



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 36, Issue 3, No.99, 2025, pp. 157- 184

Received: 27/11/2024 Accepted: 29/10/2025

Identifying the Synoptic Patterns Generating Dust Storms in the Ardabil Plain and Their Local Origin

Boroumand Salahi  *

Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
Salahi@uma.ac.ir

Mahmoud Behrouzi

Ph.D. in Climatology, Marine Science Institute, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
behrouzimahmoud@gmail.com

Mahnaz Saber

Postdoctoral Researcher of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
mahnaz.saber@uma.ac.ir

Abstract

This study analyzed wind direction and speed data from 2000 to 2018 to identify the high winds responsible for dust events in the Ardabil Plain. To uncover the atmospheric patterns leading to dust formation, sea level pressure maps were constructed for dusty days and dust trajectories were tracked using the HYSPLIT model. The atmospheric Dust Column Mass Density (DCMD) and Aerosol Optical Depth (AOD) were employed to determine dust column concentration in the Ardabil Plain. The findings highlighted the significant influence of surface pressure systems, which contributed to dust storms by inducing instability in the region. The analysis indicated that local sources heavily influenced the frequency of summer dust storms. Tracking dust particles and analyzing synoptic patterns demonstrated that dust predominantly entered the Ardabil Plain from Iraq and Syria, as well as border areas between Iran and Iraq. The substantial pressure gradient generated by the arrival of unstable systems exacerbated local gusts, resulting in the formation of extensive dust masses in the Ardabil Plain. Notably, the maximum dust column density and optical depth recorded in July reached 0.43 kg/m² and 0.5, respectively.

Keywords: AOD Index, Ardabil Plain, Dust, HYSPLIT model, Sea Level Pressure.

Introduction

Dust storms are a significant environmental hazard in arid and semi-arid regions, particularly during the warmer months of late spring and early summer. These storms have far-reaching consequences for public health, natural resources, economy, and agriculture. Various factors contribute to dust generation, including changes in wind

*Corresponding Author

Salahi, B. , Behrouzi, M. and Saber, M. (2025). Identifying the Synoptic Patterns Generating Dust Storms in the Ardabil Plain and Revealing their Local Origin. *Geography and Environmental Planning*, 36 (3), 157 - 184 .

2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2025.143518.1691

intensity driven by pressure gradients, Coriolis force, poor vegetation cover, drought, conflicts, soil texture and composition, channelized winds, and synoptic patterns associated with strong winds. The interplay between climate change and human activities, including settlement patterns, has exacerbated soil degradation, wind erosion, desertification, and deterioration of soil properties, thereby intensifying dust storms. In Ardabil, industrial and mining activities have adversely affected the photosynthesis cycle, disrupted road traffic, and negatively impacted human and livestock health, placing additional strain on the healthcare system and incurring significant costs. Consequently, this study aimed to identify and analyze the factors contributing to dust formation and the atmospheric patterns responsible for dust events during warmer months in the Ardabil Plain.

Materials & Methods

This research utilized a combination of synoptic, statistical, satellite, and modeling approaches. To analyze dust occurrence patterns during warm months over a 19-year period (2000-2018), data were extracted and examined through an environmental lens focused on circulation. The HYSPLIT model was employed to track dust pathways in the region.

The principal component reduction method was applied to identify the dust generation patterns in the Ardabil Plain for each warm month. Factor analysis was then utilized to determine the key variables influencing atmospheric circulation patterns and dust storms. Additionally, to assess the role of local sources in the occurrence of dust storms, land use changes were analyzed using the Support Vector Machine (SVM) algorithm, along with atmospheric Dust Column Mass Density (DCMD) and Aerosol Optical Depth (AOD) derived from reanalyzed MERRA data. Finally, a stepwise multivariate linear regression model was employed to estimate atmospheric dust concentration and develop a dust model for the Ardabil Plain.

Research Findings

Monthly analysis of dust-generating patterns in the Ardabil Plain revealed that local sources significantly contributed to the occurrence of dust storms in the study area. While dust particle tracking and synoptic pattern investigations indicated that dust primarily entered the Ardabil Plain from Iraq, Syria, and areas along the Iran-Iraq border, the large pressure gradients and shear forces created by the intrusion of unstable systems intensified local winds in the region. In the agricultural lands east of Ardabil City—specifically, approximately 3.6 kilometers from the city center and near the southern edge of Ardabil Airport and Ardabil Industrial Park No. 2—there were areas devoid of vegetation. During the dry season, the loose surface soils in these regions became destabilized due to moisture deficiency. As strong winds intensified, soil particles were lifted from the ground and transported westward towards Ardabil City, resulting in local dust storms that adversely impacted the environmental ecosystem and human health. Additionally, Ardabil Industrial Park No. 2 situated 11 kilometers east of the city near the airport and a prominent dust source contributed to increased air pollution. The activities of factories in this industrial zone released dust particles into the atmosphere, which further elevated the concentration of air pollutants when combined with mineral dust from the dust center.

Discussion of Results & Conclusion

The results of monitoring land use changes in the Ardabil Plain indicated that local sources significantly contributed to the occurrence of dust storms in the region. Over the past 20 years (2000-2019), the percentage of dry surface soils—identified as the primary sources of dust—had increased, while vegetation cover had diminished. This decline in vegetation had notably contributed to the rising frequency of dust storms. Vegetation played a critical role in absorbing surface moisture and retaining it on the soil, which in turn enhanced soil stability and raised the wind shear threshold speed required to mobilize surface soil particles. Consequently, stable soil conditions helped mitigate dust storms. The findings of this study revealed a reduction in vegetation cover, which had led to decreased surface soil moisture and disrupted soil balance. This instability ultimately lowered the wind shear threshold speed, making the surface soil more susceptible to being lifted by localized gusts, resulting in airborne dust that manifested as dust storms. Moreover, the regression analysis identified the role of relative humidity in estimating atmospheric dust column concentration in the Ardabil Plain. It was demonstrated that the concentration model could effectively predict dust levels based on AOD and relative humidity variables.

مقاله پژوهشی

شناسایی الگوهای همدیدی مولد توفان گرد و غبار دشت اردبیل و آشکارسازی خاستگاه محلی آن

برومند صلاحی* ، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
salahi@uma.ac.ir

محمود بهروزی، دکترای تخصصی پژوهشکده علوم دریایی، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران
behrouzimahmoud@gmail.com

مهناز صابر، پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
mahnaz.saber@uma.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، برای شناسایی بادهای توفنده مولد رخداد گرد و غبار دشت اردبیل، از داده‌های سمت و سرعت باد طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۰۰ استفاده شده است. برای آشکارسازی الگوهای جوی مولد گرد و غبار، نقشه‌های فشار تراز دریا در روزهای گرد و غباری ترسیم شد و مسیر گرد و غبار با مدل HYSPLIT ردیابی شد. به‌منظور شناسایی غلظت ستونی گرد و غبار دشت اردبیل، از شاخص غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی (DCMD) و عمق اپتیکی نور (AOD) استفاده شد. نتایج گویای نقش سامانه‌های فشار سطح زمین است که با ایجاد ناپایداری در منطقه موجب رخداد توفان گرد و غبار در دشت اردبیل می‌شوند. بررسی‌ها نشان دادند که خاستگاه محلی نقش بارزی در رخداد توفان‌های گرد و غبار تابستانه دارد. ردیابی ذرات غبار و بررسی الگوهای همدیدی نشان دادند که گرد و غبار از سوی عراق و سوریه و مناطق مرزی بین ایران و عراق وارد دشت اردبیل می‌شوند. گرادیان فشاری زیادی که در زمان ورود سامانه‌های ناپایدار به منطقه ایجاد می‌شود، موجب تشدید تندبادهای محلی و شکل‌گیری توده عظیم گرد و غبار در دشت اردبیل شده است؛ به گونه‌ای که بیشینه غلظت ستونی گرد و غبار و عمق اپتیکی نور در جولای به ترتیب تا ۰/۴۳ کیلوگرم در مترمربع و ۰/۵ رسیده است.

واژه‌های کلیدی: الگوهای جوی، شاخص AOD، فشار سطح زمین، گرد و غبار، مدل HYSPLIT.

*نویسنده مسئول

صلاحی، برومند، بهروزی، محمود و صابر، مهناز. (۱۴۰۴). شناسایی الگوهای همدیدی مولد توفان گرد و غبار دشت اردبیل و آشکارسازی خاستگاه محلی آن، جغرافیا و

برنامه‌ریزی محیطی، ۳۶ (۳)، ۱۸۴-۱۵۷.



مقدمه

گرد و غبار مجموعه‌ای از ذرات غبار با خاستگاه طبیعی یا مصنوعی است که معمولاً در اثر فرایندهای تجزیه تشکیل می‌شوند و به‌عنوان یکی از شایع‌ترین آلاینده‌های هوا مطرح هستند. توفان‌های گرد و غبار یکی از مخاطرات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که بیشتر در نیمه گرم سال، به‌ویژه در اواخر بهار و اوایل تابستان اتفاق می‌افتد (Modarres & Sadeghi, 2018) و جامعه انسانی (Khan & Strand, 2018) و گیاهی (Drack & Vázquez, 2018) در مناطق نزدیک به خاستگاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این توفان‌ها با تلاطم شدید باد همراه‌اند که عبور آن از مناطق خشک و کم‌رطوبت، ذرات خاک سطحی در دوره کم بارش را از سطح بیابان‌ها روئیده و با انتقال آن به ارتفاع ۳۰۰۰ متری به‌صورت توده عظیم گرد و غبار به مسافت‌های طولانی از خاستگاه آن انتقال می‌دهد (Zoljoodi et al., 2013) که پیامد آن، دید افقی تا کمتر از ۱۰۰۰ متر است (Cao et al., 2015). این پدیده همچون کمربند غبار از شمال غربی قاره آفریقا شروع می‌شود و با عبور از شبه‌جزیره عربستان، ایران و آسیای مرکزی به بیابان تاکلماکان در چین می‌رسد (Dimitriou & Kassomenos, 2018). علاوه بر این، کاهش بارندگی و خشک‌سالی‌های اخیر باعث گسسته‌شدن بافت نرم و سیلتی رسوبات آبرفتی میان‌رودان در عراق (Mashat & Awad, 2010) و مناطق بیابانی جنوب شرقی ایران می‌شوند که در کنار بیابان ربع‌الخالی در عربستان و بیابان صحرا در آفریقا بزرگ‌ترین خاستگاه گرد و غباری در خاورمیانه را تشکیل می‌دهند.

این مخاطره پیامدهای گوناگون و گسترده‌ای بر تندرستی، منابع طبیعی، اقتصاد و کشاورزی جوامع بر جای می‌گذارد (Shao & Dong, 2006). از عواملی که در ایجاد گرد و غبار نقش دارند می‌توان به تغییرات شدت باد ناشی از گرادیان فشار و نیروی کوریولیس، فقر پوشش گیاهی، خشک‌سالی و وقوع جنگ، بافت و ترکیب خاک‌های خشک سطحی، دالان باد، الگوهای هم‌دید وزش بادهای شدید و فرسایش بادی اشاره کرد. ترکیب پدیده تغییر اقلیم با فعالیت‌های انسانی و الگوهای سکونت آنها موجب افزایش تخریب خاک، فرسایش بادی، بیابان‌زایی و تخریب خواص خاک می‌شود که این مجموعه سرانجام منجر به تشدید توفان‌های گرد و غباری می‌شود (Rezazadeh et al., 2013). اقلیم‌شناسان، توفان گرد و غباری را به‌عنوان پدیده جوی به‌صورت هم‌دید، دینامیکی و آماری و حتی پیامدهای تغییر اقلیم را بر روند توفان‌های گرد و غبار بررسی می‌کنند. همچنین از دیدگاه علم سنجش از دور، پژوهشگران شناسایی ذرات غبار موجود در جو را با الگوریتم‌های مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پراکنش ذرات غبار و عمق اپتیکی نور مطالعه می‌کنند.

اکستروم و همکاران در بررسی توفان‌های گرد و غباری استرالیا با روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای نتیجه گرفتند توفان‌های گرد و غباری بهار و تابستان در مناطق جنوبی و مرکزی استرالیا به‌وسیله جبهه‌های سرد فاقد بارندگی، کنترل و از طریق بارش‌های تابستانه محدود می‌شوند؛ ولی توفان‌های تابستان و پاییز به‌وسیله طول دوره خشک‌سال کنترل می‌شوند (Ekstrom et al., 2004). برکان و همکاران در بررسی چگونگی انتقال گرد و غبار صحرا به ایتالیا و مرکز اروپا، استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای روی جنوب شرق مدیترانه و کم‌فشار ناشی از فرود ایسلند در غرب آفریقا را به‌منزله عامل اصلی رخداد گرد و غبار و انتقال آن به ایتالیا و مرکز اروپا معرفی کردند (Barkan et al., 2013).

al., 2005). بین و همکاران توفان گرد و غباری شدید در چین را با استفاده از مدل عددی WRF-Dust بررسی کردند و با مقایسه تصاویر سنجنده MODIS با خروجی مدل دریافتند که بیابان گبی نقش کلانی در تولید غبار چین دارد و کمترین سهم مربوط به بیابان تاکلاماکان است (Bian et al., 2011).

دهدازاده و صلاحی (۱۳۸۹) در تحلیل گرد و غبارهای استان فارس نشان دادند که در تراز سطح دریا وجود مرکز کم فشار روی عربستان و عراق موجب انتقال گرد و غبار به جو منطقه می شود. **براتی و همکاران (۱۳۹۰)** نقش همگرایی سامانه های فشار در رخداد گرد و غبارهای استان خوزستان را مطالعه کردند. **خوشحال دستجردی و همکاران (۱۳۹۱)** توفان های گرد و غباری استان ایلام را بررسی کردند. **محمدخورشید دوست و همکاران (۱۳۹۲)** نشان دادند سامانه پرفشار آوزور از طریق ایجاد کم فشارهای گرمایشی سطح زمین بیشترین نقش را در پراکندگی فراوانی روزهای گرد و غباری در غرب ایران دارد. **ریوندی و همکاران (۱۳۹۲)** دلیل عمده رخداد گرد و غبار در غرب ایران را استقرار سامانه کم فشار در خاورمیانه به همراه ناپایداری تراز میانی جو شناسایی کردند که منجر به رخداد بادهای شدید به همراه گرد و غبار در غرب و جنوب غربی ایران می شود. **ملکوتی و همکاران (۱۳۹۲)**، **قوامی و همکاران (۱۳۹۳)**، **محمدی و همکاران (۱۳۹۴)**، **محمدپور پنجاه و همکاران (۱۳۹۵)**، **برخوردار و همکاران (۱۳۹۶)**، **رستمی و حسینی (۱۳۹۷)**، **خوش اخلاق و همکاران (۱۳۹۸)**، **جلیلیان (۱۴۰۱)**، **محمدی و همکاران (۱۴۰۲)** و **وطن پرست قلعه جوق و همکاران (۱۴۰۳)** نیز در پژوهش هایی به بررسی این رخداد در محدوده مطالعاتی مدنظرشان با روش همدیدی یا ماهواره ای پرداختند. گرد و غبار در طی یک دهه گذشته، پیامدهای اجتماعی و اقتصادی ویرانگری برای استان های متأثر داشته است (**خالدی، ۱۳۹۲**). گرد و غبار صنعتی و معدنی در اردبیل پیامدهای منفی بر چرخه فتوسنتز گذاشته، سیستم ترافیک جاده ای را مختل کرده و با برهم زدن تندرستی انسان و دام به حوزه بهداشت فشار مضاعفی آورده و موجب تحمیل هزینه بر این بخش و اقتصاد شده است؛ بنابراین، در این پژوهش سعی در شناسایی و تعیین قلمرو خاستگاه گرد و غبار و الگوهای جوی مولد رخداد گرد و غبار دوره گرم سال در دشت اردبیل است. برای رسیدن به این هدف از ابزارهای پردازشی سنجنش از دور و دانش آب و هواشناسی همدیدی و آماری بهره گرفته شده است.

منطقه پژوهش

فضای مکانی دشت اردبیل عمدتاً از زمین های کشاورزی و گستره سکونتگاهی شهر اردبیل اشغال شده و کاربری های صنعتی، فرودگاهی و روستایی نیز به صورت پراکنده در آن جای گرفته است. منطقه ای با حدود ۷۰ کیلومترمربع با زمین های لخت، بایر و بدون پوشش گیاهی در مرکز این دشت تشکیل شده است که ذرات خاک سطحی آن به دلیل نبود پوشش گیاهی و چراگاه های طبیعی در آن، به صورت بیابان محلی جلوه می نماید. این بیابان سرد و خشک در روزهای بدون بارندگی و کمبود رطوبت، با تشدید سرعت باد و رخداد بادهای توفنده به عنوان خاستگاه گرد و غبار محلی شناخته می شود (**شکل ۱**). گرد و غبارهای صنعتی و معدنی ناشی از فعالیت کارخانه ها در شهرک صنعتی اردبیل و ذرات خاک سطحی خاستگاه محلی، همراه با توده هوای محلی و تندبادها به سمت غرب جریان یافته و

برای آشکارسازی نقش خاستگاه محلی در رخداد پدیده گردوغبار، تغییرات کاربری‌ها، غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی ($DCMD^1$) و عمق اپتیکی نور (AOD^2) بررسی شده است؛ به گونه‌ای که تصاویر ماهواره Landsat برای دشت اردبیل در خردادماه سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ از سایت USGS به دست آمد. تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری تصاویر در نرم‌افزار ENVI انجام شد و با تابع PAN sharpening، وضوح مکانی تصاویر از 30×30 متر به 15×15 متر کاهش یافت تا دقت مکانی تصاویر افزایش یابد. سپس برای تهیه نقشه کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه، از روش نظارت‌شده ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد؛ به گونه‌ای که با نمونه‌برداری آموزشی و اجرای تکنیک SVM بر تصویر لندست، نقشه کاربری اراضی برای هر سال تولید شد (Singh et al., 2014). پس از آن، در نرم‌افزار ArcGIS، مساحت هر طبقه کاربری زمین محاسبه شد و روند تغییرات آنها طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ به دست آمد.

در ادامه، شاخص‌های $DCMD$ و AOD از داده‌های بازتحلیل شده ماهواره MERRA با وضوح مکانی 1000×1000 متر برای ماه‌های گرم در دشت اردبیل استخراج شد و میانگین ماهانه آنها به صورت نمودار ستونی ارائه شد. سرانجام به منظور برآورد غلظت اتمسفری گرد و غبار جوی و ترسیم مدل غبار برای دشت اردبیل، از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام استفاده شد؛ بدین صورت که نخست متغیرهایی که نقش مهمی در غلظت ستونی توده گرد و غبار اتمسفر سطوح زیرین منطقه دارند، انتخاب شدند و به عنوان متغیرهای پیشگو در برآورد غبار (متغیر وابسته) در نظر گرفته شد. در این پژوهش، از متغیرهای جوی اعم از رطوبت نسبی هوا در ارتفاع دو متری، سرعت باد، میزان بارش روزانه، میانگین دمای روزانه هوا، میانگین دمای خاک سطحی (صفر تا ۱۰ سانتی‌متر سطح خاک) و میزان شاخص عمق اپتیکی نور به عنوان متغیرهای مستقل (پیشگو) در برآورد غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی دشت اردبیل استفاده شد. میانگین روزانه پارامترهای بالا از وب‌گاه GIOVANI برای پهنه دشت اردبیل طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۰ اخذ شد و فایل‌ها با فرمت NetCDF ذخیره و در محیط Excel اجرا شد. همچنین از داده‌های هواشناسی ایستگاه اردبیل نیز استفاده شد. متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (غبار جوی) به صورت ستون وارد نرم‌افزار SPSS و مدل رگرسیونی برای برآورد مدل غلظت گرد و غبار دشت اردبیل اجرا شد.

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل

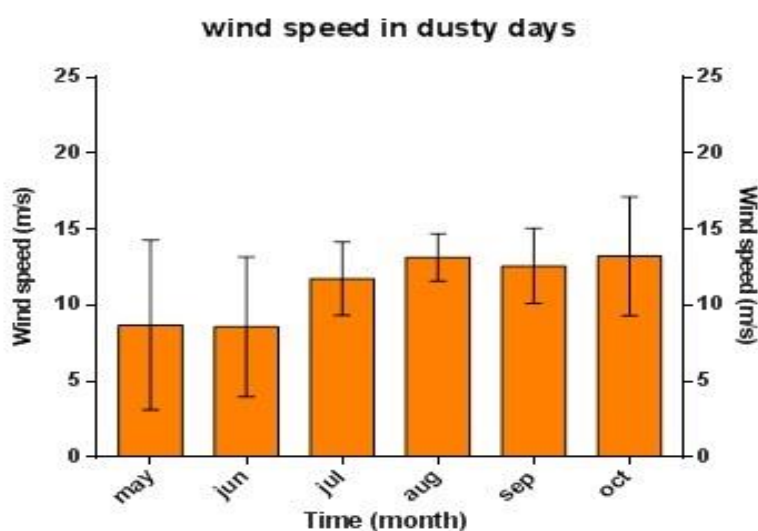
نتایج بررسی آماری رخداد گرد و غبار

بررسی آماری رخداد گرد و غبار در دشت اردبیل نشان داد تعداد فراوانی این پدیده در فصل بهار نسبت به تابستان بیشتر است؛ اما میانگین سرعت باد در روزهای گرد و غباری بهار کمتر از تابستان است (شکل ۲). میانگین ماهانه سرعت باد در دشت اردبیل که از ایستگاه سینوپتیک اردبیل به دست آمد، طی روزهای عادی و عدم گرد و غبار (Normal) با روزهای همراه با گرد و غبار (Dusty day) بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که میانگین سرعت باد در

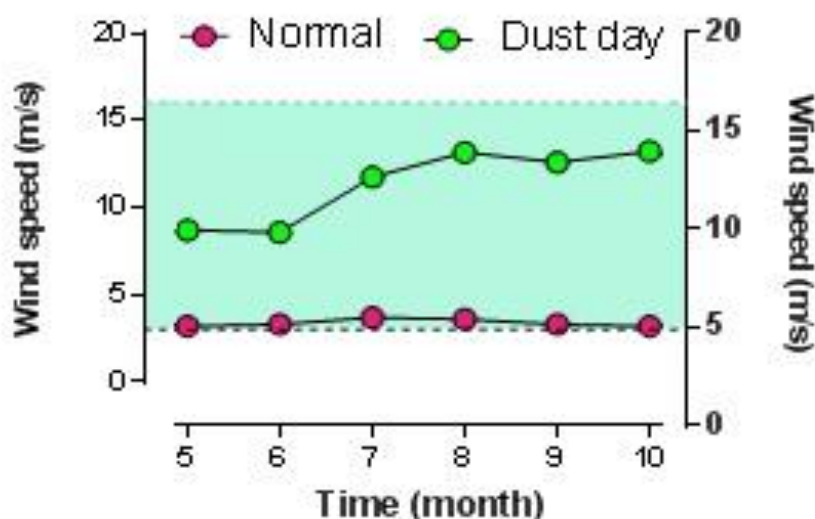
¹ Dust Column Mass Density

² Aerosol Optical Depth

روزهای عادی $3/8$ متر در ثانیه و در روزهای گرد و غباری بیش از ۱۱ متر در ثانیه است. بیشینه اختلاف بین این دو سرعت در ماه اوت (مردادماه) است که بیش از ۱۳ متر در ثانیه اختلاف سرعت باد بین روزهای عادی و روزهای گرد و غباری در دشت اردبیل است. کمینه اختلاف سرعت باد نیز در ماه‌های می و ژوئن (اردیبهشت و خردادماه) است که اختلاف سرعت باد ۴ متر در ثانیه است و نشان می‌دهد در ماه‌های فصل بهار که اتمسفر رو به گرمایش بوده، گرد و غبارها عمدتاً با سرعت باد ۱۰ تا ۱۲ متر در ثانیه همراه بوده است (شکل ۳).



شکل ۲: میانگین ماهانه سرعت باد در روزهای گرد و غباری دشت اردبیل طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۸ (منبع: نویسندگان)
 Figure 2: Monthly average wind speed on dusty days in the Ardabil Plain during the years 2000-2018

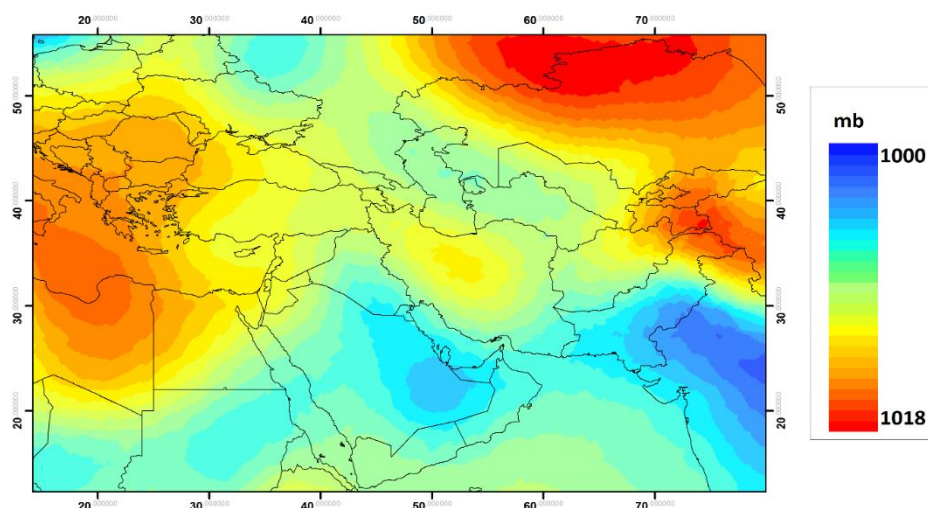


شکل ۳: اختلاف سرعت باد در روزهای عادی و روزهای همراه با گرد و غبار در دشت اردبیل (منبع: نویسندگان)
 Figure 3: Difference in average wind speed on normal days and days with dust in the Ardabil Plain

به منظور مدل سازی آماری اختلاف سرعت باد در روزهای عادی و روزهای گرد و غباری از آزمون تی - استیودنت دوطرفه استفاده شد که نتایج این آزمون بیانگر اختلاف معنی دار بین سرعت باد در روزهای عادی و روزهای گرد و غباری در دشت اردبیل است و مقدار P-value (برابر با صفر) بیانگر این اختلاف معنی دار است. بدین ترتیب، اختلاف آماری و نمودار میانگین سرعت باد نشان می دهد که سرعت باد در روزهای گرد و غباری به شکل توفان بوده و هیچ گاه سرعت باد آنها کمتر از ۸ متر در ثانیه نبوده و به جز ماه های می و ژوئن (اردیبهشت و خردادماه) همیشه سرعت باد بیشتر از ۱۰ متر در ثانیه بوده است و عملاً به صورت توفان گرد و غبار ظاهر شده است. در ادامه به بررسی سه الگوی جوی توفان گرد و غبار در سه ماه از نیمه گرم سال و غلظت ستونی گرد و غبار و عمق اپتیک نور به منظور آشکارسازی نقش خاستگاه محلی در رخداد این پدیده ماه های گرم پرداخته می شود.

الگوی جوی مولد گرد و غبار در ماه می

در ماه می، طی ۱۹ سال، ۱۹ روز با رخداد گرد و غبار در دشت اردبیل گزارش شده است که برای بررسی الگوی جوی مولد این پدیده در مقیاس کلان، توفان گرد و غبار در تاریخ ۳۰ می ۲۰۱۵ انتخاب شد و از نقشه الگوی فشار سطح زمین در چارچوب جغرافیایی ۱۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی و ۱۰ تا ۸۰ درجه طول شرقی در این روز استفاده شد (شکل ۴).

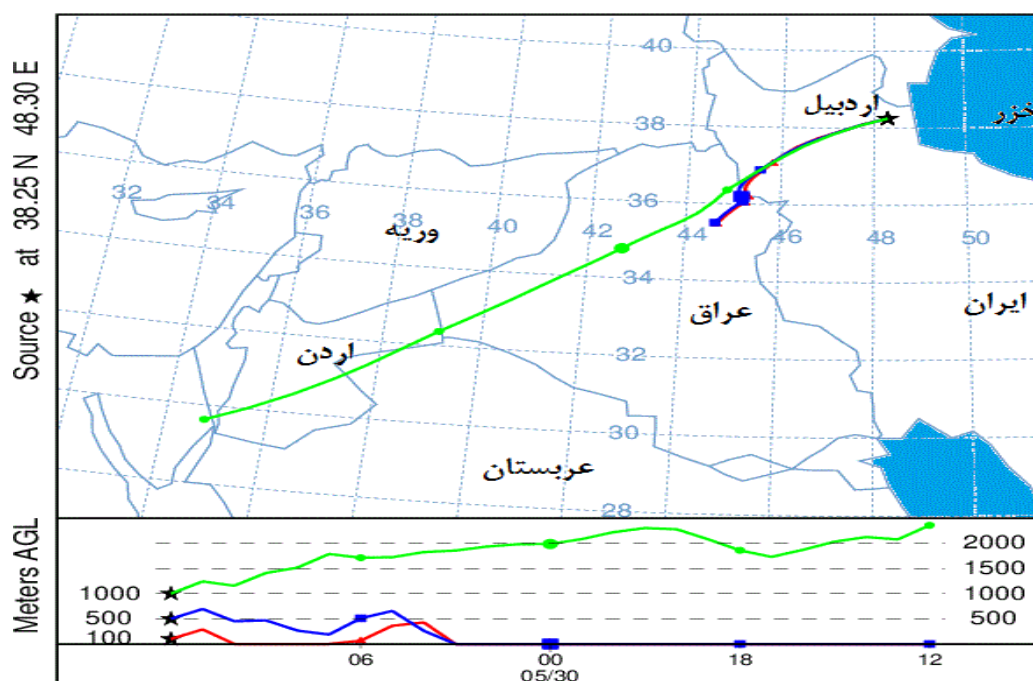


شکل ۴: نقشه الگوی فشار تراز دریا در روز نماینده رخداد گرد و غبار دشت اردبیل در ماه می (۲۰۱۵/۵/۳۰) (منبع: نویسندگان)

Figure 4: Sea level pressure pattern map on a representative day of the Ardabil plain dust event in May (5/30/2015)

ماه می که با اردیبهشت ماه خورشیدی مطابق است، اتمسفر نیم کره شمالی رو به گرمایش است و موج بادهای غربی به عرض های بالای جغرافیایی انتقال می یابد و سامانه پرفشار دینامیکی آזור جای آن را در عرض های پایین و خاورمیانه می گیرد؛ اما در شمال غربی فلات ایران هم چنان موج های کوتاه غربی عبور می کنند و ناپایداری دامنه ای در

شمال غربی ایران موجب رخداد توفان‌های تندی و بارش همرفتی می‌شود. ناپایداری هوای سطحی موجب منقلب شدن هوا می‌شود و تندبادهای سطحی در این ماه از سال به‌وفور اتفاق می‌افتد. در روز ۳۰ می ۲۰۱۵، توفان گرد و غبار در دشت اردبیل گزارش شد که سامانه‌های جوی در تراز سطح زمین به گونه‌ای بود که یک واچرخند با مرکزیت ۱۰۱۷/۵ میلی بار در ایران مرکزی تشکیل شد. در شمال و جنوب این پرفشار دو مرکز کم فشار ضعیف در دریای خزر و جنوب عربستان نیز تشکیل شده است. چرخش ساعتگرد هوای پرفشار ایران مرکزی و وزش تندباد محلی موجب خیزش ذرات خاک سطحی بیابان عراق در جهت ساعتگرد شده و به سمت کم فشار دریای خزر جریان یافته است. این توده گرد و غبار اتمسفر شمال غربی ایران را آلوده کرد و در دشت اردبیل توفان گرد و غبار گزارش شد. همچنین ردیابی ذرات غبار با مدل HYSPLIT نیز نشانگر همین موضوع است که ذرات غبار از بیابان عراق و حتی اردن و آفریقا وارد دشت اردبیل شده است (شکل ۵). اوج پیشروی ذرات در اتمسفر اردبیل طی ساعات بعدازظهر اتفاق افتاده که تبعی از گرمایش جو و خشک بودن سطح و هوای فراز آن است (شکل ۶).



شکل ۵: ردیابی ذرات معلق اتمسفری با مدل HYSPLIT در روز نماینده رخداد گرد و غبار دشت اردبیل در ماه می (۲۰۱۵/۵/۳۰)

(منبع: نویسندگان)

Figure 5: Tracking of atmospheric suspended particles with the HYSPLIT model on the representative day of the Ardabil plain dust event in May (5/30/2015)

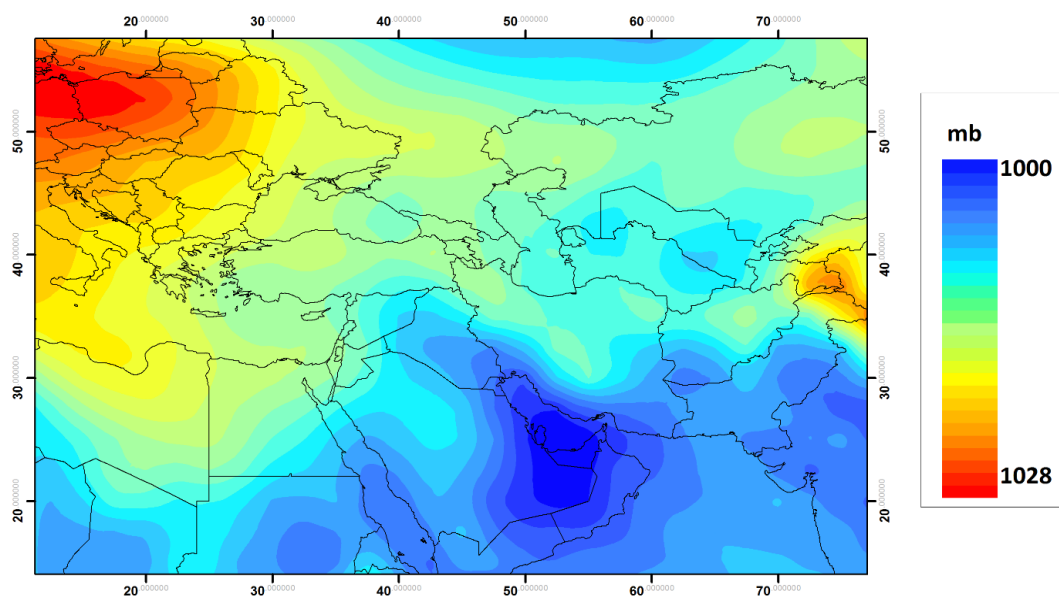


شکل ۶: مسیر ورود گرد و غبار به دشت اردبیل در روز نماینده ماه می (۲۰۱۵/۵/۳۰) (منبع: نویسندگان)

Figure 6: The path of dust entering the Ardabil plain on the representative day of May (5/30/2015)

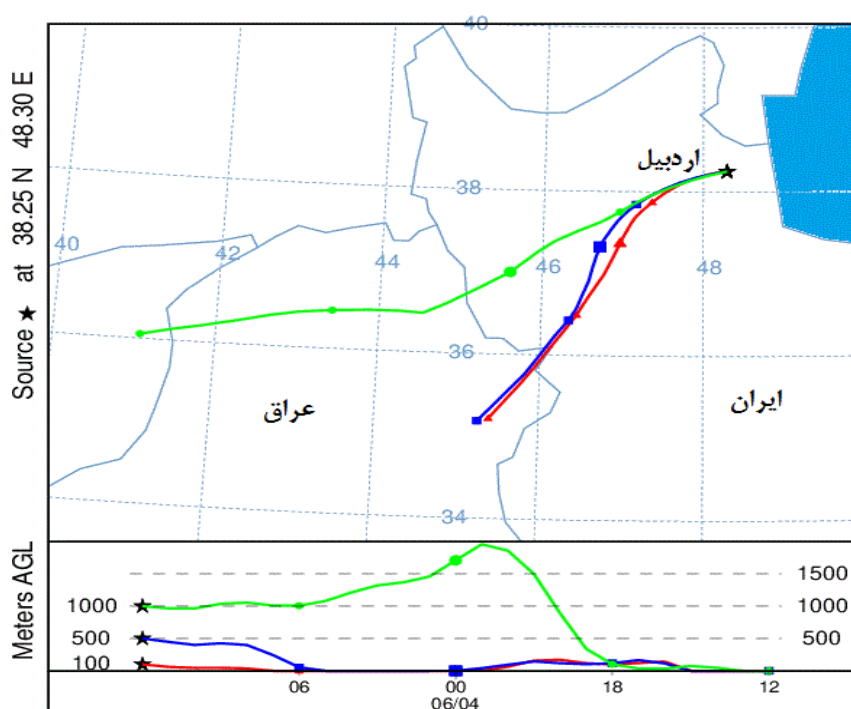
الگوی جوی مولد گرد و غبار در ماه ژوئن

در ماه ژوئن، طی ۱۹ سال (۲۰۰۰-۲۰۱۸) ۱۸ روز توأم با رخداد گرد و غبار در دشت اردبیل گزارش شده است و برای بررسی شرایط سینوپتیکی و الگوی جوی مولد پدیده گرد و غبار در مقیاس کلان، توفان گرد و غبار مورخه ۴ ژوئن ۲۰۱۵ به عنوان نماینده این ماه انتخاب شد (شکل ۷). ماه ژوئن که با خردادماه مطابق است، اتمسفر خاورمیانه و نیم کره شمالی گرم شده است. از طرفی موج بادهای غربی از خاورمیانه کاملاً خارج شده و پرفشار پویشی آזור جای آن را گرفته است. در سطح زمین، کم فشار گرمایشی در خلیج فارس، تشکیل و موجب وزش بادهای شمال از عراق به سمت ایران می شود. در روز ۴ ژوئن ۲۰۱۵ نیز در دشت اردبیل توفان گرد و غبار گزارش شد که دلیل اصلی آن وزش بادهای شمال شو از عراق به سمت ایران است. توده عظیم گرد و غبار در این روز به واسطه بادهای شمال از خاک سطحی بیابان های عراق که در این ماه از سال به دلیل تابش آفتاب زیاد، دمای بالا و تبخیر، رطوبت سطحی را از دست داده و ناپایدار شده است، نشئت گرفته و طی توفان های فرامحلی به صورت گرد و غبار در ایران ظاهر شده است. ردیابی ذرات غبار با مدل HYSPLIT نیز بیانگر ورود توده گرد و غبار به اردبیل از سمت بیابان عراق و شرق سوریه است (شکل ۸ و شکل ۹).



شکل ۷: نقشه الگوی فشار تراز دریا در روز نماینده رخداد گرد و غبار دشت اردبیل در ماه ژوئن (۲۰۱۵/۶/۴) (منبع: نویسندگان)

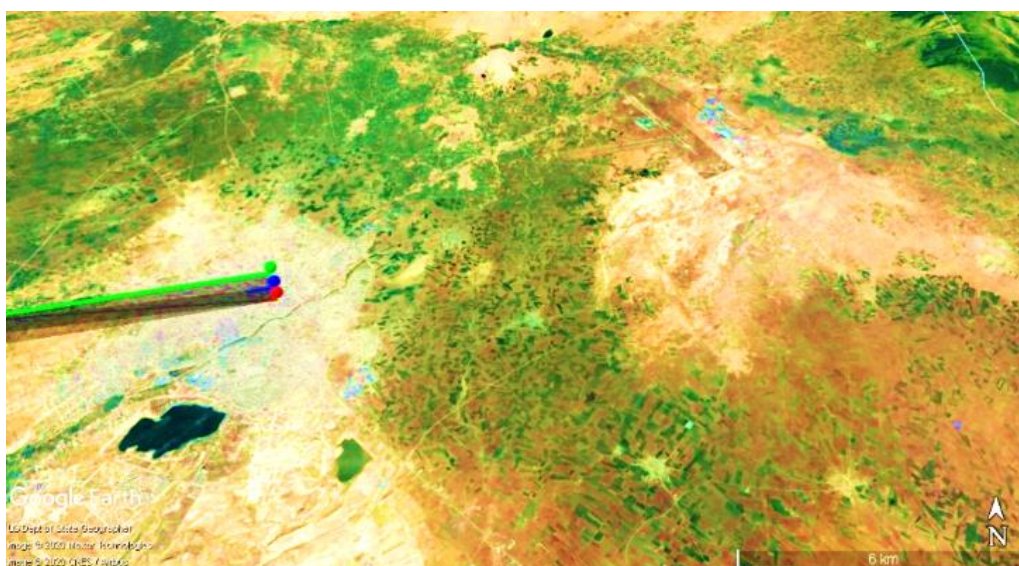
Figure 7: Sea level pressure pattern map on a representative day of the Ardabil Plain dust event in June (6/4/2015)



شکل ۸: ردیابی ذرات معلق اتمسفری با مدل HYSPLIT در روز نماینده رخداد گرد و غبار دشت اردبیل در ماه ژوئن (۲۰۱۵/۶/۴)

(منبع: نویسندگان)

Figure 8: Tracking of atmospheric suspended particles with the HYSPLIT model on the representative day of the Ardabil plain dust event in June (6/4/2015)

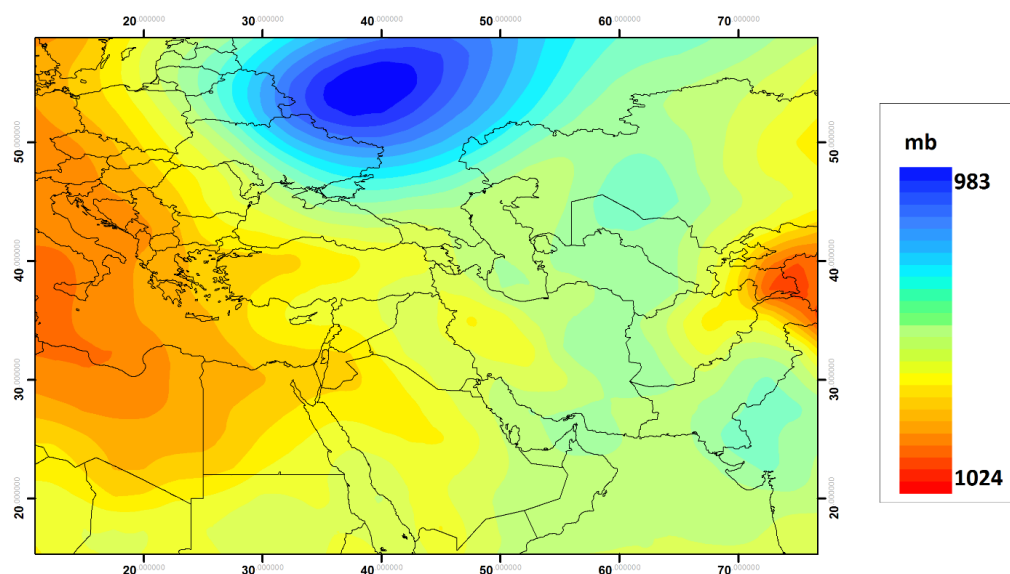


شکل ۹: مسیر ورود گرد و غبار به دشت اردبیل در روز نماینده ماه ژوئن (۲۰۱۵/۶/۴) (منبع: نویسندگان)

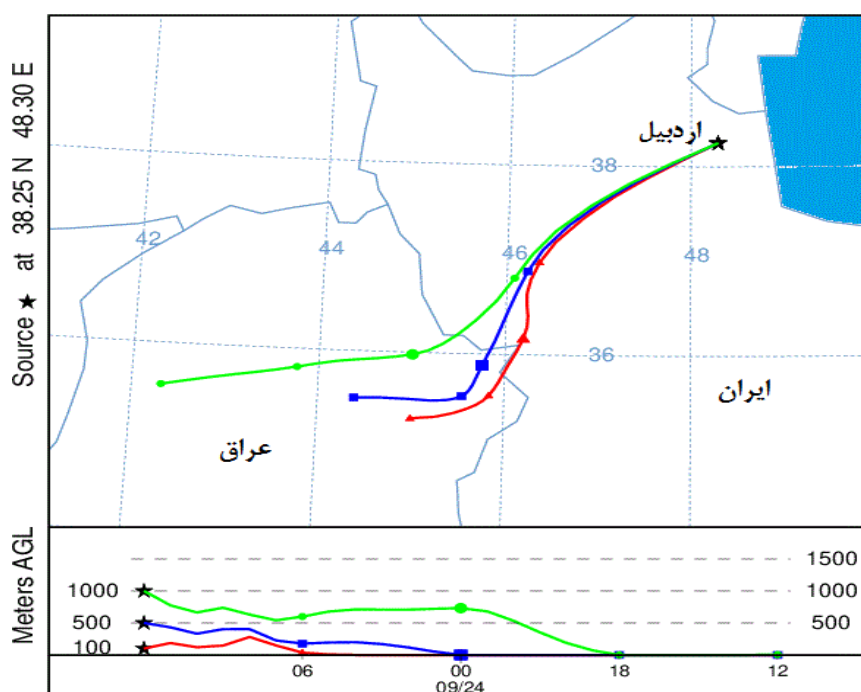
Figure 9: The path of dust entering the Ardabil plain on the representative day of June (6/4/2015)

الگوی جوی مولد گرد و غبار در ماه سپتامبر

در ماه سپتامبر، طی ۱۹ سال، ۱۳ روز با رخداد پدیده گرد و غبار در دشت اردبیل گزارش شده است که توفان گرد و غبار در تاریخ ۲۴ سپتامبر ۲۰۱۳ برای تحلیل انتخاب شد (شکل ۱۰). ماه سپتامبر که با شهریورماه مطابق است، پرفشار دینامیکی آזור در سطوح میانی اتمسفر از خاورمیانه و عرض های جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی خارج شده و به سمت عرض های پایین حرکت کرده است؛ اما هنوز موج بادهای غربی در منطقه ظاهر نشده است. در روز ۲۴ سپتامبر ۲۰۱۳ توفان گرد و غبار در دشت اردبیل گزارش شده است که برای بررسی الگوی جوی مولد آن نشان داد که در این روز، یک سامانه کم فشار قوی با مرکزیت ۹۸۵ هکتوپاسکال در روسیه تشکیل شده است. در اروپا سیستم پرفشار با مرکزیت بیش از ۱۰۲۰ میلی بار تشکیل شده و زبانه آن به سوی آفریقا گسترده شده است و حتی منحنی ۱۰۱۲/۵ هکتوپاسکال آن در شمال غربی ایران بسته شده و به صورت پرفشار محلی ظاهر شده است. از طرف دیگر، زبانه کم فشار روسیه به سمت جنوب گسترده شده و حتی استان اردبیل را نیز دربر گرفته است؛ بنابراین، گسترش دو سامانه کم فشار و پرفشار قوی در منطقه، موجب اختلاف گرادیان و شیو فشاری در منطقه شده است. پرفشار شمال غربی ایران با چرخش ساعت گرد موجب انتقال توده هوای گرم و همراه با گرد و غبار عراق به سمت شمال غربی ایران شده است و گرد و غبار به صورت معلق در تندباد فرامحلی وارد دشت اردبیل شده که خروجی مدل HYSPLIT نیز مؤید این موضوع است (شکل ۱۱ و شکل ۱۲).

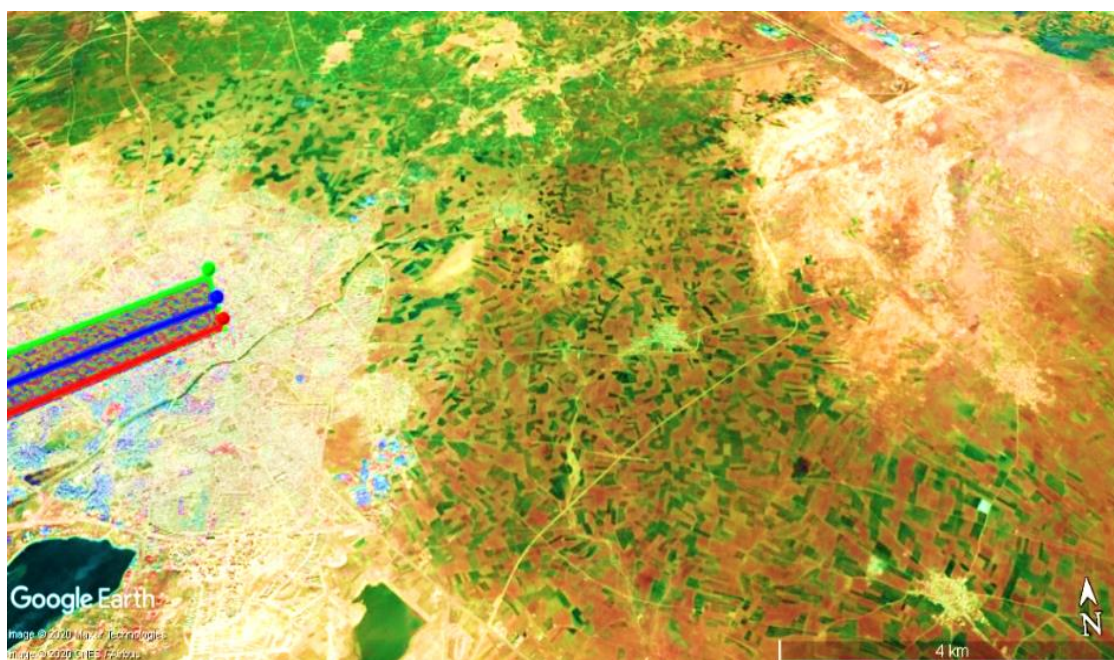


شکل ۱۰: نقشه الگوی فشار تراز دریا در روز نماینده رخداد گرد و غبار دشت اردبیل در ماه سپتامبر (۲۰۱۳/۹/۲۴) (منبع: نویسندگان)
Figure 10: Sea level pressure pattern map on a representative day of the Ardabil plain dust event in September (9/24/2013)



شکل ۱۱: ردیابی ذرات معلق اتمسفری با مدل HYSPLIT در روز نماینده رخداد گرد و غبار دشت اردبیل در ماه سپتامبر (۲۰۱۳/۹/۲۴) (منبع: نویسندگان)

Figure 11: Tracking of atmospheric suspended particles with the HYSPLIT model on the representative day of the Ardabil plain dust event in September (9/24/2013)



شکل ۱۲: مسیر ورود گرد و غبار به دشت اردبیل در روز نماینده ماه سپتامبر (۲۰۱۳/۹/۲۴) (منبع: نویسندگان)

Figure 12: The path of dust entering the Ardabil plain on the representative day of September (6/4/2015)

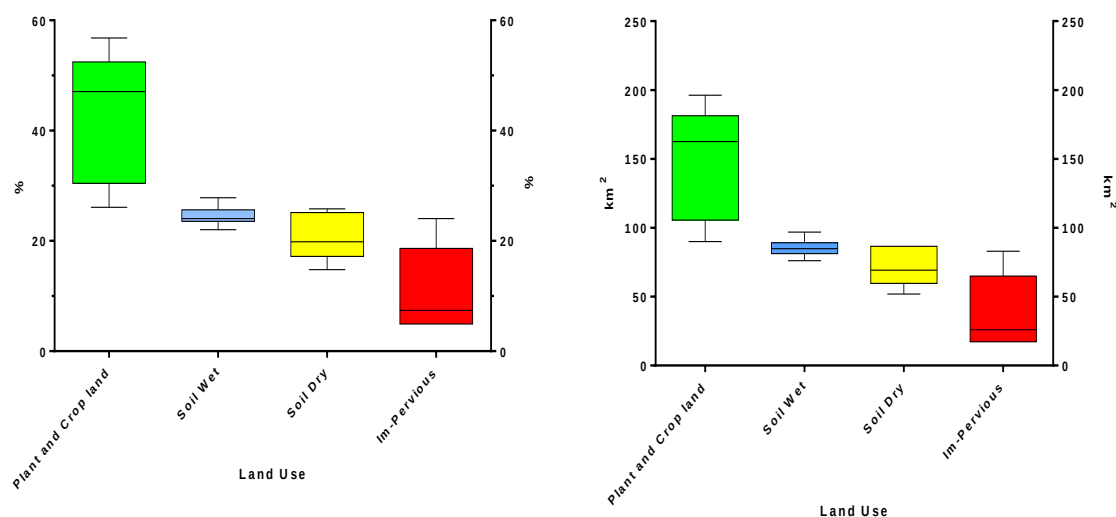
در رخداد توفان گرد و غبار جولای و اوت نیز که الگوی حاکم در سطح زمین به ترتیب کم فشار گرمایشی روی خلیج فارس و ایران است، به دلیل حاکمیت پرفشار دینامیکی آזור در ترازهای بالا امکان صعود بیشتر برای هوای گرم فراهم نبوده و خشک بودن هوا با همراهی مکش پادساعتگرد هوا به منطقه مورد مطالعه، در اردبیل، تندباد محلی از خزر و آذربایجان به سمت جنوب و دشت اردبیل جریان یافته و با کانالیزه شدن بادها در کوهستان‌های تالش و شرق اردبیل، توفان محلی شکل گرفته و عبور این تندباد از روی خاستگاه محلی گرد و غبار در شرق اردبیل، موجب خیزش غبار سطحی از کانون خشک شده و به صورت توده عظیم گرد و غبار در دشت اردبیل ظاهر شده است.

بررسی نقش کانون محلی در رخداد گرد و غبار دشت اردبیل

کاربری اراضی

نتیجه بررسی کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹، با تصاویر ماهواره‌ای در قالب نموداری نشان داده شده است (شکل ۱۳) از بین کاربری‌های زمین‌های با کاربری پوشش گیاهی و زمین‌های کشاورزی (Plant and Crop land)، خاک‌های مرطوب (Soil Wet)، خاک‌های خشک و مستعد گرد و غبار (Soil Dry) و زمین‌های نفوذناپذیر همچون آسفالت، کاربری‌های شهری و روستایی و بیرون‌زدگی سنگ سطحی (Im-Pervious)، بیشترین مساحت به طبقه پوشش‌های گیاهی و زمین‌های کشاورزی تعلق گرفته که از مجموع ۳۴۵ کیلومتر مربع مساحت منطقه مورد مطالعه، حدود ۱۵۰ کیلومتر مربع و ۴۳ درصد کاربری‌های موجود را به خود اختصاص داده است.

دشت اردبیل با خاک مناسب قهوه‌ای‌رنگ و با عمق مناسب و زهکش آبی و همچنین عبور سرشاخه‌ها و رودخانه‌های فرعی و اصلی مستعد کشاورزی است که در طول سالیان گذشته همواره زمین‌های این دشت زیر کشت محصولاتی همچون گندم و جو و سیب‌زمینی بوده است و همچنان ادامه دارد؛ به همین دلیل عمده کاربری‌های دشت اردبیل در تصاویر ماهواره‌ای به صورت پوشش گیاهی و کشاورزی نشان داده می‌شود؛ اما همان‌طور که در نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی که از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده است (شکل ۱۴)، در خاستگاه محلی گرد و غبار، کاربری مربوط به پوشش گیاهی اندک است و عمدتاً پوشش گیاهی و زمین‌های کشاورزی اطراف خاستگاه محلی گرد و غبار را احاطه کرده‌اند و به همین دلیل پوشش گیاهی کاربری غالب در تصویر است. در ضمن این کاربری تأثیری در تشدید غلظت توفان گرد و غبار در دشت اردبیل ندارد و حتی متأثر از ذرات گرد و غبار جوی است؛ چون رسوب این ذرات بر سطح برگ و محصول گیاهان، موجب اختلال در فیزیولوژی گیاه می‌شود و بر رشد گیاه اثر منفی می‌گذارد. کاربری دیگر، خاک‌های مرطوب سطحی بوده که اگرچه نسبت به پوشش گیاهی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، تغییرات اندکی داشته است، با میانگین ۸۵ کیلومتر مربع طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ و اختصاص ۲۵ درصد از کاربری‌ها به آن، دومین کاربری چیره در منطقه است. این خاک‌ها بیشتر به زمین‌های آیش کشاورزی تعلق می‌گیرد که در زمان اخذ تصویر ماهواره‌ای منطقه، در حال آیش بوده است و پوشش گیاهی و زراعی در آن مشاهده نمی‌شود؛ اما این زمین در موارد محدودی که تندباد محلی در منطقه اتفاق می‌افتد، در تشدید غلظت گرد و غبار جوی نقش دارد و می‌تواند به صورت مستقیم در برنامه‌ریزی آبخیزداری و مبارزه با بیابان‌زدایی دخالت داده شود.



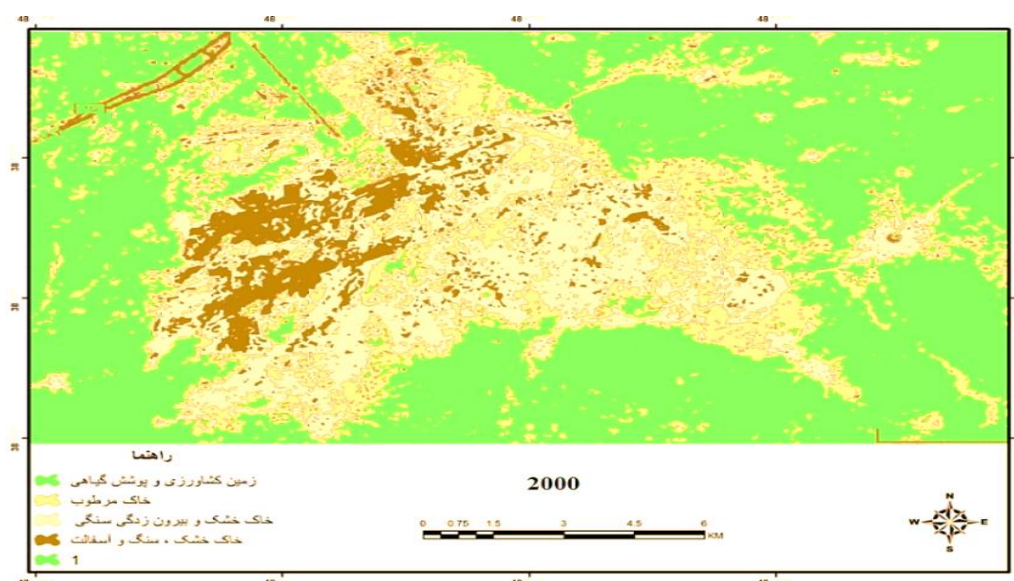
شکل ۱۳: نمودار باکس پلات مساحت و درصد کاربری‌های اراضی طبقه‌بندی شده در محدوده مدنظر در دشت اردبیل طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ (منبع: نویسندگان)

Figure 13: Box plot diagram of area and percentage of classified land uses in the target area in the Ardabil Plain during the years 2000 to 2019

مطابق نقشه طبقه‌بندی کاربری، خاک‌های مرطوب سطحی عمدتاً در نوار محصور کانون گرد و غبار قرار دارد و سرتاسر اطراف کانون محلی از خاک‌های مرطوبی تشکیل شده است که به زمین‌های کشاورزی در حال آیش اختصاص دارد. همچنین در داخل زمین‌های خاستگاه گرد و غبار نیز خاک‌های مرطوب مشاهده می‌شود که آنها نیز به زمین‌های کشاورزی آیش تعلق دارد؛ چون در داخل خاستگاه نیز زمین‌های کشاورزی وجود دارد.

سومین کاربری اراضی که در محدوده مورد مطالعه وجود دارد و از همه کاربری‌ها در این پژوهش مهم‌تر است، مربوط به کاربری خاک‌های خشک با بافت نرم و سُست است که مولد اصلی گرد و غبار در دشت اردبیل است. این کاربری به‌طور میانگین حدود ۷۰ کیلومترمربع مساحت دارد و ۲۱ درصد منطقه را شامل می‌شود. خاک خشک و نرم سطحی با ایجاد تندباد محلی، به‌سرعت از زمین، جدا و به‌صورت توفان گرد و غبار در دشت اردبیل ظاهر می‌شود. این خاک‌های خشک و نرم سطحی بیشتر در داخل کانون محلی قرار گرفته و از جمله ویژگی‌های آن این است که پوشش گیاهی در آن وجود ندارد و رطوبت خاک اندک بوده و در بیشتر مواقع عاری از رطوبت است. هیچ‌گونه مسیل و آبراهه فعال در این محدوده وجود ندارد و پوشش گیاهی آن نیز بسیار اندک است و تصاویر ماهواره‌ای آن را به‌عنوان یک کاربری مجزا تشخیص داده است.

آخرین نوع کاربری در تصویر ماهواره‌ای منطقه موردنظر، به اراضی نفوذناپذیر تعلق دارد که به مجموعه‌ای از زمین‌های مسکونی، صنعتی، آسفالت و جاده، بیرون‌زدگی سنگ‌ها و اراضی سخت تعلق دارد که به‌طور میانگین حدود ۳۷ کیلومترمربع و ۱۱ درصد از کل اراضی را به خود اختصاص داده است. این زمین‌ها تأثیری در توفان گرد و غبار ندارند. در نقشه منطقه، این کاربری‌ها در مناطق روستایی شرقی شامل آغبلاغ مصطفی‌خان، فرودگاه اردبیل، شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل، جاده‌های ارتباطی و بیرون‌زدگی سنگ و خاک سخت سطحی در نیمه غربی خاستگاه محلی گرد و غبار مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴: نقشه کاربری اراضی محدوده موردنظر در دشت اردبیل در دسامبر سال ۲۰۰۰ (منبع: نویسندگان)

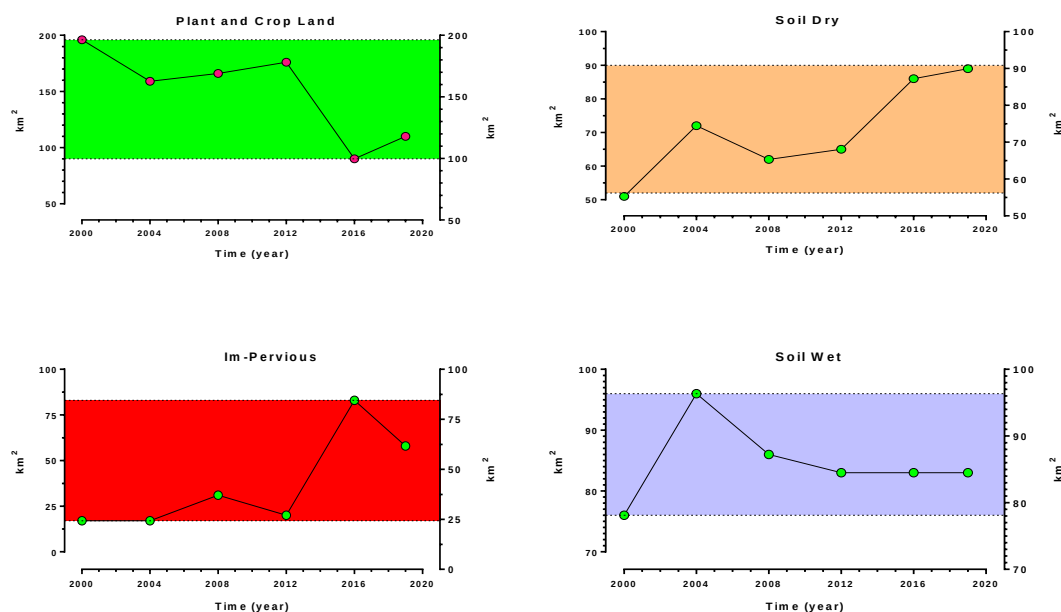
Figure 14: Land use map of the target area in the Ardabil plain in December 2000

پایش تغییرات کاربری‌های اراضی در دشت اردبیل با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

تغییرات کاربری‌های پوشش گیاهی و اراضی زراعی: نمودار روند زمانی میزان تغییرات کاربری اراضی پوشش گیاهی و زمین‌های زراعی در محدوده‌ی مدنظر در هر ۴ سال نشان می‌دهد (شکل ۱۵)، میزان مساحت پوشش‌های گیاهی طی ۲۰ سال اخیر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ روند کاهشی محسوسی داشته است. دلیل عمده‌ی آن را می‌توان به کاهش و تغییر در رژیم بارندگی منطقه و خشک‌سالی‌های اخیر اشاره کرد که منجر به از بین رفتن گیاهان غالب منطقه و گیاهانی شده‌اند که در برابر تنش خشکی و آب حساس هستند. از طرف دیگر، افزایش چشم‌اندازهای انسانی و تملک اراضی به‌منظور ساخت‌وساز و تأسیسات زیربنایی (ستون ۵ از جدول ۲) موجب کاهش زمین‌های مرتعی و زراعی در منطقه شده که این نوع تغییر اثر مشهودی بر افزایش وقوع توفان‌های گرد و غبار داشته است؛ به این دلیل که پوشش گیاهی موجب جذب رطوبت سطحی و تجمع آن در سطح خاک می‌شود و در نتیجه پایداری خاک را حفظ می‌کند و سرعت آستانه‌ی برشی باد برای روبش ذرات خاک سطحی را بالا می‌برد. این شرایط موجب تقویت پایداری خاک و کاهش توفان گرد و غباری در منطقه می‌شود.

خاک‌های مرطوب: مساحت خاک‌های مرطوب محدوده‌ی مدنظر در دشت اردبیل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ روند افزایش داشته که میزان آن حدود ۴٪ بوده است (جدول ۲)؛ اما از سال ۲۰۰۴ مساحت آن کاهش یافته و در سال ۲۰۰۸ نسبت به سال ۲۰۰۴ حدود ۳٪ کاهش یافته است. در سال ۲۰۱۲ نیز نسبت به سال ۲۰۰۸ حدود ۱٪ کاهش یافته و در سال‌های بعد تا ۲۰۱۹ تغییراتی در میزان مساحت زمین‌های مرطوب مشاهده نشده است. این خاک‌های مرطوب که عمدتاً به زمین‌های کشاورزی در حال آیش اختصاص دارد، تأثیر مشهودی بر توفان‌های گرد و غبار ندارد. از طرف دیگر، تغییرات مساحت این نوع کاربری در محدوده مدنظر را نمی‌توان به عوامل محیطی، آب‌وهوایی و انسانی نسبت داد؛ چون بعضی زمین‌های کشاورزی در مواقعی آیش بوده‌اند و در مواقعی نیز به زیر کشت برده شده‌اند و تغییرات آن تفسیرپذیر نیستند.

خاک خشک: یکی از کاربری‌های مهم و حیاتی در برنامه‌ریزی محیط‌زیست و عملیات آب‌خیزداری و مقابله با گسترش بیابان در محدوده مدنظر در دشت اردبیل، میزان مساحت و تغییرات کاربری مربوط به خاک خشک سطحی است که مستعد توفان گرد و غبار است. در زمان وقوع توفان گرد و غبار محلی در دشت اردبیل، ذرات غبار از این زمین‌های خشک و عاری از پوشش گیاهی و رطوبت خاک نشئت می‌گیرد. این کاربری در محدوده‌ی مدنظر طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ افزایش یافته و کاهش کاربری پوشش گیاهی به علت خشک‌سالی‌های اخیر در دشت اردبیل به کاربری خاک خشک تبدیل شده است. نتایج جدول (۲) نیز نشان می‌دهد که مساحت خاک خشک در سال ۲۰۰۴ نسبت به سال ۲۰۰۰ حدود ۵٪ افزایش یافته است.



شکل ۱۵: نمودار تغییرات زمانی کاربری پوشش گیاهی و اراضی زراعی در محدوده موردنظر طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۹ (منبع: نویسندگان)
 Figure 15: Diagram of temporal changes in vegetation cover and agricultural land use in the target area during the years 2000-2019

اراضی نفوذناپذیر: میزان مساحت این نوع کاربری به‌طور معمول طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ افزایش یافته که با گسترش شهرنشینی و یکجانشینی و پیشرفت در تأسیسات و چشم‌اندازهای انسانی، این نوع کاربری طی ۲۰ سال اخیر افزایش یافته است. همچنین براساس **جدول ۱** می‌توان تغییرات کاربری‌های اراضی را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ و نسبت به همدیگر مقایسه کرد. بر اساس **جدول ۱**، در سال ۲۰۰۴ نسبت به سال ۲۰۰۰، کاربری پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی ۱۰٪ کاهش یافته و جای خود را به خاک‌های مرطوب (زمین‌های آیش) و خاک‌های خشک بیابانی داده است. شاید بتوان ۴٪ افزایش خاک مرطوب را که همان زمین‌های آیش کشاورزی است، به اراضی زمین‌های زراعی نسبت داد که در زمان اخذ تصویر ماهواره‌ای، این زمین کشاورزی شخم خورده و به‌صورت آیش برای کشت سال بعد قرار داده شده است و این ۴٪ تغییر را نادیده گرفت؛ اما ۵٪ افزایش خاک خشک مربوط به حذف پوشش گیاهی و تبدیل آن به کانون گرد و غبار است؛ بنابراین، در سال ۲۰۰۴ کانون گرد و غبار در دشت اردبیل افزایش یافته است.

جدول ۱: میزان درصد تغییرات کاربری‌های اراضی در محدوده مدنظر طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۹

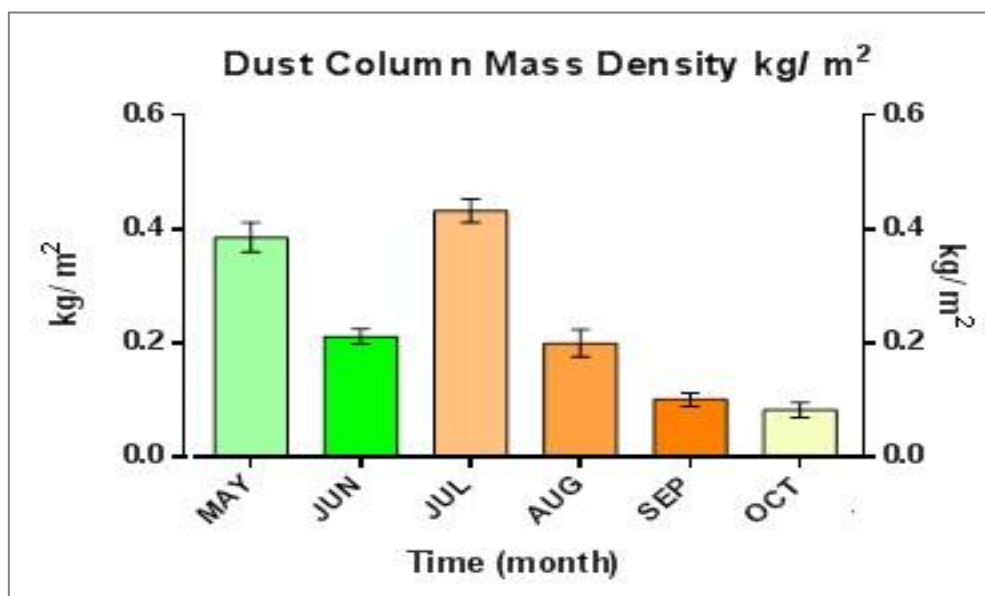
Table 1: Percentage of land use changes in the target area during the years 2000-2019

سال	پوشش گیاهی	خاک مرطوب	خاک خشک	اراضی نفوذناپذیر
درصد تغییرات (%)				
۲۰۰۰	۰	۰	۰	۰
۲۰۰۴	-۱۰	+۴	+۵	+۱
۲۰۰۸	+۲	-۳	-۲	+۴
۲۰۱۲	+۳	-۱	+۲	-۳
۲۰۱۶	-۲۵	۰	+۶	+۱۹
۲۰۱۹	+۵	۰	+۱	-۷

(منبع: نویسندگان)

بررسی غلظت ستونی گرد و غبار در دشت اردبیل

نتیجه محاسبه غلظت ستونی توده گرد و غبار معلق در اتمسفر دشت اردبیل (شهر اردبیل و کانون گرد و غبار محلی) در مقیاس ماهانه در روزهای همراه با گرد و غبار نشان می‌دهد (شکل ۱۶) بیشینه غلظت ستونی گرد و غبار جوی سال در ماه‌های گرم آن در ماه جولای است که $0/43$ کیلوگرم در مترمربع برآورد شد. در ماه‌های گرم به دلیل کاهش بارندگی و رطوبت نسبی و همچنین نبود یخبندان و یخ سطحی، خاک سطحی خشک است و با وقوع تندبادهای محلی، ذرات خاک از کانون گرد و غباری که در نزدیکی فرودگاه قرار دارد، از زمین، بلند و به‌صورت معلق وارد اتمسفر می‌شود.

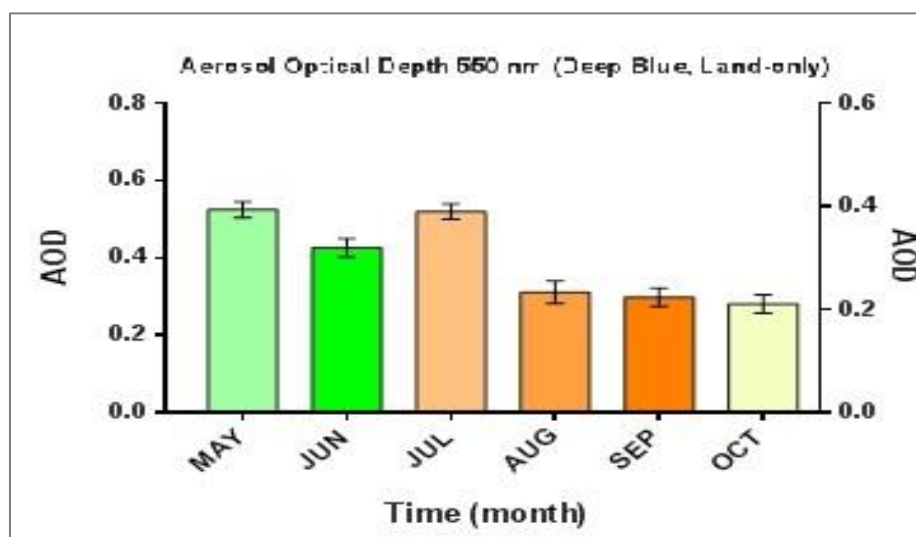


شکل ۱۶: میانگین غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی در ماه‌های مختلف سال در دشت اردبیل (منبع: نویسندگان)

Figure 16: Average column density of atmospheric dust mass in different months of the year in the Ardabil plain

بررسی عمق اپتیکی نور در دشت اردبیل

نتایج بررسی میزان عمق اپتیکی نور (AOD) نیز در روزهای گرد و غباری در مقیاس ماهانه در دشت اردبیل (شکل ۱۷) نشان می‌دهد که میزان عمق اپتیکی نور - که با افزایش غلظت ذرات غبار جوی افزایش می‌یابد - نیز همسان با غلظت ستونی گرد و غبار جوی است و بیشینه آن به جولای با AOD حدود ۰/۵ تعلق دارد.



شکل ۱۷: میانگین ماهانه عمق اپتیکی نور (AOD) در دشت اردبیل (منبع: نویسندگان)

Figure 17: Monthly average Aerosol Optical Depth (AOD) in the Ardabil plain

مدل رگرسیونی غلظت گرد و غبار دشت اردبیل

ابتدا همبستگی پیرسون در سطح احتمال ۹۵ درصد بین غلظت ستونی توده‌ی گرد و غبار جوی با متغیرهای پیشگو در مدل محاسبه شد که نتایج به صورت **جدول (۲)** ارائه شده است. بر این اساس، رطوبت نسبی و عمق اپتیکی نور همبستگی معناداری در سطح ۰/۰۱ با غلظت گرد و غبار دارند و سطح معناداری آنها ۹۹ درصد است. همچنین همبستگی رطوبت نسبی با غلظت گرد و غبار منفی است؛ بدین معنی که با افزایش رطوبت نسبی، غلظت ذرات گرد و غبار در جو کاهش می‌یابد و بالعکس، با کاهش رطوبت نسبی، غلظت ذرات غبار اتمسفری افزایش می‌یابد؛ به طوری که در فصول گرم سال که رطوبت نسبی هوا به‌ویژه در خرداد و تیرماه کاهش می‌یابد، غلظت گرد و غبار جوی افزایش می‌یابد؛ اما میزان شاخص عمق اپتیکی نور نیز با غلظت گرد و غبار جوی رابطه مستقیم و معناداری دارد. درواقع عمق اپتیکی نور نیز ناشی از غلظت گرد و غبار است و هرچه غلظت افزایش یابد، میزان عمق اپتیکی نور نیز افزایش می‌یابد.

در مدل‌سازی، ابتدا متغیرهای پیشگو وارد مدل می‌شوند و متغیرهایی که تأثیری در متغیر وابسته (گرد و غبار جوی) نداشتند، از مدل حذف می‌شوند و در گام دوم (مدل ۲) فقط متغیرهایی در مدل باقی ماندند که بیشترین تأثیر و همبستگی را با متغیر وابسته داشتند؛ بنابراین، مدل ۲ از معادله رگرسیون برای ترسیم مدل غلظت ستونی گرد و غبار جوی در دشت اردبیل در نظر گرفته شد (**جدول ۳**). از آنجایی که ضریب همبستگی (R) ۰/۹۲۴ و ضریب تعیین (R²)

(Square) ۰/۸۵۴ و همچنین ضریب تعیین اصلاح شده (Adjusted R Square) ۰/۸۲۱ محاسبه شده است، گام دوم مدل رگرسیونی مناسب است. هرچه این مقادارها به ۱ نزدیک‌تر باشند، مدل بیانگر رابطه بیشتری بین متغیر وابسته و مستقل است. به بیان دیگر، مدل رگرسیونی توانسته درصد بیشتری از تغییرات غلظت گرد و غبار را تحت پوشش قرار می‌دهد یا بیان کند. در انتهای جدول نیز ستون Durbin-Watson آماره مربوطه را با مقدار ۱/۹۴۸ نشان می‌دهد. اگر مقدار این آماره نزدیک به ۲ باشد، نشان از مستقل بودن باقی‌مانده‌ها خواهد داد. بر این اساس، مدل مربوطه مناسب است. با توجه به تحلیل مربوط به واریانس برای مدل رگرسیونی در جدول ANOVA (جدول ۴) و بزرگ‌بودن F مقدار $Sig=0.000<0.05$ نتیجه می‌گیریم که مدل رگرسیونی مناسب خواهد بود؛ زیرا بیشتر تغییرات متغیر وابسته (غلظت گرد و غبار جوی) در مدل رگرسیونی دیده شده است؛ به این معنی که سهم مدل ۲ (Regression) در تغییرات کل که در سطر آخر (Total) ستون Sum of Squares دیده می‌شود (۰/۲۲۷) به نسبت سهم خطا یا باقی‌مانده‌ها (Residual) که ۰/۰۳۳ است، بیشتر است.

جدول ۲: همبستگی غلظت ستونی گرد و غبار با متغیرهای جوی در دشت اردبیل

Table 2: Correlation of dust column density with atmospheric variables in the Ardabil plain

غلظت گرد و غبار		متغیرها
سطح معناداری	ضریب همبستگی	
۰/۱۰۰	۰/۳۹۸	دمای هوا
۰/۰۳۹	-۰/۵۲۶	بارش
۰/۰۰۱ **	-۰/۸۲۳	رطوبت نسبی
۰/۲۰۱	-۰/۲۶۶	سرعت باد
۰/۰۰۰ **	۰/۸۲۷	عمق اپتیکی نور
۰/۰۸۶	۰/۴۲۲	دمای خاک

(منبع: نویسندگان)

جدول ۳: ضرایب همبستگی مدل رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام

Table 3: Correlation coefficients of the multiple linear regression model using the stepwise method

Model Summary					
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
2	0.924	0.854	0.821	0.06076	1.948

(منبع: نویسندگان)

جدول ۴: جدول تجزیه واریانس برای مدل رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام به گام

Table 4: Analysis of variance table for multivariate linear regression model using stepwise method

ANOVA						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
2	Regression	0.194	2	0.097	26.225	000
	Residual	0.033	9	0.004		
	Total	0.227	11			

(منبع: نویسندگان)

مطابق جدول Coefficients که مقدار ثابت Constant در مدل با مقدار $1/734$ ظاهر می‌شود و با توجه به کوچک‌تر بودن مقدار sig متغیرهای رطوبت نسبی و عمق اپتیکی نور $0/01$ فرض صفر بودنشان رد می‌شود. این دلیلی بر مناسب بودن مدل رگرسیونی است. ستون Unstandardize Coefficients که ضرایب واقعی را نشان می‌دهد، با توجه به واحد اندازه‌گیری هر یک از متغیرها ایجاد شده‌اند؛ بنابراین، نمی‌توان براساس بزرگی هر یک از ضرایب اهمیت متغیر مربوطه در مدل رگرسیونی را تشخیص داد؛ به این منظور از ستون Standardize Coefficients Beta استفاده شد که براساس آن هر ضریبی دارای Beta بزرگ‌تری باشد، در مدل رگرسیونی از اهمیت بیشتری نیز برخوردار است. به این ترتیب مشخص شد که متغیر عمق اپتیکی نور با $Beta = 0.522$ و رطوبت نسبی با $Beta = -0.513$ ، بهترین متغیر برای پیشگویی متغیر وابسته (غلظت گرد و غبار جوی) است. با توجه به این ضرایب، مدل رگرسیونی به صورت معادله ارائه شد که براساس آن می‌توان مدل غلظت ستونی گرد و غبار جوی در دشت اردبیل را با توجه به متغیرهای عمق اپتیکی نور و رطوبت نسبی برآورد کرد؛ بنابراین، با ورود ۶ متغیر به مدل رگرسیون، ۲ متغیر در مدل رگرسیونی باقی‌مانده و ۴ متغیر دیگر (بارش، دمای هوا، دمای خاک و سرعت باد) از مدل، حذف و مدل غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی با دو پارامتر ترسیم شد (جدول ۵). با توجه به جداول فوق حاصل از مدل رگرسیونی، معادله مدل غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی در دشت اردبیل به صورت رابطه (۱) زیر ترسیم شد.

$$\text{Dust Column Mass Density} = 1.734 + 0.522 x_1 - 0.513 x_2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این معادله، x_1 عمق اپتیکی نور و x_2 رطوبت نسبی هوا است؛ بنابراین، نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام به گام در معادله‌سازی غلظت ستونی توده گرد و غبار جوی نشان داد که از بین ۶ پارامتر محیطی و هواشناسی، عمق اپتیکی نور و رطوبت نسبی همبستگی معناداری با غلظت گرد و غبار داشت و در مدل رگرسیونی باقی‌ماندند و می‌توان با داشتن مقادیر این دو پارامتر، غلظت ستونی گرد و غبار جوی در دشت اردبیل را برآورد کرد.

جدول ۵: سطح معنی‌داری و ضرایب متغیرهای پیشگو در مدل رگرسیون

Table 5: Significance level and coefficients of predictor variables in the regression model

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
2	(Constant)	1.734	0.573	3.025	0.014
	عمق اپتیکی نور	0.587	0.179	3.287	0.009
	رطوبت نسبی	-0.024	0.007	-3.233	0.010

(منبع: نویسندگان)

نتیجه‌گیری

توفان‌های گرد و غبار یکی از پدیده‌های جوی - محیطی است که با نشست گرفتن از بیابان‌ها و مناطق خشک، خسارت‌های فراوانی بر محیط‌زیست وارد می‌سازد. دشت اردبیل واقع در استان اردبیل، یکی از دشت‌های حاصلخیز

کشور بوده که شهر اردبیل نیز در این دشت قرار گرفته و سال‌هاست که اقتصاد آن متکی به کشاورزی هستند؛ اما به دلیل وقوع توفان‌های گرد و غباری و افزایش فرکانس رخداد آن، نگرانی‌ها را برانگیخته است؛ زیرا مطالعات محیطی متخصصان در دشت اردبیل بیانگر وجود یک کانون محلی گرد و غبار در دشت اردبیل است؛ بنابراین، در این پژوهش الگوهای مولد رخداد گرد و غبار طی ماه‌های گرم سال در دوره ۱۹ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۸) با رویکرد محیطی به گردشی استخراج و تحلیل شدند و مسیر گرد و غبار محدوده با استفاده از HYSPLIT ردیابی شد.

در بررسی شناخت الگوهای جوی مولد گرد و غبار نیز از سطح فشار تراز دریا استفاده شد و نتایج آن بیانگر اثر سیستم‌های پرفشار و کم‌فشار سطحی است که با ایجاد ناپایداری در منطقه موجب وقوع توفان گرد و غبار در دشت اردبیل می‌شوند. همچنین بررسی ماهانه این الگوها نشان داد که کانون محلی نقش بارزی در وقوع توفان‌های گرد و غبار در منطقه دارند. اگرچه ردیابی ذرات غبار و بررسی الگوهای همدیدی منطقه نشان می‌دهند که گرد و غبار از سمت عراق و سوریه و مناطق مرزی بین ایران و عراق وارد دشت اردبیل می‌شوند (که مؤید نتایج پژوهش [دهداززاده و صلاحی، ۱۳۸۹؛ ریوندی و همکاران، ۱۳۸۹؛ قوامی و همکاران، ۱۳۹۳](#))، گرادیان و شیو فشاری زیادی که در زمان ورود سیستم‌های ناپایدار به منطقه ایجاد می‌شود، موجب تشدید تندبادهای محلی در دشت اردبیل می‌شود و عبور این تندبادها از سطح کانون محلی گرد و غبار در دشت اردبیل، موجب تغلیظ توفان و حرکت ذرات خاک سطحی این کانون محلی و به‌صورت توده عظیم گرد و غبار در دشت اردبیل ظاهر می‌شود؛ زیرا در زمین‌های زراعی بخش شرقی شهر اردبیل و فاصله ۳/۶ کیلومتری شرق شهر اردبیل، در نزدیکی جنوب فرودگاه اردبیل و شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل، زمینی به مساحت تقریبی ۶,۸۸۰ هکتار عاری از پوشش گیاهی، مسکونی و تجاری است و خاک‌های سست سطحی آن در فصول خشک سال به دلیل عدم وجود رطوبت، گسسته و با تشدید تندبادهای منطقه، ذرات خاک از سطح زمین بلند می‌شود و به سمت غرب (شهر اردبیل) جریان می‌یابد و به‌عنوان توفان گرد و غبار محلی شناخته می‌شود و اکوسیستم‌های محیطی و جامعه انسانی شهر اردبیل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر آن، شهرک صنعتی ۲ اردبیل که بزرگ‌ترین شهرک صنعتی استان اردبیل نیز است، در فاصله ۱۱ کیلومتری شرق اردبیل، نزدیک به فرودگاه و کانون گرد و غبار محلی است. فعالیت کارخانه‌ها در این شهرک صنعتی نیز منجر به تشدید آلودگی هوا می‌شود و با انتشار ذرات غبار به اتمسفر و ترکیب آن با ذرات گرد و غبار معدنی در کانون گرد و غبار، منجر به افزایش غلظت آلاینده‌های هوا می‌شود و در زمان وقوع بادهای محلی، به‌صورت توده عظیم گرد و غبار به سمت شهر اردبیل جریان می‌یابد.

همچنین نتایج پایش تغییرات کاربری‌های دشت اردبیل نشان داد که خاک‌های خشک سطحی منطقه که درواقع کانون اصلی گرد و غبار هستند، طی ۲۰ سال اخیر (۲۰۰۰-۲۰۱۹) افزایش یافته و از میزان مساحت پوشش گیاهی در منطقه کاسته شده که این نوع تغییر اثر مشهودی بر افزایش وقوع توفان‌های گرد و غبار داشته است؛ زیرا پوشش گیاهی موجب جذب رطوبت سطحی و تجمع آن در سطح خاک می‌شود و در نتیجه، پایداری خاک را حفظ می‌کند و سرعت آستانه برشی باد را برای روبش ذرات خاک سطحی بالا می‌برد. این شرایط موجب تقویت پایداری خاک و کاهش توفان گرد و غباری در منطقه می‌شود؛ اما نتایج این پژوهش نشان داد که مساحت پوشش گیاهی در منطقه کاهش پیدا کرده و این شرایط موجب از دست دادن رطوبت سطحی خاک و برهم زدن تعادل خاک شده که در نهایت

با ناپدید شدن خاک سطحی و کاهش سرعت آستانه برشی باد، با وقوع تندباد محلی، گرد و غبار سطحی به صورت معلق وارد هوا شده است و به شکل توفان گرد و غبار در منطقه ظاهر می شود؛ به طوری که براساس مدل رگرسیون نیز نقش رطوبت نسبی بارز شناسایی شد و می توان مدل غلظت ستونی گرد و غبار جوی در دشت اردبیل را با توجه به متغیرهای عمق اپتیکی نور و رطوبت نسبی برآورد کرد. پیشنهاد می شود برای تثبیت خاک نواحی خشک منطقه گونه های علفی و مرتعی مناسب کشت و تقویت شود تا ضمن بهره مند شدن از مزایای اقتصادی آنها از شیوع رخداد گرد و غبار در این منطقه کاست.

منابع

- براتی، غلامرضا، لشکری، حسن، و کرمی، فریا (۱۳۹۰). نقش همگرایی سامانه های فشار بر رخداد توفان های غباری استان خوزستان. *جغرافیا و توسعه*، ۹(۲۲)، ۳۹-۵۶. https://gdij.usb.ac.ir/article_569.html
- برخوردار، سمیرا، مرادی، محمد، و ارکیان، فروزان (۱۳۹۶). مقایسه همدیدی وقوع توفان های شدید گرد و خاک در فصول بهار و تابستان در شمال استان سیستان و بلوچستان. *پژوهش های علوم و فنون دریایی*، ۱۲(۲)، ۸۵-۹۲. https://journals.iau.ir/article_540327.html
- جلیلیان، شادی (۱۴۰۱). آشکارسازی مسیرهای طوفان گرد و غبار ورودی غرب ایران با استفاده از مدل پخش لاگرانژی ذرات HYSPLIT. *مدیریت اکوسیستم های طبیعی*، ۲(۴)، ۶۳-۷۰. <https://doi.org/10.22034/emj.2024.714453>
- خالدی، کوهسار (۱۳۹۲). زیان های اقتصادی توفان گرد و غبار بر استان های غربی ایران (مطالعه موردی: ایلام، خوزستان و کرمانشاه). *فصلنامه مدل سازی اقتصادی*، ۷(۳)، ۱۰۵-۱۲۵. <https://sanad.iau.ir/Journal/eco/Article/995595>
- خوش اخلاق، فرامرز، پژوه، فرشاد، جعفری، فرزانه، و کوهی، صنم (۱۳۹۸). واکاوی همدیدی توفان های گرد و خاک شمال غرب ایران. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۲(۴)، ۲۷۲-۲۸۶. https://www.ims-jmas.net/article_128174.html
- خوشحال دستجردی، جواد، موسوی، سید حجت، و کاشکی، عبدالرضا (۱۳۹۱). تحلیل همدید توفان های گرد و غبار ایلام (۱۹۸۷-۲۰۰۵). *فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۳(۲)، ۱۵-۳۴. https://gep.ui.ac.ir/article_18542.html
- دهدازاده، محمد، و صلاحی، برومند (۲۷-۲۸ بهمن، ۱۳۸۹). *بررسی آماری و تحلیلی بر الگوهای همدید مولد گرد و خاک در استان فارس در سال های ۱۳۹۳-۲۰۰۲*. دومین همایش ملی فرسایش بادی و توفان های گرد و غبار، دانشگاه یزد. <https://civilica.com/doc/100897>
- رستمی، دانا، و حسینی، سید اسعد (۱۳۹۷). واکاوی و ردیابی پدیده گرد و غبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش از دور. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۵(۳)، ۱۰۳-۱۰۹. <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.3.103>

ریوندی، امیر، میررکنی، مجید، و محمدی‌ها، امیر (۱۳۹۲). بررسی تشکیل و انتشار توفان‌های گردوخاک ورودی به غرب و جنوب غرب ایران با استفاده از مدل پخش لاگرانژی ذرات HYSPLI. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*،

۴(۱۳)، ۱-۱۶. https://clima.irimo.ir/article_14128.html

قوامی، سمیرا، کبودوندپور، شهرام، محمدی، بختیار، و امان‌اللهی، جمیل (۱۳۹۳). تحلیل الگوهای همدید مؤثر بر رخداد توفان‌های گردوخاک استان کردستان. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، (۱۹)، ۶۷-۸۰.

https://clima.irimo.ir/article_15696.html

محمدپور پنجاه، محمدرضا، ملکوتی، حسین، و باباحسینی، سمیرا (۱۳۹۵). دستیابی به چشمه توفان‌های گرد و غبار به کمک مدل‌های عددی: معرفی رویکردی برای پیش‌بینی توفان‌های گردوغبار. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*،

۲۷(۱)، ۴۳-۵۲. <https://doi.org/10.22108/gep.2016.20792>

محمدخورشیددوست، علی، محمدی، غلامحسن، حسینی صدر، عاطفه، جوان، خدیجه، و جمالی، ابوالفضل (۱۳۹۲). تحلیل همدید عوامل مؤثر در فراوانی روزهای گرد و غباری غرب کشور. *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۷(۴۶)،

۴۷-۶۶. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_804.html

محمدی، فهیمه، کمالی، سمیه، و اسکندری، مریم (۱۳۹۴). ردیابی منابع گرد و غبار در سطوح مختلف جو تهران با استفاده از مدل HYSPLIT. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۴(۴)، ۳۹-۵۴.

<https://doi.org/10.22067/geo.v4i4.41109>

محمدی، هانیه، بذرافشان، جواد، و لیاقت، عبدالمجید (۱۴۰۲). تحلیل همبستگی خشکسالی - گرد و غبار و بررسی ارتباط آن با تغییرات پوشش گیاهی در استان خوزستان. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۱۰)، ۱۴۴۷-۱۴۶۵.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364328.669560>

مصطفائی، حسن، علیجانی، بهلول، و سلیقه، محمد (۱۳۹۴). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های شدید و فراگیر در ایران.

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۴)، ۶۵-۷۶. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65>

ملکوتی، حسین، باباحسینی، سمیرا، نوحه‌گر، احمد، آزادی، مجید، و محمدپور، محمدرضا (۱۳۹۲). مطالعه همدیدی و عددی نشر، انتقال و شناسایی چشمه یک توفان گرد و غبار سنگین در منطقه خاورمیانه. *فصلنامه پژوهش‌های*

فرسایش محیطی، ۳(۴)، ۶۹-۸۰. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-201-fa.html>

وطن‌پرست قلعه‌جوق، فاطمه، صلاحی، برومند، و زینالی، بتول (۱۴۰۳). پایش تغییرات زمانی - مکانی گرد و غبار معلق جو در استان‌های منتخب نیمه غرب ایران با استفاده از تصاویر MODIS و Sentinel-5. *جغرافیا و*

برنامه‌ریزی محیطی، ۳(۳۵)، ۱۱۳-۱۲۸. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.140621.1635>

References

- Barati, G., Lashkari, H., & Karimi, F. (2013). The role of convergence of pressure systems on the occurrence of dust storms in Khuzestan province. *Journal of Geography and Development*, 9(22), 39-56. https://gdij.usb.ac.ir/article_569.html [In Persian]
- Barkan, J., Alpert, P., Kutiel, H., & Kishcha, P. (2005). Synoptics of dust transportation days from Africa toward Italy and central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D7), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2004JD005222>

- Barkhordar, S., Moradi, M., & Arkian, F. (2017). The Synoptic Comparison of Severe dust Storms in the Spring and Summer in North of Sistan and Baluchistan Province. *Journal of Marine science & Technology Research*, 12(2), 85 – 92. https://journals.iau.ir/article_540327.html [In Persian]
- Bian, H., Tie, X., Cao, J., Ying, Z., Han, S., & Xue, Y. (2011). Analysis of a Severe Dust Storm Event over China: Application of the WRF-Dust Model. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(4), 419–428. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.04.0053>
- Cao, H., Amiraslani, F., Liu, J., & Zhou, N. (2015). Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets. *Science of the Total Environment*, 502, 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.025>
- Dehdarzadeh, M., & Salahi, B. (2011). A statistical and analytical study on the synoptic patterns of dust generators in Fars province in 1993-2002. *2nd National Conference on Wind Erosion and Dust Storms*. 15th and 16th of February. Yazd University. <https://civilica.com/doc/100897/> [In Persian]
- Dimitriou, K., & Kassomenos, P. (2018). Day by day evolution of a vigorous two wave Saharan dust storm - Thermal and air quality impacts. *Atmósfera*, 31(2), 105-124. <http://dx.doi.org/10.20937/ATM.2018.31.02.01>
- Drack, J. M. E., & Vázquez, D. P. (2018). Morphological response of a cactus to cement dust pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 571-577. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.046>
- Ekstrom, M., McTainsh, G. H. & Chappell, A. (2004). Australian dust storms: temporal trends and relationships with synoptic pressure distributions (1960–99). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(12), 1581-1599. <https://doi.org/10.1002/joc.1072>
- Escudero, M., Stein, A., Draxler, R. R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S., & Avila, A. (2006). Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D06210), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JD006395>
- Jalilijan, S. (2023). Detection of Dust Storm Pathways in Western Iran Using the HYSPLIT Lagrangian Particle Dispersion Model. *Management of Natural Ecosystems*, 2(4), 63-70. <https://doi.org/10.22034/emj.2024.714453> [In Persian]
- Khaledi, K. (2012). Economic Loss of Dust Storms in Iran West Provinces Case Study of Ilam, Khuzestan and Kermanshah. *Economic Modeling*, 23(7), 105 – 125. <https://sanad.iau.ir/Journal/eco/Article/995595> [In Persian]
- Khan, R. K., & Strand, M. A. (2018). Road dust and its effect on human health: a literature review. *Epidemiology and Health*, 40, 2018013. <http://dx.doi.org/10.4178/epih.e2018013>
- Khosh Akhlagh, F., Pazhoh, F., Jafari, F., & Kohi, S. (2020). Synoptic analysis of Iran's northwest dust storms. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 2(4), 272-286. https://www.ims-jmas.net/article_128174.html [In Persian]
- Khoshhal Dastjerdi, J., Mousavi, S. H., & Kashki, A. (2012). Synoptic analysis of Ilam dust storms (1987 - 2005). *Geography and Environmental Planning*, 23(2), 15-34. https://gep.ui.ac.ir/article_18542.html [In Persian]
- Malakooti, H., Babahosseini, S., Nohegar, A., Azadi, M., & Mohammadpour, M. (2013). Numerical and Synoptic Study of Emission, Transport and Identify Potential Sources of a Severe Dust Storm Over Middle East. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research*, 3(4), 69-80. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-201-fa.html> [In Persian]
- Mashat, A., & Awad, A. (2010). The classification of the dusty areas over the Middle-East. *Bull Fac Sci Cairo Univ*, 78(A), 1-19.
- Modarres, R., & Sadeghi, S. (2018). Spatial and temporal trends of dust storms across desert regions of Iran. *Natural Hazards*, 90(2), 101-114. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3035-8>
- Mohammadi, F., Kamali, S., & Eskandary, M. (2016). Tracing Dust Sources in Different Atmosphere Levels of Tehran Using Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(4), 39-54. <https://doi.org/10.22067/geo.v4i4.41109> [In Persian]

- Mohammad Khorshiddoust, A., Mohammadi, G. H., Hosseini Sadr, A. Javan, K., & Jamali, A. (2014). Synoptic Analysis of Effective Factors on Dust Frequency in West of Iran. *Journal of Geography and Planning*, 17(46), 47-66. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_804.html [In Persian]
- Mohammadi, H., Bazrafshan, J., & Liaghat, A. (2023). Correlation analysis of drought-dust and its relationship with vegetation changes in Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(10), 1447-1465. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364328.669560> [In Persian]
- Mohammadpour Penchah, M., malakooti, H., & Babahoseini, S. (2016). Access to sources of dust storms using numerical models: introducing an approach for forecasting of dust storms. *Geography and Environmental Planning*, 27(1), 43-52. <https://doi.org/10.22108/gep.2016.20792> [In Persian]
- Mostafaii, H., Alijani, B. & Saligheh, M. (2016). Synoptic Analysis of Widespread Heavy Rains in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2(4), 65-76. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65> [In Persian]
- Qavami, S., Kaboodvandpour, S., Mohammadi, B., & Amanollahi, J. (2014). Analysis of synoptic patterns affecting the occurrence of dust storms in Kurdistan province. *Journal of Climate Research*, (19), 67-80. https://clima.irimo.ir/article_15696.html [In Persian]
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10, 103-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.001>
- Rivandi, A., Mirrokni, M., & Mohammadiha, A. (2013). Investigation of Formation and Propagation of Dust Storms Entering to the West and Southwest of Iran Using Lagrangian Particle Diffusion Model, HYSPLIT. *Journal of Climate Research*, (13), 1-16. https://clima.irimo.ir/article_14128.html [In Persian]
- Rostami, D., & Hosseini, S. A. (2018). Analysis and Tracking Dust Phenomenon in South and Southeast of Iran by using HYSPLIT Model and the Principles of Remote Sensing. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(3), 103-119. <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.3.103> [In Persian]
- Singh, S. K., Srivastava, P. K., Gupta, M., Thakur, J. K., & Mukherjee, S. (2014). Appraisal of land use/land cover of mangrove forest ecosystem using support vector machine. *Environmental earth sciences*, 71(5), 2245-2255. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2628-0>
- Shan, W., Shan, W., Yin, Y., Lu, H., & Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*, 93(4), 767-776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.007>
- Shao, Y., & Dong, C. H. (2006). A review on East Asian Dust storm Climate, Modeling and monitoring. *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.011>
- Vatanparast Ghaleh Juq, F., Salahi, B., & Zeinali, B. (2024). Monitoring Temporal-Spatial Changes of Atmospheric Suspended Dust in Selected Provinces of the Western Half of Iran Using MODIS and Sentinel-5 Images. *Geography and Environmental Planning*, 35(3), 113-128. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.140621.1635> [In Persian]
- Zoljoodi, M., Didevarasl, A., & Ranjbar Saadatabadi, A. (2013). Dust events in the western parts of Iran and the relationship with drought expansion over the dust-source areas in Iraq and Syria. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3(03), 321-336. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2013.33034>