

Investigating Aeolian Sand Sources through Integrated Wind Analysis and Grain Morphometry: A Case Study of Boralan Plain, West Azerbaijan Province, Iran

Mehran Maghsoudi¹ , Abolghasem Goorabi² , Mojtaba Yamani³, Ayla Gholizadeh⁴ 

1. (Corresponding Author) *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: maghsoud@ut.ac.ir

2. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: goorabi@ut.ac.ir

3. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: myamani@ut.ac.ir

4. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: ayla_gholizadeh@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

3 June 2025

Revised:

2 September 2025

Accepted:

8 October 2025

Available online:

10 November 2025

Keywords:

Boralan,
Sand dunes,
Wind erosion,
Granulometry,
Morphoscopy.

ABSTRACT

This study aimed to identify the sources of aeolian sands in the Boralan Plain through an integrated approach combining wind analysis and sedimentological studies. Wind data spanning 20 years (2000–2020) from the Maku synoptic station, Iran, were analyzed. WRPLOT View 8 and a custom sand rose graphing tool were used to generate wind, storm, and sand transport roses, and to calculate wind indices, including drift potential (DP), resultant drift potential (RDP), resultant drift direction (RDD), and unidirectional index (UDI). To identify the origin of aeolian sediments, surface sand samples were collected from dunes, and grain-size and morphoscopic analyses were conducted, with distribution curves generated using GRADISTAT. Wind rose analysis showed that southeast (SE) and east (E) winds were most frequent, while storm rose analysis identified predominant erosive winds from the northwest (NW) and west (W). Sand transport potential was highest toward the east, with bidirectional winds (E-W) in autumn and winter significantly influencing aeolian sediment transport. Grain-size analysis revealed mean particle sizes ranging from 125 to 250 microns, with sorting ranging from well-sorted to poorly sorted, and distributions predominantly symmetrical. Sedimentological analyses identified the main sources of mobile sands in the Boralan Plain as alluvial deposits from the Qareh Su and Aras rivers, weathered basaltic flows, marginal alluvial fans, and eroded surfaces due to reduced vegetation from land-use changes. Overall, the aeolian sands originate from a combination of fluvial and aeolian processes driven by local geological and climatic conditions.

Cite this article: Maghsoudi, M., Goorabi, A., Yamani, M., & Gholizadeh, A. (2025). Investigating Aeolian Sand Sources through Integrated Wind Analysis and Grain Morphometry: A Case Study of Boralan Plain, West Azerbaijan Province, Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (3), 63-85.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.395829.1007885>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Wind erosion is a dominant geomorphic process in arid and semi-arid regions, forming landforms such as sand sheets and dunes. Iran, located within the global arid zone, has over two-thirds of its territory classified as arid or semi-arid. Low precipitation, climate change, and unsustainable land management have accelerated desertification nationwide. The Boralan Plain, in West Azerbaijan Province, northwest Iran, is highly vulnerable to sandstorms and dune migration, posing significant environmental challenges. This study investigates the impact of erosive winds, analyzes sand transport patterns, and employs granulometric and morphoscopic analyses to characterize sediment texture and provenance. The objective is to identify sediment sources and controlling factors, providing insights for sustainable environmental management in the region.

Methodology

This study examines the wind regime of the Boralan Plain using aeolian indices, including drift potential (DP), resultant drift potential (RDP), resultant drift direction (RDD), and unidirectional index (UDI). Wind data spanning 30 years (1990–2020) from the Maku synoptic station, Iran, were analyzed using WRPLOT View and a custom sand rose graphing tool to determine prevailing wind directions, assess sand transport capacity, and generate sand rose diagrams.

To trace aeolian sediment provenance, sand samples were systematically collected and subjected to granulometric and morphoscopic analyses. For granulometric analysis, 100 g of each sample was processed via dry sieving with mesh sizes of 2000, 1000, 500, 250, 125, and 63 μm , including a collector for particles finer than 63 μm . Grain-size distributions were analyzed in GRADISTAT to calculate statistical parameters (mean size, sorting, skewness) following the Folk and Ward (1957) method, providing insights into transport distance and depositional environment.

Morphoscopic analysis of 25 randomly selected grains per sample was conducted under a binocular microscope, documenting surface textures (e.g., matte texture, brilliance, speckling, and signs of physical or chemical weathering) to infer sedimentary processes and identify sediment sources.

Results and discussion

Wind rose and sand rose analyses revealed dominant annual winds from the southeast (SE) and east (E). Sand transport potential, calculated using a threshold wind speed of 6.7 m/s (13 knots), exceeded 65 vector units (Fryberger's method) annually. Sand transport is primarily directed eastward, with sediments mobilized from the southwest (SW), west (W), and northwest (NW). The strongest winds, occurring in winter and spring, originate from the SW, W, and NW sectors.

Granulometric analyses showed mean grain sizes ranging from 125 to 250 μm , with sorting ($\sigma\phi$) ranging from 0.465 to 1.309, indicating moderately well-sorted to poorly sorted sediments. Skewness ranged from -0.541 to 0.449, with most samples showing nearly symmetrical distributions. Kurtosis values (0.9–1.11) indicated mesokurtic distributions.

Morphoscopic analysis identified surface textures, including matte texture (45% of grains), brilliance (43%), speckling, and signs of physical or chemical weathering. Grain shapes were categorized into four abrasion levels: unabraded/angular (over 45%), slightly abraded, abraded, and well-rounded. The high proportion of angular grains suggests significant physical weathering and limited transport-induced rounding.

Conclusion

This study indicates that alluvial deposits from the Aras and Qareh Su rivers are primary sources of aeolian sand in the Boralan Plain, alongside weathered basaltic flows and eroded surfaces. The predominantly angular grain shapes indicate physical weathering of local basaltic rocks. Overgrazing and land-use changes, leading to reduced vegetation

cover, have increased the region's susceptibility to wind erosion. Consequently, sand transport in the Boralan Plain is driven by the combined effects of fluvial and aeolian processes, highlighting the need for integrated environmental management strategies to mitigate desertification and promote sustainability in the region.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper

تحلیل منابع ماسه‌های بادی بر اساس تلفیق تحلیل باد و مورفومتری ذرات ماسه مطالعه موردی: دشت بورالان آذربایجان

مهران مقصودی^۱ ✉، ابوالقاسم گورابی^۲ , مجتبی یمانی^۳ , آیلا قلیزاده^۴ 

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mahsoud@ut.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: goorabi@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: myamani@ut.ac.ir

۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ayla_gholizadeh@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۱۶

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۸/۱۹

واژگان کلیدی:

بورالان،
تپه‌های ماسه‌ای،
فرسایش بادی،
گرانولومتری،
مورفوسکوپی.

این پژوهش با هدف شناسایی منابع ماسه‌های بادی دشت بورالان از طریق رویکرد تلفیقی شامل تحلیل‌های بادی و مطالعات رسوب‌شناسی انجام شد. داده‌های بادی ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۰) ایستگاه سینوپتیک ماکو، ایران، تحلیل شدند. نرم‌افزار WRPLOT View 8 و ابزار سفارشی ترسیم گلباد برای تولید گلباد، گل طوفان و گل حمل ماسه و همچنین محاسبه شاخص‌های بادی شامل پتانسیل جابجایی (DP)، پتانسیل جابجایی نتیجه‌گیر (RDP)، جهت جابجایی نتیجه‌گیر (RDD) و شاخص یک‌جهته (UDI) استفاده شدند. برای شناسایی منشأ رسوبات بادی، نمونه‌های ماسه‌ای سطحی از تپه‌های ماسه‌ای جمع‌آوری و آزمایش‌های گرانولومتری و مورفوسکوپی بر روی آن‌ها انجام شدند و منحنی‌های دانه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار GRADISTAT و روش Folk و Ward (۱۹۵۷) ترسیم شدند. تحلیل گلباد نشان داد بادهای جنوب شرق (SE) و شرق (E) بیشترین فراوانی را دارند، درحالی‌که گل طوفان، بادهای فرساینده شمال غرب (NW) و غرب (W) را مشخص کرد. پتانسیل حمل ماسه عمدتاً به سمت شرق است و بادهای دو جهته (E-W) در پاییز و زمستان نقش مهمی در جابجایی رسوبات بادی دارند. تحلیل دانه‌بندی نشان داد میانگین اندازه ذرات بین ۱۲۵ تا ۲۵۰ میکرون متغیر است، با جوشرده‌ای از جوشرده تا ضعیف جوشرده و توزیع عمدتاً متقارن. بررسی‌ها نشان داد منابع اصلی ماسه‌های روان دشت بورالان شامل آبرفت‌های رودهای قره‌سو و ارس، هوازدگی روانه‌های بازالتی، مخروط‌افکنه‌های حاشیه‌ای و سطوح فرسایش یافته ناشی از کاهش پوشش گیاهی به دلیل تغییرات کاربری اراضی هستند. بنابراین، منابع ماسه‌های بادی دشت بورالان ترکیبی از فرآیندهای آبی و بادی است که توسط ویژگی‌های زمین‌شناسی و اقلیمی منطقه هدایت می‌شوند.

استناد: مقصودی، مهران؛ گورابی، ابوالقاسم؛ یمانی، مجتبی و قلیزاده، آیلا. (۱۴۰۴). تحلیل منابع ماسه‌های بادی بر اساس تلفیق تحلیل باد و مورفومتری ذرات ماسه مطالعه موردی: دشت بورالان آذربایجان. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۳)، ۸۵-۶۳.
<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.395829.1007885>

مقدمه

فرسایش بادی یکی از فرایندهای اصلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (Yaping, 2008). که با سه مؤلفه فرکانس، اندازه و جهت باد نقش مهمی در مورفودینامیک و شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای ایفا می‌کند (Pearce, 2005). تحرک و رسوب‌گذاری ماسه‌های بادی به‌شدت تحت تأثیر شرایط باد غالب در این مناطق قرار دارد. در این میان، سرعت و جهت باد از عوامل کلیدی در تعیین شدت فرسایندهای و میزان جابجایی رسوبات (Zhang et al., 2012). درواقع، رابطه‌ای مستقیم میان فرسایش بادی و سرعت باد وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت و عبور از آستانه فرسایشی، توان باد در حمل و انتقال ذرات ماسه‌ای افزایش یافته و در نتیجه، شدت فرسایش بیشتر می‌شود (Zhang et al., 2004). افزون بر سرعت آستانه، شرایط سطحی نیز، بر پتانسیل حمل ماسه تأثیرگذار هستند. چهار عامل اصلی که این پتانسیل را کنترل می‌کنند عبارت‌اند از: میانگین اندازه ذرات (Bagnold, 1941, Belly, 1964)، اندازه زبری سطح (Bagnold, 1941)، پوشش گیاهی (Bagnold, 1941) و رطوبت ماسه. این عوامل در مجموع مشخص می‌کنند که باد تا چه اندازه قادر به فرسایش و جابجایی ذرات ماسه باشد (Pearce, 2005).

کشور ایران در کمربند خشک و بیابانی قرار دارد به‌طوری‌که بیش از دو سوم مساحت ایران را اراضی خشک و نیمه‌خشک فراگرفته است کمبود بارش، تغییرات اقلیمی و مدیریت ناصحیح باعث افزایش نرخ رو به رشد مناطق بیابانی در کشور شده است. طبق مطالعات انجام‌شده توسط (خسروشاهی و همکاران، ۱۳۸۸) بیابان‌های ایران وسعتی به مساحت ۹۰۷۲۹۳ کیلومترمربع را در برمی‌گیرد (فرج اله محمودی، ۱۳۸۱) با انتشار کتاب "پراکندگی جغرافیایی ریگزارهای مهم ایران" وسعت ریگزارهای ایران را، بدون لحاظ نیکاه‌ها و پهنه‌های ماسه‌ای را حدود ۳۵۳۸۵ کیلومترمربع اعلام کرد، همچنین (عباسی، ۱۳۹۱) با کمک تصاویر ماهواره لندست (۷ و ۸)، عکس‌های هوایی، گوگل ارث و مشاهدات میدانی نقشه توزیع تپه‌های ماسه‌ای را تهیه کرد نتایج نشان داد پهنه‌های ماسه‌ای در ایران شامل ۱۱ دریای ماسه‌ای و ۹۷ میدان تپه‌ای را شامل می‌شود و در مجموع ۴/۶ میلیون هکتار از اراضی را پوشش می‌دهد. بنابراین مشکلات ناشی از تحرک تپه‌های ماسه‌ای که ممکن است تأثیر مخرب روی زیرساخت‌ها و مناطق پرجمعیت داشته باشد به دانش منطقه‌ای در ارتباط با فرایندهای بادی نیازمند است (Fryberger, 1979). لذا شناسایی سریع و آسان نقاط تپه‌های ماسه‌ای، شناخت دقیق منشاء رسوبات آن از پیچیدگی و ظرافت خاصی بر خوردار است که با شناسایی مناطق برداشت می‌توان علت‌ها را شناسایی نمود فعالیت‌های اجرایی مبارزه با فرسایش را در این مناطق متمرکز کرد (غلامیان و همکاران، ۱۳۹۴).

مطالعات اولیه درباره رسوبات بادی به اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی مربوط می‌شود و بعدازآن مطالعات بر پایه مسائل اقتصادی، اجتماعی و ... ادامه یافت (Stout, et al., 2009). در دهه‌های اخیر مطالعات زیادی در ارتباط با تپه‌های ماسه‌ای انجام‌شده که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

پژوهش بگنولد (۱۹۴۱) نشان داد تحت تأثیر قطر ذرات ماسه و شرایط حاکم بر باد یک ناحیه اشکال تپه‌های ماسه‌ای، اعم از عوارض خیلی سطحی و کوچک تا عوارض خیلی مرتفع، ایجاد می‌شود و از آنجا که مورفولوژی و رفتار تپه‌های ماسه‌ای با یکدیگر شباهت دارند، به این نتیجه رسید که در این زمینه می‌توان از مدل‌های مختلفی برای بررسی مورفولوژی ارگ‌ها استفاده کرد. مآن (۱۹۹۳) با استفاده از تصاویر رنگی کاذب ۷۵۴ و نقشه‌های توپوگرافی در مطالعه تپه‌های ماسه‌ای بیابان تاکلی ماکان^۱ در چین پرداخت و ارتفاع، فاصله و سرعت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای را اندازه

گرفت. وانگ و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهشی به بررسی روابط میان فعالیت ماسه‌ای و پارامترهای اقلیمی دریای ماسه‌ای تاکلی ماکن پرداختند. داده‌های این پژوهش شامل پارامترهای باد، بارش، دما و فراوانی وقوع طوفان‌های ماسه‌ای طی دوره‌ای بلندمدت از ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۵ بوده است. آن‌ها برای ارزیابی میزان پویایی ماسه‌ها از شاخص تحرک ماسه (شاخص لنکستر)^۱، استفاده کردند که ترکیبی از فراوانی وقوع بادهای فراتر از آستانه فرسایش و نسبت بارش مؤثر به تبخیر پتانسیل را در نظر می‌گیرد. روش تحقیق بر تحلیل سری‌های زمانی بلندمدت داده‌های اقلیمی و مقایسه تغییرات فعالیت ماسه‌ای در بازه‌های زمانی مختلف متمرکز بود. نتایج نشان داد که فعالیت ماسه‌ای در برخی دوره‌ها، به‌ویژه در دهه ۱۹۶۰ و میانه دهه ۱۹۸۰، افزایش چشمگیری داشته که این امر با تغییر الگوهای باد غالب و کاهش رطوبت همزمان بوده است. لیو و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی حمل ماسه تحت تأثیر جهت، سرعت و فرکانس باد در فلات اردوس چین^۲ با استفاده از مشاهدات میدانی پرداختند نتایج حاصل نشان داد وزش بادهای شدید با شدت زیاد فرکانس کمی داشته اما می‌تواند نقش مهمی را در حمل ماسه داشته باشد همچنین طوفان‌های شدید و بادهای گردوغبار در بهار دو تا چهار برابر بیشتر از سایر فصول در حمل ماسه نقش دارند. یانگ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مشاهدات میدانی به تنوع ویژگی اندازه ذرات تحت تأثیر تغییرات جهت باد و ارتفاع در تپه‌های ماسه‌ای سان لانگ شا^۳ در صحرای شمالی کومتاژ چین^۴ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ذرات ماسه‌ای درشت با افزایش ارتفاع جور شدگی بهتری دارند و تحت تأثیر بادهای غالب در منطقه هستند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی رژیم باد و حمل ماسه با استفاده از مشاهدات میدانی و کارهای آزمایشگاهی در فلات الکس^۵ کشور چین پرداختند و با استفاده از فرمول لنکستر مقدار حمل ماسه از طریق حرکت تپه‌های ماسه‌ای را تخمین زدند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار حمل ماسه در بهار و زمستان رخ داده است. همچنین در ایران نیز از جمله محققینی که در ارتباط با موضوع مورد مطالعه به پژوهش پرداختند: مقصودی و همکاران (۱۳۸۹) با تحلیل باد و مورفومتری ذرات ماسه، منابع رسوبات ماسه‌های بادی ارگ نوق را شناسایی کردند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدید میدانی، مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای را تعیین و با نمونه‌برداری، کانی‌شناسی و مورفوسکوپی رسوبات را مطالعه کردند. نتایج نشان داد منشاء رسوبات تپه‌ها از مخروطه افکنه‌ها و اراضی زراعی متروکه شرق، بستر رودخانه شور و دشت سر در جنوب غرب و غرب منطقه است. توکلی‌فرد و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از شاخص لنکستر، تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و مشاهدات میدانی، به تحلیل میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای بند ریگ کاشان پرداختند. آن‌ها با تلفیق نقشه‌های مورفولوژی منطقه، فعالیت و منشاء تپه‌ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که به‌جز بخش کوچکی از تپه‌های عرضی در شمال بند ریگ، باقی تپه‌ها به دلیل مدیریت نامناسب تثبیت و غیرفعال شده‌اند. نگارشی و همکاران (۱۳۸۷) با انجام تحلیل ژئومورفولوژیکی حرکت تپه‌های ماسه‌ای در شرق دشت سیستان، به بررسی تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر بر روند پیشروی این تپه‌ها پرداختند. در این مطالعه، منطقه گفتارگی به‌عنوان نمونه انتخاب و با استفاده از مشاهدات میدانی و آزمایش‌های آزمایشگاهی میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای طی مدت سه ماه محاسبه شد. نتایج نشان داد که بادهای غالب با سرعت بالا عامل اصلی حرکت شدید ماسه‌ها هستند که باعث ایجاد خسارات گسترده به اراضی کشاورزی، آبادی‌ها، جاده‌ها و تأسیسات آبیاری شده‌اند. با تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و محاسبات میدانی، پیش‌بینی شد که مخازن آبی چاه نیمه به‌عنوان تنها منبع آب شرب منطقه در سال‌های

1. Lancaster Index
2. Ordos plateau
3. Sanlongsha
4. Kumtagh
5. Alxa Plateau

آنی در معرض تهدید جدی ناشی از هجوم ماسه‌های روان قرار خواهد گرفت. صادقی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روش فرایبرگر و دین^۱ به تأثیر بادهای فرساینده بر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای دشت سمنان پرداختند و با ترسیم گل ماسه و محاسبه شاخص یکسانی جهت باد، شاخص پتانسیل حمل ماسه و جهت بادهای فرساینده، مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای منطقه را موردبررسی و مقایسه قرار دادند. گلی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی پارامترهای رسوب‌شناسی و ژئومورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای غرب تبریز پرداختند. در این مطالعه، شرایط محیطی و فرایندهای رسوب‌گذاری، ویژگی‌های بافتی، ساخت رسوبی و ترکیب کانی‌شناسی رسوبات ماسه‌ای مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که بادهای محلی و پوشش گیاهی نقش بسزایی در شکل‌گیری و تکامل ژئومورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای منطقه ایفا کرده‌اند. احمدی و همکاران (۱۳۸۰) برای منشأیابی تپه‌های ماسه‌ای بافق از روش‌های رسوب‌شناسی، مورفومتری و نمونه‌برداری ذرات ماسه استفاده کردند. آن‌ها با برداشت نمونه‌های ماسه‌ای از تپه‌ها و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مورفولوژیکی ذرات و همچنین تحلیل رخساره‌های فرسایش بادی و مسیرهای انتقال رسوب، منابع اصلی و فرعی تأمین ماسه‌های روان منطقه را شناسایی نمودند. نتایج نشان داد که منشأ اصلی تپه‌ها در مسیل رودخانه شور زرد و آبراهه‌های شرق آن و همچنین در دشت سر اپانداژ واقع در شرق مسیل قرار دارد و یک منشأ فرعی نیز در مغرب مسیل رودخانه شور زرد شناسایی شد. در ارتباط با منطقه مورد مطالعه صمدزاده و بلادپس (۱۳۹۱) در پژوهشی به تحلیل چشم‌اندازهای فرسایش بادی دشت بورالان را به‌عنوان یک واحد ژئومورفولوژیک مستقل پرداختند. آن‌ها با استفاده از مشاهدات میدانی، عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و آزمایش‌های گرانولومتری رسوبات، اشکال فرسایش بادی شامل تپه‌های ماسه‌ای، تل‌های گیاهی و شبه پلایاها را شناسایی و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که فعالیت فرسایش بادی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی از دوره‌های سرد کواترنر تا شرایط نیمه‌خشک کنونی و اختلاف فشار بین ارتفاعات و سطح دشت گسترش‌یافته است و شکل‌گیری چشم‌اندازهای بیابانی متنوع در منطقه را موجب شده است. این پژوهش بر ضرورت شناسایی واحدهای فرسایش بادی و پهنه‌های حساس برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و آمایش سرزمین تأکید می‌کند. پژوهش احمدی و همکاران (۱۳۸۴) در دشت بورالان با هدف ارزیابی اثر قرق مراتع بر تثبیت ماسه‌های روان انجام شد. در این مطالعه با حذف چرای دام و ایجاد قرق‌های موقت، تغییرات پوشش گیاهی و میزان حرکت ماسه‌ها طی چند فصل رشد موردبررسی میدانی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قرق سبب افزایش چشمگیر تراکم و تنوع گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی و کاهش محسوس جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای شد.

دشت بورالان، با ویژگی‌های زمین‌شناختی منحصربه‌فرد (رسوبات آتشفشانی آارات و آبرفت‌های رود ارس) و اقلیم خشک (بارش سالانه ۲۵۳ میلی‌متر)، نمونه‌ای برجسته از مناطقی است که فرسایش بادی در آن به تهدیدی جدی برای سکونت‌گاه‌ها، جاده‌ها، و مسیرهای عشایری تبدیل‌شده است. هجوم ماسه‌های بادی به زیرساخت‌ها، به‌ویژه در نتیجه تخریب پوشش گیاهی ناشی از چرای بیش‌ازحد دام، چالش‌های اجتماعی-اقتصادی متعددی ایجاد کرده است. با وجود مطالعات بنیادی در زمینه پویایی ماسه‌های بادی (Bagnold, 1941) و پیشرفت‌های اخیر در مدل‌سازی رژیم‌های بادی و منشأیابی رسوبات (Liu et al., 2005; Yang et al., 2019)، کمبود مطالعات یکپارچه در مناطق خشک، به‌ویژه در تلفیق تحلیل رژیم باد و مورفومتری رسوبات در مقیاس محلی، همچنان یک شکاف دانشی قابل‌توجه است. این شکاف، درک منبع رسوبات و ارائه راهکارهای مؤثر برای مدیریت بیابان‌زایی در مناطقی مانند بورالان را محدود کرده است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل رژیم باد و پتانسیل حمل ماسه در دشت بورالان در دشت بورالان، شناسایی منابع برداشت

رسوبات ماسه‌ای و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش خطر حرکت ماسه‌های روان بر جوامع محلی انجام شد. اهمیت این مطالعه در حفاظت از زیرساخت‌ها و معیشت محلی و کمک به توسعه پایدار ملی نهفته است تا با بهره‌گیری از داده‌های بلندمدت و تحلیل‌های پیشرفته، چارچوبی برای مدیریت بیابان‌زایی را فراهم کند.

روش پژوهش

این پژوهش با هدف تحلیل رژیم باد، منبع یابی رسوبات ماسه‌ای، و ارائه راهکارهای مدیریت فرسایش بادی در دشت بورالان (بخش منطقه مورد مطالعه) انجام شده است. برای دستیابی به این اهداف، رویکردی یکپارچه شامل تحلیل داده‌های میدانی و آزمایشگاهی به کار گرفته شد. روش‌ها ترکیبی از مطالعات کتابخانه‌ای، تحلیل داده‌های بلندمدت بادسنجی (۲۰۰۰-۲۰۲۰) ایستگاه سینوپتیک ماکو و تحلیل‌های گرانیومتری و مورفوسکوپی را شامل می‌شود. نوآوری اصلی این مطالعه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع (SRTM)، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تحلیل‌های گلباد و گل طوفان با WR PLOT گل ماسه با Sand Rose و آزمایش‌های رسوب‌شناسی است این رویکرد ترکیبی به‌طور قابل توجهی دقت تحلیل‌های محلی و منطقه‌ای را افزایش داده و امکان درک بهتر فرایندهای فرسایشی و جابجایی ماسه‌های بادی را فراهم می‌کند.

تحلیل رژیم باد

جهت مطالعه رژیم باد و شناسایی بادهای فرساینده و مؤثر در تشکیل تپه‌های ماسه‌ای داده‌های سه‌ساعته جهت و سرعت باد ایستگاه سینوپتیک ماکو با دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) تهیه شد (جدول ۱)

جدول ۱. مشخصات ایستگاه و طول دوره آماری

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	طول دوره آماری	فاصله تا محدوده مورد مطالعه (کیلومتر)
ماکو	۴۴° ۳۳'	۳۹° ۳۳'	۱۴۱۱	۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰)	۷۰

در این پژوهش از نرم‌افزار WR Plot View جهت تحلیل و نمایش داده‌های بادسنجی استفاده شد بدین منظور ابتدا داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهرستان ماکو از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد بعد از مرتب‌سازی داده به فرمت CSV ذخیره‌سازی شد سپس جهت محاسبه و ترسیم گلباد وارد نرم‌افزار WR Plot View گردید. در این نرم‌افزار کمترین سرعت باد لحاظ شده در رسم گلبادها ۰/۵ متر بر ثانیه می‌باشد (یمانی، ۱۳۷۹، صارمی نائینی، ۱۳۹۵). با استفاده از نرم‌افزار WR plot گلبادهای فصلی و سالانه ایستگاه منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید. سپس با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار مذکور و به‌منظور تعیین جهت بادهای فرساینده با حذف کلاس‌های با سرعت کمتر از آستانه احتمالی فرسایش بادی (۶/۵ متر بر ثانیه)، گل طوفان ایستگاه مورد مطالعه ترسیم شد. لازم به ذکر است در بسیاری از پژوهش‌های پیشین که در زمینه بررسی فرساینده‌گی باد و تحلیل آن در داخل کشور انجام شده، روش فرایبرگر مورد استفاده قرار گرفته است (نظری سامانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ صارمی نائینی، ۱۳۹۵؛ حنیفه‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). به‌طورمعمول طبق این روش، سرعت آستانه فرسایش بادی معمولاً ۶/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور تعیین جهت غالب باد در حمل ماسه، شناسایی شدت و الگوی مکانی فرسایش بادی در دشت بورالان و تحلیل نقش آن در جابه‌جایی و انباشت رسوبات، از نمودار گل ماسه و شاخص‌های مرتبط با آن از نرم‌افزار SandRose Graph 3 استفاده شد. در این نرم‌افزار محاسبات مربوط به برآورد پتانسیل حمل ماسه و ترسیم گل ماسه بر اساس معادلات و روابط پیشنهادی فرایبرگر (۱۹۷۹) و لتو-لتو (۱۹۷۸) انجام می‌گیرد (صارمی نائینی، ۱۳۹۵) این نرم‌افزار قادر است با دریافت اطلاعات و داده‌های بادسنجی

ایستگاه‌های منطقه موردنظر و با لحاظ سرعت آستانه فرسایش باد داده‌های بادسنجی را تحلیل و با مقایسه مقادیر دبی حمل ماسه در جهات مختلف شاخص‌های مؤثر در فرسایش بادی را فراهم آورد. جهت تهیه گل ماسه در این نرم‌افزار لازم است قبل از انجام محاسبات مقدار سرعت آستانه فرسایش برای رخساره موردنظر در اختیار باشد و با واحدی منطبق با واحد سرعت بادهای ثبت‌شده در فایل هواشناسی، به برنامه معرفی گردد که در این پژوهش با توجه به اینکه در اکثر داده‌های هواشناسی سرعت باد بر حسب نات منظور می‌گردد واحد سرعت به‌طور پیش‌فرض نات در نظر گرفته شد همچنین به پیشنهاد فرایبرگر، کمترین حد آستانه فرسایش بادی در ارتفاع ۱۰ متری به‌عنوان سرعت پایه آستانه فرسایش منظور می‌شود که در این تحقیق نیز مقدار سرعت آستانه فرسایش به‌طور پیش‌فرض ۱۳ نات منظور شد لذا جهت به دست آوردن پتانسیل حمل ماسه (DP) از رابطه استفاده شد:

$$DP = V^2(V - V_t) \times T \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن DP مقدار توان حمل رسوب در جهات مختلف هشت یا شانزده‌گانه، V سرعت‌های باد بیش از سرعت آستانه فرسایش در ارتفاع ۱۰ متری (نات)، V_t سرعت آستانه فرسایش (نات) است. بر اساس طبقه‌بندی (فرایبرگر و دین، ۱۹۷۹، ۱۴۰) اگر این مقدار بیش از ۴۰۰ باشد، قدرت فرسایشی باد زیاد و کمتر از ۲۰۰ قدرت فرسایشی باد کم و بین این دو مقدار فرسایش باد متوسط است با جمع برداری بازوهای گل ماسه (DP) بردار برآیند توان حمل ماسه $(RDP)^2$ از رابطه (۲،۳،۴) به دست آمد این شاخص وضعیت نهایی حمل ماسه را در منطقه نشان می‌دهد.

$$RDP = \sqrt{(C^2 + D^2)} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$C = \sum_{i=1}^{8 \text{ or } 16} (DP_i) \sin \theta_i \quad \text{رابطه ۳}$$

$$D = \sum_{i=1}^{8 \text{ or } 16} (DP_i) \cos \theta_i \quad \text{رابطه ۴}$$

به‌منظور محاسبه جهت خالص حرکت ماسه یا (RDD) در طول سال، ماه یا فصل از رابطه (۵) استفاده شد.

$$RDD = \text{Arc tan } (C/D) \quad \text{رابطه ۴}$$

از نسبت توان حمل ماسه به‌کل توان حمل ماسه شاخص همگنی جهت حمل ماسه (UDI) برآورد می‌شود رابطه (۶) (Fryberger, Dean et al., 1979).

$$UDI = RDP / DP_t \quad \text{رابطه ۵}$$

تغییرپذیری جهت باد را بر اساس شاخص همگنی طبق (جدول ۲)، طبقه‌بندی کردند هر چه عدد به‌دست‌آمده به یک نزدیک‌تر باشد بادهای یک‌جهته در منطقه زیادتر است و برعکس هر چه مقدار این نسبت به سمت صفر متمایل باشد بادهای قدرتمند چند جهتی بر منطقه حاکم هستند.

جدول ۲. تقسیم‌بندی شاخص تغییرپذیری جهات باد

شاخص همگنی جهت باد (UDI)	قدرت فرسایشی باد	طبقه‌بندی جهات باد
$0/8 <$	کم	بادهای تک جهته
$0/8 - 0/3$	متوسط	بادهای دو جهته با زاویه متحرک
$0/3 >$	زیاد	بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند

منبع: (Fryberger et al., 1979)

1. Drift Potential (DP)
2. Resultant Drift Potential (RDP)
1. Resultant Drift Direction (RDD)
2. Uni Directional Index (UDI)

گرانولومتری رسوبات

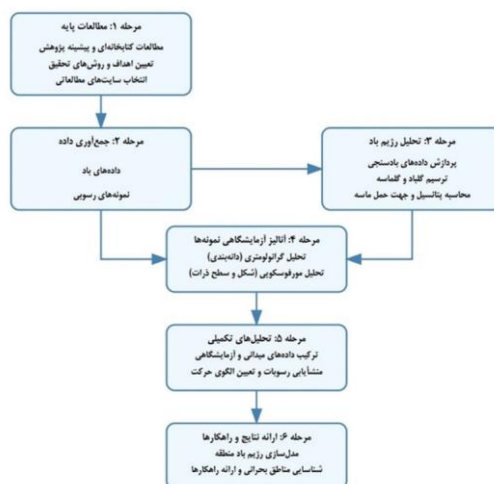
به‌منظور شناسایی ویژگی‌های فیزیکی رسوبات ماسه‌ای، ۱۹ نمونه ۳۰۰ گرمی از خاک سطحی (قطاع ۲۰×۲۰×۵ سانتی‌متر) به‌صورت تصادفی از مناطق فرسایش‌پذیر دشت بورالان برداشت شد (شکل ۱). نمونه‌ها از تپه‌های ماسه‌ای جمع‌آوری شد. عملیات گرانولومتری در آزمایشگاه ژئومورفولوژی دانشگاه تهران انجام شد. الک‌های استاندارد (۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میکرون) و دستگاه شیکر به مدت ۱۵ دقیقه برای جداسازی ذرات استفاده شد. وزن هر طبقه با ترازوی دقیق (دقت ۰/۰۲ گرم) اندازه‌گیری شد. سپس پارامترهای دانه‌بندی شامل میانگین اندازه ذرات (M_z)، جورشدگی، کج شدگی و کشیدگی با نرم‌افزار GRADISTAT 8.0 و روش Folk & Ward (۱۹۵۷) محاسبه شدند.

مورفوسکوپی رسوبات

با توجه به اینکه شکل سطح رسوبات تحت تأثیر فرآیندهای فرسایشی می‌باشد و می‌توان با مطالعه ویژگی‌های ظاهری ذرات نظیر شکل، درخشندگی، و نوع شکست سطحی، عوامل فرسایش و تخریب را در منطقه شناسایی نمود. بدین منظور از هر نمونه، ۲۵ گزینه به‌صورت تصادفی انتخاب و با میکروسکوپ بینوکولار (بزرگنمایی ۴۰ برابر) تحلیل شدند. ویژگی‌های سطح (کدر، درخشان، خال‌دار، یا تخریب‌شده) بر اساس مقیاس احمدی (۱۳۸۷) و شکل ذرات (زاویه‌دار، کم‌سائیده، سائیده، یا گرد) طبقه‌بندی شدند. تصاویر میکروسکوپی باکیفیت از ذرات تهیه شد تا تفاوت‌های مورفولوژیک نمایش داده شوند جدول ۸ وضعیت مورفوسکوپی سطح دانه‌ها را نشان می‌دهد همچنین میزان سائیدگی سطح دانه‌ها به‌صورت درصد دانه‌ها در هر دسته در خلاصه‌شده است. این تحلیل با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر تخریب، بررسی فاصله برداشت از رسوب‌گذاری و همچنین تبیین نقش فرآیندهای بادی و آبی در جابجایی رسوبات در منطقه انجام شد. به‌منظور افزایش دقت، تحلیل‌ها به‌طور مستقل توسط دو اپراتور انجام و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. جابه‌جایی رسوبات در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت.

تحلیل‌های تکمیلی و مدیریت داده‌ها

داده‌های رژیم باد، گرانولومتری و مورفوسکوپی در یک چارچوب یکپارچه تحلیل شدند تا مدل جامعی از پویایی ماسه‌های بادی ارائه شود. تحلیل‌های آماری پیشرفته، مانند رگرسیون خطی برای بررسی رابطه بین سرعت باد و اندازه ذرات انجام شد. نمودار جریان روش‌شناسی (شکل ۱) مراحل جمع‌آوری، پردازش، و تحلیل داده‌ها را نمایش می‌دهد.

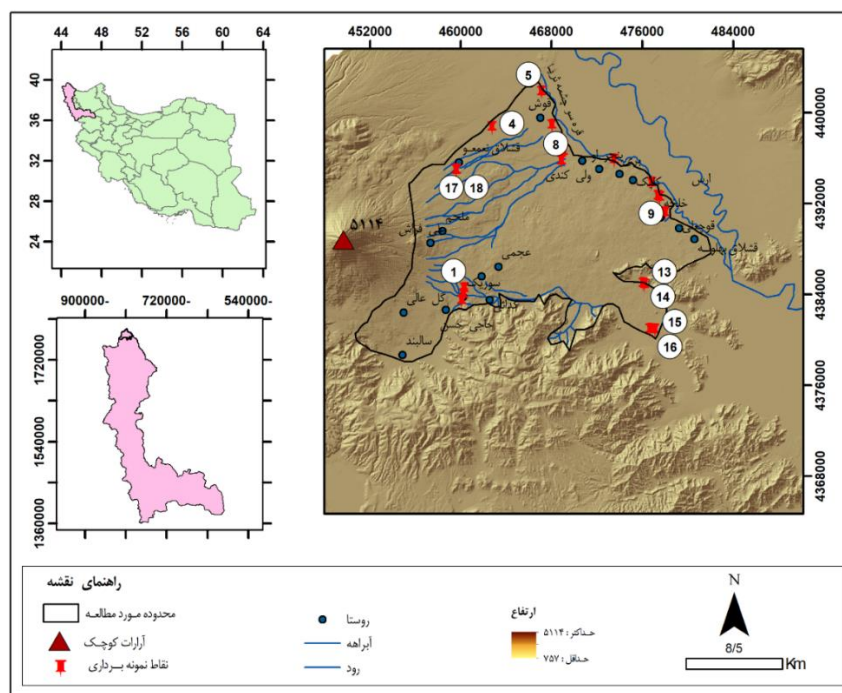


شکل ۱. فلوچارت پژوهش

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه موسوم به (دشت بورالان) پهنه‌ای هموار و پوشیده از ماسه‌های روان در شمال غربی‌ترین نقطه ایران، در استان آذربایجان غربی و در ضلع شمالی منطقه آزاد ماکو واقع گردیده است. این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی در ۴۴ درجه و ۴۸ دقیقه و ۵۶ ثانیه تا ۴۴ درجه و ۲۵ دقیقه و ۴۴ ثانیه طول شرقی و ۳۹ درجه و ۲۹ دقیقه و ۵۸ ثانیه تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه و ۴ ثانیه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱ و شکل ۱) رشته‌کوه مرتفع آبیگ در جنوب و کوه آزارات در غرب، رودخانه ارس و قره‌سو در شمال و شرق و مهم‌تر از همه گستره وسیع بیابانی در سطح دشت در مجموع به دشت بورالان انزوای جغرافیایی خاصی بخشیده است. حداقل ارتفاع منطقه ۸۰۰ متر از سطح دریاهای آزاد در حاشیه رودخانه قره‌سو و حداکثر ارتفاع ۲۶۲۰ در ارتفاعات آبیگ واقع شده است. برای مطالعه ماسه‌های بادی ایستگاه‌های منطقه شناسایی شد و آمار و اطلاعات موجود آن‌ها بررسی شد بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از سازمان هواشناسی کشور، نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک ماکو بود که در فاصله ۷۵ کیلومتری دشت بورالان واقع شده است لذا اطلاعات این ایستگاه می‌تواند معرف مناسبی برای پارامترهای اقلیمی این منطقه باشد. بر این اساس بیشترین میانگین بارش سالانه ۳۰۷ میلی‌متر، میانگین درجه حرارت سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین میانگین رطوبت نسبی در ایستگاه ماکو ۵۷ درصد می‌باشد. بیشترین شدت خشکی در منطقه مربوط به ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور است و دوره مرطوب از ماه آذر شروع و تا حداکثر اسفند ادامه دارد (طرح راهبردی-ساختاری منطقه آزاد ماکو، ۱۳۹۸).

بیش از دو سوم منطقه مورد مطالعه را روانه‌های بازالتی نشات گرفته از کوه‌های آزارات پوشانده است و رودخانه قره‌سو تنها رودخانه دائمی در منطقه و از سرشاخه‌های اولیه ارس می‌باشد که از چشمه ثریا منشأ می‌گیرد و در محل ثلاثه به رود ارس می‌پیوندد (صمدزاده و همکاران، ۱۳۹۱). تلماسه، ریپل مارک‌ها، نیکا، دشت ریگی، اشکال چندضلعی گلی، شبه پلایا و روانه‌های طنابی ناشی از گدازه‌های آتش‌فشانی در منطقه فراوان هستند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت بورالان



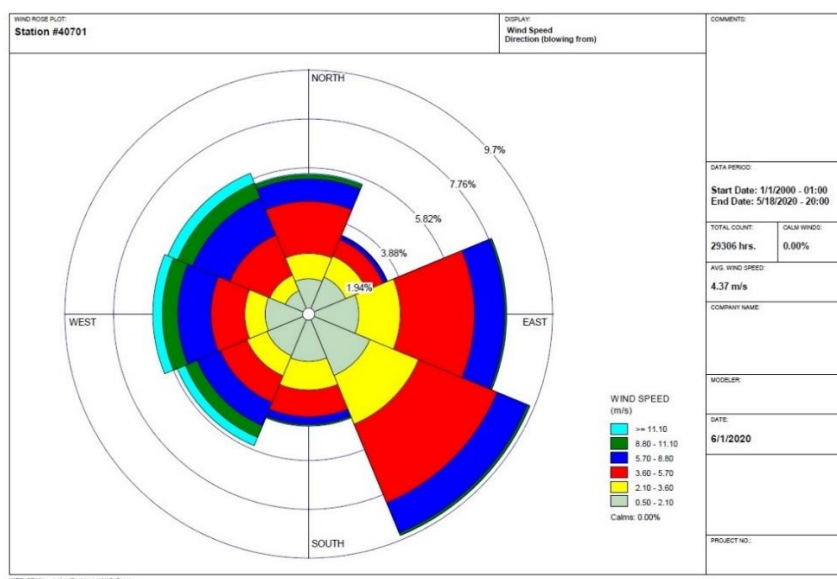
شکل ۳. چشم‌اندازی از مناطق برداشت و رسوب‌گذاری ماسه در دشت بورالان: (الف) دشت ریگی (ب) رسوبات آبرفتی رود ارس (ج) هجوم تپه‌های ماسه‌ای به خانه‌های مسکونی (د) تپه‌های ماسه‌ای

یافته‌ها

نتایج این پژوهش بر اساس تحلیل داده‌های بادسنجی، گرانولومتری و مورفوسکوپی ارائه شده است. یافته‌ها به صورت ساختاریافته در زیر بخش‌های زیر گزارش می‌شوند و با شکل‌ها و جداول پشتیبانی می‌گردند.

رژیم باد

تحلیل داده‌های ۳ ساعته باد ایستگاه سینوپتیک ماکو (۲۰۲۰-۲۰۲۰) با نرم‌افزار WR Plot View 8.0.1 انجام شد. میانگین سرعت باد سالانه ۴.۳۷ متر بر ثانیه بود، گلباد سالانه (شکل ۲) نشان داد که بادهای جنوب شرقی با فراوانی مطلق ۱۹/۵۴ درصد، جهت غالب در منطقه هستند. این الگو بیانگر تأثیر قوی سیستم‌های فشاری منطقه‌ای و تا حدودی تأثیر ناهمواری‌های محلی بر رژیم باد است. پس‌از آن بادهای شرقی با ۱۶/۱۵ درصد در رتبه دوم قرار دارند. به‌طور کلی این دو جهت اصلی بیش از ۳۵ درصد کل رژیم بادی منطقه را شامل می‌شوند.



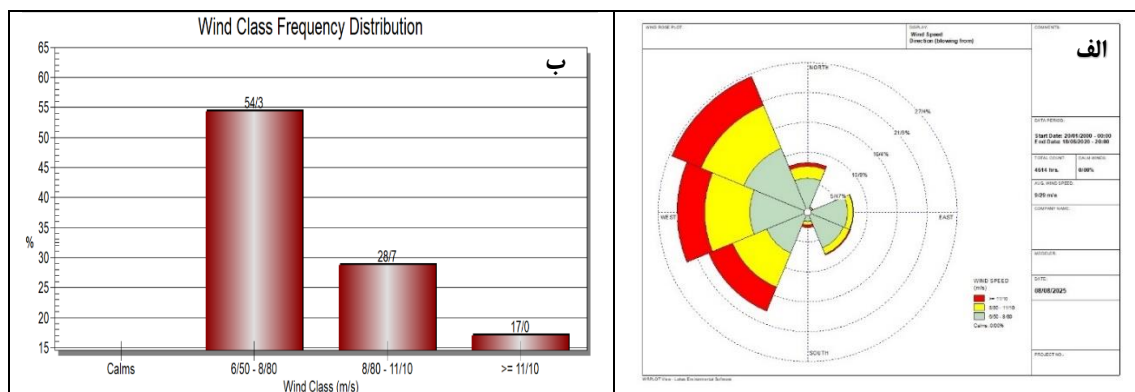
شکل ۲. گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک ماکو، دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰)

بادهای با جهات غربی نیز سهم قابل توجهی در رژیم بادی منطقه دارند، به طوری که بادهای غربی و شمال غربی هر کدام به ترتیب ۱۲/۷۱ و ۱۲/۴۴ درصد فراوانی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. این الگو در کل بیانگر وجود یک محور غالب از جنوب شرق به شمال غرب در الگوی بادی منطقه است. (جدول ۱) توزیع فرکانس باد در جهات و طبقات سرعت باد ایستگاه سینوپتیک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. توزیع فرکانس باد در جهات و طبقات سرعت باد در ایستگاه سینوپتیک ماکو

جهت/کلاس سرعت باد (m/s)	۰/۵۰ - ۲/۱۰	۲/۱۰ - ۳/۶۰	۳/۶۰ - ۵/۷۰	۵/۷۰ - ۸/۶۰	۸/۶۰ - ۱۱/۱۰	۱۱/۱۰ <	مجموع
شمال	۲/۸۹	۲/۰۶	۴/۲۴	۱/۸۴	۰/۳۴	۰/۱۰	۱۱/۴۶
شمال شرق	۳/۲۹	۱/۸۵	۱/۴۶	۰/۳۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۶/۹۶
شرق	۴/۱۰	۳/۳۸	۶/۰۵	۲/۴۶	۰/۱۵	۰/۰۱	۱۶/۱۵
جنوب شرق	۵/۴۱	۴/۲۹	۶/۹۳	۲/۶۹	۰/۱۹	۰/۰۳	۱۹/۵۴
جنوب	۳/۸۶	۲/۳۳	۲/۱۸	۰/۶۰	۰/۱۰	۰/۰۸	۹/۱۴
جنوب غرب	۳/۶۹	۱/۷۷	۲/۳۵	۲/۰۶	۱/۰۴	۰/۷۳	۱۱/۶۱
غرب	۳/۵۵	۱/۶۵	۲/۷۶	۲/۷۱	۱/۳۷	۰/۷۸	۱۲/۷۱
شمال غرب	۲/۰۶	۱/۳۷	۳/۵۳	۳/۲۹	۱/۳۰	۰/۸۸	۱۲/۴۴
مجموع	۲۸/۸۰	۱۸/۷۰	۲۹/۴۹	۱۵/۹۸	۴/۴۲	۲/۶۲	۱۰۰/۰۰

به منظور بررسی الگوی بادهای فرساینده در منطقه مورد مطالعه، گل طوفان ایستگاه سینوپتیک ماکو ترسیم شد (شکل ۳-الف). نتایج تحلیل گل طوفان نشان داد که الگوی بادهای شدید (بالای ۶/۵ متر بر ثانیه) با رژیم غالب باد منطقه تفاوت محسوسی دارد. به طور خاص داده‌های جهتی گل طوفان بیانگر شکل‌گیری محوری غالب از جنوب غرب به شمال غرب در وقوع بادهای قوی هستند. علاوه بر این تحلیل کلاس‌های فراوانی سرعت باد (شکل ۳-ب) نشان داد که بیشترین فراوانی مربوط به کلاس ۶/۵ تا ۸/۸۰ متر بر ثانیه با (فراوانی ۰/۵۴ در صد) است، در حالی که بادهای بسیار شدیدتر با کلاس بالای ۱۱/۱۰ متر بر ثانیه کمترین فراوانی (۰/۱۷ در صد) را دارا هستند.



شکل ۳. (الف) گل طوفان سالانه ایستگاه سینوپتیک ماکو (ب) کلاس‌های فراوانی سرعت باد

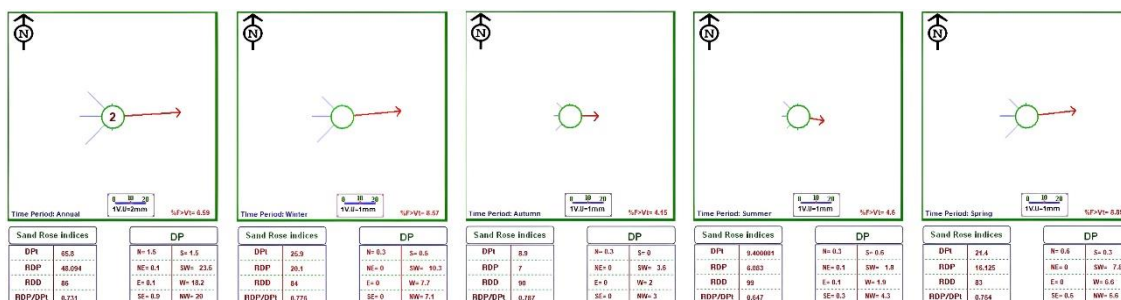
نتایج حاصل از تحلیل توزیع فرکانس باد در جهات و طبقات سرعت (جدول و نمودار گل طوفان) نشان داد که سه جهت شمال غرب (حدود ۲۷ در صد)، غرب (حدود ۲۴ در صد) و جنوب غرب (۱۹ در صد) و در مجموع ۷۰/۱۹ درصد از کل بادهای قوی منطقه را به خود اختصاص می‌دهند. این الگو نشان‌دهنده غلبه آشکار جریان‌های جوی غربی در ایجاد شرایط طوفانی است. در مقابل، بادهای شمال شرقی با تنها ۱/۰۶ درصد فراوانی، کمترین نقش را در وقوع بادهای شدید ایفا می‌کنند. همچنین، سهم نسبتاً پایین بادهای شرقی (۸/۳۷ در صد) و جنوب شرقی (۸/۵۱ در صد) نشان می‌دهد که نیمه شرقی منطقه به‌طور کلی در معرض بادهای شدید دارد.

جدول ۴. جدول توزیع فرکانس باد در جهات و طبقات سرعت باد گل طوفان

جهت/کلاس سرعت باد (m/s)	۱۱/۱۰ ≤	۸/۶۰ - ۱۱/۱۰	۶/۵۰ - ۸/۶۰	مجموع (درصد)
شمال	۶/۲۰	۲/۱۹	۰/۶۴	۹/۰۴
شمال شرق	۰/۸۰	۰/۲۰	۰/۰۷	۱/۰۶
شرق	۷/۲۹	۱/۰۰	۰/۰۹	۸/۳۷
جنوب شرق	۷/۰۷	۱/۲۲	۰/۲۲	۸/۵۱
جنوب	۱/۷۱	۰/۶۴	۰/۴۹	۲/۸۴
جنوب غرب	۸/۰۹	۶/۷۴	۴/۷۲	۱۹/۵۴
غرب	۱۰/۵۵	۸/۲۴	۵/۰۵	۲۳/۸۴
شمال غرب	۱۲/۶۱	۸/۴۶	۵/۷۴	۲۶/۸۱
مجموع	۵۴/۳۰	۲۸/۶۹	۱۷/۰۱	۱۰۰/۰۰

پتانسیل حمل ماسه

محاسبات پتانسیل حمل ماسه (DP) با نرم‌افزار SandRoseGraph و معادلات فرایبرگر (۱۹۷۹) انجام شد. نتایج حاصل از محاسبات و تهیه گل ماسه ایستگاه سینوپتیک ماکو به‌صورت فصلی و سالانه با دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۰ در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. گل ماسه‌های فصلی و سالانه ایستگاه سینوپتیک ماکو، دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۰۰

در جدول ۵ نتایج حاصل از توان حمل ماسه ((DPt) در جهات مختلف درج شده که بیانگر طول بازوی گل ماسه در جهت موردنظر است مقدار بردار (RDP) یا برآیند توان حمل ماسه بر اساس آستانه سرعت ۱۳ نات در حدود ۴۸ واحد بردار است که نسبت به شمال جغرافیایی زاویه معادل ۸۶ درجه را تشکیل می‌دهد به عبارتی جهت بردار منتجه (RDD) از جنوب غرب به سمت شرق است.

جدول ۵. توزیع مقادیر DP_t در جهات هشتگانه جغرافیایی در فصول مختلف سال در ایستگاه سینوپتیک ماکو دوره آماری (۲۰۰۰-۲۰۲۰)

جهت فصل	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	جمع سالانه رسوب (واحد برداری)
بهار	۰/۶	۰	۰	۰/۵	۰/۳	۷/۸	۶/۶	۵/۶	۲۱/۴
تابستان	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۶	۱/۸	۱/۹	۴/۳	۹/۴
پاییز	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۳/۶	۲	۳	۸/۹
زمستان	۰/۳	۰	۰	۰	۰/۵	۱۰/۳	۷/۷	۷/۱	۲۵/۹
سالانه	۱/۵	۰/۱	۰/۱	۰/۹	۱/۵	۲۳/۵	۱۸/۲	۲۰	۶۵/۸

طبق جدول الگوی جهت شاخص مجموع توان حمل ماسه نشان می‌دهد جهت جنوب غرب با ۲۳/۵ در صد غالب‌ترین جهت است و سپس شمال غرب با ۲۰ واحد و غرب با ۱۸/۲ واحد در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین الگوی فصلی نیز نشان داد زمستان با ۲۵/۹ واحد بالاترین مقدار شاخص را دارد و بهار با ۲۱/۴ واحد دومین فصل مهم محسوب می‌گردد. بنابراین با توجه به مقدار سالانه شاخص DP_t که برابر ۶۵/۸ واحد بردار هست. طبق جدول طبقه‌بندی فرایبرگر و دین (۱۹۷۹) قدرت فرسایشی باد در منطقه مورد مطالعه کمتر است.

جدول ۶. تقسیم‌بندی قدرت فرسایش باد در محیط‌های بیابانی

قدرت DP	قدرت فرسایش باد	دبی حمل ماسه بر حسب مترمکعب در سال در عرض ۱ متر
۴۰۰ <	زیاد	>۳۳
۲۰۰-۴۰۰	متوسط	۱۷-۳۳
۲۰۰ >	کم	<۱۷

منبع: (Fryberger, Dean et al., 1979).

برای محاسبه شاخص همگنی (UDI) از نسبت RDP/DP استفاده شد این شاخص میزان پایداری یا تغییرپذیری جهت بادهای حامل ماسه را نشان می‌دهد به‌طوری‌که هر چه مقدار این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ثبات بیشتر باد در یک‌جهت خاص است و هر چه به صفر میل کند، حاکی از ناپایداری جهت باد و غلبه بادهای چندجهته خواهد بود (جدول ۷). نتایج به‌دست‌آمده از ایستگاه سینوپتیک ماکو نشان می‌دهد که مقدار شاخص همگنی در کلیه فصول و در طول سال دارای دامنه تغییرات بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۹ می‌باشد که چنین مقادیری بر اساس طبقه‌بندی بیانگر نقش مؤثر بادهای دو جهته در رژیم بادی منطقه در طول سال است.

جدول ۷. نتایج گل ماسه‌های ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	پارامتر فصول	RDP	RDD(Degree)	UDI
ایستگاه سینوپتیک ماکو	بهار	۱۶/۱۳	۸۳	۰/۷۵
	تابستان	۶/۱	۹۹	۰/۶۵
	پاییز	۷	۹۰	۰/۷۹
	زمستان	۲۰/۱	۸۴	۰/۷۸
	سالانه	۰/۸۶	۸۶	۰/۷۳

گرانولومتری رسوبات

برای انجام عملیات گرانولومتری از هر نمونه رسوب به جرم ۱۰۰ گرم جهت انجام آزمایش غربال خشک استفاده گردید. الک‌های با قطر ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ظرف جمع‌آوری رسوبات کوچک‌تر از ۶۳ میکرون بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت. عملیات تکان دادن نمونه‌ها با استفاده از دستگاه شیکر ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد سپس وزن هر الک با ترازوی با دقت دو صدم گرم محاسبه و در صد هر طبقه مشخص گردید (جدول ۸).

جدول ۸. نتایج حاصل از گرانولومتری رسوبات برداشت‌شده از دشت بورالان به درصد

شماره نمونه/قطر ذرات به میکرون	۲۰۰۰ <	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۵۰-۵۰۰	۱۲۵-۲۵۰	۶۳-۱۲۵	۶۳ >
۱	۰/۳۴	۲/۳۶	۱۶/۰۷	۴۱/۴۹	۵۰/۴۳	۲۵/۳۵	۵/۳۱
۲	۰/۲۴	۲/۳۳	۱۰/۱۵	۵۲/۶۶	۵۳/۸۳	۲۵/۱۳	۵/۲۷
۳	۰/۲۲	۰/۰۸	۱/۰۸	۳۷/۵۶	۷۸/۷۲	۲۹/۵۸	۲/۲۸
۴	۰/۰۸	۱/۲۴	۵/۴۵	۳۶/۶۷	۶۸/۳۹	۳۴/۲۴	۳/۲۴
۵	۰/۰۰	۰/۳۵	۱/۶۹	۲۳/۵۳	۶۳/۸۸	۵۲/۰۴	۸/۴۴
۶	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۴۸	۶۸/۲۲	۶۰/۹۵	۱۴/۹۱	۴/۷۶
۷	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۴۴	۳۴/۲۲	۹۲/۰۴	۲۰/۱۵	۲/۴۵
۸	۰/۲۰	۱/۱۶	۵/۴۲	۳۰/۰۰	۷۲/۲۴	۳۷/۵۷	۳/۰۸
۹	۳/۹۶	۰/۳۶	۲/۲۳	۳۷/۳۷	۸۳/۹۵	۱۸/۳۴	۳/۴۱
۱۰	۷/۶۴	۳/۴۰	۷/۶۱	۳۷/۳۰	۶۰/۸۰	۲۳/۴۷	۹/۰۱
۱۱	۰/۰۷	۰/۰۹	۴/۳۳	۸۰/۷۲	۵۹/۷۴	۴/۰۳	۰/۳۶
۱۲	۰/۳۴	۰/۲۰	۱/۶۶	۳۲/۹۵	۷۲/۷۳	۳۲/۵۰	۹/۰۳
۱۳	۰/۰۰	۰/۰۹	۴/۲۰	۷۶/۸۶	۶۳/۴۳	۴/۷۸	۰/۲۳
۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۴	۳۰/۲۰	۱۱۲/۹۳	۶/۰۹	۰/۲۴
۱۵	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۱۳	۶۰/۱۸	۸۰/۸۳	۸/۲۲	۰/۲۲
۱۶	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۱۲/۹۷	۱۱۰/۲۶	۲۴/۵۹	۱/۷۱
۱۷	۰/۲۹	۲/۲۰	۱۵/۴۳	۴۷/۳۳	۵۵/۱۳	۲۴/۰۸	۵/۰۳
۱۸	۰/۳۱	۲/۴۳	۱۴/۷۶	۵۱/۲۹	۵۳/۱۷	۲۲/۷۶	۴/۸۴
۱۹	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۴۷	۳۲/۱۳	۹۳/۰۵	۲۱/۱۰	۲/۵۱

در ادامه نتایج حاصل از دانه‌بندی رسوبات به‌منظور انجام تحلیل‌های آماری از جمله میانگین، جورشدهگی و کج شدگی که در تعیین فاصله منبع یابی ماسه‌های حمل شده مؤثر می‌باشند وارد نرم‌افزار GRADISTAT شد و بر اساس روش Ward و Folk پارامترهای آماری رسوبات محاسبه گردید (جدول ۹).

جدول ۹. نتایج حاصل از پارامترهای آماری نمونه‌ها بر اساس روش Ward و Folk بر حسب میکرون

پارامتر آماری نمونه	میانگین	جورشدهگی	چولگی	کشیدگی	پارامتر آماری نمونه	میانگین	جورشدهگی	چولگی	کشیدگی
۱۱	۲/۱۲۶	۰/۵۲۴	۰/۴۴۹	۰/۵۹۳	۱	۲/۵۶۶	۱/۰۱۶	-۰/۰۵۷	۱/۰۸۵
۱۲	۲/۷۸۰	۰/۸۷۴	۰/۰۵۸	۱/۰۱۱	۲	۲/۵۹۱	۰/۹۸۷	-۰/۰۵۱	۱/۰۹۴
۱۳	۲/۱۴۲	۰/۵۲۷	۰/۴۲۳	۰/۵۸۹	۳	۲/۷۰۸	۰/۸۰۵	۰/۰۰۶	۰/۹۶۷
۱۴	۲/۴۹۷	۰/۴۶۵	-۰/۵۴۱	۱/۶۲۰	۴	۲/۷۰۸	۰/۸۵۴	-۰/۰۰۵	۰/۶۳۶
۱۵	۲/۳۸۷	۰/۶۰۱	-۰/۲۳۷	۰/۸۰۷	۵	۲/۸۹۴	۰/۸۵۴	۰/۱۰۰	۰/۹۰۴
۱۶	۲/۹۳۹	۰/۵۶۵	۰/۲۸۴	۲/۳۹۵	۶	۲/۳۸۵	۰/۶۸۰	-۰/۰۷۹	۰/۸۹۱
۱۷	۲/۵۶۹	۱/۰۰۳	-۰/۰۷۸	۱/۱۰۲	۷	۲/۵۱۱	۰/۶۳۲	-۰/۲۳۷	۲/۱۷۳
۱۸	۲/۵۴۹	۰/۹۹۶	-۰/۰۶۱	۱/۱۰۶	۸	۲/۷۴۶	۰/۸۴۷	-۰/۰۱۸	۰/۹۵۵
۱۹	۲/۵۲۳	۰/۶۲۸	-۰/۲۳۸	۲/۱۹۸	۹	۲/۴۶۱	۰/۶۷۳	-۰/۲۳۷	۰/۹۸۰
					۱۰	۲/۶۲۱	۱/۳۰۹	-۰/۲۱۵	۱/۷۵۱

میانگین اندازه ذرات (Mz) بین ۲۰۱۲۶ میکرون (نمونه ۱۱) و ۲۰۹۳۹ میکرون (نمونه ۱۶) متغیر بود. انحراف معیار یا جورشدگی پارامتری است که یکنواختی ذرات تشکیل‌دهنده رسوب و نزدیک یا دور بودن قطر آن‌ها را نشان می‌دهد لذا هر چه اندازه رسوبات یکنواخت‌تر باشد رسوب جورشدگی بیشتری دارد. میزان جور شدگی رسوبات بر اساس روش فولک را نشان می‌دهد که مقادیر این پارامتر در دامنه ۰/۴۶۵ میکرون تا ۱/۳۰۹ میکرون متغیر است و بر اساس جدول دارای جور شدگی نسبتاً خوب تا جور شدگی بد می‌باشد.

پارامتر کج شدگی یا چولگی نامتقارن بودن و تمایل منحنی دانه‌بندی رسوبات به سمت ذرات ریز یا درشت‌دانه است اگر مقدار ذرات ریز فراوان باشد دنباله منحنی به طرف راست و کج شدگی مثبت است ولی اگر فراوانی ذرات دانه‌درشت بیشتر باشد دنباله منحنی به طرف چپ و کج شدگی منفی است. طبق جدول مقادیر کج شدگی رسوبات بین ۰/۵۴۱- میکرون تا ۰/۴۴۹ میکرون می‌باشد نتایج حاصل از این پارامتر نشان می‌دهد که نمونه‌های (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۵)، (۶)، (۸)، (۱۲)، (۱۷)، (۱۸) دارای کجی متقارن هستند و منحنی بعضی از رسوبات به سمت چپ و مواد دانه‌ریز متمایل می‌شود که در این حالت میزان کج شدگی مثبت می‌باشد. نمونه‌های (۷)، (۹)، (۱۰)، (۱۵)، (۱۴) و (۱۹) دارای کج شدگی مثبت می‌باشد که این مورد نشان‌دهنده آن است که رسوب‌گذاری این رسوبات در محیط آرام صورت گرفته است همچنین در نمونه‌های (۱۱)، (۱۳) و (۱۶) منحنی رسوبات متمایل به راست و میزان کج شدگی آن‌ها منفی است که این موضوع بیانگر رسوب‌گذاری این رسوبات در محیط پر انرژی صورت گرفته است.

جدول ۱۰. طبقه‌بندی ضرایب جورشدگی و کج شدگی (فولک، ۱۹۸۰)

انحراف معیار استاندارد فولک	جورشدگی	ضرایب کج شدگی	وضعیت تقارن دانه‌بندی
کمتر از ۰/۳۵	بسیار خوب	۰-۱/۳	زیاد به سمت ذرات ریز دانه
۰/۳۵-۰/۵	خوب	۰/۰-۳/۱	به سمت ذرات ریز دانه
۰/۰-۵/۷۱	نسبتاً خوب	۰/۱-(-۰/۱)	متقارن
۰/۱-۷۱	متوسط	(-۰/۳)-(-۰/۱)	به سمت ذرات درشت‌دانه
۲-۱	بد	(-۱)-(-۰/۳)	زیاد به سمت ذرات درشت‌دانه
۴-۲	بسیار بد		
بیشتر از ۴	بی‌نهایت بد		

کشیدگی عبارت است از اندازه‌گیری نوک‌تیزی یا کشیدگی منحنی توزیع ذرات که از نسبت جور شدگی دنباله منحنی به جورشدگی قسمت وسط منحنی به دست می‌آید (فیض نیا، ۲۰۰۸). کشیدگی منحنی اطلاعات زیادی در رابطه با جور شدگی و اندازه دانه می‌دهد این اطلاعات برای تعبیر و تفسیر محیط رسوبی همچنین فرایند رسوب‌گذاری اهمیت خاصی دارد. فولک (۱۹۷۴) مقیاسی برای طبقه‌بندی کشیدگی منحنی‌ها به شرح ذیل ارائه کرده است (جدول ۷). نتایج حاصل از این مطالعات آزمایشگاهی و آماری نشان می‌دهد که بیشترین نمونه‌ها در دامنه بین ۰/۹ تا ۱/۱۱ قرار دارند و دارای منحنی با کشیدگی متوسط هستند (جدول ۱۱ و شکل ۷)

جدول ۱۱. انواع و میزان کشیدگی به روش (فولک، ۱۹۸۰).

کشیدگی	نتیجه	نتایج حاصل از پارامتر کشیدگی نمونه رسوبات
کمتر از ۰/۶۷	خیلی پهن	۴-۱۱-۱۳
۰/۰-۹/۶۷	پهن	۵-۶-۱۵
۱/۰-۱۱/۹	متوسط	۱-۲-۳-۸-۹-۱۲-۱۷-۱۸
۱/۵-۱۱/۱۱	کشیده	۱۰
۱-۳/۵	خیلی کشیده	۷-۱۴-۱۶-۱۹
بیشتر از ۳	فوق‌العاده کشیده	-



شکل ۷. نمودار مقادیر کمی جورشدگی، چولگی و کشیدگی

مورفوسکوپی رسوبات

مورفوسکوپی با توجه به اینکه فرایند فرسایش شکل سطحی رسوبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد لذا می‌توان با مطالعه ویژگی‌های سطحی رسوبات عوامل فرسایش و تخریب را در منطقه مورد مطالعه شناسایی نمود بدین منظور برای بررسی مورفوسکوپی رسوبات، تعداد ۲۵ دانه از نمونه را به صورت تصادفی از هر نمونه برداشت نموده و در زیر میکروسکوپ بینکولار، از دو جنبه مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا وضعیت سطح دانه‌ها که دارای حالت‌های کدر، مات، خال‌دار، درخشان و تخریب فیزیکی و شیمیایی مطالعه شد. کدری در دانه‌های ماسه، در نتیجه تخریب سطحی است که دانه نامنظم بوده به‌طوری‌که ممکن است در نتیجه برخورد ذرات و یا عمل انحلال قسمتی از سطح دانه‌ها تخریب یافته باشد این دانه‌ها در نمونه‌های (۴، ۱۰، ۱۲، ۱۷، ۱۸) و در قسمت شمال و شرق منطقه مورد مطالعه قرار دارند. خال‌دار یا هاله‌دار بودن ذرات نشان‌دهنده نوع عامل حمل می‌باشد به‌طوری‌که هر چه دانه‌های هاله‌ای بیشتر باشد بیانگر حمل طولانی مدت توسط آب است (احمدی، ۱۳۸۷). تعداد دانه‌های خالدار در نمونه‌های (۱) و (۲) که در اطراف رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و در قسمت جنوب منطقه مورد مطالعه وجود دارند بیشتر بود. این دانه‌ها در مجموع ۱۰/۵ درصد از مجموع کل نمونه‌ها را تشکیل داده‌اند. فراوانی دانه‌های درخشان در میان رسوبات بادی بیانگر نقش مؤثر و بیشتر آبرفت‌های رودخانه‌ای، رسوبات مسیل‌ها و خشک‌رودها در تغذیه ماسه‌های روان بود این دانه در نمونه‌های (۹-۲-۷-۸-۳) که عمدتاً در منطقه مورد مطالعه در اطراف آبراهه‌ها و رودخانه‌ها قرار دارند (جدول ۱۲) خلاصه‌ای از وضعیت مورفوسکوپی سطح دانه‌ها را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. طبق این جدول حدود ۴۵ درصد دانه‌ها کدر و حدود ۴۳ درصد دانه‌ها درخشان می‌باشد.

جدول ۱۲. بررسی وضعیت مورفوسکوپی سطح دانه‌ها در منطقه مورد مطالعه

نمونه	تعداد دانه‌های کدر	درصد دانه‌های کدر	تعداد دانه‌های خال‌دار	درصد دانه‌های خال‌دار	تعداد دانه‌های درخشان	درصد دانه‌های درخشان
۱	۱۰	۴۰	۱۰	۴۰	۵	۲۰
۲	۵	۲۰	۲	۸	۱۸	۷۲
۳	۹	۳۶	۰	۰	۱۶	۶۴
۴	۱۵	۶۰	۱	۴	۹	۳۶
۵	۱۲	۴۸	۱	۴	۹	۳۶
۶	۱۲	۴۸	۰	۰	۱۳	۵۲
۷	۷	۲۸	۰	۰	۱۸	۷۲
۸	۱۰	۴۰	۰	۰	۱۵	۶۰
۹	۶	۲۴	۰	۰	۱۹	۷۶
۱۰	۱۵	۶۰	۰	۰	۱۰	۴۰
۱۱	۱۳	۵۲	۲	۸	۱۰	۴۰

ادامه جدول ۱۲						
۱۲	۱۴	۵۶	۲	۸	۸	۳۲
۱۳	۱۳	۵۲	۸	۳۲	۴	۱۶
۱۴	۱۳	۵۲	۵	۲۰	۷	۲۸
۱۵	۱۰	۴۰	۱۱	۴۴	۴	۱۶
۱۶	۹	۳۶	۳	۱۲	۱۳	۵۲
۱۷	۱۴	۵۶	۲	۸	۸	۳۲
۱۸	۱۴	۵۶	۲	۸	۷	۲۸
۱۹	۱۳	۵۲	۱	۴	۱۱	۴۴
مجموع	۲۱۴	۸۵۶	۵۰	۲۰۰	۲۰۴	۸۱۶
		۴۵/۱		۱۰/۵		۴۲/۹

در دومین مرحله بررسی شکل دانه‌ها مقدار ساییدگی و گرد شدگی بررسی شد که بیانگر این موضوع است هر چه دانه بیشتر در معرض آب و باد قرار بگیرد و بیشتر سائیده شده باشد گردتر شده است و می‌توان علاوه بر عامل حمل مسافت حمل رسوبات را نیز تعیین کرد. برای تعیین میزان سائیدگی ذرات ماسه از چهار نوع طبقه‌بندی: (الف) دانه‌های سائیده نشده یا زاویه‌دار، (ب) دانه‌های کم سائیده شده یا فرسایش کم، (ج) دانه‌های سائیده شده و (د) دانه‌های گرد شده استفاده شد.

بررسی وضعیت مورفوسکوپی ذرات نشان‌دهنده عوامل تخریب و گویای فاصله منطقه برداشت و رسوب‌گذاری می‌باشد لذا مورفوسکوپی رسوبات بر اساس توضیحات فوق نشان داد وضعیت سطح دانه‌ها کدر یا درخشان می‌باشد که در نمونه‌های برداشت‌شده اکثر دانه‌ها دارای سطح کدر می‌باشند که علت آن را تخریب بادی می‌توان دانست و اینکه رسوبات باد روفتی هستند. از نظر شکل غالب نمونه‌ها در گروه دانه‌های سائیده نشده یا زاویه‌دار قرار گرفتند با توجه به جدول ۱۳ بیش از ۴۵ درصد دانه‌ها زاویه‌دار هستند که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر عوامل تخریب بر روی آن‌ها بوده است.

جدول ۱۳. وضعیت مورفوسکوپی میزان سائیدگی دانه در منطقه مورد مطالعه (بر حسب میکرون)

نمونه	زاویه‌دار	در صد زاویه‌دار	فرسایش کم	در صد فرسایش کم	سائیده شده	در صد سائیده شده	گرد شده	در صد گرد شده
۱	۱۴	۵۶	۱۱	۴۴	۰	۰	۰	۰
۲	۱۵	۶۰	۲	۸	۳	۱۲	۲	۸
۳	۱۴	۵۶	۸	۳۲	۳	۱۲	۰	۰
۴	۳	۱۲	۱۸	۷۲	۲	۸	۲	۸
۵	۱۴	۵۶	۹	۳۶	۰	۰	۲	۸
۶	۲۰	۸۰	۱	۴	۰	۰	۴	۱۶
۷	۲۳	۹۲	۰	۰	۰	۰	۲	۸
۸	۱۱	۴۴	۹	۳۶	۰	۰	۵	۲۰
۹	۲۵	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۲۲	۸۸	۰	۰	۳	۱۲
۱۱	۵	۲۰	۲۰	۸۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۱۳	۵۲	۶	۲۴	۰	۰	۵	۲۰
۱۳	۹	۳۶	۷	۲۸	۰	۰	۹	۳۶
۱۴	۹	۳۶	۷	۲۸	۰	۰	۹	۳۶
۱۵	۱۲	۴۸	۴	۱۶	۳	۱۲	۶	۲۴
۱۶	۳	۱۲	۸	۳۲	۸	۳۲	۶	۲۴
۱۷	۷	۲۸	۶	۲۴	۷	۲۸	۱۱	۴۴
۱۸	۵	۲۰	۷	۲۸	۳	۱۲	۱۰	۴۰

ادامه جدول ۱۳							
۱۹	۱۴	۵۶	۵	۲۰	۰	۰	۲۴
مجموع	۲۱۶	۸۶۴	۱۵۰	۶۰۰	۲۹	۱۱۶	۳۲۸
		۴۵/۵		۳۱/۶		۶/۱	۱۷/۳

بحث

نتایج تحلیل رژیم باد در دشت بورالان نشان داد که میانگین سرعت سالانه باد ($4/37$ متر بر ثانیه) است و رژیم کلی باد، جهات جنوب شرقی ($19/54$ در صد) و شرقی ($16/15$ در صد) بیشترین سهم را در ایستگاه مورد مطالعه دارند. این الگو، بازتابی از تأثیر سامانه‌های فشاری منطقه‌ای و مسیرهای اصلی جبهه‌های هوا بوده و نشان‌دهنده نفوذ جریانات شرقی در برخی از فصول است. با این حال نقش بادهای غربی و شمال غربی نیز در منطقه پررنگ بود و حضور آن‌ها موجب شکل‌گیری جنوب شرق - شمال غرب به عنوان جهت باد غالب در الگوی عمومی تحلیل رژیم باد منطقه است. این دو جهت در مجموع بیش از یک سوم کل فراوانی باد را تشکیل می‌دهند. تحلیل گل طوفان با آستانه فرسایش $6/5$ متر بر ثانیه، تصویر واقعی از بادهای فرساینده و فرسایش بادی را در منطقه مورد مطالعه ارائه داد. بادهای شدید عمدتاً از جهات شمال غرب ($26/81$ در صد) غرب ($0/24$ در صد) و جنوب غرب (19 در صد) می‌وزند به طوری که بیش از 70 درصد کل بادهای فرساینده را تشکیل می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که در دشت بورالان تفاوت معناداری بین نمودار گلباد و گل طوفان وجود دارد و درک واقعی از پویایی فرسایش بادی در منطقه مستلزم ترسیم گل طوفان منطقه است. پتانسیل حمل ماسه (DPT) برابر با $65/8$ واحد بردار و برآیند توان حمل ماسه (RDP) در طول سال معادل $0/86$ محاسبه شد. که بیشترین مقدار این شاخص برای فصول زمستان و بهار ثبت شده و بیانگر اوج جابجایی ماسه در این دوره‌ها است. نمودار گل ماسه جهت حرکت ماسه را به سمت شرق نشان داد که با جهت غالب بادهای فرساینده غربی و جنوب غربی همخوانی دارد. شاخص همگنی (UDI) بین $0/65$ تا $0/79$ ، به‌ویژه در بهار و تابستان، گویای وجود بادهای دو جهته است. بنابراین تفاوت آشکار میان الگوی گلباد و گل طوفان را می‌توان به نقش توپوگرافی محلی نسبت داد. وجود کوه آرارات در غرب و ارتفاعات آبیگ در جنوب، به عنوان موانع فیزیکی بزرگ، سبب انحراف و کانالیزه شدن بادها در امتداد محوره‌های خاص شده است. همچنین، دالان‌های بادی ناشی از رودخانه قره‌سو و ارس و گستره باز دشت بورالان شرایطی را فراهم کرده‌اند که تمرکز بادهای شدید در نیمه غربی تشدید و سهم بادهای شرقی در فرآیند فرسایشی کاهش یابد.

نتایج تحلیل گرانولومتری رسوبات نشان داد میانگین اندازه ذرات (Mz) بین $2/126$ میکرون تا $2/939$ میکرون متغیر بوده است و جورشدگی ذرات بین $0/465$ تا $1/309$ میکرون، نشان‌دهنده تنوع محیط‌های رسوبی (آرام تا پرانرژی) است. کج شدگی مثبت در برخی نمونه‌ها (مانند ۷، ۹، ۱۰) به رسوب‌گذاری در محیط‌های آرام (مانند حاشیه مسیل‌ها) و کج شدگی منفی در نمونه‌های ۱۱ و ۱۶ به محیط‌های پرانرژی (مانند تپه‌های ماسه‌ای فعال) اشاره دارد. نتایج حاصل از مورفوسکوپی رسوبات، با 45% دانه‌های کدر و زاویه‌دار، نقش غالب فرسایش بادی و حمل کوتاه‌مدت را تأیید می‌کند، درحالی که $10/5$ در صد دانه‌های خال‌دار به تأثیر فرایندهای آبی، به‌ویژه در نزدیکی رود ارس و رودخانه قره‌سو، اشاره دارد (احمدی، ۱۳۸۷). این منشأ دوگانه (آبرفتی و آتش‌فشانی) پویایی رسوبات بورالان را از سایر مناطق خشک متمایز می‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به شناخت منطقه، تحلیل‌های رژیم باد، بازدیدهای میدانی و کارهای آزمایشگاهی، یافته‌های این پژوهش نشان داد بادهای فرساینده غربی و جنوب غربی نقش اصلی را در جابجایی ماسه‌ها و فعال شدن تپه‌های ماسه‌ای در دشت بورالان ایفا می‌کنند، درحالی‌که بادهای غالب در گلباد از جهات جنوب شرق و شرق هستند و سهم کمتری در فرسایش بادی دارند. شاخص‌های حمل ماسه و بردار برآیند جابه‌جایی ماسه‌ها، جهت غالب حرکت ماسه‌ها را از جنوب غرب به شرق نشان می‌دهند و با تمرکز بادهای فرساینده در نیمه غربی دشت همخوانی دارند. که با پژوهش انجام‌شده توسط (یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۵) همخوانی دارد. ترکیب نتایج مورفوسکوپی و گرانولومتری نشان داد که منابع اصلی ماسه‌ها تخریب فیزیکی و شیمیایی روانه‌های بازالتی کوه آرات و رسوبات آبرفتی رودهای قره‌سو و ارس هستند. فرآیندهای بادی، به‌ویژه بادهای غربی با شدت بالا، عامل اصلی فرسایش و جابجایی ماسه بوده و بادهای شرقی و جنوب شرقی با شدت کمتر نقش مکملی در برداشت، حمل و رسوب‌گذاری ماسه‌ها دارند. تغییرات کاربری زمین به دلیل چرای بی‌رویه که باعث از بین رفتن پوشش گیاهی در این منطقه شده است این موضوع علیرغم تشدید فرآیندهای فرسایش بادی، حرکت و جابجایی ماسه را تسهیل کرده است. تحلیل‌های گرانولومتری نشان‌دهنده غلبه بافت ماسه متوسط تا ریز، با جورشدگی نسبتاً خوب تا بد و کشیدگی ذرات متوسط و با کجی متقارن است که بیانگر انتقال فعال رسوبات توسط باد است. نتایج مورفوسکوپی نیز درصد بالایی از ذرات با سطح کدر و زاویه‌دار را نشان می‌دهد که نقش فعال فرسایش بادی و منبع محلی بخشی از رسوبات را تأیید می‌کند درحالی‌که سهم ذرات براق و گرد کمتر بوده و نشان‌دهنده محدود بودن انتقال طولانی‌مدت است. از نظر مکانی، بخش جنوب غربی دشت به دلیل تمرکز بادهای غربی فرساینده بیشترین میزان فعالیت فرسایش بادی و برداشت ماسه را تجربه می‌کند لذا اجرای اقدامات مدیریتی شامل تثبیت بیولوژیکی و مکانیکی ماسه‌ها، احداث بادشکن، حفاظت و احیای پوشش گیاهی و پایش مستمر رژیم باد و تغییرات مورفولوژیکی تپه‌ها، می‌تواند در کاهش اثرات منفی فرسایش بادی و حفاظت از زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌های انسانی جوامع محلی کمک قابل‌توجهی بکند. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه صمدزاده و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد، که نشان می‌داد دشت بورالان عمدتاً تحت تأثیر بادهای غربی و محلی قرار دارد و منابع ماسه آن از تخریب فیزیکی و شیمیایی روانه‌های بازالتی و رسوبات آبرفتی رودخانه‌های منطقه نشأت می‌گیرد.

با توجه به نقش مهم فرسایش بادی در بیابان‌زایی و شکل‌گیری و پویایی مناطق بیابانی و تأثیرات منفی آن بر منابع طبیعی، زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌های انسانی، شناخت دقیق زمان، جهت و شدت بادهای فرسایشی در مناطق حساس مانند دشت بورالان اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های میدانی، آزمایشگاهی و تحلیل داده‌های رژیم باد، توانسته است نقش عوامل طبیعی و انسانی را در فرایند فرسایش بادی این منطقه شناسایی و تبیین نماید. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای طراحی و اجرای طرح‌های مؤثر کنترل فرسایش بادی، برنامه‌ریزی آمایش سرزمین و توسعه پایدار در مناطق بیابانی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر داده‌های دقیق، گامی مهم در جهت حفاظت از منابع طبیعی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی فرسایش بادی محسوب می‌شود.

برای مدیریت فرسایش بادی در بورالان، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

۱. تثبیت بیولوژیکی: تحلیل‌ها نشان دادند که فقدان پوشش گیاهی، شرایط را برای جابجایی ماسه‌ها تسهیل می‌کند. همچنین وجود دانه‌های زاویه‌دار نشان می‌دهند که رسوبات در مرحله اولیه فرسایش قرار دارند. بنابراین، کاشت گونه‌های بومی منطقه مانند اسکنبیل و گز می‌تواند با تثبیت خاک، از تشدید فرسایش خاک و حرکت ماسه‌ها جلوگیری کند.
۲. بادشکن‌های هوشمند: مشاهدات میدانی در روستاهای قم قشلاق و ولی‌کندی نشان داد که تپه‌های ماسه‌ای در حال پیشروی به‌سوی خانه‌ها، جاده‌ها و اراضی کشاورزی هستند. به دلیل کمبود پوشش گیاهی حفاظتی، نصب بادشکن در اطراف این روستاها ضروری است. این اقدام می‌تواند با کاهش سرعت باد، محدود کردن حرکت ماسه‌ها و حفاظت از زیرساخت‌ها و زمین‌های کشاورزی، اثرات فرسایش بادی را به حداقل برساند.
۳. مدیریت چرا: تخریب پوشش گیاهی یکی از عوامل اصلی فعال‌سازی فرسایش بادی محسوب می‌شود. وجود نیکاه‌ها، نشان‌دهنده نقش حفاظتی گیاهان در تثبیت خاک است. بنابراین کاهش فشار چرای دام می‌تواند به تثبیت طبیعی سطح خاک کمک کرده و فرآیند فرسایش بادی را محدود نماید.
۴. پایش مستمر: با وجود دسترسی به داده‌های بلندمدت باد از ایستگاه سینوپتیک ماکو، این اطلاعات به‌تنهایی برای پوشش محلی دشت بورالان کافی نیست. استقرار ایستگاه‌های بادسنج محلی و بهره‌گیری از پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2، امکان پایش دقیق تغییرات تپه‌های ماسه‌ای و ارزیابی اثربخشی اقدامات تثبیتی را فراهم می‌سازد و دیدگاه بهتری از دینامیک فرسایش بادی ارائه می‌دهد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- احمدی، احمد؛ سکوتی، رضا و خواجه‌ای، ابراهیم. (۱۳۸۴). قرق، استراتژی راهبردی برای تثبیت تپه‌های ماسه‌ای منطقه بورالان استان آذربایجان غربی. اولین همایش ملی فرسایش بادی، یزد.
- احمدی، حسن؛ فیض‌نیا، سادات؛ اختصاصی، محمدرضا و قانع‌ی بافقی، محمدجواد. (۱۳۸۰). منشأ یابی تپه‌های ماسه‌ای جنوب بافق. بیابان، ۶(۲)، ۳۳-۵۰.
- احمدی، حسن. (۱۳۸۵). ژئومورفولوژی کاربردی. جلد ۲، انتشارات دانشگاه تهران.

- احمدی، حسن و مصباح زاده، طیبه. (۱۳۹۰). مقایسه مقادیر توان حمل ماسه برآورد شده به دو روش سرعت‌های لحظه‌ای و روش کلاس‌های سرعت فرابیرگر با استفاده از نرم‌افزار گل ماسه نما (مطالعه موردی: جاسک و کرمان). آب و خاک، ۱۵(۱)، -۱. doi: 10.22067/jsw.v0i0.8500
- حنیفه‌پور، مهین؛ مشهدی، ناصر؛ محمدخان، شیرین و امیر اصلانی، فرشاد. (۱۳۹۳). تعیین جهت بادهای فرساینده با استفاده از ترسیم گل‌باد و گل طوفان (مطالعه موردی: شهرستان دامغان). مجموعه مقالات دومین همایش ملی کویر با رویکرد مدیریت مناطق خشک و بیابانی.
- عباسی، حمیدرضا. (۱۳۹۱). طبقه‌بندی سیستم تپه‌های ماسه‌ای ایران: مورفولوژی و ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی. تهران: موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران.
- صارمی نایینی، محمدعلی. (۱۳۹۵). برآورد فراوانی، سرعت و جهت بادهای فرساینده و مولد طوفان‌های گردوغبار و ریز گرد‌ها در سطح استان یزد با استفاده از تحلیل گلباد، گل طوفان و گل ماسه. مدیریت بیابان، ۴(۸)، ۹۶-۱۰۶.
- صادقی، معصومه؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ اختصاصی، محمدرضا و رجبی، محمدرضا. (۱۳۹۴). تأثیر بادهای فرساینده بر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای دشت سمنان. مهندسی و مدیریت آب‌خیز، ۷(۱)، ۵۳-۶۳. doi: 10.22092/ijwmse.2015.100904
- صمدزاده، رسول و بلادپس، علی. (۱۳۹۱). تحلیل چشم‌اندازهای فرسایش بادی دشت بورالان، گستره‌ای بیابانی در پای کوه‌های آرات با رویکرد آمایش سرزمین. فضای جغرافیایی، ۱۲(۳۸)، ۳۹-۶۰.
- غلامی، حمید؛ احمدی، جواد و نظری سامانی علی‌اکبر. (۱۳۹۴). مطالعه خصوصیات رسوب‌شناسی و شاخص شیمیایی تغییر (CIA) در رسوبات بادی. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۵(۳)، ۱۵-۲۷.
- احمدی، حسن؛ فیض نیا، سادات؛ اختصاصی، محمدرضا و قانع بافقی، محمدجواد. (۱۳۸۰). منشأ یابی تپه‌های ماسه‌ای جنوب بافق. بیابان، ۶(۲)، ۳۳-۵۰.
- محمودی، فرج‌الله. (۱۳۸۱). پراکندگی جغرافیایی ریگزارهای مهم ایران. تهران: موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور.
- گلی، طاهر؛ کاویان، حسام؛ کدخدایی ایلخچی، رحیم و نوری مخوری، احد. (۱۳۹۸). تعیین پارامترهای رسوب‌شناسی و ژئومورفولوژیکی رسوبات تپه‌های ماسه‌ای قوم تپه، شمال غرب تبریز (صوفیان). هیدروژئومورفولوژی، ۱۹(۱۹)، ۳۶-۱۹.
- نگارش، حسین و لطیفی، لیلان. (۱۳۸۷). تحلیل ژئومورفولوژیکی روند پیشروی تپه‌های ماسه‌ای شرق دشت سیستان در خشک‌سالی‌های اخیر. مجله جغرافیا و توسعه، ۶(۱۲)، ۴۳-۶۰. doi: 10.22111/gdij.2008.1242
- یمانی، مجتبی. (۱۳۷۹). ارتباط قطر ذرات ماسه و فراوانی سرعت‌های آستانه باد در منطقه بندریگ کاشان. پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۲(۳۸)، ۱۱۵-۱۳۲.
- مقصودی، مهران؛ یمانی، مجتبی؛ مشهدی، ناصر؛ تقی زاده، مهدی و ذهاب ناطوری، سمیه. (۱۳۹۰). شناسایی منابع ماسه‌های بادی ارگ نوق با استفاده از تحلیل باد و مورفومتری ذرات ماسه. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، ۲۲(۳) (پیاپی ۴۳)، ۱-۱۶.
- خسروشاهی، محمد؛ کاشکی، محمدتقی و انصافی مقدم، طاهره. (۱۳۸۸). قلمرو بیابان‌های اقلیم‌شناسی ایران. تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۶(۱) (پیاپی ۳۴)، ۹۶-۱۱۳.

References

- Abbasi, H. R. (2012). Classification of Iran's sand dune systems: Morphology and physico-chemical characteristics. Forests and Rangelands Research Institute. [in persian]
- Ahmadi, A., Sokouti, R., & Khajei, E. (2005). Grazing exclusion: A strategic approach to stabilize sand dunes in the Buralan region, West Azerbaijan Province. In Proceedings of the First National Conference on Wind Erosion (pp. 101051). Yazd, Iran. [in persian]
- Ahmadi, H. (2006). Applied geomorphology (Vol. 2). Tehran University Press. [in persian]

- Ahmadi, H., & Mesbahzadeh, T. (2011). Comparison of sand transport potential estimated using instantaneous velocities and Freiburger wind speed classes through the Golmaseh-Nama software: Case study of Jask and Kerman. *Journal of Water and Soil*, 25(1). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.8500> [in persian]
- Ahmadi, H., Feyzniya, S., Ekhtesasi, M. R., & Ghaeni Bafghi, M. J. (2001). Origin of sand dunes south of Bafgh. *Desert*, 6(2), 33–50. [in persian]
- Al-Awadhi, J. M., & Al-Dousari, A. M. (2013). Morphological characteristics and development of coastal nabkhas, north-east Kuwait. *International Journal of Earth Sciences*, 102(3), 949–958. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0833-9>.
- Bagnold, R. A. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen. DOI: 10.1007/978-94-009-5682-7
- Belly, P. Y. (1964). *Sand movement by wind*. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Technical Memo 1, Berkeley, CA.
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, TX: Hemphill Publishing Company.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, TX: Hemphill Publishing company.
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3–26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Fryberger, S. G. (1979). Dune forms and wind regime. In E. D. McKee (Ed.), *A study of global sand seas* (pp. 137–169). U.S. Geological Survey Professional Paper 1052.
- Fryberger, S.G., & Dean, G. (1979). Dune forms and wide regimes. In E.D. Mckee. (Ed.), *A Study of Global Sand Seas*(pp.145-169). U. S Geological Survey Professional Paper 1052.
- Fryberger, S.G., & Lettau, H. (1979). Dune forms and wind regimes. In E. D. Mckee. (Ed), *A study of Global Sand Seas*(137-140). U. S. Geological Survey Professional Paper 1052.
- Gholami, H., Ahmadi, J., & Nazari Samani, A. A. (2015). Study of sedimentological characteristics and chemical index of alteration (CIA) in aeolian sediments. *Environmental Erosion Research*, 5(3), 15–27. [in persian]
- Goli, T., Kavian, H., Kadkhodaei Ilkhchi, R., & Nouri Makhouri, A. (2019). Determination of sedimentological and geomorphological parameters of sand dunes in Qom Tapeh, northwest of Tabriz (Soufian). *Hydrogeomorphology*, 5(19), 19–36. [in persian]
- Hanifehpour, M., Mashhadi, N., Mohammadkhan, S., & Amir-Aslani, F. (2014). Determination of erosive wind directions using wind rose and storm rose diagrams: Case study of Damghan County. In *Proceedings of the Second National Conference on Desert Management* (pp. 329554). [in persian]
- Khosrowshahi, M., Kashki, M. T., & Enssafi Moghaddam, T. (2009). Climatic desert boundaries of Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 16(1), 96–113. [in persian]
- Liu, L. Y., Skidmore, E., Hasi, E., Wagner, L., & Tatarko, J. (2005). Dune sand transport as influenced by wind directions, speed and frequencies in the Ordos Plateau, China. *Geomorphology*, 67(3–4), 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.005>
- Ma, A.N. (1993). A wind erosion study by using the landsat images on Taklimakan desert. *Chinese Journal of Arid Land Resources*, 6(4), 301-307. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=4050453>
- Maghsoudi, M., Yamani, M., Mashhadi, N., Taghizadeh, M., & Zehab Nazouri, S. (2011). Identification of sand sources in Erg Noq using wind analysis and sand grain morphometry. *Geography and Environmental Planning*, 22(3), 1–16.
- Mahmoudi, F. (2002). *Geographical distribution of major sand fields in Iran*. Forests and Rangelands Research Institute. [in persian]
- Nazari Samani, A. A., Dadfar, S., & Shahbazi, A. (2013). A Study on Dust Storms Using Wind rose, Storm rose and sand rose (Case Study: Tehran Province). *Desert*, 18(1), 9-18. doi: 10.22059/jdesert.2013.36271. [In Persian]

- Negarash, H., & Latifi, L. (2008). Geomorphological analysis of the advancement of sand dunes east of the Sistan Plain during recent droughts. *Geography and Development*, 6(12), 43–60. <https://doi.org/10.22111/gdij.2008.1242> [in persian]
- Pearce, K. I., & Walker, I. J. (2005). Frequency and magnitude biases in the 'Fryberger' model, with implications for characterizing geomorphically effective winds. *Geomorphology*, 68(1–2), 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.030>
- Sadeghi, M., Karimi Ahmadabad, M., Ekhtesasi, M. R., & Rajabi, M. R. (2015). Effect of erosive winds on the morphology of sand dunes in the Semnan Plain. *Watershed Engineering and Management*, 7(1), 53–63. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.100904> [in persian]
- Samadzadeh, R., & Baladpas, A. (2012). Analysis of wind erosion landscapes in the Buralan Desert, a piedmont region of Mount Ararat, with a land use planning approach. *Geographical Space*, 12(38), 39–60. [in persian]
- Sarmi Naeini, M. A. (2016). Estimation of frequency, velocity, and direction of erosive winds causing dust and sandstorms in Yazd Province using wind rose, storm rose, and sand rose analysis. *Desert Management*, 4(8), 96–106. [in persian]
- Stout, J. E., Warren, A., & Gill, T. E. (2009). Publication trends in aeolian research: An analysis of the Bibliography of Aeolian Research. *Geomorphology*, 105(1–2), 6–17. doi:10.1016/j.geomorph.2008.02.015.
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations General Assembly. <https://sdgs.un.org/goals/goal15>.
- Wang, X., Dong, Z., Liu, L., & Qu, J. (2004). Sand sea activity and interactions with climatic parameters in the Taklimakan Sand Sea, China. *Journal of Arid Environments*, 57(2), 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.10.011>
- Wang, X., Yang, Y., & Dong, Z. (2016). Grain-size characteristics of aeolian sediments and their implications for wind erosion in the Kumtagh Desert, China. *Sedimentology*, 63(6), 1745–1760. <https://doi.org/10.1111/sed.12281>.
- Yamani, M. (2000). Relationship between sand grain diameter and threshold wind speed frequency in the Bandar Rig region of Kashan. *Geographical Research*, 32(38), 115–132. [in persian]
- Yang, Z., Qian, G., Han, Z., Dong, Z., Luo, W., Zhang, Z., Lu, J., Liang, A., & Tian, M. (2019). Variation in grain-size characteristics as a function of wind direction and height in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Desert, China. *Aeolian Research*, 40, 53–64. DOI: 10.1016/j.aeolia.2019.06.004.
- Yaping, S. (2008). *Physics and modeling of wind erosion*. Cologne: Springer. https://www.researchgate.net/publication/51997450_Physics_and_Modelling_Wind_Erosion
- Zhang, C.-L., et al. (2004). Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel. *Soil and Tillage Research*, 75(1), 53–59. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(03\)00159-4](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(03)00159-4)
- Zhang, Z., et al. (2012). Identifying sensitive areas to wind erosion in the Xilingele grassland by computational fluid dynamics modelling. *Ecological informatics*, 8, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.12.002>.
- Zhang, Zh., Dong, Z., & Li, C. (2015). Wind regime and sand transport in chinas Badain Jaran Desert. *Aeolian Research*, 17, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.01.004>.