

Haze Storms in Iran: Analyzing Challenges and Providing Management Solutions

Alireza Aslemand¹, Faezeh Borhani^{2*} 

1. Ph.D., Department of Applied Geomatics, Faculty of Human Sciences, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada.
2. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Introduction: There are several sources for the production of these particles that the most important of them is incomplete combustion of hydrocarbon compounds which come from anthropogenic sources, and Dust Storm, and Wildfires in natural sources. In global scale, Natural dust contribution into the atmosphere is mostly from arid and semiarid regions. In the Middle East that has a large area of the dry belt, the main sources of particles, are dust storms. Thick dust that comes over Iran from western and southwestern neighboring countries passes through the southern, western and central of Iran and even Tehran. Haze and dust storms in recent years cause to poor air quality conditions in many cities, especially in large cities like Tehran and Ahvaz. According to our investigations, Zabol and Ahvaz are the most polluted major cities in the Iran in terms of particulate matters.

Methods: There are many factors that play a role in the management of haze phenomenon such as monitoring and analyzing observation stations, satellite images and numerical simulations. Monitoring and measurement haze in Iran is still relies on the use of air quality urban monitoring stations. These stations are strongly influenced by particle emissions from transport and industrial processes and only if there is on line monitoring in urban area the dust effects on environment can be assessed. Then application of satellite images has been discussed. MODIS images have many applications in the study of climate issues. MODIS received data from the TERRA and AQUA satellites, these images give the optical depth of aerosols. Also, by using MODIS natural color images start and moving of dust storms are visible. In this study we used EUMETSAT images, which provide monitoring dust storms on earth. These satellites help meteorologist and environmental experts to determine dust trajectories and sources. Next, we used numerical models including SKIRON, AEMET and HYSPLIT for dust storms management. Models enables accurate simulation of motion of dust, the main wind direction, changes in boundary layer height and show how moving dust. After that we applied HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). HYSPLIT model is a complete system for computing simple air parcel trajectories to complex dispersion and deposition simulations. At last wind erosion control strategies described. Some of the strategies for controlling wind erosion and dust emissions are reducing wind speed at ground level to be less than the emission threshold velocity and factors such as moisture and integrity of the Earth's tectonic.

Results And Conclusion: Undoubtedly haze and its harmful effect is one of the dramatic environmental problems especially in arid region including our country. According to the health organization, four-city in Iran are highly polluted cities in the world in terms of particulate matter, this represents a very critical situation in the country. In this paper, Tools used in air quality management are monitoring stations, satellite imagery and numerical models discussed. These tools used to predict how and where the dust initiate and spread. the methods of controlling wind erosion and dust emission was assigned to work in a fundamental way to avoid the haze problems. At the end, the main approaches to control wind erosion and dust emissions such as the proper use of land, control soil moisture, vegetation or artificial barriers downwind (wind break) described.

Review History

Received: Aug 10, 2025

Revised: Sep 30, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Haze

Air quality management

Modeling

Satellite images

Wind erosion control

* Corresponding Author Email: f.borhani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0003-2686-6702

ریزگردها در ایران: تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی

علیرضا اصلمند^۱، فائزه برهانی^{۲*} 

۱. دکتری تخصصی، گروه سنجش از دور، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شریروک، شریروک، کبک، کانادا.

۲. استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

با گسترش جمعیت شهری و رشد بی‌رویه صنایع در محدوده‌های شهری، شهرهای بزرگ با مشکل آلودگی محیط‌زیست و به خصوص آلودگی هوا مواجه‌اند. در ایران نیز با توجه به روند رو به رشد صنعتی شدن کشور، این مشکل در سال‌های اخیر نمود بیشتری پیدا کرده است. مشکلی که با توجه به جنگ‌های غرب آسیا و بمباران‌های وسیع و نابسامانی‌های آن در عراق، عدم رسیدگی به آبخیزداری و اصول پیشگیری در کشورهای عربی منطقه و همچنین تشدید پدیده گرمایش جهانی و کاهش بارندگی‌ها بروز نموده، انتشار ریزگردها در کشورهای منطقه غرب آسیا و از جمله ایران می‌باشد. با توجه به مشکل جدید ریزگردها، ضرورت دارد که سازمان‌های محیط زیستی به عنوان متولیان این امر، آغازگر حرکت‌های منسجم در تدوین راهکارهای مدیریتی سیستماتیک و واقع‌گرایانه و نهادینه کردن آن از طریق مراجع قانونی باشند. در این مقاله، ابتدا به بررسی علل بروز و انتشار طوفان‌های گرد و غباری و اهمیت آثار آن بر وضعیت منطقه‌ای و محیط‌زیستی پرداخته شده است. سپس رویکردها و ابزارهای مدیریت کیفیت هوا از جمله پایش و نمونه برداری ریزگردها، ابزار تصاویر ماهواره‌ای (MODIS و EUMETSAT) و مدل‌سازی عددی (کاربرد مدل‌های HYSPLIT و SKIRON) مورد بحث قرار گرفت و در پایان رویکردهای اساسی کنترل فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار همچون استفاده صحیح از زمین، حفظ رطوبت خاک، استقرار پوشش گیاهی و یا مصنوعی و ایجاد موانع در مسیر باد (بادشکن) بیان شد.

کلمات کلیدی

ریزگردها

مدیریت کیفیت هوا

مدل‌سازی

تصاویر ماهواره‌ای

کنترل فرسایش بادی

۱- مقدمه

منابع مختلفی برای تولید این ذرات وجود دارد که از مهمترین

آن‌ها می‌توان به احتراق ناقص ترکیبات هیدروکربنی از منابع انسان‌ساخت و طوفان‌های گرد و غبار (Dust Storms) و آتش‌سوزی جنگل‌ها (Wildfires) در منابع طبیعی اشاره کرد [2]. در مقیاس جهانی سهم عمده گرد و غبار طبیعی، از مناطق خشک و نیمه خشک وارد هوا می‌شوند. در منطقه غرب آسیا نیز که مساحت زیادی از آن در کمربند خشک جهان قرار دارد، منابع اصلی انتشار طبیعی ذرات، طوفان‌های گرد و غبار هستند [3].

به طور کلی ذرات معلق در هوا به مجموعه گسترده‌ای از ذرات گفته می‌شود که زیر مجموعه‌های آن در بسیاری از خواص تفاوت دارند. دود، گرد و غبار، غبار، مایعات ذره‌ای، مه، دوده و خاکستر همگی در خانواده ذرات معلق در هوا قرار می‌گیرند. بسته به اینکه ذرات ریز معلق از کدامیک از حالات و منابع در هوا پخش شوند، خواص مربوط به جنس، هندسه و حالت فیزیکی آن‌ها متفاوت است [1].

* رایانامه نویسنده مسئول: f.borhani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0003-2686-6702

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



طوفان‌های گرد و غباری، مختصری از وضع موجود و راهکارهای مدیریت و بررسی گرد و غبار با استفاده از پایش و اندازه‌گیری، تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های نرم‌افزاری می‌باشد. در پایان نیز پیرامون روش‌های کنترل فرسایش بادی مواردی ذکر شده است. در مطالعه پیش‌رو از تصاویر EUMETSAT، MODIS و HYSPLIT و SKIRON برای بررسی گرد و غبار استفاده شده است.

۲- علل بروز و پیش‌زمینه‌های لازم

در ایجاد فرسایش بادی و انتقال گرد و غبار ناشی از آن به جو، پیش‌زمینه جغرافیایی منطقه و سیستم‌های جوی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در ادامه به بررسی این عوامل پرداخته شده است.

۲-۱- عوامل جغرافیایی

فرایندهای رودخانه‌ای در تولید ذرات ریز با جدا کردن آن‌ها از ماتریس خاک و حمل آن‌ها به حوضه رسوب و یا دشت‌های آبرفتی مؤثر است. فعالیت‌های رودخانه‌ای (حضور رودخانه‌ها، جریان‌های فصلی و زودگذر، آبرفت‌ها، دریاچه‌های نمک و مخروط افکنه‌ها و گوده‌های نهشتی) در مناطقی که منبع گرد و غبارند، مشهود است. مخروط افکنه‌ها نیز از رسوبات ناشی از فرسایش آبی در دامنه کوه تشکیل می‌شوند که قسمت بالایی آن‌ها شامل رسوبات درشت و قسمت پایینی شامل رسوبات ریز است. گوده نهشتی (جلگه قلیایی)، یک بستر دریاچه خشک است که شامل رسوبات نمک‌های قلیایی ریز دانه می‌باشد. ارتباط دائمی بین منابع گرد و غبار با گوده‌های نهشتی اثبات شده است. الگوی جهانی خشکی توسط گردش عمومی جو تعیین می‌شود و خشک‌ترین مناطق جهان در پای کوه‌های بلند هستند زیرا هنگامی که جریان هوا به نزدیکی رشته کوهی می‌رسد یا باید از آن بالا رفته و یا باید منحرف شده تا از اطراف آن عبور کند. با بالا رفتن بسته‌ی هوا، آن بسته متراکم شده و با بارش رطوبتش را از دست می‌دهد، و وقتی از کوه پایین می‌آید، گرمایش بی‌دررو در حرکت رو به پایین، مانع تراکم و بارش است در نتیجه تولید جریان هوای گرم و خشک می‌کند که به گرم باد^۲ معروف است. در ارتباط با فرسایش بادی این فرآیند دارای سه نتیجه مهم است [7]:

گرد و غبار غلیظی که از کشورهای غربی و جنوب غربی ایران منشأ می‌گیرد، از مناطق جنوبی، غربی و مرکزی ایران عبور می‌کند و به تهران و حتی مناطق شرقی کشور می‌رسد. وقوع گرد و غبار و ریزگردها در طی چند سال اخیر بارها سبب وضعیت نامطلوب کیفیت هوا در بسیاری از شهرهای کشور و بخصوص کلان‌شهرهایی چون تهران و اهواز شد، به گونه‌ای که بارها تعطیلی این شهرها را سبب شد.

در مناطق مستعد گرد و غبار بسته به سرعت باد، زبری عناصر سطح، رطوبت خاک، اندازه دانه‌ها، پوشش گیاهی، بافت خاک، چسبندگی خاک و پستی و بلندی‌های زمین، ذرات ریز وارد جریان‌های جوی شده، تولید گرد و غبار می‌کنند. روش‌های انتقال ذرات به جو شامل معلق شدن، جهش ناگهانی و خزش می‌باشد [4,5].

این نوع گرد و غبار را که بر اثر فرسایش بادی تولید می‌شود، بر اساس تاثیر بر میدان دید و شدت گرد و غبار به سه دسته طبقه بندی می‌کنند، که به ترتیب شامل طوفان گرد و غبار، گرد و غبار وزنده و گرد و غبار معلق هستند. طوفان گرد و غباری مقادیر قابل توجهی گرد و غبار و شن را به وسیله بادهای قوی به بالا حمل کرده و ممکن است میدان دید را تا حد صفر کاهش دهد. گرد و غبار وزنده از لحاظ شدت در بین پدیده‌های گرد و غبار حد متوسط می‌باشد، این پدیده به وسیله بادهای با ارتفاع زیاد ایجاد می‌شود. گرد و غبار معلق پدیده‌ای با حداقل شدت است که در آن گرد و غبار ریز در بخش زیرین تروپوسفر معلق می‌ماند [6].

در زمینه گرد و غبار در جهان و به‌ویژه در کشورهای شرق آسیا، اسپانیا و آمریکا مطالعات فراوانی انجام شده است که در آن شناسایی منابع، مسیرهای حرکت توده‌ها، تعیین غلظت، سهم منابع مختلف در غلظت، روند طوفان‌های گرد و غبار و تحلیل ویژگی‌های گرد و غبار (شیمیایی و فیزیکی) با استفاده از مدل‌سازی عددی، تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور و پایش مورد نظر بوده است [3, 6]. در ایران تحقیقات کمی در این مورد گرد و غبار صورت گرفته که اغلب آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مانند TOMS^۱ به تحلیل فصلی و سالانه گرد و غبار و شناسایی منابع پرداخته شده است و از مدل‌سازی رایانه‌ای کمتر استفاده شده است. هدف تحقیق حاضر بررسی عوامل بروز

² Foehn wind

¹ Total Ozone Mapping Spectrometer

- باد نزدیک به سطح قوی برای بلند کردن ذرات ماسه و گرد و غبار از سطح خاک
- آشفته‌گی یا همرفت قوی برای پراکنده کردن ذرات به سطوح بالا
- بادهای قوی برای حمل و نقل افقی ذرات در مسافت‌های طولانی

نکته قابل توجه آن که سیستم‌های جوی تولیدکننده طوفان‌های گرد و غباری در نقاط مختلف جهان کاملاً متفاوت است. در اینجا به تشریح سه سیستم اصلی پرداخته می‌شود.

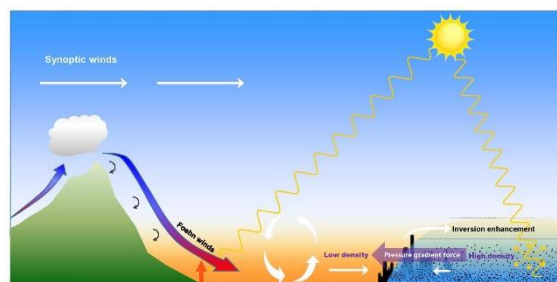
۲-۱-۲-۲- بادهای موسمی

در شمال آفریقا، غرب آسیا و جنوب شرقی آسیا طوفان‌های گرد و غباری اغلب توسط بادهای موسمی تولید می‌شوند. هارمتان^۱ (بادی شمالی جنوبی که خشک و داغ است و در سطح پایین می‌وزد) در شمال آفریقا و باد شمال^۲ در غرب آسیا از مثال‌های معروف این نوع بادهای هستند. الگوی باد و بارش در شمال آفریقا شدیداً تابع بادهای موسمی منظم و پیوسته‌ای است، که در دوره‌ای سالانه، در مناطق ۲ درجه شمالی در ژانویه و ۲۵ درجه شمالی در اگوست می‌وزند. شکل (۲) تصویری از دیواره‌ی طوفان گرد و غبار را نشان داده است. در غرب آسیا، باد شمال بین ماه‌های ژوئن و سپتامبر تقریباً هر روز می‌وزد. این باد ممکن است سبب ایجاد طوفان گرد و غبار بر روی عراق، کویت و شبهه جزیره عربستان شود.

هنگامی که باد شمال از بالای دشت‌های آبرفتی دجله و فرات می‌گذرد، مقادیر بسیار زیادی از گرد و غبار را به هوا بلند می‌کند که از روی کویت، شمال خلیج فارس و مناطقی از ایران گذر می‌کند. طوفان‌های گرد و غباری ناشی از باد شمال به صورت دیواره‌ای از گرد و غبار که دارای ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر بلندی و ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلومتر ضخامت هستند، حرکت می‌کنند. در درون این دیواره، میدان دید تقریباً "به صفر می‌رسد."

۲-۲-۲- چرخندها و سیستم‌های جبهه‌ای

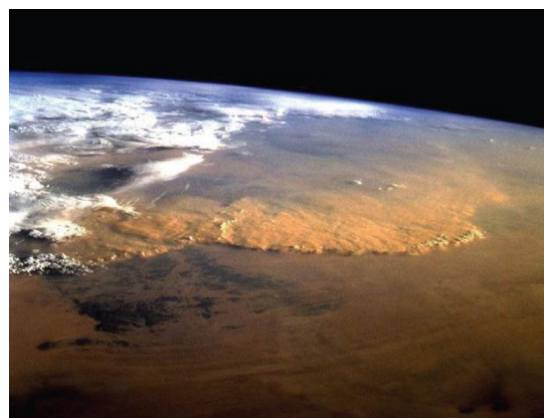
این عوامل سبب ایجاد طوفان‌های گرد و غباری در مقیاس بزرگ می‌شوند، بیشتر طوفان‌های گرد و غباری در شمال شرقی



شکل ۱. اثر عوامل جغرافیایی، کوه‌های بلند و باد فوهن در فرسایش بادی و

ایجاد طوفان‌های گرد و غباری [8]

Fig. 1. Effect of geographical factors, high mountains, and Foehn winds in creating dust storms through wind erosion



شکل ۲. تصویری از دیواره‌ی طوفان شن در صحرای آفریقا [7]

Fig. 2. Image of a dust storm in the Sahara Desert showing a dust wall

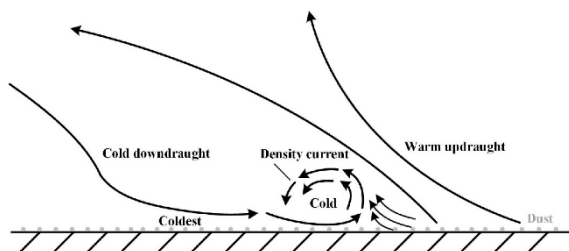
- در پای کوه، سایه خشک گسترش می‌یابد.
 - افزایش بارش در دامنه‌های کوهستانی که سبب فعالیت رودخانه‌ای و حمل و نقل رسوبات از دامنه کوه به دشت‌های مجاور می‌شود.
 - الگوی جریان‌های پیچیده در مناطق اطراف رشته کوه‌ها که بر انتقال گرد و غبار اثر می‌گذارد.
- چگونگی تأثیر عامل جغرافیایی و اثر گرم باد در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۲-۲- عوامل جوی

طوفان‌های گرد و غباری سنگین اغلب توسط سیستم‌های آب و هوایی شدید مثل بادهای موسمی، چرخندها و جبهه‌ها و طوفان‌های تندری به وجود می‌آیند. در این سیستم‌ها شرایط لازم هواشناسی برای شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غباری حضور دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به سه مورد زیر اشاره کرد [7]:

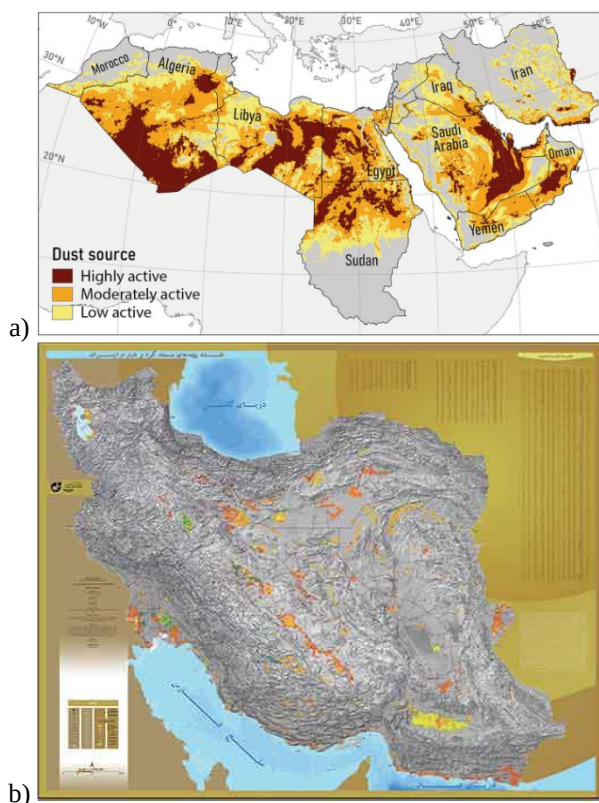
¹ Harmattan

² Shamal



شکل ۳. چگونگی ایجاد طوفان شن توسط چرخندها [7]

Fig. 3. How cyclones generate sandstorms [7]



شکل ۴. (a) کمربند گرد و غبار [15]، (b) نقشه پهنه های مستعد تولید گرد و

غبار در ایران (<https://data.gov.ir/dataset>)

Fig. 4. a) Dust belt [15], b) Map of dust-prone areas in Iran

استان های خوزستان، ایلام، سیستان و بلوچستان، کرمانشاه، کردستان، بوشهر، قم و حتی تهران بیش از سایر نقاط با ریزگردها درگیر هستند. برای نمونه، در سال ۲۰۲۳، بر اساس داده های ایستگاه های سنجش آلودگی هوا، میانگین غلظت ذرات معلق PM_{10} در زابل به ۳۲۰ میکروگرم بر مترمکعب و در اهواز به ۲۶۰ رسید. این در حالی است که حد استاندارد سازمان جهانی بهداشت برای PM_{10} تنها ۵۰ میکروگرم بر مترمکعب است. همچنین در برخی روزها، میزان حداکثری این ذرات از ۱۵۰۰ میکروگرم نیز فراتر رفت. در تهران نیز با وجود فاصله از کانون های اصلی،

آسیا و استرالیا بر اثر همین طوفان هاست. برای مثال، چرخندهایی که از فلات مغولستان سرچشمه می گیرند با عبور از صحرای گبی در شمال شرق آسیا سبب طوفان گرد و غبار می شوند، هم چنین حوادث گرد و غباری مهم در استرالیا بیشتر به علت جبهه های هوای سرد جنوبی است که از جنوب غربی به شمال شرقی گسترده می شود. در شکل (۳) چگونگی ایجاد طوفان شن توسط چرخندها نمایش داده شده است [7].

۲-۳-۲- طوفان های تندری

این طوفان ها با گردبادهایی با سرعت باد سطحی بسیار بالا، که به آن ها خطوط طوفانی می گویند، همراه می شوند. در تابستان روی برخی بیابان های جنوب صحرای آفریقا، در جنوب غرب آمریکا و بقیه مناطق خشک جهان همراهی این خطوط طوفانی با طوفان های گرد و غباری به صورت مداوم مشاهده است. در جلوی این نوع طوفان ها، هوای گرم و شناور ارتفاع گرفته و پس از متراکم شدن سبب ایجاد باران سنگین می شود، هوای خشک که در سطح بالا به طوفان می رسد به وسیله تبخیر قطرات بارش خنک شده، هنگامی که نزول می کند و به زمین برخورد می کند، شکسته و منحرف می شود و به عنوان تک های جدا شده از ابر به جلو حرکت کرده و تشکیل دیواره گرد و غبار می دهد. مشاهدات نشان می دهد که سرعت این بسته هوای جدا شده ممکن است از ۵۰ متر بر ثانیه بیشتر باشد ولی معمولاً سرعت در حدود ۲۰ متر بر ثانیه است [7].

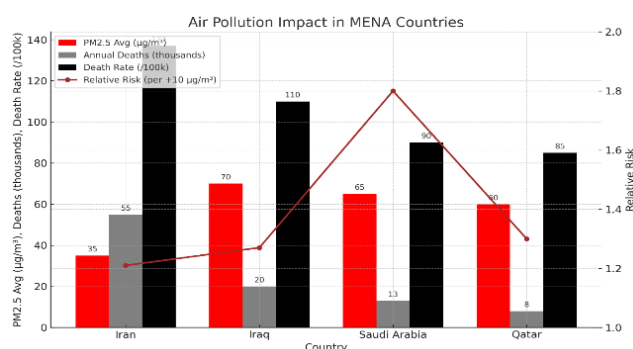
۲-۳-۲- وضعیت منطقه ای ایران در بحث ریزگردها

ایران که در کمربند گرد و غبار شکل (۴) قرار دارد در سال های اخیر شاهد افزایش کم سابقه در تعداد، شدت و گستره طوفان های گرد و غبار بوده است. این طوفان ها در بسیاری از موارد منشأ فرامرزی دارند. بیابان های خشک عراق، سوریه، عربستان و افغانستان از جمله منابع خارجی اصلی گرد و غبار هستند که با ورود به مرزهای غربی، جنوب غربی، جنوب و شرق ایران، بخش بزرگی از کشور را تحت تأثیر قرار می دهند. از سوی دیگر، کانون های داخلی گرد و غبار نیز به دلیل خشکسالی های مکرر، کاهش پوشش گیاهی، خشک شدن تالاب ها (همچون هورالعظیم، جازموریان و هامون) و حکمرانی ناپایدار منابع طبیعی، فعال تر شده اند.

افزایشی به خود گرفته است، مشکلی که با توجه به جنگ‌های غرب آسیا و بمباران‌های وسیع و نابسامانی‌های بعد از آن در عراق، عدم رسیدگی به آبخیزداری و اصول پیشگیری در کشورهای عربی منطقه و همچنین تشدید پدیده گرمایش جهانی و کاهش بارندگی‌ها تشدید شده است.

۴- ابزارهای حکمرانی کیفیت هوا در رویدادهای گرد و غباری

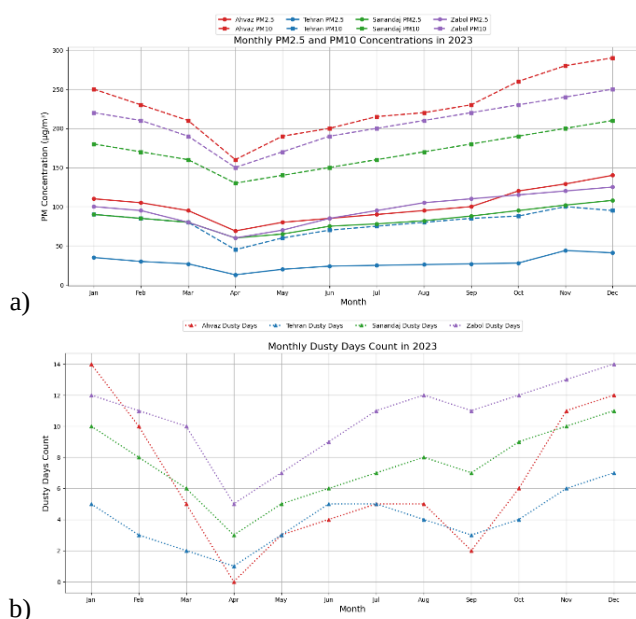
در حکمرانی پدیده ریزگردها عوامل بسیاری برای بهبود مدیریت ایفای نقش می‌کنند که می‌توان به پایش و تحلیل داده‌های زمینی، تصاویر ماهواره‌ای و شبیه‌سازی رایانه‌ای اشاره کرد.



شکل ۵. غلظت سالانه میانگین و تعداد و نرخ مرگ و میر در غرب آسیا [16]

WHO

Fig. 5. Annual average PM_{2.5} concentrations and related mortality rates in the Middle East region.



شکل ۶. a) وضعیت میانگین غلظت ذرات در روزهای گرد و غباری و b) تعداد

این روزها در سال ۲۰۲۳ (منبع: نویسنده)

Fig. 6. a) Average of concentration and b) number of dusty days in the 4 cities during the year 2023

میانگین PM_{2.5} به ۳۷ میکروگرم رسید و در بعضی روزها شاخص کیفیت هوا در محدوده ناسالم برای عموم قرار گرفت [9].

تعداد روزهای گردوغبار در این سال نیز به شکل چشم‌گیری بالا بود؛ زابل با بیش از ۱۱۵ روز، اهواز با حدود ۸۰ روز و آبادان با ۵۸ روز گردوغبار، از آلوده‌ترین نقاط کشور به شمار آمدند. شدت پدیده نیز به گونه‌ای بود که برخی پروازها لغو و مدارس در چندین استان تعطیل شدند.

۲-۴- وضعیت منطقه غرب آسیا

ریزگردها محدود به مرزهای ایران نیستند. کشورهای عراق، عربستان، کویت، سوریه، قطر و افغانستان نیز با شدت‌های مشابهی از این پدیده درگیر هستند. برای نمونه، در سال ۲۰۲۳، بغداد، کویت‌سیتی، ریاض و کابل جزو ۱۰۰ شهر اول جهان از نظر آلودگی ذرات معلق قرار گرفتند. وقوع طوفان‌های خاک به‌ویژه در بهار و تابستان، در این کشورها با کاهش دید، اختلال در حمل‌ونقل، آسیب به دستگاه‌های صنعتی و تهدید سلامت عمومی همراه بوده است [10].

۳- آثار بهداشتی و محیط زیستی

ریزگردها به ویژه ذرات ریز PM_{2.5} دارای آثار مخرب بر سلامت انسان هستند. این ذرات به عمق ریه نفوذ کرده و می‌توانند از سد تنفسی عبور کرده، وارد جریان خون شوند و موجب تشدید بیماری‌های قلبی-عروقی، آسم، برونشیت، سرطان ریه و حتی مرگ زودرس شوند [11, 12, 13, 14]. بر اساس گزارش مطالعه بار جهانی بیماری‌ها (GBD)، سالانه بیش از ۵۵ هزار مورد مرگ زودرس در ایران به آلودگی هوا نسبت داده می‌شود. علاوه بر آن، ریزگردها باعث آسیب به محصولات کشاورزی، آلودگی منابع آب، کاهش عملکرد تجهیزات صنعتی و تضعیف اکوسیستم‌ها می‌شوند. افزایش فرسایش خاک، رسوب‌گذاری در مخازن، و کاهش توان تولیدی اراضی کشاورزی از دیگر پیامدهای آن است.

شکل (۵) غلظت سالانه میانگین و تعداد و نرخ مرگ و میر در غرب آسیا و شکل (۶) وضعیت میانگین غلظت ذرات در روزهای گرد و غباری و تعداد این روزها در سال ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد.

علاوه بر وضعیت بحرانی غلظت گرد و غبار، تناوب بروز، شدت گرد و غبار و در نتیجه آثار آن در سال‌های اخیر روند

انتهایی برج پایش به ترتیب در فاصله های ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۹، ۱۳، ۱۷، ۲۱، ۲۵، ۲۹، ۳۳، ۳۴، ۴۱، ۴۵ و ۴۹ متر بالاتر از سطح زمین قرار گرفته‌اند. مقدار برداشت و جابه جایی ذرات درشت که از طریق خزشی و یا جهشی جابه جا می شوند به طور همزمان توسط تله‌های رسوبگیر دیگری که در سطح زمین و در اطراف برج پایش نصب شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند. پارامترهای سرعت و جهت باد نیز به طور همزمان و در ارتفاع‌های پانزده گانه به روش الکترونیکی ثبت می‌شوند. نمونه‌ای از این ایستگاه‌های پایش در شکل (۸) دیده می‌شوند [17].

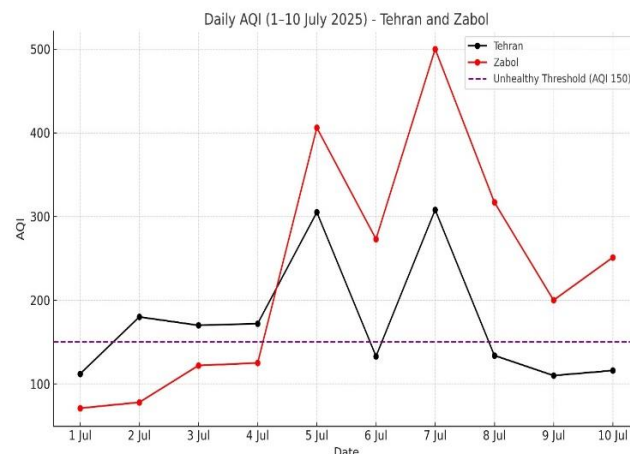
۲-۴- تصاویر ماهواره MODIS

تصاویر MODIS کاربردهای فراوانی در مطالعه مباحث اقلیم‌شناسی دارند، در بحث گرد و غبار نیز تاکنون مقالات فراوانی پیرامون کاربرد این تصاویر در شناسایی منابع و تحلیل مسیرهای حرکتی طوفان‌های گرد و غباری به چاپ رسیده است. MODIS اطلاعات خود را از ماهواره‌های TERRA و AQUA دریافت می‌کند که این تصاویر عمق اپتیکی را در تمام سطح کره زمین در مدت زمان یک تا دو روز به دست می‌دهد.

همچنین با استفاده از تصاویر گرفته شده از MODIS تصاویر واقعی گرد و غبار، شروع و حرکت آن قابل مشاهده است. ارزیابی توزیع اندازه هواویزها نیز به وسیله مقایسه نسبت‌های کانال یک (مرئی) و کانال دو (مادون قرمز نزدیک) و بازتاب تشعشعی سنجنده‌های MODIS و AVHRR امکان‌پذیر است. در زیر نمونه‌ای از تصاویر کاربردی این ماهواره برای بررسی پهنه گرد و غبار مشاهده می‌شود [18].

۳-۴- تصاویر EUMETSAT

این ماهواره اروپایی، امکان پایش طوفان‌های گرد و غباری روی زمین را فراهم می‌کند. گرد و غبار در این ترکیب^۱ RGB به صورت رنگ‌های صورتی و قرمز، ابرهای ضخیم و در ارتفاع بالا به رنگ قهوه‌ای و ابرهای نازک و در ارتفاع پایین به رنگ سیاه مشاهده می‌شوند. این ترکیب RGB+ به صورت ساعتی و با کانال‌های اشعه مادون قرمز تولید می‌شوند این ماهواره به کارشناسان هواشناسی و محیط‌زیست امکان مسیریابی و تعیین منابع انتشار ریزگردها را می‌دهد، که می‌تواند در مدیریت مخاطرات آن کمک شایانی کند [20].



شکل ۷. شاخص روزانه ایستگاه‌های زابل و تهران در طوفان گرد و غبار جولای

۲۰۲۵ (منبع: نویسنده)

Fig 7. Daily AQI in Zabol and Tehran during a dust storm in July 2025

۱-۴- پایش و اندازه‌گیری گرد و غبار

پایش و اندازه‌گیری ریزگردها در ایران همچنان به کاربرد ایستگاه‌های پایش شهری متکی است و تنها در صورت وجود پایش بر خط در محیط شهری می‌توان آثار غلظتی گرد و غبار را بر محیط بررسی نمود. این ایستگاه‌ها بشدت تحت تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای ناشی از حمل و نقل و دودکش‌های صنعتی بوده شکل (۷) شاخص روزانه ایستگاه‌های شهری زابل و تهران در طوفان گرد و غباری جولای ۲۰۲۵ نشان می‌دهد.

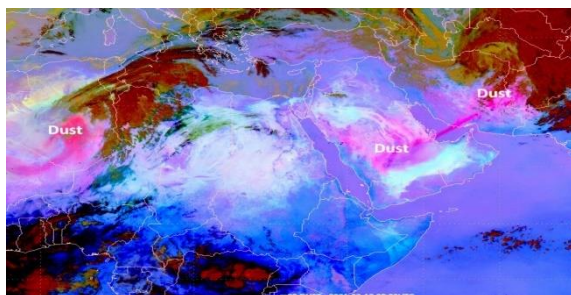
کشورهای توسعه یافته‌تر که در معرض آثار زیانبار گرد و غبار هستند، نسبت به احداث ایستگاه‌های تخصصی و تدوین سیستم پایش متمرکز ریزگردها متمرکز شده‌اند. این سیستم‌ها به نوعی کامل‌کننده پایش شهری بوده و می‌توان داده‌های کاملی از مناطق انتشار، جنس و غلظت ریزگردها بدست آورد و مسیرهای حرکتی آن‌ها را تخمین زد. کشور چین سیستم پایش متمرکز ریزگردها از طریق احداث دکل‌های مرتفع به ارتفاع ۵۰ متر و مجهز به تجهیزات خودکار در نوار بیابانی شمال غرب این کشور ایجاد کرده است. یک شبکه منسجم از ایستگاه‌های پایش گرد و غبار برای مطالعه و شناخت چگونگی حمل و جابه جایی ریزگردها در اقصی نقاط مناطق مستعد انتشار شمال غرب چین احداث شده است. در طول ارتفاع ۵۰ متری برج‌های پایش گرد و غبار، تعداد ۱۵ نقطه ثبت باد و رسوب‌های گرد و غبار تعبیه شده است و فاصله تله‌های رسوب گیر افقی و عمودی و بادسنج‌ها از سطح زمین تا نقطه

¹ RED-GREEN-BLUE



شکل ۹. تصاویر ماهواره‌ای MODIS از طوفان‌های گرد و غباری در ۱۷ آوریل ۲۰۲۵ [19]

Fig. 9. MODIS satellite image showing a dust storm on April 17, 2025



شکل ۱۰. تصاویر ماهواره‌ای گرد و غبار در EUMETSAT [21]

Fig. 10. EUMETSAT satellite image showing a large dust plume over eastern Africa and the Middle East [21]

۴-۴-۴ مدل SKIRON

مدل SKIRON یک مدل عددی پیش‌بینی جوی است که توسط دانشگاه آتن (University of Athens) به‌طور ویژه برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی انتقال و انتشار گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به ویژه در حوضه مدیترانه، شمال آفریقا و غرب آسیا توسعه یافته است.

۴-۴-۱ ویژگی‌های کلیدی مدل

- محدوده پوشش جغرافیایی: بیشتر برای نواحی شمال آفریقا، غرب آسیا، و دریای مدیترانه استفاده می‌شود؛ یعنی نواحی منبع گرد و غبار و مسیرهای انتقال آن.
- پارامترهای ورودی: شامل شرایط اولیه و مرزی از مدل‌های جهانی (مانند ECMWF یا GFS).
- داده‌های سطحی مانند خاک، رطوبت، باد، و دمای سطح.
- مدل‌سازی فیزیکی گرد و غبار: مدل SKIRON فرآیندهای برخاست گرد و غبار (dust uplift)، انتقال (transport)، ته‌نشینی گرانشی (gravitational settling) و ته‌نشینی با بارش (wet deposition) را لحاظ می‌کند.



شکل ۸. پایلوت مونه برداری از ریزگردها و طوفان‌های گرد و غبار در کشور چین [17]

Fig. 8. Example of a dust monitoring pilot station in China using vertical dust samplers and sensors [17]

شکل (۱۰) نمونه‌ای از این تصاویر را برای منطقه شرق آفریقا و غرب آسیا نشان می‌دهد، رنگ‌های قرمز در مرزهای غرب و جنوب غربی ایران به وضوح توده گرد و غبار را نشان می‌دهند.

۴-۵-۲- الگوریتم محاسبه انتشار PM_{10}

در الگوریتم محاسبه انتشار PM_{10} شار توده عمودی گرد و غبار برابر است با:

$$F = K \frac{\rho}{g} u_* (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (1)$$

که در آن u_* سرعت اصطکاکی، u_{*t} سرعت اصطکاکی حد آستانه مورد نیاز برای شروع انتشار گرد و غبار و ضریب K با واحد ثانیه بر متر که به سطح بافت خاک منتشر کننده گرد و غبار مربوط است، می‌باشند. نمادهای ρ و g نشان دهنده چگالی هوا و شتاب گرانش است. سرعت اصطکاکی در مکان و زمان متفاوت است، زیرا هر دو به شرایط محلی هواشناسی و کلاس زبری سطح بستگی دارد. در حالی که، سرعت حد آستانه و ضریب بافت خاک فقط در مکان متفاوت است و می‌توان آن را به ویژگی‌های کلاس زبری سطحی، خاک و ویژگی‌های کاربری زمین مرتبط ساخت [24].

طبق الگوریتم مذکور هنگامی که سرعت باد از سرعت اصطکاکی محل بالاتر رود، ذرات PM_{10} بلند خواهند شد و سرعت اصطکاکی محل به صورت زیر تعریف می‌شود:

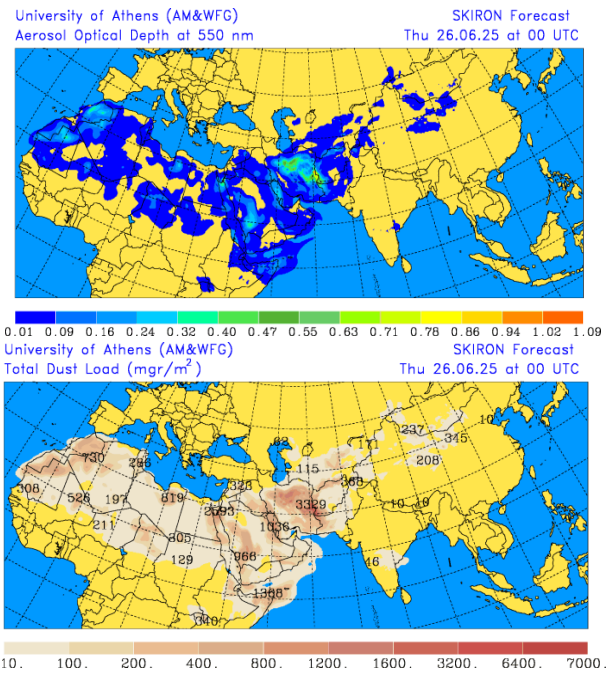
$$U_t = \frac{u_* t}{k} \ln \frac{z}{z_{0ns}} \quad (2)$$

که در آن z_{0ns} طول زبری آیرودینامیک خاک برای شرایطی است که خاک دچار فرسایش آبی نشده باشد، z ارتفاع اندازه گیری باد است و k ثابت وون کارمن است که برابر 0.4 فرض می‌شوند [29].

شکل (۱۲) نمونه‌ای از شبیه‌سازی انتشار و پخش توده گرد و غبار در تاریخ ۲۳ ژوئن ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد، منابع انتشار در مناطق مرزی عراق و سوریه واقع شده‌اند و جهت حرکت ریزگردها به سمت جنوب شرقی است.

۴-۵-۳- زیربخش خط سیر مدل

این مدل از رویکرد لاگرانژی استفاده کرده و با در نظر گرفتن توده ذرات به صورت یک بسته هوا قابلیت شبیه‌سازی مسیرهای حرکتی را در دو جهت رو به جلو (Foreword Trajectory) و رو به عقب (Backward Trajectory) دارد. در زیربخش خط سیر، اگر فرض شود که مسیر حرکت ذرات در مسیر باد است، مسیر حرکت با استفاده از انتگرال‌گیری در زمان مشخص t به دست می‌آید، در این حالت موقعیت نهایی ذره با استفاده از سرعت متوسط ذره V در مکان نهایی P و مکان ابتدایی حدسی P' به صورت زیر به دست می‌آید.



شکل ۱۱. نمونه‌ای از مدل SKIRON برای به ترتیب (a) عمق اپتیکی و (b)

بارگذاری گرد و غبار در ۲۶ June سال ۲۰۲۵ [23]

Fig. 11. SKIRON model output: a) Optical depth and b) dust loading on June 26, 2025.

- ریزساختار ذرات: شامل اندازه‌های مختلف ذرات گرد و غبار (fractionated size bins) برای دقت بیشتر در برآورد انتقال و توزیع فضایی آن است [22].

۴-۵-۵- مدل HYSPLIT

۴-۵-۱- معرفی مدل پخش و پراکنش HYSPLIT

مدل HYSPLIT، مدلی دوگانه^۱ برای محاسبات خط سیر حرکت گرد و غبار، پراکندگی و شبیه‌سازی ته‌نشینی آن با استفاده از رویکردهای پف و ذرات است. در این مدل محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از کمترین پارامترهای هواشناسی انجام می‌گیرد. روش محاسبه مدل، ترکیبی میان دیدگاه‌های لاگرانژی (مجموع غلظت ذرات در هر شبکه در طول مسیر حرکت تعیین می‌شود) و اویلری (غلظت ذرات برای هر شبکه با استفاده از پخش و انتقال ذرات انجام می‌شود) است و به همین دلیل HYSPLIT را مدلی دوگانه می‌نامند [24, 25].

برای استفاده از مدل در شبیه‌سازی گرد و غبار می‌توان از ماژول خط سیر و الگوریتم محاسبه منابع و انتشار PM_{10} توسط HYSPLIT استفاده کرد [26, 27, 28].

¹ Hybrid

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P,t) \Delta t \quad (3)$$

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P,t) + V(P',t+\Delta t)] \Delta t \quad (4)$$

خط سیر رو به عقب حرکت توده در ۲۴ می ۲۰۲۵ از شهرهای تهران و اهواز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در صورت مشخص بودن منبع انتشار استفاده از خط سیر رو به جلو و در غیر این صورت استفاده از خط سیر رو به عقب از شهرهای پذیرنده می‌تواند برای مسیریابی گرد و غبار موفق باشد.

محاسبه خط سیر در مدل به سرعت باد در سه جهت، دما، فشار سطحی و عمق اختلاط برای محاسبات نیاز دارد و مناسب‌تر است داده‌های ورودی مدل به صورت میدان‌های پیوسته وارد شود تا تخمین بهتری از حرکت توده ذرات در جهت‌های افقی و قائم به دست آید [25, 29].

۴-۶- مدل AEMET

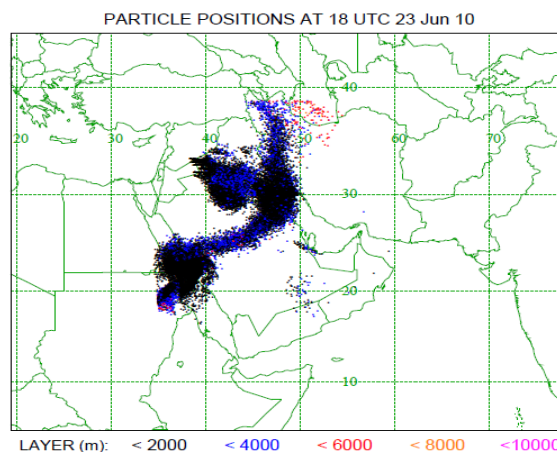
مدل AEMET که توسط سازمان هواشناسی اسپانیا توسعه یافته، یک مدل عددی برای پایش و پیش‌بینی گرد و غبار جوی به‌ویژه از صحرای آفریقا به سمت اروپا است. این مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی، شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های ماهواره‌ای، میزان و مسیر انتقال گرد و غبار را پیش‌بینی می‌کند.

خروجی‌های آن شامل نقشه‌های غلظت گرد و غبار، ارتفاع لایه‌های گرد و غباری و مسیرهای انتقال در بازه‌های زمانی مختلف است. مدل AEMET در ترکیب با دیگر مدل‌های منطقه‌ای مانند BSC-DREAM و SKIRON برای افزایش دقت و پایش بهتر رویدادهای گرد و غباری به‌کار می‌رود [30].

۵- راهکارهای کنترل فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار

مقدار فرسایش بادی و انتشار ریزگردها به سرعت باد و ویژگی‌های زمین‌ساختی مرتبط است بنابراین برای راهکارهای مبارزه با فرسایش بادی دو روش اساسی وجود دارد:

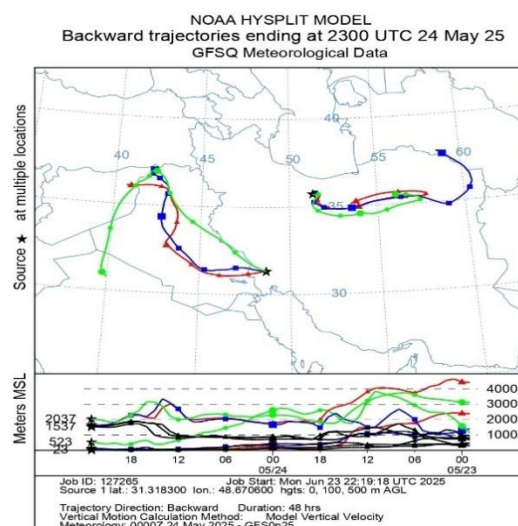
- کاهش سرعت باد در سطح زمین که از سرعت آستانه انتشار کمتر شود.
 - کنترل عوامل زمین‌ساختی مانند رطوبت و یکپارچگی.
- به همین منظور رویکردهای زیر می‌تواند در کنترل فرسایش بادی و انتشار ذرات موثر باشند:



شکل ۱۲. نمونه‌ای از شبیه‌سازی انتشار و پخش توده گرد و غبار در تاریخ ۲۳

ژوئن ۲۰۱۰ [26]

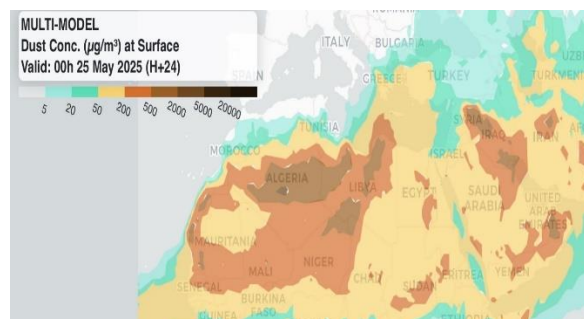
Fig. 12. Simulation of PM₁₀ emission and dispersion using HYSPLIT on June 23, 2010 [26]



شکل ۱۳. شبیه‌سازی خط سیر رو به عقب حرکت توده در تاریخ ۲۴ می ۲۰۲۵

(منبع: نویسنده)

Fig. 13. Backward trajectory simulation of dust movement toward Ahvaz and Tehran on July 24, 2025.



شکل ۱۴. نمونه‌ای از مدل AEMET برای غلظت سطحی گرد و غبار در ۲۵

می ۲۰۲۵ [31]

Fig. 14. AEMET model output showing surface dust concentration forecast for July 25, 2025.

لازم است موارد زیر بررسی شود:

- ۱- تعیین جهت، سرعت و دوره باد
- ۲- مقدار بارندگی و چگونگی توزیع آن
- ۳- مطالعات گیاهشناسی و اکولوژیکی منطقه به منظور یافتن گیاهان بومی مناسب
- ۴- بررسی وضعیت سطح آب زیرزمینی
- ۵- اطلاع از خواص ماسه‌های منطقه (با توجه به تفاوت ماسه‌ها در مناطق مختلف)

۴-۵- استقرار پوشش‌های مصنوعی

برای افزایش پایداری سطح خاک علاوه بر پوشش گیاهی می‌توان از پوشش‌های مصنوعی استفاده کرد که این امر در سال‌های اخیر رشد چشمگیری یافته و تحقیقات فراوانی پیرامون آن صورت گرفته است. این پوشش‌ها دارای طیف گسترده‌ای از بعد تهیه مواد و روش کاربرد می‌شوند که به طور نمونه می‌توان به شن‌های درشت و سنگریزه، فیبرهای جاذب، مالچ‌های نفتی، مالچ‌های سرباره صنایع فولاد و کوره‌های بلند، امولسیون‌های رزینی، پلیمرهای جاذب و سوپر جاذب سنتزی اشاره کرد. کلمه مالچ در انگلیسی به معنی پوشش است، این پوشش سطح خاک را از گزند عوامل مختلف چون باد و باران مصون می‌دارد. مالچ‌ها به طور کلی به دو گروه مالچ‌های نفتی و غیر نفتی تقسیم می‌شوند. مالچ‌های غیرنفتی شامل مالچ‌های آلی (کاه و کلش، برگ‌های گیاهان، خاک اره، کودهای حیوانی و ...) و مالچ‌های مصنوعی (پشم شیشه، صفحات فلزی، لایه‌های نازک پلیمری و پلاستیکی و سایر جاذب‌های سنتزی) می‌شوند.

منظور از مالچ‌های نفتی مواد سنگین نفتی حاصل از پالایشگاه‌ها می‌باشد که بعد از جنگ جهانی دوم با توجه به نتایج مثبت آزمایش مالچ‌های نفتی آن‌ها به طور وسیعی در کشورهای تونس، الجزایر، مراکش، لیبی، استرالیا و سایر کشورها برای تثبیت به کار رفتند. مالچ‌های نفتی به دو دسته مالچ‌های تثبیت‌شن و امولسیونه (امولسیون‌های آسفالتی) تقسیم می‌شوند. شکل‌های (۱۶ و ۱۷) نمونه‌هایی از عملیات پاشش مالچ برای مالچ‌های نفتی و پلیمری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. استقرار پوشش گیاهی برای کنترل خاک [29]

Fig. 15. Establishing vegetation cover for wind erosion control.

۱-۵- استفاده صحیح از زمین

استفاده ناصحیح از زمین سبب اصلی فرسایش بادی است بنابراین باید اصل اساسی در کنترل فرسایش بادی را این مورد دانست. نمونه از این امر پیدایش یک کاسه غبار در دشت‌های مرکزی ایالات متحده آمریکا است [29].

۲-۵- حفظ رطوبت خاک

افزایش رطوبت خاک اثر زیادی بر مقاومت خاک در مقابل باد دارد. این رطوبت چسبندگی و وزن ذرات را افزایش داده و سبب می‌شود بادهای شدیدتری برای بلندکردن و حرکت دادن ذرات لازم باشد.

سرعت انتقال ذرات رسی با ۱۰ درصد رطوبت برابر پنج متر بر ثانیه و سرعت انتقال ذرات با بیست درصد رطوبت به دوازده متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین افزایش سطح رطوبت سبب ازدیاد محصولات کشاورزی و رشد گیاهان شده که خود عاملی مثبت در کنترل فرسایش است [32].

۳-۵- استقرار پوشش گیاهی

کمبود پوشش گیاهی زمین موجب می‌شود که بادهای شدید، خاک بدون حفاظت را جابه‌جا کنند؛ ازاین‌رو، مؤثرترین و کم‌هزینه‌ترین راهکار برای کاهش فرسایش بادی، پوشاندن سطح زمین با پوشش گیاهی مناسب است. پوشش گیاهی با دو راهکار کاهش سرعت باد در سطح و به هم پیوسته کردن ذرات خاک توسط ریشه حساسیت به فرسایش را کاهش می‌دهد [29]. قبل از اقدام به تثبیت شن‌های روان به وسیله پوشش گیاهی

هنگامی که عمود بر باد غالب باشد موثرتر است. به علت شرایط سخت اکولوژیکی معمولاً استفاده از بادشکن زنده (درختی و بوته‌ای) میسر نیست و در هر منطقه با توجه به امکانات و شرایط محلی باید نسبت به ایجاد بادشکن‌های مصنوعی (سنگی، فلزی و ...) مبادرت ورزید [35, 36].

شکل (۱۸) بادشکن کوتاه و مصنوعی را نشان می‌دهد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بی‌شک مقوله ریزگردها و آثار زیانبار آن یکی از مهمترین معضلات محیط‌زیستی مناطق خشک و بیابانی از جمله کشورمان ایران است. با توجه به همسایگی ایران با مناطق مستعد برای انتشار ریزگردها (عراق، سوریه، اردن، شبه جزیره عربستان و ...)، نیاز به مدیریت صحیح و سریع هم در پیش‌بینی انتشار و حرکت توده‌ها، اطلاع‌رسانی سریع و مدیریت بحران و هم در کنترل انتشار در مبدا (جلوگیری بنیادی از فرسایش بادی و به کارگیری پوشش‌های گیاهی و مصنوعی) بیش از پیش از احساس می‌شود.

پژوهش حاضر در بخش نخست عوامل جغرافیایی و جوی را به منظور ایجاد شرایط مستعد برای شروع انتشار و پراکنش بیان کرده و در بخش دوم آثار زیانبار ریزگردها بر ایران مورد بررسی قرار گرفته‌است. طبق آمارهای سازمان بهداشت جهانی چهار شهر غرب ایران (اهواز، سنندج، کرمانشاه و یاسوج) در میان شهرهای بسیار آلوده جهان از منظر کیفیت هوا با شاخص ذرات معلق هستند که این خود نشان‌دهنده وضعیت بسیار بحرانی کشور است.

بخش سوم به ابزارهای مدیریتی کیفیت هوا در رویدادهای گرد و غباری اشاره داشته‌است. از جمله این ابزارها می‌توان به روش‌های پایش زمینی و فیزیکی گرد و غبار (شامل ایستگاه‌های تخصصی پایش ریزگردها و سنسورهای آلاینده‌های ذرات شهری) اشاره شد، همچنین می‌توان با به کاربردن تصاویر ماهواره‌ای (در تحقیق حاضر تصاویر MODIS، EUMETSAT) از مسیرهای حرکتی ریزگردها مطلع شد.

استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز انتشار و پخش و پراکنش گرد و غبار (در تحقیق حاضر مدل‌های HYSPLIT و SKIRON و AEMET) نیز راهکاری مناسب برای پیش‌بینی انتشار و چگونگی حرکت ریزگردها برای مدیریت بحران و انجام اقدامات پاسخ سریع می‌باشد. همچنین تحلیل منابع انتشار با استفاده از مدل‌سازی



شکل ۱۶. استقرار پوشش‌های مصنوعی از نوع مالچ نفتی برای کنترل فرسایش بادی [33]

Fig. 16. Use of oil-based mulch for creating artificial protective cover



شکل ۱۷. استقرار پوشش‌های مصنوعی از نوع مالچ پلیمری برای کنترل فرسایش بادی [33]

Fig. 17. Use of polymer-based mulch as an artificial cover for wind erosion control.



شکل ۱۸. نمونه‌ای از بادشکن‌های مصنوعی [17]

Fig. 18. Example of an artificial windbreak barrier [17]

۵-۵ ایجاد موانع در مسیر باد (بادشکن)

میزان فرسایش و انتشار در یک زمین وسیع به تدریج تشدید می‌شود بنابراین برای کاهش آن باید طول زمین را با ایجاد موانعی کوتاه کرد و هرچه ارتفاع موانع مذکور بیشتر باشد طول منطقه حفاظت شده آن بیشتر است [34]. یک مانع در حمایت از زمین

به منظور شناسایی کانون‌های مولد گرد و غبار می‌تواند با مشخص کردن این کانون‌ها، کمک شایانی به توسعه پایدار کشاورزی و جلوگیری از فرسایش بادی در مناطق مستعد کند.

بخش پایانی به روش‌های کنترل فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار اختصاص یافت که به نوعی راه‌کار اصلی و بنیادی برای جلوگیری از معضل ریزگردها می‌باشد. منابع انتشار اصلی ریزگردهای مؤثر بر ایران دارای دو ویژگی است، اولاً "بیشتر آنها در خارج از مرزهای کشور بوده و دوم دارای وسعت بسیار زیاد است. به علت ویژگی‌های ذکر شده، انجام پروژه‌های بیابان‌زدایی، جلوگیری از فرسایش بادی و احیای خاک نیازمند به زمان، هزینه بسیار زیاد و رایزنی‌ها و همکاری‌های گسترده در ابعاد منطقه‌ای و جهانی می‌باشد و از این‌رو تلفیقی از ابزارهای مدیریت بحران و کنترل از مبدا برای تعدیل آثار منفی گرد و غبار لازم به نظر می‌رسد.

ریزگردها پدیده‌ای چندبعدی و فرامرزی‌اند که مقابله با آن تنها با مدیریت جامع، هماهنگی بین‌سازمانی، همکاری منطقه‌ای و مشارکت جوامع محلی امکان‌پذیر است. در صورت اجرای سیاست‌های اصولی و پایدار، می‌توان ضمن کاهش پیامدهای این پدیده، به احیای زیست‌بوم‌ها، ارتقای سلامت عمومی و افزایش

امنیت زیست‌محیطی کشور دست یافت.

قدردانی نویسندگان

مؤلفان از آزمایشگاه سنجش از دور دانشگاه تربیت مدرس در تهران، ایران، برای کمک مؤثر در ارائه پایگاه داده این مطالعه تشکر می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافع ندارند.

نقش نویسندگان

علیرضا اصلمند ۴۰٪ و فائزه برهانی ۶۰٪ در فرایند انجام این پژوهش نقش داشته‌اند.

منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی هیچ نهاد یا شخص دیگری استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

- [1] Friedlander, S.K., 2000. *Smoke, dust, and haze: Fundamentals of aerosol dynamics*. 2nd ed. New York: Oxford University Press.
- [2] Mousavi, S.M., Mobarghaee Dinan, N., Ansarifard, S., Darvishi, G., Borhani, F. and Naghibi, A., 2024. Assessing the impact of global carbon dioxide changes on atmospheric fluctuations in Iran through satellite data analysis. *Journal of Water and Climate Change*, 15(6), pp.2774-2791.
- [3] Prospero, J., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.N. and Gill, T., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), pp.1-31. doi: 10.1029/2000RG000095.
- [4] Engelstaedter, S., Tegen, I. and Washington, R., 2006. North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), pp.73-100.
- [5] Xuan, J., Sokolik, I.N., Hao, J., Guo, F., Mao, H. and Yang, G., 2004. Identification and characterization of sources of atmospheric mineral dust in East Asia. *Atmospheric Environment*, 38(38), pp.6239-6252.
- [6] Wang, S., Yuan, Y. and Shang, K., 2006. The impacts of different kinds of dust events on PM₁₀ pollution in northern China. *Atmospheric Environment*, 40(40), pp.75-79.
- [7] Shao, Y., 2008. *Physics and modeling of wind erosion*. Berlin: Springer.
- [8] Lee, Y.C., Yang, X. and Wenig, M., 2010. Transport of dusts from East Asian and non-East Asian sources to Hong Kong during dust storm related events 1996-2007. *Atmospheric Environment*, 44(29), pp.3728-3738.
- [9] Department of Environment of Iran, n.d. *Department of Environment of Iran data*. (In Persian).
- [10] 10] AEMET, n.d. *Model plots: Daily dust products*. WMO Barcelona Dust Regional Center.
- [11] Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A.H. and Rashidi, Y., 2022. Evaluation of short-lived atmospheric fine particles in Tehran, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(16), p.1398.
- [12] Borhani, F., Mirmohammadi, M. and Aslemand, A., 2017. Experimental study of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) concentrations in the air pollution of Tehran, Iran. *Journal of Research in Environmental Health*, 3(2), pp.105-115.
- [13] Cheraghi, A. and Borhani, F., 2016. Assessing the effects of air pollution on four methods of pavement by using four methods of multi-criteria decision in Iran. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(1), pp.59-71.
- [14] Cheraghi, A. and Borhani, F., 2016. Evaluation of environmental and sustainable development of four pavements in Iran by four method of multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(2),

- pp.51-62.
- [15] Darvishi Boloorani, A., Nasiri, N., Soleimani, M., Papi, R., Neysani Samany, N., Amiri, F. and Al-Hemoud, A., 2024. Climate change, dust storms, and air pollution in the MENA region. In: Al-Quraishi, A., Negm, A. and Benzougagh, B. (eds.) *Climate change and environmental degradation in the MENA region*. Vol. 136. Cham: Springer, pp.327-343. doi: 10.1007/978_2024_1144.
- [16] World Health Organization, n.d. *Outdoor air pollution databases*. Available at: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/database/en/ (Accessed: 23 August 2026).
- [17] Khosroshahi, M., 2012. *Report on the visit of Dr. Mohammad Khosroshahi (Faculty Member of the Research Institute of Forests and Rangelands) as part of an educational-research workshop to desert regions of China*. Available at: <http://khosromk.blogfa.com/post/436> (Accessed: 23 August 2026). (In Persian).
- [18] MODIS, 2010. *MODIS satellite description*. Available at: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/> (Accessed: 23 August 2026).
- [19] MODIS, 2025. *MODIS satellite images – Dust storm, 17 April 2025*. Available at: https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2025-04-17 (Accessed: 23 August 2026).
- [20] EUMETSAT, n.d. *Product generation description for RGB dust*. Available at: http://oiswww.eumetsat.int/~ids/html/product_description.html (Accessed: 23 August 2026).
- [21] EUMETSAT, 2021. *Major dust outbreaks in Africa, Middle East and China*. Available at: <https://user.eumetsat.int/resources/case-studies/major-dust-outbreaks-africa-middle-east-and-china> (Accessed: 23 August 2026).
- [22] SKIRON, n.d. *SKIRON model description*. Available at: <https://forecast.uoa.gr/en/group> (Accessed: 23 August 2026).
- [23] SKIRON, 2025. *SKIRON dust forecast plots: Mediterranean – Europe, North Atlantic*. Available at: <https://forecast.uoa.gr/en/group> (Accessed: 23 August 2026).
- [24] Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D. and Belnap, J., 1997. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D19), pp.23277-23287.
- [25] Draxler, R.R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A. and Taylor, A., 2009. *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HYSPLIT) user's guide*. NOAA Technical Memorandum ERL-ARL.
- [26] Aslemand, A., 2012. *Simulation of dust storm trajectories over Iran*. Master's thesis, Faculty of Environment, University of Tehran. (In Persian).
- [27] Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A. and Ghader, S., 2014. Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), p.9. doi: 10.1186/2052-336X-12-9.
- [28] Aslemand, A., Anvari, M. and Yarizadeh, B., 2014. Simulation of atmospheric conditions and trajectories for dust storms in the Middle East. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2(4), pp.150-154.
- [29] Draxler, R.R., Gillette, D.A., Kirkpatrick, S. and Heller, J., 2001. Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmospheric Environment*, 35(26), pp.4315-4330.
- [30] AEMET, n.d. *AEMET model description*. Available at: <https://dust.aemet.es/products/overview/user-guide/@@download> (Accessed: 23 August 2026).
- [31] Borhani, F., Pourezat, A.A. and Ehsani, A.H., 2024. Spatial distribution of particulate matter in Iran from internal factors to the role of western adjacent countries from political governance to environmental governance. *Earth Systems and Environment*, 8(1), pp.135-164.
- [32] Bisal, F. and Nielsen, K.F., 1966. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science*, 102(2), pp.143-146.
- [33] So Cal Sandbags Inc., 2010. *Hydroseed mulch polymer*. Available at: <http://www.socalsandbags.com/Hydroseed%20Mulch%20Polymer.htm> (Accessed: 23 August 2026).
- [34] Rafahi, H., 1999. *Wind erosion and its control*. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- [35] Gu, Z., He, Y., Zhang, Y., Su, J., Zhang, R., Yu, C.W. and Zhang, D., 2021. An overview of triggering mechanisms and characteristics of local strong sandstorms in China and haboobs. *Atmosphere*, 12(6), p.752.
- [36] Li, J., Sun, Z., Lenschow, D.H., Zhou, M., Dou, Y., Cheng, Z., Wang, Y. and Li, Q., 2020. A foehn-induced haze front in Beijing: observations and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(24), pp.15793-15809.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Aslemand, A. and Borhani, F., 2026. Haze Storms in Iran: Analyzing Challenges and Providing Management Solutions. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.7-20.

