

Classification and analysis of the morphological and dynamic status of sand dunes (Case study: Khuzestan Reg)

Mehran Maghsoudi ^{a,*}, Hamid Ganjaeian ^b

^a Professor of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran

^b PhD of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran

Article History (Received: 2025/02/6

Research Full Paper

Accepted: 2025/03/8)

Extended abstract

1-Introduction

One of the important phenomena of arid and semi-arid regions is sand dunes, which are composed of a series of sand dunes. Sand dunes cover about 5 million square kilometers of the earth's surface. One of the most important features of sand dunes in sand dunes is their active dynamics. In fact, sand dunes do not remain in place after formation and are moved by the winds of the region. According to a report by the United States Geological Survey, the changes and displacement of sand dunes are increasing, as is climate change. In fact, climate change and land use changes have caused the displacement and expansion of sand dunes in recent years. The hazards caused by sand dunes are considered one of the important environmental issues of arid and semi-arid regions. In fact, the most important feature of sand dunes is their dynamism and movement, which makes them a source of crisis and a problem for urban and rural centers, economic centers, etc. The geographical location of Iran has led to the presence of numerous sand dunes in many eastern and southern regions of the country. Among the sand dunes in Iran, the Khuzestan Sand Dune is very important because it is located in the path of westerly winds and has been a challenge for planners in recent years. The Khuzestan Sand Dune consists of a large number of small and large sand dunes, each of which has its own dynamics and morphology. Given the importance of the subject, the aim of this research is to evaluate the morphological status and movement of the Khuzestan Sand Dune and analyze their relationship with the characteristics of the winds in the region.

2-Materials and Methods

In this study, Landsat satellite images, Google Earth images, and statistical information related to the speed and direction of the winds in the region were used as the most important research data. The most important research tools were ArcGIS (to prepare the desired maps) and WRplot (to analyze the speed and direction of the winds in the region). Considering the subject and objectives, this research was conducted in several stages. In the first stage, using Google Earth images, the exact area of the Khuzestan sand dune was drawn, and then its morphometric status was examined. In the second stage, according to the shape of the sand dunes, the Khuzestan sand dune was divided into different classes. In the third stage, in order to evaluate the displacement status of the sand dunes, sample points (112 sample points) were used. In fact, using Google Earth images, individual sand dunes were selected and then, based on Google Earth and Landsat images, their movement rate was evaluated during the years 2005 to 2020. In the fourth stage, in order to analyze the winds in the region, information from 8 meteorological stations was used and based on them, the speed and direction of the winds in the region were evaluated. In this stage, first, the seasonal and annual average wind speed (m/s) of the stations was calculated and then, using the IDW interpolation method, a map of the wind speed of the region within the sand dunes was prepared.

3-Discussion and Results

The morphology of sand dunes is directly influenced by the conditions prevailing on the sandbanks (obstacles, vegetation, etc.) and also by the wind characteristics of the region. The study of the morphology of sand dunes in the Khuzestan Sand Dunes and their movement rate indicates that in addition to natural factors, human factors, including the stabilization of sand dunes through the creation

* Corresponding Author: maghsoud@ut.ac.ir

of vegetation, have also played an important role. Based on the results of calculating the wind speed in the Khuzestan Sand Dunes area, the southern regions of the main Khuzestan Sand Dunes had the highest average wind speed. Considering that some of these areas are considered active areas and also, based on the results of monitoring the movement of sand dunes, they had the highest displacement, therefore, the wind speed of the region has been the determinant of the activity and movement of sand dunes in the region, although in some areas, due to the stabilizations, the displacement rate did not match the wind speed. In terms of sand dune morphology, the main sand dune of Khuzestan has a variety of shapes of sand dune types, which reflects the influence of winds from different directions, the morphological state of the region, and the intervention of human factors. Also, in terms of morphology, the isolated sand dune formations of Khuzestan, because they are mostly stabilized, have very little diversity and are mainly in the form of thin and medium-thick sand covers, so in these areas, the intervention of human factors has prevented the movement of sand dunes and created a specific morphology in them.

4-Conclusion

The Khuzestan Sand Dune is one of the largest sand dunes in the country, covering an area of 2629 square kilometers and consisting of many small and large sand dunes. The influence of various factors on this sand dune has resulted in the formation of various types of sand dunes in the Khuzestan Sand Dune, including complex sand dunes, parabolic, barkhan and barkhanoid, simple transverse, compound transverse, and sand cover. The results of evaluating the extent of various forms of sand dunes have shown that a large part of the region is covered by medium-thick sand covers, covering 697.5 square kilometers of the region, equivalent to 26.5 percent of the area of the Khuzestan Sand Dune. The results of analyzing the activity status of the Khuzestan Sand Dune have also shown that many parts of this sand dune are semi-active, covering 1,379.5 square kilometers, equivalent to 52.5 percent of its area. Also, active and inactive areas cover 1120.8 and 129 square kilometers, respectively, equivalent to 42.6 and 4.9 percent of the sandbank area. Based on the results, the sand dunes of Khuzestan's Rig have moved between 1 and 55 meters during the years 2005 to 2020, with the highest amount of movement being in the middle areas of Khuzestan's main Rig. Also, the results of the analysis of the winds in the region have shown that high wind speeds in some seasons, including spring, play an important role in the movement of sand dunes, and different wind directions have also caused morphological diversity in the sand dunes of the region. Also, human activities, including the stabilization of sand dunes by vegetation, have caused sand dunes to remain stationary in many areas, despite the availability of conditions.

Keywords: Khuzestan Reg, Wind speed and direction, Shape of sand dunes

Cite this article: Maghsoudi, M & Ganjaeian, H (2025). Classification and analysis of the morphological and dynamic status of sand dunes (Case study: Khuzestan Reg). *Journal of Environmental Erosion Research*. 2025; 1-19. <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.1>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.1>

Published by Hormozgan University Press.

URL: <http://magazine.hormozgan.ac.ir>

طبقه‌بندی و تحلیل وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای (مطالعه موردی: ریگ خوزستان)

مهران مقصودی*: استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

حمید گنجائیان: دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸)

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.2.1>

چکیده

موقعیت جغرافیایی و وضعیت طبیعی ایران سبب شده است تا ریگزارهای آن دارای گستردگی زیادی باشد. از جمله ریگزارهای ایران، ریگ خوزستان است که از تعداد زیادی ریگ‌های کوچک و بزرگ تشکیل شده است. با توجه به اینکه نواحی سکونتگاهی و فعالیت‌های انسانی دشت خوزستان در معرض تغییرات این ریگزارها قرار دارند، مطالعه و بررسی آن‌ها حائز اهمیت است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. در این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست، تصاویر گوگل ارث و اطلاعات آماری مربوط به سرعت و جهت بادهای منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، ArcGIS و WRplot بوده است. همچنین در این تحقیق از شاخص‌های سرعت و جهت باد استفاده شده است. در این تحقیق ابتدا محدوده دقیق ریگزارهای خوزستان ترسیم شده و سپس از نظر مورفولوژی طبقه‌بندی شده است. در ادامه، وضعیت دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان ارزیابی شده است و سپس به تحلیل ارتباط بین سرعت و جهت بادهای منطقه با مورفولوژی و دینامیک تپه‌های ماسه‌ای پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که ریگ خوزستان با ۲۶۲۹ کیلومترمربع وسعت، از اشکال مختلفی از تپه‌های ماسه‌ای تشکیل شده است. نتایج آنالیز وضعیت فعالیت ریگ خوزستان نشان داده است که حدود ۴۳ درصد از وسعت آن را مناطق فعال دربر گرفته است و در مجموع، تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان تحت تاثیر عوامل مختلف طبیعی و انسانی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بین ۱ تا ۵۵ متر جابجایی داشته‌اند. همچنین نتایج آنالیز بادهای منطقه نشان داده است که سرعت زیاد باد در بعضی از فصول از جمله بهار نقش مهمی در جابجایی تپه‌های ماسه‌ای دارد و جهت مختلف باد نیز باعث تنوع مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای منطقه شده است. همچنین فعالیت‌های انسانی از جمله تثبیت تپه‌های ماسه‌ای توسط پوشش گیاهی سبب شده است تا در بسیاری از مناطق، با وجود فراهم بودن شرایط، تپه‌های ماسه‌ای بدون جابجایی باشند.

واژگان کلیدی: ریگ خوزستان، سرعت و جهت باد، شکل تپه‌های ماسه‌ای

۱-مقدمه

ریگزارها از پدیده‌های مهم مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند و به مجموعه‌ای از تپه‌های ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در شکل و اندازه‌های مختلفی هستند (Del Valle et al, 2008., Blasco et al, 2020). ریگزارها حدود ۵ میلیون کیلومترمربع از وسعت سطح زمین را دربر گرفته‌اند (Livingstone et al, 2010). از مهم‌ترین ویژگی‌های تپه‌های ماسه‌ای موجود در ریگزارها، دینامیک فعال آن‌ها است (Maghsoudi et al, 2017., Diao et al, 2025). در واقع، تپه‌های ماسه‌ای پس از تشکیل در محل خود باقی نمی‌مانند و تحت تاثیر بادهای منطقه جابجا می‌شوند (Ahrari ridi, 2017). بر اساس گزارش سازمان زمین‌شناسی ایالت متحده آمریکا، تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی در طی سال‌های اخیر سبب جابجایی و گسترش تپه‌های ماسه‌ای شده است (Qong, 2000., Redasteer et al, 2011). مناطق گرم و خشک دارای مخاطرات مختلفی از جمله ایجاد کانون‌های گردوغبار و حرکت تپه‌های ماسه‌ای هستند (Safari Namivandi et al, 2023., Ganjaeian et al, 2023., Negahban et al, 2024). مخاطرات ناشی از تپه‌های ماسه‌ای یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Mahyou, 2010., Guan et al, 2025). در واقع، مهم‌ترین ویژگی تپه‌های ماسه‌ای، پویایی و حرکت تپه‌ها است که آن‌ها را به کانون بحران تبدیل کرده و برای مراکز شهری و روستایی، مراکز اقتصادی و غیره مشکل‌آفرین است (Mosavi et al, 2010., Mashhadi, 2024., Ganjaeian et al, 2025).

موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا در بسیاری از مناطق آن، دارای ریگزارهای متعددی باشیم. از جمله ریگزارهای ایران، ریگ خوزستان است که به دلیل اینکه در مسیرهای بادهای غربی قرار دارد، بسیار حائز اهمیت و در طی سال‌های اخیر به عنوان یک چالش برای برنامه‌ریزان مطرح شده است. ریگ خوزستان از تعداد زیادی از ریگزارهای کوچک و بزرگ تشکیل شده است که هر کدام دارای دینامیک و مورفولوژی خاصی هستند. با توجه به موارد مذکور، مطالعه وضعیت جابجایی و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های محیطی داشته باشد و به مسئولین و برنامه‌ریزان در زمینه تثبیت ریگزارها و طرح‌هایی که درآیند صورت خواهد پذیرفت، کمک نمایند که خسارات و آسیب‌های ناشی از جابجایی تپه‌های ماسه‌ای کاهش یابد.

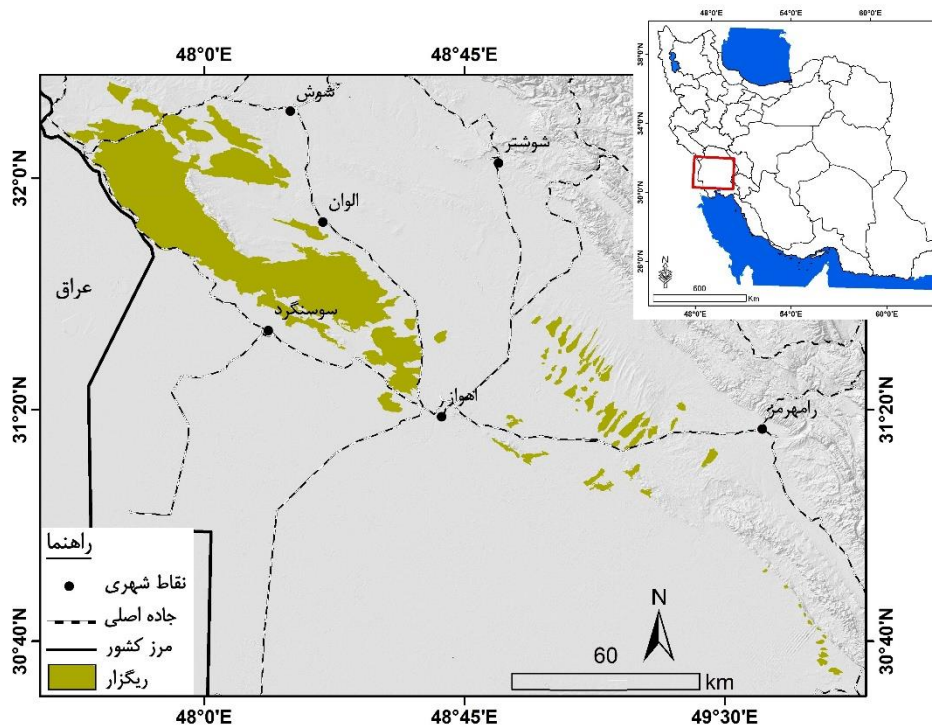
در ارتباط با موضوع مورد مطالعه تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به Zu و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد که به وضعیت ریگزارهای صحرای تاکلماکان و ارتباط آن با وضعیت اقلیمی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که بیش‌ترین تغییرات ریگزارهای این منطقه مربوط به مناطق شمالی و شرقی آن بوده است. Fitzsimmons و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی وضعیت مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای قزاقستان و غرب چین و ارتباط آن با وضعیت توپوگرافی و خصوصیات بادهای منطقه پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر ارتباط مستقیم بین سرعت بادهای منطقه بر مورفولوژی و دینامیک تپه‌های ماسه‌ای است. Hu و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی نقش خصوصیات باد در مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای سواحل شرقی دریاچه چینگ‌های در کشور چین پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که جهات متفاوت وزش بادهای منطقه، باعث شکل‌گیری الگوهای متفاوت تپه‌های ماسه‌ای شده است. Ma و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش‌های سنجش از دور، به بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای مناطق جنوب شرقی صحرای تاکلماکان پرداختند. نتایج این نشان داده است که علاوه بر عوامل اقلیمی، اندازه رسوبات نیز نقش مهمی در شکل‌گیری نوع تپه‌های ماسه‌ای داشته است. Ge و همکاران (۲۰۲۵) بر مبنای مدل‌های رقومی ارتفاعی، به

مطالعه روش‌های خودکار استخراج تپه‌های ماسه‌ای در صحرای Badain Jaran پرداختند. نتایج این دقیق بیانگر دقت حدود ۹۰ درصدی روش مورد استفاده بوده است. Maghsoudi و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از روش‌های سنجش از دور، به ارزیابی کارایی روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده و نظارت نشده در پایش تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر دقت نسبی روش طبقه‌بندی نظارت شده و عدم دقت روش طبقه‌بندی نظارت نشده در پایش موقعیت ریگزارها است. Maghsoudi و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و اطلاعاتی آماری، به پایش تغییرات سرعت باد و اثر آن بر جابجایی و تغییرات تپه‌های ماسه‌ای در ریگ لوت پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که بیش‌ترین میزان تغییرات عمودی و افقی ریگ لوت مربوط به مناطق جنوبی آن بوده است. Sharifi Pichon و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و انطباق آن با داده‌های باد در منطقه ریگ زرین پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر تاثیر مستقیم باد بر مورفولوژی و دینامیک تپه‌های ماسه‌ای منطقه است. Hanifehpor و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از شاخص لنکستر، به پایش و پیش‌بینی عوامل اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در کویر سیرجان پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر تاثیر مستقیم تغییرات اقلیمی بر دینامیک تپه‌های ماسه‌ای منطقه است. Maghsoudi و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات آماری به تحلیل وضعیت مورفولوژی و تغییرات ریگ‌های آذربایجان پرداختند و میزان جابجایی سالانه این ریگ را ۷/۳ متر برآورد کرده‌اند. بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که در بیش‌تر این تحقیقات، بر وضعیت جابجایی و تغییرات تپه‌های ماسه‌ای تاکید شده است. در این تحقیق در راستای تحقیقات پیشین، وضعیت دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن با سرعت و جهت بادهای منطقه ارزیابی شده است، اما نوآوری این تحقیق، طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای منطقه بر اساس شکل و ارائه یک طبقه‌بندی بومی بوده است.

۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حاضر منطبق بر ریگ خوزستان است. ریگ خوزستان از ریگزارهای بزرگ ایران است که در جنوب غربی کشور واقع شده است. این ریگ به‌صورت یکپارچه و پیوسته نیست و از تعداد زیادی ریگ کوچک و بزرگ تشکیل شده است که با روند شمال غربی-جنوب شرقی کشیده شده است، به همین دلیل از نظر موقعیت ریاضی بین طول جغرافیایی ۳۶° ۴۷' تا ۵۴° ۴۹' شرقی و عرض ۱۳° ۳۰' تا ۱۶° ۳۲' شمالی قرار گرفته است. از نظر تقسیمات سیاسی بخش زیادی از این ریگ در محدوده استان خوزستان قرار دارد و تنها بخش کوچکی از آن در مناطق جنوبی شهرستان دهلران در استان ایلام واقع است. همچنین این ریگ در استان خوزستان در محدوده شهرستان‌های شوش، دشت آزادگان، اهواز، باوی، رامهرمز، رامشیر، امیدیه و هندیجان قرار دارد (شکل ۱). ریگ خوزستان عملاً از شمال هندیجان شروع می‌شود و تا مرز ایران و عراق ادامه می‌یابد. رودخانه کارون این ریگ را به دو بخش تقسیم می‌کند. بخش شرقی شامل قطعات کوچک زیادی است. قطعاتی که در شمال هندیجان و جنوب آقاجاری قرار دارند عمدتاً طی عملیات تثبیت با مالچ و ایجاد پوشش گیاهی نیمه فعال و یا غیرفعال شده‌اند و پوشش گیاهی زیادی در سطح این قطعات دیده می‌شود. حتی در شمال امیدیه نیز در محدوده شهری یک ریگ کوچک دیده می‌شود که تثبیت شده و غیرفعال می‌باشد. مطمئناً منبع ماسه این ریگ‌ها هم از تخریب ناهمواری‌های اطراف و هم احتمالاً از آورد رسوبی رودخانه کارون تأمین می‌شده است. طغیان‌ها و انحرافات رودخانه کارون بارها اتفاق افتاده و از این دیدگاه نیاز به تحقیقات بیش‌تری است. آنچه که از شواهد

مشخص است اینکه در دوره‌ای در کل منطقه عوارض ماسه‌ای بصورت یکپارچه وجود داشته، اما بر اثر تغییر شرایط و فرسایش آب‌های جاری و احتمالاً حرکت تکتونیکی به سمت بالا، عمده ماسه‌ها توسط آب‌های جاری حمل و از منطقه خارج شده است. همچنین تشدید خشکسالی‌ها در آینده ممکن است موجب فعالیت دوباره این لکه‌ها شود اما در حال حاضر اغلب آن‌ها یا نیمه فعال هستند و یا غیرفعال و پوشش گیاهی خوبی بر روی آن‌ها وجود دارد.



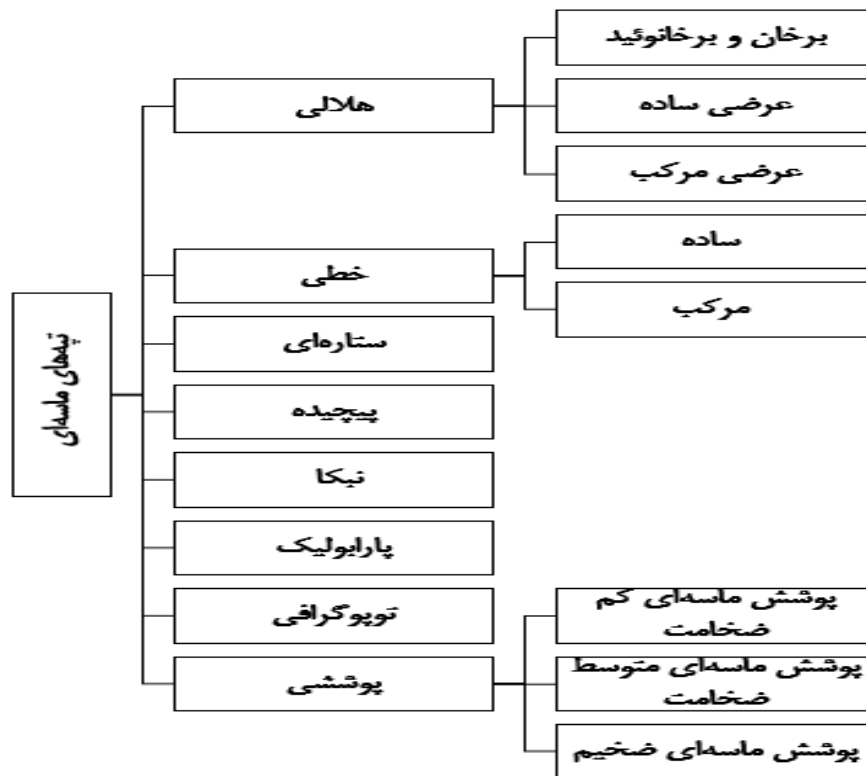
شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از تصاویر گوگل ارث (به منظور ارزیابی وضعیت مورفولوژی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای)، تصاویر ماهواره لندست (به منظور انطباق با تصاویر گوگل ارث و کنترل تغییرات) و اطلاعات آماری مربوط به سرعت و جهت بادهای منطقه به عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، ArcGIS (به منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر) و WRplot (به منظور آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه) بوده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

- **مرحله اول (ترسیم محدوده ریگ خوزستان):** در این مرحله ابتدا با استفاده مطالعات کتابخانه‌ای و تحقیقات پیشین، محدوده کلی ریگزارهای خوزستان مشخص شده است و سپس با استفاده از تصاویر گوگل ارث، محدوده دقیق ریگزارهای خوزستان به صورت دستی ترسیم شده است و سپس به بررسی وضعیت مورفومتری آن پرداخته شده است.

- **مرحله دوم (طبقه‌بندی مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان):** در این مرحله با توجه به شکل تپه‌های ماسه‌ای، ریگزار خوزستان به طبقات مختلفی تقسیم شده است. به منظور انجام این طبقه‌بندی از طبقه‌بندی‌های صورت گرفته توسط Frayberger, 1979, Lancaster, 1995 و Lancaster, 2009 استفاده شده است و یک طبقه‌بندی بومی برای ریگزارهای ایران ارائه شده است (شکل ۲) و سپس تپه‌های ماسه‌ای ریگزار خوزستان بر مبنای آن، طبقه‌بندی شده است.



شکل ۲: طبقه‌بندی بومی شده تپه‌های ماسه‌ای ایران (منبع: نگارندگان)

-مرحله سوم (پایش میزان حرکت ریگزارها): در این مرحله به منظور ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای، از ۱۱۲ نقطه نمونه استفاده شده است. در واقع، با استفاده از تصاویر گوگل ارث، تپه‌های ماسه‌ای منفرد انتخاب و سپس بر مبنای تصاویر گوگل ارث، میزان حرکت آن در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ ارزیابی شده است. در این مرحله، موقعیت هر کدام از تپه‌های ماسه‌ای در سال ۲۰۰۵ ترسیم شده است و سپس موقعیت همان تپه ماسه‌ای در سال ۲۰۲۰ نیز ترسیم شده است و به این صورت میزان جابجایی هر کدام از تپه‌های ماسه‌ای محاسبه شده است. پس از اینکه میزان جابجایی ۱۱۲ تپه ماسه‌ای انتخاب شده اندازه‌گیری شد، در نهایت با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه کلی میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در محدوده ریگ خوزستان تهیه شده است.

-مرحله چهارم (آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه): در این پژوهش به منظور آنالیز بادهای منطقه، از اطلاعات ۸ ایستگاه هواشناسی استفاده شده است (جدول ۱) و بر اساس آن‌ها وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه ارزیابی شده است. در این مرحله، ابتدا میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه) فصلی و سالانه ایستگاه‌ها محاسبه شده و سپس با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه سرعت بادهای منطقه در محدوده ریگزارها تهیه شده است. همچنین در ادامه با استفاده از نرم‌افزار WRplot، گلباد سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه تهیه و سپس ارتباط آن با مورفولوژی و جابجایی تپه‌های ماسه‌ای تحلیل شده است (Zu et al, 2008., Hu et al, 2021).

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دوره آماری
۱	ایلام	۴۶° ۲۶'	۳۳° ۳۸'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۲	مهران	۴۶° ۱۱'	۳۳° ۰۷'	۲۰۰۰-۲۰۰۳
۳	دزفول	۴۸° ۲۵'	۳۲° ۱۶'	۲۰۰۰-۲۰۰۳
۴	شوشتر	۴۸° ۵۰'	۳۲° ۰۳'	۱۹۹۲-۲۰۰۳
۵	ایذه	۴۹° ۵۲'	۳۱° ۵۱'	۱۹۹۲-۲۰۰۳
۶	مسجدسلیمان	۴۹° ۱۷'	۳۱° ۵۶'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۷	رامهرمز	۴۹° ۳۶'	۳۱° ۱۶'	۱۹۸۷-۲۰۰۳
۸	هندیجان	۴۹° ۴۴'	۳۰° ۱۷'	۲۰۰۰-۲۰۰۳

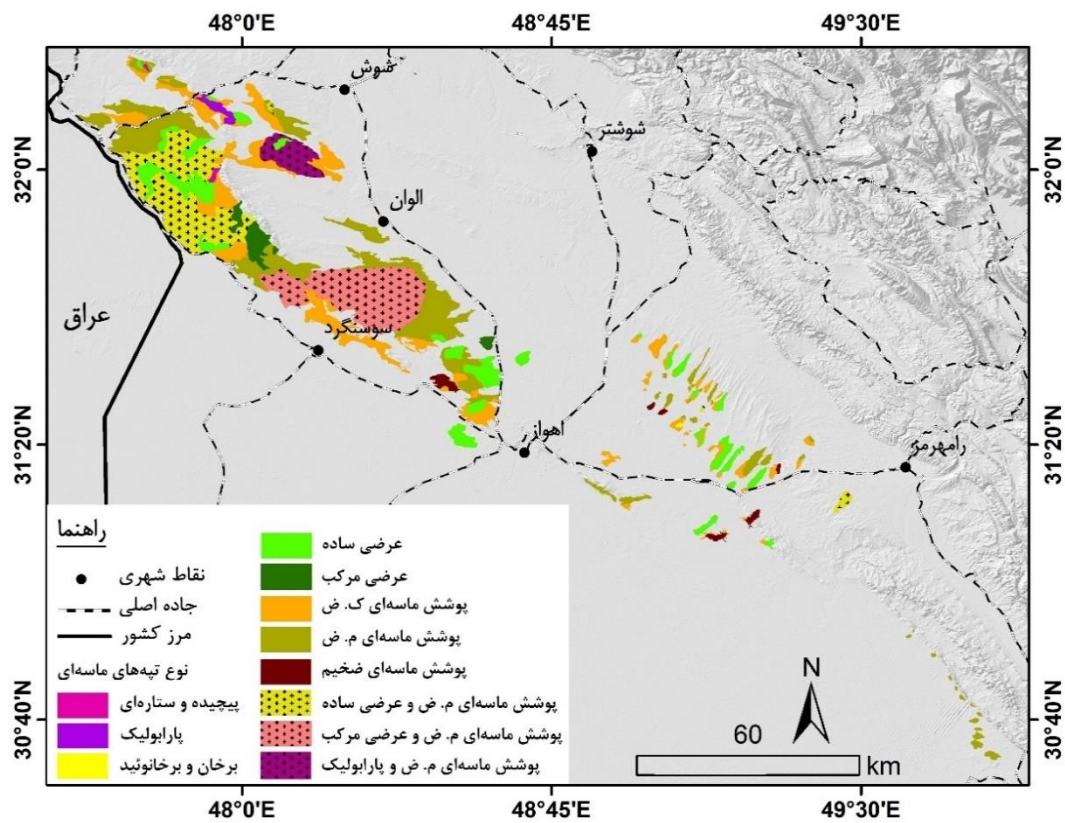
۳- بحث و نتایج

۳-۱- مورفومتری ریگ خوزستان

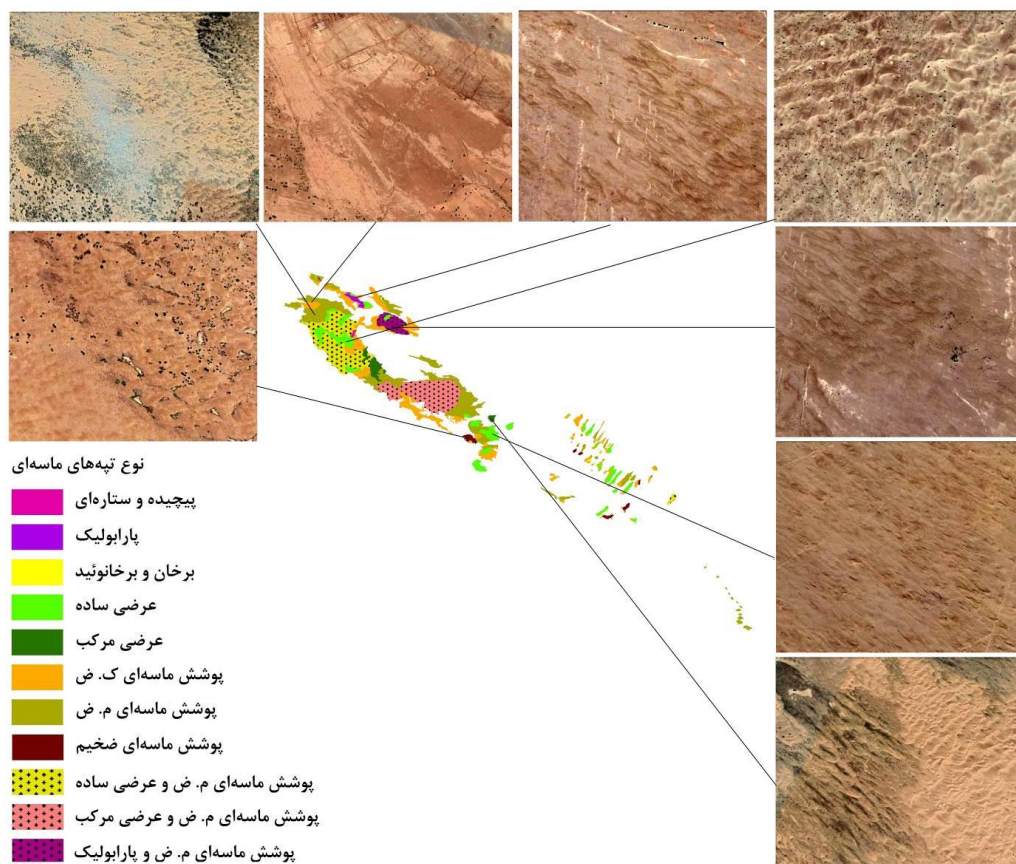
مساحت مجموع ریگ خوزستان ۲۶۲۹ کیلومترمربع است. محیط این ریگ ۳۲۴۶ کیلومتر و شامل تعداد زیادی از ریگزارهای کوچک و بزرگ است. طول این ریگزار از شمالی‌ترین ریگ (جنوب شهرستان دهلران) تا جنوبی‌ترین ریگ (جنوب شهرستان هندیجان) حدود ۳۱۰ کیلومتر است. پهنه اصلی ریگ خوزستان یعنی محدوده بین شهر شوش و هویزه، دارای ۱۳۲ کیلومتر طول و ۴۲ کیلومتر پهنای است. از نظر ارتفاع از سطح دریا، ریگ خوزستان در بین ارتفاع ۳ تا ۳۶۴ متری از سطح دریا قرار دارد که بالاترین ارتفاع مربوط به ریگزارهای نزدیک شهر شوش و کم‌ترین ارتفاع نیز مربوط به ریگزار مجاور شهر هندیجان است. همچنین ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای نیز در بعضی از مناطق زیاد و در بعضی از مناطق به صورت پوشش‌های ماسه‌ای است.

۳-۲- طبقه‌بندی ریگ خوزستان

تاثیرگذاری عوامل مختلف سبب شده است تا تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان از نظر شکل ظاهری دارای انواع مختلفی باشند. در این پژوهش با استفاده از تصاویر گوگل ارث و بر مبنای طبقه‌بندی ارائه شده (شکل ۲)، تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان از نظر شکل ظاهری طبقه‌بندی شده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴). بر اساس نتایج حاصله، ریگ خوزستان به ۱۱ طبقه تقسیم شده که عبارتند از تپه‌های ماسه‌ای پیچیده، پارابولیک، برخان و برخانوئید، عرضی ساده، عرضی مرکب، پوشش ماسه‌ای کم ضخامت، پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت، پوشش ماسه‌ای ضخیم و همچنین شکل‌های ترکیبی شامل پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده، پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی مرکب و پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و پارابولیک. بررسی نقشه طبقه‌بندی شده بیانگر این است که بخش زیادی از ریگ اصلی را پوشش‌های ماسه‌ای کم ضخامت تا ضخیم دربر گرفته است.



شکل ۳: نقشه طبقه‌بندی ریگ خوزستان

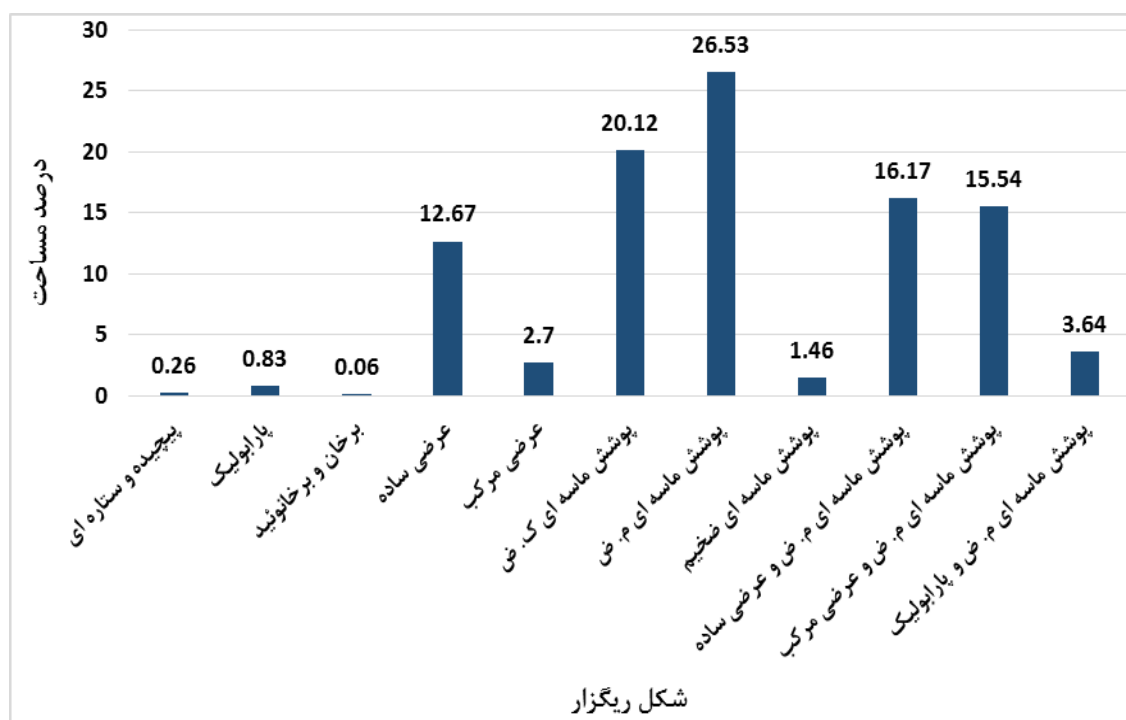


شکل ۴: نمایی از انواع تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان

ارزیابی وسعت طبقات مربوط به شکل ریگزارها نشان داده است که بخش زیادی از منطقه را پوشش‌های ماسه‌ای متوسط ضخامت دربرگرفته است به‌طوری که $697/5$ کیلومترمربع از منطقه، معادل $26/53$ درصد از مساحت ریگ خوزستان را دربرگرفته است. تپه‌های ماسه‌ای کم ضخامت نیز با $528/9$ کیلومترمربع، $20/12$ درصد از مساحت ریگ خوزستان را شامل می‌شود. همچنین تپه‌های ترکیبی شامل پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت با عرضی ساده و مرکب به ترتیب با $425/2$ و $408/7$ کیلومترمربع، $16/2$ و $15/5$ درصد از مساحت ریگ خوزستان را دربرگرفته است (جدول ۲ و شکل ۴).

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

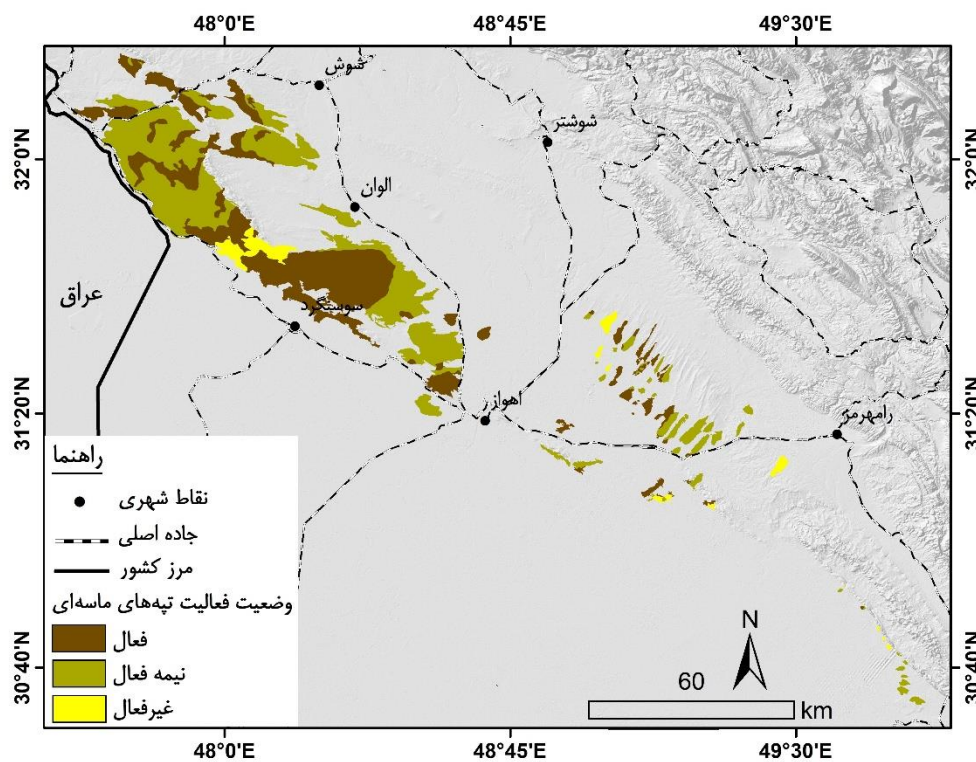
ردیف	نوع تپه‌های ماسه‌ای	مساحت	درصد مساحت
۱	پیچیده	۷	۰/۲۶
۲	پارابولیک	۲۱/۷	۰/۸۳
۳	برخان و برخانوئید	۱/۷	۰/۰۶
۴	عرضی ساده	۳۳۳/۵	۱۲/۶۷
۵	عرضی مرکب	۷۱/۱	۲/۷
۶	پوشش ماسه‌ای کم ضخامت	۵۲۸/۹	۲۰/۱۲
۷	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت	۶۹۷/۵	۲۶/۵۳
۸	پوشش ماسه‌ای ضخیم	۳۸/۳	۱/۴۶
۹	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده	۴۲۵/۲	۱۶/۱۷
۱۰	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرض مرکب	۴۰۸/۷	۱۵/۵۴
۱۱	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و پارابولیک	۹۵/۶	۳/۶۴



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

۳-۳- طبقه‌بندی ریگ خوزستان بر اساس فعالیت

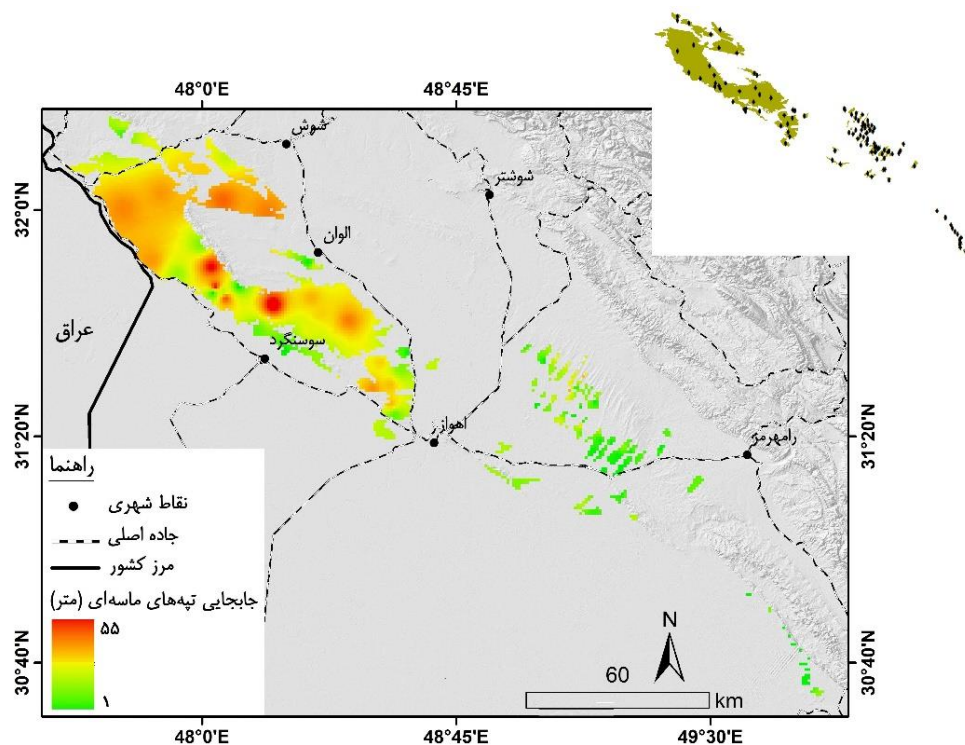
بررسی وضعیت فعالیت ریگ خوزستان بیانگر این است که بخش‌هایی از این ریگ به صورت فعال و بخش‌هایی از آن نیز به صورت نیمه فعال و غیرفعال هستند. در واقع، تحت تاثیر عوامل مختلف میزان فعالیت در بخش‌های مختلف ریگ خوزستان متفاوت است به طوری که در بخش‌هایی از این ریگ، فعالیت‌های انسانی مانند ایجاد پوشش گیاهی در حاشیه تپه‌های ماسه‌ای سبب تثبیت و ایجاد وضعیت غیرفعال آن‌ها شده است. در شکل ۶ نقشه طبقه‌بندی ریگزارهای خوزستان بر اساس وضعیت فعالیت آن‌ها نشان داده شده است که بر اساس آن بخش‌های زیادی از این ریگ به صورت نیمه فعال هستند به طوری که $1379/5$ کیلومترمربع، معادل $52/5$ درصد از مساحت آن را این طبقه دربر گرفته است. همچنین مناطق فعال و غیرفعال نیز به ترتیب با $1120/8$ و 129 کیلومترمربع، معادل $42/6$ و $4/9$ درصد از مساحت ریگزار را شامل می‌شوند.



شکل ۶: نقشه طبقه‌بندی ریگ خوزستان بر اساس وضعیت فعالیت

۳-۴- پایش حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ خوزستان

در این پژوهش به منظور پایش میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ خوزستان از ۱۱۲ نقطه نمونه استفاده شده است و سپس با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان تهیه شده است (شکل ۷). بر اساس نقشه تهیه شده، تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان بین ۱ تا ۵۵ متر جابجایی (در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) داشته است که آنالیز مکانی تغییرات صورت گرفته بیانگر این است که بیشترین میزان حرکت با بیش از ۵۰ متر، در مناطق مرکزی و شمالی ریگ بزرگ خوزستان بوده است و کمترین میزان حرکت نیز با حدود ۱ متر، مربوط به ریگزارهای منفردی است که به صورت تثبیت شده هستند. با توجه به نتایج حاصله، مناطق میانی ریگ خوزستان همانند مناطق شرقی و شمالی ریگ تاکلاماکان (Zu et al, 2008) و مناطق جنوبی ریگ لوت (Maghsoudi et al, 2021)، دارای دینامیک فعالی است.

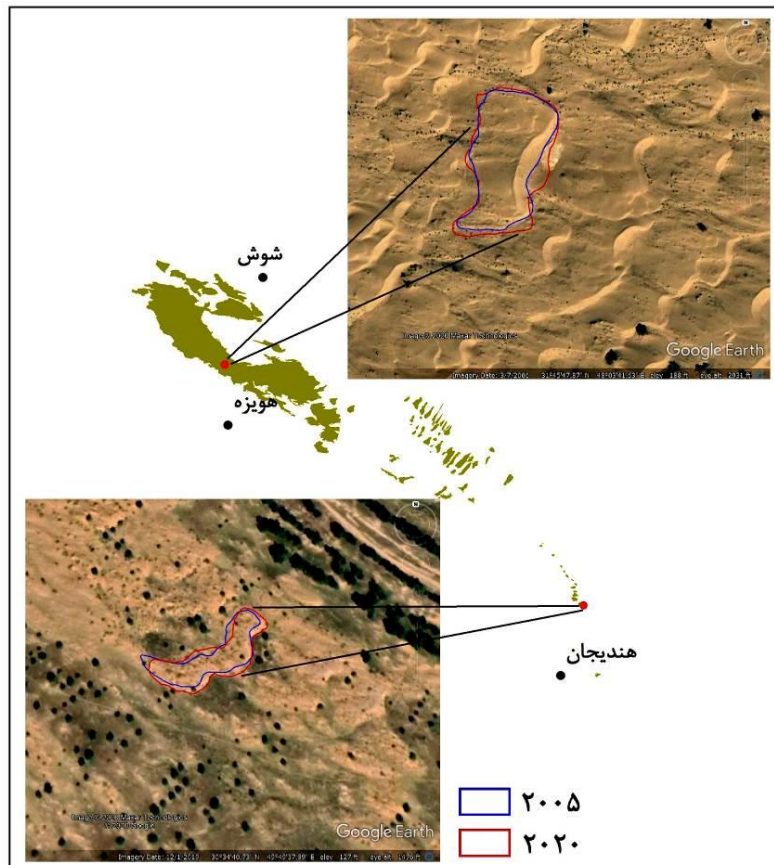


شکل ۷: نقشه موقعیت نقاط نمونه و میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ خوزستان

نتایج بررسی میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ خوزستان بیانگر این است که میزان جابجایی در این ریگزارها بسیار متفاوت است. در واقع، در بخش‌هایی از ریگ خوزستان، به دلیل ایجاد پوشش گیاهی و تثبیت تپه‌های ماسه‌ای به روش‌هایی مختلف، تپه‌های ماسه‌ای به صورت غیرفعال و فاقد حرکت هستند و در بخش‌هایی از این ریگزار، تپه‌های ماسه‌ای دارای حرکت قابل توجهی هستند. در شکل ۸ تصاویری از حرکت دو تپه ماسه‌ای در مناطق میانی ریگ اصلی و همچنین در محدوده ریگ‌های منفصل در جنوب محدوده نشان داده شده است. نتایج ارزیابی‌ها بیانگر این است که در پهنه اصلی ریگ خوزستان، تپه‌های ماسه‌ای زیادی وجود دارد که دارای حرکت قابل توجهی در طول سال هستند، به‌طوری‌که تپه ماسه‌ای در نظر گرفته شده در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بین ۲ تا ۲۰ متر جابجایی داشته است که بخش زیادی از جابجایی به صورت پخش شدگی بوده است. اما بر خلاف پهنه اصلی ریگ خوزستان، پهنه‌های منفرد به دلیل تثبیت شدگی توسط پوشش گیاهی، با حرکت خیلی کمی مواجه شده‌اند و در بعضی از آن‌ها فقط در بخش‌های میانی با جابجایی‌هایی در حدود ۲ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ مواجه شده‌اند.

۳-۵- آنالیز سرعت و جهت بادهای منطقه

خصوصیات بادهای هر منطقه عامل اصلی در تشکیل ریگزارها و همچنین شکل و میزان فعالیت آن‌هاست. با توجه به اهمیت موضوع، به‌منظور تحلیل اثرات سرعت و جهت بادهای منطقه بر ریگزارها، از اطلاعات ایستگاه‌های مجاور ریگ خوزستان استفاده شده که در ادامه به تشریح نتایج حاصله پرداخته شده است:

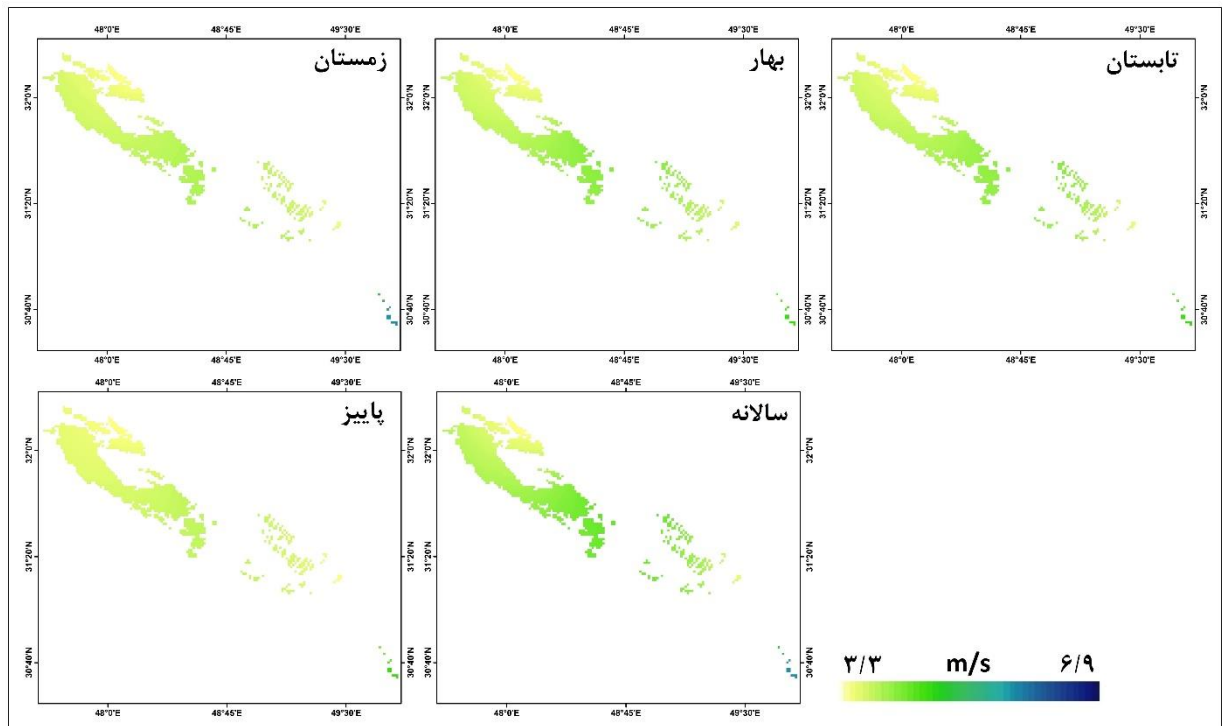


شکل ۸: محدوده تپه‌های ماسه‌ای مورد مطالعه در طی سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۵

الف) سرعت باد: نتایج بررسی میانگین فصلی سرعت باد در محدوده ریگ خوزستان بیانگر این است که در فصل زمستان میانگین سرعت باد بین ۷/۹ تا ۳/۱ متر بر ثانیه، در فصل بهار بین ۶/۹ تا ۴/۲ متر بر ثانیه، در فصل تابستان بین ۶/۱ تا ۳/۳ متر بر ثانیه، در فصل پاییز بین ۶/۵ تا ۲/۹ متر بر ثانیه و میانگین سرعت باد سالانه نیز بین ۶/۹ تا ۳/۴ متر بر ثانیه بوده است (جدول ۳). بررسی پراکنش مکانی سرعت باد در نقشه‌های مذکور بیانگر این است که بیش‌ترین میزان سرعت مربوط به بخش‌های جنوبی ریگ اصلی خوزستان بوده است (شکل ۹).

جدول ۳: سرعت باد فصلی و سالانه ایستگاه‌های مجاور ریگ خوزستان

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه	درصد باد بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه
ایلام	۵	۵/۹	۵/۶	۴	۵/۲	۳۱/۱
مهران	۵/۵	۷/۲	۵/۷	۴/۲	۵/۷	۴۰/۲
دزفول	۲/۵	۳	۲/۱	۲/۱	۲/۴	۶/۸
شوشتر	۴/۹	۷/۲	۵/۷	۵	۵/۷	۳۸/۸
ایذه	۳/۲	۴/۷	۵/۹	۴/۳	۴/۵	۲۳/۴
مسجد سلیمان	۳/۲	۵/۵	۵/۱	۳/۱	۴/۲	۲۲/۵
رامهرمز	۳/۲	۴/۵	۳/۳	۲/۷	۳/۴	۱۳/۴
هندیجان	۱۰	۷/۸	۷	۸	۸/۲	۶۸/۴



شکل ۹: نقشه‌های دورنمایی سرعت باد فصلی و سالانه محدوده ریگ خوزستان

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 ۴).

جدول ۴: محاسبه سرعت آستانه باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	درصد باد بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه	میانگین سالانه تعداد روزهای با سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه	بالاترین سرعت باد در طی دوره زمانی مورد مطالعه
ایلام	۳۱/۱	۱۰۵	۱۹
مهران	۴۰/۲	۱۱۲	۲۳
دزفول	۶/۸	۱۴	۱۵/۳
شوشتر	۳۸/۸	۱۱۶	۲۷
ایذه	۲۳/۴	۷۶	۲۵/۸
مسجدسلیمان	۲۲/۵	۷۳	۱۸/۴
رامهرمز	۱۳/۴	۳۹	۱۴/۶
هندیجان	۶۸/۴	۲۱۶	۲۲/۸

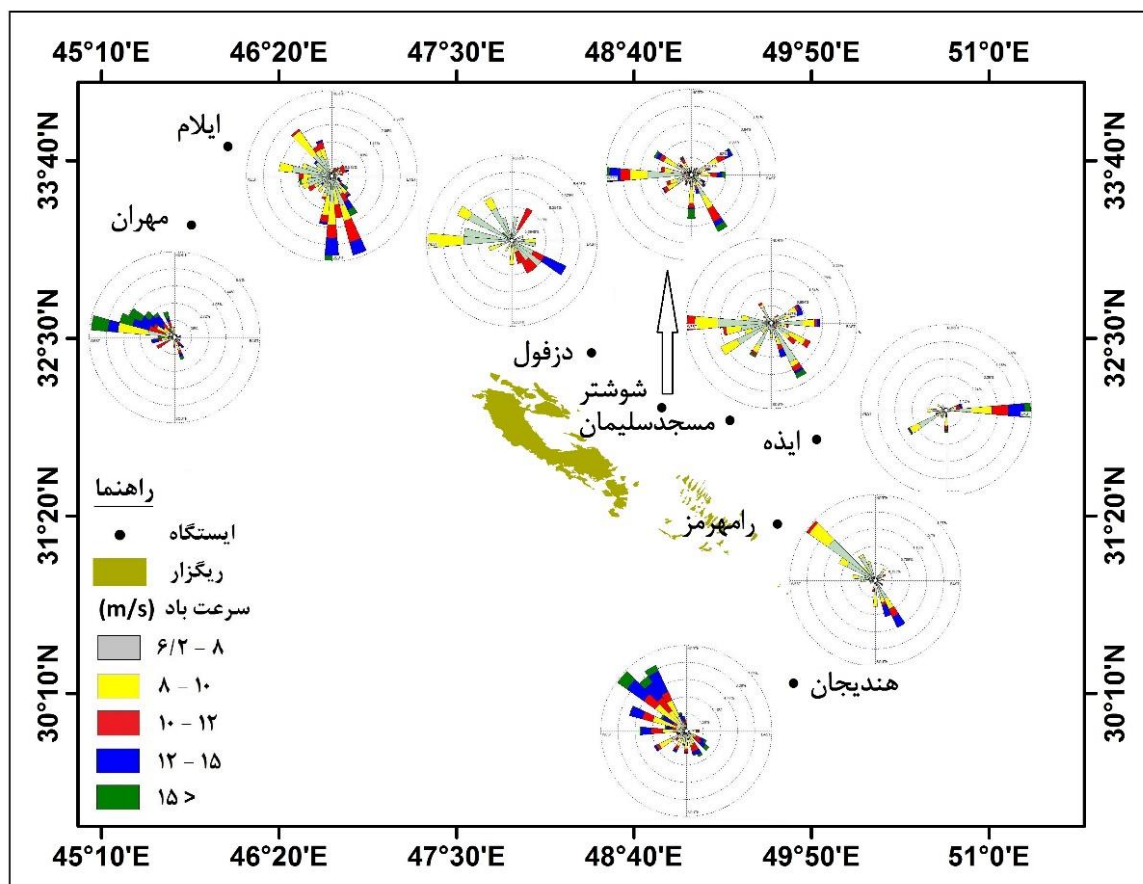
بر اساس نتایج حاصله، در ایستگاه ایلام ۳۱/۱ درصد از بادهای دارای سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه هستند که این میزان در ایستگاه مهران ۴۰/۲، در ایستگاه دزفول ۶/۸، در ایستگاه شوشتر ۳۸/۸، در ایستگاه ایذه ۲۳/۴، در ایستگاه مسجدسلیمان ۲۲/۵، در ایستگاه رامهرمز ۱۳/۴ و در ایستگاه هندیجان نیز ۶۸/۴ متر بر ثانیه بوده است. میانگین سالانه تعداد روزهای دارای باد با سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه در ایستگاه ایلام ۱۰۵ روز بوده است که این میزان در ایستگاه مهران ۲۳ روز، در ایستگاه دزفول ۱۵/۳ روز، در ایستگاه شوشتر ۲۷ روز، در ایستگاه ایذه ۲۵/۸ روز، در ایستگاه مسجدسلیمان ۱۸/۴

روز، در ایستگاه رامهرمز ۱۴/۶ روز و در ایستگاه هندیجان نیز ۲۱۶ روز بوده است که بر این اساس ایستگاه هندیجان دارای بیشترین تعداد روزهای دارای بادهای فرسایشی بوده است. همچنین از نظر سرعت وزش باد نیز، بالاترین سرعت ثبت شده با ۲۷ متر بر ثانیه مربوط به ایستگاه شوشتر بوده است.

ج) جهت باد: نتایج بررسی جهت باد غالب فصلی و سالانه ایستگاه‌های منطقه بیانگر این است (جدول ۵) که در ایستگاه‌های ایلام، دزفول و شوشتر، جهت غالب باد سالانه از سمت جنوب شرق، در ایستگاه مهران از سمت شمال غرب، در ایستگاه‌های ایزه، مسجدسلیمان و رامهرمز از سمت جنوب و در ایستگاه هندیجان از سمت جنوب غرب است (شکل ۱۰).

جدول ۵: جهت باد فصلی و سالانه ایستگاه‌های مجاور ریگ خوزستان

ایستگاه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه
ایلام	جنوب شرق	جنوب	جنوب غرب	جنوب شرق	جنوب شرق
مهران	شمال غرب	شمال غرب	شرق	جنوب غرب	شمال غرب
دزفول	جنوب شرق	جنوب غرب	جنوب شرق	جنوب شرق	جنوب شرق
شوشتر	جنوب شرق	جنوب	جنوب	جنوب شرق	جنوب شرق
ایزه	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب شرق	جنوب
مسجدسلیمان	جنوب	جنوب	جنوب	جنوب شرق	جنوب
رامهرمز	جنوب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب	جنوب
هندیجان	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب



شکل ۱۰: نقشه موقعیت ایستگاه‌های منطقه و وضعیت گلباد سالانه هر ایستگاه

۳-۶- تحلیل ارتباط بین ویژگی‌های باد و تپه‌های ماسه‌ای

مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای به‌طور مستقیم تحت تاثیر شرایط حاکم بر ریگزارها (موانع، پوشش گیاهی و غیره) و همچنین ویژگی‌های باد منطقه قرار دارد. بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان و میزان حرکت آن‌ها بیانگر این است که علاوه بر عوامل طبیعی، عوامل انسانی از جمله تثبیت تپه‌های ماسه‌ای از طریق ایجاد پوشش گیاهی نیز نقش مهمی داشته است. بر اساس نتایج حاصله از محاسبه سرعت باد در محدوده ریگ خوزستان، مناطق جنوبی ریگ اصلی خوزستان دارای بالاترین میانگین سرعت باد بوده است. باتوجه به اینکه بخشی از این مناطق جزء مناطق فعال محسوب می‌شود و همچنین بر اساس نتایج پایش حرکت تپه‌های ماسه‌ای، دارای بالاترین جابجایی بوده است، بنابراین می‌توان گفت که سرعت بادهای منطقه در این ریگزار نیز همانند ریگزارهای زرین (Sharifi Pichon et al, 2019) و ریگزارهای قزاقستان و غرب چین (Fitzsimmons et al, 2020) تعیین‌کننده فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای منطقه بوده است که البته در مناطقی به دلیل ثبیت‌های صورت گرفته، میزان جابجایی با سرعت باد انطباق نداشته است. از نظر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای، ریگ اصلی خوزستان دارای اشکال متنوعی از انواع تپه‌های ماسه‌ای است که بیانگر اثرگذاری بادهای با جهات مختلف، وضعیت مورفولوژی منطقه و همچنین دخالت عوامل انسانی است. همچنین از نظر مورفولوژی، ریگزارهای منفصل خوزستان به دلیل اینکه اکثراً به‌صورت تثبیت شده هستند، دارای تنوع خیلی کمی هستند و عمدتاً به‌صورت پوشش‌های ماسه‌ای کم ضخامت و متوسط ضخامت هستند، بنابراین در این مناطق، دخالت عوامل انسانی مانع از حرکت تپه‌های ماسه‌ای و ایجاد مورفولوژی خاص در آن‌ها شده است. نتایج ارزیابی ویژگی‌های باد در اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای نیز بیانگر این است که بالاترین میانگین سرعت با ۴/۵ متر بر ثانیه مربوط به پوشش‌های ماسه‌ای ضخیم بوده است. همچنین در این پژوهش به‌منظور ارزیابی رابطه بین میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای و همچنین خصوصیات باد منطقه، ضریب همبستگی بین آن‌ها در طی دوره‌های زمانی مختلف محاسبه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، میزان همبستگی حرکت تپه‌های ماسه‌ای با سرعت باد سالانه ۰/۵۱۴ بوده است و از نظر همبستگی فصلی نیز بالاترین همبستگی با ۰/۶۱۹ مربوط به فصل پاییز بوده است (جدول ۶).

جدول ۶: نتایج همبستگی بین حرکت تپه‌های ماسه‌ای و سرعت باد

دوره	ضریب همبستگی
زمستان	۰/۵۵۱
بهار	۰/۴۹۹
تابستان	۰/۵۰۲
پاییز	۰/۶۱۹
سالانه	۰/۵۱۴

۴- نتیجه‌گیری

ریگ خوزستان از جمله ریگزارهای بزرگ کشور است به‌طوری‌که این ریگ، ۲۶۲۹ کیلومترمربع وسعت دارد و از ریگزارهای کوچک و بزرگ زیادی تشکیل شده است. تأثیرگذاری عوامل مختلف بر ریگ خوزستان سبب شده است که انواع مختلفی از تپه‌های ماسه‌ای از جمله تپه‌های پیچیده، پارابولیک، برخان و برخانوئید، عرضی ساده، عرضی

مرکب و پوشش ماسه‌ای در آن ریگ وجود داشته باشد. نتایج ارزیابی وسعت اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای نشان داده است که بخش زیادی از منطقه را پوشش‌های ماسه‌ای متوسط ضخامت دربر گرفته است به طوری که ۶۹۷/۵ کیلومترمربع از منطقه، معادل ۲۶/۵ درصد از مساحت ریگ خوزستان را دربر گرفته است. نتایج آنالیز وضعیت فعالیت ریگ خوزستان نیز نشان داده است که بخش‌های زیادی از این ریگ به صورت نیمه فعال هستند به طوری که ۱۳۷۹/۵ کیلومترمربع، معادل ۵۲/۵ درصد از مساحت آن را این طبقه دربر گرفته است. همچنین مناطق فعال و غیرفعال نیز به ترتیب با ۱۱۲۰/۸ و ۱۲۹ کیلومترمربع، معادل ۴۲/۶ و ۴/۹ درصد از مساحت ریگزار را شامل می‌شوند و بر مبنای نتایج حاصله، تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بین ۱ تا ۵۵ متر جابجایی داشته‌اند. نتایج آنالیز مکانی جابجایی صورت گرفته نشان داده است که مناطق میانی ریگ خوزستان همانند مناطق شرقی و شمالی ریگ تا کلاماکان (Zu et al, 2008) و مناطق جنوبی ریگ لوت (Maghsoudi et al, 2021)، دارای بیش‌ترین میزان جابجایی بوده است. همچنین نتایج آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه نشان داده است که در یک روند کلی، بالاترین سرعت باد مربوط به مناطق جنوبی ریگ خوزستان بوده است و جهات غالب باد نیز از سمت جنوب و جنوب غرب بوده است و البته در طول فصول مختلف با تغییرات زیادی نیز همراه بوده است و همین مسئله سبب شده است تا تپه‌های ماسه‌ای ریگ خوزستان از یک روند کلی پیروی نکنند و دارای اشکال و جهات متنوعی باشند. در مجموع، نتایج آنالیز بادهای منطقه نشان داده است که سرعت زیاد باد در بعضی از فصول از جمله بهار نقش مهمی در جابجایی تپه‌های ماسه‌ای دارد و جهات مختلف باد نیز باعث تنوع مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای منطقه شده است. همچنین فعالیت‌های انسانی از جمله تثبیت تپه‌های ماسه‌ای توسط پوشش گیاهی سبب شده است تا در بسیاری از مناطق، با وجود فراهم بودن شرایط، تپه‌های ماسه‌ای بدون جابجایی باشند.

این مقاله حاصل طرح پژوهشی "بنیاد ملی علم ایران" بوده است.

منابع

1. Ahrari, M., 2018. Investigation of formation and extension of sand dunes in order to assessment of their effects on the Geomorphology of coastal environment of the Oman Sea. Quantitative Geomorphological Research, 6(3), 163-175. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.3.11.2> (In Persian)
2. 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>
3. Del Valle, H., Rostagno, C., & Coronato, F. 2008. Sand dune activity in north-eastern Patagonia. Journal of Arid Environments, 72, 411-422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.07.011>
4. Diao, Y., Wang, C., Huang, J., Zhang, L., Hu, H., Bai, J., & Yang, C., 2025. Feasibility study on desert sand solidification using biomimetic mineralization method: Mechanical properties and wind erosion resistance. Construction and Building Materials, 463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139995>
5. Fitzsimmons, K. E., Nowatzki, M. N., Dave, A. K., & HartwigHarder, H., 2020. Intersections between Wind Regimes, Topography and Sediment Supply: Perspectives from Aeolian Landforms in Central Asia. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol, 540 (15). <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109531>
6. 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>

7. Ganjaeian, H., Mohammadian, K., Javedani, M., & Safari Namivandi, M., 2023. Analysis of Desertification Potential of Yazd Province Using DVI Indicators. *Desert management*, 11(2), 35-48. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2023.2004871.1419> (In Persian)
8. Ganjaeian, H., Mohammadian, K., Nosrati, M., Javedani, M., 2025. Assessing the status of Khuzestan Reg activity and its risks using Google Earth Engine. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 4 (13), 1-20. <https://doi.org/10.22034/rsgi.2025.61672.1075>
9. Ge, M., Li, F., Ma, J., Yu, F., & Cui, L. 2025. An automatic method for extracting sand dunes based on slope cost distance from digital elevation models. *Advances in Space Research*, 75 (1), 248-263. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.034>
10. Guan, C., Hasi, E., & Tang, K., 2025. Grain size characteristics of the reticulate dunes of the Hobq Desert. *Journal of Arid Environments*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105279>
11. Hanifepour, M., Biabani, L., Khosravi, H., Akbarpoor Bonab, B., 2022. Monitoring and forecasting of climatic factors affecting the mobility of sand dunes using Lancaster index (Case study: Sirjan desert). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 13(48), 20-1. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373929.0> (In Persian)
12. Hu, G., Dong, Z., Zhang, Z., & Silva, G.M., 2021. Wind regime and aeolian landforms on the eastern shore of Qinghai Lake, Northeastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 188, (13). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104451>
13. Lancaster, N., 1995. *The Geomorphology of Desert Dunes*. Routledge, London, 290 P. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203413128>
14. 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
15. Livingstone, I., Bristow, C., Bryant, R.G., Bullard, J., White, K., Wiggs, G.F.S., Baas, A.C.W., Bateman, M.D., & Thomas, D.S.G., 2010. The Namib Sand Sea Digital Database of aeolian dunes and key forcing variables. *Aeolian Research*. 2: 93–104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.08.001>
16. Ma, F., Lu, P., Cao, M., Yu, J., & Xia, Z., 2024. Morphological and sedimentary characteristics of raked linear dunes in the southeastern Taklimakan Desert, China. *Aeolian Research*, 67-69. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100923>
17. Maghsoudi, M., Fathollahzadeh, M., Ganjaeian, H., 2021. Monitoring changes in wind speed and their effect on the displacement of sand dunes in the Lut Desert. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(118), 113-126. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246137> (In Persian)
18. 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).
19. Maghsoudi, M., Ghojehzadeh halani, A., Allahveisi, A., & Barati, Z., 2024. Studying the morphology and spatial changes of Azerbaijan Ergs using satellite images and analysis of erosive winds (case study: Qomtape and Maghsudlu Ergs). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 15(57), 22-1. <https://doi.org/10.22034/jargs.2024.403993.1044> (In Persian)
20. 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>
21. Mahyou, H., Tychon, B., Balaghi, R., Mimouni, J. & Paul, R., 2010. Désertification des parcours arides au Maroc. *Tropicultura*, 28(2): 107-114. <https://www.researchgate.net/publication/46378957>
22. Mashhadi, N., 2024. Morphodynamics of sand dunes and wind patterns (Case study: New and Young Citadel of Southeast Qom). *Geography and Environmental Hazards*, 13 (1), 338-317. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.76706.1227> (In Persian)
23. Mousavi, S.H., Vali, A.A., & Moeiri, M., 2010. The effect of morphometric components of a barkhan on its displacement rate (case study: Chah Jam sand). *Geography and Environmental Planning*. 21 (2), 101-118. <https://www.sid.ir/paper/153314/fa> (In Persian)
24. Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghisarian, S.S., and Ebrahimi, A., 2024. Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case

- Study: Southwest Iran). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 386-405. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.89088.1504> (In Persian)
25. Nowatzki, M., Dave, A.K., & Harder, H., 2020. Intersections between wind regimes, topography and sediment suppl: Perspectives from aeolian landforms in Central Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109531>
26. Qong, M. 2000. Sand Dune Attributes Estimated from SAR Images. *Remote Sensing of Environment*, 74, 217-228. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00112-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00112-7)
27. Redsteer, M. H., Kelley, K. B., & Francis, H., 2011. Monitoring and Analysis of Sand Dune Movement and Growth on the Navajo Nation. Southwestern United States. Geological Survey. <https://www.researchgate.net/publication/291332387>
28. Safari namivandi, M., ganjaeian, H., Ebrahimi, A., & Ebadinezhad, S., 2023. Evaluation of desertification risk potential using DVI model (Case study: northern regions of Semnan province). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 14(53), 17-1. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.397791.1032> (In Persian)
29. Sharifi Pichon, M., Omidvar, K., & Miri, Z., 2019. Investigation of sand dune morphology and its correlation with wind data in the Rig Zarrin region. *Geographical Explorations of Desert Regions*, 8 (1), 27-1. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1399.8.1.1.6> (In Persian)
30. Zu, R., Xue, X., Qiang, M., Yang, B., Qu, J., & Zhang, K., 2008. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, China. *Geomorphology*, 96 (1), 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.008>