



Identification and Analysis of Changes of Shotoran Rig in Tabas: Using the Random Forest Machine Learning Algorithm

Nafiseh Hashemian Kakhki¹ , Abolghasem Amirahmadi² , Mohammad Khanehbad³
Mohammad Baaghideh⁴

¹. Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Email: nafiseh.hashemian@gmail.com

². (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Email: amirahmadi@hsu.ac.ir

³. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Email: mkhanehbad@um.ac.ir

⁴. Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Email: mbaaghideh2005@yahoo.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

24 April 2025

Received in revised form:

1 August 2025

Accepted:

14 September 2025

pp.169-183

Keywords:

Shotoran Erg,
dune mobility, Lancaster
index, aeolian processes,
Landsat imagery,
desertification, central Iran

ABSTRACT

The Shotoran Erg represents one of the largest active sand dune fields in Iran, and its expansion and morphological changes are influenced by a combination of natural processes and anthropogenic factors. These changes have altered the shape and geomorphological characteristics of the region over time. One of the primary drivers of these dynamics is the migration of sand dunes, driven predominantly by wind activity in this arid environment. In this study, the Lancaster climatic index (also known as the dune mobility index) was employed to assess trends in the advancement of the Shotoran Erg boundaries. The results indicate that over the past two decades, the Lancaster index has increased significantly from 95 units to 371 units. This substantial rise reflects a marked intensification of dune mobility and boundary expansion, particularly in recent years. Furthermore, multi-temporal analysis of the spatial changes in the Shotoran Erg was conducted using Landsat satellite sensors, including MSS, TM, ETM+, and OLI, at approximately decadal intervals from 1990 to 2020. The findings reveal that the area of active sand dunes and migrating sands in the central Iranian region expanded from 2,473 km² to 2,965 km² over the four-decade period—an increase of approximately 13%. This observed expansion is indicative of progressive aridification and heightened wind erosivity in the region, coupled with land cover changes and reduced inflow from ephemeral streams (wadis) discharging into the central playas (e.g., around Tabas). These results underscore the combined effects of climatic drying and anthropogenic pressures in promoting aeolian activity and erg enlargement in this part of Iran's central desert.

Cite this article: Hashemian Kakhki, N. , Amirahmadi, A. , Khanehbad, M. and Baaghideh, M. (2025). Identification and Analysis of Changes in Sand Dunes and the Boundary of the Rig-e Shotoran Desert in the Northwest of Tabas Geopark. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(2).169-183.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.525188.1561](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.525188.1561)

Extended Abstract

Introduction

Sandy seas or Erg in Iran, Afghanistan, Pakistan and Tajikistan are also known as (Reg), (Rig) or (Rek) and the name (Registan) means accumulated sand (Abassi et al., 2019). The most important issue in identifying and changing Regs is the way of expansion and the main axis of movement of Regs, determining the direction and extent of their development or limitation. Most of the Regs in the areas where the high air temperature and intense evaporation have caused a drop in moisture on the soil surface, and as a result, have weakened the bond between the soil grains in the horizontal surface of sandy soils and increasing the activity of sands and flowing sands are formed (Dang et al., 2004). Shotoran Reg, one of the largest sandy areas of Iran, has also undergone geomorphological changes under the influence of natural and human factors. Wind processes, including the movement of sand dunes and wind erosion, are one of the most important natural factors in moving sands and changing the shape of landforms in this region. The purpose of this research is to investigate the spatial-temporal changes of the Shotoran Reg in a period of 30 years using the Landsat satellite images and ground evidence. The results show that the identification of changes can be the basis for prediction future changes.

Methodology

The investigation of the border changes of Shotoran Reg based on Landsat satellite images (TM, ETM+ and OLI gauges) during 3 time periods with 10-year intervals (from 1994 to 2024) was analyzed by remote sensing in geographic information system software. The satellite images used were extracted from the United States Geological Survey website. Validation of the data was done in accordance with the reference pixels of the satellite image, validation and estimation of error and accuracy was done using the Kappa coefficient method, which in short was calculated to be 90% accurate and the Kappa coefficient was 0.85, which is a very acceptable evaluation.

Results and Discussion

In the classification of sand dunes using Landsat images and the Random Forest algorithm, the satellite images must first be preprocessed for data preparation. The identified range using Landsat images and the Random Forest model has been provided for four periods, including the years 1994, 2004, 2014, and 2024. Temporal changes due to weather conditions are observed in the images from 2014 and 2024. Specifically, in the 2014 image, due to drought, small parts of the salt flat have dried up, and sand movement caused by wind has covered portions of the surface. As a result, the model identified these areas as sand dunes. However, in the 2024 image, due to rainfall in the study area and considering the elevation of the salt flat regions, flooding has caused those areas to become wet. Therefore, it can be concluded that the boundaries of the sand dunes may change temporarily due to weather conditions, but in the long term, a distinct boundary exists between the sand dunes and the salt flat in this region. The analysis of changes in the boundaries of the Shotoran sand dunes based on climatic data shows that the annual wind speed charts, categorized by different speed ranges, from 1990 to 2024, exhibit no significant change and lack a trend. Landsat satellite imagery and the Random Forest machine learning algorithm have been utilized. Firstly, the Landsat satellite series (5, 7, 8, and 9), with global coverage and freely available data, are highly suitable for monitoring land cover changes on a large scale. With a spatial resolution ranging from 15 to 30 meters (depending on the band) and multispectral imaging capabilities, Landsat is reliable for detecting surface features such as sand, soil, salt, vegetation, and water. Secondly, the supervised Random Forest machine learning algorithm is highly effective and robust for classifying satellite imagery, particularly in handling noisy data and spectral overlap. Analysis of satellite data indicates that the overall extent of the Shotoran sand dunes has remained largely stable over the past 30 years. Changes

observed in the boundaries of the sand dunes between images do not necessarily reflect actual changes in the extent of the sand dunes. They are related to the following technical and environmental factors: Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+), and Landsat 8 (OLI) have differences in spatial resolution, spectral resolution, and signal-to-noise ratio. Landsat 8 offers improved spectral quality and accuracy compared to previous generations, enabling better differentiation between surface covers such as sand, salt, and soil. These factors contribute to the observed apparent changes in the sand dune extent. During drought periods, these areas may dry out and become covered by sand, but with the first rainfall or runoff, the white, reflective salt surfaces or moist areas reappear.

Conclusion

The extent of the Shotoran sand dunes is geomorphologically stabilized, and the observed changes in satellite imagery are primarily due to technical factors (differences in sensors and imaging conditions) and environmental factors (variations in surface moisture and annual climate). Natural boundaries, such as salt flats and surrounding highlands, act as natural barriers, preventing the horizontal expansion of the sands. To accurately investigate the reasons for the expansion or lack thereof of the Shotoran sand dune boundaries, field methods and morphometric analysis of the sand dunes over several years are required. However, this was beyond the scope of this study due to time and cost constraints.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

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

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



شماره الکترونیکی: ۹۴۲۴-۲۲۵۱

مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی

Journal Homepage: www.geomorphologyjournal.ir



شناسایی و بررسی تغییرات تپه ماسه ها و مرز ماسه زار ریگ شتران در شمال غرب ژئوپارک طبس

نفیسه هاشمیان کاخکی^۱، ابوالقاسم امیراحمدی^۲✉، محمد خانه باد^۳، محمد باعقیده^۴

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، رایانامه: nafiseh.hashemian@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، رایانامه: amirahmadi@hsu.ac.ir

۳- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: mkhanehbad@um.ac.ir

۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، رایانامه: mhaaghideh2005@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۰۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۳

صص. ۱۸۳-۱۶۹

واژگان کلیدی:

الگوریتم یادگیری ماشین،

تپه های ماسه ای،

تصاویر ماهواره ای لندست،

جنگل تصادفی،

ریگ شتران

ریگ شتران به عنوان یکی از پهنه های ماسه ای وسیع در ایران، تحت تأثیر مجموعه ای از فرایندهای طبیعی و اقلیمی، دستخوش تغییرات ژئومورفولوژیکی شده است. به منظور شناسایی و پایش تغییرات مکانی تپه های ماسه ای، از تصاویر ماهواره ای لندست با قدرت تفکیک مکانی بین ۱۵ تا ۳۰ متر استفاده شد تا پوشش سطح زمین با دقت مناسبی مورد ارزیابی قرار گیرد. فرایند طبقه بندی اراضی ماسه زار با بهره گیری از الگوریتم های یادگیری و الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest)، در بستر سامانه ی Google Earth Engine صورت پذیرفت. تصاویر ماهواره ای مربوط به سنجنده های TM، ETM+ و OLI طی بازه ای ۳۰ ساله با مقاطع ۱۰ ساله (از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴) به کار گرفته شدند تا روند تغییرات مکانی تپه های ماسه ای و مرزهای ریگ شتران در شمال غرب ژئوپارک طبس تحلیل گردد. نتایج حاصل از تحلیل های مکانی نشان داد که در طول سه دهه ی گذشته، عمدتاً تغییرات موقتی در مرزهای این پهنه ماسه ای رخ داده که بیشتر ناشی از نوسانات اقلیمی بوده است. با این حال، به دلیل محصور بودن منطقه از سمت جنوب و شرق توسط ارتفاعات، از سمت غرب توسط دق، و نیز وجود جهت غالب باد از شمال به جنوب، امکان گسترش پایدار یا جابه جایی دائمی مرزهای ریگ شتران بسیار محدود است. با این وجود، در داخل این پهنه، جابه جایی های محدودی در موقعیت تپه های ماسه ای مشاهده می شود که بیانگر پویایی موضعی درون منطقه است. تحلیل روند زمانی مساحت تجمعی تپه های ماسه ای نشان داد که این مقدار در دوره ی ۱۹۹۴-۲۰۰۴ حدود ۲۳۰۰ کیلومتر مربع بوده است. در بازه ی ۲۰۰۴-۲۰۱۴ افزایش اندکی به میزان ۷۰ کیلومتر مربع رخ داده و مساحت به حدود ۲۳۷۰ کیلومتر مربع رسیده است. با این حال، در دهه ی پایانی (۲۰۱۴-۲۰۲۴) کاهش حدود ۶۰ کیلومتر مربعی مشاهده می شود و مساحت به ۲۳۱۰ کیلومتر مربع کاهش یافته است. این نوسانات اندک نشان دهنده ی پویایی محدود و نسبتاً پایدار تپه های ماسه ای در منطقه طی سه دهه ی گذشته است.

استناد: هاشمیان کاخکی، نفیسه، امیر احمدی، ابوالقاسم، خانه باد، محمد و باعقیده، محمد. (۱۴۰۴). شناسایی و بررسی تغییرات تپه ماسه ها و مرز ماسه زار ریگ شتران در شمال غرب ژئوپارک طبس. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی. ۱۴ (۳). ۱۸۳-۱۶۹.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.525188.1561](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.525188.1561)

مقدمه

پهنه‌های ماسه‌ای یکی از شاخص‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژیکی در نواحی خشک و بیابانی جهان به شمار می‌آیند که به واسطه‌ی فرایندهای بادی، اقلیمی، زمین‌ساختی و مورفولوژیکی شکل گرفته‌اند و تکامل می‌یابند. این پهنه‌ها که در زبان علمی با عنوان ارگ شناخته می‌شوند، در ادبیات بومی مناطق خشک ایران با نام‌هایی چون ریگ یا رک نام‌گذاری شده‌اند. این واژه‌ها به مناطقی اطلاق می‌شوند که عمدتاً با ماسه‌های روان پوشیده شده‌اند و فاقد پوشش گیاهی پایدار هستند (محمودی، ۱۳۸۱؛ عباسی و همکاران، ۲۰۱۹). تپه‌های ماسه‌ای و پویایی آن‌ها شاهدی بر تحولات آب و هوایی بلند مدت است مانند جنوب بیابان‌های چین (دوروالد و همکاران، ۲۰۲۵). پهنه‌های ماسه‌ای اساساً در نواحی خشک و خیلی خشک قرار گرفته‌اند (جیان و همکاران، ۲۰۲۱). ارگ‌ها عمدتاً در عرض‌های جغرافیایی ۳۰ تا ۳۵ درجه شمالی شکل می‌گیرند، جایی که دماهای بالا، تبخیر زیاد و افت رطوبت خاک، زمینه را برای بی‌ثباتی سطح خاک و فعالیت ماسه‌های روان فراهم می‌کند (دانگ و همکاران، ۲۰۰۴). در ایران، بیش از ۲۰ ریگ نسبتاً بزرگ و شمار زیادی ریگ کوچک‌تر با مجموع مساحتی در حدود ۳۶ هزار کیلومتر مربع شناسایی شده‌اند (محمودی، ۱۳۷۳). این ریگزارها اغلب در حوضه‌های داخلی مناطق خشک مرکزی و شرقی ایران، به‌ویژه در مجاورت دق‌ها، گسل‌ها و دره‌های بسته قرار دارند. توزیع آن‌ها تابعی از ویژگی‌های زمین‌ساختی، توپوگرافی، میزان دسترسی به ماسه، پوشش گیاهی، و مهم‌تر از همه، ویژگی‌های باد شامل جهت، شدت، تداوم و چرخه‌های فصلی است (لو و همکاران، ۲۰۱۳). درک دقیق از منشأ، مسیر انتقال و محل نهشته‌گذاری ماسه‌ها برای تحلیل پویایی اکوسیستم‌های بیابانی و مدیریت منابع خاک و آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رامشت و همکاران، ۱۳۹۱). تپه‌های ماسه‌ای حاصل فرسایش، انتقال و رسوب‌گذاری باد هستند و جابجایی آن‌ها تابعی پیچیده از متغیرهای اقلیمی، ژئومورفیک و انسانی است. تعیین چگونگی گسترش و میزان فعالیت و جابجایی این تپه‌ها از مهمترین اهداف مطالعات فرسایش بادی است (جعفری‌گل و همکاران، ۱۳۹۶). مطالعات نشان می‌دهند که جهت و شدت باد (هوور و همکاران، ۲۰۱۸)، از جمله عوامل کلیدی در رفتار حرکتی این تپه‌ها هستند. مقصودی و همکاران (۲۰۱۷) در ریگ مصر، حرکت سالانه ۸ متر تپه‌های ماسه‌ای را در اثر بادهای شمال‌غرب-جنوب شرق گزارش کردند. شریفی‌پیشون و همکاران (۱۳۹۸) نیز در یک بازه‌ی ۴۰ ساله در ایران مرکزی، موفق به تعیین جهت و مقدار حرکت تپه‌ها شدند. همچنین (جمالی و همکاران، ۲۰۱۸) با تحلیل خطرپذیری تپه‌ها در شهرستان صدوق یزد، به نزدیک شدن تپه‌های مرکز ارگ به مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی اشاره کردند. داده‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، ابزارهای کلیدی در مطالعه روند تغییرات فضایی-زمانی تپه‌های ماسه‌ای هستند. مطالعاتی همچون اوینگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ هوگان هولتز و همکاران، ۲۰۱۲ و یانگ و شی، ۲۰۱۸؛ توانسته‌اند از این فناوری برای تحلیل مسیر حرکت، نرخ جابه‌جایی و تحول بلندمدت ریگزارها بهره‌گیرند. در این میان، عوامل اقلیمی مانند تغییرات بارش و دما، از متغیرهای کلیدی مؤثر بر پایداری یا گسترش مرز ریگزارها شناخته می‌شوند. در سطح جهانی، پژوهش‌هایی مانند وانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ در چین و اسحاق و همکاران، ۲۰۰۹ نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث فعال شدن دوباره ماسه‌های تثبیت‌شده و گسترش ریگزارها شوند. با وجود پژوهش‌های انجام‌شده، هنوز اطلاعات دقیق، مقایسه‌پذیر و بلندمدت از برخی از ریگزارهای ایران، به‌ویژه ریگ شتران در شمال‌غرب ژئوپارک طبس، در دسترس نیست. این منطقه یکی از گسترده‌ترین پهنه‌های ماسه‌ای کشور است که در اثر تعامل مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی، زمین‌ساختی و انسانی دچار تغییرات ژئومورفولوژیکی شده است. موقعیت خاص آن در مجاورت دق‌ها، ارتفاعات و قرارگیری در مسیر بادهای غالب شمالی-جنوبی، آن را به یکی از نواحی پویای ماسه‌ای ایران تبدیل کرده است. با این حال، مطالعه‌ای جامع که به صورت کمی و فضایی روند گسترش یا تغییر مرز این ریگزار را در طی چند دهه اخیر تحلیل کند، انجام نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و بررسی تغییرات فضایی-زمانی تپه‌های ماسه‌ای و مرز ماسه‌زار ریگ شتران در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی در

محیط گوگل ارث انجین انجام شده است. این مطالعه می‌کوشد تا با بهره‌گیری از روش‌های نوین پردازش داده‌های مکانی، رفتار ژئومورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای این منطقه را تحلیل کرده و زمینه‌ای برای پایش و پیش‌بینی آینده آن فراهم آورد. گسترش و توسعه تپه‌های ماسه‌ای از طریق باد به عوامل دیگر مانند توپوگرافی و پوشش گیاهی نیز بستگی دارد و تاریخچه آن نه تنها نتیجه بادهای کنونی بلکه با چرخه بادهای فصلی و تغییرات بلند مدت ادغام می‌شوند. این توانایی به تشریح فراوانی اشکال آنها کمک کرده و تپه‌های ماسه‌ای را شاهدی بر بادهای قدیمه و شرایط محیطی می‌داند. بر روی زمین، تپه‌های ماسه‌ای برای مطالعه آب و هوای قدیمه و آزمایش مدل‌های محیطی استفاده می‌شوند (شوزاکی و هسه‌گوا، ۲۰۲۲). با توجه به نبود داده‌های بلندمدت و تحلیلی درباره تغییرات مرزی ریگ‌شتران و اثرات اقلیمی بر پویایی آن، این پژوهش تلاش دارد تا با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی و داده‌های ماهواره‌ای لندست در یک بازه‌ی ۳۰ ساله (۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴)، الگوی تغییرات مکانی تپه‌های ماسه‌ای و مرزهای ماسه‌زار ریگ‌شتران را شناسایی و تحلیل کند.

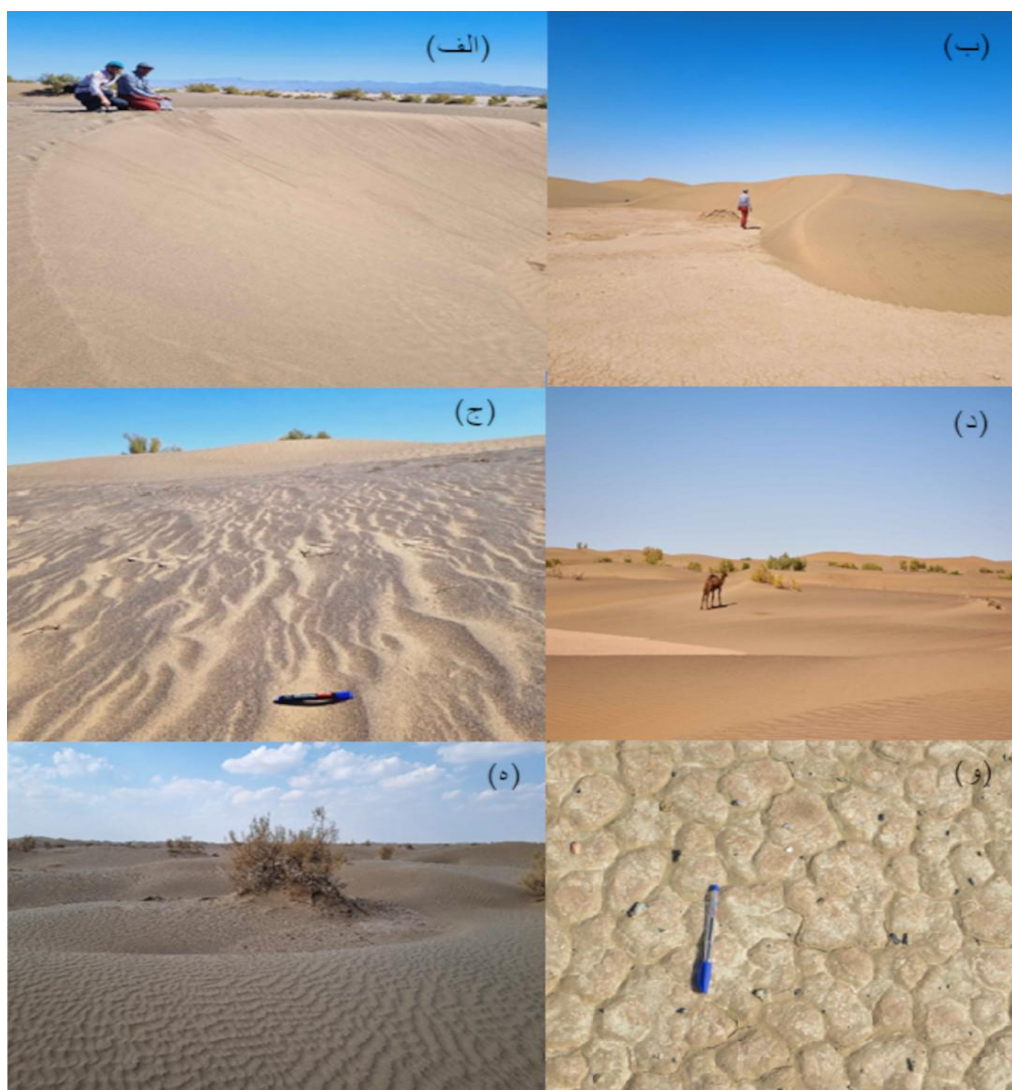
منطقه مورد مطالعه

ریگ‌شتران با مساحت ۲۶۴۱ کیلومتر مربع، بین ۱۹° ۵۵' تا ۵۹° ۵۵' طول شرقی و ۳۳° ۳۸' تا ۳۳° ۶' عرض شمالی در فاصله ۸۰ کیلومتری شهر طبس در ناحیه‌ی جنوب شرقی دشت کویر و در فاصله‌ی کوهستان‌های خور و طبس، واقع گردیده است (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رباط خان) که از نظر پیکرشناسی جزو پیچیده‌ترین ریگ‌های ایران محسوب می‌شود (شکل ۱). ریگ‌شتران از به هم پیوستن ریگ‌حیدر در شمال و ریگ‌حاجی مجی در نیمه جنوبی آن به سمت شرق و ریگ‌سرگردان در بازوی شمال غربی تشکیل شده است. ریگ‌شتران چهارمین ریگ بزرگ ایران است^۱ و تحت تأثیر بادهای طوفان‌زا از شمال و شمال غربی قرار دارد و بخش جنوبی آن به دو بازوی متفاوت تقسیم شده است. محور طولی این ریگ از شمال شرقی به جنوب غربی کشیده شده و با محور کوهستان‌های مجاور هم‌راستا است (محمودی، ۱۳۸۱). ارتفاع منطقه از ۶۰۰ تا ۱۳۰۰ متر از سطح دریا متغیر است (شکل ۱). از لحاظ موقعیت جغرافیایی ریگ‌شتران از شمال به دریاچه نمک خور از جنوب به راه ارتباطی یزد-طبس از غرب به راه ارتباطی خور-یزد و از شرق به رباط کال مرد و رباط خان محدود می‌شود. روستاها و شهرستان‌های اطراف شامل، روستای شتران، حلوان، خور و بیابانک، حاجی‌آباد و رباط خان می‌باشند (نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ طبس). این روستاها به دلیل محدودیت‌های منابع آب و زمین‌های کشاورزی، بیشتر به فعالیت‌های دامداری، کشاورزی در مقیاس محدود و همچنین فعالیت‌های معیشتی مانند استخراج منابع طبیعی مشغول هستند. میانگین بارندگی سالانه این منطقه حدود ۸۰ میلی‌متر است که از توزیع زمانی نامنظم برخوردار است. دمای میانگین سالانه نیز ۲۱٫۹ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است که این منطقه را طبق روش دمارتن در زمره مناطق خشک قرار می‌دهد (سازمان هواشناسی ایران، ۱۴۰۳). حوضه مطالعاتی از نظر هیدرولوژیکی بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران محسوب می‌شود (نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی طبس).

^۱ ریگ‌لوت، ریگ‌جازموریان، ریگ‌جن



منطقه مورد مطالعه در بلوک طبس و در مجاورت دو گسل مهم کلمرد و نائین در ایران مرکزی قرار دارد. روند کوه‌های این منطقه شمال شرقی-جنوب غربی بوده است. گسل نائین از مرزهای رسوبات دگرگونی و غیردگرگونی عبور کرده و گسل کلمرد نیز در شرق برجستگی کلمرد امتداد دارد. قدیمی‌ترین واحد سنگی این ناحیه، سازند کلمرد است که به شدت چین خورده و گسلیده شده و شامل شیل‌ها، ماسه‌سنگ‌های آרקوزی و سیلتستون می‌باشد. نهشته‌های دوره کربونیفر این ناحیه، به نام سازند گچال، نشان‌دهنده محیط تبخیری کم‌عمق هستند. در دوره پرمین، شرایط قاره‌ای گرم و خشک در منطقه غالب بوده است. نهشته‌های کواترنری منطقه نیز شامل ماسه‌های بادی و وسیع می‌باشند که در منطقه گسترش یافته‌اند (آقا نباتی، ۱۹۸۷). به لحاظ ژئومورفیکی این ریگ شامل تپه‌های عرضی متراکم و توده‌ای است که دره‌های زیادی در آن‌ها وجود دارد. ضخامت این ریگ گاهی به ۶۵ متر نیز می‌رسد. در جنوب ریگ، برخان‌های کوچک و متراکم دیده می‌شود. در سمت مشرق، تراکم ماسه‌ها به گونه‌ای است که توپوگرافی منطقه به شکل تپه ماهور دیده می‌شود و حفره‌های فراوانی دارد. در بخش جنوبی، رشته‌های ماسه‌ای به صورت باریک و موازی در آمده و اغلب مسیل‌ها از داخل آن‌ها عبور می‌کنند. احتمالاً ریگ‌های قدیمی زیر این قطعه قرار دارند (محمودی، ۱۳۸۱). لندفرم‌های غالب ژئومورفولوژیکی آن شامل نیکاها و تپه‌های ماسه‌ای است (شکل ۲).



شکل ۲: اشکال ژئومورفیک مشاهده شده در ریگ شتران الف و ب) دو نمای متفاوت از برخان ها (تاریخ عکس: مهر ماه ۱۴۰۲)
 ج: نمایی نزدیک از ریل مارک های خطی در تپه های ماسه ای ریگ شتران (تاریخ عکس اسفند ماه ۱۴۰۲)
 د: چشم اندازی گسترده از تپه های ماسه ای و کم ارتفاع ریگ شتران (تاریخ عکس اسفند ماه ۱۴۰۲)
 ه: نمایی از یک نبکا، محصور شده در بین تپه های کم ارتفاع ریگ شتران (تاریخ عکس: اسفند ۱۴۰۲)
 و: ترک گلی مشاهده شده در بستر ریگ شتران

روش تحقیق

برای رسیدن به هدف پژوهش ابتدا مطالعات کتابخانه ای در رابطه با ماسه زارها و تغییرات مرز ماسه زارها در ایران و جهان صورت گرفت. سپس بررسی تغییرات مرز ریگ شتران بر اساس تصاویر ماهواره ای لندست^۱ (سنجنده های TM، ETM+ و OLI) در طی ۳ دوره زمانی با فواصل ۱۰ ساله (از ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴) و بر اساس مشخصات مورد اشاره در جدول (۱) مورد تحلیل قرار گرفت. ابتدا اعتبار سنجی داده ها صورت گرفت. بدین طریق که برای انطباق با پیکسل های

¹ Landsat

مرجع تصویر ماهواره ای، اعتبار سنجی و تخمین خطا و دقت به روش ضریب کاپا انجام گرفت که به طور خلاصه دقت درست نمایی^۱ معادل ۹۰٪ و ضریب کاپا^۲ معادل ۰/۸۵ محاسبه شد که در جدول (۱) ارائه شده است و برای این تحقیق بسیار قابل قبول ارزیابی می شود.

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره ای مورد استفاده در سنجش از دور ریگ شتران

سال	ماهواره	سنجنده	دقت درست نمایی	ضریب کاپا
1994	Landsat 5	TM	86%	0.78
2004	Landsat 7	ETM+	94%	0.89
2014 2024	Landsat 8 Landsat 8	OLI-TIRS OLI-TIRS	95% 95%	0.86 0.86

در این مقاله از تصاویر ماهواره ای لندست و الگوریتم یادگیری ماشین از نوع جنگل تصادفی استفاده شده است. ابتدا اینکه سری ماهواره‌های لندست (۵، ۷، ۸ و ۹) با پوشش جهانی و داده‌های رایگان، برای پایش تغییرات پوشش زمین در مقیاس وسیع بسیار مناسب هستند. وضوح مکانی بین ۳۰ تا ۱۵ متر (بسته به باند)، و توانایی تصویربرداری چند طیفی^۳، لندست را برای تشخیص ویژگی‌های سطح زمین مانند ماسه، خاک، نمک، گیاه و آب قابل اعتماد می‌سازد. دوم اینکه الگوریتم یادگیری ماشین نظارتی^۴ برای طبقه بندی تصاویر ماهواره‌ای بسیار مؤثر و مقاوم در برابر داده‌های نویزدار و همپوشانی طیفی است. مزیت اصلی آن نسبت به روش‌های سنتی مانند^۵ (MLE) که یک رویکرد آماری برای تخمین پارامترهای مدل‌های پارامتریک هست و همینطور روش سنتی^۶ (KNN) که روش غیرپارامتریک ساده مبتنی بر فاصله است در دقت بالاتر، مقاومت در برابر بیش‌برازش^۷ و نیاز کمتر به تنظیمات پیچیده است. همین‌طور، جنگل تصادفی یک الگوریتم ترکیبی پیشرفته است که از ترکیب درخت‌های تصمیم با تکنیک‌های بگینگ و انتخاب تصادفی ویژگی‌ها استفاده می‌کند و برای داده‌های پیچیده‌تر مناسب‌تر است. در تشخیص ماسه زار چند نکته مهم وجود دارد. اول اینکه ماسه زارها بازتاب طیفی نسبتاً بالایی در باندهای میانی (MIR) و کوتاه موج (SWIR) دارند. تفاوت آن‌ها با خاک خشک، نمک زار و کفه‌ها، بسته به میزان رطوبت، بافت و مواد سطحی ممکن است کم باشد که نیاز به ترکیب شاخص‌ها و باندها دارد. دومین نکته تفکیک شن از کفه نمکی است که NDSI و SWIR/Green شاخص‌های مؤثری برای شناسایی نمک هستند. کفه‌ها معمولاً در دوره‌های خشک بازتاب بالایی در باندهای مرئی دارند، اما با بارندگی و رطوبت، بازتابشان به علت اختلاط طیفی کاهش می‌یابد. سومین نکته این است که در دوره‌های خشک، سطح نمکی ترک‌خورده و شن‌های روان ممکن است به داخل آن نفوذ کنند که ماسه زار گسترش ظاهری می‌یابد. در دوره‌های مرطوب، بارندگی و رواناب باعث آب‌گرفتگی یا افزایش بازتاب سطح کفه می‌شود که سبب کاهش ظاهری ماسه زار می‌شود.

در طبقه‌بندی ماسه‌زار با استفاده از تصاویر لندست و الگوریتم جنگل تصادفی ابتدا باید تصاویر ماهواره ای به منظور آماده

¹ Overall Accuracy

² Kappa Statistics

³ Multi-spectral

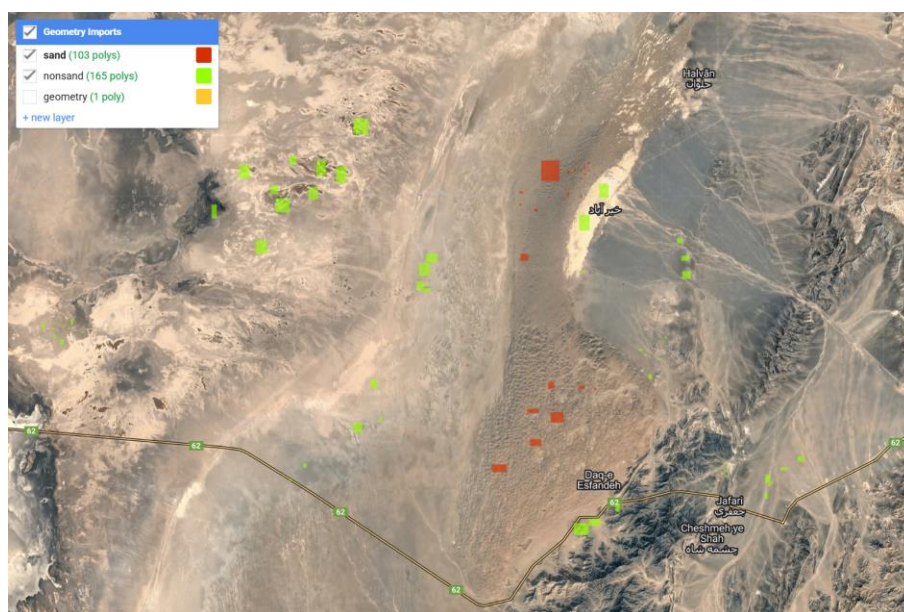
⁴ Supervised

⁵ Maximum Likelihood

⁶ K-Nearest Neighbors

⁷ overfitting

سازی داده‌ها برای تحلیل پیش پردازش شود که شامل ابتدا تصحیح هندسی و رادیومتریک است که این مرحله برای تطبیق دقیق موقعیت پیکسل‌ها با مختصات جغرافیایی و بهبود کیفیت طیفی داده‌ها انجام می‌شود. تصحیح هندسی، هم‌ترازی پیکسل‌ها را تضمین کرده و تصحیح رادیومتریک اثرات جوی و حسگر را کاهش می‌دهد. سپس ماسک کردن ابر و سایه‌ها با استفاده از الگوریتم‌هایی نظیر Fmask یا بهره‌گیری از داده‌های باند کیفیت نواحی تحت تاثیر ابر و سایه شناسایی و حذف می‌شوند تا دقت تحلیل افزایش یابد. نماگرهای طیفی کلیدی شامل شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) برای شناسایی پوشش گیاهی، شاخص تفاضل نرمال شده نمک (NDSI) برای تشخیص نواحی نمک زار، و شاخص روشنایی خاک (BSI) برای ارزیابی ویژگی‌های خاک محاسبه می‌شوند. این نماگرها اطلاعات طیفی تکمیلی برای طبقه‌بندی دقیق‌تر فراهم می‌کنند. سپس برای آموزش الگوریتم جنگل تصادفی در فرآیند طبقه‌بندی نمونه‌های آموزشی تهیه شود. در این مرحله پیکسل‌هایی از کلاس‌های مختلف (مانند ماسه‌زار، غیر ماسه‌زار) با برچسب‌های صحیح انتخاب می‌شوند. نمونه‌های آموزشی از طریق تفسیر بصری تصاویر لندست، تصاویر گوگل ارث، داده‌های میدانی، یا نقشه‌های موجود از مطالعات قبلی استخراج می‌شوند (لی و همکاران، ۲۰۲۴). نمونه‌ها باید دقیق، نماینده تنوع طیفی هر کلاس، و به صورت پراکنده در کل تصویر انتخاب شوند تا از تعمیم‌پذیری مدل اطمینان حاصل شود. کیفیت و دقت نمونه‌های آموزشی به‌طور مستقیم بر عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی تاثیر می‌گذارد. این مراحل برای طبقه‌بندی دقیق ماسه‌زارها و تحلیل تغییرات آن‌ها در منطقه مورد مطالعه انجام شود. لاپورت فورته و همکاران، ۲۰۲۰؛ با بهره‌گیری از NDVI و الگوریتم جنگل تصادفی، توانستند پوشش ماسه و پوشش گیاهی را در تپه‌های ساحلی به دقت تفکیک کنند. شکل ۳ طبقه‌بندی اراضی به دو کلاس ماسه و غیر ماسه را نشان می‌دهد.



شکل ۳: طبقه‌بندی اراضی به دو کلاس ماسه و غیر ماسه

سپس با استفاده از پیکسل‌های نمونه، مدل جنگل تصادفی آموزش داده می‌شود. الگوریتم جنگل تصادفی (RF) مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم‌گیری است که هر یک بر پایه‌ی زیرمجموعه‌ای تصادفی از داده‌ها و ویژگی‌ها ساخته می‌شوند. در مرحله‌ی پیش‌بینی، هر درخت به‌طور مستقل کلاس پیکسل را پیش‌بینی می‌کند و در نهایت، طبقه‌بندی

¹ Lee et al

نهایی پیکسل بر اساس رأی اکثریت درخت‌ها تعیین می‌شود. پس از آموزش، مدل بر روی کل تصویر اعمال شده و کلاس هر پیکسل تعیین می‌گردد. ویژگی‌ها^۱ ورودی الگوریتم شامل بازتاب باندهای مختلف لندست (مثلاً باندهای ۲ تا ۷) و شاخص‌های طیفی شامل NDVI، NDSI، BSI است. نتیجه نهایی، نقشه طبقه‌بندی شده است که در آن، ماسه زارها به عنوان یک کلاس مجزا مشخص شده‌اند.

نتایج

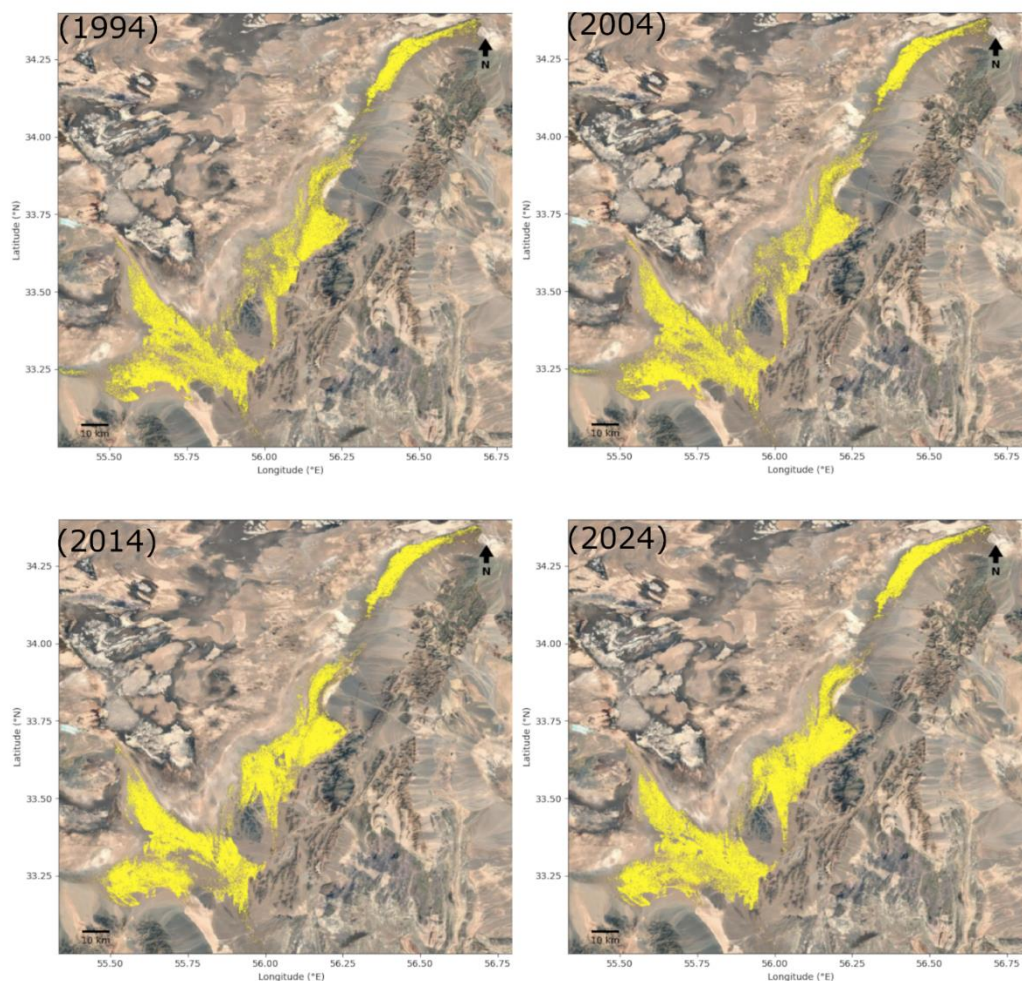
محدوده شناسایی شده ماسه‌زار شتران در چهار دوره زمانی شامل سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۴، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی^۲ استخراج شده و در شکل (۴) نمایش داده شده است. الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل ماهیت غیرخطی، توانایی بالا در مدیریت داده‌های پیچیده و عملکرد مناسب در مواجهه با نویز و هم‌پوشانی طیفی، گزینه‌ای مناسب برای تفکیک پوشش‌های سطحی مشابه مانند شن، نمک و خاک در تصاویر لندست است.

تحلیل فضایی این نقشه‌ها نشان می‌دهد که گستره ماسه‌زار در بازه زمانی ۳۰ ساله تغییرات جزئی داشته و الگوی کلی پراکنش آن نسبتاً ثابت باقی مانده است. ثبات این الگو به احتمال زیاد متأثر از شرایط محیطی مانند توپوگرافی منطقه، ویژگی‌های اقلیمی، ساختار زمین‌شناسی، و وجود مرزهای طبیعی نظیر ارتفاعات و کفه‌های نمکی است که به عنوان موانعی در برابر گسترش افقی ماسه‌ها عمل می‌کنند. همچنین، نواحی‌ای که تغییراتی در مرزهای ماسه‌زار در آن‌ها مشاهده می‌شود، عمدتاً در مناطقی با شیب ملایم و ارتفاع کمتر قرار دارند که حساسیت بیشتری به شرایط اقلیمی و فرسایش بادی دارند.

استفاده از سری زمانی طبقه‌بندی شده، امکان پایش روند تغییرات، ارزیابی پایداری ژئومورفولوژیکی منطقه، و شناسایی نواحی مستعد تغییر را فراهم کرده است. نتایج حاکی از آن است که با وجود نوسانات محیطی و اقلیمی، محدوده ماسه‌زار شتران در طول زمان از ثبات نسبی برخوردار بوده و نشانه‌ای از گسترش فعال و پیوسته در آن دیده نمی‌شود.

¹ features

² Random Forest



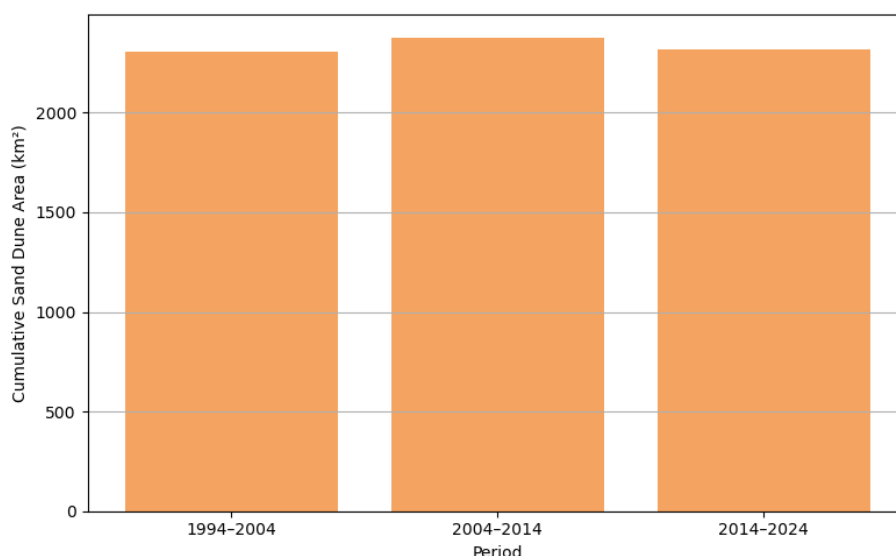
شکل ۴: تصاویر ماهواره ای لندست در محدوده مورد مطالعه ریگ شتران برای سالهای ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴

تحلیل تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴، بیانگر بروز تغییرات موقتی در مرز بین ماسه‌زار و کفه نمکی در محدوده مورد مطالعه است. در تصویر سال ۲۰۱۴، به دلیل شرایط خشکسالی حاکم و کاهش سطح رطوبت در بخش‌هایی از کفه نمکی، این نواحی با فرایندهای بادی تحت تأثیر قرار گرفته و ماسه‌ها در سطح آن‌ها تجمع یافته‌اند. این وضعیت موجب شده است که الگوریتم طبقه‌بندی، این مناطق را به عنوان ماسه‌زار شناسایی کند، چراکه ظاهر سطحی مشابه با پهنه‌های ماسه‌ای دائمی یافته‌اند. در مقابل، تصویر مربوط به سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که این نواحی در پی وقوع بارندگی و ورود رواناب‌های سطحی، مرطوب شده‌اند. این تغییر شرایط سطحی باعث شده تا تفاوت بازتاب طیفی این مناطق در تصاویر ماهواره‌ای به گونه‌ای باشد که در طبقه‌بندی، دیگر به عنوان ماسه‌زار شناسایی نشوند. این پدیده نشان‌دهنده وابستگی موقتی مرزهای شناسایی شده میان ماسه‌زار و کفه نمکی به شرایط اقلیمی کوتاه‌مدت، به ویژه بارندگی و میزان رطوبت سطحی است. با این حال، بررسی‌های بلندمدت و تطبیقی داده‌های مکانی نشان می‌دهد که به رغم نوسانات اقلیمی و تأثیر آن‌ها بر طبقه‌بندی موقتی اراضی، مرز ژئومورفولوژیکی بین ماسه‌زار و کفه نمکی در این ناحیه از ثبات نسبی برخوردار بوده و در بلندمدت پایدار است. این ثبات ناشی از تفاوت‌های ساختاری، مورفولوژیکی، و هیدرولوژیکی میان این دو واحد ژئومورفیک است که آن‌ها را از نظر فرآیندهای شکل‌زایی و رفتار سطحی متمایز

می‌سازد. بنابراین، تغییرات مشاهده شده در بازه‌های زمانی کوتاه بیشتر بازتابی از نوسانات محیطی هستند و تحولات ساختاری پایدار خصوصاً در مرزهای کفه نمکی مشاهده نمی‌شود.

در نمودار (۱)، روند تغییرات مساحت ماسه‌زار در سه دوره‌ی زمانی متوالی (۱۹۹۴-۲۰۰۴، ۲۰۰۴-۲۰۱۴ و ۲۰۱۴-۲۰۲۴) نمایش داده شده است. در هر بازه‌ی ده ساله، حداکثر گستره‌ی ماسه‌زار، بر اساس تحلیل جامع تصاویر ثبت شده توسط ماهواره لندست در طی دوره مربوطه، برآورد شده است. مساحت ارائه شده در واقع نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی تجمعی حضور ماسه‌زار در طول هر دهه است، به این معنا که حتی اگر پوشش ماسه‌ای در طی سال‌های مختلف در یک نقطه ظاهر و ناپدید شده باشد، آن نقطه در آمار نهایی آن دوره لحاظ شده است.

در دوره‌ی اول (۱۹۹۴-۲۰۰۴)، مساحت تجمعی ماسه‌زار در حدود ۲۳۵۰ کیلومتر مربع برآورد شده است. این مقدار در دهه‌ی بعد (۲۰۰۴-۲۰۱۴) با افزایش اندکی به حدود ۲۴۴۰ کیلومتر مربع رسید که می‌تواند بیانگر گسترش جغرافیایی ماسه‌زار، احتمالاً در نتیجه‌ی سال‌های خشک در این دوره باشد. با این حال، در دوره‌ی سوم (۲۰۱۴-۲۰۲۴)، روند تغییرات معکوس شده و مساحت تجمعی ماسه‌زار با کاهش محسوس به حدود ۲۲۲۰ کیلومتر مربع کاهش یافته است. کاهش اخیر می‌تواند بازتابی از تغییر در شرایط اقلیمی یا هیدرولوژیکی منطقه باشد. از جمله عوامل احتمالی می‌توان به افزایش بارندگی و در نتیجه مرطوب شدن سطح کفه‌های نمکی اشاره کرد.



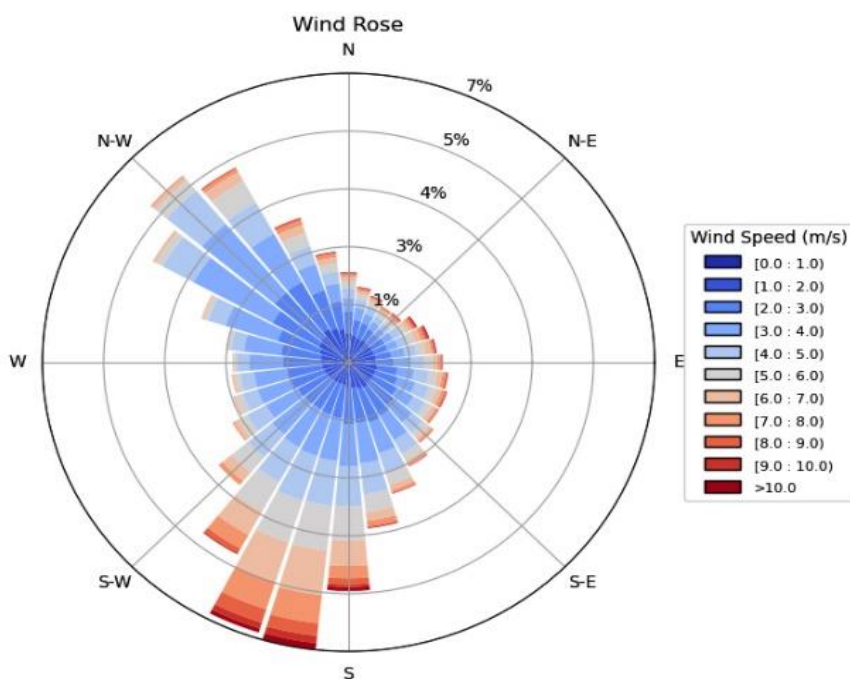
نمودار ۱: گستره تجمعی ماسه‌زار در هر یک از بازه‌های زمانی ۱۰ ساله

تحلیل داده‌های هواشناسی

با توجه به نبود ایستگاه بادنجه‌ی مورد مطالعه، برای بررسی رژیم باد از داده‌های بازتحلیل مدل جهانی ERA5-Land در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ استفاده شده است. این مدل یکی از محصولات مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت اروپایی (ECMWF) است که با استفاده از تلفیق داده‌های مشاهداتی و مدل‌های عددی جو، اطلاعات آب‌وهوایی پیوسته و قابل اطمینانی را در شبکه‌ای منظم ارائه می‌دهد. در این پژوهش، داده‌های سرعت و جهت باد از یک پیکسل واقع در محدوده‌ی ریگزار و در نزدیکی روستای حلوآن (به‌عنوان نزدیک‌ترین نقطه قابل اعتماد) استخراج شده‌اند. انتخاب این نقطه به‌گونه‌ای صورت گرفته که بیشترین تطابق مکانی با منطقه مورد مطالعه داشته باشد. هرچند داده‌های بازتحلیل جایگزین کامل داده‌های میدانی نیستند، اما در مطالعات منطقه‌ای فاقد ایستگاه، روشی رایج و

معتبر به شمار می‌روند و در پژوهش‌های مختلف نیز دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها در تحلیل الگوهای اقلیمی مانند گل‌باد مورد تأیید قرار گرفته است (هرسباخ و همکاران، ۲۰۲۰).

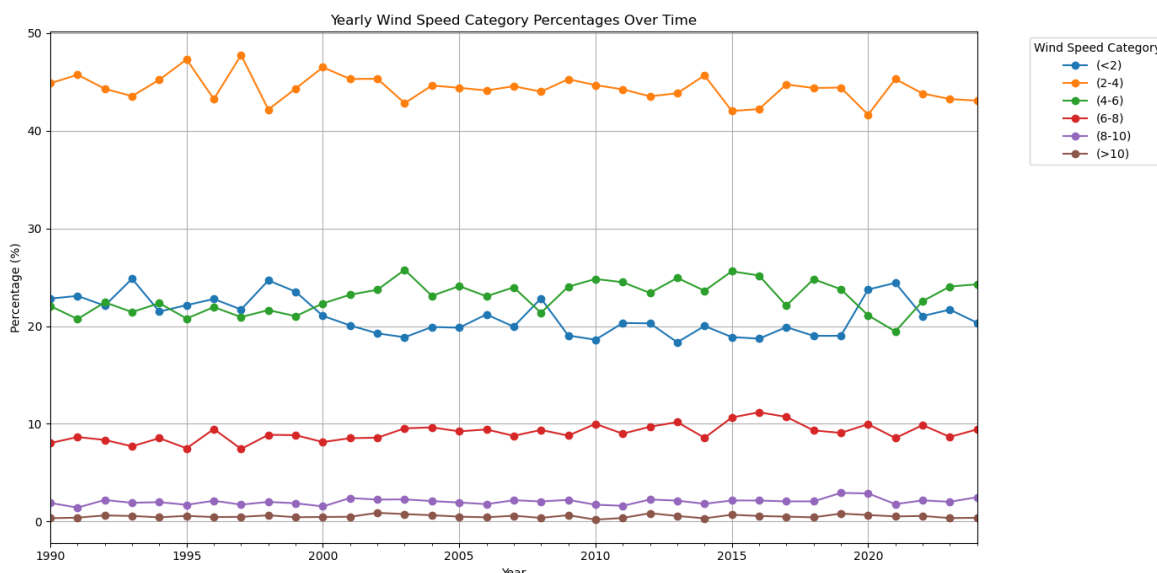
بررسی گل‌باد نشان می‌دهد که الگوی غالب وزش باد در منطقه مورد مطالعه به‌طور مشخص از دو جهت اصلی شمال‌شرقی (NE) و جنوب‌غربی تا جنوبی (SWS) تبعیت می‌کند. این الگوی باد دوسویه بیانگر شرایط خاص توپوگرافیکی منطقه است، به‌ویژه حضور رشته‌کوه‌های کلمرد که به‌عنوان مانعی طبیعی، مسیر حرکت توده‌های هوایی را هدایت و محدود می‌کنند. چنین ساختارهای طبیعی معمولاً موجب تشکیل کریدورهای بادی می‌شوند که در آن باد در جهات مشخصی تقویت و متمرکز می‌شود (نمودار ۲). شواهد حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های میدانی نیز موید این الگو است؛ به‌طوری که فرم تپه‌های ماسه‌ای در منطقه، انطباق بالایی با جهت‌گیری باد دارد. تپه‌های ماسه‌ای غالباً دارای ساختارهایی طولی یا برخانی هستند که در اثر وزش باد در دو جهت مخالف شکل می‌گیرند. در این نوع اشکال ژئومورفولوژیک، شیب تندتر معمولاً در جهت وزش باد غالب ایجاد می‌شود و امتداد کلی تپه‌ها در راستای مسیر رفت و برگشتی باد مشخص می‌شود. در این منطقه نیز تپه‌های ماسه‌ای چنین ویژگی‌هایی را نشان می‌دهند و بیانگر آن هستند که فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری تحت تأثیر مستقیم دینامیک باد و توپوگرافی منطقه‌ای بوده است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌راستایی بین الگوی باد و جهت‌گیری تپه‌های ماسه‌ای نه تنها تأییدی بر صحت داده‌های باد در این بازه بلندمدت است، بلکه بر نقش اساسی شرایط توپوگرافیکی و اقلیمی در شکل‌گیری و تحول ژئومورفولوژیک تپه‌های ماسه‌ای منطقه را تأیید می‌کند.



نمودار ۲: نمودار گل‌باد منطقه مورد مطالعه

بررسی نمودار سری زمانی سرعت باد سالیانه در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که تغییرات سرعت باد در دسته‌بندی‌های مختلف (بر اساس طبقه‌بندی سرعت) فاقد نوسانات قابل توجه و روند مشخص افزایشی یا کاهش‌ی است. این پایداری در رفتار زمانی سرعت باد، نشان‌دهنده ثبات نسبی اقلیم بادی منطقه طی سه دهه گذشته است. به بیان

دیگر، داده‌ها حاکی از آن هستند که هیچ تغییر ساختاری یا اقلیمی عمده‌ای که منجر به تغییر در رژیم بادی منطقه شده باشد، در این دوره زمانی رخ نداده است. عدم وجود روند مشخص در سری زمانی سرعت باد می‌تواند به عواملی نظیر موقعیت جغرافیایی خاص منطقه، تأثیرات توپوگرافی پایدار، و همچنین نبود تحولات شدید اقلیمی در سطح محلی یا ناحیه‌ای مربوط باشد. در چنین شرایطی، شرایط باد در منطقه عمدتاً توسط الگوهای سینوپتیکی و گردش‌های عمومی جو کنترل می‌شود که در بازه‌های زمانی طولانی تغییرات کمی دارند (نمودار ۳)



نمودار ۳: نمودار درصد سرعت باد سالیانه برحسب زمان

بحث

تفسیر تغییرات محدوده ماسه زار شتران بر اساس تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴ و سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۴ با لندست ۸ به شرح زیر است:

در تحلیل تغییرات زمانی محدوده ماسه زار شتران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴، نتایج نشان می‌دهد که گستره کلی این ماسه‌زار طی سه دهه گذشته تغییر معناداری نداشته و در حالت نسبتاً پایداری باقی مانده است. این ثبات مکانی می‌تواند حاصل عوامل متعددی از جمله شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های اقلیمی، زمین ساخت منطقه و نیز وجود موانع طبیعی نظیر کفه‌های نمکی و ارتفاعات اطراف باشد که در مجموع مانع از گسترش افقی توده‌های ماسه‌ای شده‌اند. با وجود این پایداری کلی، تفاوت‌هایی در مرزهای ماسه‌زار در تصاویر سال‌های مختلف دیده می‌شود که لزوماً بازتاب‌دهنده تغییرات واقعی در گستره ریگزار نیست، بلکه عمدتاً ناشی از عوامل محیطی و محدودیت‌های فنی تصاویر ماهواره‌ای است. از جمله این عوامل می‌توان به تفاوت در شرایط رطوبتی سطح زمین در زمان تصویربرداری، تغییرات فصلی و سالانه در میزان بارندگی، و همچنین اختلاط طیفی بین عناصر سطحی مانند نمک، ماسه و خاک اشاره کرد. در دوره‌های خشک، سطح کفه‌ها ممکن است ترک‌خورده و به شن‌های روان اجازه ورود بدهند، که این امر موجب بزرگ‌نمایی ظاهری ریگزار در تصاویر می‌شود. برعکس، در دوره‌های مرطوب، پوشش نمکی یا آب‌گرفتگی سطح کفه‌ها باعث افزایش بازتاب و کاهش ظاهری محدوده ماسه‌زار می‌گردد.

برای تفکیک دقیق بین پوشش‌های سطحی مختلف، شاخص‌هایی مانند SWIR/Green و NDSI در شناسایی نواحی نمکی کاربرد مؤثری دارند، چراکه این سطوح در دوره‌های خشک بازتاب بالایی در باندهای مرئی و مادون قرمز کوتاه‌موج دارند، اما در شرایط مرطوب به واسطه جذب رطوبت یا پوشش آبی، بازتاب آن‌ها کاهش می‌یابد و تمایزشان با ماسه

سخت تر می شود. در شرق منطقه، وجود کفه های نمکی با رطوبت نسبی بالا، سطحی پایدار ایجاد کرده اند که از حرکت شن ها جلوگیری می کند. با خشک شدن این سطوح در دوره های کم بارش، امکان پیشروی موضعی ماسه ها فراهم می شود، اما این جابجایی ها اغلب ناپایدار و موقتی اند. از سوی دیگر، در مرزهای جنوبی و شرقی، مخروط افکنه ها و ارتفاعات محلی به عنوان سدهای طبیعی در برابر گسترش ماسه زار عمل کرده اند. این واحدهای ژئومورفیک، به دلیل بافت درشت تر و مقاومت بالاتر در برابر فرسایش بادی، در پایداری مرزهای ماسه زار نقش مهمی ایفا کرده اند. در مجموع، بر اساس بررسی های انجام شده می توان نتیجه گرفت که تغییرات مشاهده شده در مرزهای ماسه زار شتران عمدتاً ناشی از عوامل محیطی و شرایط موقتی سطح زمین بوده و نه از گسترش فعال یا فرایندهای شدید بادی. بنابراین، درک دقیق از پویایی این سیستم نیازمند پایش بلندمدت میدانی همراه با تحلیل های مورفومتری تپه های ماسه ای است.

نتیجه گیری

یافته های این پژوهش نشان می دهد که ریگ شتران طی سه دهه ی گذشته (۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴) در وضعیت نسبتاً تثبیت شده ای قرار داشته و فاقد روند گسترش چشمگیر یا جابه جایی عمده در مرزهایش است. تحلیل تصاویر ماهواره ای و نتایج الگوریتم یادگیری ماشین بیانگر آن است که تغییرات فضایی مشاهده شده، عمدتاً در مقیاس های موضعی و محدود بوده و بیشتر ناشی از نوسانات فصلی اقلیم، تغییر رطوبت سطحی و عوامل طبیعی کوتاه مدت است. موانع ژئومورفولوژیکی اطراف ریگزار، از جمله کفه های نمکی، دق ها و ارتفاعات حاشیه ای، به عنوان سدهای طبیعی مؤثر در برابر گسترش افقی ماسه های روان عمل کرده اند. این موانع در کنار جهت گیری بادهای غالب، سبب تثبیت نسبی مرزهای ریگزار شده و الگوی حرکت ماسه ها را به مسیرهای خاصی محدود کرده اند. با وجود این پایداری نسبی، برخی جابجایی های جزئی و تغییر در موقعیت موضعی تپه های ماسه ای در درون پهنه شناسایی شده است که بیانگر پویایی محدود درونی و احتمال واکنش موضعی به تغییرات اقلیمی یا انسانی می باشد. این مسئله اهمیت پایش مداوم و دقیق تر ریگزار را در بازه های زمانی بلندمدت دوچندان می سازد. در نهایت، این پژوهش نشان داد که ترکیب داده های سنجش از دور، الگوریتم های یادگیری ماشین و تحلیل ژئومورفولوژیکی می تواند ابزار مناسبی برای شناسایی، پایش و پیش بینی تغییرات ریگزارها در مقیاس منطقه ای باشد. نتایج این مطالعه می تواند در راستای برنامه ریزی محیطی، مدیریت خطر فرسایش بادی، و تصمیم گیری های مربوط به توسعه پایدار در نواحی بیابانی به کار گرفته شود. با این حال، برای ارزیابی دقیق روند پویایی مرزهای ماسه زار شتران و تعیین میزان و جهت جابجایی تپه های ماسه ای، نیاز به مطالعات میدانی دقیق، برداشت های مکرر در بازه های زمانی بلندمدت می باشد. چنین مطالعاتی مستلزم صرف منابع مالی و زمانی قابل توجهی است که در چارچوب این پژوهش قابل تحقق نبوده است.

منابع

- جعفر بگلو منصور و همکاران، ۱۳۹۶، بررسی و پیش بینی تغییرات کاربری اراضی متأثر از تپه های ماسه ای در شرق شهر بشرویه با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۳، ۱۳۹۶، صص. ۱۱۷-۱۳۴
- رامشت محمد حسین و همکاران، ۱۳۹۱، بررسی میزان گسترش تپه های ماسه ای شرق جاسک در بازه زمانی (۱۳۸۳-۱۳۶۹)، با استفاده از GIS و RS، جغرافیا و توسعه، شماره ۳۱، صص ۱۳۶-۱۲۱.
- سازمان زمین شناسی ایران، ۱۳۸۴، نقشه زمین شناسی ۲۲۵۶ (رباط خان) و ۷۳۵۷ (طبس) مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- سازمان هواشناسی ایران، ۱۴۰۳، وبسایت: irimo.ir.
- شریفی پیچون محمد و همکاران، ۱۳۹۸، بررسی تغییرات ارتفاعی بررسی تغییرات ارتفاعی ریگ زرین با استفاده از سری های زمانی تصاویر

- ماهواره ای (طی دوره ۱۹۷۷-۲۰۱۷)، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۴، ۱۳۹۹، صص. ۱۹۲-۲۰۶
- عباس نژاد، احمد؛ ذهاب نوری، سمیه، ۱۳۹۱، شناسایی اشکال فرسایش بادی دشت رفسنجان، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، صص. ۱۲۷-۱۴۴
- محمودی، فرج الله، ۱۳۷۳، پراکندگی جغرافیایی ریگزارهای مهم ایران. تهران: مجله تحقیقات جغرافیایی. شماره ۳۴، صص ۳۵-۵.
- محمودی، فرج الله، ۱۳۸۱، پراکندگی جغرافیایی ریگزارهای مهم ایران، چاپ اول، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع، ۱۸۷ ص.
- نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ طبس، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور، ۱۳۵۰.
- Abbasi HR, Opp C, Groll M, Rohipour H, Gohardoust A (2019). Assessment of the distribution and activity of dunes in Iran based on mobility indices and ground data. *Aeolian Research*, 41: 100539.
- Aghanabati SA, Haghipur A (1978) Geological map of Tabas, 1:250000 series. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Dong ZB, Wang T, Wang XM (2004). Geomorphology of the mega dunes in the Badain Jaran desert, *Geomorphology*, 60: 191-203.
- Dörwald, L., Lehmkuhl, F., Delobel, L., Yang, X., & Stauch, G. (2025). Dynamics of dunes and climate variability over the last five decades: A remote sensing analysis of regional contrasts on the northeastern Tibetan Plateau and the adjacent Hexi Corridor. *Global and Planetary Change*, 252(104873), 104873. doi:10.1016/j.gloplacha.2025.104873
- Ewing, R.C., McDonald, G.D., Hayes, A.G., (2015). Multi-spatial analysis of aeolian dune-field patterns, *Geomorphology*, Vol 240, Pp 44-53.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoover, R. H., Gaylord, D. R., & Cooper, C. M. (2018). Dune mobility in the St. Anthony Dune Field, Idaho, USA: Effects of meteorological variables and lag time. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 309, 29-37. doi:10.1016/j.geomorph.2018.02.018
- Hugenholtz, C.H., Levin, N., Barchyn, T.E., Baddock, M.C., (2012). Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook, *Earth Science Reviews*.
- Jamali, A. A. (2018). Risk assessment of sand dune disaster in relation to geomorphic properties and vulnerability in the saduq-Yazd erg. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(1), 579-590. doi:10.15666/aeer/1601_579590
- Jiyan, T., Smith, R., & Brown, L. (2021). Geographical Distribution of Sandy Deserts: Hyper-arid, Arid, and Coastal Regions. *Journal of Arid Environments*, 185, 104-123.
- Laporte-Fauret, Q., Lubac, B., Castelle, B., Michalet, R., Marieu, V., Bombrun, L., Launeau, P., Giraud, M., Normandin, C., & Rosebery, D. (2020). Classification of Atlantic coastal sand dune vegetation using in situ, UAV, and airborne hyperspectral data. *Remote Sensing*, 12(14), 2222. <https://doi.org/10.3390/rs12142222>
- Lee, J., Kim, K., & Lee, K. (2024). Multi-Sensor Image Classification Using the Random Forest Algorithm in Google Earth Engine with KOMPSAT-3/5 and CAS500-1 Images. *Remote Sensing*, 16(24), 4622. <https://doi.org/10.3390/rs16244622>
- Lu, H., Yi, S., Xu, Z. et al. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial Maximum and Holocene Optimum. *Chin. Sci. Bull.* 58, 2775-2783 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5919-7>
- Maghsoudi, M., Navidfar, A., Mohammadi, A. (2017). The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data. doi:10.22059/jnec.2017.225011.62
- Shozaki, H., & Hasegawa, H. (2022). Development of longitudinal dunes under Pangaeen atmospheric

- circulation. *Climate of the Past*, 18(7), 1529–1539. doi:10.5194/cp-18-1529-2022
- Wang X, Dong Z, Yan P, Zhang J, Qian G (2005). Wind energy environments and dune field activity in the Chinese deserts. *Geomorphology* 65(1–2): 33–48.
- Yang, H., Shi, C., (2018). Spatial and temporal variations of aeolian sediment input to the tributaries (the Ten Kongduis) of the upper Yellow River, *Aeolian Research*, Vol 30, Pp 1-10.