The Journal of Geographical Research on Desert Areas
Vol 13, Issue 2, Fall and Winter 2025, pp :1-19
Home page: http://grd.yazd.ac.ir/
P-ISSN: 2345-332X E-ISSN: 2588-7009

Original Research Article

Evaluation of the effectiveness of afforestation in controlling desertification and dust in the sand dunes of Khuzestan, Kerman and Isfahan

Mehran Maghsoudi[1] **Tahereh Farahi Boshehri**[2]

1. Professor of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Ph.D. student in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran

10.22034/GRD.2026.23897.1677

Received:
October 31 2025
Accepted:
April 12 2026

Keywords:
Sand dunes, Afforestation, Dust concentration

Abstract

Sand dunes are associated with negative environmental impacts; therefore, in recent years, various methods—including the establishment of forest cover—have been used to stabilize dune areas. This study aims to evaluate the effectiveness of afforestation projects by examining their environmental impacts in the sand dune regions of Khuzestan, Kerman, and Isfahan provinces. The main data used in this research include the digital layer of afforestation areas in Iran, MODIS satellite imagery, and Google Earth images. The primary tools employed were ArcGIS, Google Earth, and Google Earth Engine. In the first step, the boundaries of the sand dunes were mapped, and the afforested areas were identified. Then, the impacts of afforestation on dust concentration and sand dune movement were evaluated. The results indicate that the highest impact of afforestation on reducing dust concentration—with a pixel coefficient of 0.51—was observed in the sand dunes of Kerman, while the lowest impact, with a coefficient of 0.23, was found in the dunes of Khuzestan. The assessment of the impact of afforestation on sand dune movement revealed that the greatest level of dune stabilization occurred in the isolated dunes of Khuzestan, which experienced about 1 meter of displacement. Following this, the dunes surrounding the cities of Kerman and Ardestan showed the highest stabilization and control, with displacements of less than 10 meters. Overall, the findings demonstrate that afforestation has had positive effects on reducing dust concentration and controlling sand dune movement. However, given the variation in effectiveness, it is necessary to examine the types of forest cover established and the quality of implementation in areas with limited impact, in order to identify and address the underlying causes of reduced effectiveness.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

* **Corresponding author:** Mehran Maghsoudi **Email:** maghsoud@ut.ac.ir

Address: University of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract

1. Introduction

Wind erosion in desert regions and the accumulation of aeolian sediments result in the formation of sand dunes, which are the outcome of interactions between wind regimes and sedimentation processes. Due to their dynamic nature, sand dunes have become environmental crisis centers, posing threats to urban and rural settlements, economic infrastructures, and agriculture by reducing productivity through sand movement. Although dunes are part of the natural landscape, their uncontrolled expansion disrupts ecological balance and accelerates desertification. Because of low moisture and insufficient vegetation cover, they are highly prone to wind erosion, making their stabilization essential. In Iran, various measures—including afforestation and the establishment of vegetation cover—have been undertaken to stabilize shifting sands. This method creates a protective plant layer that prevents sand displacement and enhances dune stability. Considering the varying success rates of these vegetation projects in different regions, the present study evaluates the effectiveness of afforestation initiatives implemented in the sand dune areas of Khuzestan, Kerman, and Isfahan provinces.

2. Research Methodology

In this study, the main data sources included the digital layer of afforestation areas in Iran, MODIS satellite imagery, and Google Earth images. The primary tools utilized were ArcGIS, Google Earth, and the Google Earth Engine platform. Based on the study objectives, the research was conducted in several stages. In the first stage, the boundaries of the sand dune areas were delineated, and afforested regions were identified. In the second stage, to evaluate dust concentration levels within the sand dune zones, the Google Earth Engine system and MODIS satellite images from 2019 to 2023 were used, and dust concentration maps were produced separately for each province (Khuzestan, Kerman, and Isfahan). In the third stage, Google Earth images from 2005 and 2020 were analyzed to assess the displacement and movement of sand dunes in the study areas.

3. Discussion and results

Given the negative environmental impacts of sand dunes, various stabilization methods—such as afforestation—have been implemented in recent years. This study aimed to assess the effectiveness of afforestation efforts by examining their environmental impacts in the sand dune areas of Khuzestan, Kerman, and Isfahan provinces. According to the results, the total areas afforested within the dune regions of Khuzestan, Kerman, and Isfahan in recent years were approximately 563, 425, and 1,820 square kilometers, respectively. The evaluation of afforestation impacts on dust concentration levels showed that the greatest effect was observed in the sand dunes of Kerman Province, where the pixel correlation coefficient between vegetation cover and dust concentration was 0.51. This value was 0.44 for Isfahan and 0.23 for Khuzestan. Based on these findings, it can be concluded that the established forest cover in the sand dune regions of Khuzestan and Isfahan has had relatively limited effectiveness in reducing dust concentration compared to Kerman.

4. Conclusion

The results of evaluating the effects of afforestation on sand dune displacement in the studied regions indicate that the highest level of dune stabilization occurred in the isolated dunes of Khuzestan, which experienced approximately 1 meter of movement. Following this, the dunes surrounding the cities of Kerman and Ardestan showed the next highest degree of stabilization and control, with displacements of less than 10 meters. Accordingly, it can be concluded that the established forest cover has played a significant role in stabilizing sand dunes in some areas; however, in certain regions—such as the central parts of Khuzestan's dunes, the dunes near Shahdad, and the northern areas of Band Rig in Kashan—its impact on stabilization and control has been limited. Overall, the findings demonstrate that afforestation has had positive effects on reducing dust concentration and controlling sand dune movement. Nonetheless, due to the observed variation in effectiveness, it is necessary to evaluate the types of forest cover used and the quality of implementation in areas with lower impact to identify and address the main causes of reduced effectiveness. To enhance the effectiveness of afforestation efforts, it is recommended that in areas with lower efficiency, native plant species that are resistant to local climatic conditions be used, and periodic monitoring through satellite imagery and wind modeling be conducted to assess the stability of dune stabilization. Additionally, the participation and education of local communities in maintaining afforestation projects can play a significant role in sustaining the results. A combination of biological and mechanical methods, such as planting vegetation and installing windbreaks or surface coverings, is recommended for more effective control of sand dune movement, and the development of a long-term management plan in collaboration with environmental and natural resource agencies is essential for the restoration of critical areas.

کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی
سال سیزدهم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحات ۱۹- ۱
Home page: http://grd.yazd.ac.ir/
P-ISSN: 2345-332X E-ISSN: 2588-7009

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثربخشی جنگل‌کاری‌ها در کنترل بیابان‌زایی و گرد و غبار (مطالعه موردی: ریگزارهای خوزستان، کرمان و اصفهان)

مهران مقصودی[1*]، طاهره فرهی بوشهری[2]

[1]استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[2]دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

10.22034/grd.2026.23897.1677

تاریخ دریافت:
۰۹ آبان ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش:
23 فروردین ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:
تپه¬های ماسه¬ای، جنگل¬کاری، غلظت گردوغبار، سنجش از دور، تصاویر مودیس

چکیده

ریگزارها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانون‌های تولید گردوغبار و جابجایی تپه‌های ماسه‌ای، اثرات منفی گسترده‌ای بر محیط‌زیست و فعالیت‌های انسانی دارند و جنگل‌کاری به‌عنوان راهکار اصلی کنترل این پدیده‌ها در ایران اجرا شده است. هدف این پژوهش، ارزیابی کمی اثربخشی جنگل‌کاری‌های انجام‌شده در کنترل غلظت گردوغبار و تثبیت تپه‌های ماسه‌ای در ریگزارهای استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان است. بدین منظور، با استفاده از لایه رقومی جنگل‌کاری‌ها، تصاویر ماهواره‌ای MODIS (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳) و تحلیل‌های مکانی در محیط‌های ArcGIS و Google Earth Engine، تغییرات شاخص عمق اپتیکی آئروسل (AOD) و میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان همبستگی پیکسلی بین پوشش جنگلی و غلظت گردوغبار در ریگزارهای کرمان برابر با ۰/۵۱، در اصفهان ۰/٤٤ و در خوزستان ۰/۲۳ بوده است که بیانگر بیشترین اثربخشی جنگل‌کاری‌ها در ریگزارهای کرمان است. همچنین ارزیابی جابجایی تپه‌های ماسه‌ای نشان داد که میزان جابجایی در مناطق جنگل‌کاری‌شده خوزستان، کرمان و اصفهان به‌ترتیب در بازه‌های ۱ تا ٤۱، ٤ تا ۳۱ و ۷ تا ۳٤ متر قرار داشته است. کمترین جابجایی (حدود ۱ متر) در ریگزارهای منفرد خوزستان و پس از آن در ریگزارهای اطراف شهرهای کرمان و اردستان با جابجایی کمتر از ۱۰ متر مشاهده شد، در حالی که بیشترین جابجایی به‌ترتیب در بخش‌های مرکزی و شمالی ریگ خوزستان، ریگزارهای مجاور شهداد (حدود ۳۱ متر) و ریگزارهای شمال‌شرق استان اصفهان ثبت گردید. نتایج کلی پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه جنگل‌کاری‌ها در برخی مناطق توانسته‌اند به‌طور معناداری موجب کاهش غلظت گردوغبار و تثبیت تپه‌های ماسه‌ای شوند، اما در بخش‌هایی از ریگزارها اثربخشی محدودی داشته‌اند. ازاین‌رو، بهبود نوع پوشش گیاهی، افزایش تراکم جنگل‌کاری و ارتقای کیفیت اجرای عملیات، به‌ویژه در مناطق با جابجایی بالاتر از ۳۰ متر، برای افزایش کارایی این اقدامات ضروری است.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

*** نویسنده مسئول:** مهران مقصودی
آدرس: دانشگاه تهران، تهران، ایران
Email: maghsoud@ut.ac.ir

۱ مقدمه

باد یکی از پدیده های جغرافیایی مهم در مناطق نیمه‌خشک، خشک و فراخشک است (عظیم‌زاده و اختصاصی، ۱۳۸۳). فرسایش بادي و هجوم ماسه‌هاي روان يك شاخص جدي در وقوع پديده بيابان‌زايي و يك تهديد جدي براي اين مناطق به شمار مي‌آيند (اسميت[1]

1 . Smyth

و همکاران، ۲۰۲۳). هجوم ماسه‌هاي روان باعث آسيب‌هاي زياد به شهرها و آبادي‌ها، جاده‌ها، راه‌ها و همچنين از بين رفتن حاصلخيزي خاك مي‌شود (رفاهی، ۱۳۷۸؛ مقصودی و همکاران، ۱۴۰۰؛ عرب‌عامری و همکاران، ۱۴۰۳). در واقع، انتشار گرد و غبار و حرکت ماسه-های روان توسط نیروی باد به‌عنوان یکی از علل اصلی فرآیند بیابان‌زایی شناخته شده است (فرهان و نواسه[1]، ۲۰۲۵؛ لی[2] و همکاران، ۲۰۲۵؛ کیو[3] و همکاران، ۲۰۲۶). که در نتیجه آن مناطق کشاورزی به زمین‌های بایر تبدیل می‌شوند و باعث ایجاد پوشش ماسه بر روی آن‌ها می‌گردد (ممبنی و همکاران، ۱۳۹۷).

فرسایش بادی در مناطق بیابانی و انباشت رسوبات بادی سبب شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای می‌شود (ژانگ[4] و همکاران، ۲۰۲۳؛ بشیری[5] و همکاران، ۲۰۲۵؛ لی[6] و همکاران، ۲۰۲۵). بر این اساس، شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای، نتیجه تعامل بین محیط‌های رژیم بادی و فرایندهای رسوب‌گذاری است (دونگ[7] و همکاران، ۲۰۱۳؛ مقصودی و گنجائیان[8]، ۲۰۲۵). تپه‌های ماسه‌ای شکل گرفته نیز به دلیل پویایی و قابلیت حرکتی که دارند، به کانون بحران تبدیل می‌شوند (کای[9] و همکاران، ۲۰۲۵) و برای مراکز شهری و روستایی، مراکز اقتصادی و غیره مشکل‌آفرین می‌شوند (ژانگ[10] و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی[11] و همکاران، ۲۰۲۴). در واقع، حرکت ماسه‌ها توسط باد می‌تواند زیرساخت‌های انسانی مانند جاده‌ها و مزارع را نیز تحت تأثیر قرار دهد و باعث کاهش بهره‌وری کشاورزی شود (یو[12] و همکاران، ۲۰۲۴؛ یاو[13] و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، تپه‌های ماسه‌ای اگرچه بخشی از چشم‌انداز طبیعی به شمار می‌روند، اما در صورت گسترش بی‌رویه و بدون کنترل، می‌توانند تعادل اکولوژیکی را بر هم زده و به بیابان‌زایی دامن بزنند (هی[14] و همکاران، ۲۰۲۰؛ جیانگ[15] و همکاران، ۲۰۲۵). تپه‌های ماسه‌ای، به علت رطوبت ناکافی و همچنین عدم پوشش مناسب گیاهی، دارای چسبندگی کمی بوده و مستعد فرسایش بادی می‌باشند (ژین[16] و همکاران، ۲۰۲۱؛ نیو[17] و همکارن، ۲۰۲۲)، بنابراین تثبیت و جلوگیری از پیشرفت آن‌ها ضروری است (نادی و همکاران، ۱۴۰۲).

به¬منظور تثبیت ماسه¬های روان در کشور، اقدامات مختلفی انجام شده است که از جمله آن¬ها، تثبیت تپه¬های ماسه¬های با استفاده از جنگل¬کاری یا پوشش¬گیاهی بوده است. تثبیت تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از پوشش-گیاهی یک روش موثر و پایدار برای کنترل فرسایش بادی و جلوگیری از گسترش بیابان‌ها است (فرج¬الهی و همکاران، ۱۴۰۱). در این روش با ایجاد یک لایه حفاظی از گیاهان بر روی سطح تپه‌ها، مانع از جابجایی ماسه‌ها توسط باد شده و به تثبیت آن¬ها کمک می‌کند. با توجه به اینکه میزان موفقیت طرح ایجاد پوشش-گیاهی تپه¬های ماسه¬ای در مناطق مختلف متفاوت بوده است، در این پژوهش به ارزیابی میزان موفقیت طرح-های ایجاد پوشش¬گیاهی صورت گرفته در ریگزارهای استان¬های خوزستان، کرمان و اصفهان پرداخته شد.

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه، پژوهش‌های متعددی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف انجام شده است. وانگ[18] و همکاران (۲۰۰۵) با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، مشاهدات میدانی و تحلیل‌های بلندمدت، اثرات پوشش گیاهی را بر کنترل فرسایش خاک و بهبود ویژگی‌های خاک در مناطق مختلف چین بررسی کردند. نتایج این پژوهش که در مقیاس منطقه‌ای انجام شد، نشان داد احیای پوشش گیاهی می‌تواند به‌طور معناداری موجب کاهش شدت فرسایش خاک و افزایش پایداری سطح زمین شود. لی[19] و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست همراه با برداشت‌های میدانی خاک، تغییرات تپه‌های ماسه‌ای را پس از عملیات تثبیت زیستی

1 . Farhan & Nawaiseh
2 . Li
3 . Qu
4 . Zhang
5 . Bashiri
6 . Li
7 . Dong
8 . Maghsoudi & Ganjaeian
9 . Qi
10 . Zhang
11 . Li
12. Yu
13 . Yao
14 . He
15 . Jiang
16 . Xin
17 . Niu
18 . Wang
19 . Li

در جنوب‌شرقی کویر تنگر چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پس از تثبیت تپه‌ها به وسیله پوشش گیاهی، تغییرات فیزیکی خاک در اعماق بیش از ۰/٤ متر ناچیز بوده و اثر اقدامات تثبیتی عمدتاً در لایه‌های سطحی مشاهده شده است. یانگ‌سو[1] و همکاران (۲۰۲۳) با تلفیق داده‌های سنجش از دور چندزمانه و داده‌های میدانی، نقش پوشش گیاهی در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای را در مناطق بیابانی چین بررسی کردند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که استقرار پوشش گیاهی باعث افزایش رطوبت خاک، کاهش تحرک ماسه‌ها و در نهایت افزایش پایداری تپه‌های ماسه‌ای شده است. ژائو[2] و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های میدانی گردآوری‌شده طی دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵، اثر احیای پوشش گیاهی را بر کنترل فرسایش خاک در مناطق نیمه‌خشک چین ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که جنگل‌کاری و توسعه پوشش گیاهی یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش فرسایش خاک و تثبیت تپه‌های ماسه‌ای در این مناطق محسوب می‌شود.

در مطالعات داخلی، موسوی‌نژاد (۱۳۸۴) با اتکا بر داده‌های میدانی و مشاهدات طولی، عملکرد بادشکن‌ها و نهال‌کاری را در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای فعال مجاور روستای رضاآباد در منطقه ارگ خوارتوران استان سمنان بررسی کرد. نتایج نشان داد که اجرای این اقدامات از سال ۱۳۷۹ به بعد، نقش چشمگیری در کاهش فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و افزایش پایداری سطح زمین داشته است. حضیرئی و زارع (۱۳۹۲) با استفاده از روش‌های میدانی و تحلیل‌های آماری، تأثیر مالچ رسی–آهکی را بر تثبیت ماسه‌های روان دشت یزد–اردکان بررسی کردند. یافته‌ها بیانگر آن بود که این نوع مالچ، به‌واسطه بهبود چسبندگی ذرات و کاهش فرسایش بادی، نقش مؤثری در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای ایفا می‌کند. اختصاصی و حضیرئی (۱۳۹۴) نیز با بهره‌گیری از روش‌های میدانی، کارایی مالچ سیمانی را در تثبیت ماسه‌های روان در دشت یزد–اردکان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مالچ سیمانی در مقایسه با مالچ‌های نفتی، اثربخشی بالاتری در کاهش جابجایی ماسه‌ها دارد. زارع و همکاران (۱۳۹۷) با نصب شاخص‌های مدرج در بخش‌های مختلف تپه‌های ماسه‌ای، به ارزیابی کارایی برخی مالچ‌های غیرنفتی در تثبیت ماسه‌های روان پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که در میان مالچ‌های بررسی‌شده، مالچ بیوپلیمری کم‌ترین میزان تثبیت‌کنندگی را داشته است. آرامش و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل رگرسیون وزن‌دار فضایی (GWR)، ارتباط بین عوامل مورفولوژیک تپه‌های ماسه‌ای و پوشش گیاهی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که گونه‌های مختلف گیاهی اثرات متفاوتی بر شکل‌گیری و پایداری مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای دارند.

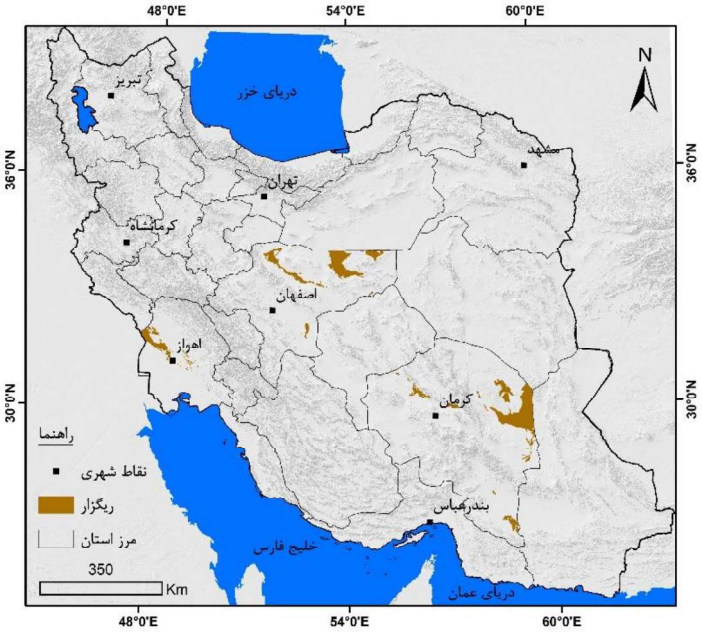
در راستای نتایج حاصل از تحقیقات پیشین و با توجه به خلأ مطالعات مقایسه‌ای در مقیاس منطقه‌ای کشور، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی میزان موفقیت جنگل‌کاری‌های انجام‌شده در ریگزارهای استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای و بهبود شرایط سطح زمین است.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱-منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر، شامل ریگزارهای استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان است (شکل ۱). با توجه به اینکه موضوع مورد مطالعه، تاثیرات جنگل‌کاری‌های صورت گرفته بر ریگزارها است و جنگل‌کاری‌های صورت گرفته متاثر از برنامه‌ریزی‌های انسانی است و این برنامه‌ریزی‌ها در استان‌های مختلف، ساختار متفاوتی دارد، بنابراین در این پژوهش، از مرزهای سیاسی استفاده شده است. ریگزارهای مورد مطالعه در استان‌های مختلف، دارای وضعیت طبیعی متفاوتی است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است.

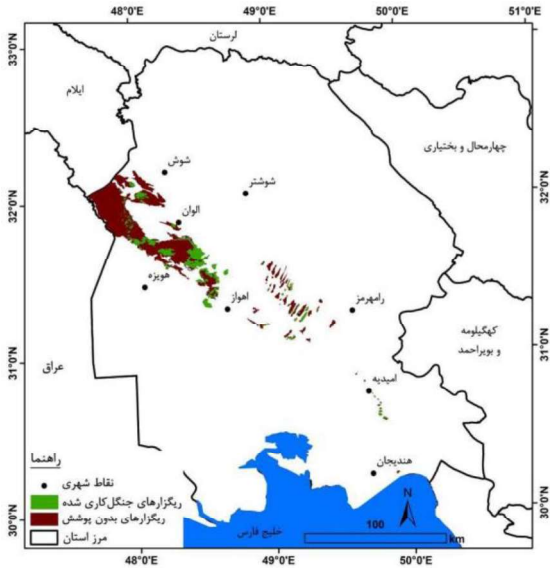
1 . Yuhang Su
2 . Zhou



شکل ۱: نقشه موقعیت ریگزارهای مورد مطالعه

الف) ریگزارهای استان خوزستان و مناطق جنگل‌کاری شده آن

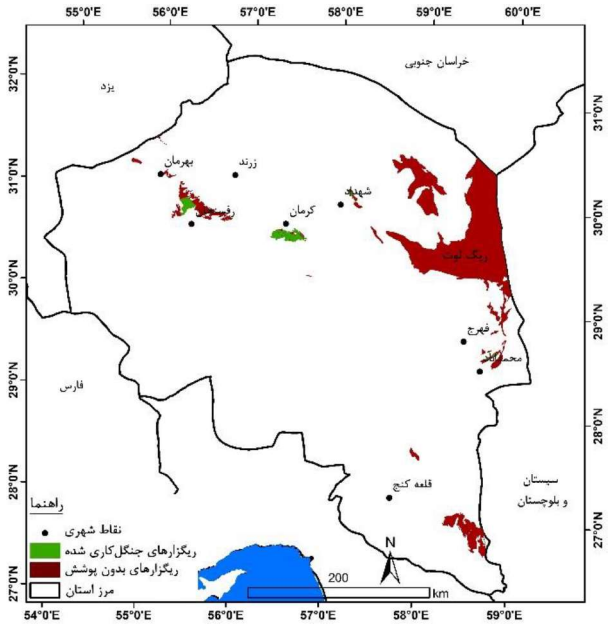
ریگزارهای استان خوزستان حدود ۲۴۶۸ کیلومترمربع است که از نظر پراکندگی مکانی، بیش‌تر در شمال غربی این استان و در حد فاصل شهرهای شوش، الوان، هویزه، اهواز، رامهرمز قرار دارند. همچنین در محدوده استان خوزستان، ریگزارهای منفرد زیادی نیز وجود دارد که این ریگزارها بیش‌تر در حد فاصل شهرهای رامهرمز تا هندیجان قرار دارند. با توجه به اینکه بخش زیادی از وسعت استان خوزستان را ریگزارها دربرگرفته است و این ریگزارها تحت تاثیر سرعت و جهت بادهای منطقه، دارای وضعیت فعالی هستند، بنابراین به جهت کنترل حرکت ریگزارها، در طی سال‌های اخیر اقدامات زیادی از جمله جنگل‌کاری صورت گرفته است (مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۴). نتایج بدست آمده از بررسی وضعیت جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در محدوده ریگزارهای استان خوزستان نشان داده است که در محدوده این ریگزارها، ۵۶۳ کیلومترمربع جنگل‌کاری شده است. آنالیز مکانی جنگل‌کاری صورت گرفته نشان داده است که بیش‌ترین میزان جنگل‌کاری مربوط به محدوده مناطق جنوبی ریگ اصلی خوزستان و همچنین ریگزارهای منفرد بوده است (شکل ۲).



شکل ۲: نقشه محدوده ریگزارهای استان خوزستان و مناطق جنگل‌کاری شده آن

ب) ریگزارهای استان کرمان و مناطق جنگل‌کاری شده آن

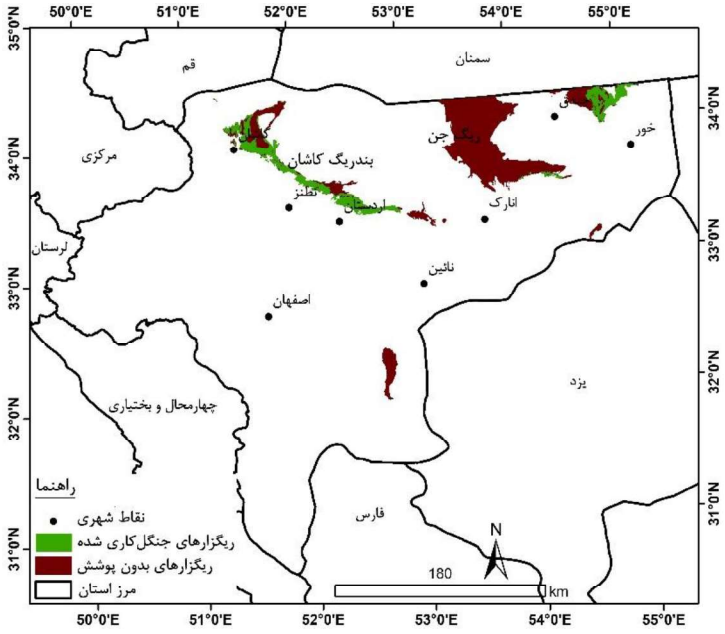
در محدوده استان کرمان ریگزارهای متنوعی با وسعت و اشکال مختلف وجود دارد. بخش زیادی از ریگزارهای استان کرمان در مناطق شرق این استان قرار دارد و وسعت کل ریگزارهای استان کرمان حدود ۱۰۶۵۲ کیلومترمربع است. از جمله مهم‌ترین ریگزارهای استان کرمان، ریگ یلان است که بخش زیادی از وسعت آن در محدوده استان کرمان قرار دارد همچنین علاوه بر این ریگزار نیز ریگزارهای متعددی از جمله ریگ رفسنجان و بخشی از ریگ جازموریان وجود دارد. همچنین نتایج بدست آمده از بررسی وضعیت جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در محدوده ریگزارهای استان کرمان نشان داده است که در محدوده این ریگزارها، ۴۲۵ کیلومترمربع جنگل‌کاری شده است. آنالیز مکانی جنگل‌کاری صورت گرفته نشان داده است که بیش‌ترین میزان جنگل‌کاری مربوط به محدوده ریگزارها کرمان و رفسنجان بوده است (شکل ۳).



شکل ۳: نقشه محدوده ریگزارهای استان کرمان و مناطق جنگل‌کاری شده آن

ج) ریگزارهای استان اصفهان و مناطق جنگل‌کاری شده آن

در محدوده استان اصفهان ریگزارهای متنوعی با وسعت و اشکال مختلف وجود دارد. بخش زیادی از ریگزارهای استان اصفهان در مناطق مرکزی شرق این استان قرار دارد و وسعت کل ریگزارهای استان اصفهان حدود ۷۰۷۳ کیلومترمربع است. از جمله مهم‌ترین ریگزارهای استان اصفهان می‌توان به بندریگ کاشان و ریگ جن اشاره کرد که به ترتیب در بخش‌های مرکزی، شمالی و شرقی این استان قرار دارند (مقصودی و گنجائیان، ۱٤۰۳). نتایج بدست آمده از بررسی وضعیت جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در محدوده ریگزارهای استان اصفهان نشان داده است که در محدوده این ریگزارها، ۱۸۲۰ کیلومترمربع جنگل‌کاری شده است. آنالیز مکانی جنگل‌کاری صورت گرفته نشان داده است که بیش‌ترین میزان جنگل‌کاری مربوط به محدوده بند ریگ کاشان بوده است (شکل ٤).



شکل ٤: نقشه محدوده ریگزارهای استان اصفهان و مناطق جنگل‌کاری شده آن

۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق، به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش، از داده‌های سنجش‌ازدور و داده‌های رقومی مکانی استفاده شده است. از جمله مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده، لایه رقومی مناطق جنگل‌کاری‌شده در ایران است که از سازمان مراتع و جنگل‌داری کشور تهیه شده و به‌صورت داده‌های برداری برای شناسایی و تفکیک ریگزارهای جنگل‌کاری‌شده و جنگل‌کاری‌نشده در محدوده مناطق مورد مطالعه به کار رفته است. همچنین، به‌منظور ارزیابی وضعیت غلظت گردوغبار، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS نصب‌شده بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ بوده و این سنجنده با برخورداری از قدرت تفکیک زمانی روزانه (تناوب عبور ۱ تا ۲ روز)، امکان پایش پیوسته تغییرات پدیده گردوغبار را فراهم می‌کند. سنجنده MODIS شامل ۳٦ باند طیفی در محدوده طول موجی حدود ۰/٤ تا ۱٤/٤ میکرومتر است که باندهای مرئی، فروسرخ نزدیک، فروسرخ میانی و فروسرخ حرارتی را در بر می‌گیرد و قدرت تفکیک مکانی آن بسته به نوع باند، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر می‌باشد. در این پژوهش، داده‌های MODIS در محیط سامانه Google Earth Engine پردازش شده و نقشه‌های مرتبط با غلظت گردوغبار برای هر یک از استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان استخراج گردیده است. علاوه بر این، تصاویر ماهواره‌ای Google Earth به‌منظور ترسیم محدوده ریگزارها و بررسی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. این تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ بوده و به دلیل برخورداری از قدرت تفکیک مکانی بالا (در حد چند متر تا کمتر از یک متر)، امکان تفسیر بصری دقیق عوارض سطح زمین و مقایسه تغییرات مکانی را فراهم ساخته است. در راستای پردازش و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار ArcGIS جهت مدیریت و تحلیل داده‌های مکانی و تهیه نقشه‌ها، از سامانهGoogle Earth Engine برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و انجام

تحلیل‌های پیکسلی و از نرم‌افزار Google Earth برای تفسیر بصری و استخراج اطلاعات مکانی استفاده شده است.با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است (شکل ۵) که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (ترسیم محدوده ریگزارها و شناسایی مناطق جنگل‌کاری شده): در مرحله نخست، به‌منظور تعیین محدوده ریگزارهای استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان، از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا در محیط Google Earth استفاده شد. با توجه به ماهیت ریگزارها و پراکندگی فضایی نامنظم آن‌ها، به‌ویژه در مقیاس‌های کوچک و باریک، استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک متوسط مانند تصاویر سنجنده Sentinel-2 و روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده، منجر به عدم تشخیص دقیق مرز ریگزارها و حذف بخش‌هایی از ریگزارهای کوچک و پراکنده می‌شود (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۷). نتایج آزمایشی طبقه‌بندی نظارت‌شده مبتنی بر تصاویر Sentinel-2 نشان داد که این روش‌ها به دلیل اختلاط طیفی ریگزارها با سایر سطوح فاقد پوشش گیاهی، از دقت لازم برای استخراج دقیق محدوده ریگزارها برخوردار نیستند.

بر این اساس، در این پژوهش از روش تفسیر بصری نظام‌مند مبتنی بر تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در Google Earth استفاده شد. فرآیند تفسیر بصری بر اساس شاخص‌هایی نظیر بافت، رنگ، شکل، الگوی پراکنش و موقعیت ژئومورفولوژیک تپه‌های ماسه‌ای انجام گرفت و مرز ریگزارها به‌صورت رقومی ترسیم شد. برای کاهش خطای انسانی و افزایش اطمینان از دقت ترسیم‌ها، از تصاویر مربوط به چند تاریخ زمانی و زوایای دید متفاوت استفاده شد و مرزهای ترسیم‌شده به‌صورت تطبیقی مورد بازبینی قرار گرفتند.

پس از ترسیم محدوده ریگزارها، لایه رقومی مناطق جنگل‌کاری‌شده کشور در محیط ArcGIS بر نقشه ریگزارها منطبق گردید و بدین ترتیب، محدوده ریگزارهای جنگل‌کاری‌شده و جنگل‌کاری‌نشده به‌صورت دقیق استخراج شد. استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در این مرحله موجب شد تا ریگزارهای کوچک و پراکنده که معمولاً در روش‌های طبقه‌بندی خودکار شناسایی نمی‌شوند، در نقشه نهایی لحاظ گردند و از بروز خطاهای مکانی جلوگیری شود.

مرحله دوم (ارزیابی وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارها): در این مرحله، به‌منظور بررسی الگوی مکانی و زمانی غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای مورد مطالعه، از داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره MODIS در بستر سامانه Google Earth Engineاستفاده شد. به‌جای تمرکز بر رخدادهای منفرد گردوغبار یا روزهای خاص، رویکرد پژوهش مبتنی بر تحلیل تجمیعی داده‌ها در یک دوره زمانی بلندمدت بوده است. بدین منظور، بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ در سامانه Google Earth Engine انتخاب و تمامی تصاویر معتبر این دوره مورد پردازش قرار گرفتند.

در گام نخست، داده‌های مربوط به شاخص عمق نوری آئروسل (Aerosol Optical Depth – AOD) پس از اعمال فیلترهای کیفی و حذف پیکسل‌های نامعتبر، به‌صورت آماری تجمیع شدند. ضریب AOD حاصل، که به‌عنوان شاخص غلظت گردوغبار در پژوهش استفاده شده است، مقادیر بین ۰ تا ۱ دارد و در تحلیل‌های MODIS و خروجی Google Earth Engine رایج است (فتح‌الله‌زاده، ۱۴۰۲؛ نگهبان و همکاران، ۱۴۰۳). در این فرآیند، بدون نیاز به تعیین تعداد دقیق روزهای دارای گردوغبار، از تمامی مشاهدات موجود در دوره مورد مطالعه استفاده شد و نقشه‌های میانگین چندساله غلظت گردوغبار برای هر یک از استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان استخراج گردید. این رویکرد باعث کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت و افزایش پایداری نتایج مکانی شده است.

پس از تهیه نقشه‌های میانگین غلظت گردوغبار، این نقشه‌ها با لایه ریگزارهای جنگل‌کاری‌شده و جنگل‌کاری‌نشده همپوشانی داده شد. مقایسه وضعیت گردوغبار به‌صورت آماری و مکانی انجام گرفت و تفاوت مقادیر AOD بین این دو دسته از مناطق در چارچوب یک پهنه ریگزار مشترک مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ماهیت پویای گردوغبار، هدف این مقایسه، شناسایی اختلاف نسبی الگوی بلندمدت غلظت گردوغبار بین مناطق دارای پوشش گیاهی تثبیت‌شده و مناطق فاقد آن بوده است، نه بررسی رخدادهای مقطعی یا انتقال لحظه‌ای گردوغبار.

در ادامه، به‌منظور بررسی رابطه بین پوشش گیاهی و غلظت گردوغبار، تحلیل همبستگی پیکسلی انجام شد. در این تحلیل، مقدار میانگین AOD هر پیکسل به‌عنوان متغیر وابسته و مقدار پوشش گیاهی متناظر با همان پیکسل به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد و ضریب همبستگی آماری به‌صورت مکانی محاسبه گردید. این روش امکان ارزیابی الگوی فضایی ارتباط بین افزایش پوشش گیاهی و تغییرات غلظت گردوغبار را در مقیاس منطقه‌ای فراهم ساخته است.

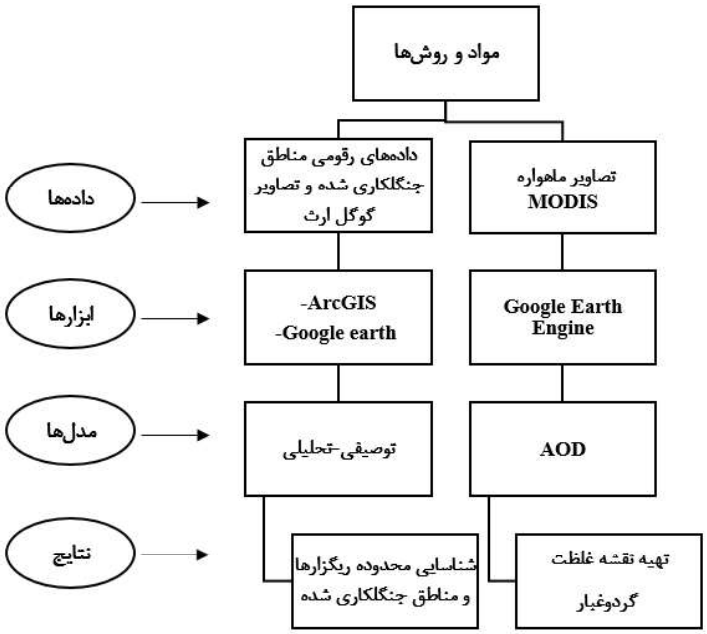
انتخاب رویکرد تجمیعی و بلندمدت در این پژوهش، ضمن کاهش وابستگی نتایج به رخدادهای خاص گردوغبار، امکان تحلیل اثر کلی و پایدار جنگل‌کاری بر وضعیت گردوغبار منطقه را فراهم نموده است و با ماهیت داده‌های پردازش‌شده در سامانه Google Earth Engine سازگار می‌باشد.

مرحله سوم (ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در مناطق جنگل‌کاری شده): در مرحله سوم، به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در ریگزارهای جنگل‌کاری‌شده، از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا در محیط Google Earth استفاده شد. تصاویر مربوط به دو مقطع زمانی ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ انتخاب گردید تا امکان بررسی تغییرات بلندمدت موقعیت تپه‌های ماسه‌ای فراهم شود. انتخاب این بازه زمانی با هدف کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت و تمرکز بر روندهای کلی جابجایی تپه‌های ماسه‌ای انجام شده است.

پس از مشخص شدن محدوده ریگزارهای جنگل‌کاری‌شده بر اساس نتایج مرحله اول، نمونه‌برداری مکانی به‌صورت هدفمند و پراکنده انجام شد. در هر ریگزار جنگل‌کاری‌شده، ۱۰ نقطه نمونه انتخاب شد که نماینده شرایط غالب ریگزار بوده و در بخش‌های مختلف آن پراکنده گردیده‌اند. لازم به ذکر است که این نمونه‌برداری محدود، نماینده روند کلی ریگزار است، اما نمی‌تواند تغییرات جزئی و موضعی همه تپه‌ها را پوشش دهد.

موقعیت مکانی هر نقطه در تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ استخراج و با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری مکانی در Google Earth میزان جابجایی افقی تپه‌های ماسه‌ای در این نقاط محاسبه گردید. به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری و کاهش خطای ناشی از تفسیر بصری، فرآیند تعیین موقعیت تپه‌ها بر اساس شاخص‌های ژئومورفولوژیکی نظیر شکل، بافت و الگوی پراکنش تپه‌ها انجام شد و تصاویر برای هر مقطع زمانی چندبار تطبیق داده شدند. بر اساس تجربه و دقت ابزار، عدم قطعیت اندازه‌گیری تقریبی در حد چند متر برآورد شده است.

مقادیر جابجایی محاسبه‌شده به‌صورت آماری تجمیع و الگوی کلی تغییرات جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در مناطق جنگل‌کاری‌شده استخراج شد. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده در ارتباط با وجود پوشش گیاهی ناشی از جنگل‌کاری مورد تحلیل قرار گرفت تا میزان نقش نسبی این اقدامات در کاهش یا تعدیل جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در مقیاس بلندمدت ارزیابی شود.



شکل ۵: فلوچارت تحقیق

۳ یافته‌های پژوهش

ریگزارهای استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان از نظر **ویژگی‌های مکانی و ژئومورفولوژیکی** تفاوت‌های قابل توجهی دارند که بر اثر بخشی اقدامات جنگل‌کاری در کاهش غلظت گردوغبار تاثیر می‌گذارد. ریگزارهای خوزستان عمدتاً پهنه‌های وسیع و پیوسته‌ای با منابع گردوغبار داخلی و انتقال گردوغبار از کشورهای همسایه دارند، بنابراین جنگل‌کاری‌های محدود در این مناطق توانایی کمتری در کاهش کلی غلظت گردوغبار دارند. ریگزارهای کرمان و اصفهان، در بخش‌هایی با وسعت کمتر و پراکندگی مکانی مناسب‌تر، تحت تاثیر بادهای محلی هستند و پوشش گیاهی تثبیت‌شده می‌تواند نقش قابل توجهی در کاهش غلظت گردوغبار ایفا کند. علاوه بر این، تفاوت در میزان جنگل‌کاری‌های انجام شده و پراکندگی آن‌ها باعث می‌شود اثرگذاری اقدامات تثبیت خاک و پوشش گیاهی در هر استان متفاوت باشد. این مقدمه زمینه را برای تحلیل مقایسه‌ای نتایج AOD و ارزیابی تاثیر جنگل‌کاری بر کاهش گردوغبار در هر ریگزار فراهم می‌کند.

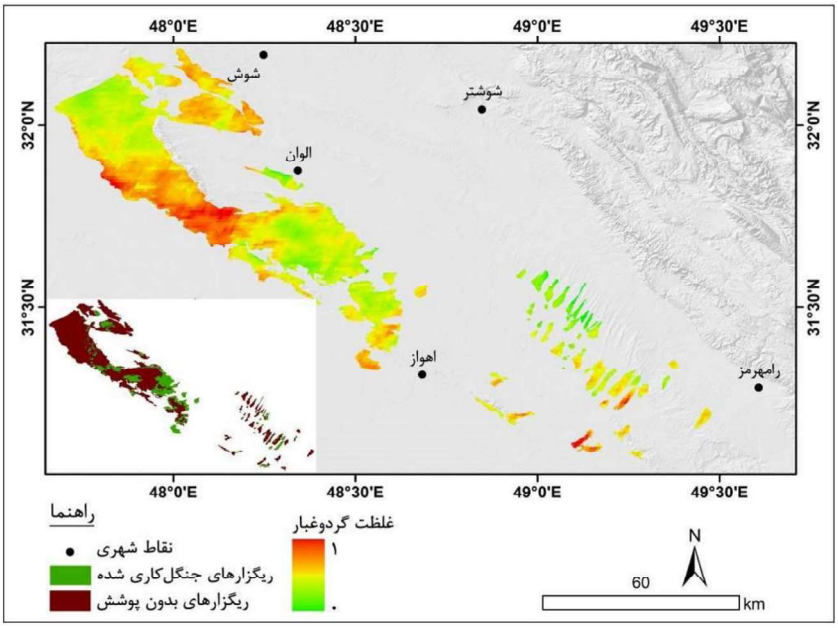
۳-۱- ارزیابی تاثیرات جنگل‌کاری‌های صورت گرفته بر وضعیت غلظت گردوغبار

برای بررسی اثر جنگل‌کاری بر غلظت گردوغبار، از نقشه‌های میانگین AOD حاصل از تصاویر MODIS در بازه ۲۰۱۹–۲۰۲۳ استفاده شد (روش محاسبه در بخش روش تحقیق شرح داده شد). نتایج نشان می‌دهد که در ریگزارهای جنگل‌کاری‌شده، میانگین مقادیر AOD به طور نسبی کاهش یافته است و این الگو در پهنه‌های مختلف استان‌ها متفاوت است

الف) تاثیر جنگل‌کاری‌ها بر وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای خوزستان

ریگزارهای استان خوزستان از نظر وسعت و موقعیت مکانی، تفاوت‌های قابل توجهی با ریگزارهای کرمان و اصفهان دارند و تحت تاثیر منابع گردوغبار داخلی و همچنین انتقال گردوغبار از ریگزارهای کشور عراق قرار دارند. این شرایط باعث می‌شود اثر جنگل‌کاری بر کاهش غلظت گردوغبار محدود باشد، حتی در مناطقی که سطح قابل‌توجهی جنگل‌کاری صورت گرفته است.

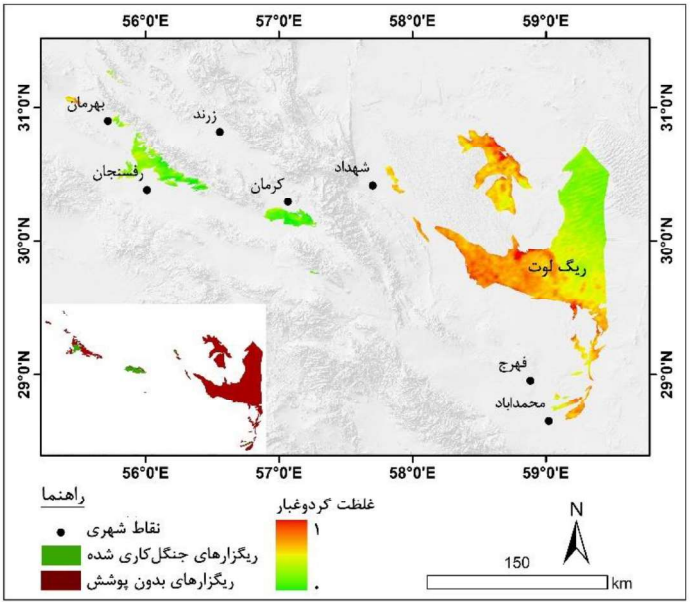
نتایج ارزیابی وضعیت غلظت گردوغبار (AOD) نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر غلظت گردوغبار مربوط به مناطق میانی ریگ اصلی خوزستان است و کمترین میزان آن در مناطق شمالی ریگ اصلی و ریگزارهای منفرد مشاهده می‌شود (شکل ٦). در حالی که مناطق شمالی ریگزار جنگل‌کاری نشده و غلظت گردوغبار پایین است، مناطق میانی که جنگل‌کاری در آن‌ها انجام شده است، همچنان دارای مقادیر بالای AOD هستند. این الگو نشان می‌دهد که ارتباط معناداری بین جنگل‌کاری‌های انجام شده و کاهش غلظت گردوغبار در ریگزارهای خوزستان وجود ندارد. به همین دلیل ضریب همبستگی پیکسلی بین وضعیت پوشش گیاهی (جنگل‌کاری‌ها) و غلظت گردوغبار در این مناطق حدود ۰/۲۳ محاسبه شده است. علت اصلی این الگو را می‌توان در ترکیب عوامل زیر جستجو کرد: (۱) اثر بادهای بلندبرد و انتقال گردوغبار از خارج کشور که بخش عمده‌ای از منابع غلظت گردوغبار را تشکیل می‌دهد و (۲) پراکندگی و وسعت زیاد ریگزارها که باعث می‌شود پوشش گیاهی تثبیت‌شده تنها بخش محدودی از سطح ریگزار را پوشش دهد و نتواند به‌طور محسوس غلظت گردوغبار کلی منطقه را کاهش دهد. بنابراین، حتی با وجود جنگل‌کاری‌های انجام شده، کاهش معناداری در غلظت گردوغبار در ریگزارهای خوزستان مشاهده نمی‌شود.



شکل ٦: نقشه وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای خوزستان

ب) تاثیر جنگل‌کاری‌ها بر وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای کرمان

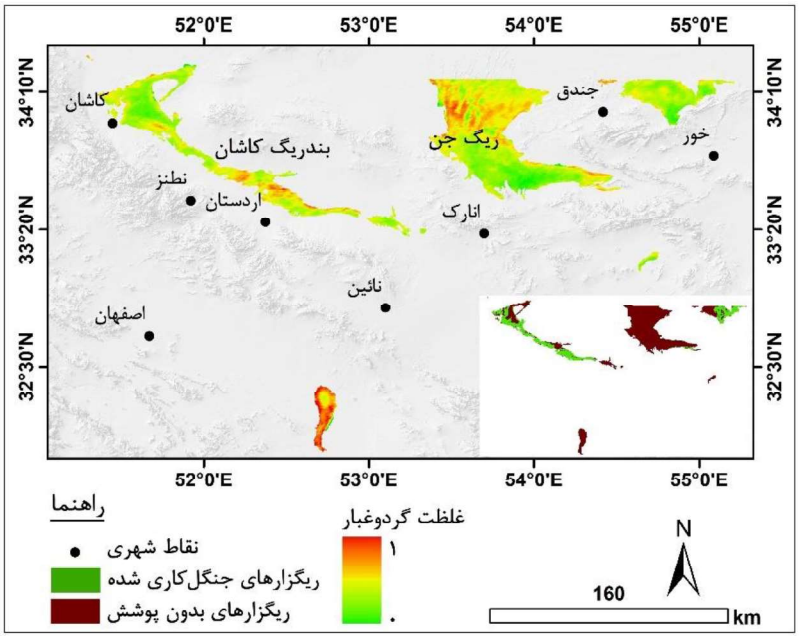
نتایج ارزیابی وضعیت غلظت گردوغبار (AOD) در محدوده ریگزارهای استان کرمان بیانگر این است که در یک روند کلی، بالاترین ضریب غلظت گردوغبار مربوط به بخش‌های غربی ریگ اصلی لوت است و کم‌ترین میزان غلظت گردوغبار نیز مربوط به ریگزارهای مجاور شهرهای کرمان و رفسنجان است (شکل ۷). با توجه به اینکه بالاترین میزان جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در محدوده ریگزارهای مجاور شهرهای کرمان و رفسنجان بوده است، بنابراین می‌توان گفت که بر خلاف ریگزارهای استان خوزستان، جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در ریگزارهای مجاور شهرهای کرمان و رفسنجان، نقش اصلی را در کاهش ضریب غلظت گردوغبار این منطقه داشته است. همچنین نتایج ضریب همبستگی پیکسلی بین غلظت گردوغبار و وضعیت پوشش گیاهی ریگزارهای کرمان حدود ۰/۵۱ محاسبه شده است که نسب به ریگزارهای خوزستان، دارای ضریب همبستگی بالاتری است.



شکل ۷: نقشه وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای کرمان

ج) تاثیر جنگل‌کاری‌ها بر وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای اصفهان

نتایج ارزیابی وضعیت غلظت گردوغبار (AOD) در محدوده ریگزارهای استان اصفهان بیانگر این است که بالاترین ضریب غلظت گردوغبار مربوط به بخش‌های میانی بندریگ کاشان و ریگ جن است (شکل ۸). با توجه به اینکه کم‌ترین میزان جنگل‌کاری‌های صورت گرفته نیز مربوط به همین مناطق بوده است، بنابراین می‌توان گفت که بر خلاف ریگزارهای استان خوزستان، جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در ریگزارهای استان اصفهان، نقش اصلی را در کاهش ضریب غلظت گردوغبار این منطقه داشته است. همچنین نتایج ضریب همبستگی پیکسلی بین غلظت گردوغبار و وضعیت پوشش‌گیاهی ریگزارهای اصفهان حدود ۰/٤٤ محاسبه شده است که نسب به ریگزارهای خوزستان، دارای ضریب همبستگی بالاتر و نسبت به ریگزارهای کرمان، دارای ضریب همبستگی پایین‌تری است.



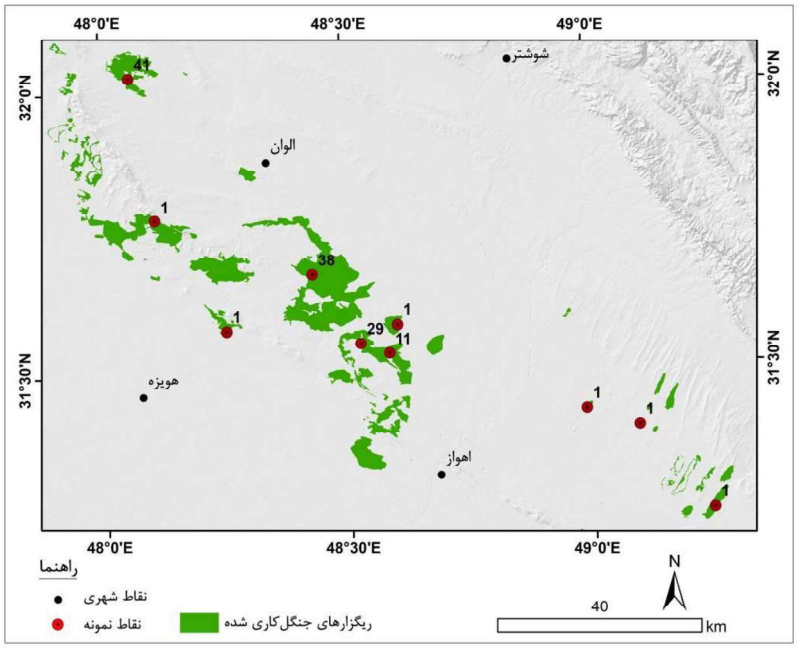
شکل ۸: نقشه وضعیت غلظت گردوغبار در محدوده ریگزارهای اصفهان

۳-۲- ارزیابی تاثیرات جنگل‌کاری‌های صورت گرفته بر وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای

یکی دیگر از مخاطرات مهم ریگزارها، حرکت تپه‌های ماسه‌ای و تخریب کاربری‌های انسان‌ساخت است. با توجه به اهمیت موضوع، در این بخش با استفاده از نقاط نمونه (۱۰ نقطه نمونه برای هر ریگزار) به ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در مناطق جنگل‌کاری شده پرداخته شده است:

الف) ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگزارهای خوزستان در مناطق جنگل‌کاری شده

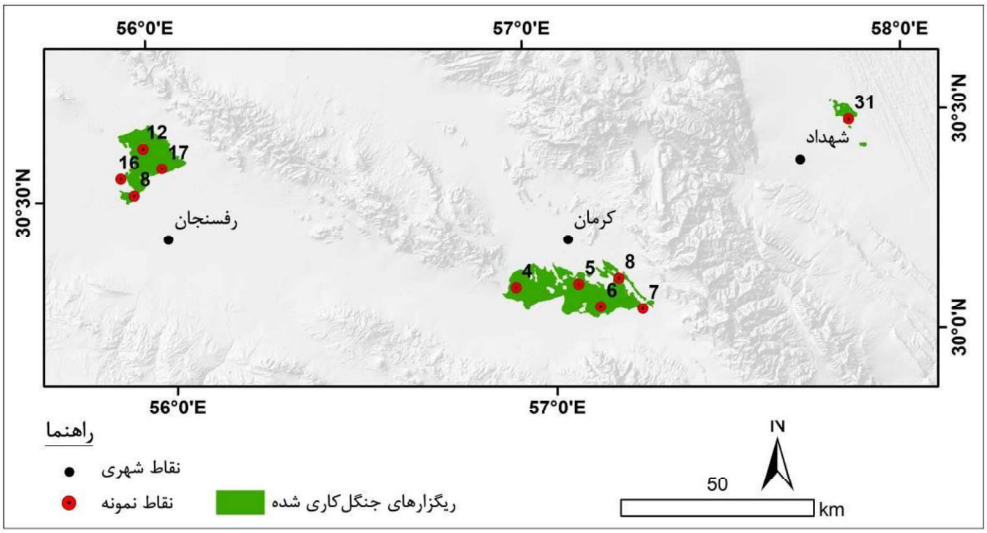
نتایج ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای نمونه در ریگزارهای استان خوزستان نشان داده است که میزان جابجایی این تپه‌ها در محدوده ریگزارهای جنگل‌کاری شده بین ۱ تا ٤۱ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بوده است (شکل ۹). نتایج آنالیز میزان جابجایی صورت گرفته بیانگر این است که بیش‌ترین میزان جابجایی مربوط به مناطق شمالی و مرکزی ریگ خوزستان بوده است و همچنین کم‌ترین میزان جابجایی نیز مربوط به محدوده ریگزارهای منفرد بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در محدوده ریگ اصلی خوزستان، تاثیر کمی در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای داشته است.



شکل ۹: نقشه وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریزگارهای خوزستان در مناطق جنگل‌کاری شده

ب) ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریزگارهای کرمان در مناطق جنگل‌کاری شده

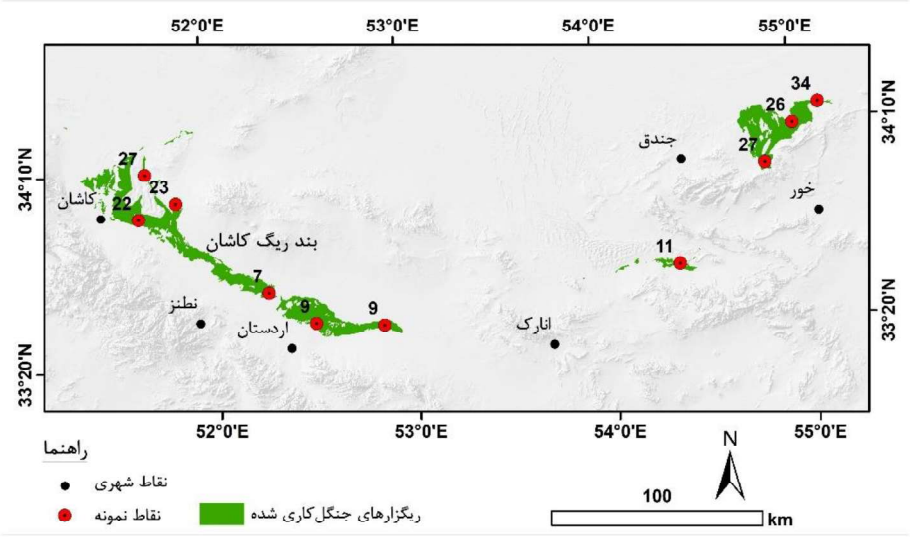
نتایج ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای نمونه در ریزگارهای استان کرمان نشان داده است که میزان جابجایی این تپه‌ها در محدوده ریزگارهای جنگل‌کاری شده بین ٤ تا ۳۱ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بوده است (شکل ۱۰). نتایج آنالیز میزان جابجایی صورت گرفته بیانگر این است که بیش‌ترین میزان جابجایی مربوط با ۳۱ متر مربوط به ریزگارهای مجاور شهداد بوده است و همچنین کم‌ترین میزان جابجایی نیز مربوط به محدوده ریزگارهای اطراف شهر کرمان بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که جنگل‌کاری‌های صورت گرفته در محدوده ریزگارهای شهر کرمان، دارای بالاترین تاثیر در تثبیت تپه‌های ماسه‌ای بوده است.



شکل ۱۰: نقشه وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریزگارهای کرمان در مناطق جنگل‌کاری شده

ج) ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگزارهای اصفهان در مناطق جنگل‌کاری شده

نتایج ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای نمونه در ریگزارهای استان اصفهان نشان داده است که میزان جابجایی این تپه‌ها در محدوده ریگزارهای جنگل‌کاری شده بین ۷ تا ۳٤ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بوده است (شکل ۱۱). نتایج آنالیز میزان جابجایی صورت گرفته بیانگر این است که بیش‌ترین میزان جابجایی مربوط به ریگزارهای شمال شرق استان اصفهان و همچنین کم‌ترین میزان جابجایی نیز مربوط ریگزارهای مجاور اردستان بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که بیش‌ترین میزان تاثیرگذاری تپه‌های ماسه‌ای مربوط به مناطق جنوبی بندریگ کاشان و کم‌ترین میزان تاثیرگذاری نیز مربوط به مناطق شمالی بندریگ کاشان و همچنین ریگزارهای شمال شرق استان اصفهان بوده است.



شکل ۱۱: نقشه وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگزارهای اصفهان در مناطق جنگل‌کاری شده

۴ بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اثرات منفی زیست‌محیطی ریگزارها، طی سال‌های اخیر تلاش شده است تا با استفاده از روش‌های مختلف از جمله ایجاد پوشش جنگلی، محدوده ریگزارها تثبیت شود. در این پژوهش، به منظور ارزیابی کارایی جنگل‌کاری‌های صورت گرفته، تاثیرات آن‌ها در ریگزارهای استان‌های خوزستان، کرمان و اصفهان بررسی شد. میزان جنگل‌کاری‌های انجام شده در این سه استان به ترتیب ۵٦۳، ٤۲۵ و ۱۸۲۰ کیلومترمربع بوده است. نتایج نشان داد که اثر جنگل‌کاری بر کاهش غلظت گردوغبار و تثبیت تپه‌های ماسه‌ای در مناطق مختلف یکسان نبوده و تحت تاثیر عوامل مکانی، ژئومورفولوژیکی و بادهای غالب قرار داشته است. در ریگزارهای استان کرمان، پوشش جنگلی بیشترین تاثیر را در کاهش غلظت گردوغبار داشته است؛ ضریب همبستگی پیکسلی بین پوشش گیاهی و AOD حدود ۰,۵۱ محاسبه شد. در ریگزارهای اصفهان و خوزستان این ضریب به ترتیب ۰,٤٤ و ۰,۲۳ بوده است که نشان می‌دهد پوشش جنگلی ایجاد شده نتوانسته به صورت معنادار غلظت گردوغبار را کاهش دهد. از سوی دیگر، بررسی جابجایی تپه‌های ماسه‌ای نشان داد که بیشترین تثبیت در ریگزارهای منفرد خوزستان، با جابجایی حدود ۱ متر، و در ریگزارهای اطراف شهرهای کرمان و اردستان، با جابجایی کمتر از ۱۰ متر، رخ داده است. در حالی که در برخی مناطق مانند میانی ریگ خوزستان، اطراف شهر شهداد و شمال بندریگ کاشان، جنگل‌کاری تاثیر اندکی بر تثبیت تپه‌ها داشته است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که صرف ایجاد پوشش جنگلی به تنهایی نمی‌تواند عامل پایدار و مستقل برای کنترل گردوغبار و پویایی تپه‌های ماسه‌ای باشد و اثر آن به شدت تحت تاثیر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی ریگزار، بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که جنگل‌کاری می‌تواند نقش مهمی در کاهش غلظت گردوغبار و تثبیت تپه‌های ماسه‌ای ایفا کند، اما برای رسیدن به اثرگذاری پایدار، لازم است این روش با سایر اقدامات مدیریتی مکمل

مانند تثبیت مکانیکی تپه‌ها، ایجاد بادشکن و مدیریت منابع آب ترکیب شود. همچنین، کیفیت اجرای جنگل‌کاری و نوع پوشش گیاهی انتخاب شده، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان اثرگذاری دارد و باید در مناطقی که اثرگذاری کم بوده است، مورد بررسی و بهبود قرار گیرد.

References

- Fathallahzadeh, M., Ranjbar Barough, Z., Motamedirad, M., & Hajikarimi Dolabi, Z. (2023). Investigating the characteristics of wind and its relationship with the occurrence of dust in Zabol city using the system Google Earth Engine. Quantitative Geomorphological Research, 12(3), 167-183. https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.416114.1455. [In Persian]
- Arab Ameri, F., Mohammadian Behbahani, A., Ownegh, M., & Arami, S. H. (2024). Statistical Analysis of Spatio-Temporal Variations of Dust Occurrences in Golestan Province. Desert Ecosystem Engineering, 12(40), 59-72. https://doi.org/%E2%80%8E10.22052/deej.2024.254036.1037 . [In Persian]
- Aramesh, M., Vali, A.A. & ranjbar, A. (2023). Investigating geomorphological indicators and their relationship with vegetation in sand dunes (case study: Aran-Bidgol, and Kashan). Quantitative Geomorphological Research, 12(1), 114-131. https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.375286.1393 . [In Persian]
- Azimzadeh, H., Ekhtesasi, M.R. (2004). Threshold Velocity as Related to soil Physical and Chemical Properties in Iranian Central plain (Case study:yazd.;.Ardakan Plain). Iranian Journal of Natural Resources (Not Publish), 57(1). https://ijnr.ut.ac.ir/article_25281.html?lang=en . [In Persian]
- Dong, Z., Qian, G., Lv, P., & HU, G. (2013). Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea. Earth-Science Reviews, 120, 20–39. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.003
- Ekhtesasi, M.R. & Hazirei, F. (2015). Effects of cement mulch combinations on sand dunes fixation. Journal of Range and Watershed Managment, 68(4), 739-750. https://doi.org/10.22059/jrwm.2015.56955 . [In Persian]
- Farajollahi, A., Arami, S.A., & Ghasemi Aryan, Y. (2022). Evaluating the Effects of Desertification Combating Projects on the Socio-Economic Conditions of Local Communities in Ahvaz. Desert Ecosystem Engineering, 11(34), 99-112. https://doi.org/%E2%80%8E10.22052/deej.2021.11.34.51 . [In Persian]
- Farhan, Y. & Nawaiseh, S. (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. Environ. Earth Sci. 74 (6), 4649–4669. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4430-7
- Hazirei, F., & Zare Ernani, M. (2013). Investigation of Effect of Clay-Lime Mulch for Sand Dunes Fixation. Water and Soil, 27(2), 373-380. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.24364 . [In Persian]
- He, Q., Dai, X. & Chen, S. (2020). Assessing the effects of vegetation and precipitation on soil erosion in the Three-River headwaters region of the Qinghai-Tibet plateau, China. J. Arid Land. 12 (5), 865–886. https://doi.org/10.1007/s40333-020-0075-9
- Jiang, H., Gao, W., & Liu, B. (2025). Quantifying soil wind erosion attribution in Inner Mongolia’s desert grassland. Sci Rep, 15. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98339-8
- Li, L., Lv, L., & Li, Q. (2024). Local failure mechanism of sand-blocking fence in latticed dune along desert roads. J. Mt. Sci. 21, 526–537. https://doi.org/10.1007/s11629-023-8311-3
- Li, X.R., Kong, D.S., & Tan, H.J. (2007). Changes in soil and vegetation following stabilisation of dunes in the southeastern fringe of the Tengger Desert, China. Plant Soil, 300, 221–231. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9407-1
- Maghsoodi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Aeolian Geomorphology of Ergs and Dunefields in Iran. Desert, 30(1), 41-66. https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.102461
- Maghsoudi, M. and Ganjaeian, H. (2025). The Morphology and Morphodynamics of Aeolian Landforms in the Jazmurian Erg: An Analysis of Environmental Controls. Desert Ecosystem Engineering, 14(48), 111-127. https://doi.org/%E2%80%8E10.22052/deej.2025.257208.1113 . [In Persian]

- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2024). Classification of ergs around the Kavir plain (Dasht-e Kavir) and the Masileh Playa and assessment of their changes. Quaternary Journal of Iran, 10(1, 2), 88-107. https://doi.org/10.22034/irqua.2025.2054847.1042 . [In Persian]

- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Classification and analysis of the morphological and dynamic status of sand dunes (Case study: Khuzestan Reg). E.E.R. 15(2), 1-19. http://dx.doi.org/10.61186/jeer.15.2.1 . [In Persian]

- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Studying the Distributions and Areas of Sand Dunes in Iran Using Remote Sensing Methods. Geography and Environmental Planning, 36(2), 89-112. https://doi.org/10.22108/gep.2025.145019.1721 . [In Persian]

- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2026). Analysis of the effects of human activities and wind characteristics on the morphological and dynamic state of ergs (Case Study: ergs of Sistan and Baluchestan Province). Journal of Natural Environmental Hazards, 15(47), 133-154. https://doi.org/10.22111/jneh.2025.51181.2104 . [In Persian]

- Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2026). Analysis of the impact of wind characteristics on the dynamic and morphological state of sand dunes (Case study: sand dunes of the southern coast of Iran). Journal of Hydrogeomorphology, 12(45), 141-123. https://doi.org/10.22034/hyd.2025.68191.1801 . [In Persian]

- 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]

- 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]

- Mombani, M., Asgari, H., Mohammadian Behbahani., & Yousefi, H. (2018). A review of the mechanism of stabilizing effect of various types of mulches on the movement of quicksand. https://civilica.com/doc/1866825 . [In Persian]

- Mousavi-Nejad, S. (2005). Investigating the performance of windbreaks and seedlings in stabilizing active sand dunes adjacent to Reza Abad village in Erg of Khavartoran, Semnan province, First National Wind Erosion Conference, Yazd. https://civilica.com/doc/101121 . [In Persian]

- Nadi, M., Sadeghipour, A., Kabuli, S.H. (2023). Sustainable development of desert areas by stabilizing quicksand (techniques, solutions, advantages and disadvantages). Sixth National Conference on New Technologies in Agriculture, Natural Resources and Environment of Iran, Tehran. https://civilica.com/doc/1993525 . [In Persian]

- Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghaysarian, S.S., & Ebrahimi, A. (2025). Identifying dust centers and analyzing the factors affecting their occurrence based on remote sensing data (Case study: Southwest Iran). Geography and environmental hazards, 13(4), 386-405. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.89088.1504 . [In Persian]

- Niu, Q.H., Qu, J.J., & Zhao, A.G. (2022). Sand control effect of HDPE sandbreak nets with different porosity structure. Res Cold Arid Reg, 14(6), 403–411. https://doi.org/10.1016/j.rcar.2023.02.001

- Refahi, H. (1999). Wind Erosion and Its Control. Tehran University Press. https://www.gisoom.com/book/1958180 . [In Persian]

- Smyth, T.A., Rooney, P. & Yates, K.L. (2023). Dune slope, not wind speed, best predicts bare sand in vegetated coastal dunes. J Coast Conserv, 27, 27.https://doi.org/10.1007/s11852-023-00957-9

- Wang, X. (2005). Vegetation and soil recovery in revegetated sand dunes in the semi-arid region of China. Arid Land Research and Management, 19(2), 109–121. https://doi.org/10.1080/15324980590951400

- Xin, G.W., Huang, N., & Zhang, J. (2021). Investigations into the design of sand control fence for Gobi buildings. Aeolian Res, 49. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100662

- Yuhang Su, A., Yin, J., Zhou, Q., & Wang, Y. (2023.) Effect of sand-fixing vegetation on the hydrological regulation function of sand dunes and its practical significance. Arid Land, 15, 52–62. https://doi.org/10.1007/s40333-023-0002-y

- Zhang, K, Tian, J.J., & Qu, J.J. (2022). Sheltering effect of punched steel plate sand fences for controlling blown sand hazards along the Golmud-Korla railway: field observation and numerical simulation studies. J Arid Land, 14, 604–619. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0019-7

- Zhang, K., Zhang, H., & Deng, Yh. (2023). Effects of sand sedimentation and wind erosion around sand barrier: Numerical simulation and wind tunnel test studies. J. Mt. Sci. 20, 962–978. https://doi.org/10.1007/s11629-022-7757-z

- Zhou, W., Li, C., Wang, S., Ren, Z., & Stringer, L.C. (2023). Effects of vegetation restoration on soil properties and vegetation attributes in the arid and semi-arid regions of China. Journal of Environmental Management, 343(1). http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118186