






## Spatiotemporal Analysis of the Impact of Dust Storms on Thermal Stress and the Health of Oak Forests in Ilam Province Using Remote Sensing Data

Mahin Hedayaty Zadeh  <sup>1</sup> | Mohammad Saligheh  <sup>2</sup> | Zahra Hejazizadeh  <sup>2</sup>  
Parviza Zeaiean  <sup>2</sup> | Mehry Akbary  <sup>3</sup>

1. PhD Student in Climatology at Kharazmi University
2. Professor in the Department of Physical Geography, Kharazmi University
3. Associate Professor in the Department of Physical Geography, Kharazmi University, Tehran

### Article Info:

**Article type:**  
Research Article

**Date:**

**Received:** 2024.11.07

**Received:** 2024.12.21

**Accepted:** 2024.12.29

### Keywords:

(AOD), (VCI), (TCI),  
Oak forests, Ilam  
Province

**Abstract:** Dust storms are among the most significant environmental hazards in western Iran, exerting considerable impacts on natural ecosystems, particularly the Zagros oak forests. This study aims to investigate the spatiotemporal variations of dust and analyze its effects on the vegetation condition of oak forests in Ilam Province during the period 2005–2020. For this purpose, Aerosol Optical Depth (AOD) was used as an indicator of dust intensity, while the Vegetation Condition Index (VCI) and Temperature Condition Index (TCI) were applied to assess vegetation status and thermal conditions, respectively. MODIS satellite data and Sentinel-2 imagery were processed within the Google Earth Engine platform. Temporal trends of dust were analyzed using the non-parametric Kendall's Tau test, and spatial correlation analysis between AOD and vegetation indices was conducted in the ArcGIS environment. The results indicated that AOD values exhibited interannual variability and increasing trends during certain periods. Spatial correlation between AOD and VCI was negative and statistically significant across large parts of the oak forests, particularly in the southern and southwestern areas of the province, indicating a decline in vegetation condition concurrent with increased dust levels. Moreover, the correlation between AOD and TCI revealed intensified thermal stress under high dust concentrations. The sensitivity map showed that southern areas were most affected, while northern highlands experienced the lowest impact.

**Cite this article:** Hedayaty Zadeh, M, Saligheh, M, Saligheh, M, Hejazizadeh, Z, Zeaiean, P , Akbary, M . (2024). Spatiotemporal Analysis of the Impact of Dust Storms on Thermal Stress and the Health of Oak Forests in Ilam Province Using Remote Sensing Data. *Climat Change and Climat Disasters*, 3(6), 288-310.

© The Author(s).

**Homepage:** [cccd.znu.ac.ir](http://cccd.znu.ac.ir)

**Publisher:** University of Zanjan



## Extended Abstract

Dust storms are among the most critical environmental hazards affecting arid and semi-arid regions, particularly in western Iran, where increasing dust activity has raised serious concerns about ecosystem stability. The Zagros oak forests (*Quercus brantii*), which constitute a major portion of Iran's forest resources, are highly sensitive to atmospheric dust deposition due to their ecological characteristics and extensive leaf surface area. In recent decades, intensified dust events, coupled with drought and rising temperatures, have contributed to the decline of these forests. Accordingly, this study aimed to investigate the spatiotemporal variability of dust activity and to assess its impact on vegetation health and thermal stress in oak forests of Ilam Province during the period 2005–2020.

Aerosol Optical Depth (AOD) derived from MODIS satellite products was employed as an indicator of dust concentration. To evaluate vegetation condition and

thermal stress, the Vegetation Condition Index (VCI) and Temperature Condition Index (TCI) were calculated. The spatial distribution of oak forests was delineated using Sentinel-2 Level-2A imagery and applied as a reference layer to restrict the analyses to oak-dominated areas. All satellite data processing and index generation were conducted within the Google Earth Engine platform. Temporal trends of AOD were examined using Kendall's Tau non-parametric test, while pixel-based spatial correlation analyses between AOD and vegetation indices were performed in ArcGIS after spatial standardization of raster datasets. Additionally, a dust impact sensitivity map was produced to classify areas according to their level of vulnerability.

The results revealed considerable interannual variability in AOD values across Ilam Province, with periods of intensified dust activity during the study interval. Spatial correlation analysis demonstrated predominantly negative and statistically meaningful

relationships between AOD and VCI across large portions of the oak forests, particularly in the southern and southwestern parts of the province. This pattern indicates that increased dust loading is associated with reduced vegetation vigor. Likewise, the relationship between AOD and TCI suggested that higher dust concentrations contribute to intensified thermal stress in vegetation. The sensitivity map highlighted clear spatial heterogeneity: southern and southwestern areas exhibited the highest levels of vulnerability, whereas northern mountainous regions showed relatively low sensitivity.

Lagged correlation analysis further indicated that vegetation response to dust exposure is time-dependent and non-linear. While the impact of dust on thermal conditions (TCI) appeared

more immediate and short-term, the response of vegetation condition (VCI) showed both concurrent and delayed effects, suggesting cumulative ecological impacts over time.

Overall, the findings identify dust storms as a significant, spatially variable environmental stressor affecting the sustainability of Zagros oak forests in Ilam Province. The study emphasizes that dust impacts operate through both direct reductions in vegetation health and the intensification of thermal stress. Integrating dust-related risk assessments into forest management strategies and regional environmental planning is therefore essential to enhance ecosystem resilience and ensure the long-term stability of oak forest landscapes in western Iran.

**Keywords:** (AOD), (VCI), (TCI), Oak forests, Ilam Province



دانشگاه زون

## تحلیل زمانی- مکانی اثر گردوغبار بر تنش حرارتی و سلامت جنگل‌های بلوط استان

### ایلام با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور

مهین هدایتی زاده<sup>۱</sup> ✉ | محمد سلیقه<sup>۲</sup> | زهرا حجازی زاده<sup>۲</sup> | پرویز ضیائیان<sup>۲</sup> | امهری اکبری<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دوره دکتری بخش اقلیم‌شناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی

۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی

#### اطلاعات مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

#### تاریخ‌ها:

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

#### واژگان کلیدی:

AOD, VCI, TCI, جنگل‌های

بلوط، استان ایلام

**چکیده:** گردوغبار از مهم‌ترین مخاطرات محیط زیستی در مناطق غربی ایران است که اثرات قابل توجهی بر اکوسیستم‌های طبیعی، به ویژه جنگل‌های بلوط زاگرس دارد. هدف این پژوهش بررسی تغییرات زمانی-مکانی گردوغبار و تحلیل اثر آن بر وضعیت پوشش گیاهی جنگل‌های بلوط استان ایلام طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ است. برای این منظور، از شاخص عمق نوری آتروسول (AOD) به‌عنوان نماینده شدت گردوغبار و از شاخص‌های VCI و TCI برای ارزیابی وضعیت و شرایط حرارتی پوشش گیاهی استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و تصاویر Sentinel-2 در بستر Google Earth Engine پردازش شدند. تحلیل روند زمانی گردوغبار با آزمون غیرپارامتری Kendall's Tau و تحلیل همبستگی مکانی بین AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی در محیط ArcGIS انجام گرفت. نتایج نشان داد مقادیر AOD دارای نوسانات بین‌سالی و در برخی دوره‌ها روند افزایشی است. همبستگی مکانی بین AOD و VCI در بخش قابل توجهی از جنگل‌های بلوط، به‌ویژه در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی استان، منفی و معنادار بوده و کاهش وضعیت پوشش گیاهی همزمان با افزایش گردوغبار را نشان می‌دهد. همچنین، همبستگی AOD و TCI بیانگر تشدید تنش‌های حرارتی با غلظت بالای گردوغبار است. نقشه حساسیت نیز نشان داد مناطق جنوبی بیشترین و نواحی مرتفع شمالی کمترین اثرپذیری را دارند.

**استناد:** هدایتی زاده، مهین، سلیقه، محمد، حجازی زاده، زهرا، ضیائیان، پرویز، اکبری، مهیری. (۱۴۰۳). تحلیل زمانی- مکانی اثر گردوغبار بر تنش

حرارتی و سلامت جنگل‌های بلوط استان ایلام با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور. دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی، ۳(۶)، ۲۸۸-۳۱۰.

© نویسندگان .

Homepage: [cccd.znu.ac.ir](http://cccd.znu.ac.ir)

ناشر: دانشگاه زنجان



## ۱. مقدمه

است (Jafari et al., 2014). بررسی‌های انجام‌شده در مناطق مختلف نشان می‌دهد که نوع و ترکیب آئروسول‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و کاربری اراضی است؛ به‌گونه‌ای که در نواحی شهری مانند آدیس‌آبابا، آئروسول‌های شهری، در مناطق کشاورزی مانند گوجام، آئروسول‌های بیومس، و در نواحی غیرصنعتی مانند دبریتابور، ترکیبی از گردوغبار و آئروسول‌های بیومس غالب هستند. همچنین مطالعات انجام شده در جیبوتی نشان داده است که این منطقه به‌طور خاص تحت تأثیر آئروسول‌های ناشی از اسپری دریایی قرار دارد. در این راستا، عمق نوری آئروسول (AOD) و نمای انگستروم (AE) به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها برای بررسی غلظت و نوع ذرات معلق جوی به‌کار گرفته می‌شوند و تحلیل آن‌ها می‌تواند به درک بهتر دینامیک‌های جوی و تغییرات اقلیمی کمک کند. (Eshet & Raju, 2021)

گردوغبار یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر بر سامانه‌های اقلیمی و محیط‌زیستی در مقیاس‌های محلی و جهانی به‌شمار می‌رود و می‌تواند موجب تغییرات قابل‌توجه در چرخه‌های زیستی، زمین‌شناسی، شیمیایی و همچنین محیط زیست انسان شود. ذرات گردوغبار با کاهش نفوذ تابش خورشیدی به سطح زمین، موجب اختلال در فرآیندهای فتوسنتزی شده و در نتیجه می‌توانند کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی تولیدات کشاورزی را به‌دنبال داشته باشند. افزون بر این، به دلیل خاصیت جذب بالای ذرات گردوغبار، این ذرات به‌راحتی می‌توانند ناقل مواد آلی و معدنی، عوامل بیماری‌زا و حتی آلودگی‌های رادیواکتیو باشند. همچنین در برخی مطالعات، وجود مقادیر بالایی از باکتری‌ها و گرده‌های گیاهی در ترکیب گردوغبار گزارش شده

در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی تغییرات زمانی و مکانی گردوغبار با استفاده از شاخص AOD پرداخته‌اند. محمدپور و همکاران (۱۳۹۸) با مقایسه داده‌های ماهواره‌ای و شبیه‌سازی‌شده AOD در غرب ایران نشان دادند که تغییرات این شاخص به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عواملی همچون فصل، باد و پوشش گیاهی قرار دارد (Mohammadpour et al., 2019). محمدپور (۱۴۰۰) نیز با بهره‌گیری از تکنیک‌های چندمتغیره و داده‌های سنجنده MODIS، به منطقه‌بندی عمق نوری آئروسول در ایران پرداخت و کارایی روش‌های خوشه‌بندی و تحلیل عاملی را در شناسایی الگوهای مکانی AOD تأیید کرد (Mohammadpour et al., 2021). نتایج مشابهی توسط برتینا و همکاران (۱۳۹۲)، مشک‌زاده و همکاران (۱۳۹۵)، میری و همکاران (۱۳۹۶)، دهقانپور (۱۳۹۶) و میراکبری و

ابراهیمی‌خوسفی (۱۳۹۹) نیز گزارش شده است که همگی بر ناهمگنی زمانی- مکانی گردوغبار در مناطق مختلف کشور تأکید دارند (Bertina et al., 2013; Dehghanpour, 2017; Ebrahimi-Khousfi & Mirakbari, 2020; Meshkizadeh et al., 2016; Miri et al., 2017). از سوی دیگر، نقش پوشش گیاهی در تعدیل یا تشدید پدیده گردوغبار نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. سلیمانی‌ساردو و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که الگوی زمانی و مکانی گردوغبار در حوضه جازموریان به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر وضعیت پوشش گیاهی قرار دارد. (Bertina et al., 2013; Dehghanpour, 2017; Ebrahimi-Khousfi & Mirakbari, 2020; Meshkizadeh et al., 2016; Miri et al., 2017) احمدی و همکاران (۱۳۹۷) نیز نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و عوامل جغرافیایی مکان را در توزیع فضایی عمق

برگ، کرکدار بودن، میزان بارندگی و مدت زمان مواجهه با گردوغبار را از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده میزان آسیب‌پذیری گیاهان در برابر این پدیده معرفی کرده است (ISNA News Agency, 2024). در استان ایلام، ورود ریزگردها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل آغاز زوال جنگل‌های بلوط شناخته می‌شود و خشکسالی‌های اخیر، شدت این چالش زیست‌محیطی را تشدید کرده است. هر هکتار جنگل سالانه حدود ۶۰ تن ریزگرد را رسوب می‌دهد و این ذرات با ایجاد اختلال در فتوسنتز، کاهش بارندگی و افزایش دما، موجب تضعیف تدریجی درختان و افزایش حساسیت آن‌ها به آفات و بیماری‌ها می‌شوند (Ghorbani & Babaei, 2018) با توجه به اینکه گونه بلوط بخش عمده پوشش جنگلی غرب کشور را تشکیل می‌دهد و به‌دلیل سطح برگ گسترده، جذب‌کننده مؤثری برای

نوری آئروسول‌های فصلی ایران برجسته کردند (Ahmadi et al., 2018). همچنین مطالعاتی نظیر نامداری و همکاران (۱۳۹۶)، جبالی و همکاران (۱۳۹۸) و سلیمانی و همکاران (۱۴۰۰) بر اهمیت عوامل اقلیمی، توپوگرافی و پارامترهای جوی در تغییرپذیری گردوغبار تأکید دارند (Jebali et al., 2019; Namdari et al., 2017; Soleimani et al., 2021) در سطح اکوسیستم‌های جنگلی، اثرات منفی گردوغبار بر ساختار و عملکرد پوشش گیاهی به‌ویژه در جنگل‌های بلوط زاگرس به‌خوبی مستند شده است. طاهرپور و ناجی (۲۰۱۹) نشان دادند که طوفان‌های گردوغبار شبیه‌سازی‌شده می‌توانند رشد قطری، ساختار چوب و ویژگی‌های روزنه‌ای برگ گونه *Quercus brantii* را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار دهند (Taherpour & Naji, 2019). همچنین کیادلیری عواملی نظیر پهنای

کشور در میان رشته کوه‌های کبیرکوه از سلسله جبال زاگرس قرار دارد. از شمال به استان کرمانشاه، از جنوب به قسمتی از خوزستان و کشور عراق، از شرق به استان لرستان و از غرب به کشور عراق محدود است .

استان ایلام حدود ۴۲۵ کیلومتر مرز مشترک با کشور عراق دارد. کوه‌های ایلام از جمله ناهمواری‌های سلسله جبال زاگرس است. نواحی شمال و شمال شرقی استان کوهستانی و دارای ارتفاعات مهمی است. مناطق غرب و جنوب غربی آن از زمین‌های پست و کم‌ارتفاع و تپه ماهور، تشکیل شده است. آب و هوای استان ایلام به سبب تأثیرپذیری از عوامل گوناگونی چون عرض جغرافیایی (زاویه تابش آفتاب)، ارتفاع، امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس، فاصله از بیابان‌های عراق و عربستان و بادهای محلی و ناحیه‌ای از تنوع زیاد برخوردار است. استان ایلام دارای سه منطقه آب و هوایی

گردوغبار است، بیشترین آسیب را از این پدیده متحمل می‌شود؛ به‌ویژه جنگل‌های بلوط رویشی استان ایلام که در معرض تهدیدات متعددی از جمله گردوغبار قرار دارند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر گردوغبار و پیامدهای آن بر سلامت پوشش گیاهی بلوط استان ایلام، از طریق شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) و ارتباط آن با شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی انجام شده است.

## ۲. داده‌ها و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

استان ایلام با مساحتی حدود ۱۹۰۸۶ کیلومتر مربع، در غرب کشور، بین ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی نسبت به استوا و ۴۵ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. این استان یک منطقه کوهستانی و مرتفع است که در غرب و جنوب‌غربی



مورد استفاده قرار گرفت و مبنایی برای شناسایی پیکسل‌های بلوطی در کل منطقه مطالعه فراهم نمود. با توجه به ماهیت پایدار و دیرپوی تغییرات مکانی رویشگاه‌های بلوط در بازه‌های زمانی میان‌مدت، فرض شد که الگوی مکانی پراکنش این جنگل‌ها در دوره مورد بررسی (۲۰۰۵-۲۰۲۰) تغییر اساسی نداشته است.

بر این اساس، تحلیل‌های زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی و اثرات گردوغبار، صرفاً بر روی پیکسل‌هایی انجام شد که بر اساس نقشه مرجع، به‌عنوان مناطق بلوطی شناسایی شده بودند. بنابراین، نقشه بلوط استخراج‌شده از تصاویر سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۱، نه به‌عنوان نقشه زمانی هم‌دوره با تحلیل گردوغبار، بلکه به‌عنوان یک لایه مرجع مکانی جهت محدودسازی تحلیل‌ها به مناطق دارای پوشش بلوط مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت استخراج دقیق پوشش‌های جنگلی انجام گرفت.

### ۳.۲. روش‌ها

**مرحله اول: تعیین گستره ی جنگل -**

#### های بلوط ایلام

در این پژوهش، هدف بررسی اثر پدیده گردوغبار بر تغییرات وضعیت پوشش جنگل‌های بلوط استان ایلام در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بوده است. به‌منظور تفکیک مکانی رویشگاه‌های بلوط از سایر کاربری‌ها، از تصاویر Sentinel-2 سطح A ۲ مربوط به سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۱ شمسی (۲۰۲۱-۲۰۲۲ میلادی) استفاده شد. انتخاب این بازه زمانی به دلیل برخوردار بودن تصاویر Sentinel-2 از قدرت تفکیک مکانی بالا و کیفیت مناسب داده‌ها جهت استخراج دقیق پوشش‌های جنگلی انجام گرفت.

نقشه حاصل از طبقه‌بندی، به‌عنوان نقشه مرجع مکانی پراکنش جنگل‌های بلوط

به‌عنوان نمایانگر سلامت و وضعیت پوشش گیاهی و شاخص TCI (Trend Change Index) به‌منظور بررسی روند تغییرات محیط‌زیستی به کار رفت. نقشه‌های این شاخص‌ها بر اساس سال‌های وقوع گردوغبار با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine تولید شدند؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بالاتر VCI نشان‌دهنده وضعیت بهتر پوشش گیاهی است. برای تحلیل گردوغبار، از شاخص AOD به‌عنوان نماینده تراکم ذرات معلق در هوا استفاده شد. داده‌های AOD از سنسورهای ماهواره‌ای (مانند MODIS استخراج و نقشه‌های سالانه آن در Google Earth Engine تهیه گردید. سپس اثر گردوغبار بر سلامت پوشش گیاهی (به‌ویژه گونه بلوط) از طریق تحلیل همبستگی بین AOD و VCI بررسی شد. نتایج نمودارها و تحلیل‌ها نشان‌دهنده وجود همبستگی

لازم به ذکر است که هدف از تهیه نقشه بلوط، تحلیل تغییرات سطح جنگل نبوده، بلکه تفکیک مکانی مناطق بلوطی برای بررسی پاسخ پوشش گیاهی به پدیده گردوغبار در بازه زمانی مورد مطالعه بوده است.

**مرحله دوم:** به‌منظور بررسی تغییرات زمانی گردوغبار، تحلیل روند زمانی مقادیر AOD انجام شد. در این مرحله از ضریب همبستگی کندال (Kendall's Tau) به‌عنوان یک روش غیرپارامتری مقاوم برای سنجش روند تغییرات استفاده گردید که به دلیل عدم وابستگی به توزیع نرمال داده‌ها، برای تحلیل سری‌های زمانی محیط‌زیستی مناسب است.

**مرحله سوم:** در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر گردوغبار بر وضعیت پوشش گیاهی، از شاخص‌های VCI، TCI و AOD50 استفاده شد. شاخص VCI (Vegetation Condition Index)

منفی بین افزایش گردوغبار و کاهش شاخص گیاهی است.

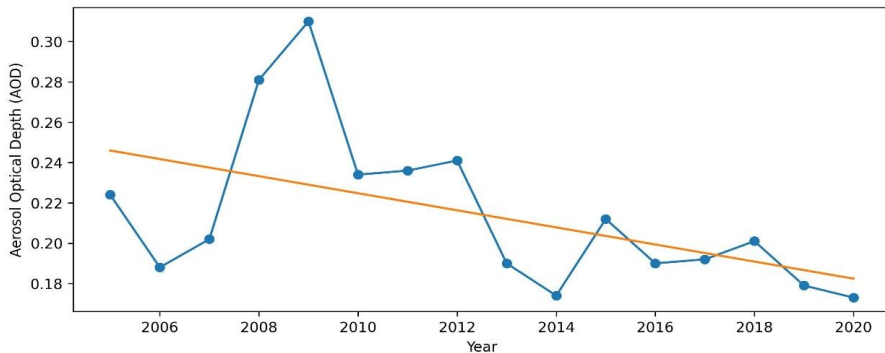
**مرحله چهارم:** به منظور بررسی رابطه مکانی بین گردوغبار و وضعیت پوشش گیاهی و شاخص روند تغییر محیط زیستی، ابتدا لایه‌های رستری عمق نوری گردوغبار (AOD50) و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص روند تغییر محیط زیستی (TCI) از نظر سیستم مختصات، اندازه پیکسل و محدوده مکانی یکسان‌سازی شدند. سپس میانگین مقادیر هر یک از شاخص‌ها در کل محدوده مطالعه با استفاده از ابزار Zonal Statistics محاسبه شد.

در ادامه، به منظور تحلیل همبستگی مکانی، رابطه پیکسلی بین انحراف هر پیکسل از میانگین AOD و TCI و VCI با استفاده از Raster Calculator در محیط ArcGIS محاسبه گردید. خروجی این مرحله به عنوان نقشه شدت همبستگی مکانی AOD-VCI,TCI نمایش داده شد که در آن مقادیر منفی نشان‌دهنده اثر منفی افزایش گردوغبار بر وضعیت پوشش گیاهی و شرایط حرارتی است. در نهایت، نقشه همبستگی مکانی در پنج طبقه شدت همبستگی طبقه‌بندی و برای تفسیر فضایی نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۲: نمودار سری زمانی AOD در دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ است که نشان‌دهنده نوسانات بین‌ساله قابل توجه همراه با یک روند کلی کاهشی است. وجود خط رگرسیون خطی با شیب منفی بیانگر کاهش تدریجی عمق نوری آئروسول در دوره مورد بررسی است. بیشترین مقادیر AOD در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش وقوع رخداد‌های گردوغبار در جو طی این سال‌ها باشد. پس از این دوره، مقادیر AOD به‌طور کلی کاهش یافته و کمینه آن در سال‌های پایانی دوره، به‌ویژه

خط رگرسیون نشان دهنده روند بلندمدت تغییرات عمق نوری آئروسول (AOD) در دوره مورد بررسی است. شیب منفی این خط بیانگر کاهش تدریجی بار آئروسول های جوی طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بوده و مستقل از نوسانات سالانه، جهت کلی تغییرات را نشان می دهد.

۲۰۱۴ و ۲۰۲۰، ثبت شده است. نوسانات سالانه AOD حاکی از تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی نظیر تغییرات الگوهای باد، خشکسالی، شرایط سطح زمین و منابع گردوغبار منطقه ای است. کاهش تدریجی AOD در سال های اخیر می تواند بیانگر کاهش فراوانی یا شدت انتقال و یا بهبود نسبی شرایط اقلیمی و مدیریتی در منطقه مورد مطالعه باشد.



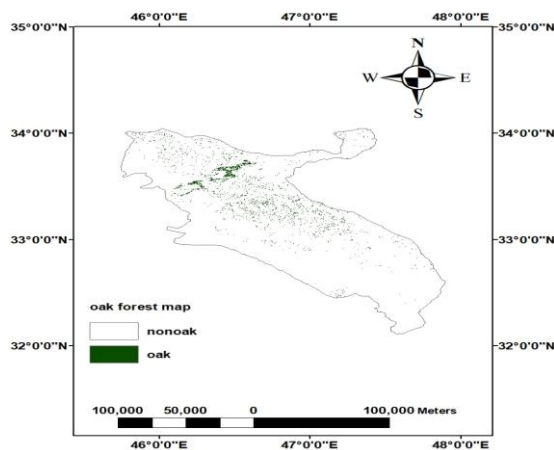
شکل ۲: تغییرات سالانه عمق نوری آئروسول در استان ایلام (۲۰۰۵-۲۰۲۰)

۳. یافته ها و نتایج  
نشان دهنده تراکم بالای درختان بلوط است. مناطق ناپیدا: نشان دهنده بدون درخت بلوط است (کلاس ۰)، یا ممکن است به دلایل مختلف شیب، خاک، یا نوع

شکل ۳ نقشه ی گسترش جنگل های بلوط را در استان ایلام نشان می دهد که مناطق سبز پررنگ (سبز تیره یا عمیق)،

پوشش نادیده گرفته شده باشد. نقاط سبز پررنگ نشان‌دهنده ی نواحی با درختان بلوط (کلاس ۱) است. این نواحی عمدتاً در مناطق مرتفع و کوهستانی استان ایلام قرار دارند، به عنوان مناطقی با شرایط اقلیمی و خاکی مناسب و کم‌تداخل انسانی است.

شکل ۳ نقشه ی گسترش جنگل های بلوط را در استان ایلام نشان می دهد که مناطق سبز پررنگ (سبز تیره یا عمیق)، نشان‌دهنده تراکم بالای درختان بلوط است. مناطق ناپیدا: نشان‌دهنده بدون درخت بلوط است (کلاس ۰)، یا ممکن است به دلایل مختلف شیب، خاک، یا نوع پوشش نادیده گرفته شده باشد. نقاط سبز پررنگ نشان‌دهنده ی نواحی با درختان بلوط (کلاس ۱) است. این نواحی عمدتاً در مناطق مرتفع و کوهستانی استان ایلام قرار دارند، به عنوان مناطقی با شرایط اقلیمی و خاکی مناسب و کم‌تداخل انسانی است.



شکل ۳: نقشه ی گسترش جنگل های بلوط در استان ایلام

شکل ۴ نقشه گردوغبار استان ایلام طی دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۰ است که نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی مقادیر عمق نوری آئروسول (AOD) در سطح استان است. مقادیر

بالاتر AOD که بارنگ‌های تیره‌تر مشخص شده‌اند، عمدتاً در نواحی غربی و شمال‌غربی استان، به‌ویژه در مجاورت مرز عراق و مناطق کوهستانی، مشاهده می‌شوند. این الگو با جهت بادهای غالب منطقه و مجاورت با منابع طبیعی و انسانی تولید گردوغبار سازگار است، در حالی‌که نواحی با مقادیر کمتر AOD عمدتاً در بخش‌های مرکزی و شرقی استان قرار دارند. نقشه همبستگی مکانی بین AOD و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) در جنگل‌های بلوط استان ایلام نشان می‌دهد که در بخش قابل توجهی از منطقه، به‌ویژه نواحی مرکزی و غربی، همبستگی منفی متوسط تا قوی ( $r = -1 - -0.5$ ) حاکم است. این نتیجه بیانگر کاهش وضعیت پوشش گیاهی همزمان با افزایش غلظت آئروسول‌های جوی بوده و می‌تواند ناشی از کاهش تابش دریافتی، اختلال در فرآیند فتوسنتز و افزایش تنش‌های فیزیولوژیک گیاهان باشد.

در مقابل، همبستگی مثبت محدود و موضعی در بخش‌هایی از شرق و جنوب‌شرق استان مشاهده می‌شود که احتمالاً تحت تأثیر شرایط اقلیمی و محیطی محلی نظیر رطوبت، بارش و ویژگی‌های توپوگرافی قرار دارد. همچنین، نواحی با همبستگی ضعیف یا نامعنا نشان‌دهنده غلبه سایر عوامل محیطی و انسانی بر رابطه خطی بین AOD و VCI است. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که اثر آئروسول‌های جوی بر وضعیت پوشش گیاهی جنگل‌های بلوط استان ایلام از نظر مکانی یکنواخت نبوده و غالب بودن همبستگی‌های منفی، نقش بالقوه گردوغبار را به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در تضعیف پوشش گیاهی منطقه تأیید می‌کند.

شکل ۵: نقشه ی گردوغبار استان ایلام سال ۲۰۱۰ - ۲۰۱۵ است. مناطق قرمز رنگ در

نقشه، درگیر بحران گردوغبار می‌باشند. این نقشه نشان‌دهنده توزیع غلظت ذرات معلق در جو (AOD) در منطقه ی ایلام است و درجه‌بندی رنگ‌ها میزان غلظت گردوغبار را نشان می‌دهد. پُرخطرترین نواحی، مناطق با رنگ قرمز که در مرکز و شرق و شمال شرق منطقه دیده می‌شوند، شامل مناطقی مانند دهلران و ملکشاهی و بدره و دره شهرو ایلام و بخشی از دهلران است که این نواحی درگیر غبار شدید هستند. مناطق کم‌خطر در غرب و شمال‌غرب، مانند ایوان و چوار، درگیر غبار کمتری هستند و بیش‌تر با رنگ‌های زرد نشان داده شده‌اند. نواحی جنوب و شرق منطقه، در سطح فعالیت گردوغبار بالا و بحرانی قرار دارند، که این می‌تواند بر سلامت انسان و فعالیت‌های کشاورزی تأثیرگذار باشد. نقشه همبستگی مکانی بین عمق نوری آئروسول (AOD) و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) در جنگل‌های بلوط استان ایلام نشان می‌دهد که در بخش عمده‌ای از منطقه، به‌ویژه نواحی مرکزی و غربی، همبستگی منفی ضعیف تا متوسط غالب است. این الگو بیانگر کاهش وضعیت پوشش گیاهی همزمان با افزایش غلظت آئروسول‌های جوی بوده و احتمالاً ناشی از کاهش تابش دریافتی، محدودیت فتوسنتز و افزایش تنش‌های محیطی است. در مقابل، همبستگی‌های مثبت محدود و پراکنده در بخش‌هایی از شرق و جنوب‌شرق مشاهده می‌شود که می‌تواند تحت تأثیر شرایط اقلیمی و محیطی محلی قرار داشته باشد. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که اثر گردوغبار بر پوشش گیاهی منطقه یکنواخت نبوده، اما غالب بودن همبستگی‌های منفی نقش بالقوه آئروسول‌های جوی را در تضعیف جنگل‌های بلوط استان ایلام تأیید می‌کند. نقشه همبستگی مکانی بین عمق نوری

گردوغبار (AOD) و شاخص شرایط حرارتی پوشش گیاهی (TCI) در جنگل‌های بلوط استان ایلام طی دوره زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد که الگوی رابطه بین این دو متغیر از نظر مکانی یکنواخت نیست. در بخش‌هایی از منطقه، به‌ویژه نواحی مرکزی و غربی، همبستگی منفی ضعیف تا متوسط غالب است که بیانگر افزایش تنش حرارتی پوشش گیاهی همزمان با افزایش غلظت آئروسول‌های جوی است. در مقابل، لکه‌هایی از همبستگی مثبت ضعیف تا متوسط به‌صورت پراکنده، عمدتاً در بخش‌هایی از شرق و جنوب‌شرق منطقه مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط محلی اقلیمی و تفاوت‌های توپوگرافی باشد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که گردوغبار می‌تواند از طریق تأثیر بر شرایط حرارتی، یکی از عوامل مؤثر بر تنش پوشش گیاهی در جنگل‌های بلوط استان ایلام باشد.

شکل ۶ نقشه‌ی گردوغبار استان ایلام در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۰ است. مناطق درگیر گرد و غبار در نواحی شرقی و جنوبی استان، بخصوص در دهلران، آبدانان، و بخشی از ایلام و دره شهر قرار دارند و قسمتی از ایوان در شمال استان ایلام درگیر گردوغبار است. نواحی غربی و شمالی، کمتر در معرض گرد و غبار هستند و بیشتر با رنگ‌های زرد و کرمی نشان داده شده‌اند. مناطقی در بخش‌های جنوبی و مرکزی نقشه، رنگ قرمز تیره دارند، که نشان‌دهنده غبار بسیار زیاد است. این نواحی شامل مناطق نزدیک به شهرستان‌های دهلران، آبدانان، ملکشاهی و دره شهر است که در نواحی شرقی و جنوبی استان و ایوان در شمال استان ایلام قرار دارند. نقشه همبستگی مکانی AOD و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) در جنگل‌های بلوط استان ایلام نشان می‌دهد که در بخش عمده‌ای از منطقه، به‌ویژه

نواحی مرکزی و غربی، همبستگی منفی متوسط تا قوی غالب است که بیانگر تضعیف پوشش گیاهی همزمان با افزایش غلظت گردوغبار می‌باشد. در مقابل، همبستگی‌های مثبت محدود و پراکنده در بخش‌هایی از شرق و جنوب‌شرق مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، نتایج حاکی از نقش مؤثر و مکانی‌وابسته گردوغبار در کاهش وضعیت پوشش گیاهی منطقه طی دوره مورد مطالعه است. نقشه همبستگی مکانی بین عمق نوری گردوغبار (AOD) و شاخص شرایط حرارتی پوشش گیاهی (TCI) در جنگل‌های بلوط استان ایلام طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در بیشتر سطح منطقه، همبستگی ضعیف تا متوسط و عمدتاً منفی غالب است. این الگو بیانگر آن است که افزایش غلظت گردوغبار در سال‌های اخیر با تشدید تنش حرارتی پوشش گیاهی همراه بوده است. همبستگی‌های مثبت قوی تنها به‌صورت محدود و پراکنده مشاهده می‌شود که احتمالاً تحت تأثیر شرایط محلی اقلیمی یا توپوگرافی قرار دارد. به‌طور کلی، نتایج حاکی از تداوم اثر نامطلوب گردوغبار بر شرایط حرارتی پوشش گیاهی جنگل‌های بلوط استان ایلام در دوره مورد مطالعه است. براساس نتایج جدول ۱، بیشترین سطح اثرپذیری از مخاطره گردوغبار در نواحی غربی و جنوب‌غربی استان ایلام مشاهده می‌شود، در حالی که نواحی مرتفع شمالی استان کمترین میزان اثرپذیری را نشان می‌دهند. این الگوی فضایی بیانگر ناهمگنی حساسیت اکوسیستم‌های محلی نسبت به تنش گردوغبار است. شکل ۷ نقشه حساسیت اثر گردوغبار است که نشان می‌دهد که شدت تأثیر این پدیده در استان ایلام دارای الگوی مکانی مشخصی است. مناطق جنوبی و جنوب‌غربی استان، شامل شهرستان‌های مهران، دهلران و آبدانان، در طبقه حساسیت زیاد قرار دارند که بیانگر

اثرگذاری شدید گردوغبار بر شرایط محیطزیستی و پوشش گیاهی این نواحی است. مناطق مرکزی استان دارای حساسیت متوسط بوده و مناطق شمالی، از جمله ایوان، سیروان و چرداول، کمترین حساسیت را نسبت به گردوغبار نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نتایج بیانگر کاهش شدت اثر گردوغبار از جنوب به شمال استان است که با نتایج شاخص‌های AOD و VCI و همبستگی منفی بین گردوغبار و سلامت پوشش گیاهی همخوانی دارد.

شکل ۸ نمودار همبستگی با تأخیر بین عمق نوری گردوغبار (AOD) و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) است که نشان می‌دهد پاسخ پوشش گیاهی به گردوغبار وابسته به زمان و غیرخطی است. در حالت بدون تأخیر زمانی ( $Lag = 0$ )، ضریب همبستگی منفی و نسبتاً متوسط ( $r \approx -0.39$ ) مشاهده می‌شود که بیانگر کاهش هم‌زمان وضعیت پوشش گیاهی با افزایش گردوغبار است. این نتیجه نشان می‌دهد که گردوغبار می‌تواند در همان سال وقوع، تنش‌هایی بر پوشش گیاهی وارد کند. با اعمال تأخیر یک‌ساله، همبستگی به مقدار مثبت و ضعیف تغییر می‌کند ( $r \approx 0.06$ ) که نشان‌دهنده کاهش اثر مستقیم گردوغبار و نقش پررنگ‌تر سایر عوامل اقلیمی در سال بعد است. بیشترین مقدار همبستگی در تأخیر دو‌ساله مشاهده می‌شود ( $r \approx 0.21$ )، که می‌تواند بیانگر اثرات تجمعی یا تأخیری گردوغبار بر ساختار و عملکرد پوشش گیاهی باشد. در تأخیر سه‌ساله، مجدداً همبستگی منفی و نسبتاً قوی‌تر ( $r \approx -0.38$ ) مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد اثرات منفی گردوغبار می‌تواند در بلندمدت و در تعامل با سایر تنش‌های محیطی، دوباره ظاهر شود. به‌طور کلی، این الگو بیانگر آن است که اثر گردوغبار بر وضعیت پوشش گیاهی پایدار و یکنواخت نیست و در بازه‌های زمانی

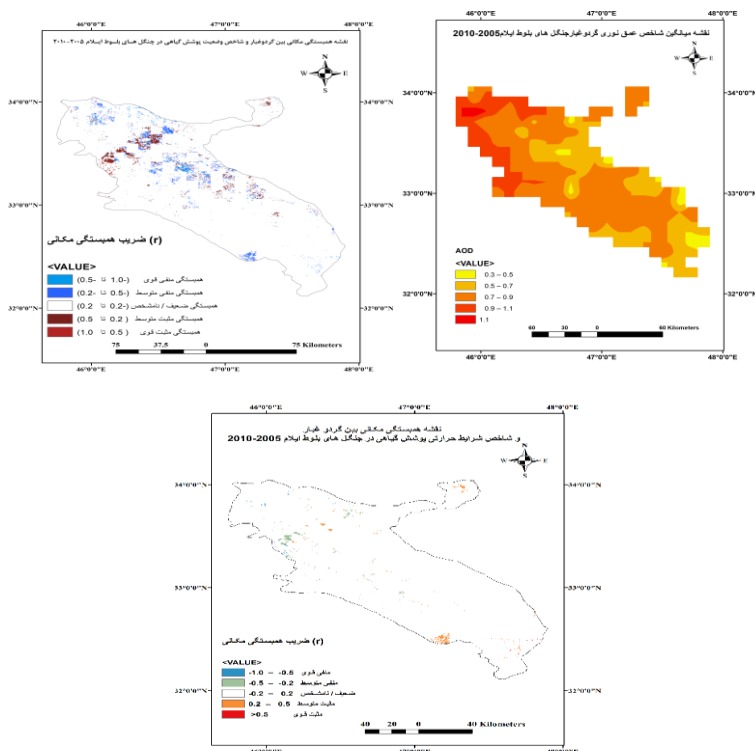
کاهش می‌یابد ( $r \approx 0.23$  و  $r \approx 0.11$ )، که بیانگر تضعیف اثر گردوغبار و غلبه سایر عوامل اقلیمی بر شرایط دمایی پوشش گیاهی است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که پدیده گردوغبار طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ نقش مؤثری در تضعیف وضعیت پوشش گیاهی جنگل‌های بلوط استان ایلام داشته است. تحلیل روند زمانی عمق نوری آئروسول (AOD) بیانگر نوسانات بین‌سالی قابل‌توجه و افزایش شدت گردوغبار در برخی بازه‌های زمانی است. نتایج همبستگی مکانی پیکسلی نشان داد که در بخش عمده‌ای از رویشگاه‌های بلوط، به‌ویژه در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی استان، همبستگی منفی بین AOD و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) غالب بوده که بیانگر کاهش سلامت پوشش گیاهی همزمان با افزایش غلظت گردوغبار است.

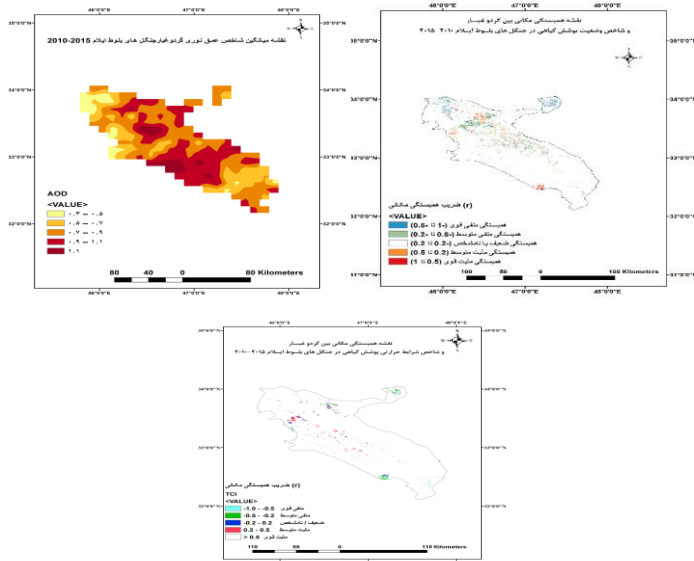
مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. نمودار همبستگی با تأخیر بین AOD و شاخص دمایی پوشش گیاهی (TCI) نشان می‌دهد که اثر گردوغبار بر شرایط حرارتی پوشش گیاهی منسجم‌تر و کوتاه‌مدت‌تر از اثر آن بر VCI است. در حالت بدون تأخیر ( $Lag = 0$ )، ضریب همبستگی مثبت و متوسط ( $r \approx 0.52$ ) مشاهده می‌شود که بیانگر ارتباط مستقیم بین افزایش گردوغبار و تغییرات دمایی پوشش گیاهی در همان سال است. این نتیجه می‌تواند ناشی از تغییر در توازن انرژی سطح زمین و تأثیر ذرات معلق بر تابش ورودی و خروجی باشد. بیشترین مقدار همبستگی در تأخیر یک‌ساله به دست آمده است. ( $r \approx 0.58$ )، که نشان می‌دهد پاسخ دمایی پوشش گیاهی به گردوغبار با یک وقفه زمانی کوتاه‌مدت تقویت می‌شود. با افزایش تأخیر به دو و سه سال، شدت همبستگی به‌طور قابل توجهی

همچنین، رابطه بین AOD و شاخص شرایط حرارتی پوشش گیاهی (TCI) نشان‌دهنده تشدید تنش‌های حرارتی در مناطق با غلظت بالای گردوغبار می‌باشد. نقشه حساسیت اثر گردوغبار ناهمگنی فضایی پاسخ اکوسیستم‌های بلوط را آشکار ساخت؛ به طوری که مناطق جنوبی استان بیشترین و نواحی مرتفع شمالی کمترین سطح اثرپذیری را نشان دادند.

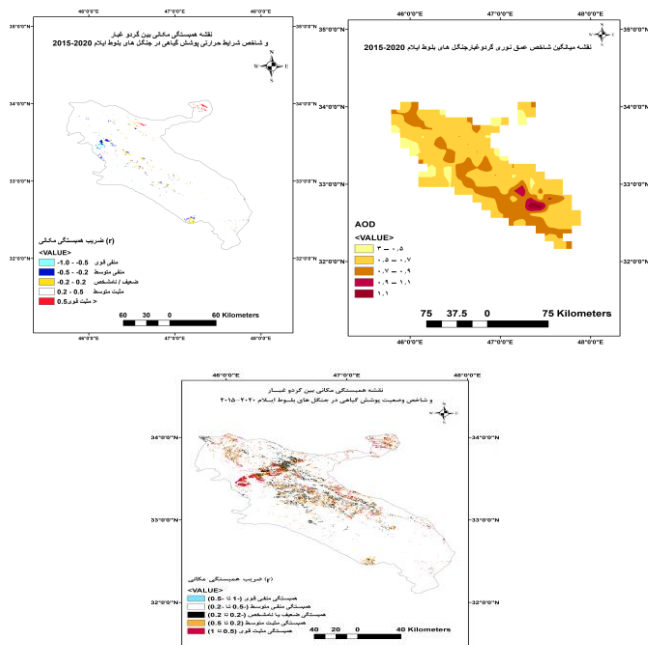


شکل ۴: از چپ به راست نقشه ی گردوغبار و همبستگی گردوغبار با TCI و VCI استان ایلام

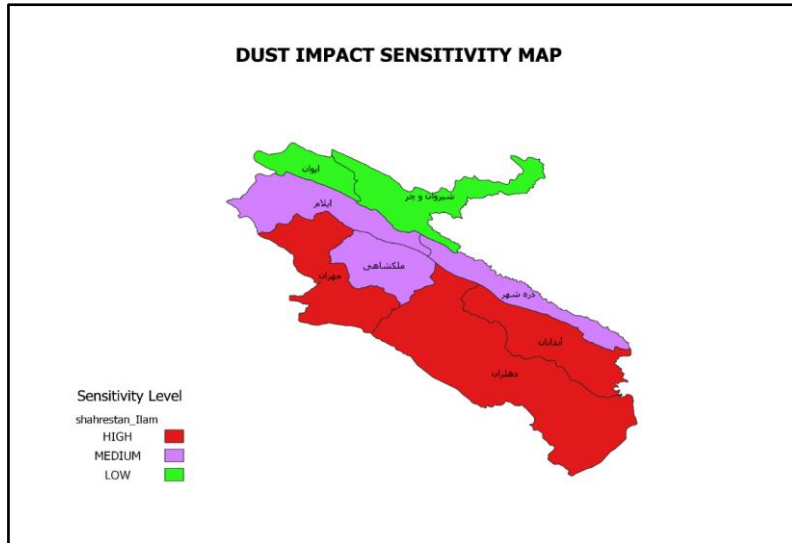
سال ۲۰۰۵-۲۰۱۰



شکل ۵: از چپ به راست نقشه‌ی گردوغبار و همبستگی گردوغبار با VCI و TCI استان ایلام سال ۲۰۱۵-۲۰۱۰



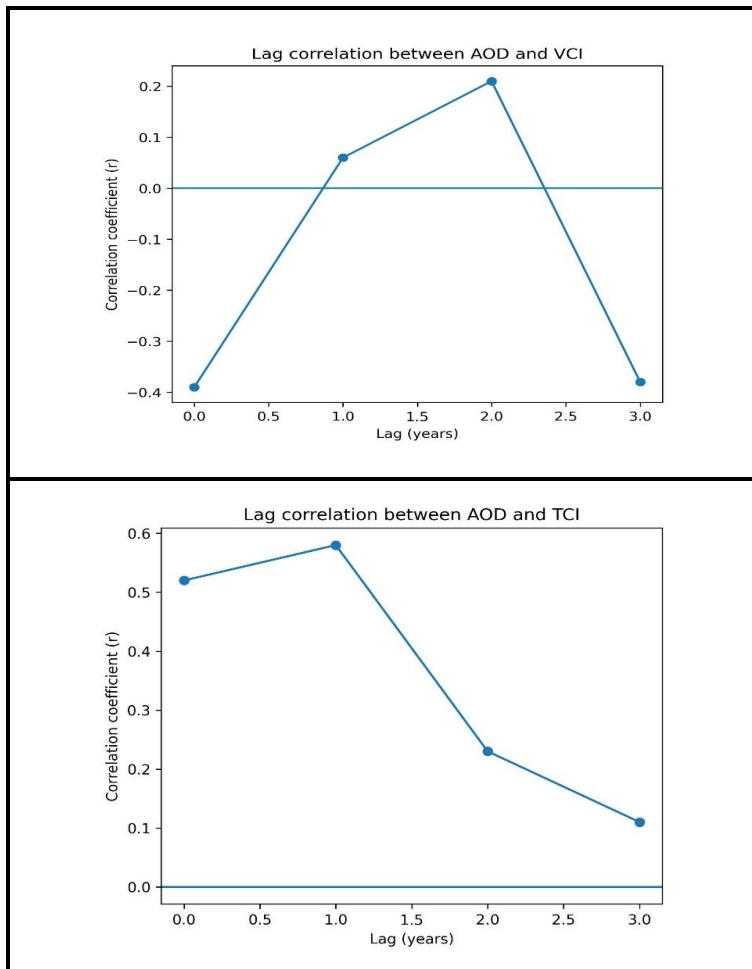
شکل ۶: از چپ به راست نقشه‌ی گردوغبار و همبستگی گردوغبار با VCI و TCI استان ایلام سال ۲۰۲۰-۲۰۱۵



شکل ۷: طبقه‌بندی نواحی استان ایلام بر اساس سطح اثرپذیری از مخاطره گردوغبار

جدول ۱: طبقه‌بندی نواحی استان ایلام بر اساس سطح اثرپذیری از مخاطره گردوغبار

تبیین علمی	ویژگی‌های اصلی	نواحی / شهرستان‌ها	سطح اثرپذیری
مجاورت با کانون‌های گردوغبار عراق، ارتفاع کمتر، اقلیم گرم و خشک، پوشش گیاهی تنک	افزایش روند گردوغبار، کاهش TCI و VCI	مهران، دهلران، بخش‌هایی از آبدانان (نوار مرزی غرب و جنوب‌غرب)	بالا
اثر تعدیل‌کننده توپوگرافی و تنوع کاربری اراضی	تغییرات نوسانی گردوغبار و شاخص‌های پوشش گیاهی	نواحی مرکزی استان (ایلام، چرداول)	متوسط
ارتفاع بیشتر، بارش بالاتر، پوشش گیاهی متراکم‌تر	روند ضعیف گردوغبار، پایداری یا بهبود VCI	نواحی شمالی و شمال‌شرقی (ایوان و ارتفاعات شمال استان)	کم



شکل ۸: همبستگی با تأخیر AOD با شاخص‌های پوشش گیاهی (VCI) و (TCI) طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۵

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که گردوغبار، به‌صورت مکانی‌وابسته و با اثرات تجمعی، یکی از عوامل تهدیدکننده پایداری جنگل‌های بلوط استان ایلام است و توجه به آن در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و حفاظتی ضروری می‌باشد.

### ملاحظات اخلاقی

**حامی مالی:** این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان های تأمین مالی دریافت نکرده است.  
**تعارض منافع:** طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.  
**برگرفته از رساله:** این مقاله برگرفته از رساله مهین هدایتی زاده بوده است.

### References

- Ahmadi, M., Shakiba, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2018). Investigation of the role of vegetation indices and geographical components on the optical depth of seasonal aerosols in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(1), 211-233. [In Persian].
- Bertina, H., Sayyad, G., Matinfar, H., & Hojati, S. (2013). Spatio-temporal distribution of atmospheric suspended particles in the west of the country based on MODIS sensor spectral data. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 20(3), 119-136. [In Persian].
- AOD and its relationship with cold cloud characteristics over Iran using MODIS remote sensing data. *Journal of Geographical Space Preparation*, 7(24), 17-30. [In Persian].
- Dehghanpour, A. (2017). Investigation of temporal and spatial variations of dust storms and the decline of Zagros forests. *2nd International*

- Dust Conference. [In Persian].
- ISNA. (2022). Dust: The scourge of the country's forests. ISNA News Agency, Environment Section. [In Persian].
  - Jebali, A., Zare, M., Ekhtesasi, M., & Jafari, R. (2020). Investigation of the horizontal visibility variability in areas affected by dust events in Yazd province. *Journal of Desert Management*, 8(15), 21-36. [In Persian].
  - Jafari, S., & Soltani, A. (2014). Investigating the effect of dust phenomenon on Zagros oak forests and strategies to combat it. The 2nd National Conference on Environment, Energy and Biodefense, 1-8. [In Persian].
  - Mohammadpour, K. (2021). Application of multivariate techniques in zoning of Aerosol Optical Depth (AOD) over Iran. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 8(1), 123-140. [In Persian].
  - Mohammadpour, K., Saligheh, M., Darvishi-Bolloorani, A., & Rezaei, T. (2019). Analysis and comparison of satellite products and AOD simulation in analyzing dust in Western Iran (2000-2018). *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(1), 15-32. [In Persian].
  - Meshkizadeh, P., Orak, N., & Morshedi, J. (2016). Investigating the spatio-temporal distribution of Aerosol Optical Depth

- (AOD) over Khuzestan province using remote sensing techniques. *Geography and Environmental Studies*, 5(19), 69-78. [In Persian].
- Soleimani-Sardo, F., Karami, S., & Hossein-Hamzeh, N. (2021). Determination and analysis of the temporal-spatial dust pattern and its impact on vegetation (Case study: Jazmurian Basin). *Environmental Erosion Research\**, 11(2), 64-81. [In Persian].
- Soleimani, M., Organi, M., Papi, R., & Amiri, F. (2021). Prediction of satellite aerosol optical depth using climate parameter data mining. *Physical Geography Research*, 53(3), 319-333. [In Persian].