

Analysis of the effects of human activities and wind characteristics on the morphological and dynamic state of ergs (Case Study: ergs of Sistan and Baluchestan Province)

Mehran Maghsoudi^{1*} , Hamid Ganjaeian²

1. *Corresponding Author, Professor of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: maghsoud@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4973-8327>

2. *PhD. Student of geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran*

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: 17 February 2025 Revised: 23 November 2025 Accepted: 05 December 2025 Published: 21 March 2026</p> <p>Keywords: Dunes, Dune shape, Dune dynamics, Sistan and Baluchestan ergs.</p>	<p>Ergs are a collection of dunes of various shapes and sizes. One of the characteristics of dunes is their active dynamics, which are considered a serious threat to residential areas and human activities. Dunes in Sistan and Baluchestan provinces have high morphological diversity and are dynamically active, which is why this study examined their morphological and dynamic status. This research was based on remote sensing methods and statistical information. In this study, satellite images and statistical information related to the speed and direction of the winds in the region were used as the most important research data. ArcGIS and WRplot software were the most important research tools. In this study, the morphological and dynamic status of dunes was first examined, and then their relationship with the speed and direction of the winds of the region and human activities was analyzed. The results of this study have shown that of the total 1068 square kilometers of the Sistan Dune, about 60 percent of it is covered by simple crescent dunes, and given that the average movement of the dunes of this dune has been between 2 and 90 m (during the years 2005 to 2020), it is therefore dynamically active. In addition, the results of the analysis of the winds of the region have shown that the northern areas of the Sistan Dune have the highest average wind speed, but because the dunes have been fixed by human activities, they have had the least amount of movement, but the dunes of the southern areas have had more movement due to less vegetation cover and the absence of geomorphological barriers.</p>

How to Cite: Maghsoudi, M. and Ganjaeian, H. (2026). Analysis of the effects of human activities and wind characteristics on the morphological and dynamic state of ergs (Case Study: ergs of Sistan and Baluchestan Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 133-154.



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2025.51181.2104

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Dunes are among the factors threatening residential areas. These dunes also move throughout the year and may shift more than 20 meters annually. In many cases, the movement of dunes leads to the destruction of agricultural lands or human infrastructure. Due to their specific morphology, dunes have high tourism potential; however, because of their active dynamics, they are considered a serious threat to human activities. In fact, the movement of dunes, or the sandstorms caused by them, destroys agricultural lands and human infrastructure. A large part of Iran is covered by desert lands, and dunes in Iran are significantly distributed, covering major portions of the central, eastern, southern, and Khuzestan plain regions. Among the dunes in the eastern and southeastern regions of the country are those in Sistan and Baluchestan Province. These dunes consist of several individual dunes. The dunes of Sistan and Baluchestan Province display high morphological diversity and are dynamically active. Moreover, since they are mainly located near residential areas, they are of great importance. Given this significance, the present study examines the movement and shape of the dunes in Sistan and Baluchestan Province and their relationship with the wind conditions of the region.

DATA AND METHODOLOGY

This research was based on remote sensing methods and statistical information. Satellite images and statistical data related to wind speed and direction in the region were used as the primary research inputs. Google Earth software (to delineate the exact area of the dunes and monitor their displacement), ArcGIS (to prepare the required maps), and WRplot (to analyze wind speed and direction in the region) were the main research tools. Considering the subject and objectives, the study was conducted in several stages. In the first stage, the area of the dunes was delineated using Google Earth and Landsat satellite images. In the second stage, to assess the displacement of the dunes, 15 sample points were selected. Based on the displacement of these points during the years 2005 to 2020, a displacement map of the dunes in the study area was prepared using the IDW interpolation method. In the third stage, to analyze the winds in the region, data from nine meteorological stations were used. Based on these data and through the WRplot software, wind speed and direction in the region were evaluated. In this stage, after calculating the average wind speed for different months of the year, a monthly wind speed map of the studied dunes was prepared using the IDW interpolation method. Finally, after analyzing the wind conditions of the region, the effects of wind speed and direction on the morphological and dynamic characteristics of the dunes were evaluated.

RESULTS AND DISCUSSION

The Sistan dunes, with a total area of 1,068 square kilometers, consist of several dunes and are highly diverse in terms of morphology and dynamics. The results of this study have shown that in the Sistan dunes, there are various types of dune shapes, including barchan and barchanoid, simple transverse, compound transverse, and thin to thick sand covers, which indicate the influence of various factors on them (Figure 1). Considering that simple crescentic dunes cover about 60 percent of the total area of the dunes in the region, they are more extensive than other dunes. The results of this study also showed that a large part of the Sistan Dune is dynamically active, such that the dunes of this dune have moved between 2 and 90 meters (during the years 2005 to 2020), with the highest amount of movement, at 90 meters, related to the southern dunes of the region, and the lowest amount of movement, about 2 meters, related to the stabilized dunes around Zabol. Also, the results of the analysis of the speed and direction of the winds in the region have shown that the average wind speed in the Sistan Dune area has been between 5.5 and 22.5 meters per second, and in terms of spatial distribution, the highest average wind speed during different months has been related to the dunes adjacent to the city of Zabol. In terms of wind direction, in the northern areas of the Sistan Dune, the

prevailing wind directions are from the northwest, and in the southern areas of the Sistan Dune, the prevailing wind directions are from the southeast.

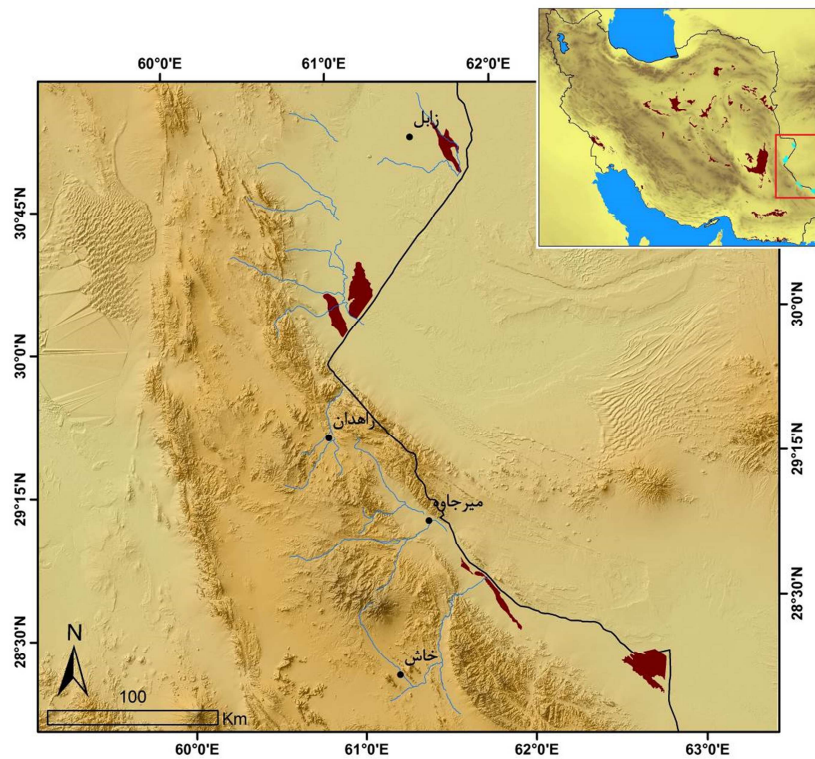


Figure 1: Map of the location of the Sistan ergs

Table 2: Area and percentage area of dunes in Sistan ergs

Row	Type of dunes	Area (km)	percentage of area
1	Barchans & Barchanoids	57.6	5.4
2	Simple Crescentic Ridge	644.4	60.3
3	Simple Crescentic Ridge & Barchans	138.8	13
4	Compound Crescentic Ridge	7.3	0.7
5	Sand Sheet Low Thickness & Barchans	54	5.1
6	Sand Sheet Medium Thickness	4.5	0.4
7	Sand Sheet Medium Thickness & Simple Crescentic Ridge	161.2	15.1

CONCLUSION

The Sistan Dune consists of a series of large and small dunes that cover the border strip of Sistan and Baluchestan provinces. Given the considerable differences in latitude and altitude between the northern and southern regions of this dune, environmental conditions, including wind speed and direction, are not uniform across the area. Moreover, the impact of human factors varies in different parts of the Sistan Dune; for instance, a large portion of the dunes adjacent to Zabol has been stabilized, resulting in minimal influence of winds on these dunes. In contrast, the southern dunes have less vegetation cover, and their morphology has provided favorable conditions for movement. In this study, after calculating wind characteristics, wind speed was evaluated for each dune type. The results showed that the highest average wind speed, 9.3 m/s, occurred in the barchans, followed by the simple transverse dunes, while the lowest, with an average of 7.2 m/s, was associated with the medium-thick

sand cover. Considering that the transverse dunes and barchans of the region exhibited active dynamics during the study period, it can be concluded that differences in wind speed have played a significant role in the morphological and dynamic diversity of the dunes in the region.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the Iran National Science Foundation (INSF) (grant number 98007635).

REFERENCES

References (in Persian)

- Jadidoleslami Ghaleno, M. (2024). Analysis of Aeolian Deposit Processes and their Hazards in Sistan Plain. *Natural Environment Hazards*, 13(42), 71-90. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47555.2014> [In Persian]
- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2024). Classification of ergs around the Kavir plain (Dasht-e Kavir) and the Masileh Playa and assessment of their changes. *Quaternary Journal of Iran*, 10(1, 2), 88-107. <https://doi.org/10.22034/irqua.2025.2054847.1042> [In Persian]
- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Classification and analysis of the morphological and dynamic status of dunes (Case study: Khuzestan Reg). *E.E.R.*, 15(2), 1-19. <http://dx.doi.org/10.61186/jeer.15.2.1> [In Persian]
- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Studying the Distributions and Areas of Sand Dunes in Iran Using Remote Sensing Methods. *Geography and Environmental Planning*, 36(2), 89-112. <https://doi.org/10.22108/gep.2025.145019.1721> [In Persian]
- Maghsoudi, M., Fathollahzadeh, M., & Ganjaeian, H. (2021). Monitoring wind speed changes and their effect on the displacement and changes of dunes in the Lut Sand Dunes. *Sepehr*, 30(118), 113-126. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246137> [In Persian]
- Maghsoudi, M., Ganjaeian, H., & Hoseini, S. (2018). Evaluating the Effectiveness of Supervised and Unsupervised Classification Methods in Monitoring Regs (Case Study: Jazmourian Reg). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 9(32), 81-92. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161472.html [In Persian]
- Mamaghani, A., Zare Ahmadabad, M., Maghsoudi, M. (2019). Determining the origin of wind-blown sands using mineralogy and morphoscopy of sand grains (Case study: Teph Soufian tribe - north of Lake Urmia). *Geography and Environmental Hazards*, 8 (3), 77-95. <https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81703> [In Persian]
- Mashhadi, N., 2024. Morphodynamics of dunes and wind patterns (case study: New erg and Young, South-East of Qom). *Geography and Environmental Hazards*, 13 (1), 338-317. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.76706.1227> [In Persian]
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghaysarian, S.S., & Ebrahimi, A. (2025). Identifying dust centers and analyzing the factors affecting their occurrence based on remote sensing data (Case study: Southwest Iran). *Geography and environmental hazards*, 13(4), 386-405. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.89088.1504> [In Persian]
- Rabbani, A., Mohseni, N., & Hosseinzadeh, R. (2019). Studying the role of geomorphic processes in the morphology of semi-arid deserts. *Geography and Environmental Hazards*, 9 (36), 105-93. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.68982.1021> [In Persian]
- Sadeghi Ravesh, M. (2018). Analysis of wind erosion and determination of sand movement direction in the Khezrabad region. *Watershed Engineering and Management* 10 (1), 95-107. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2017.108120.1216> [In Persian]
- Sharifi Pichun, M., Omidvar, K., & Miri, Z. (2019). Studying the morphology of dunes and their correlation with wind data in the Rig Zarrin region. *Geographical Explorations of Desert Areas*, 8 (1), 1-27. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1399.8.1.1.6> [In Persian]

References (in English)

- Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., Tsoar, H. (2012). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. *June 2012 Climatic Change*, 112(3), 1-23. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0264-9>
- Blasco, J. M.D., Chini, M., Verstraeten, G., & Hanssen, R.F. (2020). Sand Dune Dynamics Exploiting a Fully Automatic Method Using Satellite SAR Data. *Remote Sensing* 12 (22), 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs12233993>

- Dammala, P.K., Kolli, S., Garaga, R., Reddy, K.R., Kumar, P. (2025). Aeolian sand dune fixation – critical review of measures, challenges, and future perspectives with a case study on Thar Desert. *CATENA*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108786>
- Fryberger, S.G. (1979). Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (Ed.), *A Study of Global Sand Seas. Geological Survey Professional Paper*, 137–169. <https://www.researchgate.net/publication/349216893>
- Lancaster, N. (2009). Dune morphology and dynamics. In: Parsons A J, Abrahams AD (eds) *Geomorphology of desert environments. Springer*, 824 P. https://10.0.3.239/978-1-4020-5719-9_18
- Lancaster, N., 1995. *The Geomorphology of Desert Dunes*. Routledge, London, 290 P. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203413128>
- Liu, H., Xiao, Z., Zheng, X., 2024. A trans-scale simulation of aeolian sand flow – dune – dune field based on actual environmental wind field. *Geomorphology*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109358>
- Maghsoodi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Aeolian Geomorphology of Ergs and Dunefields in Iran. *Desert*, 30(1), 41-66. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.102461>
- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). The Morphology and Morphodynamics of Aeolian Landforms in the Jazmurian Erg: An Analysis of Environmental Controls. *Desert Ecosystem Engineering*, 14(48), 111-127. <https://doi.org/10.22052/deej.2025.257208.1113>
- Maghsoudi, M., Navidfar, A., & Mohammadian, A. (2017). The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data. *Natural Environment Change*, 3(1), 33-43. <https://doi.org/10.22059/jnec.2017.225011.62>
- Qian, G., Yang, Z., Xuegang, X., Dong, Z., & Guo, Y. (2024). Seasonal morphological evolution and migration of granule ripples in the Sanlongsha Dune Field, northern Kumtagh Sand Sea, China. *Geomorphology*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108951>
- Sparavigna, A.C. (2013). A Study of Moving Sand Dunes by Means of Satellite Images. *International Journal of Sciences* 2, 33-42. <https://doi.org/10.18483/ijSci.229>
- Sun, W., Gao, X. (2022). Geomorphology of sand dunes in the Taklamakan Desert based on ERA5 reanalysis data. *Journal of Arid Environments*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104848>
- Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., & Chen, G. (2002). Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 42(3-4), 183-195. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00085-X)
- Wiggs, G.F.S., Atherton, R.J., & Baird, A.J. (2004). Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values. *Sedimentology* 51 (1), 95-108. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00613.x>
- Zhang, G.F., Molina, C.A., Shi, P., Lin, D., Jose A., Feng Kong, G., & Chen, D. (2019). Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China (1982–2016). *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 102- 115. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.039>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

تحلیل تاثیر فعالیتهای انسانی و خصوصیات باد بر وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگزارها (مطالعه موردی: ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان)

مهران مقصودی^{۱*}، حمید گنجائیان^۲

۱. استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: maghsoud@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4973-8327>

۲. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>ریگزارها به مجموعه‌ای از تپه‌های ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در شکل و اندازه‌های مختلفی هستند. یکی از خصوصیات ریگزارها، دینامیک فعال آن‌ها است که به‌عنوان یک تهدید جدی برای نواحی سکونتگاهی و فعالیتهای انسانی محسوب می‌شود. ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان دارای تنوع مورفولوژی بالایی هستند و از نظر دینامیکی نیز وضعیت فعالی دارند، به همین دلیل در این پژوهش به بررسی وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی آن‌ها پرداخته شده است. این تحقیق بر مبنای روش‌های سنجش از دوری و اطلاعات آماری بوده است. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات آماری مربوط به سرعت و جهت بادهای منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. همچنین نرم‌افزارهای ArcGIS و WRplot، مهم‌ترین ابزارهای تحقیق بوده است. در این تحقیق ابتدا به بررسی وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای پرداخته شده است و سپس ارتباط آن با سرعت و جهت بادهای منطقه و همچنین فعالیتهای انسانی تحلیل شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که از مجموع ۱۰۶۸ کیلومترمربع ریگ سیستان، حدود ۶۰ درصد از آن را تپه‌های ماسه‌ای عرضی ساده دربرگرفته است و با توجه به اینکه میانگین حرکت تپه‌های ماسه‌ای این ریگ بین ۲ تا ۹۰ متر (در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) بوده است، بنابراین از نظر دینامیکی نیز دارای وضعیت فعالی است. همچنین نتایج آنالیز بادهای منطقه نشان داده است که در مناطق شمالی ریگ سیستان دارای بالاترین میانگین سرعت باد هستیم ولی به دلیل اینکه تپه‌های ماسه‌ای توسط فعالیتهای انسانی تثبیت شده است، دارای کم‌ترین میزان حرکت بوده‌اند اما تپه‌های ماسه‌ای مناطق جنوبی به دلیل پوشش گیاهی کم‌تر و نبود موانع ژئومورفولوژیکی، دارای حرکت بیش‌تری بوده‌اند.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: تپه‌های ماسه‌ای، شکل تپه‌های ماسه‌ای، دینامیک تپه‌های ماسه‌ای، ریگزارهای سیستان و بلوچستان.</p>

استناد: مقصودی، مهران و گنجائیان، حمید. (۱۴۰۵). تحلیل تاثیر فعالیتهای انسانی و خصوصیات باد بر وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگزارها (مطالعه موردی: ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵(۴۷)، ۱۳۳-۱۵۴.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.51181.2104



مقدمه

یکی از عوارض قابل توجه مناطق خشک و نیمه‌خشک، ریگزارها هستند (مقصودی^۱ و همکاران، ۲۰۱۷؛ ممقانی و همکاران، ۱۳۹۸). ریگزارها به مجموعه‌ای از تپه‌های ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در شکل و اندازه‌های مختلفی هستند. تپه‌های ماسه‌ای دارای دینامیک فعالی هستند و به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی طوفان‌های گردوغبار محسوب می‌شوند (وانگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویگز^۳ و همکاران، ۲۰۰۴؛ بالاسکو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به فعالیت و همچنین نقش مهمی که تپه‌های ماسه‌ای در ایجاد طوفان‌های گردوغبار دارند (ژانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کیان^۶ و همکاران، ۲۰۲۴)، ریگزارها از جمله عوامل تهدیدکننده نواحی سکونتگاهی محسوب می‌شوند (مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۴). همچنین تپه‌های ماسه‌ای آن‌ها در طول سال دارای حرکت هستند و ممکن است تا سالانه تا بیش از ۲۰ متر نیز جابجا شوند. در واقع، تپه‌های ماسه‌ای پس از تشکیل در جهت حرکت باد جابجا می‌شوند. به این ترتیب که باد ذرات ماسه را از سمت مقابل خود به طرف بالا و جلو می‌راند و پس از رسیدن به قله (نقطه قرار) در سمت دیگر به پایین می‌افتد. تکرار این عمل به تدریج موجب جابجایی تپه می‌شود (مقصودی و همکاران، ۱۴۰۰). در بسیاری از مواقع، جابجایی تپه‌های ماسه‌ای باعث تخریب اراضی کشاورزی و یا زیرساخت‌های انسانی می‌شود. ریگزارها با توجه به مورفولوژی خاصی که دارند، پتانسیل‌های گردشگری بالایی دارند ولی به دلیل دینامیک فعالی که دارند، به‌عنوان یک تهدید جدی برای فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شوند. در واقع، حرکت تپه‌های ماسه‌ای و یا طوفان‌های ماسه‌ای ناشی از آن‌ها، باعث تخریب اراضی کشاورزی و زیرساخت‌های انسانی می‌شود.

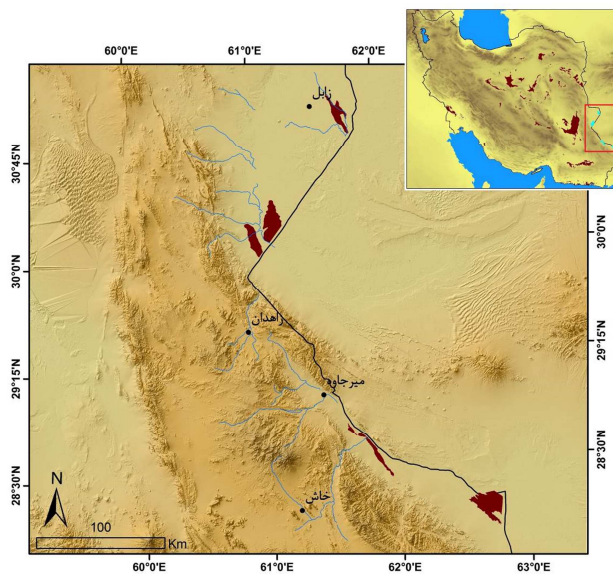
با توجه به اینکه بخش زیادی از وسعت ایران را اراضی بیابانی در بر گرفته است (نگهبان و همکاران، ۱۴۰۳)، ریگزارها در ایران نیز دارای پراکنش قابل توجهی هستند و بخش قابل توجهی از مناطق مرکزی، شرق، جنوب و جلگه خوزستان را دربر گرفته‌اند. از جمله ریگزارهای مناطق شرق و جنوب شرقی کشور، ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان است. این ریگزارها از چندین ریگ منفرد تشکیل شده است. ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان دارای تنوع مورفولوژی بالایی هستند و از نظر دینامیکی نیز وضعیت فعالی دارند. همچنین با توجه به اینکه عمدتاً در نزدیکی نواحی سکونتگاهی قرار دارند، دارای اهمیت بالایی هستند. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به بررسی وضعیت حرکت و شکل تپه‌های ماسه‌ای ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان و ارتباط آن با وضعیت بادهای منطقه پرداخته شده است.

در ارتباط با وضعیت مورفولوژی و دینامیک ریگزارها تحقیقات مختلفی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به اسپاروینگا^۷ (۲۰۱۳) اشاره کرد که به ارزیابی وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در بیابان آریزونا پرداخته است. اشکندی^۸ و همکاران (۲۰۱۴) وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای و عوامل موثر در آن را در بیابان‌های کالاهاری و استرالیا را مورد ارزیابی قرار دارند. سان و ژاو^۹ (۲۰۲۲) به تحلیل نقش عوامل محیطی در شکل تپه‌های ماسه‌ای

1. Maghsoudi
2. Wang
3. Wiggs
4. Blasco
5. Zhang
6. Qian
7. Sparavigna
8. Ashkenazy
9. Sun & Gao

بیابان تاکلاماکان پرداختند. لیو^۱ و همکاران (۲۰۲۴) به شبیه‌سازی تاثیرات باد بر حرکت تپه‌های ماسه‌ای پرداختند. دامالا^۲ و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای بیابان تار و همچنین ارائه راهکارهای کنترل آن پرداختند. در ایران نیز صادقی‌روش (۱۳۹۷) به ارزیابی تاثیر باد بر حرکت تپه‌های ماسه‌ای در منطقه خضراآباد پرداخته است. مقصودی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی کارایی روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده در پایش ریگزارهای جازموریان پرداختند. شریفی پیچون و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن با داده‌های باد در منطقه ریگ زرین پرداختند. ربانی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی نقش فرایندهای ژئومورفیک در مورفولوژی نیکاهای مناطق نیمه‌خشک پرداختند. مشهدی و همکاران (۱۴۰۳) به تحلیل نقش خصوصیات باد بر وضعیت مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای جنوب شرق قم پرداختند. بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که در بیش‌تر تحقیقات به پایش میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و همچنین ارتباط آن با وضعیت بادهای منطقه پرداخته شده است. در این تحقیق علاوه بر پایش وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن با بادهای منطقه، با استفاده از یک الگوی بومی، به طبقه‌بندی شکل تپه‌های ماسه‌ای منطقه نیز پرداخته شده است.

موقعیت ریگزارهای سیستان و بلوچستان: ریگزارهای سیستان و بلوچستان از جمله ریگزارهای ایران است که از چند ریگ کوچک و بزرگ تشکیل شده است (مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۴). ریگزارهای سیستان از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده استان سیستان و بلوچستان و شهرستان‌های هیرمند، زهک، زابل، زاهدان، خاش و سراوان قرار دارند (شکل ۱). این ریگزارها دارای ۱۰۶۸ کیلومتر مربع وسعت و همچنین حدود ۴۹۵ کیلومتر محیط هستند و همچنین در یک روند کلی به‌صورت کشیده مناطق شرقی و نوار مرزی سیستان و بلوچستان را دربر گرفته‌اند. بخش‌های شمالی این ریگزار از نظر ارتفاعی در طبقه ارتفاعی کم‌تر از ۵۰۰ متر و بخش‌های جنوبی آن در طبقه ارتفاعی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از سطح دریا قرار دارند. این ریگزار از ۵ ریگ تشکیل شده است که ریگ جنوبی آن با مساحت حدود ۳۳۴ کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین ریگ آن محسوب می‌شود.

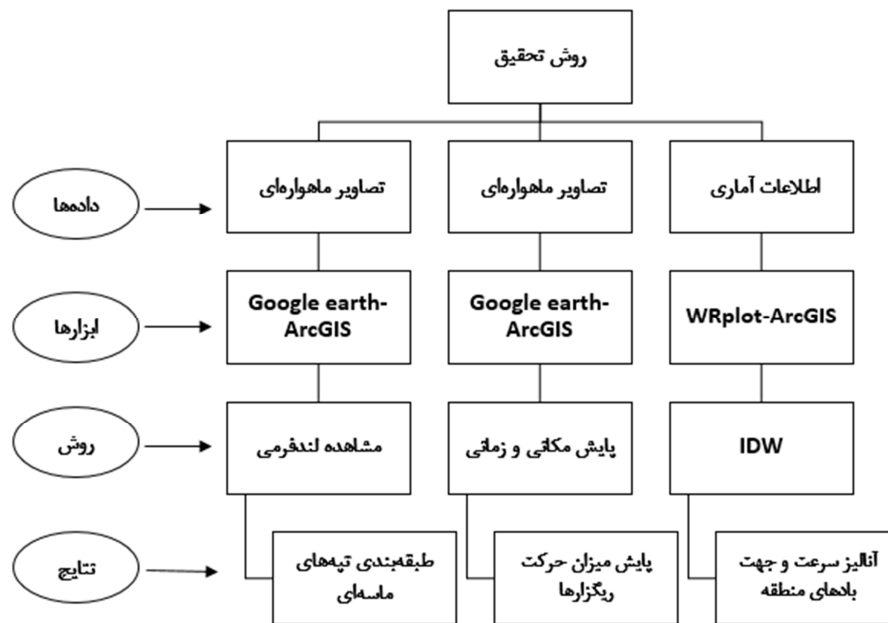


شکل ۱: نقشه موقعیت ریگ‌های سیستان

1. Liu
2. Damala

داده‌ها و روش‌ها

این تحقیق بر مبنای روش‌های سنجش از دوری و اطلاعات آماری بوده است. در این تحقیق از تصاویر گوگل ارث و اطلاعات آماری مربوط به سرعت و جهت بادهای منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. همچنین نرم‌افزارهای گوگل ارث (به‌منظور ترسیم محدوده دقیق ریگزارها و پایش میزان جابجایی آن‌ها)، ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر) و WRplot (به‌منظور آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه)، مهم‌ترین ابزارهای تحقیق بوده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است (شکل ۲) که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:



شکل ۲: فلوچارت روش تحقیق

-مرحله اول (طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای): در این مرحله با استفاده از تصاویر گوگل ارث، محدوده ریگزارها ترسیم شده است. در ادامه بر مبنای مطالعات پیشین (فرایبرگر^۱، ۱۹۷۹؛ لنکستر^۲، ۱۹۹۵ و لنکستر، ۲۰۰۹؛ مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۳) و با توجه به وضعیت مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای، ریگزارهای منطقه از نظر شکل به طبقات مختلفی تقسیم شده است. پس از طبقه‌بندی از نظر شکل، با توجه به وضعیت فعالیت تپه‌های ماسه‌ای، ریگزارهای منطقه به ۳ دسته فعال، نیمه فعال و غیرفعال تقسیم شده است.

-مرحله دوم (پایش میزان حرکت ریگزارها): در این مرحله به‌منظور ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای، از نقاط نمونه (۱۵ نقطه نمونه) استفاده شده است و بر مبنای وضعیت جابجایی نقاط نمونه در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰، با استفاده از روش درونیایی IDW، نقشه میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در محدوده ریگزارهای مورد مطالعه تهیه شده است.

-مرحله سوم (آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه): در این پژوهش به منظور آنالیز بادهای منطقه، از اطلاعات ۹ ایستگاه هواشناسی استفاده شده است (جدول ۱) و بر اساس آنها و با استفاده از نرم‌افزار WRplot، وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه ارزیابی شده است. در این مرحله پس از محاسبه میانگین سرعت باد در ماه‌های مختلف سال، با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه سرعت باد ماهانه در ریگزارهای مورد مطالعه تهیه شده است. پس از آنالیز وضعیت بادهای منطقه، به تحلیل تاثیرات سرعت و جهت بادهای منطقه در وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگزارهای منطقه پرداخته شده است. آنالیز وضعیت بادهای منطقه در طی سال‌های مختلف بیانگر پایداری و قابلیت تعمیم آن به دوره‌های بعدی است. بنابراین، عدم انطباق دوره زمانی مربوط به اطلاعات آماری باد و اطلاعات زمانی تصاویر ماهواره‌ای نمی‌تواند موجب کاهش اطمینان نتایج گردد. همچنین لازم به ذکر است که فقدان داده‌های جامع (شامل سرعت و جهت روزانه باد ایستگاه‌های مورد مطالعه) از جمله محدودیت‌های این تحقیق محسوب می‌شود.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دوره آماری
۱	نهبندان	۶۰° ۰۲'	۳۱° ۳۲'	۱۹۸۶-۲۰۱۳
۲	دهسلم	۵۹° ۱۹'	۳۱° ۱۲'	۲۰۱۲-۲۰۱۳
۳	زابل	۶۱° ۲۹'	۳۱° ۰۲'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۴	زهک	۶۱° ۴۱'	۳۰° ۵۴'	۱۹۹۲-۲۰۰۳
۵	نصرت آباد	۶۰° ۰۱'	۲۹° ۵۳'	۲۰۰۰-۲۰۰۳
۶	زاهدان	۶۰° ۵۳'	۲۹° ۲۸'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۷	خاش	۶۱° ۱۳'	۲۸° ۱۳'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۸	ایرانشهر	۶۰° ۱۲'	۲۷° ۱۲'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۹	سراوان	۶۲° ۲۰'	۲۷° ۲۰'	۱۹۸۲-۲۰۰۳

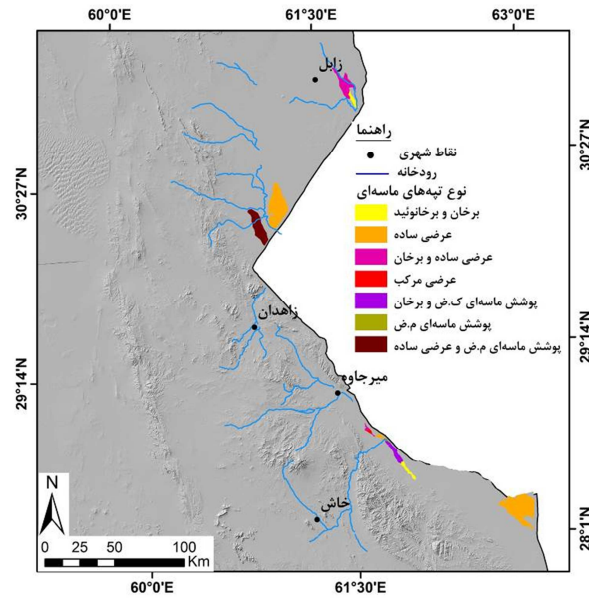
نتایج و بحث

طبقه‌بندی ریگ سیستان

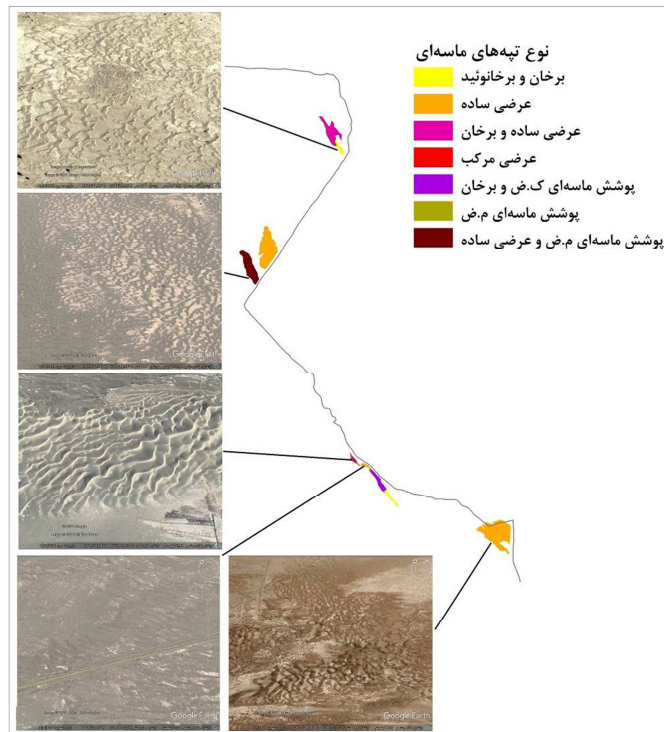
موقعیت ریگزار سیستان و خصوصاً وسعت آن سبب شده است تا این ریگزار نسبت به ریگ جازموربان و لوت از تنوع کم‌تری برخوردار باشد. در این پژوهش، پس از شناسایی ریگزارها و ترسیم محدوده آنها، دو نوع طبقه‌بندی صورت گرفته است. ابتدا با توجه به شکل ظاهری به ۷ دسته تقسیم شده‌اند و در ادامه با توجه به میزان فعالیت که در طی سال‌های اخیر داشته‌اند به ۲ دسته فعال و نیمه‌فعال تقسیم شده‌اند.

الف) طبقه‌بندی ریگزارها بر اساس شکل ظاهری: ریگ سیستان در جنوب شرقی ایران واقع شده و بخش زیادی از مساحت آن در نوار مرزی استان سیستان و بلوچستان گسترش یافته است. در این پژوهش، بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث، ریگزارهای خوزستان از نظر شکل ظاهری به ۷ طبقه برخان و برخانئید، عرضی ساده، عرضی ساده و برخان، عرضی مرکب، پوشش ماسه‌ای کم ضخامت و برخان، پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده تقسیم شده است. لازم به ذکر است که ضخامت تپه‌های ماسه‌ای بر مبنای تصاویر گوگل ارث مشخص شده است و مناطقی که ماسه‌ها به صورت بادرفتی و لایه‌ای نازک هستند، به‌عنوان

کم‌ضخامت در نظر گرفته شدند و مناطقی که دارای ضخامت مشخصی در حد تپه‌های ماسه‌ای هستند، به‌عنوان تپه‌های ماسه‌ای با ضخامت متوسط در نظر گرفته شدند. بررسی وضعیت پراکنش شکل ریگزارهای سیستان بیانگر این است که بخش زیادی از این ریگزار را تپه‌های عرضی ساده دربرگرفته است (شکل ۳ و ۴).



شکل ۳: نقشه طبقه‌بندی ریگ سیستان

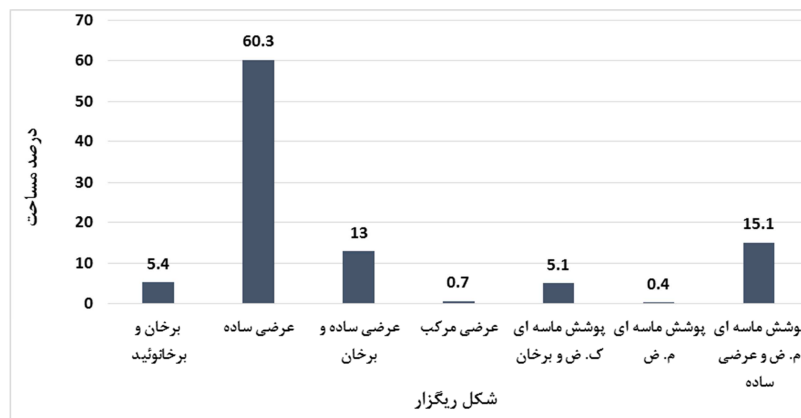


شکل ۴: نحوه طبقه‌بندی ریگ سیستان

در جدول ۲ و شکل ۵ مساحت و درصد مساحت طبقات نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، بخش زیادی از مساحت ریگ سیستان را تپه‌های ماسه‌ای عرضی ساده دربرگرفته است، به طوری که این تپه‌ها ۶۴۴/۴ کیلومترمربع (معادل ۶۰/۳ درصد از کل مساحت ریگ سیستان) از این ریگزار را شامل می‌شود. همچنین تپه‌های عرضی ساده در ترکیب با برخان و پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت به ترتیب ۱۳۸/۸ (معادل ۱۳ درصد از کل مساحت ریگ سیستان) و ۱۶۱/۲ (معادل ۱۵/۱ درصد از کل مساحت ریگ سیستان) کیلومترمربع وسعت دارند.

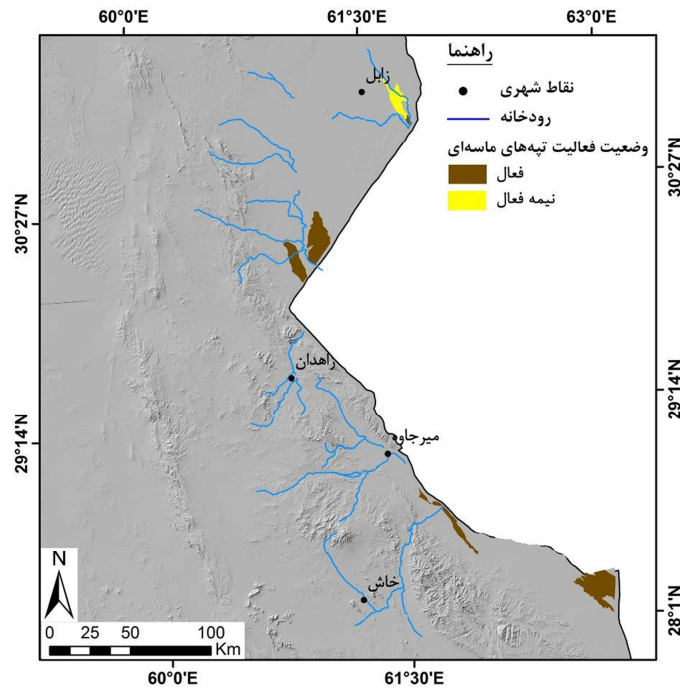
جدول ۲: مساحت و درصد مساحت طبقات تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان

ردیف	نوع تپه‌های ماسه‌ای	مساحت	درصد مساحت
۱	برخان و برخانوئید	۵۷/۶	۵/۴
۲	عرضی ساده	۶۴۴/۴	۶۰/۳
۳	عرضی ساده و برخان	۱۳۸/۸	۱۳
۴	عرضی مرکب	۷/۳	۰/۷
۵	پوشش ماسه‌ای کم ضخامت و برخان	۵۴	۵/۱
۶	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت	۴/۵	۰/۴
۷	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده	۱۶۱/۲	۱۵/۱



شکل ۵: نمودار مساحت و درصد مساحت طبقات تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان

ب) طبقه‌بندی ریگ سیستان بر اساس فعالیت: بررسی وضعیت فعالیت ریگ سیستان بیانگر این است که بخش زیادی از تپه‌های ماسه‌ای این ریگزار در طی سال‌های اخیر با تغییرات زیاد مواجه شده‌اند، بنابراین در بررسی کلی ریگزارها این منطقه، این مناطق به عنوان مناطق فعال در نظر گرفته شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه نهایی تهیه شده از وضعیت فعالیت ریگ سیستان، به جز بخش‌هایی از مناطق شمالی این ریگ که به صورت نیمه فعال (جابجایی کمتر از ۱۰ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) است، سایر مناطق آن در وضعیت فعال (جابجایی بیش‌تر از ۱۰ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) قرار دارد.



شکل ۶: نقشه طبقه‌بندی ریگ سیستان بر اساس وضعیت فعالیت

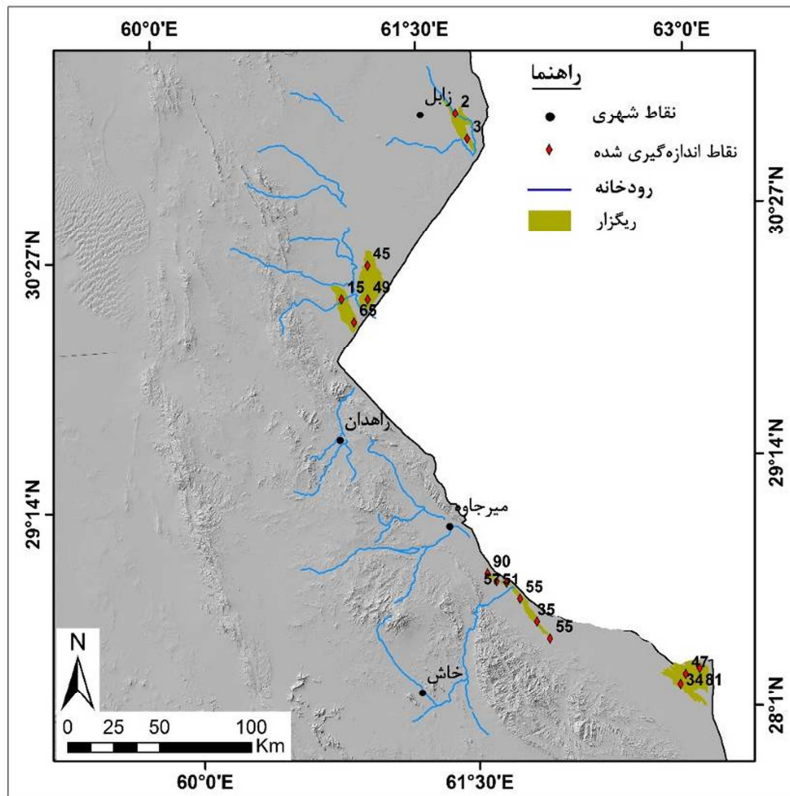
پایش تغییرات ریگ سیستان

به منظور پایش میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ سیستان از ۱۵ نقطه نمونه استفاده شده است (جدول ۳ و شکل ۷) و سپس با استفاده از روش درونیایی IDW، نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان تهیه شده است (شکل ۸). بر اساس نقشه تهیه شده، تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان بین ۲ تا ۹۰ متر (در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) حرکت داشته است که بیش‌ترین میزان حرکت با ۹۰ متر، مربوط به برخان‌های جنوبی منطقه و کم‌ترین میزان حرکت نیز با حدود ۲ متر مربوط به تپه‌های تثبیت شده اطراف زابل بوده است.

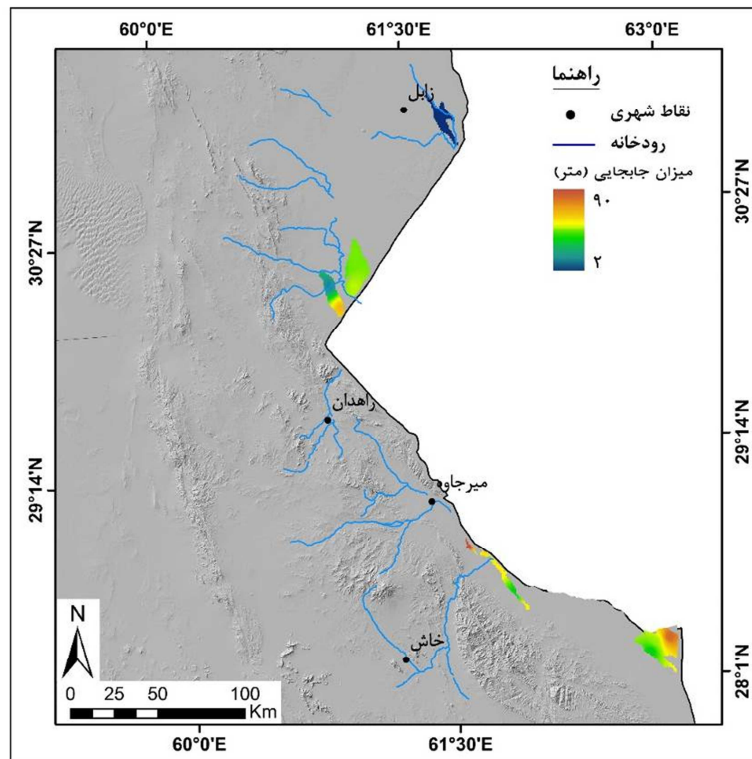
جدول ۳: موقعیت نقاط نمونه برداری شده و میزان جابجایی آن‌ها در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میزان جابجایی (متر)
۱	۶۱° ۴۱' ۳۶"	۳۱° ۰۱' ۲۵"	۲
۲	۶۱° ۴۴' ۴۶"	۳۰° ۵۳' ۴۱"	۳
۳	۶۱° ۰۶' ۵۷"	۳۰° ۱۹' ۴۷"	۴۵
۴	۶۱° ۰۵' ۵۵"	۳۰° ۱۰' ۱۱"	۴۹
۵	۶۰° ۵۷' ۲۱"	۳۰° ۱۰' ۳۲"	۱۵
۶	۶۱° ۰۰' ۵۷"	۳۰° ۰۳' ۲۰"	۶۵
۷	۶۱° ۳۷' ۴۷"	۲۸° ۴۷' ۱۶"	۹۰
۸	۶۱° ۴۰' ۳۲"	۲۸° ۴۴' ۲۰"	۵۱
۹	۶۱° ۴۳' ۴۰"	۲۸° ۴۳' ۲۹"	۵۷
۱۰	۶۱° ۴۷' ۳۱"	۲۸° ۳۸' ۳۷"	۵۵
۱۱	۶۱° ۵۲' ۴۸"	۲۸° ۳۱' ۱۲"	۳۵

۵۵	۲۸° ۲۶' ۱۳"	۶۱° ۵۶' ۳۱"	۱۲
۳۴	۲۸° ۰۹' ۳۰"	۶۲° ۳۷' ۳۸"	۱۳
۴۷	۲۸° ۱۲' ۱۳"	۶۲° ۳۹' ۴۷"	۱۴
۸۱	۲۸° ۱۳' ۳۸"	۶۲° ۴۴' ۳۸"	۱۵

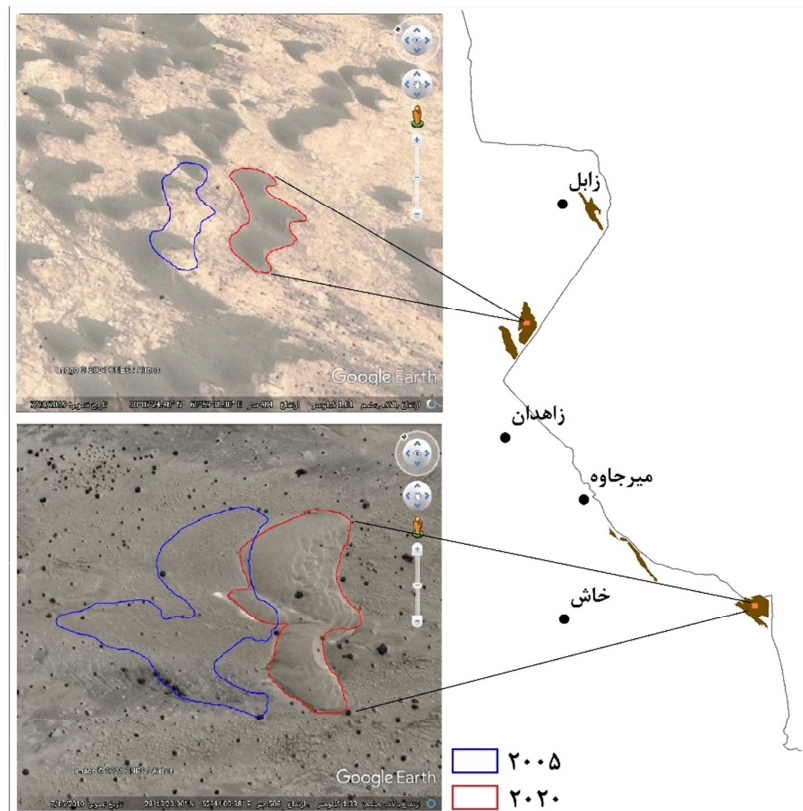


شکل ۷: نقشه موقعیت نقاط نمونه برداری در ریگ سیستان



شکل ۸: نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ سیستان

بر اساس نتایج بدست آمده، در یک روند کلی، میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان از سمت شمال به سمت جنوب افزایش یافته است. در این بخش به منظور بررسی نمونه‌ای از تغییرات صورت گرفته، دو تپه ماسه‌ای منفرد در بخش‌های میانی و جنوبی ریگ سیستان انتخاب و میزان جابجایی آن‌ها در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ پایش شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از ارزیابی تصاویر گوگل ارث (۹)، تپه ماسه‌ای شمال زاهدان در طی دوره زمانی مورد مطالعه حدود ۶۰ متر جابجایی داشته است و همچنین تپه ماسه‌ای جنوبی نیز در طی دوره زمانی حدود ۸۵ متر جابجایی داشته است.



شکل ۹: محدوده تپه‌های ماسه‌ای مورد مطالعه در طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰

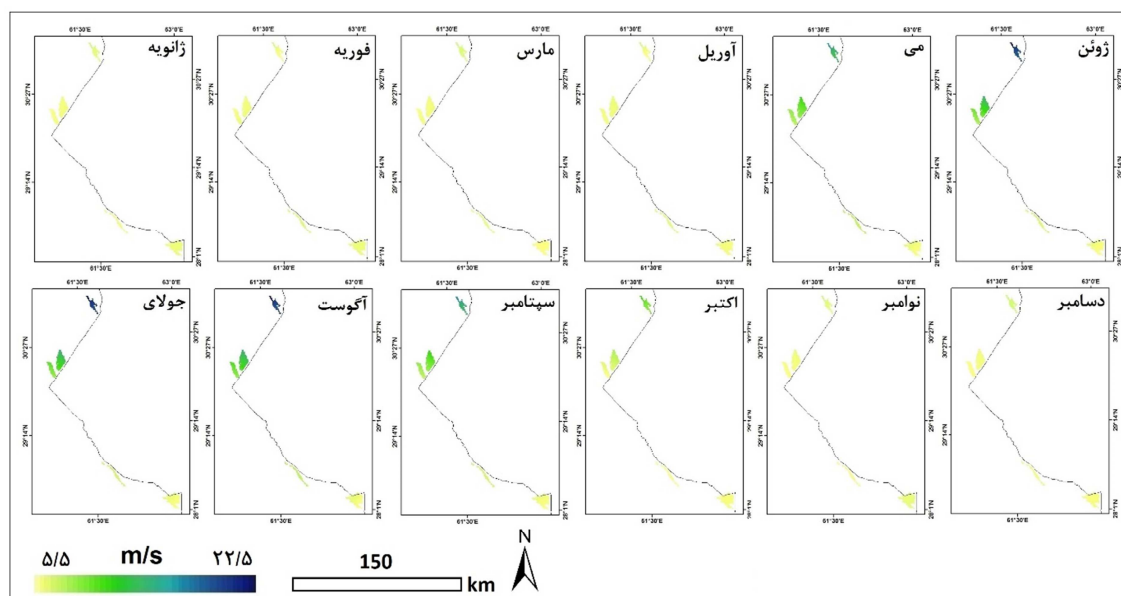
آنالیز بادهای منطقه

در این پژوهش به منظور وضعیت دینامیک ریگ سیستان از اطلاعات ۱۲ ایستگاه هواشناسی مجاور این ریگ استفاده شده است. بررسی موقعیت ایستگاه‌ها بیانگر این است که ایستگاه‌های نهبندان، دهسلم، شهداد، کرمان، لاله‌زار، بم، جیرفت، کهنوج، ایرانشهر، خاش، زاهدان و نصرت آباد در مجاورت ریگ سیستان قرار دارند که در ادامه به تشریح وضعیت گلباد و گلماسه این ایستگاه‌ها پرداخته شده است.

الف) سرعت ماهانه باد: در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت سرعت باد در منطقه، ابتدا میانگین سرعت باد در طی دوره‌های زمانی مختلف محاسبه شده است (جدول ۴). پس از انجام محاسبات و تهیه اطلاعات لازم، با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه سرعت باد ماهانه در محدوده ریگ سیستان تهیه شده است (شکل ۱۰). بر اساس نقشه‌های مذکور، میانگین سرعت باد در محدوده ریگ سیستان بین ۵/۵ تا ۲۲/۵ متر بر ثانیه بوده است که از نظر پراکنش مکانی، بالاترین میانگین سرعت باد در طی ماه‌های مختلف مربوط به ریگزارهای مجاور شهر زابل بوده است و کم‌ترین میانگین سرعت نیز در محدوده ریگزارهای جنوبی سیستان بوده است. همچنین از نظر پراکنش زمانی نیز بالاتری میانگین سرعت با میانگین بین ۷/۸ تا ۲۲/۵ متر بر ثانیه مربوط به ماه جولای و کم‌ترین میانگین سرعت نیز با میانگین ۵/۹ تا ۷/۱ متر بر ثانیه مربوط به ماه دسامبر بوده است.

جدول ۴: میانگین سرعت باد ماهانه ایستگاه‌های مجاور ریگ سیستان

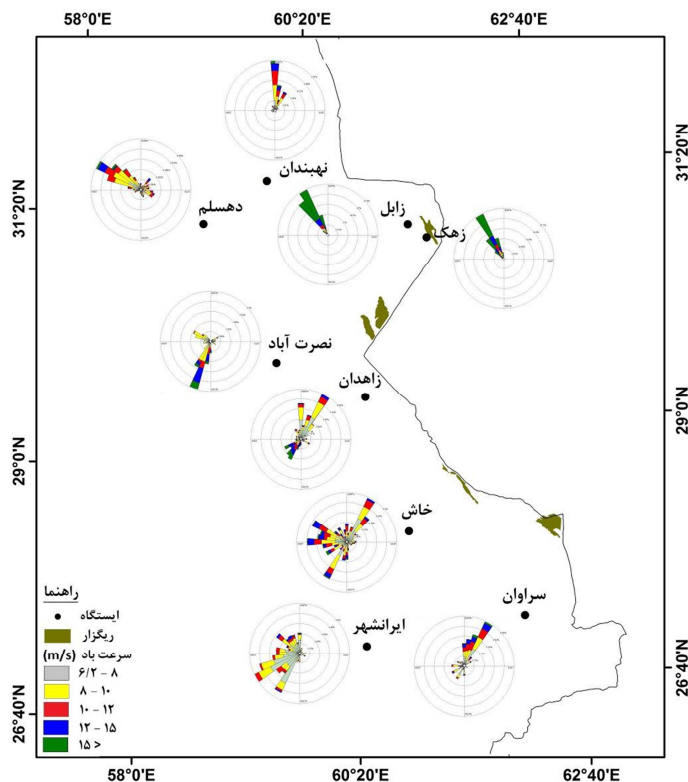
ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
نهبندان	۳/۸	۴/۱	۴	۴	۴/۴	۵/۶	۷/۳	۶/۵	۶/۱	۴/۳	۳/۸	۳/۶	۵/۱
دهسلم	۵/۱	۵/۳	۵/۴	۴/۷	۵/۱	۵/۳	۵/۴	۳/۹	۴/۴	۳/۸	۴	۳/۹	۴/۹
زابل	۷/۸	۹	۸/۸	۹/۲	۱۵	۲۰	۲۴/۶	۲۲	۱۸	۱۰/۴	۸/۵	۷/۲	۱۳/۴
زهک	۶/۷	۷/۱	۸	۶/۱	۱۰/۷	۱۵/۶	۱۹/۷	۱۶/۸	۱۳	۷/۶	۶/۳	۷	۱۰/۲
نصرت آباد	۴/۱	۴/۳	۴/۵	۵/۱	۵/۵	۵/۹	۴/۶	۴/۸	۵	۳/۷	۳/۹	۵/۱	۴/۶
زاهدان	۷/۱	۸/۶	۸/۶	۶/۷	۶/۸	۷/۲	۷/۷	۶/۶	۵/۵	۴/۴	۵/۲	۶/۳	۶/۸
خاش	۶/۶	۸/۵	۸/۲	۷/۵	۸	۸/۳	۸/۴	۸	۷/۱	۵/۴	۵/۷	۶/۳	۷/۳
ایرانشهر	۶/۲	۶/۵	۶/۹	۶/۸	۶/۹	۷/۴	۷/۸	۷/۵	۷/۳	۵/۷	۵/۴	۵/۸	۶/۷
سراوان	۶/۷	۷/۵	۷/۳	۶/۳	۶/۴	۷/۶	۷/۲	۶/۱	۵/۸	۵/۵	۶/۷	۶/۱	۶/۶



شکل ۱۰: نقشه‌های دورنیایی سرعت باد ماهانه محدوده ریگ سیستان

ب) سرعت باد و تداوم آن: با توجه به اینکه سرعت و تداوم سرعت باد به عنوان عامل اصلی در حرکت تپه‌های ماسه‌ای محسوب می‌شود، در این بخش به بررسی وضعیت بادهای با سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه (سرعت آستانه فرسایش بادی) در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است (جدول ۵). بر اساس نتایج حاصله، در ایستگاه نهبندان ۳۵/۳ درصد از بادهای دارای سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه هستند که این میزان در ایستگاه دهسلم ۶۹، در ایستگاه زابل ۶۲/۹، در ایستگاه زهک ۵۶/۵، در ایستگاه نصرت آباد ۱۶/۸، در ایستگاه زاهدان ۵۷، در ایستگاه خاش

جنوب	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	نصرت
غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	آباد
شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	زاهدان
شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	
جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	شمال	شمال	شمال	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	خاش
غرب	غرب	غرب	غرب	شرق	شرق	شرق	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	
جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب	ایرانشهر
غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	
شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	سراوان
شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	شرق	



شکل ۱۱: نقشه موقعیت ایستگاه‌های منطقه و وضعیت گلباد سالانه هر ایستگاه

تحلیل ارتباط بین ویژگی‌های باد و تپه‌های ماسه‌ای

ریگ سیستان از مجموعه از ریگ‌های بزرگ و کوچک تشکیل شده است که نوار مرزی استان سیستان و بلوچستان را دربرگرفته است. با توجه به اینکه بین مناطق شمالی و جنوبی این ریگزار، اختلاف عرض جغرافیایی و همچنین اختلاف ارتفاع زیادی وجود دارد، بنابراین شرایط محیطی، از جمله سرعت و جهت بادهای منطقه در مناطق شمالی و جنوبی این ریگزار، یکنواخت نیست. همچنین تاثیرگذاری عوامل انسانی نیز در مناطق مختلف ریگ سیستان به یک اندازه نبوده، به طوری که بخش زیادی از تپه‌های مجاور زابل به صورت تثبیت شده است که همین مسئله سبب شده تا بادهای منطقه تاثیر کمی بر این تپه‌ها داشته باشد. بر خلاف این تپه‌ها، تپه‌های ماسه‌ای مناطق جنوبی، دارای

پوشش گیاهی کمتری هستند و وضعیت مورفولوژی آنها، زمینه را برای حرکت این تپه های ماسه ای فراهم کرده است. در این پژوهش همچنین پس از محاسبه ویژگی های باد، به ارزیابی میزان سرعت باد در هر کدام از اشکال تپه های ماسه ای پرداخته شده است (جدول ۷). بر اساس نتایج بدست آمده، بالاترین میانگین سرعت باد با ۹/۳ متر بر ثانیه در برخان ها و سپس تپه های عرضی ساده بوده است و کمترین میزان آن نیز با میانگین سرعت ۷/۲ متر بر ثانیه مربوط به پوشش ماسه ای متوسط ضخامت بوده است. با توجه به اینکه تپه های عرضی و برخان های منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه دارای دینامیک فعالی بوده اند، بر این اساس می توان گفت که تفاوت سرعت باد در منطقه نقش مهمی در تنوع مورفولوژیکی و دینامیکی تپه های ماسه ای منطقه داشته است.

جدول ۷: ارزیابی ویژگی های باد در اشکال مختلف تپه های ماسه ای

ردیف	نوع تپه های ماسه ای	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱	برخان و برخانوفید	۹/۳
۲	عرضی ساده	۷/۸
۳	عرضی ساده و برخان	۸/۷
۴	عرضی مرکب	۷/۳
۵	پوشش ماسه ای کم ضخامت و برخان	۷/۳
۶	پوشش ماسه ای متوسط ضخامت	۷/۲
۷	پوشش ماسه ای متوسط ضخامت و عرضی ساده	۷/۸

نتیجه گیری

ریگزارهای سیستان با مجموع ۱۰۶۸ کیلومترمربع از چندین ریگ تشکیل شده است و از نظر مورفولوژیکی و دینامیکی دارای تنوع زیادی هستند. نتایج این تحقیق نشان داده است که در ریگ سیستان انواع اشکال تپه های ماسه ای شامل برخان و برخانوفید، عرضی ساده، عرضی مرکب و پوشش های ماسه ای کم ضخامت تا ضخیم وجود دارد که بیانگر تاثیرگذاری عوامل مختلف بر آنها است و با توجه به اینکه تپه های ماسه ای عرضی ساده حدود ۶۰ درصد از وسعت کل ریگزارهای منطقه را دربر گرفته اند، دارای گستردگی بیشتری نسبت به سایر تپه های ماسه ای هستند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که بخش زیادی از ریگ سیستان از نظر دینامیکی دارای وضعیت فعالی است به طوری که تپه های ماسه ای این ریگ بین ۲ تا ۹۰ متر (در طی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) حرکت داشته اند که بیشترین میزان حرکت با ۹۰ متر، مربوط به برخان های جنوبی منطقه و کمترین میزان حرکت نیز با حدود ۲ متر مربوط به تپه های تثبیت شده اطراف زابل بوده است. همچنین نتایج آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه نشان داده است که میانگین سرعت باد در محدوده ریگ سیستان بین ۵/۵ تا ۲۲/۵ متر بر ثانیه بوده است که از نظر پراکنش مکانی، بالاترین میانگین سرعت باد در طی ماه های مختلف مربوط به ریگزارهای مجاور شهر زابل بوده است. از نظر جهت باد نیز در مناطق شمالی ریگ سیستان، جهات غالب باد از سمت شمال غرب و در مناطق جنوبی ریگ سیستان، جهات غالب باد از سمت جنوب شرق است. نتایج ارزیابی ارتباط بین وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگ سیستان با وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه بیانگر این است که علاوه بر سرعت و جهت باد و همچنین عوامل توپوگرافی، عوامل انسانی نیز در میزان جابجایی تپه های ماسه ای نقش داشته است. در واقع، در مناطق شمالی ریگ سیستان دارای بالاترین میانگین سرعت باد هستیم ولی به دلیل اینکه تپه های ماسه ای توسط فعالیتهای

انسانی تثبیت شده است، دارای کمترین میزان حرکت بوده‌اند اما تپه‌های ماسه‌ای مناطق جنوبی به دلیل پوشش گیاهی کم‌تر و نبود موانع ژئومورفولوژیکی، دارای حرکت بیش‌تری بوده‌اند. همچنین بر اساس نتایج حاصله، بالاترین میانگین سرعت باد در محدوده برخان‌ها و سپس تپه‌های عرضی ساده بوده است و با توجه به اینکه تپه‌های عرضی و برخان‌های منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه دارای دینامیک فعالی بوده‌اند، بر این اساس می‌توان گفت که تفاوت سرعت باد در منطقه نقش مهمی در تنوع مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای منطقه داشته است.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی شماره ۹۸۰۰۷۶۳۵، حمایت‌شده توسط بنیاد ملی علم ایران (INSF) است.

منابع

- جدیدالاسلامی قلعه‌نو، مهدی. (۱۴۰۳). تحلیل فرایندهای رسوبات بادی و مخاطرات آن در دشت سیستان. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳(۴۲)، ۷۱-۹۰. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47555.2014>
- ربانی، ابوالفضل؛ محسنی، ندا؛ حسین‌زاده، سیدرضا. (۱۳۹۹). بررسی نقش فرایندهای ژئومورفیک در مورفولوژی نبک‌های مناطق نیمه‌خشک. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹(۳۶)، ۹۳-۱۰۵. <https://doi.org/10.22067/geoch.2021.68982.1021>
- شریفی پیچون، محمد؛ امیدوار، کمال؛ میری، زینب. (۱۳۹۹). بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و انطباق آن با داده‌های باد در منطقه ریگ زرین. *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۸(۱)، ۲۷-۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1399.8.1.1.6>
- صادقی‌روش، محمدحسن. (۱۳۹۷). تحلیل فرسایش بادی و تعیین جهت حرکت ماسه‌های روان در دشت خضرآباد یزد. *مهندسی و مدیریت آب‌خیز*، ۱۰(۱)، ۹۵-۱۰۷. <https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2017.108120.1216>
- مشهدی، ناصر. (۱۴۰۳). مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای و الگوهای باد (مطالعه موردی: ارگ جدید و جوان جنوب شرق قم). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳(۱)، ۳۱۷-۳۳۸. <https://doi.org/10.22067/geoch.2022.76706.1227>
- مقصودی، مهران؛ فتح‌اله‌زاده، محمد؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۰). پایش تغییرات سرعت باد و اثر آن بر جابجایی و تغییرات تپه‌های ماسه‌ای در ریگ لوت. *سیهر*، ۳۰(۱۱۸)، ۱۱۳-۱۲۶. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246137>
- مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). طبقه‌بندی ریگزارهای اطراف دشت کویر و چاله مسیله و ارزیابی تغییرات آن‌ها. *دوفصلنامه کواترنری ایران*، ۱۰(۱ و ۲)، ۸۸-۱۰۷. <https://doi.org/10.22034/irqua.2025.2054847.1042>
- مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۴). بررسی وضعیت پراکندگی و وسعت ریگزارهای ایران با استفاده از روش‌های سنجش از دوری. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۶(۲)، ۸۹-۱۱۲. <https://doi.org/10.22108/gep.2025.145019.1721>
- مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۴). طبقه‌بندی و تحلیل وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای (مطالعه موردی: ریگ خوزستان). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۵(۲)، ۱-۱۹. <http://dx.doi.org/10.61186/jeer.15.2.1>
- مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید؛ حسینی، سیدجواد. (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده در پایش ریگزارها (مطالعه موردی: ریگ جازموریان). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۹(۳۲)، ۸۱-۹۲. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161472.html
- مقانی، عباس؛ زارع احمدآباد، محسن؛ مقصودی، مهران. (۱۳۹۸). منشأ یابی ماسه‌های بادی با استفاده از کانی‌شناسی و مورفوسکوپی دانه‌های ماسه (مطالعه موردی: قوم تپه صوفیان- شمال دریاچه ارومیه). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۸(۳)، ۷۷-۹۵. <https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81703>
- نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ قیصریان، سیدسعدی؛ ابراهیمی، عطیرین. (۱۴۰۳). شناسایی کانون‌های گردوغبار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن بر مبنای داده‌های سنجش‌ازدوری (مطالعه موردی: جنوب غرب ایران). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳(۴)، ۳۸۶-۴۰۵. <https://doi.org/10.22067/geoch.2024.89088.1504>

- Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., Tsoar, H. (2012). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. June 2012 Climatic Change, 112(3), 1-23. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0264-9>
- Blasco, J. M.D., Chini, M., Verstraeten, G., & Hanssen, R.F. (2020). Sand Dune Dynamics Exploiting a Fully Automatic Method Using Satellite SAR Data. Remote Sensing 12 (22), 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs12233993>
- Dammala, P.K., Kolli, S., Garaga, R., Reddy, K.R., Kumar, P. (2025). Aeolian sand dune fixation – critical review of measures, challenges, and future perspectives with a case study on Thar Desert. CATENA, 250. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108786>
- Fryberger, S.G. (1979). Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (Ed.), A Study of Global Sand Seas. *Geological Survey Professional Paper*, 137–169. <https://www.researchgate.net/publication/349216893>
- Lancaster, N. (2009). Dune morphology and dynamics. In: Parsons A J, Abrahams AD (eds) *Geomorphology of desert environments*. Springer, 824 P. https://10.0.3.239/978-1-4020-5719-9_18
- Lancaster, N., 1995. *The Geomorphology of Desert Dunes*. Routledge, London, 290 P. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203413128>
- Liu, H., Xiao, Z., Zheng, X., 2024. A trans-scale simulation of aeolian sand flow – dune – dune field based on actual environmental wind field. *Geomorphology*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109358>
- Maghsoodi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Aeolian Geomorphology of Ergs and Dunefields in Iran. *Desert*, 30(1), 41-66. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.102461>
- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). The Morphology and Morphodynamics of Aeolian Landforms in the Jazmurian Erg: An Analysis of Environmental Controls. *Desert Ecosystem Engineering*, 14(48), 111-127. <https://doi.org/%E2%80%8E10.22052/deej.2025.257208.1113>
- Maghsoudi, M., Navidfar, A., & Mohammadian, A. (2017). The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data. *Natural Environment Change*, 3(1), 33-43. <https://doi.org/10.22059/jnec.2017.225011.62>
- Qian, G., Yang, Z., Xuegang, X., Dong, Z., & Guo, Y. (2024). Seasonal morphological evolution and migration of granule ripples in the Sanlongsha Dune Field, northern Kumtagh Sand Sea, China. *Geomorphology*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108951>
- Sparavigna, A.C. (2013). A Study of Moving Sand Dunes by Means of Satellite Images. *International Journal of Sciences* 2, 33-42. <https://doi.org/10.18483/ijSci.229>
- Sun, W., Gao, X. (2022). Geomorphology of sand dunes in the Taklamakan Desert based on ERA5 reanalysis data. *Journal of Arid Environments*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104848>
- Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., & Chen, G. (2002). Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 42(3-4), 183-195. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00085-X)
- Wiggs, G.F.S., Atherton, R.J., & Baird, A.J. (2004). Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values. *Sedimentology* 51 (1), 95-108. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00613.x>
- Zhang, G.F., Molina, C.A., Shi, P., Lin, D., Jose A., Feng Kong, G., & Chen, D. (2019). Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China (1982–2016). *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 102- 115. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.039>.