

Analyzing the Trends in Aerosol Optical Depth (AOD) Changes Over a 20-Year Period (2001–2020): A Case Study of Alborz Province

Mahdiye Shaker ^a, Hadi Eskandari Damaneh ^b, Hassan Khosravi ^{c*}

^a M.Sc. Student, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

^b Researcher, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

^c Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Areas, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

Research Full Paper

Article History (Received: 2024/10/17

Accepted: 2025/02/28)

Extended abstract

1- Introduction

Dust storms are complex atmospheric phenomena that result from the interaction of various dynamic and physical processes within the atmosphere. These storms primarily occur in regions where conditions such as high wind speed, dry soil surfaces, and minimal or absent vegetation cover prevail. Dust storms can significantly impact local and global climates, as they contribute to the transport of suspended particles in the atmosphere, potentially leading to climatic changes, air quality degradation, and increased health risks for humans. This phenomenon is fundamental in arid and semi-arid regions, such as Alborz province, which faces specific climatic and geographical challenges. Alborz is characterized by its unique topography and climate, which create conditions that are conducive to the formation of dust storms. The province's location, altitude, and land cover play a crucial role in how dust storms develop and spread. In recent decades, the frequency and intensity of dust storms have been reported to increase across many parts of the Middle East and Central Asia. These changes are often linked to anthropogenic factors such as land degradation, deforestation, and excessive groundwater withdrawal. In Iran, particularly in Alborz province, growing urbanization and changing land-use patterns have exacerbated environmental sensitivity, making it more vulnerable to dust generation and transport. The rapid expansion of urban areas has led to the destruction of natural landscapes, thus diminishing the land's ability to retain moisture and vegetation, which is essential for mitigating dust storm formation. Furthermore, agricultural practices, including overgrazing and improper irrigation, contribute to soil erosion and degradation, making the region even more susceptible to dust storms. Given the regional implications for air quality, agriculture, and human health, it is essential to assess dust storm trends using reliable atmospheric data. By doing so, we can better understand the patterns and causes of dust storms and develop effective strategies to mitigate their impact. Collaborative efforts combining scientific research, policy-making, and community engagement are necessary to address these challenges comprehensively and protect the environment and public health.

2- Methodology

To analyze dust storm trends and their spatial distribution in Alborz province, satellite-derived Aerosol Optical Depth (AOD) data were employed as a primary indicator of atmospheric dust concentration. AOD measures the extinction of solar radiation caused by aerosol particles in a column of the atmosphere and is a reliable proxy for assessing dust intensity and transport patterns. Data from 2001 to 2020 were collected, processed, and analyzed using remote sensing techniques and geographic information systems (GIS). This

¹ Corresponding Author: hakhosravi@ut.ac.ir

approach facilitated classifying AOD values into discrete classes representing varying dust concentrations, mapping their spatial coverage across the study area period.

3- Results

The temporal analysis of AOD data revealed a clear upward trend in atmospheric dust levels in Alborz province over the two-decade study period. In particular, the southern and southwestern regions of the province experienced a noticeable increase in AOD values. The annual analysis showed that between 2008 and 2011, AOD levels exhibited significant fluctuations, with the highest value recorded in 2009 at 0.4. In other years, values remained relatively elevated at 0.29 in 2008, 0.34 in 2010, and 0.29 in 2011, indicating persistent dust activity. Furthermore, the spatial distribution of AOD classes demonstrated dynamic shifts over time. While the areas covered by very low and moderately high AOD classes decreased, those in the very high AOD class expanded markedly. Specifically, the AOD class area grew from 3.01% of the province's surface in 2001 to 8.02% in 2020. This shift underscores a substantial intensification in the region's frequency and severity of dust storm events.

4- Discussion & Conclusions:

This study's findings indicate a concerning trend of rising dust storm activity in Alborz province, especially in the southern and southwestern regions. Multiple interconnected factors may contribute to this increase. Climate change has caused elevated temperatures and decreased precipitation, leading to drier soils and less vegetation cover, which heightens wind erosion potential. Rapid urban growth and unsustainable land use practices, including overgrazing and unregulated agricultural expansion, have intensified land degradation and desertification, creating favorable conditions for dust storm formation. The surge in very high AOD levels showcases the growing frequency of dust events and underscores a heightened environmental health risk for the province's residents. Increased particulate matter levels worsen respiratory issues, lower life expectancy, and burden public health systems. Additionally, these trends pose challenges to infrastructure, agriculture, and water resources, calling for urgent policy action intervention. To tackle these challenges, it is crucial to implement integrated land management approaches that support vegetation restoration, soil conservation, and sustainable agriculture. Moreover, urban planning should include measures to mitigate dust, particularly in areas at risk. Continued long-term satellite remote sensing monitoring ought to be enhanced with ground-based observations for improved accuracy in assessments. In summary, the rising trend in AOD values and the expansion of high-dust zones in Alborz province clearly signify increasing risks of dust storms. This study offers valuable insights for environmental planners, policymakers, and researchers focused on air quality and public health. It emphasizes the necessity for further research into the underlying causes of dust activity and the creation of predictive models to anticipate future dust storm patterns amid changing climate and land-use scenarios.

Keywords: Dust storms, Aerosol Optical Depth (AOD), Alborz province, remote sensing, satellite imagery

Cite this article: Shaker, M., Eskandari Damaneh, H., & Khosravi, H. (2025). Analyzing the Trends in Aerosol Optical Depth (AOD) Changes Over a 20-Year Period (2001–2020): A Case Study of Alborz Province. *Journal of Environmental Erosion Research*. 2025; 15 (2):110-126. <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.110>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.110>

Published by Hormozgan University Press.

URL: <http://magazine.hormozgan.ac.ir>

بررسی روند تغییرات عمق نوری گرد و غبار استان البرز در بازه‌ی زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

مهدیه شاکر، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت و کنترل بیابان، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

هادی اسکندری دامنه، پژوهشگر بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
حسن خسروی*، استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰)

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.110>

چکیده:

توفان گرد و غبار، فرآیند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر فعل و انفعالات سامانه‌های جوی بوده و شرایطی مانند سرعت زیاد باد، خاک خشک و بدون پوشش یا با پوشش سطحی کم و هوای خشک باعث ایجاد آن می‌شود. این توفان‌ها می‌تواند روی تغییرات آب و هوایی اثر گذاشته و سبب آسیب‌های جدی برای مردم شود. در این پژوهش برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی گرد و غبار در استان البرز از داده‌های سنجش از دوری سنجنده مودیس با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ از ماهواره ترامودیس استفاده گردید. میزان شاخص عمق نوری در یک بازه ۲۰ ساله در ۵ درجه، خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید با استفاده از روش Natural Breaks Classification طبقه‌بندی گردید. بررسی روند تغییرات AOD استان البرز در این بازه زمانی ۲۰ ساله نشان داد، میزان شاخص عمق نوری در جنوب و جنوب غرب استان افزایش یافته است. همچنین بررسی میزان حداقل، حداکثر و متوسط سالانه شاخص عمق نوری نشان داد که در این دوره ۲۰ ساله این شاخص افزایشی بوده به طوریکه میزان حداقل آن از ۰/۰۶ در سال ۲۰۰۱ به ۰/۱۳ در سال ۲۰۱۸، میزان حداکثر از ۰/۱۸ در سال ۲۰۰۱ به ۰/۴۱ در سال ۲۰۰۹ و مقادیر متوسط نیز در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ به بالاترین مقدار یعنی ۰/۱۹ رسیده‌اند. بررسی تغییرات کلاس‌های مختلف با استفاده از روش مد نظر در بازه‌های ۵ ساله، نشان داد که کلاس‌های خیلی کم و شدید، کاهشی و دیگر کلاس‌ها بخصوص کلاس خیلی شدید، افزایشی بوده است به طوریکه از میزان ۳/۰۱ درصد در سال ۲۰۰۱ به میزان ۸/۰۲ درصد در سال ۲۰۲۰ رسیده است.

واژگان کلیدی: استان البرز، تصاویر ماهواره‌ای، سنجش از دور، عمق نوری، گرد و غبار

۱- مقدمه

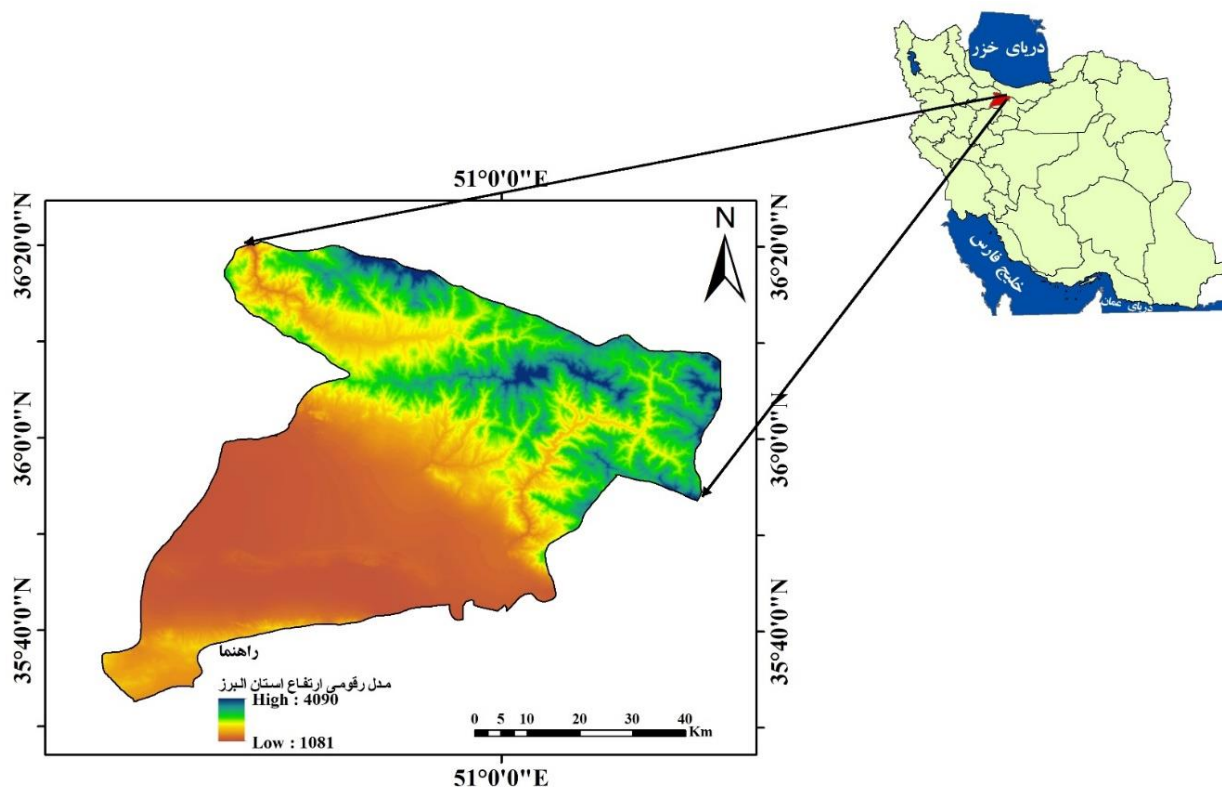
هواویزها عمدتاً از منابع طبیعی مانند فوران‌های آتشفشانی، آتش‌سوزی جنگل‌ها، نمک دریایی تولید شده پس از تبخیر آب دریا و طوفان‌های شن و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند احتراق سوخت‌های فسیلی و سوزاندن زیست‌توده به دست می‌آیند (Guo et al., 2023). این ذرات بسته به خاصیت جذب و پراکندگی خود تأثیر زیادی بر اقلیم یک منطقه دارند. در واقع، ذرات معلق در هوا نقش مهمی در تغییر بودجه تابش زمین، کیفیت هوا، میکروفیزیک ابر و تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند (Mehta et al., 2022). با توجه به نقش مهم هواویزها، بررسی تغییرات مکانی و زمانی و تجزیه و تحلیل روند تغییرات طولانی مدت آن‌ها امری ضروری است. از طرفی این بررسی و تجزیه و تحلیل‌ها می‌تواند به عنوان یک معیار مهم برای تعیین تأثیر آئروسول‌ها بر عوامل محیطی و اقلیمی عمل کند (Qin et al., 2018; Thompson et al., 2014, Ghasemi Aryan et al., 2024). به طوری که با ظهور علم سنجش از راه دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و گسترش علوم محاسباتی، برآورد اطلاعات از ماهواره‌ها سریع‌تر و آسان‌تر شده است. از طرفی مطالعات نشان داده است که محصول عمق نوری آئروسول‌های حاصل از داده‌های ماهواره‌ای ابزاری کارآمد برای بررسی خصوصیات هواویزها است (Cochrane, 2003; YJ, 2002). با توجه به اهمیت این موضوع پژوهشگران و محققان مختلفی برای بررسی این پدیده در داخل و خارج از کشور پرداخته‌اند. Liu و همکاران در سال ۲۰۲۳ در بررسی طوفان‌های آسیای مرکزی در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ داده‌های عمق نوری روزانه محاسبه، استخراج و روندهای بلندمدت غلظت آئروسول را تجزیه و تحلیل کردند، از این طریق منابع گرد و غبار را شناسایی نموده و ویژگی‌های ذرات معلق گرد و غبار را در این منابع نیز مشخص گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که نزدیک به نیمی از مناطق آسیای مرکزی روند افزایشی گرد و غبار در این بازه زمانی تجربه کرده است (Liu et al., 2023). Xiaomin Tian و همکاران ۲۰۲۳ نیز با بررسی توزیع جهانی مکانی-زمانی و تجزیه و تحلیل AOD بر اساس داده‌های سنجنده MODIS طی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۰۳ دریافتند که میانگین سالانه AOD550 در نیمکره شمالی (۰/۱۸۷-۰/۲۰۷) به طور قابل توجهی بالاتر از نیمکره جنوبی (۰/۱۳۵-۰/۱۱۰) است. علاوه بر آن نتایج میانگین ماهانه نشان داد که ذرات معلق در هوا بر روی اقیانوس عمدتاً توسط منابع خشکی (منابع گرد و غبار و زیست توده) می‌باشند و الگوی حمل و نقل اقیانوسی یک چرخه سالانه را ارائه می‌کند (Tian et al., 2023). شیخ قادری و همکاران ۲۰۲۲ با آشکارسازی طوفان گردوغبار با استفاده از مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا و محصول عمق نوری دریافتند که خروجی‌های مدل عددی تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا در هر سه رویداد گردوغبار، مناطق واقع در شمال غرب کشور عراق (مرز بین عراق و سوریه)، مناطق شمال عربستان و مناطق شرقی هورالعظیم در عراق به‌عنوان منابع اصلی گسیل ذرات گردوغبار برای غرب کشور، شناسایی شدند (Sheikhghaderi et al., 2022). اسکندری دامنه و همکاران ۲۰۲۱ در مطالعه خود به بررسی تغییرات مکانی و زمانی عمق نوری و داده‌های اقلیمی کشور ایران در بازه زمانی ۲۰ ساله پرداختند. نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات AOD، پوشش گیاهی و داده‌های اقلیمی نشان داد که روند این پارامترها در مناطق مختلف کشور ایران متفاوت است. به طوریکه شاخص NDVI و بارندگی کشور کاهشی بوده است، این در حالی است که AOD، سرعت باد و دما به ترتیب در کشور روندی رو به افزایش را نشان داده است. (Eskandari Damaneh et al., 2021, b).

همچنین، مطالعات اپیدمیولوژیک ذرات معلق در هوا و سلامت انسان همبستگی بالایی را بین مشکلات سلامت مربوط به تنفس و غلظت آئروسول در هوای بیرون نشان می‌دهد (Banerjee et al., 2018; Kumar et al., 2015). مطالعات اخیر نشان داده است که قرار گرفتن کوتاه مدت در معرض ذرات ریز با قطر کمتر از $2.5 \mu m$ (PM2.5) خطر ابتلا به بیماری‌های حاد قلبی عروقی و تنفسی را افزایش می‌دهد (Pu & Yoo, 2022). بنابراین ضروری است که نظارت مداوم بر ذرات معلق در هوا انجام شود تا تصویر مناسبی از بارگیری آئروسول در جو به دست آید (Sorek-Hamer et al., 2016). استان البرز، که در نزدیکی پایتخت ایران، تهران، واقع شده است، از ویژگی‌های خاصی برخوردار است که موجبات توجه به وضعیت کیفیت هوای این منطقه را فراهم می‌کند. تهران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین کلان‌شهرهای جهان با جمعیتی بالغ بر ۲۰ میلیون نفر، به طور مداوم تحت تأثیر منابع مختلفی از آلاینده قرار دارد. با توجه به نزدیکی استان البرز به تهران و ویژگی‌های خاص این منطقه، تغییرات عمق نوری آئروسول‌ها (AOD) می‌تواند نقش عمده‌ای در تعیین کیفیت هوا و روندهای اقلیمی منطقه ایفا کند. از طرفی دیگر در دهه‌های اخیر اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تالاب صالحیه و اقع در استان البرز و استان قزوین سبب شده تا این تالاب خشک شده و به عنوان یک عامل تهدید کننده استان‌های البرز و تهران به عنوان منبع گرد و غبار باشد. بنابراین هدف از این پژوهش، شناسایی روندهای بلندمدت تغییرات و AOD و تحلیل روند تغییرات عمق نوری آئروسول‌ها در استان البرز طی دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۱) با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها:

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان البرز به مرکزیت شهر کرج وسعتی معادل $175/39$ کیلومترمربع را شامل می‌شود. با عرض جغرافیایی $35^{\circ}53'15''$ تا $35^{\circ}42'1''$ شمالی و طول جغرافیایی آن $51^{\circ}28'58''$ تا $51^{\circ}50'49''$ ثانیه شرقی در دامنه جنوبی رشته کوه البرز را شامل می‌شود. ارتفاع از سطح آب‌های آزاد ۱۰۸۱ تا ۴۰۹۰ متر و شیب غالب آن کمتر از ۱۵ درصد و در جهت جنوبی غالب است. اقلیم آن به صورت نیمه‌خشک و سرد و متوسط دمای روزانه با طول بازگشت ۲۱ سال برابر با $15/8$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین میزان بارش به ثبت رسیده به صورت میانگین سالانه ۲۲۴ میلی‌متر می‌باشد (باقرآبادی و همکاران، ۱۴۰۰). در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است (Bagherabadi & Moeinaddini, 2021).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و تغییرات ارتفاعی آن

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه برای بررسی تغییرات عمق نوری از داده‌های سنجنده مودیس ترا و آکوا MCD19A2 استفاده شد. این تولیدات، داده‌های عمق نوری را به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از سال ۲۰۰۰ در اختیار محققین قرار می‌دهند. که در این تحقیق برای بررسی عمق نوری استان البرز در بازه زمانی سالانه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ از این محصولات استفاده گردید. این محصولات از سایت ناسا (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>) تهیه گردید. پرتو سنجهای MODIS از سال ۲۰۰۰ در ترا و از سال ۲۰۰۲ در آکوا کار می‌کنند و محصولات بازیابی ویژگی‌های آئروسول و ابر را با پوشش جهانی هر یک یا دو روز یک بار ارائه می‌کنند (Levy et al., 2007; Remer et al., 2005,). (Eskandari Damaneh et al, 2021, a). ترا حدود ساعت ۱۰:۳۰ به وقت محلی در جهت شمال به جنوب از خط استوا می‌گذرد و در ساعت ۱۳:۳۰ از آکوا در جهت جنوب به شمال می‌گذرد. (Rubin & Collins, 2014).

۲-۳- پیش پردازش داده‌ها

در مرحله پیش پردازش، داده‌های خام با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تصحیح شدند تا تأثیرات عوامل مختلفی همچون پوشش ابر، تغییرات در وضعیت سنجنده و نویزهای موجود در داده‌ها کاهش یابد. همچنین، داده‌ها به سیستم مختصات جغرافیایی منطقه‌ای استان البرز تبدیل شدند.

۲-۴- تحلیل مکانی و زمانی تغییرات عمق نوری

تحلیل روند زمانی عمق نوری در این مرحله، برای بررسی روند تغییرات AOD در استان البرز، از روش‌های آماری رگرسیون خطی استفاده شد. روند تغییرات AOD در بازه‌های زمانی ده‌ساله (۲۰۱۰-۲۰۲۰ و ۲۰۲۰-۲۰۳۰) مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، رگرسیون خطی به منظور محاسبه شیب تغییرات و ضریب تبیین (R^2) در هر دهه استفاده شد. و نمودارهای مربوط به روند تغییرات عمق نوری در سال‌های مختلف ترسیم گردید. سپس از نرم‌افزار ArcGIS به منظور استخراج نقشه‌های مکانی تغییرات AOD استفاده شد. نقشه‌ها با استفاده از عملیات استخراج داده‌های مکانی و تحلیل رستر تولید شدند. این نقشه‌ها امکان تحلیل توزیع مکانی غلظت گرد و غبار را در سطح استان البرز فراهم کردند.

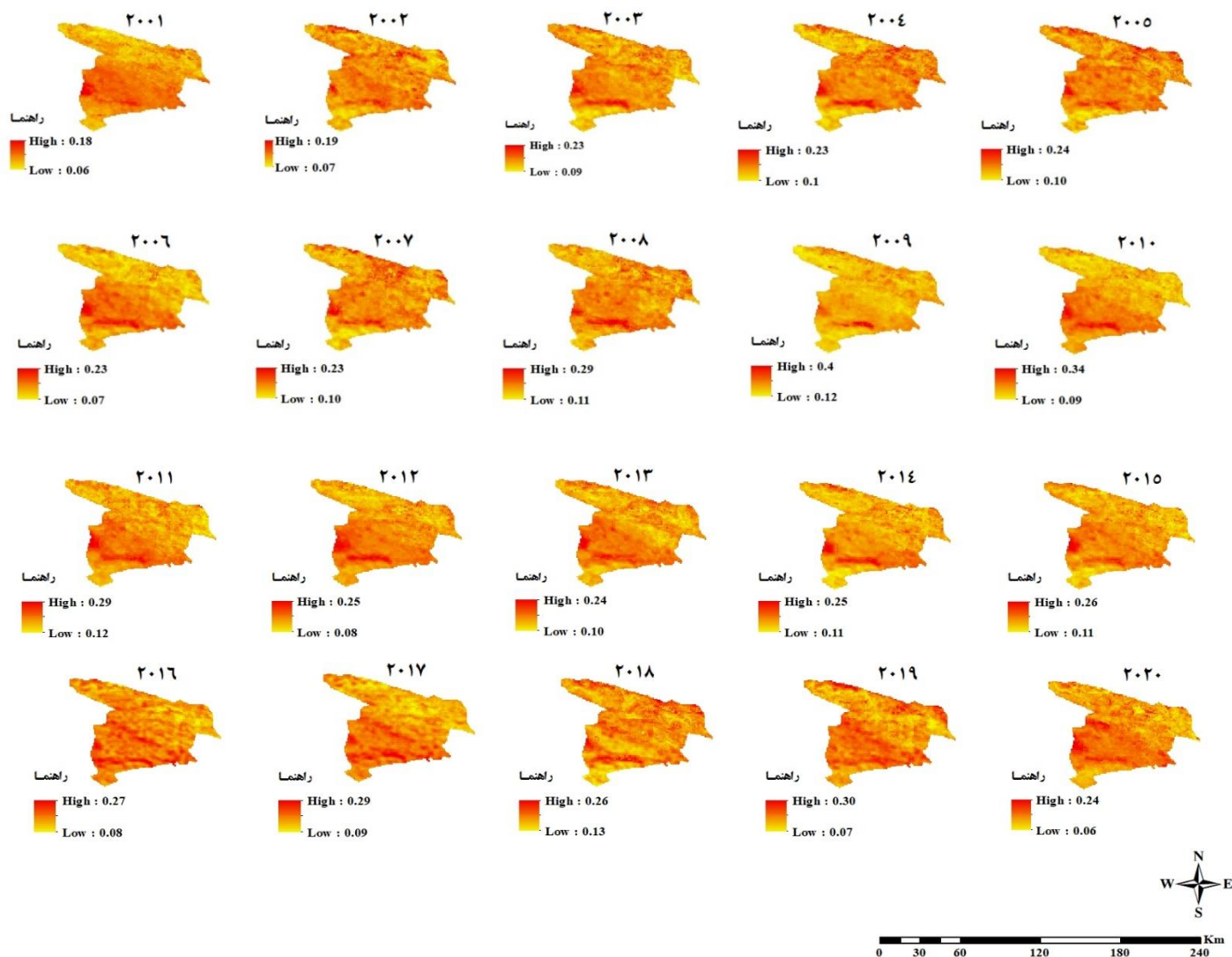
۲-۵- طبقه‌بندی تغییرات عمق نوری

برای ارائه تحلیل دقیق‌تر از تغییرات AOD در این تحقیق، داده‌های عمق نوری با استفاده از روش Natural Breaks Classification به کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی شدند. کلاس‌ها و طبقه‌بندی در این روش بر اساس گروه‌بندی‌های طبیعی ذاتی در هر گروه تعیین می‌شود. شکست کلاس‌ها یا حد آستانه هر کلاس و طبقه در واقع تعیین کننده این حالت است که عوارض این گروه بیشترین شباهت را دارند و از طرفی کلاس‌ها نیز بیشترین تفاوت را با یکدیگر نشان می‌دهند. این طبقه‌بندی بر اساس مقادیر AOD در پنج سطح مختلف خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید انجام شد. این طبقه‌بندی با استفاده از روش‌های آماری و تحلیل‌های داده‌های فضایی در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. مساحت هر کلاس در هر سال محاسبه شد تا تغییرات مساحت کلاس‌ها در بازه‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

۳- نتایج

۱-۳- روند تغییرات متوسط عمق نوری در کلاس‌های مختلف در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۳۰

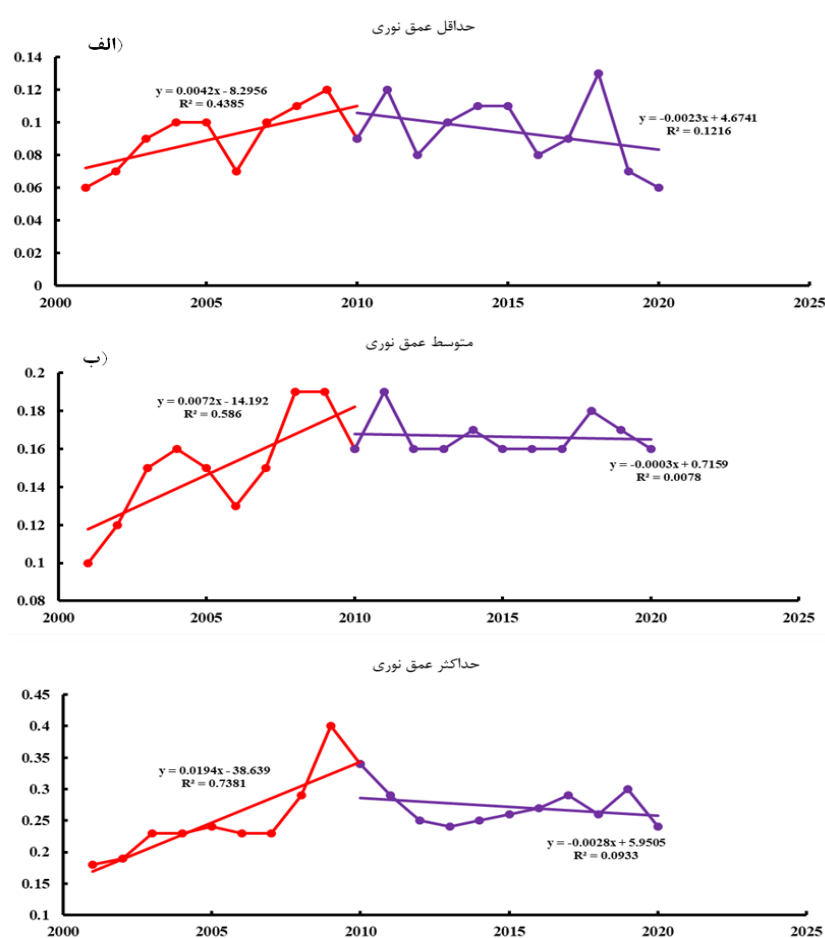
با هدف نمایش و توزیع مکانی غلظت گرد و غبار در محدوده مورد مطالعه، نقشه میزان تغییرات عمق نوری برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ استخراج شد. بر اساس نقشه‌های بدست آمده در شکل ۲ حداکثر میزان تغییر در عمق نوری برابر با ۰/۴۰ و حداقل عمق نوری برابر ۰/۰۶ می‌باشد. همچنین بررسی تغییرات مکانی در این شکل نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این شاخص در قسمت‌های جنوب و جنوب غربی مشاهده شده است که در سال‌های اخیر در این قسمت‌ها بیشتر شده است. همچنین مقادیر کمتر این شاخص بیشتر در قسمت شمالی استان مشاهده شده است.



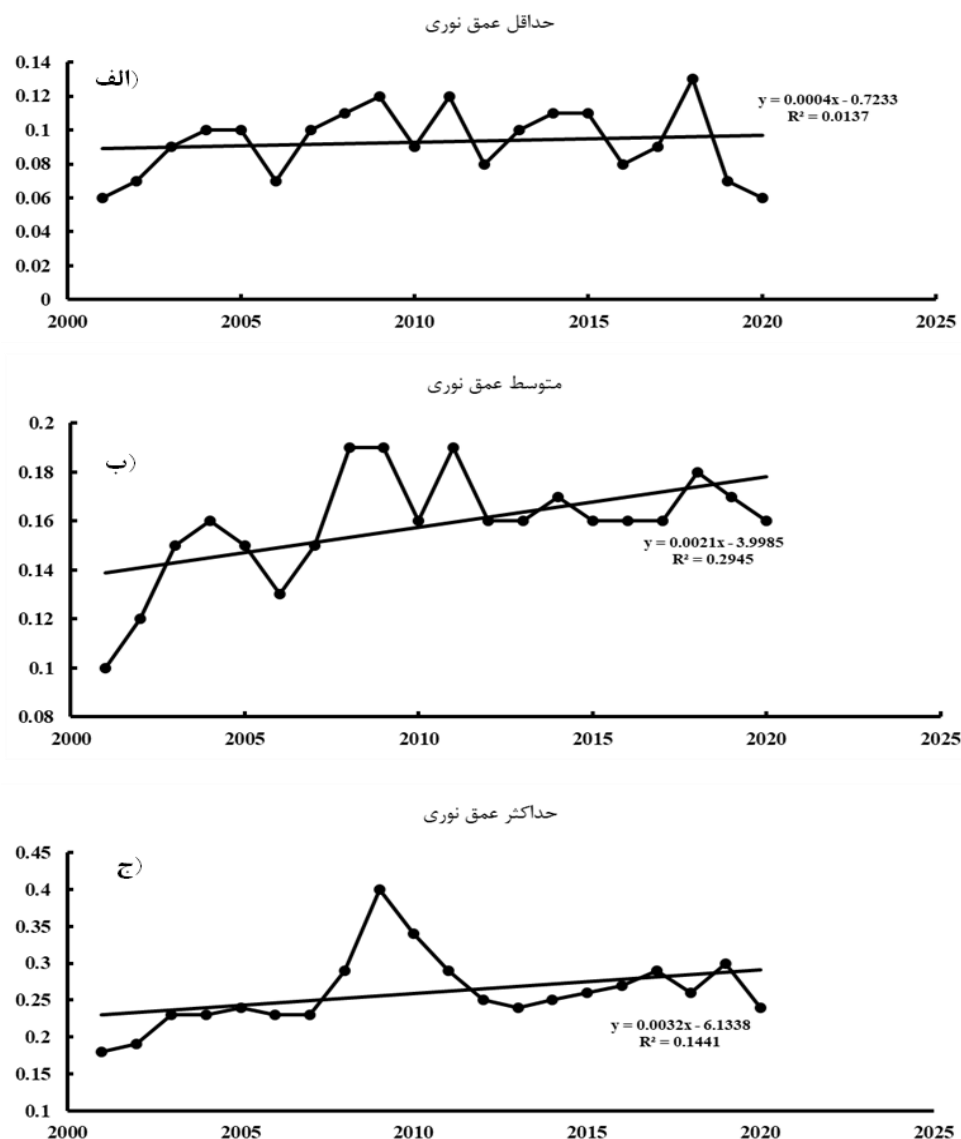
شکل ۲: روند تغییرات مکانی متوسط سالانه عمق نوری در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰

نتایج بررسی تغییرات AOD در شکل ۳ نشان داد که در این بازه زمانی ۲۰ ساله روند تغییرات افزایشی بوده است. این افزایش روند در هر دو بازه زمانی ده ساله مورد مطالعه مشهود است به طوری که روند افزایش حداقل عمق نوری در ۱۰ سال اولیه (۲۰۱۰ تا ۲۰۰۰) برابر با میزان شیب 0.0044 و ضریب تبیین 0.49 و در ده سال دوم (۲۰۲۰ تا ۲۰۱۰) برابر با میزان شیب 0.002 و ضریب تبیین 0.96 بوده است. همچنین این روند برای حداکثر عمق نوری در ده سال اول و دوم به ترتیب برابر با میزان شیب 0.0192 و 0.0028 و ضریب تبیین 0.73 و 0.93 می باشد. علاوه بر آن مقدار متوسط عمق نوری نیز دارای روندی افزایشی در بازه ۲۰ ساله بوده به طوری که در ده سال اول شیب تغییرات و ضریب تبیین به ترتیب برابر با 0.0072 و 0.58 بوده است. حداقل مقدار متوسط شاخص AOD در سال ۲۰۰۱ برابر با 0.1 و حداکثر مقدار متوسط

این شاخص در سال های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ حدود ۰/۱۹ مشاهده شده است. به منظور بررسی کلی در شکل ۴ شیب تغییرات و ضریب تبیین در یک بازه ۲۰ ساله پیوسته در حداکثر، متوسط و حداقل عمق نوری اندازه گیری شد که برای حداقل عمق نوری شیب تغییرات و ضریب تبیین به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۱۳ و برای متوسط عمق نوری ضریب تبیین برابر با ۰/۲۹۴ و شیب تغییرات ۰/۰۰۲ اندازه گیری شد. این مقادیر برای درجه حداکثر عمق نوری، با شیب تغییرات ۰/۰۳۲ و ضریب تبیین ۰/۱۴۴ ثبت گردید.



شکل ۳: نمودار تغییرات شاخص عمق نوری در روند ۱۰ ساله (الف) حداقل عمق نوری، (ب) حداکثر عمق نوری، (ج) متوسط عمق نوری



شکل ۴: نمودار تغییرات شاخص عمق نوری در روند ۲۰ ساله (AOD الف) حداقل عمق نوری، ب) حداکثر عمق نوری، ج) متوسط عمق نوری

تغییرات عمق نوری در کلاس بازه زمانی ۵ ساله در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۰

میزان شاخص عمق نوری در یک بازه ۲۰ ساله در ۵ کلاس، خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید به روش Natural Breaks طبقه‌بندی شد. در بازه‌های ۵ ساله جداگانه مساحت هر کلاس طبقه‌بندی تغییراتی داشته است، در سال ۲۰۰۱ مساحت کلاس خیلی کم برابر با ۹۱۵/۳۶ کیلومتر مربع، کلاس کم برابر با ۱۳۳۲/۴۲ کیلومتر مربع، کلاس متوسط حدود ۱۴۴۰/۱۱ کیلومتر مربع، کلاس شدید برابر با ۱۵۵/۸۰ کیلومتر مربع و در نهایت کلاس خیلی شدید برابر با ۱۵۵/۸۰ کیلومتر مربع معادل ۳/۰۱ درصد می‌باشد. در سال ۲۰۰۵ میزان کلاس خیلی کم روندی کاهشی داشته و در مقابل آن کلاس‌های کم و متوسط

روندی افزایشی را از خود نشان می‌دهند به طوری که مساحت آن‌ها به ترتیب از مقدار ۱۳۳۲/۴۲ و ۱۴۴۰/۱۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۱ به مقدار ۱۵۱۹/۲۰ و ۱۷۵۲/۲۵ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۵ رسیده است. با توجه به جدول ۱ می‌توان دریافت که کلاس شدید و خیلی شدید در سال ۲۰۰۵ به ترتیب کاهشی و افزایشی بوده اند. در سال ۲۰۱۰ نیز بیشترین تغییرات مساحت مربوط به افزایش مساحت کلاس طبقه بندی کم و خیلی کم نسبت به سال ۲۰۰۵ می‌باشد. به طوری که میزان کلاس کم، از ۲۹/۳۹ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۳۱/۲۰ درصد در سال ۲۰۱۰ و میزان کلاس خیلی کم، از ۱۴/۷۰ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۲۰/۳۷ درصد در سال ۲۰۱۰ رسیده است. این تغییرات در سال ۲۰۱۵ برای تمامی کلاس‌های طبقه بندی به جز کلاس طبقه بندی خیلی کم روندی کاهشی داشته است همچنین روند کلی تغییرات شاخص عمق نوری در بازه ۲۰ ساله نیز در کلاس‌های خیلی کم و شدید کاهشی و در دیگر کلاس‌ها بخصوص کلاس خیلی شدید، افزایشی بوده است. شکل ۵ نیز میانگین ۲۰ ساله هر کلاس طبقه بندی را نشان می‌دهد که این مقدار برای کلاس خیلی کم برابر با ۸۴۲/۰۵ کیلومتر مربع، کلاس کم ۱۴۸۳/۰۹ کیلومتر مربع، کلاس متوسط ۱۵۷۳/۸۸ کیلومتر مربع، کلاس شدید ۱۰۰۱/۱۱ کیلومتر مربع و کلاس خیلی شدید برابر با ۲۶۹/۷۱ کیلومتر مربع می‌باشد.

جدول ۱: میزان تغییرات شاخص عمق نوری در بازه زمانی ۲۰ ساله بر حسب کیلومتر مربع و درصد الف: بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵. ب: بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰. ج: بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵. د: بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰

الف

درجه	خیلی کم		کم		متوسط		شدید		خیلی شدید		مساحت کل	
	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد
۲۰۰۱	۹۱۵/۳۶	۱۷/۷۱	۱۳۳۲/۴۲	۲۵/۷۷	۱۴۴۰/۱۱	۲۷/۸۶	۱۳۲۶/۱۵	۲۵/۶۵	۱۵۵/۸۰	۳/۰۱	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۲	۶۹۷/۲۹	۱۳/۴۹	۱۳۷۵/۶۶	۲۶/۶۱	۱۷۴۸/۵۸	۳۳/۸۲	۱۱۳۶/۸۱	۲۱/۹۹	۲۱۱/۵۱	۴/۰۹	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۳	۵۱۰/۱۵	۱۵/۶۷	۱۵۶۸/۷۴	۳۰/۳۴	۱۶۸۴/۲۵	۳۲/۵۸	۸۷۹/۴۲	۱۷/۰۱	۲۲۷/۲۷	۴/۴۰	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۴	۸۷۷/۰۱	۱۶/۹۶	۱۳۴۱/۷۲	۲۵/۹۵	۱۶۵۱/۷۴	۳۱/۹۵	۹۹۶/۸۷	۱۹/۲۸	۳۰۲/۴۸	۵/۸۵	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۵	۷۵۹/۹۴	۱۴/۷۰	۱۵۱۹/۲۰	۲۹/۳۹	۱۷۵۲/۲۵	۳۳/۸۹	۹۱۳/۴۱	۱۷/۶۷	۲۲۵/۰۴	۴/۳۵	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰

ب

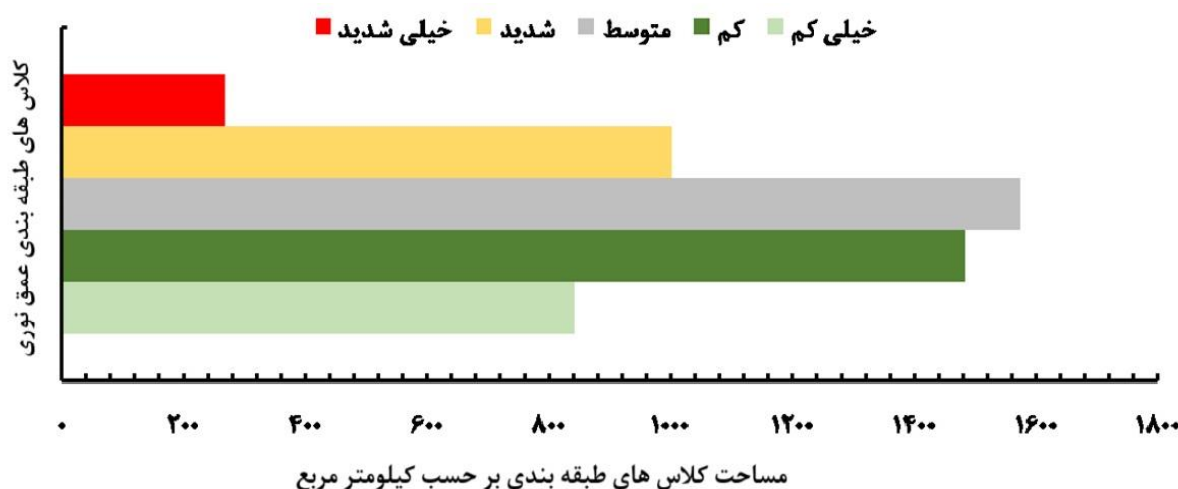
درجه	خیلی کم		کم		متوسط		شدید		خیلی شدید		مساحت کل	
	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد
۲۰۰۶	۱۱۴۸/۹۶	۲۲/۲۲	۱۴۶۴/۳۲	۲۸/۳۲	۱۱۹۸/۷۱	۲۳/۱۹	۱۱۰۱/۲۲	۲۱/۳۰	۲۵۶/۶۳	۴/۹۶	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۷	۶۸۰/۳۲	۱۳/۱۶	۱۴۲۴/۴۹	۲۷/۵۵	۱۷۲۹/۱۹	۳۳/۴۵	۱۰۲۸/۴۴	۱۹/۸۹	۳۰۷/۴۰	۵/۹۵	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۸	۸۲۵/۹۲	۱۵/۹۸	۱۴۳۲/۳۵	۲۷/۷۱	۱۸۴۳/۸۷	۳۵/۶۷	۸۲۳/۲۸	۱۵/۹۲	۲۴۴/۴۳	۴/۷۳	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۰۹	۱۰۶۴/۹۸	۲۰/۶۰	۱۸۱۷/۸۷	۳۵/۱۶	۱۷۰۳/۸۲	۳۲/۹۶	۵۱۸/۴۵	۱۰/۰۳	۶۴/۷۲	۱/۲۵	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۰	۱۰۵۲/۸۹	۲۰/۳۷	۱۶۱۲/۸۷	۳۱/۲۰	۱۲۹۶/۳۷	۲۵/۰۸	۹۸۱/۴۵	۱۸/۹۸	۲۲۶/۲۵	۴/۳۸	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰

ج

درجه	خیلی کم		کم		متوسط		شدید		خیلی شدید		مساحت کل	
	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد
۲۰۱۱	۸۷۲/۷۷	۱۶/۸۸	۱۵۴۵/۶۱	۲۹/۹۰	۱۴۸۳/۹۸	۲۸/۷۰	۱۰۰۵/۰۱	۱۹/۴۴	۲۶۲/۴۷	۵/۰۸	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۲	۷۴۷/۸۳	۱۴/۴۷	۱۴۹۴/۰۲	۲۸/۹۰	۱۷۱۶/۶۴	۳۳/۲۰	۹۰۸/۰۰۴	۱۷/۵۶	۳۰۳/۳۵	۵/۸۷	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۳	۹۰۲/۸۴	۱۷/۴۶	۱۴۱۰/۷۳	۲۷/۲۹	۱۴۹۳/۷۲	۲۸/۸۹	۱۱۳۳/۰۸	۲۱/۹۲	۲۲۹/۴۸	۴/۴۴	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۴	۱۰۸۶/۷۸	۲۱/۰۲	۱۶۸۷/۰۲	۳۲/۶۳	۱۴۷۷/۳۱	۲۸/۵۸	۷۰۵/۰۲	۱۳/۶۴	۲۱۳/۷۱	۴/۱۳	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۵	۸۸۰/۶۱	۱۷/۰۳	۱۵۳۳/۴۰	۲۹/۶۶	۱۶۷۱/۰۱	۳۲/۳۲	۹۲۵/۳۴	۱۷/۹۰	۱۵۹/۴۶	۳/۰۸	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰

د

درجه	خیلی کم		کم		متوسط		شدید		خیلی شدید		مساحت کل	
	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد	کیلومتر مربع	درصد
۲۰۱۶	۵۵۵/۰۲	۱۰/۷۴	۱۴۰۱/۳۵	۲۷/۱۱	۱۸۲۳/۳۴	۳۵/۲۷	۱۰۲۴/۶۴	۱۹/۸۲	۳۶۵/۴۸	۷/۰۷	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۷	۸۲۸/۵۳	۱۶/۰۳	۱۳۹۹/۰۷	۲۷/۰۶	۱۶۱۵/۶۸	۳۱/۲۵	۹۵۷/۳۴	۱۸/۵۲	۳۶۹/۲۱	۷/۱۴	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۸	۸۶۳/۶۷	۱۶/۷۱	۱۵۵۲/۷۷	۳۰/۰۴	۱۲۳۵/۲۶	۲۳/۸۹	۱۱۰۸/۲۴	۲۱/۴۴	۴۰۹/۹۰	۷/۹۳	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۱۹	۶۵۴/۲۸	۱۲/۶۶	۱۳۳۱/۳۳	۲۵/۷۵	۱۴۱۹/۲۵	۲۷/۴۵	۱۳۲۰/۱۵	۲۵/۵۴	۴۴۴/۸۲	۸/۶۰	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰
۲۰۲۰	۶۱۵/۸۸	۱۱/۹۱	۱۴۱۶/۹۳	۲۷/۴۱	۱۴۹۲/۴۳	۲۸/۸۷	۱۲۲۹/۸۳	۲۳/۷۹	۴۱۴/۷۷	۸/۰۲	۵۱۶۹/۸۶	۱۰۰



شکل ۵: میانگین تغییرات مساحت ۲۰ ساله شاخص های طبقه بندی

۴- بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش برای بررسی روند تغییرات عمق نوری در استان البرز داده های روزانه سنجنده مودیس ترا و آکوا MCD19A2 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ استفاده گردید. نتایج بررسی روند تغییرات AOD نشان داد که مقدار این شاخص از سال ۲۰۰۸ روندی افزایشی را طی نموده است. با توجه به نقشه های مکانی، میانگین عمق نوری در قسمت های جنوب و جنوب غربی استان البرز حداکثر بوده است. در میان این دوره ۲۰ ساله، حداکثر مقدار عمق نوری در سال ۲۰۰۹ نشان داده شده که برابر با میزان ۰/۴۰ می باشد. بالاترین میزان متوسط عمق نوری با مقدار ۰/۱۹ نیز برای سال های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ می باشد. همچنین برای حداقل شاخص عمق نوری، مقدار ۰/۱۲ برای سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ نشان داده شد.

نتایج نشان داد که میزان شاخص عمق نوری در بازه ۲۰ ساله روندی افزایشی داشته است که این افزایش میتواند ناشی از تغییرات موجود در منطقه نیز باشد. نتایج مطالعه علی پور و همکاران (۲۰۱۸) نشان می دهد عوامل اقلیمی از جمله خشکسالی نیز در افزایش میزان گرد و غبار در استان البرز تاثیر گذار بوده است. بررسی خشکسالی در مقیاس سالانه در دوره آماری ۲۰۰۴-۲۰۰۰ نشان داد که در ایستگاه کرج خشکسالی های شدید و متوسط اتفاق افتاده است. نتایج باقرپور و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۳، روند کلی تغییرات رطوبت در تالاب صالحیه کاهش یافته بوده که ضمن این کاهش رطوبت، بستر تالاب خشک و مستعد فرسایش بادی گردیده که به موجب آن مشکلات گرد و غبار و همچنین افزایش عمق نوری گسترش یافته است. اسکندری دامنه و همکاران (۲۰۲۱) نیز در پژوهش خود به ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی عمق نورری و داده های اقلیمی پرداختند و نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات مذکور نشان داد که روند این پارامترها در مناطق مختلف کشور متفاوت می باشد. به طوری که شاخص NDVI و بارندگی به ترتیب ۸۵/۱۳ و ۶۷/۵۷

درصد کشور کاهشی بوده است این در حالی است که AOD، سرعت باد و دما به ترتیب در ۷۱/۴۳، ۷۱/۸۶ و ۹۹/۳۷ درصد از سطح کشور افزایش نشان داده است (Eskandari Damaneh et al., 2021, a). رمی و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود به آنالیز اتمسفریک طوفان‌های گرد و غبار در منطقه‌ی آسیای مرکزی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور پرداختند نتایج بررسی مناطق تاثیرگذار ناشی از توده‌های گرد و غبار نشان می‌دهد که دریای خشک آرال، غرب ازبکستان و مناطق غربی ترکمنستان دارای بیشترین میزان AOD و بار گردوغبار هستند. براساس مطالعات، بیشترین فعالیت‌های شدید گردوغبار در آسیای مرکزی، در بهار و تابستان، در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، جولای و آگوست، رخ داده و براساس نتایج به دست آمده، حداکثر میزان بار گردوغبار در منطقه در مواردی به بیش از ۷ گرم بر مترمربع می‌رسد.

نتایج تحلیل مکانی نشان داد که بالاترین مقادیر AOD در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ مشاهده شده که این سال‌ها همزمان با وقوع پدیده‌های شدید گرد و غبار بوده‌اند. مناطق جنوبی و جنوب‌غربی استان به‌عنوان نواحی با بالاترین مقادیر AOD شناسایی شدند. با توجه به نتایج حاصل از طبقه‌بندی داده‌ها به پنج کلاس (خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید)، مشاهده شد که در ابتدای دوره مورد مطالعه، بیشترین مساحت به کلاس‌های "خیلی کم" و "کم" اختصاص داشت، اما به تدریج با گذشت زمان، مساحت کلاس‌های "کم" و "متوسط" افزایش یافته است. این تغییرات می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی، و به‌ویژه خشکسالی‌های متعدد در سال‌های اخیر باشد. که در پژوهش اسکندری دامنه و قاسمی آریان (۲۰۲۴) نیز تایید شد. در پژوهش مذکور به بررسی روند و تبیین پیشران‌های کلیدی بیابان‌زایی و تخریب سرزمین در تالاب صالحیه و شور هزار دشت مرکزی قزوین پرداخته شد که نتایج حاصل از آن نشان داد بستر آبی تالاب در سال‌های ۱۳۶۶، ۱۳۷۷ و ۱۳۸۷ به ترتیب ۸۹۲۲/۳۶، ۲۸۴۴/۰۲ و ۱۱۳۵/۲۸ هکتار بوده است، که این مساحت در سال‌های بعد از احداث زهکش یعنی سال‌های ۱۳۹۷، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به ترتیب به ۹۲۱/۰۱، ۴۰۹/۳۸ و ۱۶۷/۵۴ هکتار کاهش یافته است. نتایج این تحقیق نشان داد که تخریب سرزمین در تالاب صالحیه و شور هزار دشت مرکزی قزوین، گویای تأثیر جدی فعالیت‌های انسانی بر وضع موجود تالاب است که به موجب آن بستر مناسبی برای فرسایش و ایجاد طوفان‌های گردوغبار را فراهم می‌کند.

در حالت کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تحلیل تغییرات شاخص عمق نوری (AOD) در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰، روند افزایشی این شاخص را در تمامی مراحل زمانی مورد بررسی نشان داد. در این بازه زمانی ۲۰ ساله، تغییرات مکانی و زمانی غلظت گرد و غبار به‌وضوح در قسمت‌های جنوبی و جنوب‌غربی منطقه مشاهده شد که این نواحی نسبت به سایر بخش‌ها افزایش معناداری در عمق نوری داشته‌اند. از سوی دیگر، بخش‌های شمالی استان کاهش عمق نوری را تجربه کرده‌اند. نتایج تحلیل‌های آماری در دو بازه زمانی ده‌ساله (۲۰۱۰-۲۰۲۰ و ۲۰۱۰-۲۰۲۰) نیز مؤید روند افزایشی در شاخص AOD بود، به‌طوری‌که شیب‌های مثبت معناداری برای حداقل و حداکثر عمق نوری در هر دو بازه زمانی مشاهده شد. علاوه بر این، بررسی طبقه‌بندی مکانی عمق نوری در کلاس‌های مختلف نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در مساحت‌های هر کلاس

طی بازه زمانی ۲۰ ساله بود. کلاس‌های با عمق نوری کم و خیلی کم در ابتدا روند کاهشی داشته‌اند، در حالی که کلاس‌های با عمق نوری شدید و خیلی شدید روند افزایشی را تجربه کرده‌اند. این نتایج بیانگر افزایش قابل توجه غلظت گرد و غبار در نواحی خاص و تغییرات ساختاری در الگوی توزیع آن در سطح منطقه است. این یافته‌ها می‌تواند برای مدیریت و برنامه‌ریزی‌های محیطی و مقابله با اثرات منفی گرد و غبار در این منطقه اهمیت ویژه‌ای داشته باشد همچنین برای بهبود دقت بیشتر نیز پیشنهاد می‌شود که روند تغییرات AOD در مقیاس‌های فصلی و ماهانه نیز بررسی شود تا تأثیرات فصول مختلف سال بر روی غلظت گرد و غبار مشخص گردد. و ضمن آن، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مانند مدل HYSPLIT برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی مسیر حرکت و منبع‌یابی گرد و غبار در استان البرز پیشنهاد می‌شود. این مدل‌ها می‌توانند در شبیه‌سازی پدیده‌های گرد و غبار و مدیریت بحران‌های ناشی از آن مؤثر واقع شوند.

منابع:

1. Alipour, N., Mesbahzadeh, T., Ahmadi, H., Malekian, A. and Jafari, M. (2018). Synoptic analysis of dust events and its relation with drought in Alborz and Qazvin provinces. *Geography (Regional Planning)*, 8(30), 59-68
2. Bagherabadi, R., & Moeinaddini, M. (2021). Dust storms directional source identification of Karaj. *Journal of Climate Research*, 1400(47), 141-155. https://clima.irimo.ir/article_142697_75e0e78a71f793b7ce0655a250183c5b.pdf
3. Bagherpour, M., Tabatabaie, F., Zare, S., Nazari Samani, A. A., & Ghoohestani, G. (2023). Evaluating the changes in the water body of Salehiyeh Wetland caused by the construction of drainage. *Journal of Arid Biome*, 13(2), 107-123. https://aridbiom.yazd.ac.ir/article_3316.html?lang=en#:~:text=10.29252/ARIDBIOM.2024.20315.1942
4. Banerjee, T., Kumar, M., & Singh, N. (2018). Aerosol, climate, and sustainability. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09914-6>
5. Cochrane, M. A. (2003). Fire science for rainforests. *Nature*, 421(6926), 913-919. <http://dx.doi.org/10.1038/nature01437>
6. Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khoorani, A. and Li, J. (2021,a). Assessing the land degradation using water use efficiency (WUE) and drought indices (case study: Fars province). *Journal of Range and Watershed Managment*, 74(1), 103-120. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.314310.1550>
7. Eskandari damaneh, H. and Ghasemi Aryan, Y. (2024). Investigating the trend and explaining the key drivers of desertification and land degradation in Salehiyeh wetland and Qazvin salt plain. *Integrated Watershed Management*, (), -. doi: 10.22034/iwm.2024.2026209.1146 https://iwm.ilam.ac.ir/article_714316.html?lang=en#:~:text=10.22034/IWM.2024.2026209.1146
8. Eskandari Damaneh, h., Eskandari Damaneh, H., Sayadi, Z., & Khoorani, A. (2021, b). Evaluation of spatiotemporal changes and correclations of aerosol optical depth, NDVI and climatic data over Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(4), 772-786. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125252>
9. Ghasemi Aryan, Y., Eskandari Damaneh, H., Haghani, G., Mohammadi Roudbari, M., Jafarian, V., Eskandari Damaneh, H., Hajibaglou, A. and Ziaee, N. (2024). Investigating the trend and determining the characteristics of critical wind and dust erosion hotspots in Sarakhs County. *Journal of Arid Biome*, 14(2), 61-74. <https://doi: 10.29252/aridbiom.2025.22155.2028>

10. Guo, B., Wang, Z., Pei, L., Zhu, X., Chen, Q., Wu, H., Zhang, W., & Zhang, D. (2023). Reconstructing MODIS aerosol optical depth and exploring dynamic and influential factors of AOD via random forest at the global scale. *Atmospheric Environment*, 315, 120159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120159>
11. Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., & Nieuwenhuijsen, M. (2021). Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *The Lancet Planetary Health*, 5(3), e121-e134. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2)
12. Kumar, M., Singh, R., & Banerjee, T. (2015). Associating airborne particulates and human health: Exploring possibilities: Comment on: Kim, Ki-Hyun, Kabir, E. and Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International* 74 (2015) 136-143. *Environment International*, 84, 201-202. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2015EnInt..84..201K/doi:10.1016/j.envint.2015.06.002
13. Lelieveld, J., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Haines, A., & Münzel, T. (2020). Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovascular research*, 116(11), 1910-1917. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>
14. Levy, R. C., Remer, L. A., Mattoo, S., Vermote, E. F & ,Kaufman, Y. J. (2007). Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D13). <https://doi.org/10.1029/2006JD007811>
15. Liu, J., Ding, J., Li, X., Zhang, J., & Liu, B. (2023). Identification of dust aerosols, their sources, and the effect of soil moisture in Central Asia. *Science of The Total Environment*, 868, 161575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161575>
16. Liu, J., Ding, J., Li, X., Zhang, J., & Liu, B. (2023). Identification of dust aerosols, their sources, and the effect of soil moisture in Central Asia. *Science of The Total Environment*, 868, 161575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161575>
17. Mehta, M., Jain, A., & Chauhan, P. (2022). Aerosol optical depth retrieval over land from OCEANSAT-2/ OCM- 2 data – A simple physics based approach. *Atmospheric Pollution Research*, 13(3), 101339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101339>
18. Pu ,Q., & Yoo, E.-H. (2022). A gap-filling hybrid approach for hourly PM2.5 prediction at high spatial resolution from multi-sourced AOD data. *Environmental Pollution*, 315, 120419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120419>
19. Qin, W., Liu, Y., Wang, L., Lin, A., Xia, X., Che, H., Bilal, M., & Zhang, M. (2018). Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over mainland China during 1980–2017. *Remote Sensing*, 10(7), 1064. <https://doi.org/10.3390/rs10071064>
20. Rami, A., Hamidi, M., & Navayi Neya, B. (2022). Atmospheric Analysis of Dust Storms in Central Asia Region using remote sensing. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, -. <https://doi.org/10.22034/jcee.2022.47077.2054>
21. Remer, L. A., Kaufman, Y., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D., Martins, J. V., Li, R.-R., Ichoku, C., Levy, R., & Kleidman, R. (2005). The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(4), 947-973. <https://doi.org/10.1175/JAS3385.1>

22. Rubin, J., & Collins, W. (2014). (Global simulations of aerosol amount and size using MODIS observations assimilated with an Ensemble Kalman Filter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(22), 12,780-712,806. <https://doi.org/10.1002/2014JD021627>
23. Sheikhghaderi, S. H., Alizadeh, T., & Rezaei Banafsheh, M. (2022). Dust Storm Detection using Weather Rcscarch Forcast-CHEM Model and Aerosol Optical Depth Product Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer Sensor (Case Study: Kermanshah) [Original Research]. *Geographical Researches*, 37(3), 313-326. <http://georesearch.ir/article-1-1348-en.html>
- Cochrane, M. A. (2003). Fire science for rainforests. *Nature*, 421(6926), 913-919. <http://dx.doi.org/10.29252/geores.37.3.313>
24. Sheikhghaderi, S. H., Alizadeh, T., & Rezaei Banafsheh, M. (2022). Dust Storm Detection using Weather Rcscarch Forcast-CHEM Model and Aerosol Optical Depth Product Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer Sensor (Case Study: Kermanshah) [Original Research]. *Geographical Researches*, 37(3), 313-326. <http://georesearch.ir/article-1-1348-en.html>
25. Sorek-Hamer, M., Just, A. C., & Kloog, I. (2016). The use of satellite remote sensing in epidemiological studies. *Current opinion in pediatrics*, 28(2), 228. <https://doi.org/10.1097/mop.0000000000000326>
26. Thompson, T. M., Rausch, S., Saari, R. K., & Selin, N. E. (2014). A systems approach to evaluating the air quality co-benefits of US carbon policies. *Nature Climate Change*, 4(10), 917-923. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2342>
27. YJ, K. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419, 215-223. <http://dx.doi.org/10.1038/nature01091>