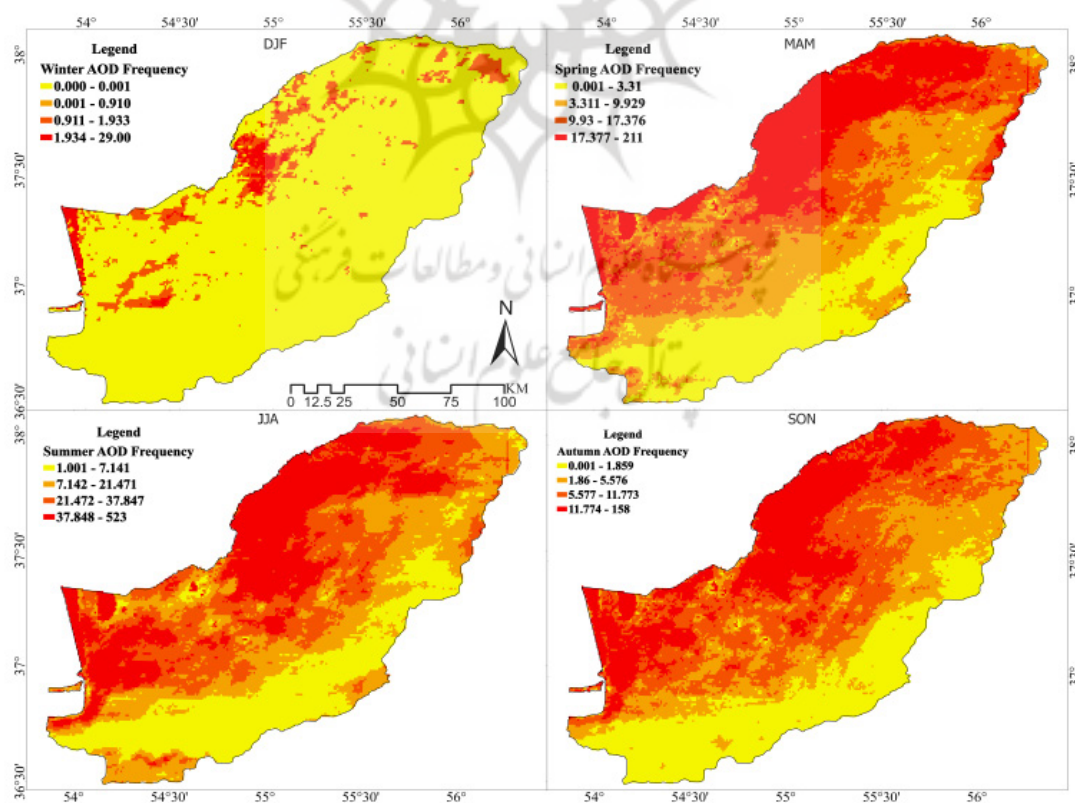
$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad \text{معادله (۴)}$$

یافته‌ها

الگوی فصلی توزیع فراوانی AOD

AOD به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. نزدیک به ۵۰/۴ درصد از مساحت استان در کلاس‌های میانی و بالای فراوانی (بیش از ۹/۹۲۹ بار وقوع به‌روز) قرار دارند. قاعدتاً افزایش فعالیت‌های گردوغبار در این فصل با افزایش ناپایداری‌های اقلیمی، وزش بادهای محلی و خشک شدن سطح خاک همبستگی دارد. همچنین، توزیع مکانی نیز نشان‌دهنده گسترش قابل توجه مناطق با فراوانی بالا در بخش‌های شمالی و شرقی استان دیده می‌شود؛ اما تابستان فعال‌ترین فصل از نظر وقوع پدیده گردوغبار محسوب می‌شود بطوریکه در دوره موردنظر حداکثر تا ۵۳۳ روز نیز اتفاق افتاده است. در کل حدود ۵۱ درصد از مساحت استان در دو کلاس بالای فراوانی (بیش از ۲۱/۴۷۱ روز) قرارگرفته‌اند. عامل اصلی این روند، معمولاً با افزایش دما، تبخیر بالا، کاهش شدید رطوبت نسبی و فراوانی منابع گردوغبار سطحی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بخش‌های شمالی استان هم‌زمان است.

مطابق نگاره ۳ و جدول ۳ ملاحظه می‌شود که الگوی زمانی و مکانی مشخصی از پراکندگی ریزگرد در استان گلستان شکل می‌گیرد. به‌طوری‌که در طول دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ در فصل زمستان، بیشتر فراوانی وقوع تنها با بیش از ۱/۹۳۳ روز در ۲/۳۸ درصد از استان به‌صورت لکه‌ای در بخش شمالی اتفاق افتاده است. درحالی‌که ۸۹/۵۹ درصد از سطح استان تقریباً هیچ واقعه ریزگردي در طی ۲۴ سال رخ نداده است. این الگو با شرایط اقلیمی فصل زمستان، شامل بارندگی بالاتر و رطوبت نسبی زیاد و همچنین کاهش فعالیت بادهای خشک، هم‌راستا است. در فصل بهار، در دوره موردنظر فراوانی وقوع تا ۲۱۱ روز نیز اتفاق افتاده است. با توجه به جدول و نقشه این فصل مطابق طبقات چارکی انجام‌شده مشخص می‌شود. توزیع فراوانی وقوع



نگاره ۳: فراوانی فصلی وقوع AOD در استان گلستان (۲۰۰۱-۲۰۲۴)

بررسی فصلی پوشش سطحی و کاربری اراضی استان گلستان

در این مطالعه، به منظور بررسی تغییرات فصلی انواع پوشش زمین در سال ۲۰۲۴ و ارزیابی ارتباط احتمالی آن‌ها با فراوانی وقوع AOD، از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل (Dynamic World V1) استخراج شده از Google Earth Engine برای تحلیل تغییرات فصلی پوشش سطحی و کاربری اراضی در استان گلستان استفاده شد. تحلیل تلفیقی داده‌های کاربری/پوشش اراضی (نگاره ۴) در فصول چهارگانه سال نشان‌دهنده دینامیک فضایی-زمانی قابل توجهی در نوع و گسترش پوشش‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه است. بر اساس نتایج، سهم نسبی وسعت هر کاربری در سطح استان (جدول ۴) در فصول مختلف تفاوت معناداری را نشان می‌دهد که می‌تواند حاصل تعامل عوامل اقلیمی، فیزیوتوگرافی، بهره‌برداری انسانی و ساختار پوشش گیاهی باشد.

پوشش درختی (Trees): بیشترین گسترش این نوع کاربری در فصل تابستان با ۱۸/۷۹٪ مشاهده شد و در بهار (۱۷/۴۱٪) و پاییز (۱۸/۱۸٪) نیز سهم بالایی دارد که نشان‌دهنده وضعیت تثبیت شده پوشش جنگلی در نیمه جنوبی و جنوب شرقی منطقه است؛ این نواحی عمدتاً با ارتفاعات بیشتر و رطوبت بالاتر تطابق دارند. کمترین میزان پوشش درختی در زمستان (۱۰/۱٪) مشاهده شد که احتمالاً به دلیل کاهش سبزینگی و برف‌پوش بودن برخی مناطق است.

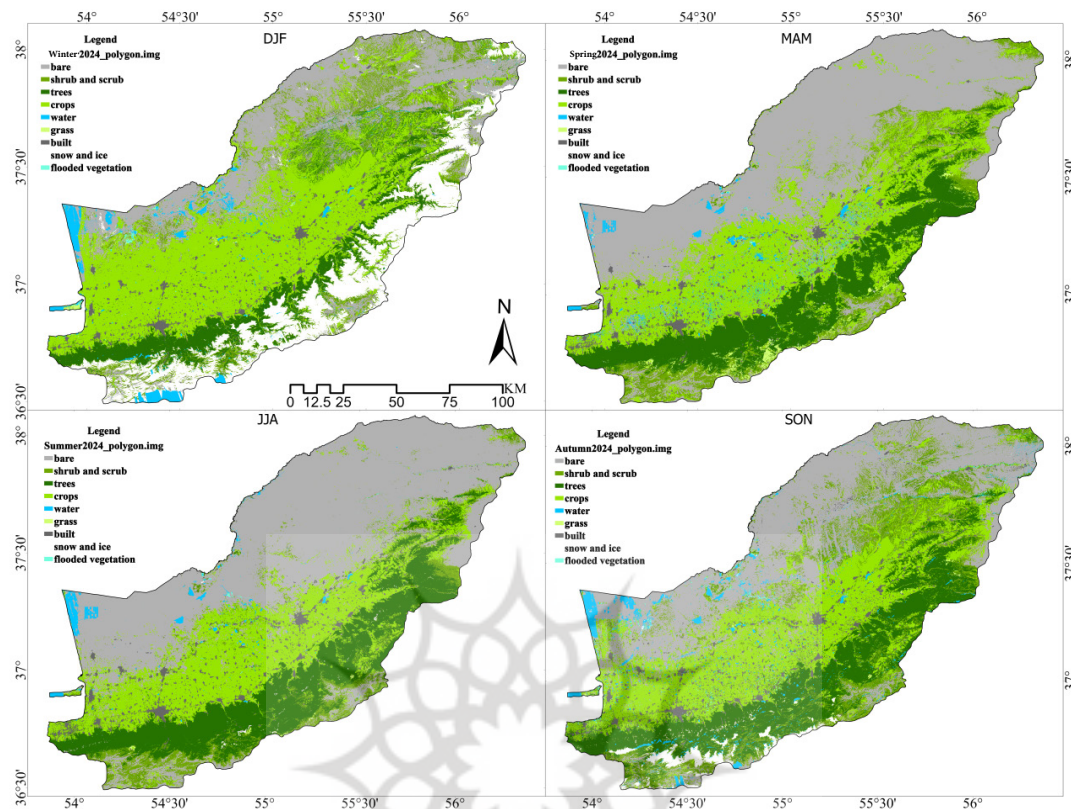
اراضی زراعی (Crops): این اراضی در زمستان (۳۶/۶۶٪) و بهار (۲۷/۴۸٪) بیشترین گستردگی را دارند که با دوره‌های کشت پاییزه و اوایل بهار هماهنگ است. در تابستان به کمترین مقدار خود (۲۲/۰۶٪) می‌رسند که احتمالاً نشان‌دهنده دوره آیش یا برداشت محصول در مناطق زراعی غرب و مرکز منطقه است. پراکنش این اراضی به‌ویژه در حاشیه دشت‌های هموار و نواحی کوهپایه‌ای متمرکز شده‌اند.

زمین‌های بایر (Bare): بالاترین سهم در تابستان (۴۸/۸۵٪)

پاییز نیز به‌عنوان فصلی با فعالیت متوسط تا نسبتاً بالا در نظر گرفته می‌شود. بیش از ۵۲ درصد از سطح استان در کلاس‌های فراوانی بالاتر از ۵/۵۷۶ بار قرار گرفته‌اند. اگرچه شدت آن به اندازه تابستان نیست، اما همچنان نشان‌دهنده استمرار روزهای گردوغباری در ماه‌های ابتدایی این فصل است. از عوامل مؤثر در این فصل، کاهش تدریجی دما در کنار استمرار خشکی تابستانه و همچنین آمادگی برای کشت پاییزه است که با شخم زدن خاک همراه شده است. از نظر مکانی مطابق نقشه‌های فصلی، بیشترین تراکم وقوع روزهای غباری در شمال و شرق استان مشاهده شده که با توزیع اراضی بایر و مناطق مستعد فرسایش بادی همخوانی دارد. در نهایت اینکه تابستان به‌عنوان فصل بحرانی از نظر فراوانی و شدت وقوع رویداد روزهای گردوغباری قرار می‌گیرد و در مراحل بعد نیز افزایش فراوانی وقوع در فصول بهار و پاییز است.

جدول ۳: درصد مساحت طبقات فراوانی AOD در فصول مختلف در استان گلستان (۲۰۲۴-۲۰۰۱)

فصل‌ها	طبقات فراوانی به‌روز	مساحت به درصد
زمستان	۰-۰/۰۰۱	۸۹/۵۹
زمستان	۰/۰۰۱-۰/۹۱	۰
زمستان	۰/۹۱-۱/۹۳۳	۸/۰۴
زمستان	۱/۹۳۳-۲۹	۲/۳۸
بهار	۰-۳/۳۱	۲۳/۱۶
بهار	۳/۳۱-۹/۹۲۹	۲۷/۴۵
بهار	۹/۹۲۹-۱۷/۳۷۶	۲۶/۱۶
بهار	۱۷/۳۷۶-۲۱۱	۲۳/۲۳
تابستان	۱-۷/۱۴۱	۲۲/۱۳
تابستان	۷/۱۴۱-۲۱/۴۷۱	۲۶/۹۱
تابستان	۲۱/۴۷۱-۳۷/۸۴۷	۲۵/۳۹
تابستان	۳۷/۸۴۷-۵۲۳	۲۵/۵۷
پاییز	۰-۱/۸۵۹	۲۳/۲۷
پاییز	۱/۸۵۹-۵/۵۷۶	۲۳/۸۴
پاییز	۵/۵۷۶-۱۱/۷۷۳	۲۹/۲۷
پاییز	۱۱/۷۷۳-۱۵۸	۲۳/۶۲



نگاره ۴: نقشه‌های فصلی کاربری/پوشش اراضی استان گلستان بر اساس داده‌های Sentinel-2 در سال ۲۰۲۴

جدول ۴: درصد تغییرات فصلی انواع کاربری اراضی در استان گلستان بر اساس داده‌های Sentinel-2 در سال ۲۰۲۴

کاربری اراضی	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
آب (Water)	۲/۰۲	۱/۲۵	۰/۹۴	۲/۰۶
درختان (Trees)	۱۰/۱	۱۷/۴۱	۱۸/۷۹	۱۸/۱۸
چمن (Grass)	۰/۳۸	۰/۸۵	۰/۲۱	۰/۴۶
پوشش گیاهی غرقابی (Flooded Vegetation)	۰/۲۸	۰/۱	۰/۱۴	۰/۴۵
محصولات کشاورزی (Crops)	۳۶/۶۶	۲۷/۴۸	۲۲/۰۶	۲۵/۷۸
بوته‌زار و درختچه (Shrub and Scrub)	۹/۰۶	۶/۷۳	۶/۲۳	۱۳/۷۶
مناطق ساخته‌شده (Built)	۲/۸۷	۲/۴۱	۲/۷۳	۳/۴۷
زمین بایر (Bare)	۲۳/۲۸	۴۳/۷۶	۴۸/۸۵	۳۴/۲۹
برف و یخ (Snow and Ice)	۱۵/۳۵	۰/۰۱	۰/۰۵	۱/۵۷

فرسایش‌پذیری تمرکز دارند. در مقابل، در زمستان این وسعت به ۲۳/۲۸٪ کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از مرطوب شدن سطح یا سبزی‌نگی گیاهان زمستانه باشد. پوشش برف (Snow and Ice): به‌صورت قابل‌توجهی در

و بهار (۴۳/۷۶٪) دیده می‌شود که بیانگر تأثیر خشکی اقلیمی و نبود پوشش گیاهی در این فصول است. این اراضی عمدتاً در نواحی شمالی و شمال شرقی با شیب نسبتاً زیاده‌تر از نواحی جلگه‌ای، کمبود منابع آبی و خاک‌های

زراعی در بخش‌های میانی و غربی و اراضی بایر در شمال و شمال شرق بیشترین تمرکز فضایی را دارند. همچنین، فصول سرد موجب افزایش موقت پوشش آبی، برف و پوشش گیاهی غرقابی شده درحالی‌که در فصول گرم شاهد گسترش اراضی بایر و کاهش سبزی‌نگی هستیم.

بررسی فصلی تأثیر پوشش سطحی / کاربری اراضی بر فراوانی وقوع AOD در استان گلستان

تحلیل تناسب پوشش سطحی / کاربری اراضی با فراوانی وقوع AOD در استان گلستان، با استفاده از داده‌های فصلی، الگوهای پیچیده‌ای را در رابطه با تأثیر نوع پوشش سطحی بر AOD نشان می‌دهد. این تحلیل بر مبنای چهار طبقه AOD در هر فصل انجام شده و به بررسی نقش انواع پوشش سطحی در احتمال وقوع AOD پرداخته است (جدول ۵). یافته‌های این مطالعه به‌صورت فصلی و با تأکید بر مکانیزم‌های محیطی و انسانی مؤثر بر AOD ارائه می‌شود. در فصل زمستان، در طبقه AOD پایین (۰-۰/۰۰۱)، پوشش‌های اراضی کشاورزی معادل ۳۳/۴۹٪، زمین‌های بایر معادل ۱۷/۹۲٪ و برف معادل ۱۵/۲۳٪ از وسعت غالب هستند. این ترکیب نشان‌دهنده کاهش فعالیت‌های زیستی و کشاورزی در این فصل است که به همراه حضور برف هرچند عمر کوتاهی دارد اما به کاهش غلظت آئروسول‌ها کمک می‌کند. ریزش‌های جوی ازجمله برف به‌عنوان یک پوشش غیرفعال، از بلند شدن ذرات گردوغبار جلوگیری کرده و نقش تثبیت‌کننده در کاهش AOD دارد. در طبقه‌های بالاتر (۱/۹۳۳ - ۰/۹۱) و (۱/۹۳۳-۲۹) AOD، پوشش زمین‌های بایر معادل به ترتیب ۴/۱۸٪ و ۱/۱۸٪ و اراضی کشاورزی معادل ۲/۶۲٪ و ۰/۵۴٪ از وسعت همچنان نقش دارند، اما فراوانی کلی AOD بالا بسیار محدود است. این امر احتمالاً به دلیل رطوبت بالای خاک در زمستان و کاهش وزش بادهای قوی است که مانع از انتشار ذرات معلق می‌شود. نکته قابل‌توجه، عدم وقوع AOD در طبقه ۰/۹۱-۰/۰۰۱ است که نشان‌دهنده شرایط پایدار جوی و فقدان منابع قوی تولید آئروسول در این فصل است. در بهار،

زمستان (۱۵/۳۵٪) دیده می‌شود البته لازم به ذکر است معمولاً ماندگاری پوشش‌های برفی بسیار کوتاه‌مدت است و حتی در فصول دیگر تقریباً حذف می‌شود، این پوشش نشان‌دهنده تأثیر اقلیم سرد و ارتفاعات بالا در نواحی کوهستانی است.

بوته‌زار و درختچه (Shrub and Scrub): در پاییز (۱۳/۷۶٪) بیشترین و در تابستان (۶/۲۳٪) کمترین مقدار را دارند. به نظر می‌رسد گونه‌های خزان‌دار این تیپ گیاهی در پاییز رشد مجدد پیدا کرده و در فصول گرم دچار تحلیل می‌شوند. از نظر مکانی، این کاربری در نواحی میانی با شیب متوسط پراکنده است.

پوشش گیاهی غرقابی و آب (Flooded Vegetation and Water): این دو نوع پوشش عمدتاً در زمستان و پاییز مشاهده می‌شوند (به ترتیب: ۰/۲۸٪ و ۲/۰۲٪ در زمستان و ۰/۴۵٪ و ۲/۰۶٪ در پاییز) که ناشی از تجمع رواناب و افزایش منابع آبی سطحی در این فصول است. این پوشش‌ها در پست‌ترین نواحی، در امتداد رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی تمرکز دارند.

پوشش چمنی (Grass): بسیار محدود بوده و بیشترین مقدار آن در بهار (۰/۸۵٪) گزارش شده که می‌تواند با رشد فصلی گونه‌های علفی هم‌زمان باشد. کمترین مقدار در تابستان (۰/۲۱٪) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تأثیر خشک‌سالی تابستانه بر پوشش علفی است.

مناطق ساخته‌شده (Built): تغییرات جزئی بین فصول مشاهده می‌شود که احتمالاً به فضای میانی نواحی ساخته‌شده وابسته است و بین ۲/۴۱٪ (بهار) تا ۳/۴۷٪ (پاییز) در نوسان است. پراکنش فضایی این اراضی عمدتاً در نواحی شهری مرکزی و به‌صورت پراکنده در مناطق روستایی دیده می‌شود که با توسعه روستاها و شهرهای کوچک همخوانی دارد. در مجموع، داده‌های فوق حاکی از آن است که تغییرات پوشش اراضی در منطقه مورد مطالعه عمدتاً تابع فصلی شرایط آب‌وهوایی و فعالیت‌های کشاورزی است. پوشش درختی در جنوب منطقه، اراضی

جدول ۵: درصد مساحت انواع پوشش سطحی و کاربری اراضی برحسب طبقات فراوانی AOD در فصول مختلف استان گلستان

LandCover									class	فصل ها
snow and ice	bare	built	shrub and scrub	crops	flooded vegetation	grass	trees	water		
۱۵/۲۳	۱۷/۹۲	۲/۶۸	۸/۲۹	۳۳/۴۹	۰/۲۳	۰/۳۶	۹/۹۶	۱/۴۱	۰-۰/۰۰۱	زمستان
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۱-۰/۹۱	زمستان
۰/۱۱	۴/۱۸	۰/۱۶	۰/۷	۲/۶۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۹۱-۱/۹۳۳	زمستان
۰/۰۱	۱/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۵۴	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۵۱	۱/۹۳۳-۲۹	زمستان
۰	۱/۱۳	۰/۵	۲/۶۶	۳/۳۴	۰/۰۵	۰/۷۸	۱۴/۶	۰/۱۱	۰-۳/۳۱	بهار
۰	۵/۲۲	۱/۳	۳/۳۱	۱۴/۲۱	۰/۰۲	۰/۰۶	۲/۷۸	۰/۵۴	۳/۳۱-۹/۹۲۹	بهار
۰	۱۵/۴۴	۰/۵۹	۰/۷	۸/۹۶	۰/۰۲	۰	۰/۰۲	۰/۴۲	۹/۹۲۹-۱۷/۳۷۶	بهار
۰	۲۱/۹۷	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۹۶	۰	۰	۰/۰۱	۰/۱۹	۱۷/۳۷۶-۲۱۱	بهار
۰/۰۵	۱/۱۵	۰/۴۶	۲/۵۹	۲/۲۲	۰/۰۴	۰/۱۴	۱۵/۴۱	۰/۰۶	۱-۷/۱۴۱	تابستان
۰	۱۰/۵۵	۱/۰۲	۲/۸۲	۸/۹۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۳/۲۴	۰/۲۳	۷/۱۴۱-۲۱/۴۷۱	تابستان
۰	۱۵/۵۶	۰/۸۶	۰/۵۵	۸/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۸	۲۱/۴۷۱-۳۷/۸۴۷	تابستان
۰	۲۱/۵۹	۰/۳۹	۰/۲۷	۲/۷۹	۰/۰۲	۰	۰/۰۴	۰/۴۶	۳۷/۸۴۷-۵۲۳	تابستان
۱/۵	۱/۷۷	۰/۳۸	۴/۵۲	۱/۷۷	۰/۰۴	۰/۲۶	۱۲/۵۷	۰/۴۵	۰-۱/۸۵۹	پاییز
۰/۰۵	۴/۶۳	۱/۱۳	۳/۳۲	۹/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۹	۵/۱۳	۰/۳۲	۱/۸۵۹-۵/۵۷۶	پاییز
۰/۰۱	۱۱/۲۷	۱/۳۴	۳/۹۶	۱۱/۵۹	۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۴	۰/۴۸	۵/۵۷۶-۱۱/۷۷۳	پاییز
۰/۰۱	۱۶/۶۲	۰/۶۳	۱/۹۵	۳/۳۷	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۸	۱۱/۷۷۳-۱۵۸	پاییز

درختان و محصولات کشاورزی) در طبقه‌های بالای AOD است که نشان‌دهنده محدودیت توانایی این پوشش‌ها در مهار آتروسول‌ها در شرایط گردوغبار شدید است. در تابستان که معمولاً با شرایط خشک و دمای بالا همراه است، الگوهای AOD تحت تأثیر کاهش رطوبت خاک و افزایش فعالیت‌های گردوغبار قرار دارند. در طبقه AOD پایین (۱-۷/۱۴۱)، پوشش درختان معادل ۱۵/۴۱٪ و اراضی کشاورزی معادل ۲/۲۲٪ از وسعت نقش مهمی در کاهش AOD دارند. این پوشش‌ها با ایجاد سایه و حفظ رطوبت نسبی خاک، از بلند شدن ذرات جلوگیری می‌کنند. با افزایش (۲۱/۴۷۱-۳۷/۸۴۷) و (۳۷/۸۴۷-۵۲۳) AOD، پوشش زمین‌های بایر به‌طور قابل‌توجهی غالب می‌شود (به ترتیب ۱۵/۵۶٪ و ۲۱/۵۹٪ از وسعت) که نشان‌دهنده نقش غالب گردوغبار ناشی از زمین‌های خشک و بدون پوشش گیاهی است.

الگوهای متفاوتی مشاهده می‌شود. در طبقه AOD پایین (۰-۳/۳۱)، پوشش درختان معادل ۱۴/۶٪ و اراضی کشاورزی معادل ۳/۳۴٪ از وسعت برجسته هستند که نشان‌دهنده تأثیر پوشش گیاهی فعال در کاهش غلظت آتروسول‌ها است. درختان با جذب ذرات معلق و کاهش سرعت باد در سطح زمین، به کاهش AOD کمک می‌کنند. باین‌حال، در طبقه‌های بالاتر (۹/۹۲۹-۱۷/۳۷۶) و (۱۷/۳۷۶-۲۱۱) AOD، پوشش زمین‌های بایر به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد (به ترتیب ۱۵/۴۴٪ و ۲۱/۹۷٪ از وسعت) و به‌عنوان منبع اصلی تولید آتروسول‌ها عمل می‌کند. این افزایش می‌تواند به عواملی مانند آماده‌سازی زمین‌های کشاورزی، شخم زدن و وزش بادهای فصلی نسبت داده شود که گردوغبار را از زمین‌های خشک و بایر به هوا منتقل می‌کنند. نکته قابل‌توجه، کاهش نقش پوشش‌های گیاهی فعال (مانند

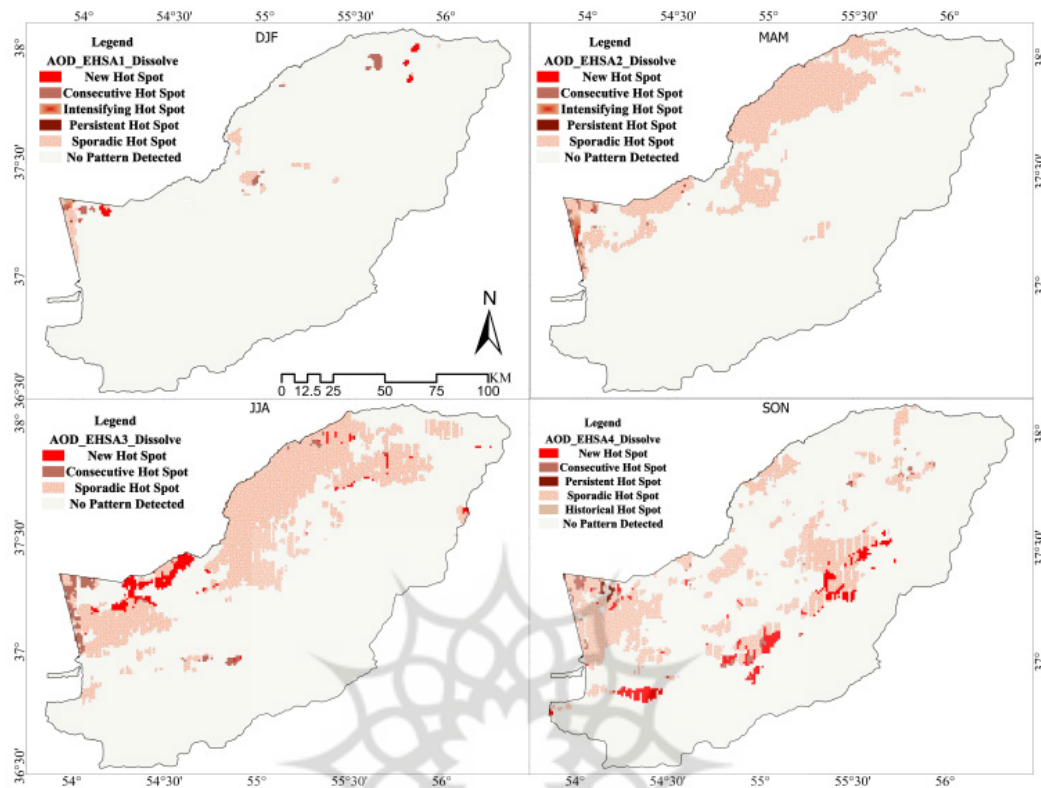
فصلی، مانند رطوبت خاک، دما و الگوهای وزش باد، به طور قابل توجهی بر AOD تأثیر دارند. زمستان با رطوبت بالا و حضور برف، کمترین فراوانی AOD بالا را دارد. بهار و تابستان، به دلیل خشکی و وزش باد، با افزایش AOD همراه هستند. پاییز به عنوان یک فصل انتقالی، ترکیبی از این اثرات را نشان می دهد. فعالیت های کشاورزی، مانند شخم زدن و برداشت، به ویژه در بهار و پاییز، به افزایش AOD در مناطق با پوشش اراضی کشاورزی کمک می کنند. مناطق ساخته شده نیز، به ویژه در پاییز (تا ۳/۹۶٪ از وسعت)، احتمالاً به دلیل فعالیت های شهری و صنعتی، نقش محدودی در تولید آئروسول ها دارند. در نهایت این بررسی نشان می دهد که زمین های بایر و اراضی کشاورزی به عنوان منابع اصلی آئروسول ها در استان گلستان عمل می کنند، به ویژه در طبقه های بالای AOD و در فصول بهار، تابستان و پاییز. پوشش های گیاهی فعال، مانند درختان، در طبقه های پایین AOD نقش کاهش دهنده دارند، اما در شرایط گردوغبار شدید، تأثیر آنها محدود است. شرایط اقلیمی فصلی و فعالیت های انسانی (مانند کشاورزی) به طور قابل توجهی بر الگوهای AOD تأثیر می گذارند.

تحلیل نقاط داغ نوظهور برای فصول مختلف

تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHSA) بر اساس داده های فراوانی وقوع AOD برای چهار فصل، به صورت مجموع روزهای هر فصل در بازه زمانی ۲۴ ساله انجام شد. هدف این بخش، مقایسه الگوهای نقاط داغ در فصول مختلف است. نتایج تحلیل ها مطابق نگاره ۵ و جدول ۶ نشان دهنده تفاوت های قابل توجه در تعداد و نوع نقاط داغ بین فصول مختلف است که می تواند به عوامل فصلی مانند الگوهای آب و هوایی، فعالیت های انسانی، یا منابع انتشار آئروسول مرتبط باشد. یافته های این بخش نشان می دهد که در فصل زمستان، از مجموع ۲۰،۴۴۴ کیلومتر مربع، تنها ۳۸۴ کیلومتر مربع به عنوان نقاط داغ شناسایی شده اند که در گروه های پراکنده ۲۳۷، پیوسته ۸۳، جدید ۴۷، شدید شونده ۱۵ و

این الگو با شرایط اقلیمی تابستان، از جمله کاهش بارندگی و افزایش تبخیر، همخوانی دارد. همچنین، حضور اندک پوشش آب (۰/۴۶٪ از وسعت در بالاترین طبقه) نشان دهنده تأثیر محدود منابع آبی در کاهش AOD در این فصل است که احتمالاً به دلیل خشک سالی های فصلی تشدید می شود. در پاییز، ترکیبی از شرایط انتقالی بین فصول مرطوب و خشک مشاهده می شود. در طبقه AOD پایین (۰-۱/۸۵۹)، پوشش درختان معادل ۱۲/۵۷٪ و بوته زار و درختچه معادل ۴/۵۲٪ از وسعت نقش مهمی دارند که نشان دهنده تأثیر پوشش گیاهی در کاهش AOD است. با افزایش طبقه AOD (۱۱/۷۷-۵/۵۷۶) و (۱۱/۷۷۳-۱/۵۸)، پوشش زمین های بایر معادل به ترتیب ۱۱/۲۷٪ و ۱۶/۶۲٪ و اراضی کشاورزی معادل ۱۱/۵۹٪ و ۳/۳۷٪ از وسعت برجسته می شوند. این الگو نشان دهنده تأثیر ترکیبی فعالیت های کشاورزی (مانند برداشت محصولات و آماده سازی زمین) و گردوغبار ناشی از زمین های بایر است. کاهش پوشش گیاهی فعال در پاییز، به ویژه در طبقه های بالای AOD، احتمالاً به دلیل پایان فصل رشد و افزایش وزش بادهای پاییزی است که ذرات معلق را به هوا منتقل می کنند.

در کل زمین های بایر در تمامی فصول، به ویژه در طبقه های بالای AOD، به عنوان منبع اصلی آئروسول ها شناسایی شدند. این پوشش به دلیل فقدان پوشش گیاهی و رطوبت کم، مستعد تولید گردوغبار است. در بهار و تابستان، این اثر با وزش بادهای فصلی و خشکی خاک احتمالاً تشدید می شود، در حالی که در پاییز، کاهش پوشش گیاهی و در زمستان، محدودیت های جوی (مانند رطوبت بالا) این اثر را تعدیل می کنند. پوشش های گیاهی فعال، به ویژه درختان و اراضی کشاورزی، در طبقه های پایین AOD نقش کاهش دهنده دارند. درختان با ایجاد مانع طبیعی و جذب ذرات و اراضی کشاورزی با حفظ رطوبت خاک، به کاهش انتشار آئروسول ها کمک می کنند. با این حال، در طبقه های بالای AOD، توانایی این پوشش ها کاهش می یابد که نشان دهنده محدودیت های آنها در برابر شرایط شدید گردوغبار است. شرایط اقلیمی



نگاره ۵: نقشه‌های توزیع فصلی نقاط داغ و سرد بر اساس تحلیل EHSAs (۲۰۰۱-۲۰۲۴)

جدول ۶: توزیع گروه‌های نقاط داغ و سرد فصلی بر اساس تحلیل EHSAs (۲۰۰۱-۲۰۲۴) بر حسب کیلومتر مربع

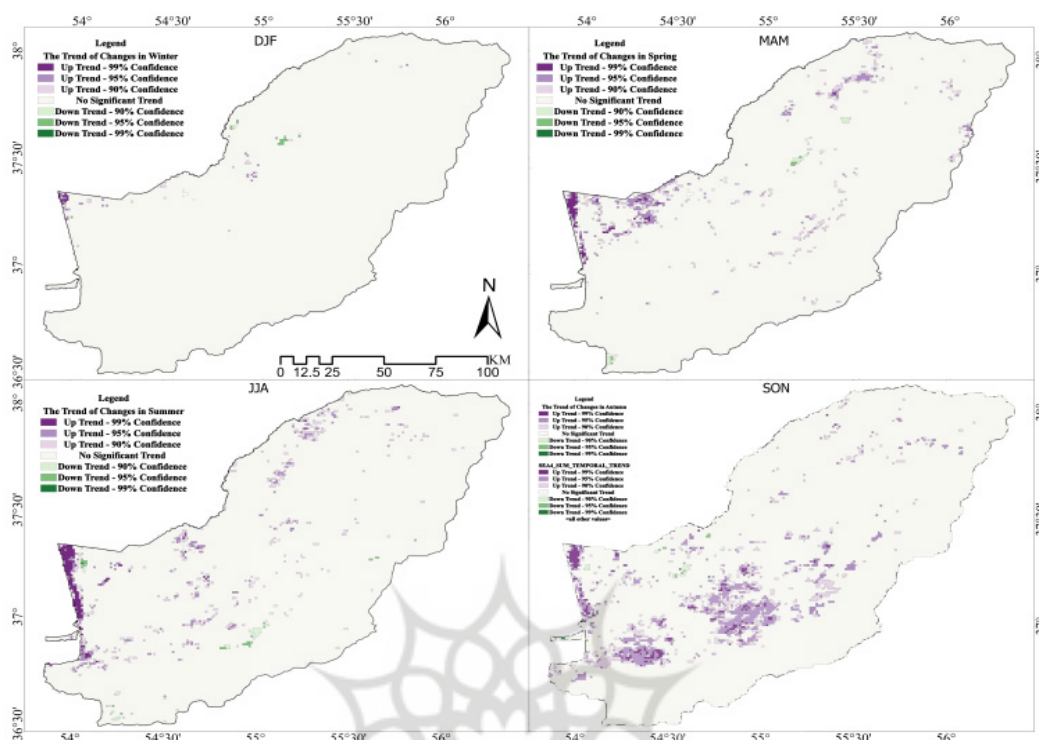
ویژگی	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
کل نقاط داغ	۳۸۴	۲۸۷۸	۴۷۸۵	۳۵۵۲
جدید (New)	۴۷	۳	۳۱۵	۴۲۸
پیوسته (Consecutive)	۸۳	۵۰	۱۹۶	۱۱۹
تشدیدشونده (Intensifying)	۱۵	۴۲	۰	۰
پایدار (Persistent)	۲	۴	۰	۲۶
کاهش‌یابنده (Diminishing)	۰	۰	۰	۰
پراکنده (Sporadic)	۲۳۷	۲۷۷۹	۴۲۷۴	۲۹۷۶
نوسانی (Oscillating)	۰	۰	۰	۰
تاریخی (Historical)	۰	۰	۰	۳
کل نقاط سرد	۰	۰	۰	۰

داده است. در فصل بهار، نقاط داغ به ۲,۸۷۸ کیلومتر مربع افزایش یافته و بیشترین مقدار در گروه پراکنده ۲,۷۷۹ کیلومتر مربع و مساحت کمتری در گروه‌های تشدید شونده ۴۲، پیوسته ۵۰، پایدار ۴ و جدید ۳ کیلومتر مربع قرار گرفته‌اند.

پایدار ۲ کیلومتر مربع توزیع شده‌اند. مساحت اندک نقاط داغ احتمالاً به کاهش فعالیت‌های انتشار آئروسول یا شرایط جوی خاص، مانند بارندگی یا پایداری جوی، مربوط می‌شود. وجود نقاط تشدید شونده شدت را در برخی مناطق افزایش

(۱۹۶ مورد) و پاییز (۱۱۹ مورد) تعداد بیشتری داشته و در بهار (۵۰ مورد) کمترین تعداد را نشان داده است که تداوم روندهای داغ را در فصول گرم‌تر نشان می‌دهد. گروه تشدید شونده تنها در زمستان (۱۵ مورد) و بهار (۴۲ مورد) مشاهده شده و افزایش شدت را در فصول سردتر یا انتقالی نشان داده است. گروه پایدار در پاییز (۲۶ مورد) بیشترین تعداد را داشته و در تابستان (۰ مورد) وجود نداشته است که پایداری روندها را در پاییز نشان می‌دهد. گروه تاریخی تنها در پاییز (۳ مورد) مشاهده شده و کاهش روندهای داغ را در برخی مناطق در سال ۲۰۲۴ نشان داده است. هیچ‌کدام از تحلیل‌ها نقاط سردی شناسایی نکرده‌اند که احتمالاً به افزایش کلی غلظت آئروسول یا محدودیت‌های تنظیمات تحلیل (مانند فاصله همسایگی نامشخص) مربوط می‌شود. در مقایسه فصلی، تابستان با ۴,۷۸۵ کیلومتر مربع نقاط داغ بیشترین مقدار و زمستان با ۳۸۴ کیلومتر مربع کمترین وسعت را داشته‌اند، در حالی که پاییز ۳,۵۵۲ کیلومتر مربع و بهار ۲,۸۷۸ کیلومتر مربع در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. این الگو شرایط مساعدتر تابستان را برای افزایش غلظت آئروسول نشان می‌دهد. در توزیع گروه‌ها، گروه پراکنده در همه فصول بیشترین مقدار را داشته و در تابستان ۴/۲۷۴ کیلومتر مربع به اوج خود رسیده و در زمستان ۲۳۷ کیلومتر مربع کمترین وسعت را نشان داده است که توزیع گسترده‌تر روندهای داغ را در فصول گرم‌تر نشان می‌دهد. گروه جدید در پاییز ۴۲۸ کیلومتر مربع و تابستان ۳۱۵ کیلومتر مربع بیشترین وسعت را داشته و ظهور روندهای داغ اخیر را در این فصول نشان داده است، در حالی که بهار ۳ کیلومتر مربع کمترین وسعت را نشان می‌دهد. گروه پیوسته در تابستان ۱۹۶ کیلومتر مربع و پاییز ۱۱۹ کیلومتر مربع وسعت بیشتری داشته و در بهار ۵۰ کیلومتر مربع کمترین وسعت را نشان داده است که تداوم روندهای داغ را در فصول گرم‌تر نشان می‌دهد. گروه تشدید شونده تنها در زمستان ۱۵ کیلومتر مربع و بهار ۴۲ کیلومتر مربع مشاهده شده و افزایش شدت را در فصول سردتر یا انتقالی نشان داده است. گروه پایدار

افزایش قابل توجه نقاط داغ در بهار فعالیت منابع آئروسول را نشان می‌دهد، در حالی که مساحت اندک نقاط جدید پایداری روندهای نقاط داغ از زمستان را نشان می‌دهد. در فصل تابستان، نقاط داغ به ۴,۷۸۵ کیلومتر مربع که بیشترین مقدار است رسیده و بیشترین مقدار در گروه پراکنده ۴,۲۷۴ کیلومتر مربع و تعداد قابل توجهی در گروه‌های جدید ۳۱۵ و پیوسته ۱۹۶ کیلومتر مربع قرار گرفته‌اند. مساحت بالای نقاط داغ احتمالاً به شرایط جوی تابستانی (مانند دمای بالا و پایداری جوی) یا افزایش فعالیت‌های انسانی (مانند کشاورزی یا حمل‌ونقل) مربوط می‌شود و نبود نقاط تشدید شونده و پایدار روندهای کوتاه‌مدت یا پراکنده را نشان می‌دهد. در فصل پاییز، نقاط داغ به ۳,۵۵۲ کیلومتر مربع رسیده و بیشترین مقدار در گروه پراکنده ۲,۹۷۶ کیلومتر مربع و تعداد قابل توجهی در گروه‌های جدید ۴۲۸، پیوسته ۱۱۹، پایدار ۲۶ و تاریخی ۳ کیلومتر مربع قرار گرفته‌اند. در مجموع متوسط نقاط داغ تعادل بین فعالیت‌های فصلی و شرایط جوی را نشان می‌دهد و حضور نقاط تاریخی (برای اولین بار در تحلیل‌ها) مناطقی را نشان می‌دهد که در گذشته نقاط داغ بوده اما در سال ۲۰۲۴ داغ نیستند و احتمالاً به تغییرات فصلی یا کاهش انتشارات مربوط می‌شود. در مقایسه فصلی، تابستان با ۴,۷۸۵ نقطه داغ بیشترین و زمستان با ۳۸۴ نقطه کمترین تعداد را داشته‌اند، در حالی که پاییز (۳,۵۵۲ نقطه) و بهار (۲,۸۷۸ نقطه) در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. این الگو شرایط مساعدتر تابستان را برای افزایش غلظت آئروسول نشان می‌دهد. در توزیع گروه‌ها، گروه پراکنده در همه فصول بیشترین تعداد را داشته و در تابستان (۴,۲۷۴ مورد) به اوج خود رسیده و در زمستان (۲۳۷ مورد) کمترین تعداد را نشان داده است که توزیع گسترده‌تر روندهای داغ را در فصول گرم‌تر نشان می‌دهد. گروه جدید در پاییز (۴۲۸ مورد) و تابستان (۳۱۵ مورد) بیشترین تعداد را داشته و ظهور روندهای داغ اخیر را در این فصول نشان داده است، در حالی که بهار (۳ مورد) کمترین تعداد را نشان می‌دهد. گروه پیوسته در تابستان



نگاره ۶: نقشه‌های روندهای تغییرات AOD بر اساس تحلیل من-کندال در فصول مختلف (۲۰۰۱-۲۰۲۴)

اطمینان (۱) BIN= معادل ۹۰٪، BIN= معادل ۹۵٪، BIN=۳ معادل ۹۹٪ و همین حالت برای مقادیر منفی) و همراه با مساحت تحت پوشش هر روند را نشان می‌دهد. در فصل زمستان، ۹۹/۵۵٪ از مساحت استان (معادل ۲۰۳۵۱ کیلومترمربع) فاقد روند معنی‌دار است که ثبات نسبی در مقادیر AOD را نشان می‌دهد. باین‌حال، روندهای کاهشی و افزایشی محدودی مشاهده شده است. روند کاهشی معنی‌دار با اطمینان ۹۵٪ در مساحتی به میزان ۱۷ کیلومترمربع (۰/۰۸٪) و روند افزایشی معنی‌دار با اطمینان ۹۵٪ در مساحتی به میزان ۲۹ کیلومترمربع (۰/۱۴٪) ثبت شده است. پراکنش این تغییرات در نقشه نشان می‌دهد که روندهای کاهشی و افزایشی عمدتاً در نواحی غربی و شمال غربی استان با جهت‌گیری شمال متمرکز شده‌اند که احتمالاً تحت تأثیر عوامل محلی مانند نوسانات سطح خزر یا تغییرات اقلیمی قرار گرفته‌اند. در فصل بهار، ۹۶/۰۲٪ از مساحت استان (۱۹۶۳۱ کیلومترمربع) فاقد روند معنی‌دار است. باین‌وجود،

در پاییز ۲۶ کیلومتر مربع بیشترین وسعت را داشته و در تابستان مشاهده نمی‌شود که پایداری روندها را در پاییز نشان می‌دهد. گروه تاریخی تنها در پاییز ۳ کیلومتر مربع مشاهده شده و کاهش روندهای داغ را در برخی مناطق در بازه سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۲۴ نشان داده است. هیچ‌کدام از تحلیل‌ها نقاط سردی شناسایی نکرده‌اند که احتمالاً به افزایش کلی غلظت آئروسول یا محدودیت‌های تنظیمات تحلیل مانند فاصله همسایگی نامشخص مربوط می‌شود.

بررسی روند تغییرات عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان

بررسی روند تغییرات AOD در استان گلستان طی دوره سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، الگوهای متفاوتی را در تغییرات زمانی و مکانی برای چهار فصل سال نشان می‌دهد. نگاره ۶ و جدول ۷ نتایج حاصل از تحلیل آماری، شامل سطح معنی‌داری (p-value)، دسته‌بندی روندها (BIN) با سطوح

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)

بررسی تغییرات فصلی و مکانی عمق نوری آتروسل (AOD) در استان گلستان ... / ۱۳۷

حاشیه خزر دیده می شود که ممکن است با تغییرات فصلی در الگوهای جوی یا فعالیتهای کشاورزی پس از برداشت محصول مرتبط باشند. روندهای کاهشی در این فصل تنها ۰/۲۸٪ از مساحت را در بر گرفته اند.

جدول ۷: توزیع آماری روندهای تغییرات AOD بر اساس تحلیل من-کندال در فصول مختلف (۲۰۰۱-۲۰۲۴)

فصل ها	p-value	TREND_BIN	مساحت	مساحت٪
زمستان	۰/۰۱	-۳	۰	۰
	۰/۰۵	-۲	۱۷	۰/۰۸
	۰/۱	-۱	۱۲	۰/۰۶
	۰	۰	۲۰۳۵۱	۹۹/۵۵
	۰/۱	۱	۲۰	۰/۱
	۰/۰۵	۲	۲۹	۰/۱۴
	۰/۱	۳	۱۵	۰/۰۷
بهار	۰/۰۱	-۳	۰	۰
	۰/۰۵	-۲	۱۰	۰/۰۵
	۰/۱	-۱	۵۸	۰/۲۸
	۰	۰	۱۹۶۳۱	۹۶/۰۲
	۰/۱	۱	۳۹۴	۱/۹۳
	۰/۰۵	۲	۲۶۱	۱/۲۸
	۰/۱	۳	۹۰	۰/۴۴
تابستان	۰/۰۱	-۳	۱	۰
	۰/۰۵	-۲	۳۰	۰/۱۵
	۰/۱	-۱	۷۱	۰/۳۵
	۰	۰	۱۹۵۶۸	۹۵/۷۲
	۰/۱	۱	۳۸۸	۱/۹۰
	۰/۰۵	۲	۲۱۳	۱/۰۴
	۰/۱	۳	۱۷۳	۰/۸۵
پاییز	۰/۰۱	-۳	۴	۰/۰۲
	۰/۰۵	-۲	۱۴	۰/۰۷
	۰/۱	-۱	۳۹	۰/۱۹
	۰	۰	۱۸۵۶۲	۹۰/۷۹
	۰/۱	۱	۷۰۶	۳/۴۵
	۰/۰۵	۲	۸۹۶	۴/۳۸
	۰/۱	۳	۲۲۳	۱/۰۹

روندهای افزایشی نسبت به زمستان بیشتر شده اند. به طور خاص، ۳۹۴ کیلومتر مربع (۱/۹۳٪) دارای روند افزایشی با اطمینان ۹۰٪ و ۲۶۱ کیلومتر مربع (۱/۲۸٪) دارای روند افزایشی با اطمینان ۹۵٪ گزارش شده است. پراکنش این روندها در نقشه مربوطه نشان می دهد که افزایش ها عمدتاً در نواحی شمال غربی، مرکزی و شرقی استان توزیع شده اند که ممکن است با فعالیتهای کشاورزی یا تغییرات فصلی و نوسانات سطح خزر مرتبط باشند. روندهای کاهشی در این فصل محدود بوده و تنها ۰/۳۳٪ از مساحت را در بر گرفته اند. در فصل تابستان، ۹۵/۷۲٪ از مساحت (۱۹۵۶۸ کیلومتر مربع) فاقد روند معنی دار است. روندهای افزایشی در این فصل نیز قابل توجه بوده اند، به طوری که ۳۸۸ کیلومتر مربع (۱/۹۰٪) دارای روند افزایشی با اطمینان ۹۰٪، ۲۱۳ کیلومتر مربع (۱/۰۴٪) با اطمینان ۹۵٪ و ۱۷۳ کیلومتر مربع (۰/۸۵٪) با اطمینان ۹۹٪ ثبت شده است. پراکنش این تغییرات در نقشه نشان می دهد که روندهای افزایشی به ویژه در نواحی شمالی و مرکزی استان و همچنین ساحل شرقی خزر با جهت گیری شمال متمرکز شده اند که احتمالاً به دلیل شرایط خشک تابستانی، افزایش گردوغبار یا فعالیتهای انسانی و کاهش فصلی خزر رخ داده اند. از طرف دیگر بخش هایی از دامنه های البرز به خصوص در نواحی حاشیه جنگلی و همچنین به صورت خیلی پراکنده در شمال غرب روند کاهشی دیده می شود. در کل روندهای کاهشی در این فصل کمتر از ۰/۵٪ از مساحت را شامل شده اند. فصل پاییز بیشترین تنوع در روندهای معنی دار را نشان می دهد. تنها ۹۰/۷۹٪ از مساحت (۱۸۵۶۲ کیلومتر مربع) فاقد روند معنی دار است که کمترین مقدار در میان فصول محسوب می شود. روندهای افزایشی در این فصل برجسته تر شده اند، به طوری که ۷۰۶ کیلومتر مربع (۳/۴۵٪) دارای روند افزایشی با اطمینان ۹۰٪، ۸۹۶ کیلومتر مربع (۴/۳۸٪) با اطمینان ۹۵٪ و ۲۲۳ کیلومتر مربع (۱/۰۹٪) با اطمینان ۹۹٪ گزارش شده است. پراکنش این روندها در نقشه مربوطه حاکی از آن است که افزایش ها به ویژه در نواحی مرکزی و غربی و همچنین

در کل بررسی روند تغییرات AOD در استان گلستان طی دوره مورد مطالعه حاکی از آن است که بخش عمده مساحت استان در تمامی فصول فاقد روند معنی دار است که بیانگر ثبات نسبی هست، با این وجود در زمستان روندهای کاهشی و افزایشی عمدتاً در نواحی غربی و شمال غربی متمرکز شده اند، در بهار روندهای افزایشی در نواحی شمال غربی، مرکزی و شرقی پراکنده شده اند، در تابستان روندهای افزایشی در نواحی شمالی، مرکزی و ساحل شرقی خزر دیده می شوند، در حالی که روندهای کاهشی در دامنه های البرز، حاشیه جنگلی و به صورت پراکنده در شمال غرب رخ داده اند و در پاییز روندهای افزایشی برجسته تر در نواحی مرکزی، غربی و حاشیه خزر مشاهده شده اند.

بحث و نتیجه گیری

تحلیل تغییرات فصلی و مکانی عمق نوری آئروسول (AOD) در استان گلستان طی دوره سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان دهنده الگوهای مشخصی در توزیع و شدت رویدادهای گردوغبار است که با عوامل اقلیمی، پوشش زمین و فعالیت های انسانی ارتباط نزدیکی دارد. نتایج مطالعه نشان داد که فصل تابستان با بیشترین فراوانی و شدت وقوع رویدادهای گردوغبار (تا ۵۲۳ روز با $AOD > 0.5$) به عنوان بحرانی ترین فصل شناخته می شود. این یافته با مطالعات پیشین در مناطق خشک و نیمه خشک مانند خاورمیانه و آسیای مرکزی همخوانی دارد (Rashki et al., 2021; Alizadeh-Choobari et al., 2014). این امر به شرایط اقلیمی تابستان، از جمله دمای بالا، کاهش رطوبت خاک و وزش بادهای محلی نسبت داده می شود که با افزایش فرسایش بادی در اراضی بایر و کاهش پوشش گیاهی همراه است (Yousefi et al., 2020; Gholami et al., 2021). در مقابل، فصل زمستان با کمترین فراوانی رویدادهای گردوغبار (تنها ۲/۳۸٪ از مساحت با بیش از ۱/۹۳۳ روز) به دلیل رطوبت بالای خاک، بارندگی و کاهش فعالیت بادهای خشک، پایداری جوی بیشتری را نشان می دهد (Yousefi Kebriya et al., 2025).

ارتباط معنادار بین پوشش زمین و فراوانی AOD از دیگر یافته های کلیدی این مطالعه است. اراضی بایر، به ویژه در فصول بهار و تابستان، به عنوان منابع اصلی تولید آئروسول ها شناسایی شدند (تا ۴۸/۸۵٪ از مساحت در تابستان). این نتیجه با مطالعات قبلی در مورد نقش زمین های بایر در انتشار گردوغبار هم راستا هست (Ginoux et al., 2012; Prospero et al., 2002). این اراضی به دلیل فقدان پوشش گیاهی و رطوبت کم، مستعد فرسایش بادی هستند، به ویژه در نواحی شمالی و شمال شرقی گلستان که با بیابان های ترکمنستان هم مرز هستند (Indoitu et al., 2012; Papi et al., 2022). در مقابل، پوشش های گیاهی فعال مانند جنگل های هیرکانی و اراضی کشاورزی در طبقه های پایین AOD نقش کاهشی دارند، اما در شرایط گردوغبار شدید ($AOD > 0.5$)، توانایی آنها در مهار آئروسول ها کاهش می یابد (Miri et al., 2021). این یافته با مطالعات دیگر در مورد تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش انتشار گردوغبار همخوانی دارد (Salajegheh et al., 2024; Rahdari et al., 2025). تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHSA) نشان داد که تابستان با ۴۷۸۵ کیلومتر مربع بیشترین مساحت نقاط داغ را دارد که عمدتاً در گروه پراکنده (۴۲۷۴ کیلومتر مربع) قرار دارند. این الگو نشان دهنده توزیع گسترده تر رویدادهای گردوغبار در فصول گرم است که با شرایط اقلیمی خشک و فعالیت های انسانی مانند کشاورزی و شخم زدن خاک مرتبط است (Gholami et al., 2020; Esmaili et al., 2023). در مقابل، زمستان با ۳۸۴ کیلومتر مربع کمترین مساحت نقاط داغ را دارد که نشان دهنده تأثیر عوامل جوی مانند بارندگی و رطوبت بالا در کاهش انتشار آئروسول ها هست (Hamzeh et al., 2021). ظهور نقاط داغ جدید در پاییز (۴۲۸ کیلومتر مربع) و تابستان (۳۱۵ کیلومتر مربع) نیز حاکی از پویایی منابع گردوغبار در این فصول است که ممکن است به تغییرات کاربری اراضی و کاهش سطح آب دریای خزر مرتبط باشد (Papi et al., 2022; Afzalizadeh et al., 2025). زمانی با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد که بخش عمده مساحت گلستان (بیش از ۹۰٪ در تمامی فصول) فاقد

سنجش‌ازدور و مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند به شناسایی زودهنگام نقاط داغ نوظهور و کاهش اثرات گردوغبار کمک کند.

تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

References

- 1- Afzalizadeh, M., Nadoushan, M. A., Jalalian, A., & Chamani, A. (2025). Dust source dynamics in arid Iran: Examining the relationship between MODIS AOD and land surface characteristics in a dried catchment. *Advances in Space Research*, 75(4), 3326/3334.
- 2- Ahmadi, M., Shakiba, A. R. and Dadashi Roudbari, A. A. (2019). Investigating the role of vegetation indices and geographic components on seasonal aerosol optical depth over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(1), 211-233. doi: 10.22059/jesphys.2018.260582.1007019
- 3- Al-Hemoud, A., Al-Dashti, H., Al-Saleh, A., Petrov, P., Malek, M., Elhamoud, E., ... & Middleton, N. (2022). Dust storm 'hot spots' and transport pathways affecting the Arabian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 238, 105932.
- 4- Alizadeh-Choozari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric Research*, 143, 328/341.
- 5- Al-Taei, A. I., Alesheikh, A. A., & Boloorani, A. D. (2024). Evaluating the effects of land use/land cover change on the emergence of hazardous dust sources in the Tigris-Euphrates Basin. *Spatial Information Research*, 32(5), 569/582.
- 6- An, L., Che, H., Xue, M., Zhang, T., Wang, H., Wang, Y., ... & Sun, M. (2020). Temporal and spatial variations in sand and dust storm events in East Asia from 2007 to 2016: Relationships with wind regimes and vegetation cover. *Atmospheric Environment*, 229, 117473.
- 7- Beyranvand, A., Azizi, G. and Alizadeh, O. (2024). The Role of Summer and Winter Shamal Winds in the Occurrence of Dust Storms in Western Iran. *Physical Geography Research*, 56(4), 1-19. doi: 10.22059/jphgr.2025.372219.1007809
- 8- Boloorani, A. D., Najafi, M. S., Soleimani, M., Papi, R., & Torabi, O. (2022). Influence of Hamoun Lakes' dry

روند معنی‌دار در تغییرات AOD است که بیانگر ثبات نسبی در بلندمدت است. با این حال، روندهای افزایشی در پاییز (تا ۴/۳۸٪ با اطمینان ۹۵٪) و تابستان (تا ۱/۹٪ با اطمینان ۹۰٪) برجسته‌تر هستند و عمدتاً در نواحی مرکزی، غربی و حاشیه خزر مشاهده می‌شوند. این روندها می‌توانند به تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی و فعالیت‌های کشاورزی پس از برداشت محصول نسبت داده شوند (Alizadeh-Choozari *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2015). روندهای کاهشی محدود (کمتر از ۰/۵٪ در تابستان) در نواحی حاشیه جنگلی البرز مشاهده شدند که احتمالاً به تأثیر مثبت پوشش گیاهی و مدیریت بهتر اراضی مرتبط است (Yousefi Kebriya *et al.*, 2025).

این مطالعه نشان داد که الگوهای فصلی و مکانی AOD در استان گلستان به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر پوشش زمین، شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار دارند. تابستان به‌عنوان بحرانی‌ترین فصل از نظر فراوانی و شدت گردوغبار شناخته شد، در حالی که زمستان کمترین فعالیت را نشان داد. اراضی بایر به‌عنوان منابع اصلی انتشار آئروسول‌ها، به‌ویژه در فصول گرم، شناسایی شدند، در حالی که پوشش‌های گیاهی مانند جنگل‌ها و اراضی کشاورزی در کاهش AOD در شرایط غیر بحرانی مؤثر هستند. تحلیل نقاط داغ نوظهور نشان‌دهنده توزیع گسترده‌تر نقاط داغ در تابستان و ظهور نقاط جدید در پاییز است که با تغییرات کاربری اراضی و کاهش سطح آب دریای خزر همخوانی دارد. روندهای زمانی نیز حاکی از ثبات نسبی در بیشتر مناطق است، با افزایش‌های معنی‌دار در پاییز و تابستان که نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی است. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به بهبود مدیریت منابع طبیعی، کاهش اثرات بهداشتی و اقتصادی طوفان‌های گردوغبار و توسعه استراتژی‌های پایدار در استان گلستان کمک کنند. پیشنهاد می‌شود اقدامات حفاظتی مانند احیای پوشش گیاهی، مدیریت پایدار اراضی کشاورزی و کنترل فرسایش بادی در نواحی بایر شمالی و شمال شرقی گلستان در اولویت قرار گیرند. همچنین، پایش مستمر با استفاده از فناوری‌های

- 19- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3), RG3005.
- 20- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18/27. <https://doi.org/10/1016/j.rse.2017/06.031>
- 21- Goudarzi, G., Daryanoosh, S. M., Godini, H., Hopke, P. K., Sicard, P., & De Marco, A. (2019). Health risk assessment of exposure to the Middle-Eastern dust storms in the Iranian megacity of Kermanshah. *Public Health*, 166, 162/170.
- 22- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204/1-4, 182/196. [https://doi.org/10/1016/S0022/1694\(97/00125-X](https://doi.org/10/1016/S0022/1694(97/00125-X)
- 23- Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., & Mohammadpour, K. (2021). Long-term trends of dust events and their relationship with drought in Southwest Iran. *Atmosphere*, 12/10, 1350. <https://doi.org/10/3390/atmos12101350>
- 24- Hsu, N. C., Jeong, M. J., Bettenhausen, C., Sayer, A. M., Hansell, R., & Seftor, C. S. (2013). Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118/16, 9296/9315. <https://doi.org/10/1002/jgrd.50705>
- 25- Huang, J., Wang, T., Wang, W., Li, Z., & Yan, H. (2014). Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119/24, 11398/11416.
- 26- Indoitu, R., Orlovsky, L., & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85, 62/70.
- 27- Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419/6903, 215/223.
- 28- Khaniabadi, Y. O., Daryanoosh, S. M., Amrane, A., Polosa, R., Hopke, P. K., Goudarzi, G., ... & Armin, H. (2017). Impact of Middle Eastern Dust storms on human health. *Atmospheric Pollution Research*, 8/4, 606/613.
- 29- Koren, I., Kaufman, Y. J., & Remer, L. A. (2004). Aerosol effect on cloud droplet size and radiative forcing. conditions on dust emission and radiative forcing over Sistan plain, Iran. *Atmospheric Research*, 72, 106/152.
- 9- Cao, H., Amiraslani, F., Liu, J., & Zhou, N. (2015). Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets and development of its database. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187/3, 1/14.
- 10- Che, H., Zhang, X., Wang, Y., Zhang, L., Xing, J., & Wang, H. (2019). Aerosol optical properties and their impacts on radiative forcing in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Atmospheric Environment*, 212, 225/235.
- 11- Darvishi Bolorani, A., Papi, R., Soleimani, M., & Najafi, M. S. (2021). Dust source susceptibility mapping in Tigris and Euphrates basin using remote sensing and machine learning techniques. *Remote Sensing*, 13/15, 2973.
- 12- Esmaili, O., Tajrishy, M., & Ardestani, M. (2023). Impact of dust storms on agricultural productivity in the Middle East. *Environmental Science and Pollution Research*, 30/12, 34567/34578.
- 13- Filonchyk, M., Yan, H., & Peterson, B. (2020). Analysis of aerosol characteristics and their temporal variations in Central Asia using MODIS data. *Atmosphere*, 11/4, 411. <https://doi.org/10/3390/atmos11040411>
- 14- Gan, Y., Zhang, Z., Liu, F., Chen, Z., Guo, Q., Zhu, Z., & Ren, Y. (2024). Analysis of characteristics and changes in three-dimensional spatial and temporal distribution of aerosol types in Central Asia. *Science of The Total Environment*, 927, 172/196.
- 15- Ghanghermeh, A., Roshan, G., Asadi, K., & Attia, S. (2024). Spatiotemporal analysis of urban heat islands and vegetation cover using emerging hotspot analysis in a humid subtropical climate. *Atmosphere*, 15/2, 161.
- 16- Gherboudj, I., Beegum, S. N., & Ghedira, H. (2017). Identifying natural dust source regions over the Middle-East and North-Africa: Estimation of dust emission potential. *Earth-Science Reviews*, 165, 342/355.
- 17- Gholami, H., Mohammadifar, A., & Collins, A. L. (2021). Spatial mapping of the provenance of storm dust in the Middle East using remote sensing and machine learning techniques. *Atmospheric Research*, 249, 105307.
- 18- Gholami, H., Rahimi, S., & Collins, A. L. (2020). Mapping the sources of dust storms in the Middle East using remote sensing and meteorological data. *Science of The Total Environment*, 707, 135628.

and Artificial Intelligence for Earth Observation (pp. 195/212). Elsevier.

41- Rahmati, O., Mohammadi, F., & Fathabadi, A. (2020). Identification of dust sources in Iran using remote sensing and meteorological data. *Atmospheric Environment*, 241, 117845. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117845>

42- Rahnama, M. , Noori, F. , Sehat Kashani, S. and Khoddam, N. (2025). Monitoring and zoning of long-term variation of the DSI in the eastern half of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(44), 19-36. doi: 10.22111/jneh.2025.48604.2040

43- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Sepehr, A., & Arjmand, M. (2021). Dynamics of dust storms in the Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics, and affected areas. *Aeolian Research*, 49, 100662. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021/100662>

44- Rashki, A., Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2017). Dust storms in the Middle East: Sources, transport, and impacts. *Aeolian Research*, 27, 103/113.

45- Remer, L. A., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., ... & Holben, B. N. (2005). The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4), 947/973. <https://doi.org/10.1175/JAS3385/1>

46- Rupakheti, D., Kang, S., Bilal, M., Gong, J., Xia, X., & Cong, Z. (2019). Aerosol optical depth climatology over Central Asian countries based on Aqua-MODIS Collection 6/1 data: Aerosol variations and sources. *Atmospheric Environment*, 207, 205/214. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019/03.033>

47- Salajegheh, S., Eskandari Damaneh, H., & Eskandari Damaneh, H. (2024). Examining the Spatial and Temporal Relationships among Aerosol Optical Depth, Soil Moisture, and Wind Speed from 2000 to 2024, (Case Study: Western Iran). *Desert*, 29(2), 314/326.

48- Salustro, C. E., Hsu, N. C., & Jeong, M. (2009). Validation of MODIS Deep Blue aerosol products over bright surfaces. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2009, pp. A11C-0114).

49- Sayer, A. M., Munchak, L. A., Hsu, N. C., Levy, R. C., Bettenhausen, C., & Jeong, M.-J. (2014). MODIS Collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's C006 Deep Blue and Dark Target algorithms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(21), 12131/12147. <https://doi.org/10.1002/2014JD022297>

Science, 303/5662), 1342/1345.

30- Kumar, A., Patil, R., & Dikshit, A. K. (2023). Monitoring land use and land cover changes using Google Earth Engine and machine learning algorithms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 1/18.

31- Li, L., & Sokolik, I. N. (2018). Analysis of dust aerosol retrievals using satellite data in Central Asia. *Atmosphere*, 9(8), 288.

32- Liu, G., Yin, G., Kurban, A., Aishan, T., & You, H. (2016). Spatiotemporal dynamics of land cover and their impacts on potential dust source regions in the Tarim Basin, NW China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1/12.

33- MalAmiri, N., Rashki, A., Al-Dousari, A., & Kaskaoutis, D. G. (2025). Socioeconomic and Health Impacts of Dust Storms in Southwest Iran. *Atmosphere*, 16(2), 159.

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

35- Miri, A., Maleki, S., & Middleton, N. (2021). An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. *Science of the Total Environment*, 757, 143952.

36- Namdari, S., Valizadeh Kamran, K., & Sorooshian, A. (2021). Analysis of some factors related to dust storms occurrence in the Sistan region. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 45450/45458.

37- Nobakht, M., Shahgedanova, M., & White, K. (2021). Aeolian dust emission, transport, and deposition in the Middle East. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094013.

38- Papi, R., Attarchi, S., Darvishi Boloorani, A., & Neysani Samany, N. (2022). Characterization of hydrologic sand and dust storm sources in the Middle East. *Sustainability*, 14(22).

39- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 2/1–2/31.

40- Rahdari, M. R., Kharazmi, R., & Caballero-Calvo, A. (2025). Monitoring of land cover changes and dust events over the last 2 decades using Google Earth Engine: Hamoun wetland, Iran. In *Google Earth Engine*

meteorological effects. Remote Sensing, 15/4), 905.

- 58- Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., & Sun, Z. (2025). Assessment of some environmental stresses in the Shadegan wetland: Analysis of satellite data, water quality indicators, and dust storm pathways. Iranica Journal of Energy & Environment, 16/2), 372/388.
- 59- Zhou, Y., Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Shi, Y., & Wang, C. (2020). Dust aerosol retrieval over the oceans with the MODIS/VIIRS Dark-Target algorithm: 1. Dust detection. Earth and Space Science, 7/10), e2020EA001221.
- 60- Zucca, C., Fleiner, R., Bonaiuti, E., & Kang, U. (2022). Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms. Catena, 219, 106575.

- 50- Shen, H., Abuduwaili, J., Samat, A., & Ma, L. (2016). A review on the research of modern aeolian dust in Central Asia. Journal of Geographical Sciences, 26/6), 775/786.

- 51- Sokolik, I. N., Shiklomanov, A. I., Xi, X., de Beurs, K. M., & Tatarskii, V. V. (2020). Quantifying the anthropogenic signature in drylands of Central Asia and its impact on water scarcity and dust emissions. Landscape Dynamics of Drylands Across Greater Central Asia: People, Societies and Ecosystems, 49/69.

- 52- Sternberg, T., & Edwards, M. (2017). Desert dust and health: A Central Asian review and steppe case study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 14/11), 1342.

- 53- 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 spectroradiometer (MODIS). Environmental Monitoring and Assessment, 192, 1/15.

- 54- Wei, J., Li, Z., Peng, Y., & Sun, L. (2021). MODIS Collection 6/1 aerosol optical depth products over land and ocean: Validation and comparison. Atmospheric Environment, 244, 117904.

- 55- Xi, X., & Sokolik, I. N. (2015). Dust interannual variability and trend in Central Asia from 2000 to 2014 in MODIS and MISR aerosol products. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120/23), 12131/12147.

- 56- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., & Shaheen, A. (2020). Long-term aerosol optical depth trend over Iran and identification of dominant aerosol types. Science of the Total Environment, 722, 137906.

- 57- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A., & Kaskaoutis, D. G. (2023). Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)

