

Monitoring Changes in Sand Dunes by Analyzing Satellite Images and Wind Station Data (Case Study: Zahak Erg Region in the East of Sistan Plain)

¹ Mehran Maghsoudi*, ² Fatemeh Geravand, Bayram-Ali Abdinejad ³, Parisa Pirani ⁴

1- Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

(*Corresponding Author Email: maghsoud@ut.ac.ir)

2- PhD Candidate of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

3- PhD Candidate of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

4- PhD Candidate of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Introduction

Aeolian sand transport is a complex process influenced by many variables including wind conditions (Lancaster, 1985; Anderson & Haff, 1988; Gillette et al., 2001; Zou et al., 2001; Liu et al., 2005), grain size and sand surface moisture (Jackson, 1998; Wiggs et al., 2004), surface crusting (Leys & Eldridge, 1991), topography (Iversen & Rasmussen 1994; Hesp et al., 2005), and vegetation cover (Buckley, 1987; Kuriyama et al., 2005). The importance of sand dunes studies is due to their impacts on water and soil resources, flora and fauna, human infrastructure, and roads. Sand drifting can lead to losing agricultural lands, burying residential buildings, railways, highways, and other infrastructures in many areas of the desert (Zhu et al., 1980; Lei et al., 2003; Dong, 2004). Bagnold (1981) has done the first study on the movement of sand dunes. In recent years, many studies have been done on the cognition of sand dune processes, which include the study of the winds and sands migration in different dunes. Needless to say that significant signs of progress have been obtained. In this regard, there is no doubt that the remote sensing technique and its capabilities, as well as the optimal time sequence of satellite imagery in mapping erg areas, have fundamental performances. Using these images, a substantial area of sand dunes can be examined in a short period of time, and then we can talk about the identification of active dunes, their expansion, and relocation.

Methodology

To study the changes and migration of sand dunes, this study was conducted in two stages. At the first stage, to evaluate changes in the range of sand dunes in the study area, Landsat images were used for the years 2001 and 2019. Moreover, to detect the changes in the Zahak Erg range the ENVI software was used. The results of this section can be important in the overall assessment of the area. Additionally, in order to detect the trend of changes in those parts where significant shifting occurred, we used either Landsat or the Google Earth images with different time intervals. It worth mentioning that for geo-referencing the Google Earth images of recent years (2006-2018) the Stitch Map Software was used. Moreover, to draw the sand rose, the Sand Rose software was used. Sand rose is the Graph of Portable sand by wind energy, which was used by Fryberger and Dean (1979) for the first time. In order to draw this Graph, winds that were faster than the erosion velocity threshold were developed into vector units as sand drift potential.

Discussion

Mobility is the most important characteristic of sand dunes. In this regard, special attention should be paid to the importance of wind in changing the sand dunes morphology. In addition, studies of sand dunes migration provide basic knowledge about wind processes and sand transfer values. In this study, monitoring and detection of the sand dunes relocation rate have been considered based on the use of Landsat images (for the years 2001-2019). At the first stage, the regions that have been faced changes

were identified using the change detection technique for the entire range of Erg. Based on the output map, marked areas with the red color experienced the maximum changes, and also, in this section, sand dunes have been more developed. The differences between the two images within the sand dunes area were estimated at about 23 km². However, the pattern of sand dunes migration represents relocation from the Northwest to the Southeast. At the next stage of the study, to understand the change rate and relocation trend, Google Earth images were used (years 2006 and 2018). Furthermore, the region with significant changes has been selected for a closer look. Moreover, using Stitch Map software, the georeferenced images were extracted. It worth mentioning that, from the five selected zones on the Erg surface, a total of 368 cases of sand dunes were quantitatively analyzed. According to the results, the greatest amount of migration was found for zone 3 with the amount of 24.72 m, in contrast, the lowest value was calculated at about 14.16 m for zone 5. In addition, the migration average rate for a period of 12 years was calculated. Here, the maximum migration belonged to zone 3 which is 2.06 meters per year. While the minimum one allocated to zone 5 was 1.18 meters per year.

Conclusion

In this study, the authors monitored changes in sand dunes using satellite imagery data and wind data of meteorological stations of Zahak Erg. In this regard, the sand dunes activity rate, dunes migration pattern, and also factors affecting their intensity and patterns were identified. The results of the 368 studied sand dunes in different parts of the erg surface indicated displacement with a northwest-southeast trend, which is consistent with the results of data analysis for wind pattern. But the average amount of displacement of 1.53 meters per year for a period of 12 years (2006 to 2018) with the results of data from Zabol wind station showed the amount of sand carrying more than 300 tons per meter for a year. The changes in wind speed at this station were inconsistent and it was shown that the maximum value obtained was before the stabilization of the active sand dunes. In addition, smooth sands move on the surface of the earth, independent of sand dunes, which cannot be measured by images.

Keywords: Sand Dunes, Remote Sensing, Wind Data, Wind erosion, Zahak Erg.

References:

- Ahmadi, H. (2006). *Applied Geomorphology Volume 2 Desert- Wind Erosion*. Tehran: University of Tehran Press.
- Ahmadian, M. A. (2008). Desert (A Systematic Approach to the Desertification and Desertification Process). *Geographical Research Quarterly*, 2(53), 146-159.
- Al-Awadhi, J. M., Al-Helal, A., & Al-Enezi, A. (2005). Sand Drift Potential in the Desert of Kuwait. *Journal of Arid Environments*, 63, 425-438.
- Bagnold, R. A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Chapman and Hall, pp. 104-106.
- Baitis, E., Kocurek, G., Smith, V., Mohrig, D., Ewing, R. C., & Peyret, A. P. B. (2014). Definition and Origin of the Dune-Field Pattern at White Sands, New Mexico. *Aeolian Research*, 15, 269-287.
- Delgado-Fernandez, I., & Davidson-Arnott, R. (2011). Meso-Scale Aeolian Sediment Input to Coastal Dunes: The Nature of Aeolian Transport Events. *Geomorphology*, 126(1-2), 217-232.
- Dong, Z., Wang, T., & Wang, X. (2004). Geomorphology of the Megadunes in the Badain Jaran Desert. *Geomorphology*, 60(1-2), 191-203.
- Ebrahimzadeh, I. (2018). *A Regional Analysis of Urban-Rural Relationships in Sistan*. PhD Thesis in Geography and Urban-Regional Planning, Faculty of Literature and Humanities, University of Isfahan, pp. 85-65.
- Fryberger, S. G., AL-Sari, A. M., Clisham, T. J., Rizvi, S. A., & ALHinai, K. G. (1984). Wind Sedimentation in the Jafurah Sand Sea, Saudi Arabia. *Sedimentology*, 31(3), 413-431.
- Fryberger, S. G., & Dean, G. (1979). *Dune Forms and Wind Regime*. USA: Geological Survey Professional Paper 1052-F, pp. 137-169.

- Gillies, J. A., & Lancaster, N. (2013). Large Roughness Element Effects on Sand Transport, Oceano Dunes, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), 785-792.
- Hamdan, M. A., Refaat, A. A., & Wahed, M. A. (2016). Morphologic Characteristics and Migration Rate Assessment of Barchan Dunes in the Southeastern Western Desert of Egypt. *Journal of Geomorphology*, 257, 57-74.
- Hereher, M. E. (2018). Geomorphology and Drift Potential of Major Aeolian Sand Deposits in Egypt. *Journal of Geomorphology*, 304, 113-120.
- Hermas, E., Leprince, S., & Abou El-Magd, I. (2012). Retrieving Sand Dune Movements Using Sub-Pixel Correlation of Multi-Temporal Optical Remote Sensing Imagery, Northwest Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 121, 51-60.
- Hesp, P. A., Davidson-Arnott, R., Walker, I. J., & Ollerhead, J. (2005). Flow Dynamics Over a Foredune at Prince Edward Island, Canada. *Journal of Geomorphology*, 65(1-2), 71-84.
- Housing Foundation of the Islamic Revolution of Sistan and Baluchestan Province. (2019). *Technical Unit and Rural Development Studies*.
- Khosravi, M. (2005). *Research Project of Ecological and Environmental Effects of 120-Day Winds in Sistan*. Environmental Protection Organization of Sistan and Baluchestan Province, Consultant of Sistan and Baluchestan Institute of Earth Sciences and Geography, p.300.
- Kuriyama, Y., Mochizuki, N., & Nalashima, T. (2005). Influence of Vegetation on Aeolian Sand Transport Rate from a Backshore to a Foreshore at Hasaki, Japan. *Journal of Sedimentology*, 52(5), 1123-1132.
- Lancaster, N., Nickling, W. G., & Gillies, J. A. (2010). Sand Transport by Wind on Complex Surfaces: Field Studies in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(3).
- Latifi, L. (2006). *Investigating the Progress of Sand Dunes Using Satellite Images in Recent Droughts in the North and East of Sistan Plain*. Master Thesis, Department of Geography, Islamic Azad University, Mashhad Branch.
- 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. *Journal of Geomorphology*, 67(3-4), 283-297.
- Maghsoudi, M., Mohammadi, M., Khanbabaei, Z., Mahboubi, S., Baharvand, M., & Hajizadeh, A. H. (2017). Monitoring the Movement of Erg and Barkhans in the West of Lut (Peshouieh). *Journal of Quantitative Geomorphological Research*, 5(4), 189-176.
- Maghsoudi, M., Navidfar, A., & Mohammadi, A. (2017). The Sand Dunes Migration Patterns in Mesr Erg Region Using Satellite Imagery Analysis and Wind Data. *Journal of Natural Environment Change*, 3(1), 33-43.
- Mohamed, I. N., & Verstraeten, G. (2012). Analyzing Dune Dynamics at the Dune-Field Scale Based on Multi-Temporal Analysis of Landsat-TM Images. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 119, 105-117.
- Negaresh, H., & Latifi, L. (2008). Geomorphological Analysis of the Progress of Sand Dunes East of the Sistan Plain in Recent Droughts. *Journal of Geography and Development*, 6(12), 60-43.
- Noroozhi, F. (1993). *Investigating the Destructive Effects of Helmand River Floods*. MA Thesis, Department of Geography, Sistan and Baluchestan University, p.195.
- Piri, H., Abbaszadeh, M., Rahdari, V., & Maleki Najafabadi, S. (2013). Comparative Assessment of 4 Meteorological Drought Indices Using Cluster Analysis Method (Case Study of Sistan and Baluchestan Province). *Journal of Water Resources Engineering*, 6(17), 25-36.
- Pye, K., & Tsoar, H. (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Berlin: Springer-Verlag.
- Salighe, M. (2003). Attention to the Wind in the Construction of the Physical Body of Zabol. *Journal of Geography and Development*, 1(2), 109-121.
- Sargzi, H. (2005). *Origin and Assessment of Severity and Damage of Sand Dunes in Niatak Sistan Desert*. Master Thesis, Gorgan University of Natural Resources, p.136.
- Sherman, D. J., & Li, B. (2012). Predicting Aeolian Sand Transport Rates: A Reevaluation of Models. *Journal of Aeolian Research*, 3(4), 371-378.

- Sparavigna, A. C. (2013). A Study of Moving Sand Dunes by Means of Satellite Images. *International Journal of Sciences*, 2.
- Tsoar, H. (2005). Sand Dunes Mobility and Stability in Relation to Climate. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 357(1), 50-56.
- Wang, X., Eerdun, H., Zhou, Z., & Liu, X. (2007). Significance of Variations in the Wind Energy Environment over the Past 50 Years with Respect to Dune Activity and Desertification in Arid and Semiarid Northern China. *Journal of Geomorphology*, 86(3-4), 252-266.
- Wiggs, G. F. S., Atherton, R. J., & Baird, A. J. (2004). Thresholds of Aeolian Sand Transport: Establishing Suitable Values. *Journal of Sedimentology*, 51(1), 95-108.
- Yao, Z. Y., Wang, T., Han, Z. W., Zhang, W. M., & Zhao, A. G. (2007). Migration of Sand Dunes on the Northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 70(1), 80-93.
- Yurk, B. P., Hansen, E. C., & Hazle, D. (2013). A Deadtime Model for the Calibration of Impact Sensors with an Application to a Modified Miniphone Sensor. *Journal of Aeolian Research*, 11, 43-54.
- Zhang, G., Azorin-Molina, C., Shi, P., Lin, D., Guijarro, J. A., Kong, F., & 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.
- Zhang, Z., Dong, Z., & Li, C. (2015). Wind Regime and Sand Transport in China's Badain Jaran Desert. *Journal of Aeolian Research*, 17, 1-13.



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۷۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صص ۱۴۸-۱۳۱

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۹/۴/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۲

پایش تغییرات تپه‌های ماسه‌ای با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه بادسنجی

نمونه پژوهش: محدوده ریگ زهک در شرق دشت سیستان

مهران مقصودی^{*}، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

magsoud@ut.ac.ir

فاطمه گراوند، دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

f_geravand@ut.ac.ir

بایرامعلی عبدی‌نژاد، دانشجوی دکترای رشته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

abdinegad@yahoo.com

پریسا پیرانی، دانشجوی دکترای رشته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

p.pirani@ut.ac.ir

چکیده

تپه‌های ماسه‌ای به‌منابه یکی از لندفرم‌های مناطق بیابانی ایران و سعت زیادی از بخش‌های این مناطق را دربرگرفته است. شناخت موقعیت، رفتار و ماهیت تپه‌های ماسه‌ای و شناسایی محل‌های برداشت، حمل و رسوب‌گذاری این لندفرم‌ها به دلیل مشکلات عدیده‌ای که برای محیط زیست انسانی داشته، ضروری است. در این پژوهش مطالعه الگوی گسترش و توسعه تپه‌های ماسه‌ای در سطح ریگ زهک در شرق دشت سیستان در دو بخش انجام شده است؛ در بخش اول به‌منظور بررسی تغییرات محدوده تپه‌های ماسه‌ای از دو تصویر ماهواره‌ای سری Landsat-7 مربوط به سال ۲۰۰۱ (ETM) و Landsat 8 مربوط به سال ۲۰۱۹ و برای بررسی روند تغییرات و جابه‌جایی‌ها از تصاویر گوگل ارث منطقه مربوط به سال‌های اخیر (۲۰۱۸، ۲۰۰۶) استفاده شد؛ در بخش دوم برای آگاهی از وضعیت بادهای فعال و الگوی حرکت آنها، داده‌های ایستگاه بادسنجی ارزیابی شد. نتیجه بررسی تپه‌ها در بخش‌های مختلف سطح ریگ نشان‌دهنده جابه‌جایی با روند شمال غربی- جنوب شرقی است. این نتیجه با نتایج تحلیل داده‌های جهت‌الگوی باد همخوانی و مطابقت داشته است؛ اما میانگین مقدار جابه‌جایی ۱/۵۳ متر در سال برای بازه زمانی ۱۲ ساله (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸) با نتایج داده‌های ایستگاه بادسنجی زابل که مقدار حمل ماسه را بیش از ۳۰۰ تن در متر برای یک سال نشان می‌دهد و بررسی روند تغییرات سرعت باد در این ایستگاه همخوانی نداشته است. این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت است که حداکثر این مقدار حاصل شده به پیش از تثبیت تپه‌های ماسه‌ای فعال مربوط بوده است؛ علاوه بر این ماسه‌های روان در سطح زمین و مستقل از تپه‌های ماسه‌ای حرکت می‌کنند که با تصاویر قابل اندازه‌گیری نیستند.

واژه‌های کلیدی: تپه‌های ماسه‌ای، سنجش از دور، داده‌های باد، فرسایش بادی، ریگ زهک

*نویسنده مسؤول

Copyright©2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/gep.2020.123597.1317](https://doi.org/10.22108/gep.2020.123597.1317)

مقدمه

یکی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات مورفولوژی مناطق بیابانی، فراوانی وزش باد به دلیل توپوگرافی نسبتاً هموار و فقر پوشش سطحی و کمبود رطوبت در این مناطق است. حمل و نقل شن و ماسه بادی، فرایندی پیچیده است که از بسیاری از متغیرها از جمله ویژگی‌های باد (Liu et al., 2005: 285)، اندازه دانه، رطوبت سطح شن و ماسه (Wiggs et al., 2004: 99)، توپوگرافی (Hesp et al., 2005: 74) و پوشش گیاهی (Kuriyama et al., 2005: 1127) تأثیر می‌پذیرد؛ بر این اساس فعالیت بادها در انجام فرسایش به‌طور چشمگیری در ارتباط با شرایط اقلیمی هر منطقه بوده است. شاخص‌ترین لندفرم‌ها در مناطق بیابانی برای پایش این فعالیت‌ها، تپه‌های ماسه‌ای است که براساس میزان فعالیت به دو دسته فعال و تثبیت‌شده یا ثابت تقسیم می‌شوند (Tsoar, 2005: 54). فرایبرگر^۱ در سال ۱۹۷۹ انواع تپه‌های ماسه‌ای را براساس حالت‌های باد غالب تقسیم‌بندی کرد که شامل یونی مدال، بای مدال و پیچیده‌اند. بادهای یونی مدال معمولاً موجب شکل‌گیری تپه‌های عرضی می‌شوند، بادهای بای مدال یا دوطرفه موجب تشکیل تپه‌های خطی و طولی و بادهای پیچیده یا کمپلکس موجب تشکیل تپه‌های ستاره‌ای شکل می‌شوند. به‌طور کلی رسوبات ناشی از فرسایش بادی در مکانی جابه‌جا و نهشته می‌شوند که «ریگ» نام دارد. ریگ‌ها، یک محیط فعال برای شکل‌گیری اشکال ماسه‌ای محسوب می‌شوند و شرایط لازم برای شکل‌گیری آنها، وجود ذرات ماسه فراوان، وزش باد مؤثر، توپوگرافی مناسب برای گسترش باد و شرایط آب‌وهوایی مناسب با رطوبت کم است (Pye and Tsoar, 2009: 112). ماسه‌های موجود در ریگ‌ها ناشی از رسوبات قابل حمل با منشأ محیط‌های رودخانه‌ای و دریاچه‌ای و ساحلی‌اند (Lancaste et al., 2010: 3). به دلیل شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک و بیابانی که در عرض‌های ۳۰ تا ۳۵ درجه وجود دارد، بیشتر ریگ‌ها نیز در این نواحی شکل می‌گیرند؛ زیرا دما و تبخیر زیاد موجب کاهش شدید رطوبت در سطح و همین امر موجب افزایش فعالیت ماسه‌ها می‌شود (Dong et al., 2004: 196; Wang et al., 2007: 257).

ماسه‌های بادی همواره یکی از مخاطرات محیطی محسوب می‌شوند؛ زیرا انتقال ماسه‌های روان تهدیدی جدی برای مناطق مستقر در حاشیه توده‌های عظیم ماسه‌ای به شمار می‌رود (احمدی، ۱۳۸۵: ۱۱۴). حرکت ماسه‌ها به دست دادن زمین‌های کشاورزی، مدفون‌شدن ساختمان‌های مسکونی، راه‌آهن، بزرگراه‌ها و زیرساخت‌های دیگر در بسیاری از مناطق بیابانی منجر می‌شود (Dong, 2004: 197). اهمیت مطالعه تپه‌های ماسه‌ای به علت تأثیراتی است که آنها بر منابع آب و خاک، حیات گیاهی و جانوری و تأسیسات و راه‌های ارتباطی دارند.

اولین مطالعات را درباره حرکت تپه‌های ماسه‌ای بگنلود^۲ (1941) انجام داد. در سال‌های اخیر نیز، پژوهش‌های بسیاری در زمینه شناخت فرایند تپه‌های ماسه‌ای صورت پذیرفته که دربرگیرنده مطالعه بادها و حرکت ماسه‌ها در تپه‌های مختلف بوده و پیشرفت‌های مهمی نیز حاصل شده است. در این زمینه بی‌گمان سنجش از دور و توانایی‌های آن و همچنین توالی زمانی مطلوب این تصاویر در تهیه نقشه‌های مورد نیاز برای بررسی ریگزارها کارایی زیادی داشته است. با به‌کارگیری این تصاویر می‌توان وسعت زیادی از تپه‌های ماسه‌ای را در مدت کوتاهی بررسی و تپه‌های

1. Fryberger

2. Bagnlod

فعال را شناسایی کرد و درباره چگونگی گسترش و جابه‌جایی آنها نیز به نتایج پذیرفته‌ای دست یافت. در زیر خلاصه‌ای از مطالعات حرکات تپه‌های ماسه‌ای با کمک سنجش از دور ارائه می‌شود.

ایهاب و ورسترن^۱ (2012) میدان‌های ماسه‌ای را براساس تصاویر لندست TM در دوره‌های زمانی مختلف بررسی کردند. در این پژوهش باندهای مادون قرمز نزدیک برای RGB تصاویر استفاده شده است.

هرماس و همکاران^۲ (2012) حرکات تپه‌های ماسه‌ای را با استفاده از همبستگی پیکسل‌های تصاویر چندزمانی در شمال غربی صحرای مصر بررسی کرده‌اند. نتیجه مطالعه بیان‌کننده جابه‌جایی تپه‌ها به سمت شرق و جنوب شرقی است.

اسپاراوینا^۳ (2013) حرکات تپه‌های ماسه‌ای را با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث مطالعه کرده است. حرکات تپه‌های ماسه‌ای هرچند کاملاً آهسته به نظر می‌رسد، ممکن است یک چالش یا حتی تهدید برای فعالیت‌های انسانی باشد. در حرکات تپه‌های ماسه‌ای تغییرات آب‌وهوا ممکن است عواقب فاجعه‌باری برای جوامع محلی داشته باشد.

بیتسز و همکاران^۴ (2014) با استفاده از تصاویر لیدار الگوی تپه‌های ماسه‌ای را بررسی کرده‌اند.

جانگ و همکاران^۵ (2015) با استفاده از رژیم باد، الگوی جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای را در بیابان جاران چین بررسی کرده‌اند.

همدان و همکاران^۶ (2016) ویژگی‌های مورفولوژیکی و میزان جابه‌جایی برخان‌ها را در جنوب شرقی بیابان غربی مصر بررسی کرده‌اند. آنها در این پژوهش با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث در بازه‌های زمانی مختلف جابه‌جایی تپه‌ها را بررسی کردند. نتیجه مطالعه از جابه‌جایی ۳ تا ۱۰/۸۲ متری در سال حاکی است که این موضوع برای زیرساخت‌ها و زمین‌های زیر کشت خطر بزرگی محسوب می‌شود.

مقصودی و همکاران^۷ (2017) با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های بادسنجی و تصاویر ماهواره‌ای، الگوی گسترش و توسعه تپه‌های ماسه‌ای و وضعیت بادهای فعال را در سطح ریگ مصر بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این منطقه متأثر از بادهای غالب از جهت شمال غربی- جنوب شرقی طی روزهای سرد سال است و عمده جابه‌جایی‌ها در سطح ریگ از این روند پیروی کرده و متوسط جابه‌جایی در سطح تپه‌ها، ۸ متر در سال ارزیابی شده است.

هریهر^۸ (2018) در پژوهشی ژئومورفولوژی و پتانسیل فرسایش بادی را در حمل رسوبات ماسه‌ای در ریگ‌های مصر بررسی کرد. او با محاسبه مقادیر پتانسیل حمل ماسه، بردار برآیند مسیر جابه‌جایی و تعیین انرژی باد در مناطق مختلف مصر به الگوی جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در ریگ‌های مصر دست یافت.

ژانگ و همکاران^۹ (2019) در پژوهشی تغییرپذیری فرسایش بادی و مقادیر تخریب دینامیکی ناشی از آن را در

1. Ihab and Verstraeten

2. Hermas et al.

3. Sparavigna

4. Baitis et al.

5. Zhang et al.

6. Hamdan et al.

7. Maghsuodi et al.

8. Hereher

9. Zhang et al.

مناطق کشاورزی شمال چین در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۶ شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد سرعت باد نزدیک سطح زمین به طور سالیانه ۰,۰۰۷ متر بر ثانیه کاهش یافته است. این کاهش در فصل بهار ۰,۰۱ متر بر ثانیه و در فصل پاییز ۰,۰۰۹ متر بر ثانیه در سال بوده است.

مقصودی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی جابه‌جایی برخانه‌های غرب ریگ لوت (پشوئیه) را پایش و با استفاده از سله‌های موجود در سطح و مقایسه آن با عکس‌های هوایی سال‌های مختلف، میزان حرکت و جابه‌جایی ریگ و برخانه‌ها را مشخص کردند؛ بر این اساس مشخص شد ریگ مدنظر به سمت جنوب و جنوب شرق در حال جابه‌جایی است. این امر در مطالعات میدانی انجام‌شده نیز تأیید شد.

استان سیستان و بلوچستان با توجه به شرایط خاص هیدرواقلمی حاکم بر آن بیش از ۵ میلیون هکتار بیابان (معادل ۲۶,۷ درصد از کل مساحت استان) دارد که ۱۶ درصد از این بیابان‌ها (حدود ۸۰۰ هزار هکتار) جزو شنزارهای فعال و نیمه‌فعال محسوب می‌شود (لطیفی، ۱۳۸۵: ۷۴). این استان با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص خود و متأثر از عوامل هیدرواقلمی، دستخوش بیشترین سوانح طبیعی ناشی از تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر از جمله خشکسالی، سیل و طوفان شن بوده است که در کنار جابه‌جایی مداوم تپه‌های ماسه‌ای و طوفان‌های شن ناشی از وزش بادهای ۱۲۰ روزه، زندگی شهری و روستایی این استان را به‌ویژه در دشت سیستان و شهرستان زهک تهدید می‌کنند؛ به طوری که ماسه‌زار فعال و نیمه‌فعال منطقه با وزش باد جابه‌جا می‌شود و با هجوم خود به اراضی کشاورزی، رودخانه‌ها، راه‌های ارتباطی، شهرها و روستاها، تأسیسات اقتصادی و حیاتی منطقه، مشکلات عدیده‌ای را برای زیست مردم ایجاد (تصویر ۱) و به فعالیت‌های زیربنایی منطقه خسارات جبران‌ناپذیری وارد می‌کند. چنانکه در چند دهه اخیر، خسارات جبران‌ناپذیری به محیط زیست انسانی وارد شده است (احمدیان، ۱۳۸۷: ۱۴۵).

دستگاه‌های اداری استان از جمله منابع طبیعی، جهاد کشاورزی و بنیاد مسکن انقلاب اسلامی اقداماتی را در زمینه تثبیت تپه‌های ماسه‌ای و جمع‌آوری ماسه‌ها از معابر و محوطه منازل مسکونی روستاها انجام می‌دهند، اما جابه‌جایی این ماسه‌ها در کنار خشکسالی همیشه تهدیدی برای ساکنان این منطقه محسوب می‌شود. یکی از طرح‌های اساسی بنیاد مسکن در برخورد با این موضوع، تهیه و اجرای طرح‌های هادی روستایی با همکاری سایر دستگاه‌های اجرایی است؛ به طوری که از مجموع ۱۴۱ روستای بالای ۲۰ خانوار براساس سرشماری سال ۱۳۹۵ در شهرستان زهک برای ۱۳۸ روستا طرح هادی روستایی تهیه شده است (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، ۱۳۹۹)؛ با وجود این به دلیل اجرانشدن مصوبات این طرح‌ها توسط دستگاه‌های اجرایی ذی‌صلاح، سکونتگاه‌های روستایی در طول سال پیوسته با ماسه‌های روان تهدید شده و این امر به یک معضل دائمی برای مسئولان محلی تبدیل شده است.

یکی از دلایل ناکامی در مهار حرکت ماسه‌ها، آگاهی‌نداشتن دقیق از میزان و جهت جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای است. لازمه برخورد اصولی با این موضوع، پایش تغییرات تپه‌های ماسه‌ای و نظارت بر آنها و محاسبه میزان حرکت تپه‌های شنی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه در منطقه ریگ زهک است که دسترسی به آن از اهداف اصلی این پژوهش محسوب می‌شود.



تصویر ۱. تهدید جاده ارتباطی با ماسه‌های روان

(مسیر زهک به روستای محمد شاه کرم): (نویسندگان، ۱۳۹۸)

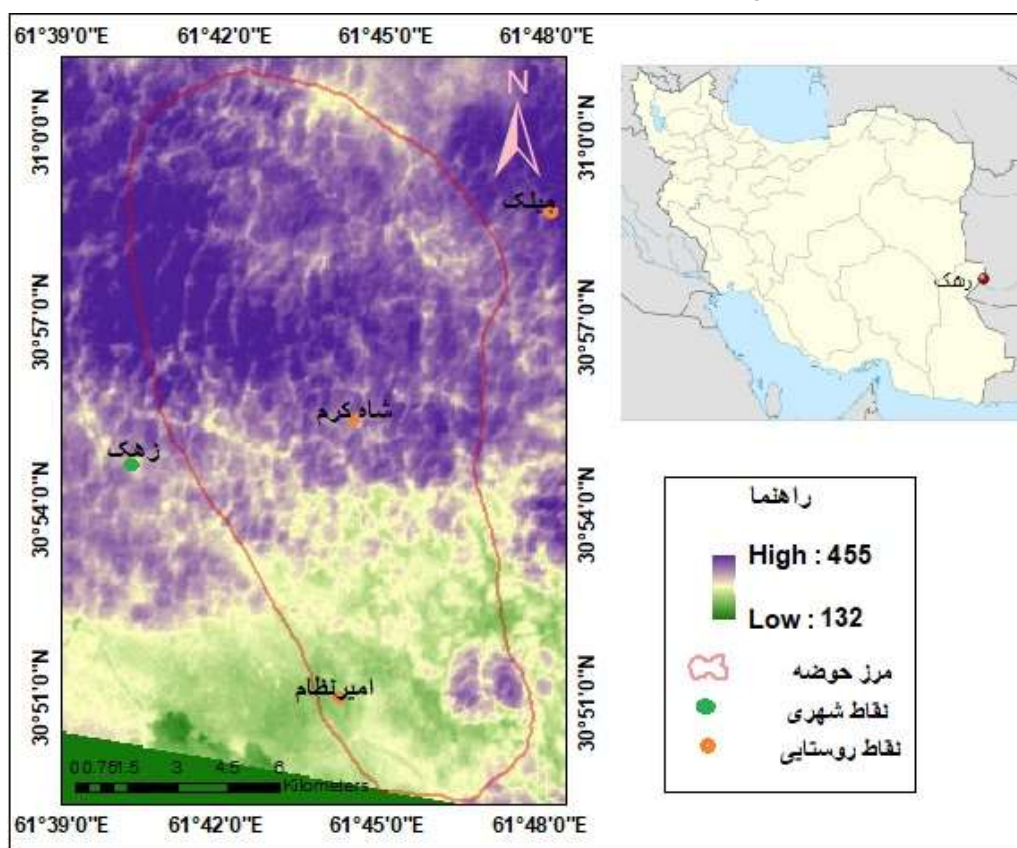
Image 1. Threat of communication road by quicksands
(Zahak route to Mohammad Shahkaram village); (Authors, 2019)

موقعیت و ویژگی‌های جغرافیایی منطقه پژوهش

محدوده پژوهش به‌مثابه بخشی از دشت سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران در نوار مرزی مشترک ایران و افغانستان واقع شده است. این محدوده از سمت شمال شرق به روستاهای شاهجان بامری و میلک و از سمت غرب به شهرک نارویی و شهر زهک و از سمت جنوب غرب به شهرک کهک و چاه نیمه‌ها محدود شده و بین طول‌های جغرافیایی ۶۱ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و عرض‌های ۳۰ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این محدوده با مساحتی حدود ۱۶۵ کیلومترمربع با اختلاف ارتفاع کم و شیب کمتر از یک درصد در آبرفت‌های رودخانه هیرمند در شرق دشت سیستان واقع شده است. میزان ارتفاع و شیب عمومی آن از شمال به جنوب و از غرب به شرق به سمت بستر رودخانه هیرمند کاهش می‌یابد.

از نظر اقلیمی این منطقه در تیپ اقلیمی گرم و خشک قرار دارد و متوسط بارندگی سالیانه آن در ایستگاه زهک کمتر از ۴۷ میلی‌متر، حداقل بارش آن ۱۱ میلی‌متر و حداکثر سالیانه آن ۱۴۶ میلی‌متر است (پیری و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۹). متوسط دمای سالیانه منطقه در ایستگاه زهک ۲۲/۶ درجه سانتی‌گراد و متوسط رطوبت نسبی سالیانه ۲۹ درصد است. شرایط اقلیمی نامساعد، متوسط بارش سالیانه کم، تبخیر بسیار شدید بیش از ۵۰۰۰ میلی‌متر و میزان رطوبت نسبی کم (ابراهیم‌زاده، ۱۳۷۹: ۷۱)، فقر پوشش گیاهی شامل گونه‌های پراکنده گز و تاغ و همچنین طوفان‌های شن و ماسه و حرکت تپه‌های ماسه‌ای، از عوامل تهدیدکننده و مخرب این منطقه محسوب می‌شوند که شرایط را برای زیست در آن سخت کرده‌اند.

وقوع خشکسالی در منطقه سیستان و پیرو آن کاهش پوشش گیاهی و خشک شدن دریاچه هامون و همچنین وجود بادهای ۱۲۰ روزه، بستر مناسبی را برای فرسایش بادی و وقوع طوفان‌های گرد و خاک ایجاد کرده است. این عوامل سبب شده‌اند حرکت شن‌های روان در منطقه با سرعت زیادی انجام و تپه‌های ماسه‌ای فراوانی بر جای گذاشته شود (نگارش و لطیفی، ۱۳۸۷: ۴۷). سکونتگاه‌های روستایی شهرک محمد شاه‌کرم، نادر الم‌خان و امیرنظام در کانون جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای قرار دارند. با وجود انجام اقدامات مؤثر مانند مالچ‌پاشی و کاشت نهال برای تثبیت نسبی تپه‌های ماسه‌ای با منابع طبیعی استان، این روستاها به علت جابه‌جایی ماسه‌های روان همواره در معرض آسیب جدی قرار دارند (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، ۱۳۹۹).



شکل ۱. موقعیت محدوده ریگ زهک در دشت سیستان و ایران (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 1. Location of Zahak sand area in Sistan and Iran plain (Authors, 2019)

روش‌شناسی پژوهش

به منظور بررسی تغییرات و جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای، این مطالعه در دو سطح انجام شده است. در سطح اول، به منظور بررسی تغییرات محدوده تپه‌های ماسه‌ای در منطقه پژوهش از دو تصویر ماهواره‌ای ۲۳ و ۲۷ ماه می به ترتیب مربوط به LandSat 7 برای سال ۲۰۰۱ (ETM^۱) و Landsat 8 برای سال ۲۰۱۹ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰

متر استفاده شد؛ در کنار تصاویر لندست از تصاویر گوگل‌ارث منطقه مربوط به ۸ نوامبر ۲۰۰۶ و ۵ آگوست ۲۰۱۸ برای بررسی روند تغییرات و جابه‌جایی‌ها استفاده شد. برای آشکارسازی تغییرات، تصاویر ماهواره‌ای با کمک نرم‌افزار ENVI 3.5 پردازش شدند. در ادامه پژوهش در قسمت‌هایی که تغییرات بارزی وجود داشت، از تصاویر با فواصل زمانی گوگل‌ارث برای آشکارسازی روند استفاده شد. برای زمین مرجع کردن تصاویر گوگل‌ارث با دقت زیاد، نرم‌افزار Stitch Map به کار رفت.

در سطح دوم، از آمار ایستگاه بادسنجی زابل، نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه، برای اطلاع از رژیم باد و آگاهی از توان فرساینده باد استفاده شد. پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مربوط به سرعت و جهت باد در محیط اکسل با استفاده از نرم‌افزارهای WR Plot و Sand Rose Graph به ترتیب نمودار گلباد و گلماسه ترسیم و بدین وسیله جهت و سرعت باد غالب و پتانسیل رانندگی ماسه در اطراف ریگ مدنظر تعیین و بردار نیروی برآیند در جابه‌جایی ماسه‌ها و شکل‌دهی لندفرم‌های ریگ زهک تعیین و مشخص شد. اصطلاح پتانسیل حمل ماسه^۱ (DP) را نخستین بار فرایبرگر^۲ (1979) برای اندازه‌گیری توان باد سطحی در جابه‌جایی ماسه‌ها در طول یک بیابان خشک استفاده کرد. این اصطلاح به‌طور گسترده برای توصیف فعالیت و جابه‌جایی ماسه در مناطق بیابانی و ریگ‌ها در ارتباط با قدرت باد غالب استفاده می‌شود (Fryberger et al., 1984: 415; Al-Awadhi et al., 2005: 427; Tsoar, 2005: 3; Zhang et al., 2015: 3; Hereher, 2018: 115; Yao et al., 2007: 84; 52). براساس یافته‌های فرایبرگر پتانسیل رانندگی ماسه با باد با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه، DP_t پتانسیل جابه‌جایی ماسه کل، V میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین برحسب کیلونات، V_t آستانه سرعت فرسایش بادی که معمولاً ۱۲ کیلونات در نظر گرفته می‌شود و t درصد رخداد باد در جهات مختلف است. چنانچه مقدار DP_t در یک منطقه کمتر از ۲۰۰ باشد، باد در آن منطقه ویژگی انرژی کم دارد و تغییرپذیری جهات باد بیشتر می‌شود؛ در صورتی که مقدار آن بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ باشد، باد انرژی تغییرپذیری متوسط دارد و چنانچه بیشتر از ۴۰۰ باشد، باد در منطقه انرژی زیاد دارد و تغییرپذیری جهات باد کمتر است (Fryberger and Dean, 1979: 141).

اصطلاحات دیگری نیز در جابه‌جایی ماسه‌ها استفاده می‌شود؛ از جمله RDP^3 یا برآیند پتانسیل حمل ماسه که میزان پتانسیل جابه‌جایی ماسه در جهت بردار برآیند باد را اندازه‌گیری می‌کند و RDD^4 یا بردار برآیند مسیر حمل ماسه که جهت برآیند حرکت ماسه‌ها را تعیین می‌کند. به‌صورت کمی پتانسیل حمل ماسه برابر با ۱ برحسب مقیاس برداری برابر با ۰,۰۷ متر مکعب بر متر در سال است؛ همچنین نسبت RDP/DPT نیز عددی است که برای تفسیر شکل تپه‌های ماسه‌ای در بیابان به کار می‌رود (Zhang et al., 2015: 9). هنگامی که باد غالب به‌طور ثابت از یک جهت می‌وزد، این نسبت به ۱ نزدیک است و تپه‌های ماسه‌ای حاصل مانند برخان‌های موجود در صحرای آفریقا از نوع عرضی هستند

1. Drift Potential.
2. Fryberger
3. Resultant Drift Potential
4. Resultant Drift Direction

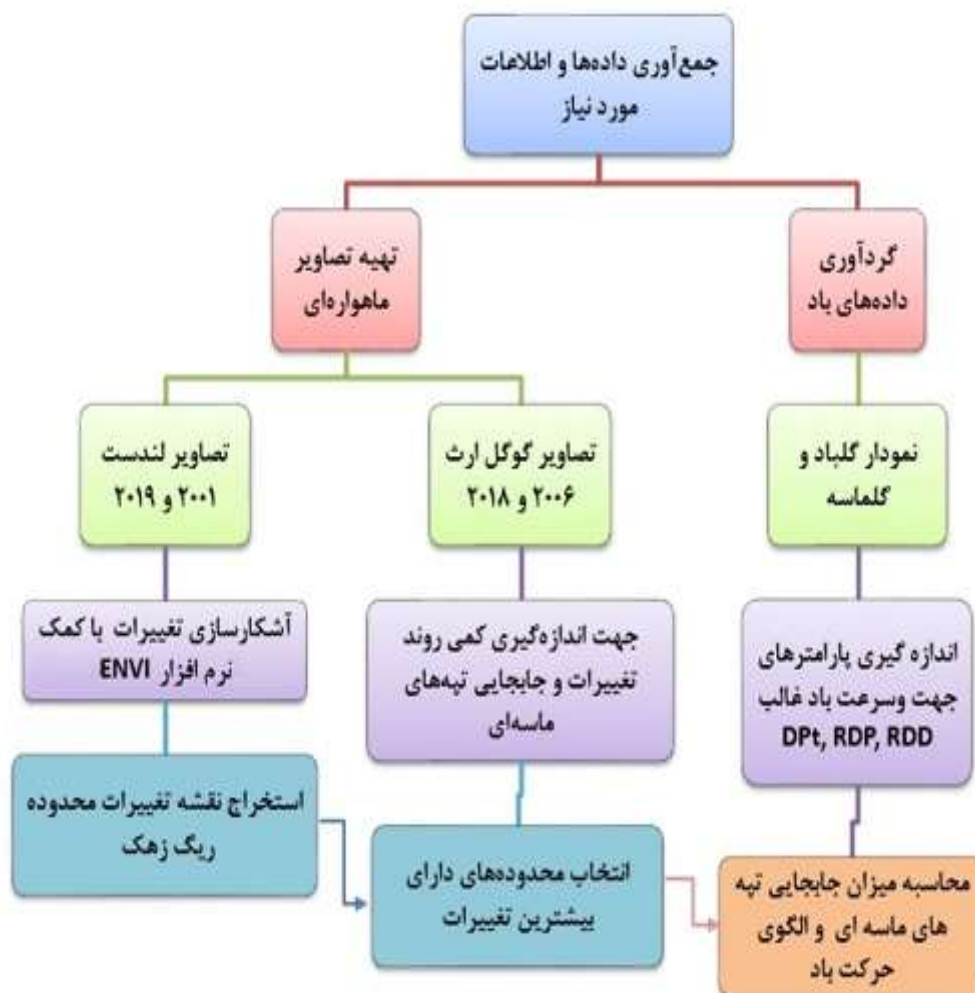
(Fryberger and Dean, 1979: 142؛ جدول ۱). در کنار تعیین گلباد در هر ایستگاه، روند تغییرات سرعت باد نیز در طول سال‌های ۱۹۶۲ تا ۲۰۱۸ در ایستگاههای مرتبط بررسی شد.

جدول ۱. تقسیم‌بندی قدرت فرسایشی باد و شاخص‌های تغییرپذیری جهت آن در محیط‌های بیابانی

(Fryberger and Dean, 1979: 142)

Table1. The classification of wind energy environments using drift potential (DP) and directional variability (modified from Fryberger and Dean, 1979: 142)

DP	قدرت فرسایش باد	RDP/DP	تغییرپذیری جهت باد	طبقه‌بندی جهات باد
<۲۰۰	کم	<۰/۳	زیاد	بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند
۴۰۰-۲۰۰	متوسط	۰/۳-۰/۸	متوسط	بادهای دوجته با زاویه منفرجه
>۴۰۰	زیاد	>۰/۸	کم	بادهای یک‌جهته



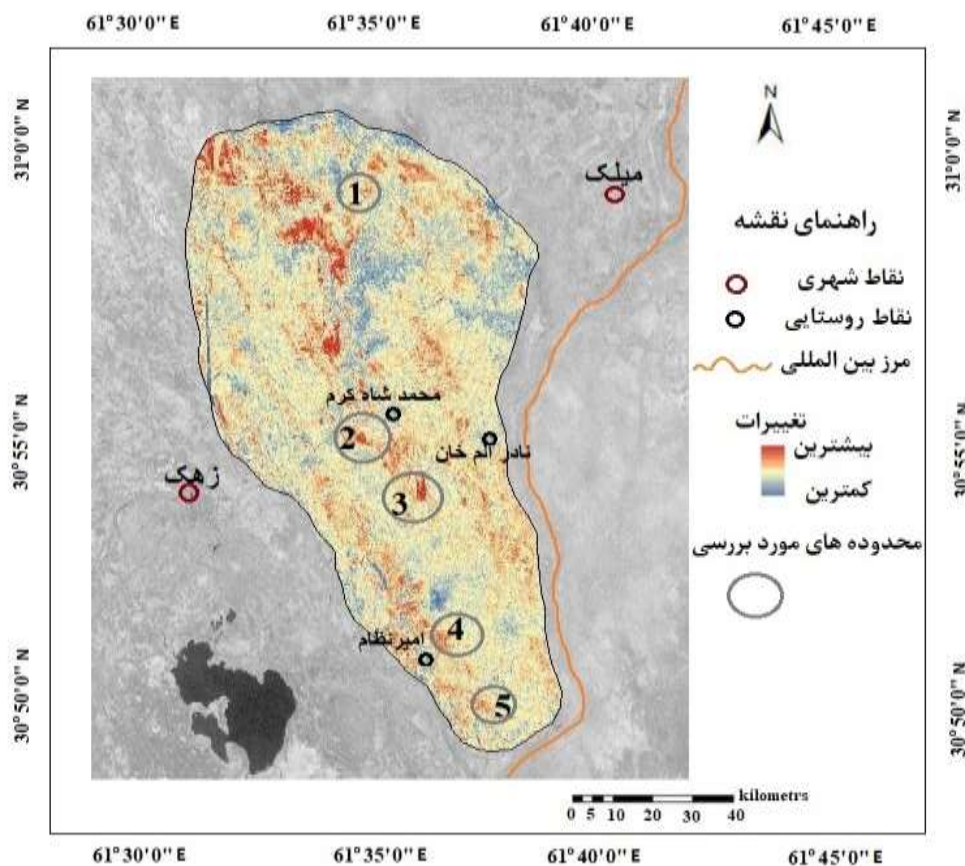
شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام پژوهش (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 2. Flowchart of research stages (Authors, 2019)

یافته‌های پژوهش

مهم‌ترین ویژگی تپه‌های ماسه‌ای، پویایی و حرکت تپه‌هاست. در این زمینه باید به اهمیت نقش باد در تغییرات مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای توجه ویژه داشت. مطالعات حرکت تپه‌های ماسه‌ای، پایه و اساس شناخت فرایندهای بادی و مقادیر انتقال ماسه را فراهم می‌کند.

در این مطالعه، پایش و آشکارسازی میزان تغییرات و جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای براساس استفاده از تصاویر لندست بوده است (2001، 2019). در مرحله اول برای کل محدوده ریگ با استفاده از تکنیک آشکارسازی تغییرات^۱، محدوده‌های دارای تغییرات مشخص شد (شکل ۳). براساس نقشه خروجی، قسمت‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده، بیشترین تغییرات را داشته و بیشترین گسترش تپه‌های ماسه‌ای نیز در این بخش بوده است. مقدار اختلاف دو تصویر در محدوده تپه‌های ماسه‌ای حدود ۲۲/۸۷ کیلومترمربع برآورد شد. الگو و روند حرکت تپه‌های ماسه‌ای بیان‌کننده حرکت تپه‌ها در جهت شمال غرب به جنوب شرق است.



شکل ۳. تغییرات صورت‌گرفته در محدوده ریگ زهرک بین سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۱۹ و موقعیت تپه‌های بررسی شده (نویسندگان، ۱۳۹۸)

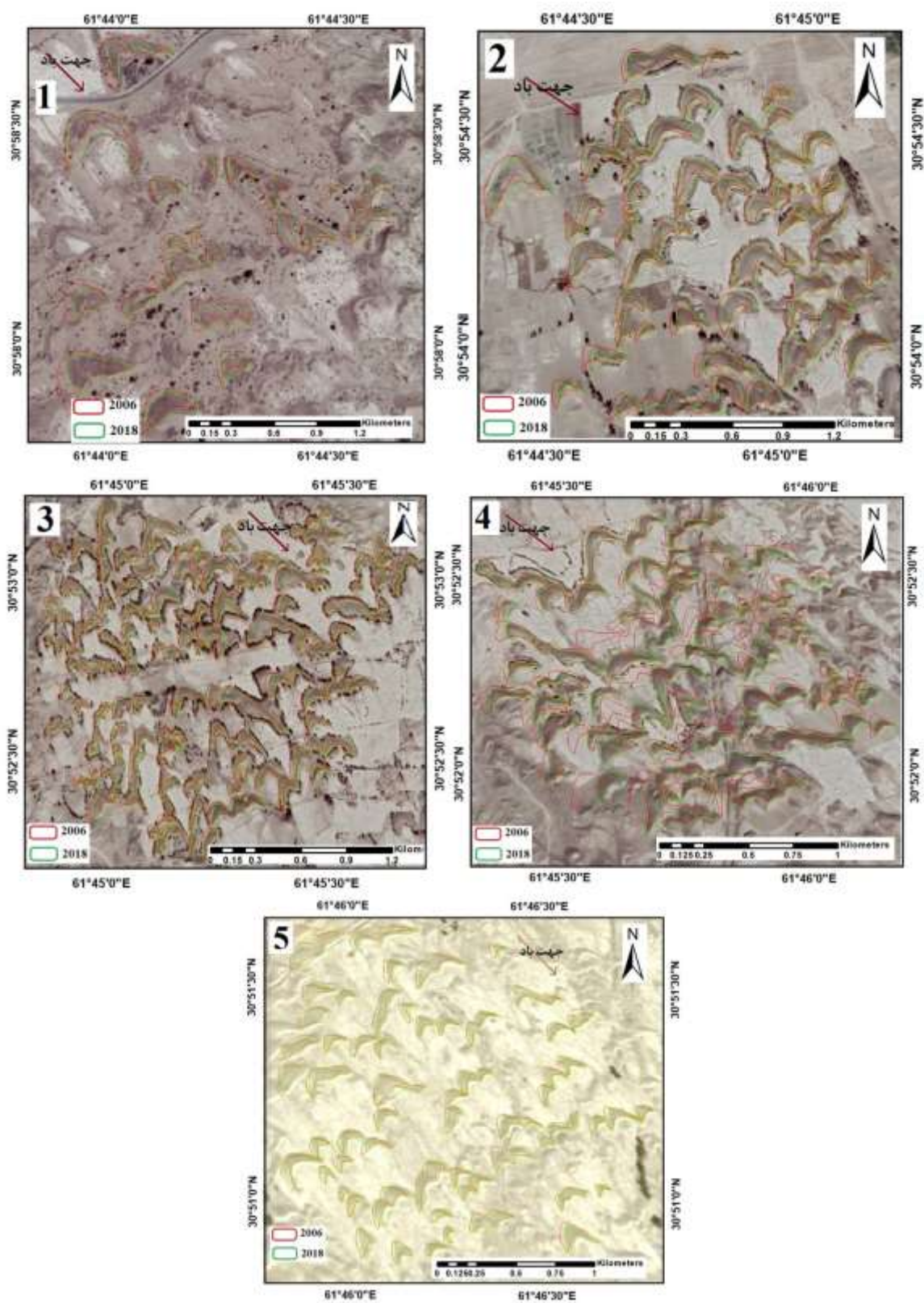
Figure 3. Changes in the range of drainage sand between years of 2001-2019 and the location of the studied hills (Authors, 2019)

در مرحله بعدی پژوهش برای آگاهی از میزان تغییرات و روند جابه‌جایی‌ها با کمک تصاویر گوگل‌ارث (۸ نوامبر ۲۰۰۶ و ۵ آگوست ۲۰۱۸)، بخش‌هایی از منطقه که تغییرات زیادی داشته است برای بررسی دقیق‌تر انتخاب شد. تصاویر جدید و قدیمی‌تر محدوده ریگ زهک با استفاده از نرم‌افزار *Stitch Map* به‌صورت زمین مرجع شده استخراج شد (شکل ۳). از پنج محدوده دارای بیشترین تغییرات مشخص شده در سطح ریگ، تعداد ۳۶۸ تپه ماسه‌ای ارزیابی کمی شد. براساس نتایج این بخش جهت جابه‌جایی‌ها در سطح ریگ شمال غربی - جنوب شرقی است. براساس ستون جابه‌جایی، بیشترین میزان جابه‌جایی برای محدوده ۳، ۲۴/۷۲ متر به دست آمد و کمترین میزان برای محدوده ۵، ۱۴/۱۶ متر محاسبه شد. میزان جابه‌جایی براساس ۱۲ سال تصاویر استفاده شده برای هر سال برآورد شده است؛ بر این اساس بیشترین و کمترین میزان جابه‌جایی به ترتیب به محدوده ۳ به میزان ۲/۰۶ متر در سال و محدوده ۵ به میزان ۱/۱۸ متر در سال مربوط است. میانگین میزان جابه‌جایی در مجموع ۳۶۸ تپه در سال، ۱/۵۳ متر محاسبه شد (جدول ۲، شکل ۴).

جدول ۲. مقادیر حرکت تپه‌های ماسه‌ای در محدوده ریگ زهک (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Table 2. Moving values of sand dunes in the area of Zahak sand (Authors, 2019)

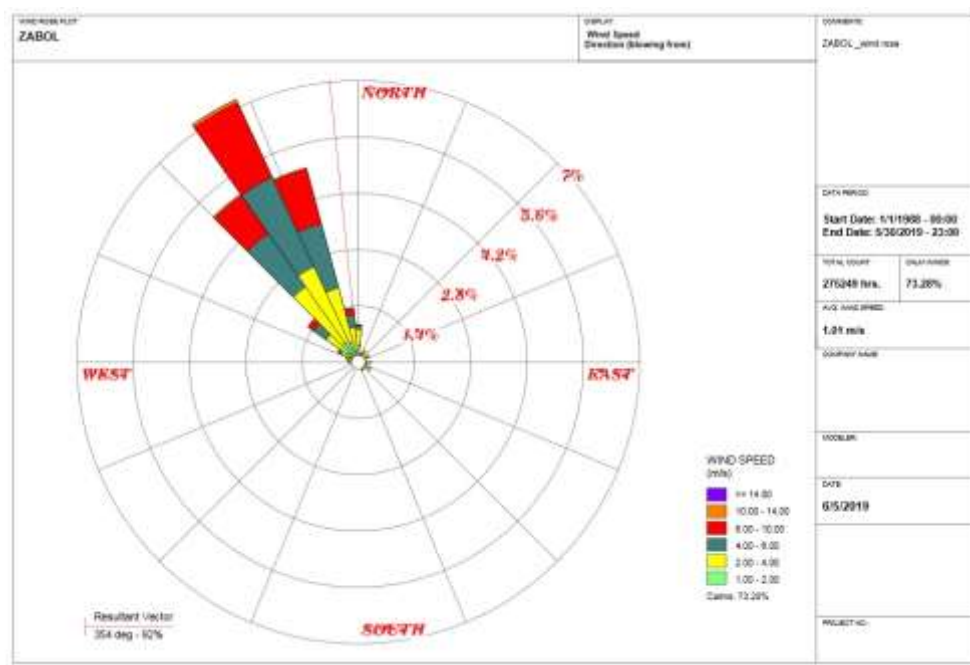
محدوده	تعداد تپه بررسی شده	مساحت (مترمربع)		اختلاف مساحت (مترمربع)	جهت جابه‌جایی	میزان جابه‌جایی (متر)	متوسط میزان جابه‌جایی در سال (متر)
		۲۰۱۸	۲۰۰۶				
۱	۲۳	۹۶۹۴	۱۲۵۵۲	۱۴۳۰	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۸/۷۲	۱/۵۶
۲	۶۳	۵۲۰۶۸	۵۹۸۹۸	۳۹۱۵	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۸/۱۲	۱/۵۱
۳	۱۴۶	۱۹۲۹۳۵	۲۱۱۰۸۱	۹۰۷۳	شمال غربی - جنوب شرقی	۲۴/۷۲	۲/۰۶
۴	۷۷	۶۹۷۲۱	۷۹۲۹۱	۴۷۸۵	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۵/۸۴	۱/۳۲
۵	۵۹	۵۱۴۷۶	۵۸۸۰۹	۳۶۶۶	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۴/۱۶	۱/۱۸



شکل ۴: الگوی حرکتی تپه‌های ماسه‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ (نویسندگان، ۱۳۹۸)
 Figure 4. Movement pattern of sand dunes in the period 2006 to 2018 (Authors, 2019)

رژیم باد و حمل ماسه

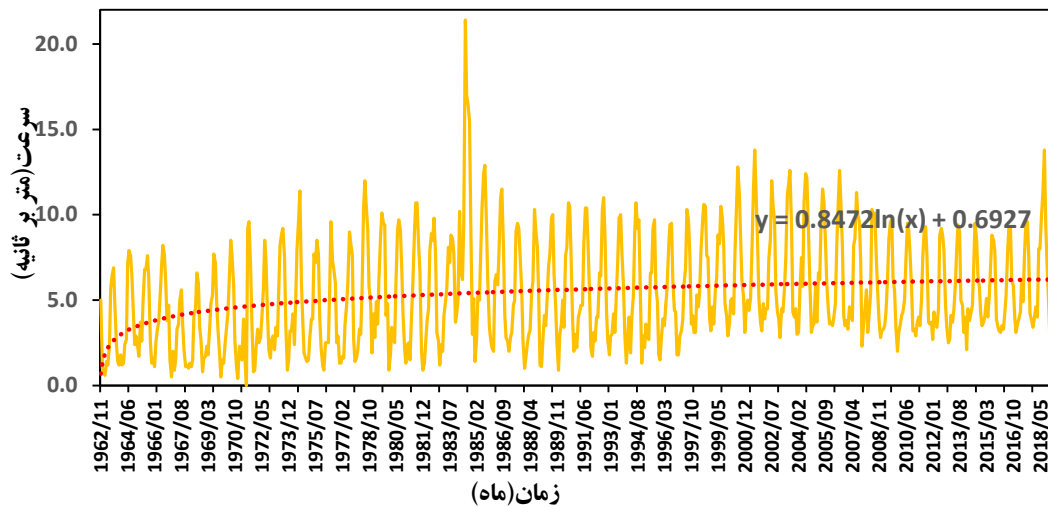
بی‌تردید اصلی‌ترین عامل فرسایش بادی در منطقه سیستان، وقوع طوفان‌های ماسه بر اثر وزش بادهای ۱۲۰ است. این بادهای که با شدت بیشتر از ۷۰ و گاهی ۱۴۸ کیلومتر در ساعت (سرگزی، ۱۳۸۴: ۲۹) در دوره‌های زمانی نزدیک به هم و در مدت بیش از ۶ ماه از سال و در حالت نرمال به وقوع می‌پیوندند، عامل اصلی فرسایش بادی در منطقه‌اند (سلیقه، ۱۳۸۲: ۱۱۰) و گاهی چاله‌هایی به عمق ۲ تا ۳ متر و عرض ۶ تا ۹ متر ایجاد می‌کنند (نوروزهی، ۱۳۷۲: ۱۳). حداکثر سرعت باد محتمل در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله، نشان‌دهنده تندی بادی با سرعت ۱۶۵ کیلومتر در ساعت است که حکایت از اهمیت سرعت زیاد بادهای در این منطقه دارد (خسروی، ۱۳۸۴: ۱۷۰). به‌منظور امکان‌سنجی انرژی باد پس از آماده‌سازی داده‌های ساعتی، سرعت و جهت باد مربوط به ایستگاه زابل در محیط اکسل با استفاده از نرم‌افزار WR PLOT، گلباد ایستگاه ترسیم شد (شکل ۵).



شکل ۵. نمودار گلباد در ایستگاه زابل (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 5. Flower diagram at Zabol station (Authors, 2019)

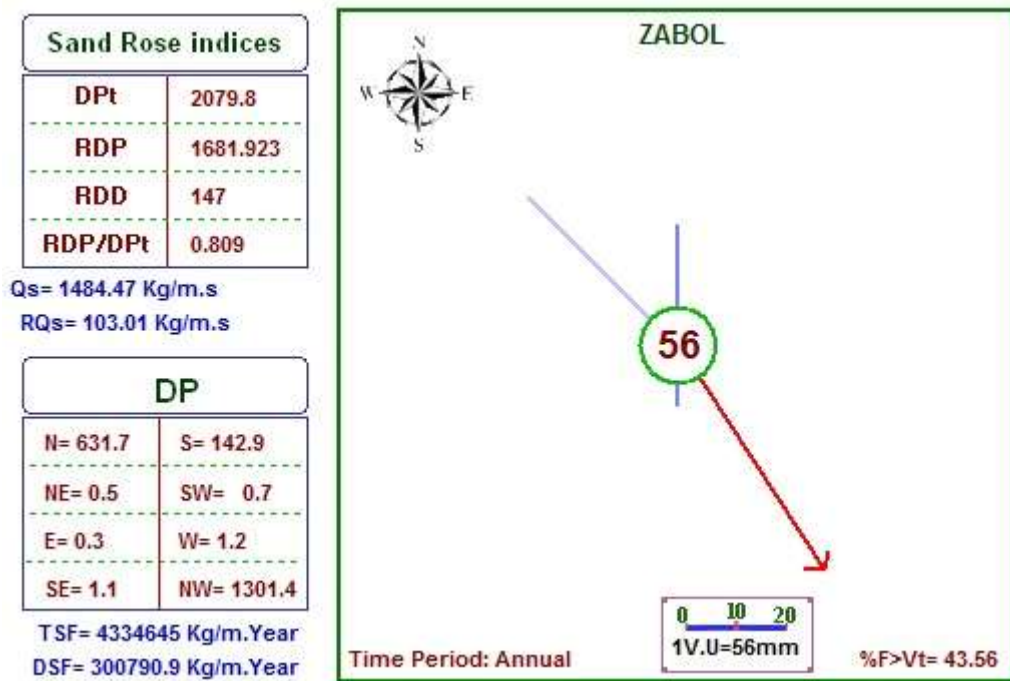
بر مبنای شکل مربوط به گلباد در هر ایستگاه جهت وزش باد غالب به یک سمت مشخص است؛ با توجه به گلباد ایستگاه زابل، بیش از ۷ درصد بادهای غالب این ایستگاه سرعتی مساوی با ۶ متر بر ثانیه یا بیشتر از آن دارند که بیان‌کننده عبور از سرعت آستانه فرسایش بادی است. در کنار اطلاعات مربوط به داده‌های باد غالب در این ایستگاه، بررسی روند تغییرات سرعت باد در این ایستگاه در بازه‌های زمانی موجود نشان می‌دهد در طول ۵۶ سال گذشته متوسط سرعت باد در ایستگاه زابل رو به افزایش بوده است؛ به طوری که میانگین سرعت باد از ۲/۵ متر بر ثانیه در ماه در سال ۱۹۶۲ به حدود ۴/۸ متر بر ثانیه در ماه در سال ۲۰۱۸ رسیده است که افزایش ۲/۳ متر بر ثانیه را در این مدت نشان می‌دهد (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار تغییرات سرعت باد در ایستگاه زابل (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 6. Diagram of wind speed changes in Zabol station (Authors, 2019)

رخداد حمل ماسه، کوچک‌ترین بخش از فرایند حمل ماسه است (Lancaster et al., 2010: 3; Delgado et al., 2011: 221; Gillies and Lancaster, 2013: 787; Yurk et al., 2013: 46). مطالعه رخداد حمل ماسه به‌مثابه نخستین قدم در درک فرایندهای حمل شن و ماسه در نظر گرفته شده است؛ بر این اساس با استفاده از نرم‌افزار Sand Rose Graph ویژگی‌های حمل ماسه در ایستگاه زابل بررسی شد؛ نتایج پارامترهای آماری برای ایستگاه زابل در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷. نمودار گل‌ماسه در ایستگاه زابل (نویسندگان، ۱۳۹۸)

Figure 7. Golmaseh diagram at Zabol station (Authors, 2019)

با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار پتانسیل حمل ماسه (DPT) در ایستگاه زابل ۲۰۷۹/۸ است که براساس تقسیم‌بندی فرایبرگر و دین^۱ (1979؛ ارائه شده در جدول ۱) انرژی باد در این ایستگاه زیاد ارزیابی شده است؛ ستون بردار توان حمل ماسه با علامت RDP نشان داده شده است. داده‌های این ستون بیان‌کننده این است که بیشترین مقدار توان حمل ماسه برای این ایستگاه برابر با ۱۶۸۱/۹ بوده و شاخص تغییرپذیری جهت‌های باد (UDI) یا همگنی جهت حمل ماسه که نسبت مقدار نهایی حمل ماسه به کل توان حمل ماسه است. براساس این شاخص، تغییرپذیری جهات باد برای ایستگاه زابل در گروه تغییرپذیری کم با طبقه‌بندی بادهای یک‌جهته و بیان‌کننده شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای عرضی شکل است. داده‌های ستون جهت خالص حرکت ماسه با علامت اختصاری RDD نشان داده شده است. با توجه به داده‌های ستون RDD برای ایستگاه زابل به نظر می‌رسد تأثیر مستقیم بر روند جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در سطح ریگ زهک داشته است. مجموع ماسه جابه‌جاشده (DSF) براساس رابطه لتو- لتو که پیش‌فرض نرم‌افزار هم این رابطه است، بیشترین مقدار ماسه جابه‌جاشده در ایستگاه زابل، ۳۰۰/۸ تن بر متر در سال و دبی خالص جریان ماسه (RQS)، ۱۰۳ کیلوگرم بر متر در سال برآورد شده که بیان‌کننده مقدار حمل زیاد ماسه در منطقه است. استفاده از داده‌های این ایستگاه، اطلاع از سمت و سوی بادهایی است که بر الگوی حرکتی تپه‌های ماسه‌ای سطح ریگ تأثیر می‌گذارند. بیشترین سرعت آستانه برای این ایستگاه در جهت شمال غربی- جنوب شرقی و روند حرکت تپه‌های ماسه‌ای نیز شمال غربی- جنوب شرقی در تطابق با بادهای ۱۲۰ روزه سیستان بوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تلاش شده است با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های باد ایستگاه بادسنجی، میزان فعالیت و الگوی جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در محدوده ریگ زهک مشخص شود. نتایج بررسی ۳۶۸ تپه در بخش‌های مختلف سطح ریگ نشان‌دهنده جابه‌جایی با روند شمال غربی- جنوب شرقی است. این نتیجه با نتایج تحلیل داده‌های جهت‌الگوی باد همخوانی و مطابقت دارد؛ همچنین میانگین مقدار جابه‌جایی ۱/۵۳ متر در سال برای بازه زمانی ۱۲ ساله (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸) به دست آمده است. این نتیجه با نتایج داده‌های ایستگاه بادسنجی زابل که مقدار حمل ماسه را بیش از ۳۰۰ تن در متر برای یک سال نشان می‌دهد و بررسی روند تغییرات سرعت باد که افزایش سرعت متوسط باد را در طول ۵۶ سال گذشته در این ایستگاه نشان می‌دهد، همخوانی نداشته و بیان‌کننده واقعیتی بسیار بیشتر از این مقدار جابه‌جایی است؛ بر این اساس و با توجه به تصاویر گوگل‌ارث سال ۲۰۱۸ که تثبیت ماسه‌های روان‌شده را نشان می‌داد، حداکثر این مقدار حاصل شده به پیش از تثبیت تپه‌های ماسه‌های فعال مربوط بوده است و علاوه بر آن ماسه‌های روان در سطح زمین و مستقل از تپه‌های ماسه‌ای حرکت می‌کنند که با تصاویر قابل اندازه‌گیری نیستند.

منابع

- ابراهیم‌زاده، عیسی، (۱۳۷۹). *تحلیلی منطقه‌ای از روابط متقابل شهری و روستایی در سیستان*، رساله دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری منطقه‌ای، دانشگاه اصفهان، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، ۸۵ - ۶۵.
- احمدی، حسن، (۱۳۸۵). *ژئومورفولوژی کاربردی؛ بیابان - فرسایش بادی*، جلد ۲، چاپ ۳، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- احمدیان، محمدعلی، (۱۳۸۷). *بیابان (نگرشی سیستمی به فرایند بیابان‌زایی و بیابان‌زدایی)*، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۴، شماره ۱-۲ (پیاپی ۵۲ و ۵۳)، ۱۴۴ - ۱۵۹.
- بنیاد مسکن انقلاب اسلامی استان سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۹). *واحد فنی و مطالعات عمران روستایی*.
- پیری، حلیمه، عباس‌زاده، معصومه، راهداری، وحید، ملکی نجف‌آبادی، سعیده، (۱۳۹۲). *ارزیابی تطبیقی ۴ نمایه خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای؛ مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان*، نشریه مهندسی منابع آب، دوره ۶، شماره ۱۷، ۲۵ - ۳۶.
- خسروی، محمود، (۱۳۸۴). *طرح پژوهشی اثرات اکولوژیکی و زیست‌محیطی بادهای ۱۲۰ روزه سیستان*، سازمان حفاظت محیط زیست استان سیستان و بلوچستان، مشاور طرح پژوهشکده علوم زمین و جغرافیای سیستان و بلوچستان، ۳۰۰.
- سرگزی، حسین، (۱۳۸۴). *منشأیابی و ارزیابی شدت و خسارات تپه‌های ماسه‌ای بیابان نیاتک سیستان*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه منابع طبیعی گرگان، ۱۳۶ صفحه.
- سلیقه، محمد، (۱۳۸۲). *توجه به باد در ساخت کالبد فیزیکی شهر زابل*، نشریه جغرافیا و توسعه، دوره ۱، شماره ۲، ۱۰۹ - ۱۲۱.
- لطیفی، لیلا، (۱۳۸۵). *بررسی روند پیشروی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در خشکسالی‌های اخیر در شمال و شرق دشت سیستان*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، گروه جغرافیا.
- مقصودی، مهران، محمدی، ابوطالب، خان‌بابایی، زهرا، محبوبی، صدیقه، بهاروند، مهدی، حاجی‌زاده، عبدالحسین، (۱۳۹۶). *پایش جابه‌جایی ریگ و برخان‌های غرب لوت (پشتویه)*، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۴، ۱۷۶ - ۱۸۹.
- نگارش، حسین، لطیفی، لیلا، (۱۳۸۷). *تحلیل ژئومورفولوژیکی روند پیشروی تپه‌های ماسه‌ای شرق دشت سیستان در خشکسالی‌های اخیر*، جغرافیا و توسعه، دوره ۶، شماره ۱۲، ۴۳ - ۶۰.
- نوروزهی، فرامرز، (۱۳۷۲). *بررسی اثرات تخریبی سیلاب‌های رودخانه هیرمند*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه جغرافیا، ۱۹۵ صفحه.
- Ahmadi, H., (2006). *Applied Geomorphology Volume 2 Desert - Wind Erosion*, Tehran, Printing turn 3, University of Tehran Press.

- Ahmadian, M.A., (2008). **Desert (A Systematic Approach to the Desertification and Desertification Process)**, Geographical Research Quarterly, Nos.1 and 2, Consecutive 52 and 53, pp 146- 159.
- Al-Awadhi, J.M., Al-Helal, A., Al-Enezi, A., (2005). **Sand drift potential in the desert of Kuwait**, J. Arid Environ, 63, pp 425- 438.
- Bagnold, R.A., (1941). **The Physics of Blown Sand and Desert Dunes**, Chapman and Hall, London, pp 104- 106.
- Baitis, E., Kocurek, G., Smith, V., Mohrig, D., Ewing, R.C., Peyret, A.P.B., (2014). **Definition and origin of the dune-field pattern at White Sands**, New Mexico, Aeolian Research 15, 269-287.
- Delgado- Fernandez, I., Davidson- Arnott, R., (2011). **Meso-scale aeolian sediment input to coastal dunes: the nature of aeolian transport events**, Geomorphology 126, 217- 232.
- Dong, Z.B., Wang, T., Wang, X.M., (2004). **Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran desert**, Geomorphology 60, 191- 203.
- Fryberger, S.G., Dean, G., (1979). **Dune forms and wind regime**, U.S. Geological Survey Professional Paper 1052-F, pp 137- 169.
- Fryberger, S.G., Al-Sari, A.M., Clisham, T.J., Rizvi, S.R., Al-Hinai, K.G., (1984). **Wind sedimentation in the Jafurah Sand Sea, Saudi Arabia**, Sedimentology 31, pp 413- 431.
- Gillies, J.A., Lancaster, N., (2013). **Large roughness element effects on sand transport**, Oceano Dunes, California. Earth Surf. Process. Landf. 38, 785- 792.
- Hereher, M., (2018). **Geomorphology and drift potential of major aeolian sand deposits in Egypt**, Geomorphology, Vol 304, pp 113- 120.
- Hamdan, M.A., Refaat, A.A., Abdel Wahed, M., (2016). **Morphologic characteristics and migration rate assessment of barchans dunes in the SoutheasternWestern Desert of Egypt**, Geomorphology 257, 57- 74.
- Hermas, E., Leprince, S., El-Magd., I.A., (2012). **Retrieving sand dune movements using sub-pixel correlation of multi-temporal optical remote sensing imagery**, northwest Sinai Peninsula, Egypt. Remote Sensing of Environment 121, 51- 60.
- Hesp, P., Davidson-Arnott, R., Walker, I., Ollerhead, J., (2005). **Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island Canada**, Geomorphology 65, 71- 84.
- Ihab, N.L.M., Verstraeten, G., (2012). **Analyzing dune dynamics at the dune-field scale based on multi-temporal analysis of Landsat-TM images**, Remote Sensing of Environment 119, 105- 117.
- Kuriyama, Y., Mochizuki, N., Nalashima, T., (2005). **Influence of vegetation on Aeolian sand transport rate from a backshore to a foreshore at Hasaki, Japan**, Sedimentology 52, 1123- 1132.
- Lancaster, N., Nickling, W.G., Gillies, J.A., (2010). **Sand transport by wind on complex surfaces: field studies in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica**, J. Geophys. Res. 115, F03027. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JF001408>.
- Latifi, L., (2006). **Investigating the progress of sand dunes using satellite images in recent droughts in the north and east of Sistan plain**, Master Thesis, Department of Geography, Supervisor: Hossein Negaresh, Islamic Azad University, Mashhad Branch.
- 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, 283- 297.
- Maghsoudi, M., Mohammadi, M., Khanbabaee, Z., Mahboubi, S., Baharvand, M., Hajizadeh, A.H., (2017). **Monitoring the movement of erg and Barkhans in the west of Lut (Peshouieh)**, Quantitative Geomorphological Research, Fifth Year, Vol 5, No 4, pp 189- 176.
- Maghsoudi, M., Navidfar, A., Mohammadi, A., (2017). **The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data**, Natural Environment Change Vol 3, No 1, Winter & Spring 2017, pp 33- 43.
- Pye, K., Tsoar, H., (2009). **Aeolian Sand and Sand Dunes**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.
- Salighe, M., (2003). **Attention to the wind in the construction of the physical body of Zabol**, Journal of Geography and Development, Vol 1, No 2, pp 121- 109.

- Sargzi, H., (2005). **Origin and assessment of severity and damage of sand dunes in Niatak Sistan desert**, Master Thesis, Supervisor: Majid Onagh, Gorgan University of Natural Resources, 136 p.
- Sherman, D.J., Li, B., (2012). **Predicting aeolian sand transport rates: A reevaluation of models**, *Aeolian Research*, 3 (4), 371- 378.
- Sparavigna, A.C., (2013). **A study of moving sand dunes by means of satellite images**, *International Journal of Sciences*, 2.
- Tsoar, H., (2005). **Sand dunes mobility and stability in relation to climate**, *Phys. A* 357, 50- 56.
- Wang, X., Eerdun, H., Zhou, Z., Liu, X., (2007). **Significance of variations in the wind energy environment over the past 50 years with respect to dune activity and desertification in arid and semiarid northern China**, *Geomorphology* 86, pp 252- 266.
- Wiggs, G.F.S., Atherton, R.J., Baird, A.J., (2004). **Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values**, *Sedimentology* 51, 95- 108.
- Yao, Z.Y., Wang, T., Han, Z.W., Zhang, W.M., Zhao, A.G., (2007). **Migration of sand dunes on the northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China**, *J. Arid Environ.* 70, pp 80- 93.
- Wang, Z.Y., Han, Z.W., Zhang, W.M., Zhao, A.G., (2007). **Migration of sand dunes on the northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China**, *J. Arid Environ.* 70, pp 80- 93.
- Yurk, B.P., Hansen, E.C., Hazle, D., (2013). **A deadtime model for the calibration of impact sensors with an application to a modified miniphone sensor**, *Aeolian Res.* 11, 43- 54.
- 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, pp 102- 115.
- Zhang, Z., Dong, Z., Li, C., (2015). **Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert**, *Aeolian Research* 17, 1- 13.

