Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Research Article

Pattern identification and attenuation trend: development of nebkhas in Iran (Case study: Kerman province)

Mehran Maghsoudi[1] *, Hahzir Mohammadi[1]

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

Received: 10 Apr 2025 Accepted: 12 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

Nebkha is a distinctive type of desert landform that develops when aeolian (wind-blown) sand accumulates around a vegetative anchor, such as shrubs, grasses, or small bushes. This phenomenon predominantly occurs in arid and semi-arid environments, where vegetation is sparse and the wind plays a dominant role in shaping the landscape. Nebkhas are not only geomorphological indicators of wind dynamics and vegetation interaction but also serve as ecological microhabitats for various desert organisms. These sand mounds are formed by the progressive deposition of wind-transported particles around the base of plants, where the roughness provided by vegetation reduces wind speed, causing particles to settle. Over time, this process creates crescent-shaped or irregularly domed sand dunes that can reach from a few centimeters to several meters in height, depending on environmental variables. The vegetation, in turn, becomes increasingly buried as the nebkha grows, often leading to a complex interaction between plant physiology and sediment deposition. In arid regions like Kerman Province in Iran, nebkhas act as natural windbreaks, reducing the extent of wind erosion and helping to stabilize otherwise highly mobile desert surfaces.The ecological significance of nebkhas goes beyond their role in sand trapping. They promote soil development, enhance microbial activity in the rhizosphere, and support biodiversity in desert ecosystems. By creating microenvironments with higher moisture retention and organic matter accumulation, nebkhas help establish favorable niches for other plant species and even desert fauna. These functions make nebkhas critical components in the study of desertification, land degradation, and ecological resilience.The primary objective of the present study is to explore the spatial and temporal patterns of nebkha development in Kerman Province, focusing particularly on the morphological evolution of these landforms over recent decades. Kerman is an ideal case study due to its varied climatic conditions, significant wind activity, and presence of vegetation-sand interactions in multiple zones. The research also highlights how climate variability—including droughts and episodic rainfall—can lead to the degradation or regeneration of these formations. By combining satellite imagery, meteorological data, and remote sensing techniques, this study provides a comprehensive understanding of how nebkhas are formed, how they evolve over time, and what their current status indicates about broader environmental trends. Such investigations are crucial for land management practices, especially in regions vulnerable to desertification and ecological stress.

Citation: Maghsoudi, M. and Mohammadi, H., 2025. Pattern identification and attenuation trend: development of nebkhas in Iran, *Res. Earth. Sci:* 16(3), (1-24) DOI: 10.48308/esrj.2025.239063.1267

* Corresponding author E-mail address: maghsoud@ut.ac.ir

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Materials and Methods

To analyze the formation, spatial distribution, and dynamic changes of nebkhas across the study area, a multidisciplinary approach was adopted involving meteorological observations, satellite image analysis, and geospatial data processing. The methodology was designed to provide both qualitative and quantitative insights into the environmental processes governing nebkha dynamics. Wind Data Analysis:

The first step in the analysis involved collecting wind data—both speed and direction—from meteorological stations situated in Bam, Shahdad, and Kahnuj. Wind Rose and Sand Rose diagrams were constructed to visualize prevailing wind directions and intensities. These diagrams help identify dominant erosional forces and potential sediment transport pathways. The Sand Drift Potential (DPt) and Resultant Drift Potential (RDP) were calculated using standard equations in aeolian geomorphology, which quantify the potential for sand transport and its directional bias. This information is vital for understanding where nebkhas are most likely to form and how they might migrate over time. Remote Sensing and Image Analysis: To monitor temporal changes in nebkha distribution and morphology, a time series of Landsat 8 satellite images (30-meter resolution) was analyzed. Images from multiple years were preprocessed using atmospheric correction and geometric alignment to ensure consistency. The images were then imported into ImageJ, a powerful open-source software for image processing. In this software, negative imaging was applied to enhance contrast between vegetation and bare soil, making nebkhas more distinguishable from surrounding landforms. Image differencing techniques were used to detect spatial changes in nebkha features between different years. This technique involves subtracting pixel values of one image from another to highlight areas of change. In regions where pixel values significantly changed, either new nebkhas had formed, or existing ones had been degraded or displaced by active dunes. Automated Change Detection with Python: To improve the precision and reproducibility of the image analysis, custom Python scripts were developed. These scripts automated the pixel-level comparison across image sets, reducing human error and enabling more efficient processing of large datasets. The Python algorithms calculated pixel-by-pixel differences and flagged areas that showed significant morphological changes, enabling spatial mapping of nebkha dynamics over time. Climatic Data Assessment: In addition to wind data, the study analyzed long-term climatic data, including mean annual temperature and total annual precipitation over a 20-year period. These data were obtained from synoptic weather stations within and around Kerman Province. This climatic information helped assess how shifts in temperature and rainfall patterns correlate with the formation or deterioration of nebkhas. Vegetation Cover Mapping and NDVI Analysis: To evaluate the role of vegetation in nebkha stability, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated from the Landsat images. NDVI is a widely used remote sensing index that reflects vegetation density and health. Higher NDVI values indicate dense, healthy vegetation, while lower values point to sparse or stressed vegetation. Land use maps were generated for different time points to identify zones of ecological degradation or improvement. These maps were then cross-referenced with nebkha locations to assess the relationship between vegetation dynamics and nebkha evolution. By integrating these diverse datasets and methods, the study provides a robust, multi-temporal analysis of nebkha development under the influence of climatic and geomorphological factors.

Results and Discussion

1. Wind Erosion Analysis: Wind dynamics play a pivotal role in both the formation and degradation of nebkhas. Based on the Wind Rose and Sand Rose analyses, distinct wind regimes were identified for each station:

Station	DPt	RDP	RDD	RDP/DPt
Bam	214.1	119.206	140°	0.0557
Shahdad		892.9	492.887	149° 0.552
Kahnuj	254.9	229.172	46°	0.899

The RDP/DPt ratio is critical in interpreting the unidirectionality of wind transport. In Bam, the low ratio suggests multidirectional winds, reducing net sediment transport in any specific direction. In contrast, Kahuna's high ratio reflects a dominant wind direction, conducive to the linear accumulation of sand and nebkha formation. Shahdad represents an intermediate condition with substantial drift potential and a moderately focused directional bias. 2. Image Differencing and Spatial Changes in Nebkhas: Image processing in ImageJ revealed significant spatial and morphological changes in nebkha formations between different time intervals. Key observations include: Growth and densification of existing nebkhas in zones with recent rainfall and vegetation regeneration. Disappearance of smaller or younger nebkhas in areas increasingly affected by mobile sand encroachment. In some transitional zones, fragmentation of nebkhas was evident, possibly due to fluctuating vegetation health and inconsistent sand supply. These findings

underscore the dual nature of environmental drivers: while certain areas demonstrate resilience and regeneration, others continue to degrade under the combined pressure of wind erosion and drought.3. Climatic Trends and Vegetation Dynamics: Analysis of the 20-year climatic data revealed a prolonged drought period lasting approximately 14 years, followed by three consecutive years of above-average rainfall. According to reports from the Kerman Meteorological Organization, this recent precipitation influx significantly improved soil moisture content and facilitated vegetative growth along the desert margins. This change is clearly reflected in the NDVI analysis, where notable increases in vegetation cover were observed, particularly in the northern and northeastern sectors of the province. These improved conditions led to the re-emergence of nebkhas in previously degraded zones. However, in southern areas with less precipitation, vegetation recovery was minimal, and many smaller nebkhas failed to survive. The study thereby confirms the hypothesis that climate—particularly rainfall—acts both as a degrading and restorative force in desert geomorphology.

Conclusion

The comprehensive investigation into the dynamics of nebkhas in Kerman Province highlights their significant geomorphological and ecological roles in arid landscapes. Nebkhas are not static landforms; they are dynamic systems shaped by the interplay of wind, vegetation, and climate. The study demonstrated that regions with high wind drift potential and sufficient vegetative cover are more likely to sustain large and persistent nebkhas. Conversely, areas subject to extreme drought and active sand encroachment show nebkha degradation and eventual loss. Key takeaways from the research include:

Morphological Patterns: Four primary nebkha patterns were observed—linear, fan-shaped, dense/sparse, and anthropogenic. These patterns reflect local wind regimes and vegetation types.

Wind and Sand Dynamics: The DPt and RDP values at the studied stations revealed varying degrees of susceptibility to wind erosion. Kahnuj had the most unidirectional winds, ideal for nebkha formation, while Bam had the least focused winds. Climate Variability: Despite a long-term drought, the recent increase in rainfall played a crucial role in reviving degraded areas and promoting nebkha regrowth. This underscores the importance of episodic climatic events in maintaining desert landforms.

Technological Integration: The use of satellite imagery, NDVI analysis, and automated pixel-level change detection provided a robust and replicable methodology for future studies on aeolian landforms. Ultimately, nebkhas serve as early indicators of ecological health in desert regions. Monitoring their evolution offers valuable insights into broader environmental processes, including desertification, climate adaptation, and landscape resilience. Continued research and satellite-based observation will be vital for managing and conserving these unique desert features under conditions of increasing climatic uncertainty

Keywords: Nebkha, Wind Rose, Sand Rose, Satellite Imagery, Vegetation Cover.

پژوهشهای دانش زمین
Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

الگویابی و روند میرایی - توسعه نبکاهای ایران (مطالعه موردی: استان کرمان)

مهران مقصودی[1]* ، هژیر محمدی[1]

۱-گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(**پژوهشی**) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

چکیده گسترده

مقدمه

نبکا یکی از اشکال ویژه و منحصربه‌فرد لندفرم‌های بیابانی است که در اثر تعامل پیچیده میان نیروهای بادی و پوشش گیاهی شکل می‌گیرد. این پدیده به صورت تپه‌های کوچک تا نسبتاً بزرگ ماسه‌ای مشاهده می‌شود که توسط گیاهانی چون بوته‌ها، درختچه‌ها یا حتی علف‌های مقاوم تثبیت شده‌اند. فرآیند شکل‌گیری نبکا زمانی آغاز می‌شود که بادهای غالب منطقه ذرات ماسه را از سطح زمین بلند کرده و به اطراف پایه گیاهان منتقل می‌کنند.

وجود مانع طبیعی مانند پوشش گیاهی، سرعت باد را در ناحیه پیرامون خود کاهش می‌دهد، در نتیجه ذرات معلق ته‌نشین می‌شوند و به تدریج، توده‌ای از ماسه شکل می‌گیرد. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، نبکاها به‌عنوان شاخص‌هایی از پویایی اقلیمی و ژئومورفولوژیکی شناخته می‌شوند. در مناطق بیابانی ایران، از جمله استان کرمان، این ساختارها نه تنها از منظر ژئومورفولوژی حائز اهمیت‌اند، بلکه از نظر اکولوژیکی نیز نقش بسزایی در ایجاد زیستگاه‌های محلی دارند. پوشش گیاهی مستقر بر روی نبکاها علاوه بر تثبیت ماسه‌ها، باعث افزایش جذب رطوبت، کاهش تبخیر و فراهم‌سازی شرایط زیستی برای سایر گونه‌ها می‌شود.

اندازه، شکل و پراکنش نبکاها می‌تواند اطلاعات با ارزشی در خصوص شدت و جهت باد، وضعیت پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی منطقه ارائه دهد. اهمیت نبکاها تنها محدود به عملکرد طبیعی آن‌ها نیست، بلکه آن‌ها به‌عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی میزان بیابان‌زایی و تغییرات محیطی در سطح منطقه‌ای و محلی نیز کاربرد دارند. بنابراین، مطالعه‌ی الگوهای پراکنش، تغییرات زمانی و عوامل مؤثر بر تشکیل و زوال نبکاها، می‌تواند به‌طور مستقیم در مدیریت منابع طبیعی و طراحی راهکارهای مقابله با بیابان‌زایی نقش داشته باشد. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی روندها و الگوهای فضایی - زمانی نبکاها در استان کرمان است؛ منطقه‌ای که به دلیل شرایط خاص اقلیمی، وقوع خشکسالی‌های طولانی‌مدت، و فعالیت‌های بادی گسترده، بستر مناسبی برای مطالعه این پدیده فراهم کرده است. علاوه بر این، حضور گونه‌های گیاهی مقاوم و متنوع، موجب شکل‌گیری نبکاهای متعددی در نواحی مختلف استان شده که می‌توانند به‌عنوان زیستگاه‌هایی برای گونه‌های جانوری خاص بیابانی نیز عمل نمایند. در این مطالعه تلاش شده است با تلفیق داده‌های هواشناسی، تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل‌های نرم‌افزاری و شاخص‌های زیست‌محیطی، شناخت دقیق‌تری از رفتار و دینامیک این لندفرم‌ها به دست آید.

استناد: مقصودی، م. و محمدی، ه.، ۱۴۰۴. الگویابی و روند میرایی - توسعه نبکاهای ایران، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۳)، (۲۴-۱)،
DOI: 10.48308/esrj.2025.239063.1267

* نویسنده مسئول: E-mail: maghsoud@ut.ac.ir

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف پژوهش، از رویکردی چندمرحله‌ای و تلفیقی بهره گرفته شد که شامل تحلیل داده‌های هواشناسی، پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور، و برنامه‌نویسی جهت پردازش خودکار داده‌ها می‌باشد.

۱) تحلیل داده‌های باد: در نخستین گام، داده‌های باد شامل سرعت و جهت در بازه‌های زمانی مختلف از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه شامل بم، شهداد و کهنوج گردآوری شد. این داده‌ها پایه تحلیل‌هایی چون ترسیم نمودارهای گلباد (Wind Rose) و گل‌ماسه (Sand Rose) بود. این نمودارها نمایانگر توزیع فراوانی و شدت باد در جهات مختلف هستند و به‌ویژه در مناطق بیابانی، برای تشخیص جهت‌های غالب فرسایش و رسوب‌گذاری بادی کاربرد دارند. شاخص‌های پتانسیل جابه‌جایی ماسه (DPt) و پتانسیل راندگی باد (RDP) برای هر ایستگاه محاسبه گردید تا میزان انرژی مؤثر باد در انتقال ماسه‌ها تعیین شود. همچنین شاخص بردار برآیند مسیر راندگی (RDD) به‌منظور شناسایی جهت غالب حرکت ماسه‌ها تعیین شد و در نهایت نسبت RDP/DPt که نشانگر میزان جهت‌مندی باد است، محاسبه شد. ۲) پردازش تصاویر ماهواره‌ای: برای تحلیل تغییرات زمانی و مکانی نبکاها، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. این تصاویر مربوط به دوره‌های زمانی مختلف انتخاب و پس از اعمال تصحیحات هندسی و رادیومتریک، برای تحلیل وارد نرم‌افزار ImageJ شدند. در این نرم‌افزار، ابتدا عملیات نگاتیوسازی (Negative) برای افزایش کنتراست بین پوشش گیاهی و زمین لخت انجام شد. سپس از طریق محاسبه تفاضل بین تصاویر سال‌های مختلف، مناطقی که در آن‌ها تغییرات مکانی در ساختارهای نبکاها رخ داده بود، شناسایی شدند.

۳) تحلیل تغییرات پیکسلی با زبان پایتون: به‌منظور افزایش دقت تحلیل‌ها، از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای نوشتن اسکریپت‌هایی استفاده شد که قادر بودند به‌صورت خودکار تفاوت‌های پیکسلی بین تصاویر را محاسبه کنند. این فرایند موجب شد تا مناطقی که بیشترین تغییرات را در ساختارهای نبکا داشتند با دقت بالا شناسایی و استخراج شوند. از مزایای این روش، کاهش خطای انسانی و افزایش سرعت پردازش داده‌ها می‌باشد. ۴) تحلیل داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی: در ادامه، داده‌های اقلیمی شامل میانگین دمای سالانه و میزان بارش طی ۲۰ سال گذشته استخراج شد تا ارتباط میان عوامل اقلیمی و تغییرات نبکاها بررسی شود. با استفاده از شاخص NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)، نقشه‌های پوشش گیاهی در بازه‌های زمانی مختلف تهیه گردید و روند تغییر پوشش سبز منطقه تحلیل شد. NDVI، به‌عنوان شاخصی معتبر برای سنجش سلامت زیستی و چگالی پوشش گیاهی عمل می‌کند. در نهایت، با تطبیق نقشه‌های NDVI با تغییرات مکانی نبکاها، ارتباط میان افزایش یا کاهش پوشش گیاهی با رشد یا زوال نبکاها مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده بیانگر نقش مؤثر عوامل اقلیمی، به‌ویژه باد و بارندگی، در شکل‌گیری و تحول نبکاها می‌باشد. بررسی نمودارهای گلباد و گلماسه برای سه ایستگاه بم، شهداد و کهنوج نتایج زیر را نشان داد:

Station	DPt	RDP	RDD	RDP/DPt
Bam	214.1	119.206	140°	0.0557
Shahdad	892.9	492.887	149°	0.552
Kahnuj	254.9	229.172	46°	0.899

تحلیل این داده‌ها نشان می‌دهد که ایستگاه شهداد دارای بیشترین انرژی بادی برای جابه‌جایی ماسه بوده و ایستگاه کهنوج دارای بیشترین جهت‌مندی باد است. این بدان معناست که در کهنوج بادها بیشتر در یک جهت معین می‌وزند که این امر در تشکیل نبکاهای خطی مؤثر است، درحالی‌که در بم، به دلیل پراکندگی جهتی باد، نبکاها به‌صورت نامنظم‌تر و با اشکال غیرخطی تشکیل شده‌اند.

تحلیل تصاویر و تغییرات نبکاها: بررسی تصاویر لندست در نرم‌افزار ImageJ نشان داد که نبکاها در منطقه موردمطالعه دچار تحولات قابل‌توجهی شده‌اند. این تغییرات را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد.

۱) رشد و گسترش نبکاها: در نواحی‌ای که پوشش گیاهی طی سال‌های اخیر افزایش یافته، به‌ویژه در مناطق پایین‌دست با بارندگی مناسب، نبکاها رشد کرده‌اند. این رشد با افزایش حجم ماسه پیرامون گیاهان و گسترش دامنه‌ی تپه‌های ماسه‌ای همراه بوده است. شاخص NDVI نیز در این مناطق، مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

۲) زوال یا ناپدید شدن نبکاها: در مناطقی که تحت تأثیر ماسه‌های روان قرار گرفته‌اند یا پوشش گیاهی به‌دلیل خشکسالی‌های مداوم کاهش یافته، نبکاها دچار تخریب شده‌اند. برخی از آن‌ها به‌کلی مدفون شده و یا پایه گیاهی خود را از دست داده‌اند. نقش اقلیم در تحول نبکاها: داده‌های اقلیمی نشان می‌دهد که منطقه طی ۱۴ سال متوالی درگیر خشکسالی بوده اما در سه سال اخیر، با افزایش بارندگی، پوشش گیاهی تا حدی بهبود یافته است. این امر در برخی مناطق منجر به احیای مجدد نبکاهای تخریب‌شده گردیده است که نشانگر تاب‌آوری سیستم‌های بیابانی در برابر نوسانات اقلیمی است. با این حال، زوال نبکاهای کوچک‌تر نیز نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای آن‌ها در برابر ناپایداری‌های اقلیمی می‌باشد.

الگوهای مورفولوژیکی نبکاها: در تحلیل نهایی، چهار الگوی اصلی برای نبکاهای مشاهده شده در منطقه شناسایی گردید: نبکاهای خطی (در راستای جهت باد)، نبکاهای بادبزنی یا چتری (گسترش‌یافته در چند جهت)، نبکاهای متراکم یا تنک (با توجه به تراکم پوشش گیاهی) و نبکاهای انسان‌ساخت یا مصنوعی (بر اثر فعالیت‌های کشاورزی یا صنعتی). این تنوع الگوها نشان‌دهنده‌ی تأثیر متقابل عوامل مختلفی چون توپوگرافی، پوشش گیاهی، شدت باد و فعالیت‌های انسانی در شکل‌گیری و تحول این لندفرم‌ها است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که نبکاها به‌عنوان لندفرم‌های حاصل از تعامل باد و پوشش گیاهی، شاخص‌های حساس و کارآمدی برای بررسی تغییرات اقلیمی و ژئومورفولوژیکی در مناطق خشک هستند. در استان کرمان، ترکیبی از شرایط خاص اقلیمی، به‌ویژه شدت و جهت باد و الگوهای بارندگی، موجب تنوع در الگوهای نبکاها گردیده است. داده‌های حاصل از ایستگاه‌های بم، شهداد و کهنوج نشان داد که هر منطقه بر اساس ویژگی‌های بادی خاص خود، شرایط متفاوتی برای تشکیل یا زوال نبکاها دارد. علاوه بر آن، استفاده از ابزارهای نوین مانند پردازش تصاویر ماهواره‌ای، نرم‌افزارهای متن‌باز مانند (ImageJ) و زبان برنامه‌نویسی پایتون، امکان تحلیل دقیق و قابل‌اطمینان تغییرات را فراهم آورد. تحلیل NDVI و پایش پوشش گیاهی نشان داد که بارندگی اخیر نقش مهمی در احیای برخی نبکاها داشته و این خود بیانگر تاب‌آوری نسبی این ساختارها در برابر نوسانات محیطی است. در مجموع، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت اکوسیستم‌های بیابانی، به‌ویژه در حوزه‌ی مقابله با بیابان‌زایی، استفاده گردد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تأثیر فعالیت‌های انسانی، چرای دام، و تغییرات کاربری زمین بر پایداری نبکاها نیز بررسی شود.

واژگان کلیدی: نبکا، گلباد و گلماسه، تصاویر ماهواره‌ای، پوشش گیاهی.

مقدمه

نبکا تپه‌ای است که از حاصل تجمع رسوبات ریزدانه در مجاور ریشه یا شاخه‌های گیاه به وجود می‌آید. منشأ و توسعه نبکاها با پوشش گیاهی، در دسترس بودن رسوب و فعالیت باد ارتباط دارد که نشان‌دهنده تغییرات پویا در آب‌وهوای منطقه و محیط است (Lang et al, 2013). پوشش گیاهی سبب ایجاد تغییر در جریان هوای نزدیک به سطح زمین، یک نبکا را تشکیل می‌دهند و رسوبات ریزدانه ماسه‌ای را بین خود و در سمت بادگیر قرار می‌دهند. چرخه رشد نبکا ۴ مرحله را در حالت طبیعی شامل می‌شود: ۱) مرحله نوپا (اولیه)، ۲) رشد، ۳) تثبیت و ۴) تنزل (نابودی) (Tengberg and Chen, 1998)؛ یعنی با تغییر جهت باد و افزایش مواد ریزدانه، نبکا به‌تدریج از مرحله نوپا عبور کرده و به پایداری می‌رسد و درنتیجه آن نبکا ناپدید می‌شود یا با مرگ پوشش گیاهی شروع به توسعه فاز جدیدی می‌کند (Wang et al, 2006; Khalaf et al, 2014). پیدایش و توسعه نبکا ارتباط نزدیکی با تشکیل پوشش گیاهی، در دسترس بودن رسوب و فعالیت باد دارد (Li et al, 2020). هرچه مقدار پوشش گیاهی رشد بیشتری داشته و همگام با آن جهت و سرعت باد ثابت باشد می‌تواند رسوبات ریزدانه بیشتری را به گیاه برساند و به‌تبع آن نبکاهای بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند. نبکاها دارای تنوع مورفولوژیکی هستند که در طول توسعه آن‌ها به وجود می‌آیند ازجمله ۱) پشته ماسه‌ای خطی، ۲) مرحله مثلثی متساوی‌الساقین، ۳) بیضی‌شکل و ۴) تقریباً دایره‌ای؛ با توجه به تفاوت‌های نبکاها در مراحل رشد، بین پارامترهای مورفولوژیکی نبکاها

مانند طول، عرض و ارتفاع همبستگی وجود دارد (Dongzhu et al, 2017). با توسعه نبکا، مورفولوژی یک نبکا، جریان باد را در سطح نبکا تغییر می‌دهد و بر فعالیت‌های بادی تأثیر می‌گذارد و باعث فرسایش بادی سطحی و تغییرات در تجمع مواد ریزدانه می‌شود که بر مورفولوژی نبکا تأثیر می‌گذارد (Luo et al, 2017).

نبکا می‌تواند به‌طور مؤثری سرعت باد را کاهش دهد و مواد ریزدانه از جمله ماسه را به دام بیندازد همچنین روند بیابان‌زایی را کاهش دهد که نقش مهمی در پایداری اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک و حفاظت از تنوع زیستی ایفا کند (Cao et al, 2024). نبکا گونه‌ای سازنده که بومی مناطق خشک و نیمه‌خشک است. نبکا به دلیل توانایی منحصربه‌فرد خود در تثبیت ماسه، چشم‌انداز محلی بیابان‌ها را کنترل می‌کند و نقش اکولوژیکی مهمی در حرکت ذرات ریزدانه ماسه‌ایفا می‌کند؛ بنابراین، وجود نبکاها یک عامل کلیدی اکولوژیکی برای حفظ امنیت اکولوژیکی منطقه‌ای در سیستم‌های محیطی خشک و نیمه‌خشک است (Kees et al, 2016). با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران (بر مبنای بارندگی کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر در سال) مناطق وسیعی از آن دارای بیابان بزرگی همچون دشت کویر و بیابان لوت است. مساحت مناطق بیابانی ایران حدود ۸۶ میلیون هکتار برآورد شده است که در این مساحت مناطق کویری، تپه‌های ماسه‌ای و مناطق با پوشش گیاهی ناچیز وجود دارد (Negahban et al, 2013)؛ که با توجه به موقعیت ایران بر روی کره زمین و نزدیکی به مدار رأس‌السرطان (کمربند بیابانی) قسمت‌های مرکزی و شرقی کشور بیشترین مقدار از آن‌ها را دارند. در بسیاری از مناطق بیابانی، پوشش‌های گیاهی پراکنده نقش کلیدی در تثبیت ماسه‌های روان ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین اشکال این فرایند، تشکیل نبکاها است؛ پدیده‌ای ژئومورفولوژیک که در اثر تجمع تدریجی ماسه به دور پایه‌های گیاهان به وجود می‌آید. این تپه‌های ماسه‌ای گیاه‌پایه، که در منابع علمی از آن‌ها با عنوان «نبکا» یاد می‌شود، نه تنها جلوه‌ای از تعامل میان عوامل بیولوژیک و ژئومورفیک هستند، بلکه به عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی پویایی محیط‌های بیابانی نیز شناخته می‌شوند. در ایران، به‌ویژه در مناطقی چون حاشیه غربی دشت لوت، نبکاهای متراکم و گاه بسیار بزرگی وجود دارند که در طول زمان دستخوش تغییرات متعددی شده‌اند. این تحولات تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی نظیر اقلیم، بافت خاک، و الگوهای باد، و همچنین دخالت‌های انسانی، تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های عمرانی رخ داده‌اند. الگوهای مکانی و زمانی شکل‌گیری، رشد و زوال نبکاها پیچیده و پویا هستند. در نواحی با رطوبت نسبی بیشتر، مانند مسیر آبراهه‌ها، نبکاها الگوی خطی به خود می‌گیرند، درحالی که در مناطق مخروط‌افکنه‌ای، الگوهای توسعه آن‌ها تابع ساختار شبکه زهکشی است. با این حال، پایش میدانی این ساختارها در مناطق گسترده و صعب‌العبور، فرآیندی پرهزینه و دشوار است. از این‌رو، بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش‌ازدور و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند ابزاری کارآمد برای مطالعه روند تغییرات نبکاها در مقیاس زمانی و مکانی گسترده باشد. با توجه به نقش مؤثر نبکاها در تثبیت ماسه‌های روان و کاهش خطر فرسایش بادی، همچنین اهمیت آن‌ها در جلوگیری از گسترش بیابان‌زایی به سمت مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی، مطالعه روند تغییرات فضایی و زمانی همچنین الگوهای توسعه و تخریب این پدیده‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی، توسعه پایدار و آمایش سرزمین نقش مهمی ایفا کند. از این منظر، تحلیل روند تحول نبکاها نه‌تنها ابزاری برای شناخت بهتر پویایی چشم‌اندازهای بیابانی است، بلکه به‌مثابه هشداری برای مدیریت و حفاظت از این سامانه‌های شکننده طبیعی نیز عمل می‌کند. در زمینه بررسی نبکاها مطالعات بسیاری در ایران و جهان انجام شده است که می‌توان اشاره کرد که پژوهش‌های علوی پناه و همکاران (Alavi Panah et al, 2013) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، ویژگی‌های مورفومتری نبکاها در منطقه شهداد را تحلیل کردند و دریافتند که پراکنش فضایی این نبکاها به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر جهت‌های غالب باد و تراکم پوشش گیاهی است؛ به‌گونه‌ای که نبکاهای بزرگ‌تر معمولاً در نزدیکی بستر رودخانه‌های فصلی تشکیل شده‌اند. تحلیل زمانی (Moradi and Khorasani, 2016) با استفاده از تصاویر لندست در جنوب شهداد نشان داد که طی یک دوره ۲۰ ساله، برخی نبکاها به دلیل افزایش رسوب‌گذاری گسترش یافته‌اند، در حالی‌که برخی دیگر در اثر کاهش پوشش گیاهی و تشدید فرسایش بادی دچار زوال شده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، قهرودی و همکاران (Ghahroudi et al, 2018) با بهره‌گیری از شاخص‌های اقلیمی و زمین‌ریخت‌شناسی، پتانسیل شکل‌گیری نبکاها را در

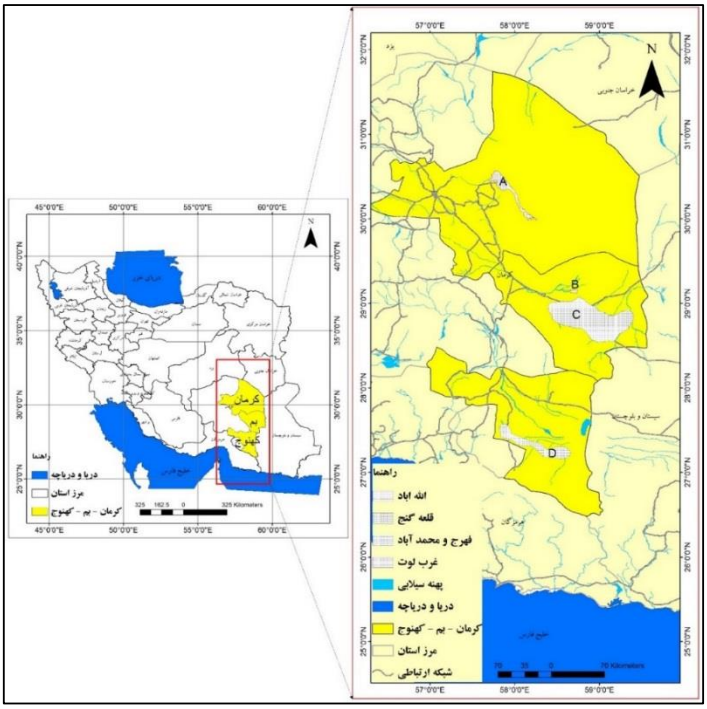
حاشیه غربی لوت نقشه‌برداری کردند و نواحی دارای بافت خاک متوسط تا ریزدانه، شیب ملایم و سرعت بالای باد را به‌عنوان مناطق بسیار مساعد برای توسعه نبکا معرفی نمودند. فتحی و همکاران (Fathi et al, 2020) نقش نبکاها را در تثبیت ماسه‌های روان در مناطق بم و فهرج بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وجود نبکاهای متراکم به‌طور مؤثری موجب کاهش سرعت باد در نزدیکی سطح زمین شده و به تثبیت تپه‌های ماسه‌ای کمک می‌کند. در نهایت کریمی و محمودی (Karimi and Mahmoudi, 2021) تأثیر اقلیم و توپوگرافی بر الگوی پراکنش نبکاها در دشت ریگان را مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که نبکاها در مناطق کم‌شیب با رطوبت نسبی بالاتر تمرکز بیشتری داشته و جهت‌گیری آن‌ها با الگوی بادهای غالب منطقه هم‌راستا است. مقصودی و همکاران (Maghsoudi et al, 2022): در بررسی تحلیل ویژگی‌های اکوژئومورفولوژیکی نبکاها، مورفومتری ۵۱ نبکا در سیرجان و ۵۵ نبکا در شهربابک را مورد ارزیابی قراردادند که نشان داد تکامل نبکاهای سیرجان در حال رشد است اما در شهر بابک روند تخریبی دارند. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi Meymand et al, 2020) در پژوهشی تحت عنوان آنالیز بافت رسوبی و تأثیر پوشش گیاهی در نبکاهای شهداد دریافتند که جنس و گونه گیاهی در ژئومورفولوژی نبکاهای دشت شهداد حائز اهمیت است. این امر به‌گونه‌ای است که از سه نوع پوشش گیاهی شناسایی شده (گز، ترات و کهور) مرتفع‌ترین نبکاها مربوط به نبکاها با پوشش گز بوده اما تأثیر نوع پوشش گیاهی در پارامترهای رسوب‌شناسی ناچیز است و تغییر قابل‌ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد. پاریزی و همکاران (Parizi et al, 2017) تأثیر ویژگی‌های هیدروژئولوژی بر مورفومتری نبکاهای چاله در انجیر را بررسی نمودند که دریافتند شرایط هیدروژئولوژی در منطقه موردمطالعه مهم‌ترین عامل شکل‌گیری است که ویژگی‌های مورفومتری را نیز کنترل می‌کند. وانگ و همکاران (Wang et al, 2024)، یافته‌های پژوهش سن‌سنجی چندگانه نبکاهای جوان در دشت ماسه‌ای Mu Us، شمال مرکزی چین نشان می‌دهد که برخی از نبکاهای بزرگ در منطقه‌ی جنوب غربی موسو ایالات متحده احتمالاً ۱۰۰ تا ۲۰۰ سال پیش سرچشمه گرفته‌اند که در پاسخ به خشکی ناشی از آب‌وهوا یا ناشی از فعالیت انسان در این منطقه است. دو و همکاران (Du et al, 2024) شکل‌گیری و توسعه نبکاها بر اساس کرونولوژی و رسوب‌شناسی در فلات اوردوس، شمال چین را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که نبکاها در منطقه موردمطالعه عمدتاً روی کانال‌های پالئو یا لایه‌های پالئوسول توسعه‌یافته‌اند. ماسه بسیار ریز و ماسه ریز ترکیب غالب بر اندازه دانه رسوبات نبکا هستند. نمک‌سازی ابزار اصلی برای حرکت ذرات است که نشان‌دهنده تجمع نزدیک منبع برای رسوبات نبکا هست. در دهه‌های اخیر، کشاورزان محلی به افزودن رسوبات نبکا به خاک مناطق آبیاری برای بهبود کیفیت خاک و کاهش شوری خاک عادت کرده‌اند. چنین فعالیت‌های کشاورزی، همراه با احیای زمین، نابودی نبکاها در فلات اوردوس را تسریع کرده است. ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2024) مطالعه لندفرم‌های نبکا با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین، علاوه بر ارائه بینش‌های مفید برای تدوین سیاست‌ها و اجرای طرح‌های حفاظتی، نمونه‌ای کاربردی از چگونگی به‌کارگیری این روش‌ها برای کمی‌سازی ویژگی‌های لندفرم‌های بیوژئومورفولوژیکی و شبیه‌سازی تغییرات آن‌ها در مطالعات میدانی ژئومورفولوژی به شمار می‌رود.ژو یانگ (Zhou and Yang, 2023) مورفولوژی، توزیع و تشکیل نبکاها در گبی را از طریق بررسی‌های میدانی و شبیه‌سازی تونل باد بین درختچه‌های تشکیل‌دهنده نبکاها بررسی نمودند که شکل‌گیری و توسعه نبکاها تحت تأثیر گیاهان از طریق پوشاندن زمین، تغییر جهت باد و به دام انداختن ماسه است و مورفولوژی نبکاها مربوط به شکل، تراکم و ساختار گیاهانی است که نبکا را تشکیل می‌دهند. یان و همکاران (Yan et al, 2023) با بررسی، آیا تأثیر جزیره حاصلخیز در نبکاهای گز در حوضه شمالی تاریم باعث افزایش گرمایش جهانی می‌شود؛ نتایج نشان داد که: ۱) اثرات جزیره حاصلخیز در رابطه با استوکیومتری خاک در نبکاهای گز در بیشتر موارد مثبت بود. ۲) روند بیابان‌زایی بدون پیشرفت آشکار در مرحله بوته‌زار تسریع شد و ۳) از دست دادن خاک کربن از جزایر حاصلخیز فروریخته است بنابراین می‌تواند گرمایش جهانی را تسریع کند. وی و همکاران (Wei et al, 2023) بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی و مکانیسم‌های تأثیرگذار نبکاها در انواع مختلف زمین‌های ماسه‌ای در اکوتون واحه بیابانی جیلانتایی را انجام دادند که نتایج نشان داد ظرفیت تثبیت ماسه درختچه تانگتروم نبکاها با تثبیت اراضی ماسه‌ای بیشتر بود. درختچه‌های تانگتروم رشد خوبی داشتند و با تثبیت زمین‌های ماسه‌ای،

توانایی باززایی به‌تدریج افزایش یافت. ذهاب ناظوری و همکاران (Zahab Nazouri et al, 2021) با بررسی بیوژئومورفولوژی مگا نبکاها در دشت فهرج با بازدیدهای میدانی و مورفومتری دریافتند که در این منطقه نبکاهای با ارتفاع ۲۰ متر وجود دارد که به احتمال زیاد بلندترین و بزرگ‌ترین نبکاهای جهان هستند.

منطقه‌ی مورد مطالعه

ایران به‌واسطه موقعیت جغرافیایی خاص خود در کمربند خشک نیمکره شمالی، تنوع اقلیمی چشم‌گیری دارد. این کشور با گستردگی در عرض‌های جغرافیایی حدود ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی، دوری از دریاهای آزاد، و وجود ناهمواری‌های گسترده‌ای چون زاگرس، البرز و فلات مرکزی، از اقلیم‌هایی متنوع از نیمه‌مرطوب تا فراخشک برخوردار است. در این میان، از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور، میزان رطوبت کاهش یافته و دما افزایش می‌یابد که این روند، منجر به شکل‌گیری اقلیم‌های گرم و خشک، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی کشور شده است. بخش عمده‌ای از این نواحی، به‌ویژه استان کرمان، تحت تأثیر همین شرایط اقلیمی قرار دارد و به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین نواحی بیابانی ایران شناخته می‌شود. مناطق بیابانی کشور، از جمله استان کرمان، دارای ویژگی‌های طبیعی خاصی هستند که بر روندهای ژئومورفولوژیکی آن‌ها تأثیرگذارند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به بارندگی بسیار کم و پراکنده (اغلب کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال)، تبخیر بالا، وزش بادهای مداوم و خشک، بارندگی‌های شدید و رگباری در مدت‌زمان کوتاه، و اختلاف دمای زیاد بین شب و روز اشاره کرد. این ویژگی‌ها نه‌تنها منجر به پوشش گیاهی فقیر و پراکنده شده‌اند، بلکه شرایطی فراهم آورده‌اند که در آن اشکال خاصی از فرسایش بادی و لندفرم‌های بادی مانند نبکاها شکل بگیرند. در این مناطق، ماسه‌های روان که توسط باد حمل می‌شوند، هنگام برخورد با موانعی مانند گیاهان، دچار افت سرعت شده و در پیرامون آن‌ها رسوب می‌کنند. تکرار این فرایند به شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای گیاه‌پایه‌ای منجر می‌شود که در اصطلاح علمی به آن‌ها «نبکا» گفته می‌شود. نبکاها به‌عنوان لندفرم‌هایی شاخص در مناطق بیابانی ایران شناخته می‌شوند و اهمیت اکولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و حتی اقتصادی دارند. در پژوهش حاضر، با توجه به گستردگی و تنوع این پدیده در جنوب‌شرق ایران، محدوده مطالعه در مناطقی انتخاب شده است که از لحاظ تراکم، تنوع و الگوی نبکاها برجسته هستند. استان کرمان که از لحاظ جغرافیایی در منطقه خشک مرکزی ایران قرار گرفته، یکی از مهم‌ترین کانون‌های شکل‌گیری و توسعه نبکاها به شمار می‌رود. در این استان، سه شهرستان کرمان، بم و کهنوج دارای مناطقی با تراکم بالای نبکا هستند که گاه به دلیل انبوهی و پیوستگی، با عنوان «جنگل‌های نبکا» شناخته می‌شوند. در این پژوهش، چهار منطقه‌ی اصلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند: غرب دشت لوت، فهرج و محمدآباد، قلعه گنج در دشت جازموریان، و منطقه شهداد منطقه غرب دشت لوت به‌عنوان یکی از خشک‌ترین و داغ‌ترین نقاط زمین شناخته می‌شود و شرایط سخت اقلیمی آن، از جمله دمای بسیار بالا، بارش ناچیز، و وزش بادهای شدید، زمینه‌ای مناسب برای شکل‌گیری نبکاهای مقاوم و پایدار فراهم کرده است. این منطقه به دلیل سطح هموار، رسوبات ریزدانه و پوشش گیاهی پراکنده، بستری مناسب برای توسعه لندفرم‌های بادی از جمله نبکاها به شمار می‌آید. مناطق فهرج و محمدآباد در جنوب شرق کرمان قرار دارند و به‌واسطه موقعیت بینابینی میان کوهپایه‌ها و دشت‌های پست، دارای مخروط‌افکنه‌های فعال با زهکش‌های موقت هستند که در پیرامون آن‌ها رسوبات آبرفتی دانه‌ریز و رطوبت نسبی بیشتر یافت می‌شود. این شرایط، به رشد گیاهان شورپسند و مقاوم به خشکی کمک کرده و باعث تمرکز بالای نبکاها در این ناحیه شده است. همچنین با توجه به قرار گرفتن در مسیر بادهای غالب، روند تشکیل و تغییرات نبکاها در این منطقه بسیار پویا است. منطقه قلعه‌گنج در حاشیه دشت جازموریان، یکی از مهم‌ترین کانون‌های پوشش نبکایی در جنوب استان کرمان است. وجود زمین‌های شور و رس‌دار، شیب بسیار کم، دشت‌های سیلابی و نیز گسل‌های فعال باعث شده است تا این ناحیه شرایط مناسبی برای تشکیل نبکاها داشته باشد. ترکیب خاک‌های شور و فضاهای فرورفته بین پشته‌های رسی موجب شده است که نبکاها به‌صورت پراکنده اما پایدار در این منطقه شکل بگیرند و در برخی نواحی به شکل رشته‌ای و نواری ظاهر شوند. منطقه شهداد که در حاشیه غربی لوت و در جوار کلوت‌ها قرار دارد، به‌واسطه وجود آبراهه‌های فصلی، مخروط‌افکنه‌های گسترده و زمین‌های ریزبافت، محیطی مناسب برای استقرار پوشش گیاهی و تشکیل نبکاهاست. تنوع گیاهی، شدت بالای

فرسایش بادی و رسوب‌گذاری پی‌درپی باعث شده که نبکاهای این منطقه از لحاظ فرم و ابعاد، تنوع چشم‌گیری داشته باشند و برخی از آن‌ها به‌عنوان بزرگ‌ترین نبکاهای جهان شناخته شوند. از نظر زمین‌شناسی، محدوده‌های موردمطالعه در زون ساختاری سنندج سیرجان قرار دارند که بخشی از کمربند زمین‌ساختی زاگرس به شمار می‌رود. این زون ساختاری به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی گسترده، چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های فراوان، از تنوع سنگ‌شناسی زیادی برخوردار است. ترکیبات سنگ‌شناسی در این مناطق شامل آندزیت، بازالت، گدازه‌های آتشفشانی، سنگ‌های دگرگونی و نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم زمین‌شناسی می‌باشد که خود در تعیین نوع خاک، نفوذپذیری و الگوهای فرسایشی منطقه نقش مؤثری دارند. بیشتر بخش‌های محدوده مورد بررسی دارای شیب‌های ملایم با توپوگرافی یکنواخت و پست هستند. این نواحی غالباً در انتهای مخروط‌افکنه‌های خشک‌شده یا در بستر رودخانه‌های فصلی قرار دارند و از نظر رسوب‌شناسی شامل خاک‌هایی با بافت ریز، همچون رس، سیلت و ماسه‌ی نرم هستند. این رسوبات به دلیل توانایی بالا در نگهداری رطوبت و چسبندگی ذرات، بستر مناسبی برای استقرار گیاهان مقاوم به خشکی و در نتیجه شکل‌گیری نبکاها فراهم می‌آورند. این شرایط زمینه‌ای مناسب برای رشد پوشش گیاهی بیابانی و در نتیجه شکل‌گیری نبکاها فراهم کرده است. از نظر اقلیمی، تابستان‌های منطقه بسیار گرم و خشک، و زمستان‌ها سرد و نسبتاً خشک‌اند. بادهای غالب در منطقه عمدتاً از جهت‌های شمال، شمال غربی و جنوب غربی می‌وزند و بیشترین سرعت خود را در فصول گرم سال، به‌ویژه از اواخر بهار تا اوایل پاییز، به دست می‌آورند. این بادها عامل اصلی جابجایی ماسه‌ها و ایجاد پویایی در فرایند شکل‌گیری و تحول نبکاها به‌شمار می‌روند. بررسی این ویژگی‌ها و تأثیر آن‌ها بر پویایی لندفرم‌های بیابانی، هدف اصلی این پژوهش را تشکیل می‌دهد.



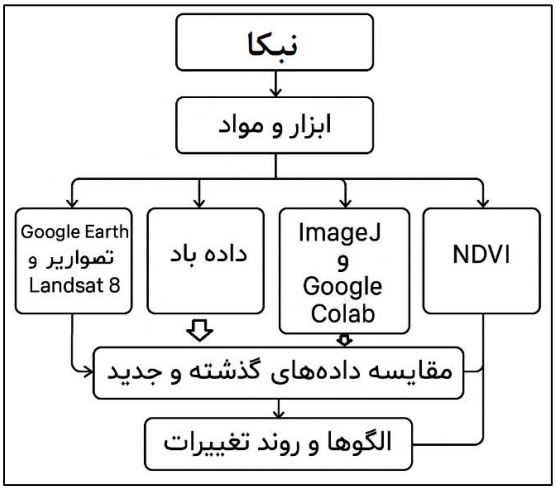
شکل ۱: نقشه محدوده موردمطالعه (A: غرب لوت، B: الله‌آباد، C: فهرج و محمدآباد، D: قلعه گنج)

Fig. 1: Map of the study area (A: Western Lut, B: Allahabad, C: Fahraj and Mohammadabad, D: Qaleh Ganj

مواد و روش‌ها

لندفرم‌های سطح زمین، با گذشت مدت‌زمانی از پایداری فرایندهای اثرگذار، به حالت تعادلی می‌رسند که می‌توان گفت؛ در عین تغییر، فرم ثابتی را به خود گرفته‌اند، ولی اگر در یکی از فاکتورهای فرایندهای اثرگذار، تغییری ایجاد شود فرم در مقابل آن واکنش نشان می‌دهد و این واکنش بستگی به شرایطی دارد که از آن به‌عنوان آستانه یاد می‌کنند باید به خاطر سپرد که برای وقوع آستانه‌ها گاه میزان تغییر چندان اهمیّت ندارد بلکه دامنه‌ی تغییر نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. استفاده از ابزار و مواد مؤثر جهت

بررسی موضوع موردنظر بسیار مهم است تا نتیجه مطلوب را دریافت نماییم. در ابتدا از نرم‌افزار گوگل ارث و تصاویر لندست ۸ جهت شناسایی و استخراج منطقه موردمطالعه (مناطق بسیار شاخص نسبت به مناطق دیگر) شاخص‌ها و سایت‌های نبکاها استفاده شد. مدل رقومی ارتفاعی ۳۰*۳۰ محدوده موردمطالعه از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا استخراج گردید. لایه‌های موردنیاز از جمله: گسل، زمین‌شناسی منطقه از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، ۱:۲۵۰۰۰۰ و شبکه آبراهه از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS-Arc رقومی گردید. با استفاده از تصاویر سری زمانی در نرم‌افزار گوگل ارث نقاطی که نبکاها در معرض تخریب قرارگرفته بودند مشخص گردید و با عواملی از جمله مسیر قنات‌ها، جاده‌ها و مناطق دخالت انسانی مقایسه شد. داده‌های باد از ایستگاه سینوپتیک استان کرمان از سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۹ در نرم‌افزار اکسل مرتب‌سازی شد. با تهیه گلباد و گلماسه منطقه به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای Graph Sand Rose و WR Plot و داده‌های آنلاین سامانه جامع globalwindatlas مناطقی که داده‌ی باد ندارد را گلباد گرفتیم و اثرات باد در تغییرات نبکاها بررسی شد. جهت بررسی الگویابی نبکاها از نرم‌افزار Image J استفاده شد؛ تصاویر ماهواره‌ای را به‌صورت Negative نمایش دادیم. در قسمت Image Calculator تفاضل تصاویر به دست آمد. با برنامه‌نویسی زبان پایتون در Google Colab میزان تغییرات پیکسل به پیکسل تصاویر بررسی گردید و تصاویر آن استخراج شد. همچنین با تصاویر زمان‌های گذشته تطبیق و مقدار تغییرات را به دست آوردیم. با مرتب‌سازی داده‌های ۲۰ ساله دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیک استان کرمان از روش IDW ۱۵*۱۵ کیلومتر داده‌ها درون‌یابی گردید تا ارتباط تراکم و بزرگی نبکاها با دما و بارش بررسی شود. شاخص NDVI پوشش گیاهی (تصاویر سنتینل ۲) در ارث انجین در سری‌های زمانی تحلیل و با پوشش نبکاها در تصاویر ماهواره‌ای اپتیک تطبیق داده شد تا ارتباط این شاخص با توسعه یا تخریب این لندفرم به دست بیاید (شکل ۲).



شکل ۲: دیاگرام فرایند پژوهش حاضر

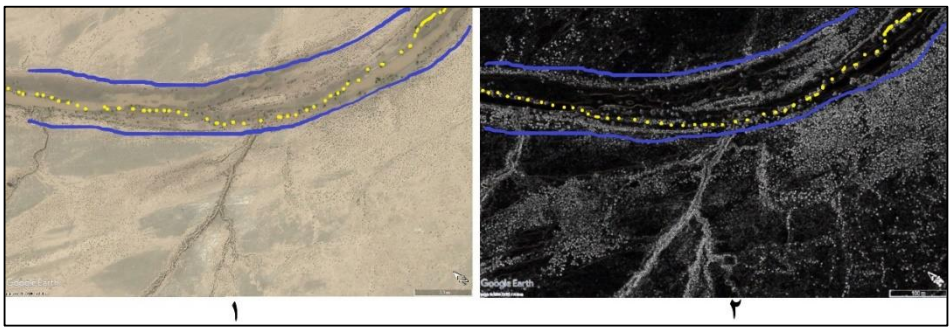
Fig. 2: Diagram of the current research process

بحث و نتایج

الگوی نبکاها

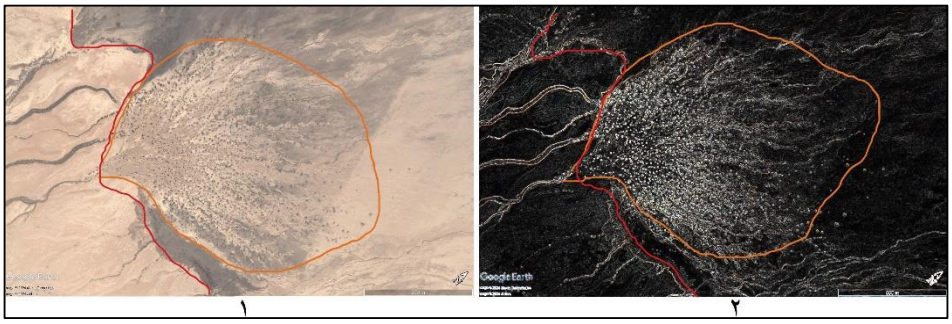
پوشش گیاهی بر اساس رطوبت محیط خود می‌تواند رشد کند خواه این رشد ناشی از آب‌های سطحی ناشی از بارش که به‌صورت رودخانه جاری می‌شود و یا آب‌های زیرزمینی مانند چشمه‌ها و بالا بودن سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی و یا استحصال آب زیر زیرزمینی مانند قنات‌ها و ... باشد. در بعد وسیع‌تر و کلی‌تر اگر پراکندگی پوشش گیاهی را بر اساس ژئومورفولوژی نگاه کنیم می‌توان دید که پوشش گیاهی نبکاها در مناطقی که رودخانه به دشت منتهی می‌شود و در مخروط افکنه ها دیده می‌شود چون در این مناطق سطح آب زیرزمینی بالاتر است و هم شبکه آبراهه‌ها ناشی از روان آب‌ها وجود دارد که باعث به وجود آمدن پوشش گیاهی و رشد آن‌ها می‌شوند. این مناطق با تسلط

خود بر منطقه باعث می‌شوند که پوشش گیاهی ایجاد کنند و تابع رطوبت آن‌ها هستند. این مناطق در ژئومورفولوژی هرکدام دارای شکل خاصی بر روی زمین، نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای هستند. در منطقه موردمطالعه نبکاها دارای الگوی تجمعی گوناگونی هستند که شامل: ۱) خطی، ۲) بادبزنی و چتری، ۳) متراکم و تنک، ۴) انسان‌ساخت (مصنوعی). ۱) الگوی خطی: با توجه به اینکه نبکاها در مناطقی که رسوبات ریزدانه، پوشش گیاهی و باد غالب وجود داشته باشد در مناطق خشک ایجاد می‌شوند. در مناطق خشک بستر رودخانه محلی مناسب برای تشکیل این لندفرم می‌باشد که با توسعه رودخانه آن‌هم افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نبکاها در طول رودخانه به وجود می‌آیند که الگوی آن‌ها شبیه به رودخانه و خطی است (شکل ۳).



شکل ۳: الگوی خطی با تبعیت از بستر رودخانه (نقاط زردرنگ: نبکا، خطوط آبی‌رنگ: محدوده رودخانه)
Fig. 3: Linear pattern following the riverbed (yellow dots: nabkhas, blue lines: river boundaries)

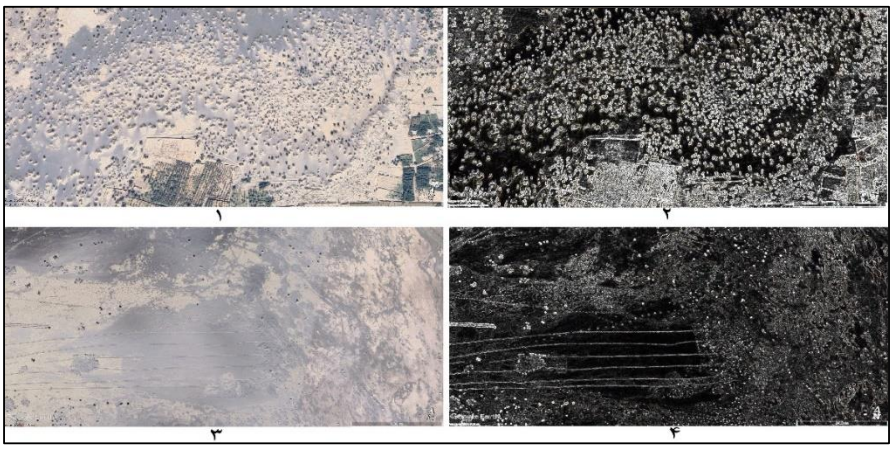
۲) الگوی بادبزنی و چتری: دوران چهارم زمین‌شناسی برای ژئومورفولوژیست ها حائز اهمیت است؛ زیرا این دوران با تغییرات اقلیمی، تکامل و گسترش پدیده‌های فرسایشی زیادی همچون مخروط افکنه ها توأم بوده است. مخروط افکنه ها اشکال مثلثی شکل چهارم هستند که در محل ورود آبراهه و یا رودخانه به داخل سطوح تقریباً هموار دشت‌ها شکل می‌گیرند (Huggett and Shuttleworth, 2022). بر روی این لندفرم شبکه زهکشی به‌صورت واگرا عمل می‌کند و آبراهه‌های در این منطقه ایجاد می‌شود. با توجه به وجود رطوبت پوشش گیاهی نیز رشد می‌کند و هم‌زمان با رسوبات ریزدانه با کمک عامل باد تپه‌های با به دام انداخته شدن این رسوبات ریزدانه در پوشش گیاهی نبکاها به وجود می‌آیند. در سراسر مخروطه افکنه نبکاها گسترش پیدا کرده و الگوی شبیه به مخروط افکنه که مانند بادبزن و چتر مانند است ایجاد می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴: ۱: تصویر ماهواره‌ای لندست، ۲: تصویر نگاتیو شده در نرم‌افزار image j؛ الگوی بادبزنی و چتری با تبعیت از مخروط افکنه (خط نارنجی محدوده مخروط افکنه و نبکاها، خط قرمز مرز واگرا شدن آبراهه اصلی با ورود به دشت)
Fig. 4: 1: Landsat satellite image, 2: Inverted image processed in ImageJ software; fan-shaped and umbrella-like pattern following the alluvial fan (orange line: boundary of the alluvial fan and nabkhas, red line: divergence point of the main channel as it enters the plain)

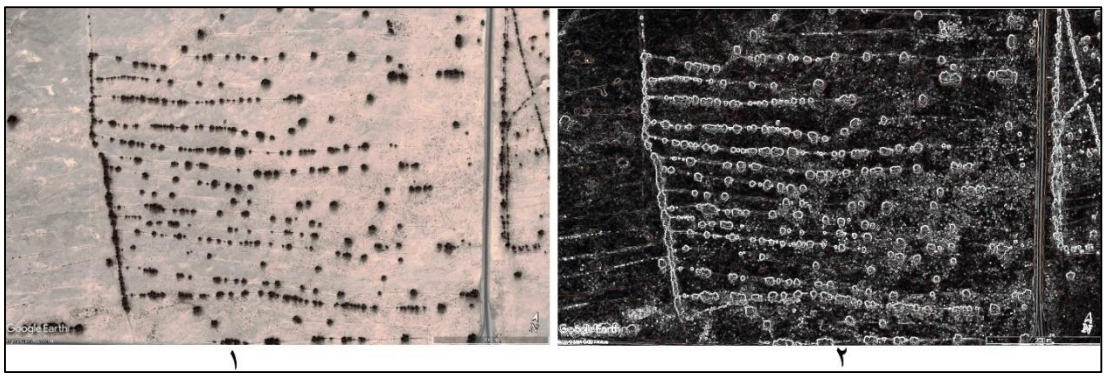
۳) الگوی متراکم و تنک: در مناطقی که شرایط تشکیل نبکاها از جمله وجود باد، رسوبات ریزدانه، پوشش گیاهی و رطوبت کافی باشد مراحل تشکیل نبکا سریع‌تر و کامل‌تر و به صور تثبیتی انجام می‌شود و می‌تواند بزرگ‌تر شود اما در

مناطقی که شرایط مذکور کافی نباشد و در هر بازه از زمان عوامل تشکیل نبکا وجود نداشته باشد باعث می‌شود که ساختار نبکا کامل نشود و در مراحل ابتدایی رشد از بین برود. این دو شرایط محیطی دو نوع الگوی متفاوت رشد نبکاها را ایجاد می‌کنند که در نوع اول گونه نبکا متراکم و در مورد دوم تنک نام‌گذاری می‌شود که علت این دو نوع الگو فراهم نبودن شرایط شکل‌گیری این لندفرم است (شکل ۵).



شکل ۵: الگوی متراکم (۱ و ۲) الگوی تنک (۳ و ۴)
Fig. 5: Dense pattern (1 and 2), sparse pattern (3 and 4)

۴) الگوی انسان‌ساخت (مصنوعی): همان‌گونه که از اسم این نوع مشخص است دخالت انسان در این نوع حرف اول را می‌زند. به‌طوری که انسان با کاشت پوشش گیاهی در مناطقی که خطر ماسه‌های روان آنجا را تهدید می‌کند؛ باعث ایجاد مانعی در برابر هجوم آن‌ها می‌شود که برای جلوگیری از تخریب مزارع، باغات کشاورزی و مناطق مسکونی آن‌ها را به وجود می‌آورند این پوشش گیاهی در مناطقی که پتانسیل حمل ماسه‌های روان وجود دارد به تشکیل نبکا منجر می‌شود که خود خطر ماسه‌های روان را کم می‌کند و یک مانع طبیعی نیز محسوب می‌شود کما که به‌وسیله‌ی انسان به وجود آمده باشد. این الگو در مناطق مختلف نسبت به سایر الگوهای قبلی شکل متفاوتی دارد که نوع نظم آن حاکی از آن است که یک عامل باعث پدیدار شدن آن می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶: الگوی متراکم انسان‌ساخت (مصنوعی)
Fig. 6: Human-made (artificial) dense pattern

گلباد و گلماسه (میزان فرسایش بادی)

در نزدیکی سطح زمین بادهای مناطق خشک قادرند رسوبات ریزدانه بیشتری را برحسب مترمکعب در سال در پهنـای یـک کیلـومتر نسبت به هر پدیده ژئومورفولوژیکی دیگر حمل کنند سرعت بیشتر از ۶ متر بر ثانیه نشان‌دهنده فرسایش بادی است که این سرعت توان جابه‌جا کردن رسوبات ریزدانه ماسه‌ای را دارد (Ayazi, 2018). درنتیجه بررسی و تجزیه‌وتحلیل گلباد و گلماسه در محدوده

موردمطالعه این اطلاعات را به پژوهش اضافه می‌کند که چه میزان فرسایش بادی وجود دارد و آیا بادهای منطقه موردمطالعه توان و پتانسیل حمل ماسه را دارند؟ (جدول ۱ و ۲) (Fryberger and Dean, 1979).

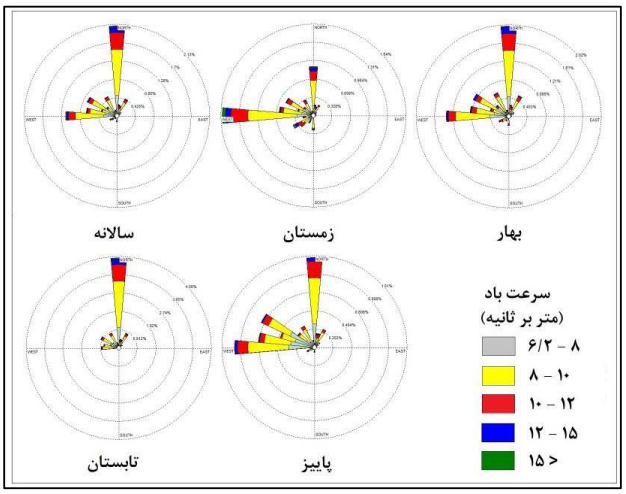
جدول ۱: کلاس‌بندی توان حمل ماسه در محیط‌های بیابانی
Table 1: Classification of sand transport potential in desert environments

Erosion Power Class	Sand transport rate (m^3/year)	DPt Value
<33	High	> 400
17-33	Medium	200–99
>17	Low	< 200

جدول ۲: تغییرپذیری جهات باد UDI
Table 2: Variability of Wind Directions (UDI)

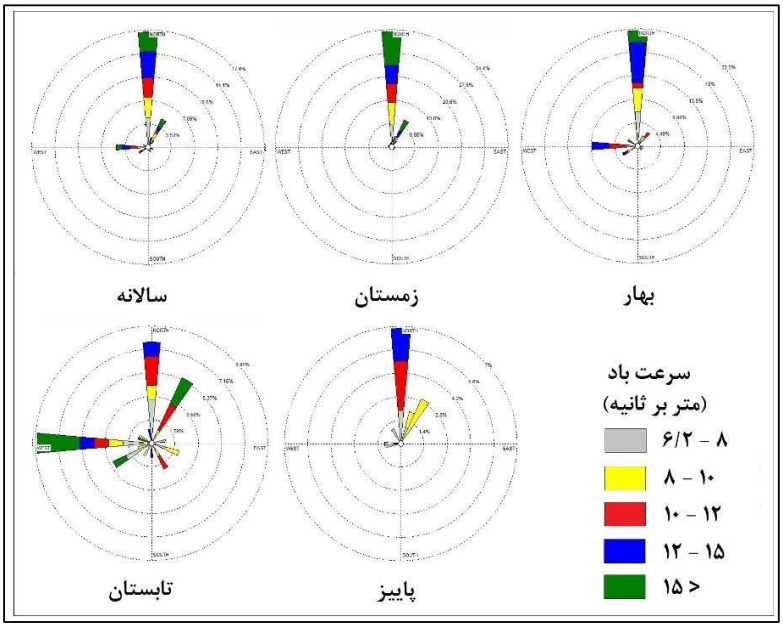
UDI Value	Variability Class	Wind Direction Classification
> 0.8	Low	Unidirectional winds
0.8 – 0.3	Medium	Bidirectional winds with obtuse angle
< 0.3	High	Multidirectional compound winds with acute angle

بعد از مرتب‌سازی داده‌های باد ایستگاه‌های موردنظر گلباد هرکدام ترسیم گردید. این نمودارها در چهارفصل سال و سالانه به دست آمد. در تحلیل گلباد ایستگاه بم نتیجه به صورت است که در تمام فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و نمودار سالانه باد جهت غالب باد شمال است و همچنین نقش بادهای غربی در نمودارها مشهود است اما در فصل زمستان این غلبه بادها به سمت غرب است که در کل بیشترین مقدار باد سرعتی معادل ۸ تا ۱۰ متر بر ثانیه را دارند این سرعت باد از حد آستانه فرسایش بادی که ۶ متر بر ثانیه است عبور نموده که بیانگر فرسایش بادی در این ایستگاه است (شکل ۷).



شکل ۷: نمودار گلباد ایستگاه بم
Fig. 7: Wind rose diagram of Bam station

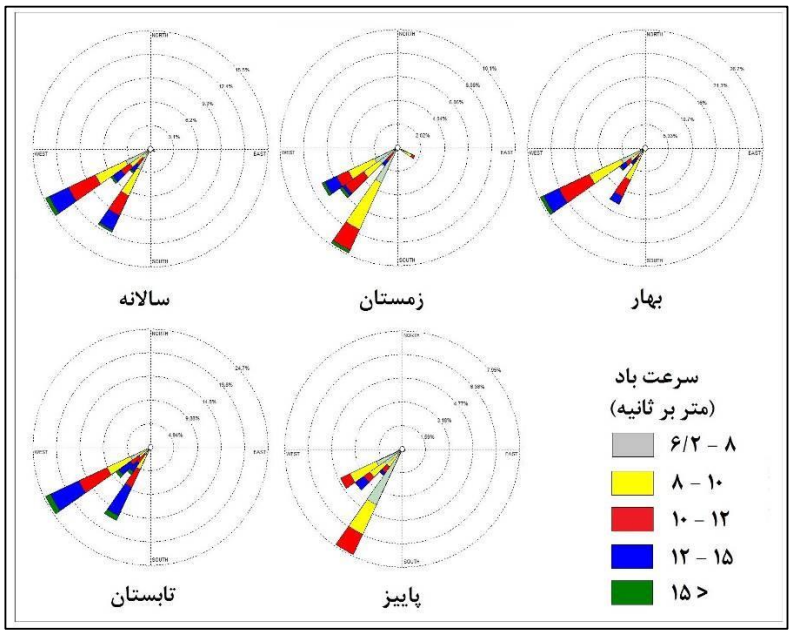
نمودار گلباد ایستگاه شهداد همانند ایستگاه بم جهت غالب باد را در تمام فصول سال شمال را نشان می‌دهد اما این جهت باد در تابستان تغییراتی را دارد که به سمت غرب و شمال شرق نیز جابه‌جا می‌شود همچنین سرعت بیشترین باد غالب مقدار ۱۲ تا ۱۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد همانند ایستگاه بم با عبور از حد آستانه فرسایش بادی سرعت باد باعث جابه‌جای رسوبات ریزدانه در جهت باد می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸: نمودار گلباد ایستگاه شهداد

Fig. 8: Wind rose diagram of Shahdad station

فرسایش بادی در ایستگاه کهنوج نیز فعال است که شاهد آن گلباد منطقه می‌باشد که در تمام نمودارهای طول فصول سال جهت باد غالب جنوب غربی را نشان می‌دهد که در نمودار سالانه آن نیز این جهت تغییری نمی‌کند و فراوانی سرعت باد در این جهت ۸ تا ۱۰ است که حاکی از رد کردن سرعت آستانه فرسایشی بادی است (شکل ۹).

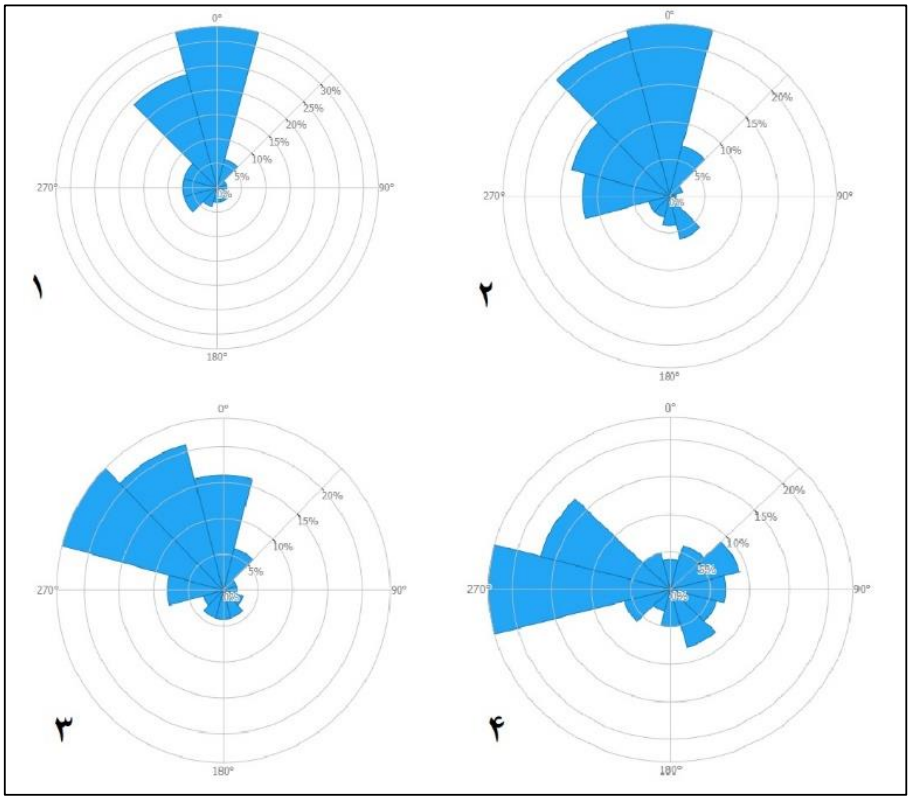


شکل ۹: نمودار گلباد ایستگاه کهنوج

Fig. 9: Wind rose diagram of Kahnuj station

داده‌های آنلاین و به روز سامانه اطلس باد جهانی را در منطقه حضور نبکاها اطلاعات بسیار خوبی را به ما می‌دهند که یکی از مزیت‌های این سامانه اجازه داده شدن ترسیم نمودار گلباد در هر منطقه از روی کره زمین است. چهار منطقه موردمطالعه نبکاها از غرب لوت، الله‌آباد، فهرج و محمدآباد و گنج قلعه انتخاب شد و با ترسیم نمودار گلباد آن‌ها نتایج به روزی را کسب نمودیم. داده‌های این سامانه از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ هستند که دقت بالای را دارا

هستند. در منطقه نبکاهای غرب لوت بیشترین سرعت باد ۸/۵ متر بر ثانیه به دست آمد و جهت غالب این باد شمال غربی به دست آمد. در منطقه الله‌آباد جهت باد غالب شمال، شمال غرب برآورد گردید و سرعت باد در این منطقه ۶/۷۴ متر بر ثانیه به دست آمد. فهرج بافاصله کمتر به الله‌آباد قرار دارد که داده‌های باد آن‌ها نزدیک هم است و سرعت باد غالب ۶/۴۷ است اما جهت غالب باد در این منطقه شمال غرب است اما در قلعه گنج در منطقه موردمطالعه جهت باد غالب شمال است و بیشترین سرعت باد نیز ۶/۱ متر بر ثانیه برآورد گردید. با توجه به داده‌های به دست آمده در سامانه آنلاین اطلس باد جهانی هر چهار منطقه دارای فرسایش بادی هستند نمودار (شکل ۱۰). با توجه به داده‌های باد محدوده‌های موردنظر نمودارهای گلماسه ترسیم گردید از ویژگی‌های نمودار گلماسه این است که می‌توان شرایط تشکیل نبکاها که محل تجمع ماسه‌های ناشی از جابه‌جایی توسط باد و پتانسیل فرسایش بادی هستند را می‌توان تحلیل کرد.

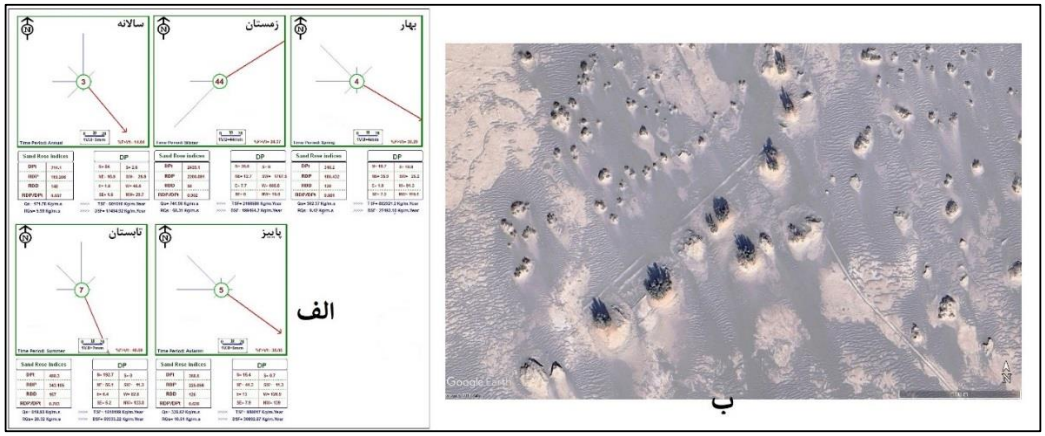


شکل ۱۰: نمودارهای گلباد حاصل از داده‌ای آنلاین و به‌روز (۱: غرب لوت، ۲: الله‌آباد، ۳: فهرج، ۴: قلعه گنج)

Fig. 10: Wind rose diagrams derived from online and up-to-date data (1: Western Lut, 2: Allahabad, 3: Fahraj, 4: Qaleh Ganj)

بر اساس ترسیم نمودار گلماسه ایستگاه‌های بم، شهداد و کهنوج ارقامی برای پتانسیل جابه‌جایی ماسه (DPt)، برآیند پتانسیل راندگی (RDP)، بردار برآیند مسیر راندگی (RDD) و نسبت RDP/DPt برای شکل تپه‌های ماسه‌ای مشخص شد. شرایط تشکیل نبکاها که محل تجمع ماسه‌های ناشی از جابه‌جایی توسط باد و پتانسیل فرسایش بادی هستند را می‌توان تحلیل کرد. DPt ایستگاه بم ۲۱۴/۱ که این شاخص با توجه فراوانی باد در منطقه به علت وجود پوشش گیاهی پایین آمده است و نشان از این دارد که جابه‌جایی ماسه رخ می‌دهد اما چون نبکا با پوشش گیاهی و مانع شناخته شده است این اثر را کاهش می‌دهد که نتیجه این مقدار قدرت فرسایش متوسط است. شاخص RDP 119.206 در این ایستگاه حاکی از این است که انرژی جابه‌جایی و پتانسیل راندگی متوسط به پایین است. RDD در منطقه عدد ۱۴۰ درجه را نشان می‌دهد که این زاویه جهت بردار حمل ماسه با زاویه ۱۴۰ درجه نسبت به شمال جغرافیایی است که جهت جنوب شرق بیشترین پتانسیل حمل ماسه را دارد اما مقدار UDI نسبت RDP/DPt 0.557

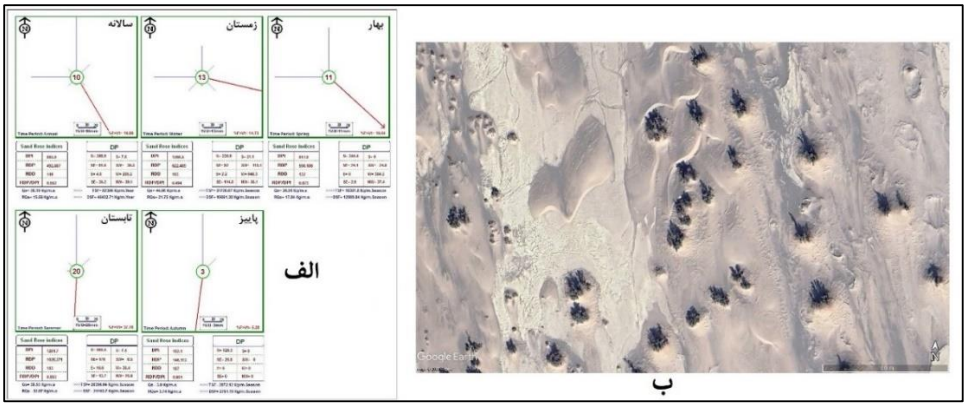
می‌باشد این شاخص بالایی ۰/۵ است این شاخص بین عدد ۳ تا ۸ قرار گرفته است که تغییرپذیری باد متوسط و بادهای دوجهته با زاویه منفرجه را نشان می‌دهد. گلماسه ایستگاه بم در تمام فصول سال جهت جنوب شرقی را نشان می‌دهد به غیر از زمستان که آن هم ناشی از کم اثر شدن پرفشار جنب حاره در این فصل است که بادهای غربی می‌توانند نفوذ بیشتری داشته باشند در فصل زمستان جهت تشکیل تپه‌های ماسه‌ای شمال شرقی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: الف: نمودارهای گلماسه فصلی و سالانه ایستگاه بم، ب: تصویر ماهواره‌ای لندست نبکاهای بم

Fig. 11: a: Seasonal and annual sand dune diagrams of Bam station, b: Landsat satellite image of Bam nabkhas

DPt ایستگاه شهداد ۸۹۲/۹ است نتیجه این مقدار قدرت فرسایش بالا است. شاخص RDP ۴۹۲/۸۸۷ ایستگاه شهداد نتیجه این است که انرژی جابه‌جایی و پتانسیل راندگی بالا است. RDD ۱۴۹ درجه را نشان می‌دهد که این زاویه جهت بردار حمل ماسه با زاویه ۱۴۹ درجه نسبت به شمال جغرافیایی است که جهت جنوب شرق بیشترین پتانسیل حمل ماسه را دارد اما مقدار UDI نسبت RDP/DPt ۰/۵۵۲ می‌باشد این شاخص بالایی ۰/۵ است این شاخص تغییرپذیری باد متوسط و بادهای دوجهته با زاویه منفرجه را نشان می‌دهد تغییر میزان جهت باد جهات جنوب تا جنوب شرقی را نشان می‌دهد که در فصل تابستان این زاویه به جنوب و در زمستان به شرق نزدیک‌تر است. تصویر ماهواره‌ای نبکاهای غرب لوت در نزدیکی شهداد نیز تأیید این موضوع است که دامنه پشت به باد این لندفرم روبه جهت جنوب شرق است (شکل ۱۲).

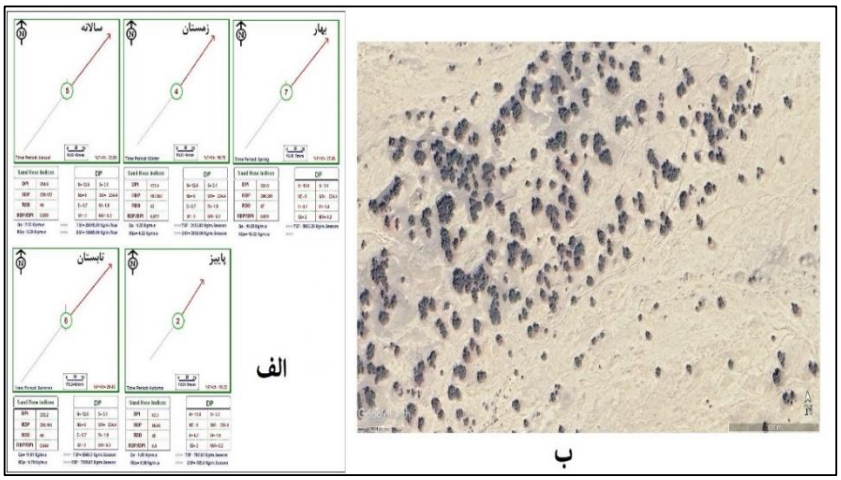


شکل ۱۲: الف: نمودارهای گلماسه فصلی و سالانه ایستگاه شهداد، ب: تصویر ماهواره‌ای لندست نبکاهای شهداد

Fig. 12: a: Seasonal and annual sand dune diagrams of Shahdad station, b: Landsat satellite image of Shahdad nabkhas.

در ایستگاه کهنوج شاخص DPt ۲۵۴/۹ را برای نمودار سالانه نشان می‌دهد که حاکی از توان حمل ماسه در این محیط متوسط به بالا می‌باشد. RDP نیز عدد ۲۲۹/۱۷۲ است که انرژی جابه‌جایی و پتانسیل راندگی بالا است و

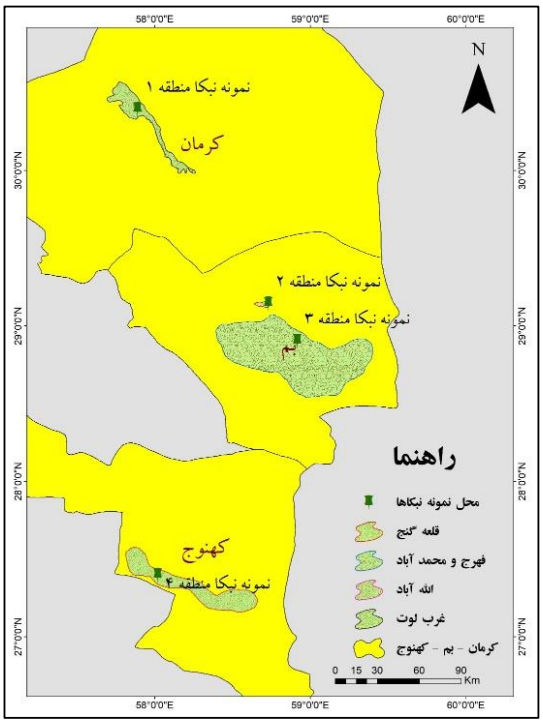
همچنین RDD مقدار ۴۶ است که زاویه جهت بردار حمل بردار نسبت به شمال جغرافیایی جهت شمال شرق را نشان می‌دهد این جهت برای تمام فصول سال منطقه نیز صادق است و شاخص UDI میزان ۰/۸۹۹ را به ما داد که تغییرپذیری باد کم و با زاویه تند را نشان می‌دهد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: الف: نمودارهای گلماسه فصلی و سالانه ایستگاه کهنوج، ب: تصویر ماهواره‌ای لندست نبکاهای کهنوج
Fig. 13: a: Seasonal and annual sand dune diagrams of Kahnuj station, b: Landsat satellite image of Kahnuj nabkhas

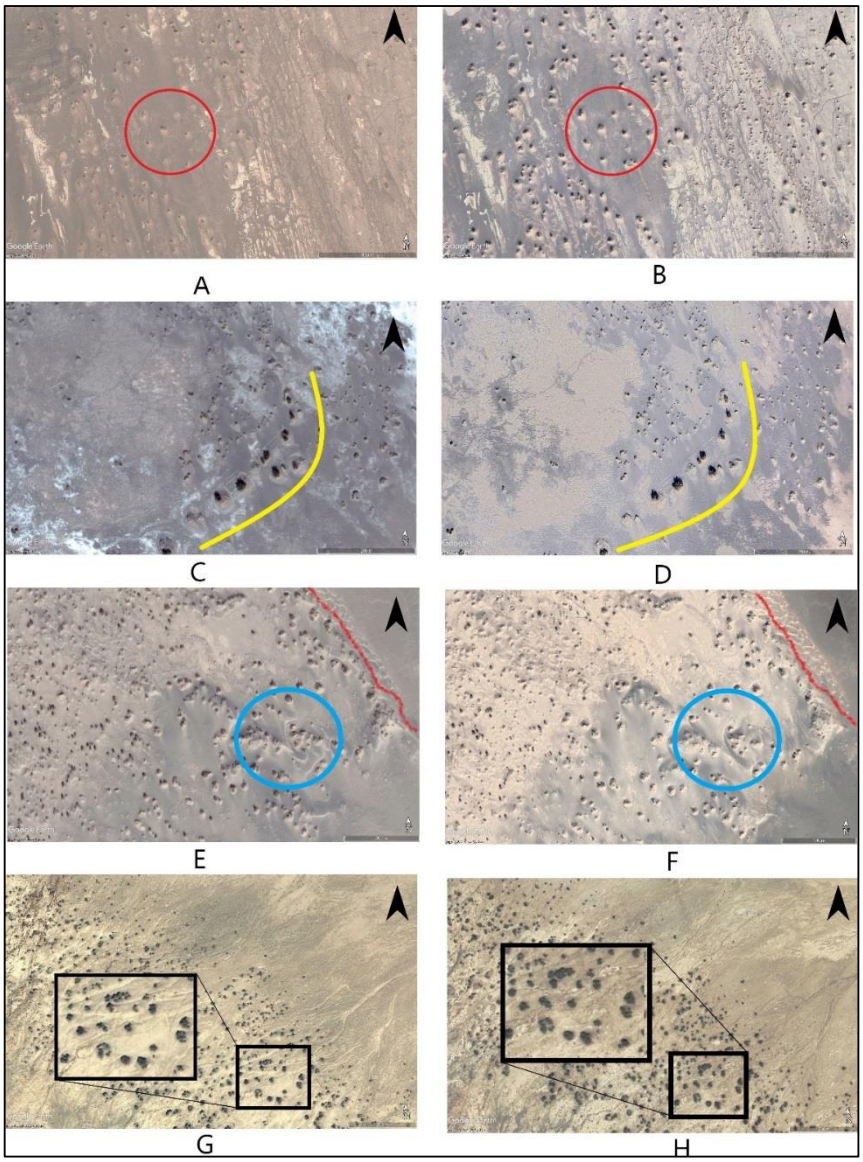
تغییرات نبکاها

با توجه به میزان تغییرات پوشش گیاهی و به تبع آن نبکاها مناطقی انتخاب شد که دارای بیشترین میزان تغییرات بوده و بسیار محسوس است. در مناطق منتخب چهار محدوده موردنظر که شامل غرب لوت، الله‌آباد، فهرج، قلعه گنج می‌باشند محدوده‌هایی انتخاب شد که تصاویر ماهواره‌ای آن‌ها در بازه زمانی سیزده‌ساله که از ۲۰۱۱ تصویر مبدأ تا ۲۰۲۴ آخرین تصویر شامل می‌شود (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: موقعیت مناطق نمونه نبکا
Fig. 14: Location of nabkha sample sites

طی این بازه زمانی (۱۳ ساله) نبکاها دارای تغییرات بسیاری هستند که با مقایسه آن‌ها در نرم‌افزار IMAGE J میزان رشد یا تخریب آن‌ها به دست آمد. با بررسی تصاویر ماهواره‌ای به علت‌های: ۱: تراکم نبکاها، ۲: توزیع نبکاها در مناطق مختلف، ۳: قرارگیری در کنار سایر لند فرم‌های ژئومورفیک چهار محدوده انتخاب شد (شکل ۱۵).

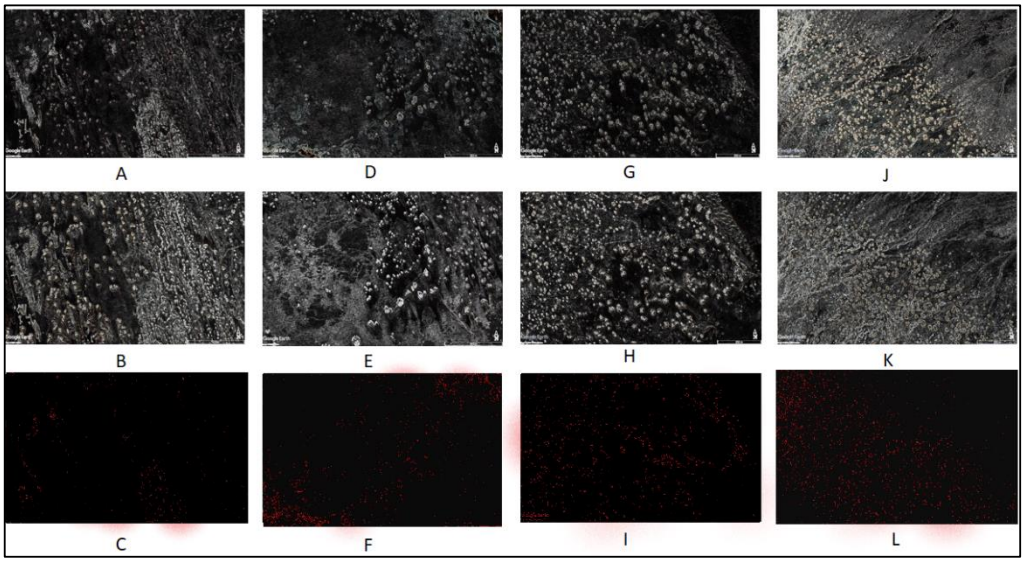


شکل ۱۵: تصاویر ماهواره‌ای مناطق منتخب در محدوده موردمطالعه (A: منطقه ۱ سال ۲۰۱۱، B: منطقه ۱ سال ۲۰۲۴، C: منطقه ۲ سال ۲۰۱۱، D: منطقه ۲ سال ۲۰۲۴، E: منطقه ۳ سال ۲۰۱۱، F: منطقه ۳ سال ۲۰۲۴، G: منطقه ۴ سال ۲۰۱۱، H: منطقه ۴ سال ۲۰۲۴)

Fig. 15: Satellite images of selected areas within the study region (A: Area 1, 2011; B: Area 1, 2024; C: Area 2, 2011; D: Area 2, 2024; E: Area 3, 2011; F: Area 3, 2024; G: Area 4, 2011; H: Area 4, 2024)

تصویر ماهواره‌ای نبکاهای غرب لوت این را نشان داد که در طی این بازه زمانی تعداد آن‌ها افزایش یافته است و همچنین نبکاهای که کوچ بوده‌اند رشد خوبی داشته‌اند وجود رطوبت گاهی برای پوشش گیاهی و رسوبات ریزدانه که جهت باد شمالی غالب منطقه است تراکم این نوع تپه‌های ماسه‌ای را بیشتر کرده است. همچنین دامنه‌های پشت به باد این لندفرم زائده‌ی کشیده‌تری را پیدا نموده است که در اختلاف تصویر به دست آمده از تصاویر نگاتیو اصلاح شده تغییرات بسیار مشهود است. در الله‌آباد تغییر مشهود در نبکاها مربوط به افزایش ارتفاع و حجم نبکاها است و در فهرج و محمدآباد تصویر گذشته سال ۲۰۱۱ طبق گزارش منابع طبیعی شهرستان در این زمان نبکاها در معرض تخریب قرار گرفته بودند که شاهد آن هجوم ماسه‌های روان است که قبلاً نبکاها مانند مانعی بودند؛ اما

در تصویر سال ۲۰۲۴ تخریب از بین رفته و تراکم و رشد آن‌ها افزایش پیدا کرده است همان‌گونه که تصویر اختلاف این دو سال مشخص می‌کند قسمت شرق این منطقه در مقابل هجوم ماسه‌های روان قرار دارد که با وجود نبکاها مقدار خطر کاهش پیدا می‌کند؛ اما در منطقه‌ای که به گفته ژئومورفولوگ های بزرگ ایران چاله جازموریان مانند متراکم‌ترین نبکاهای ایران را دارد به علت وجود کوهستان‌ها بارش نسبت بهتری دریافت می‌کنند که به‌تبع آن شبکه زهکش منتهی به این منطقه رطوبت خوبی جهت رشد پوشش گیاهی برای توسعه نبکاها دارد. در تصویر سال ۲۰۱۱ نگاتیو شده تراکم نسبت به سال ۲۰۲۴ کمتر بوده است که تفاضل این دو تصویر مقدار زیادی از نبکاها را نشان داده است (شکل ۱۶). در مجموع نتایج تصاویر برای نبکاها نشان از آن دارد که رشد و توسعه افزایش پیدا نموده و نبکاها تخریب کمتری را دارند اما باید فعالیت‌های انسانی را فراموش نکرد که با جاده‌سازی، افزایش سطح زیر کشت، توسعه شهری و همایش‌های آفرود این لندفرم را تهدید می‌کند (جدول ۱).



شکل ۱۶: تصاویر نگاتیو شده در نرم‌افزار Image J و تفاضل تصاویر ماهواره‌ای مناطق منتخب در محدوده موردمطالعه (رنگ قرمز مقدار تغییرات در طی ۱۲ سال بر اساس تصاویر ماهواره‌ای)

Fig. 16: Negative images processed in ImageJ software and difference of satellite images of selected areas within the study region (red color indicates the amount of change over 12 years based on satellite images).

جدول ۳: اطلاعات تصاویر نگاتیو شده محدوده موردمطالعه

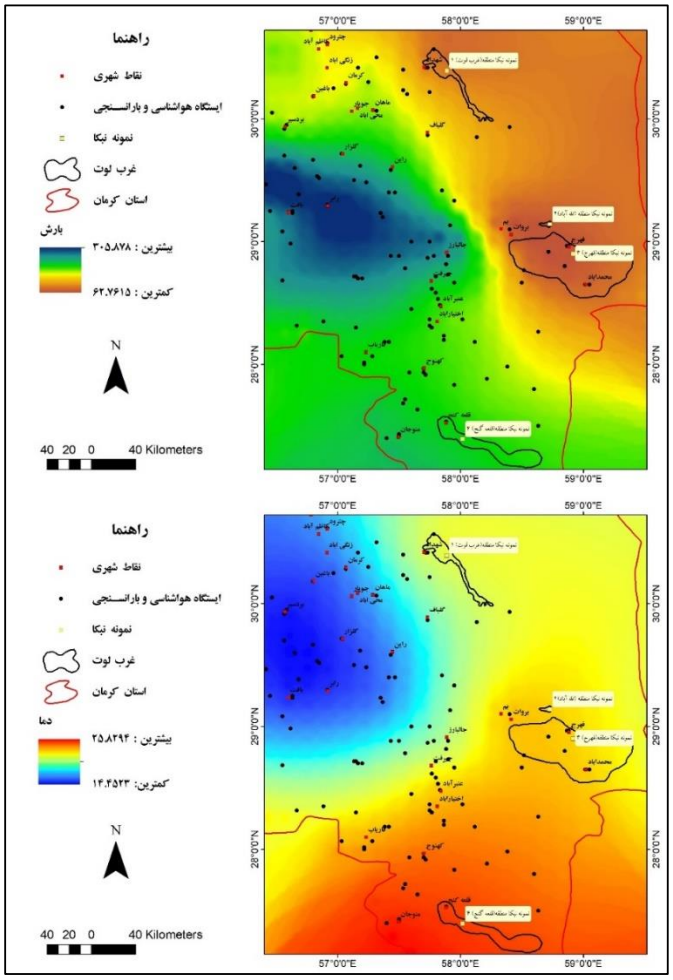
Table 3: Information of negative images for the study area

Region 1	Pixel Count	Region 2	Pixel Count	Region 3	Pixel Count	Region 4	Pixel Count
A: Image 2011	511	D: Image 2011	509	G: Image 2011	508	J: Image 2011	511
B: Image 2024	511	E: Image 2024	509	H: Image 2024	508	K: Image 2024	511
C: Changes	120	F: Changes	174	I: Changes	169	L: Changes	60
Percentage Change	23.48		34.18		33.26		11.74

دما و بارش

دما یکی از عوامل کلیدی در تبخیر و تعرق گیاهان است. دماهای بالا معمولاً باعث افزایش تبخیر و تعرق می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش رطوبت خاک و در نتیجه کاهش رشد گیاهان روی نبکا شود. در مقابل، دماهای مناسب (نه خیلی بالا و نه خیلی پایین) می‌تواند شرایط بهتری برای رشد گیاهان فراهم کند که به تثبیت و توسعه نبکاها کمک می‌کند. بارش به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب برای گیاهان

در مناطق خشک اهمیت دارد. افزایش بارش می‌تواند منجر به افزایش رطوبت خاک و رشد بهتر گیاهان روی نبکا شود. توزیع زمانی بارش نیز مهم است؛ بارش‌های فصلی منظم می‌تواند باعث رشد مداوم گیاهان و تثبیت خاک شود، در حالی که بارش‌های ناگهانی و شدید ممکن است باعث فرسایش و تخریب نبکاها شود. در مجموع، تعادل بین دما و بارش در منطقه‌ای خاص می‌تواند تعیین‌کننده نوع و میزان رشد نبکاها باشد. مناطقی با بارش کافی و دماهای معتدل معمولاً شرایط بهتری برای توسعه این لندفرم‌ها فراهم می‌آورند. این وضعیت اقلیمی از جمله عاملی است که باید در جهت توسعه نبکاها در مناطق خشک بررسی شود. استان کرمان در کنار گرم‌ترین نقطه زمین قرارگرفته است که در حاشیه کویر سرسبز است که آن‌هم ناشی از وجود گلدان‌های ماسه‌ای نبکاها هستند. با توجه به گزارش هواشناسی استان کرمان طی ۱۴ سال خشکسالی و کمبود بارش در ۳ سال گذشته این استان بارش‌های خوبی را دریافت کرده است این بارش‌ها توانست سرسبزی حاشیه کویر این استان را بیشتر کند و توانست بسیاری از نبکاها را که از بین رفته و یا رشد بسیار کمی داشتند دوباره توسعه بدهد و تراکم و بزرگی نبکاها را بیشتر کند. نبکاها علاوه بر اینکه از بارش‌ها به رشد خود استفاده می‌کنند به پخش و کنترل سیلاب نیز کمک می‌کنند که با کاهش جریانات سطحی باعث نفوذ آب به زمین شده و سفره‌های زیرزمینی را تغذیه می‌کنند. با توجه به داده‌های هواشناسی دما و بارش می‌توان گفت که در مناطقی که بارش‌ها می‌توانند زمین‌های پایین‌دست کوهستان‌ها را تغذیه کنند باعث ایجاد نبکاهای بزرگ و متراکمی می‌شوند که نمونه آن‌ها ارتفاعات شهداد است که در غرب لوت نبکاهای تیپیکی را ایجاد نموده و همچنین در قلعه گنج می‌توان متراکم‌ترین نبکاهای ایران را مشاهده نمود (شکل ۱۷).

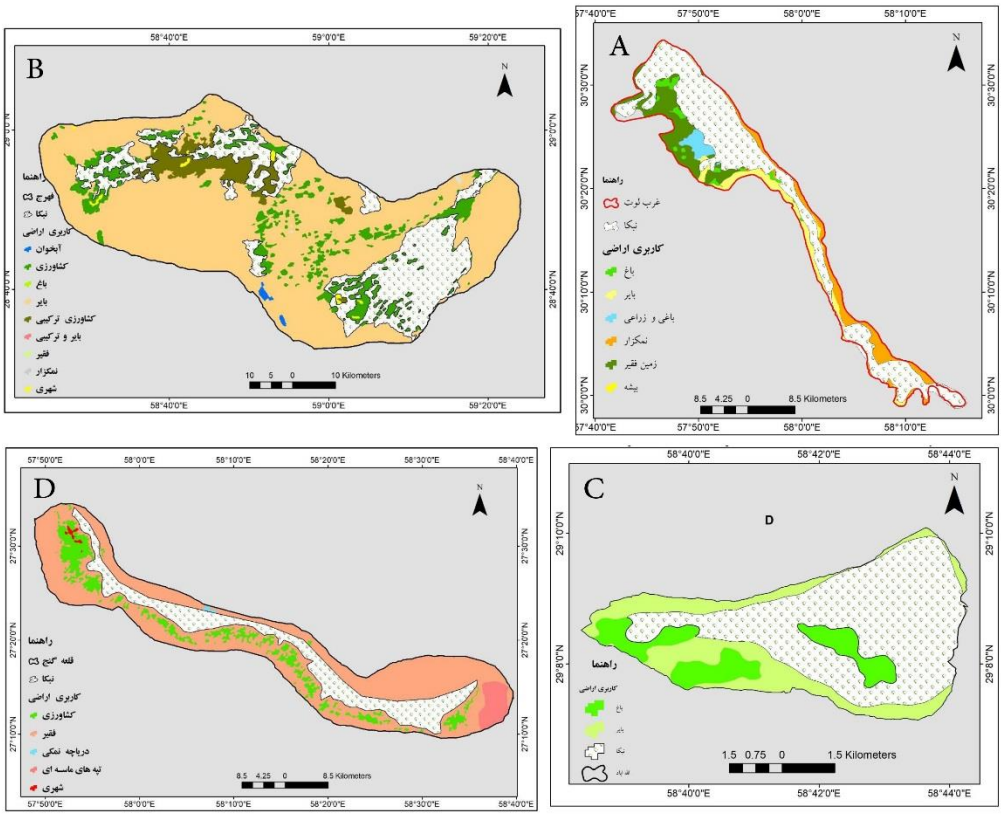


شکل ۱۷: وضعیت پراکندگی بارش و دما محدوده موردمطالعه

Fig. 17: Distribution patterns of precipitation and temperature in the study area

پوشش گیاهی و توسعه نبکا

ارتباط شاخص پوشش گیاهی و کاربری اراضی با نبکاها در مناطق خشک به عوامل مختلفی بستگی دارد که در شکل‌گیری و پایداری این ساختارها نقش دارند. گیاهان در مناطق خشک به‌عنوان یک مانع طبیعی عمل می‌کنند که باعث تجمع ماسه و خاک در اطراف خود می‌شوند و نبکاها را تشکیل می‌دهند. شاخص‌های پوشش گیاهی، مانند NDVI، می‌توانند میزان سلامت و تراکم پوشش گیاهی را اندازه‌گیری کنند. هرچه پوشش گیاهی متراکم‌تر و سالم‌تر باشد، احتمال تشکیل و پایداری نبکاها بیشتر است. پوشش گیاهی با کاهش فرسایش بادی و حفظ رطوبت خاک، به تثبیت و توسعه نبکاها کمک می‌کند. فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، چرای دام و توسعه شهری می‌توانند تأثیرات مثبتی یا منفی بر پوشش گیاهی و در نتیجه بر نبکاها داشته باشند. استفاده نادرست از زمین می‌تواند منجر به کاهش پوشش گیاهی و تخریب نبکاها شود. برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح کاربری اراضی می‌تواند به حفظ و تقویت پوشش گیاهی و نبکاها کمک کند. به عنوان مثال حفاظت از مناطق خاص یا کاهش چرای بی‌رویه می‌تواند به پایداری این ساختارها کمک کند. در مجموع، شاخص پوشش گیاهی و کاربری اراضی می‌توانند به‌عنوان ابزارهایی مؤثر در مدیریت و حفاظت از نبکاها در مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرند. تحلیل و درک بهتر این ارتباطات می‌تواند به حفظ تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم‌های خشک کمک کند. با توجه به داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ شاخص پوشش گیاهی NDVI استخراج گردید و بعد از اصلاحات و حذف خطاهای این شاخص بررسی‌های لازم در زمینه توسعه پوشش گیاهی انجام گرفت. با توجه به رویه رشد پوشش گیاهی با تطبیق بر تصاویر اپتیک منطقه از سال‌های گذشته نشان داد که نبکاها تعداد بیشتری پیدا کرده‌اند و توسعه یافته‌اند و همچنین با اتکا به این شاخص و تصاویر ماهواره‌ای پهنه‌بندی محدوده نبکاها انجام شد و مرزبندی این لندفرم در مناطق مورد مطالعه انجام گرفت (شکل ۱۸ A، B، C و D).



شکل ۱۸: A: وضعیت پراکندگی نبکاها بر روی کاربری اراضی غرب لوت، B: وضعیت پراکندگی نبکاها بر روی کاربری اراضی فهرج، C: وضعیت پراکندگی نبکاها بر روی کاربری اراضی الله‌آباد، D: وضعیت پراکندگی نبکاها بر روی کاربری اراضی گنج قلعه.

Fig. 18: A: Distribution pattern of nabkhas over land use in Western Lut, B: Distribution pattern of nabkhas over land use in Fahraj, C: Distribution pattern of nabkhas over land use in Allahabad, D: Distribution pattern of nabkhas over land use in Qaleh Ganj.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، نبکاها در مناطق موردمطالعه استان کرمان تحت‌تأثیر عوامل اقلیمی، ژئومورفولوژیکی و انسانی، الگوهای متفاوتی از رشد و تحول را تجربه کرده‌اند. تحلیل گلبادها نشان داد که ایستگاه شهداد با شاخص پتانسیل جابه‌جایی ماسه (DPt) معادل ۸۹۲/۹ بالاترین میزان فرسایش بادی را دارد. همچنین، نسبت RDP/DPt در ایستگاه کهنوج برابر با ۰/۸۹۹ محاسبه شد که نشان‌دهنده تمرکز بالای انرژی باد در یک‌جهت خاص و پتانسیل بالاتر برای شکل‌گیری نبکاهای منظم‌تر است. تصاویر ماهواره‌ای پردازش‌شده در نرم‌افزار ImageJ و با کمک برنامه‌نویسی پایتون نشان دادند که در برخی مناطق، نبکاها رشد و تراکم بیشتری یافته‌اند، در حالی که در نواحی دیگر به دلیل هجوم ماسه‌های روان، نبکاهای کوچک تخریب شده‌اند. همچنین، تحلیل داده‌های بارش ۲۰ ساله حاکی از آن است که افزایش بارش‌ها در سال‌های اخیر موجب گسترش پوشش گیاهی در حاشیه کویر شده که این عامل نقش مؤثری در تثبیت نبکاها داشته است. الگوهای مکانی شناسایی‌شده شامل الگوی خطی در بستر آبراهه‌ها و الگوی چتری در مخروط‌افکنه‌هاست که با نوع پوشش گیاهی و توزیع رسوبات همبستگی دارد. در مجموع، نتایج نشان داد که نبکاها علاوه بر آنکه شاخص‌های حساس محیطی‌اند، به‌عنوان ساختارهای تثبیت‌کننده ماسه و کاهنده فرسایش بادی، نقش کلیدی در پایداری بوم‌سازگان‌های بیابانی ایفا می‌کنند.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

References

Alavi Panah, S.K. et al, 2013. Morphometric analysis of nabkhas in the Shahdad region using satellite images and GIS. Journal of Geography and Development, v. 11(32), p. 45-60 (In Persian).

Cao, X., Li, J., Jiao, J., Bai, L., Wang, X., Chen, T. and Ma, X., 2024. The secret of nabkha development–From the inspective of surface wind erosion and sand accumulation, Catena, v. 24, 107992. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107992.

Dongxu, C., Shengyu, L. and Yaozhong, L., 2017. Morphological character- istics of shadow dunes of plant at dry lakebed of Taitema Lake. Arid Land Geography, v. 40(5), p.1020-1028.

Du, Y., Lu, R., Ma, L., Chen, D. and Liu, Y., 2024. The formation and development of nebkhas based on chronology and sedimentology in the Ordos Plateau, northern China (No. EGU24-5535). Copernicus Meetings.

Ebrahimi Meymand, S., Zandmoghadam, H., Khanebad, M., Mahboubi, A. and Hosseinyar, G., 2020.Sediment texture analysis and the impact of vegetation on nabkha hills in Shahdad, east of Kerman: An applied approach to their formation mechanisms. Geosciences Scientific Quarterly, v. 29(115), p. 27-38 (In Persian).

Fathi, F. et al, 2020. Evaluating the role of nabkhas in stabilizing mobile sand in Bam and Fahraj regions. Journal of Earth and Environmental Sciences, v. 12(3), p. 59-74 (In Persian).

Fryberger, S. and Dean, G., 1979. Dune forms and wind regime. In A Study of Global Sand Seas, E. McKee, Ed. Washington, U. S. Geological Survey Professional, v. 1052, p. 137-170.

Ghahroudi, M. et al, 2018. Mapping the potential of nabkha formation using climatic and geomorphological indicators (Case study: Western Lut Desert). Journal of Environmental Planning, v. 22(65), p. 101-120 (In Persian).

https://earthexplorer.usgs.gov.

https://globalwindatlas.info.

Huggett, R. and Shuttleworth, E., 2022. Fundamentals of geomorphology. Routledge.

Jafari, G.H. and Mohammadi, H., 2019. Investigating the chaotic behavior of geomorphological processes in the Qezel Owzan watershed. Geography and Environmental Hazards, v. 8(1), p. 1-23 (In Persian).

Khalaf, F.I., Al-Hurban, A.E. and Al-Awadhi, J., 2014. Morphology of protected and non-protected Nitraria retusa coastal nabkha in Kuwait, Arabian Gulf: a comparative study. Catena, v. 115, p. 115-122.

Khorasani, H. and Moradi, E., 2016. Temporal analysis of nabkha dynamics using satellite imagery: Case study of southern Shahdad. Journal of Applied Geographical Sciences, v. 19(52), p. 33-47 (In Persian).

Lang, L., Wang, X., Hasi, E. and Hua, T., 2013. Nebkha (coppice dune) formation and significance to environmental change reconstructions in arid and semiarid areas. Journal of Geographical Sciences, v. 23, p. 344-358.

Li, X., Yan, P. and Liu, B., 2020. Geomorphological classification of aeolian-fluvial interactions in the desert region of north China. Journal of Arid

Environments, v. 172, 104021. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2019.104021.

Luo, W., Zhao, W. and Liu, B., 2016. Growth stages affect species richness and vegetation patterns of nebkhas in the desert steppes of China. Catena, v. 137, p. 126-133.

Maghsoudi, M., Parizi, E. and Veisi, A., 2022. A comparative analysis of the eco-geomorphological characteristics of nabkhas in Sirjan and Shahr-e Babak. Geographical Studies of Arid Regions, v. 6(22), p. 104-120 (In Persian).

Mahmoudi, Z. and Karimi, S., 2021. The effect of climate and topography on nabkha distribution patterns in Rigan Plain. Journal of Natural Geography Research, v. 8(27), p. 88-102 (In Persian).

Parizi, E., Yamani, M., Mehrnia, S.R., Maghsoudi, M. and Hosseini, S.M., 2022.The effect of hydrogeological characteristics on nabkha morphometry (Case study: Chale Deranjir). Geographical Studies of Arid Regions, v. 8(30), p. 76-93 (In Persian).

Quets, J.J., El-Bana, M.I., Al-Rowaily, S.L., Assaeed, A.M., Temmerman, S. and Nijs, I., 2016. A mechanism of self-organization in a desert with phytogenic mounds. Ecosphere, v. 7(11), e01494.

Tengberg, A. and Chen, D., 1998. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso. Geomorphology, v. 22(2), p. 181-192.

Wang, X., Wang, T., Dong, Z., Liu, X. and Qian, G., 2006. Nebkha development and its significance to wind erosion and land degradation in semi-arid northern China. Journal of Arid Environments, v. 65(1), p.129-141.

Wang, Y., Li, S., Yi, S. and Xu, Z., 2024. Multiple age control of young nebkhas in the Mu Us dune field, north-central China. Quaternary Geochronology, v. 82, 101531.

Wei, Y., Guo, J, Dang, X., Yunhu, X., Wang, J., Li, X. and Wu, H., 2023. Morphological characteristics and influencing mechanisms of Nitraria tangutorum nebkhas at different sandy land types in desert oasis ecotone of Jilantai, Journal of Nanjing Forestry University, v. 47(5), 172 p.

Xue, D. and Yang, Y., 2023. Morphology, Distribution and Formation of the Nebkhas on Gobi and Desert in China. In Sand Dunes of the Northern Hemisphere, p. 152-162. CRC Press.

Yin, C., Shi, Q., Zhou, Y. and Zhang, K., 2023. Does the fertile island effect in tamarisk nebkhas enhance in the northern Tarim Basin in the context of global warming. Ecosphere, v. 14(10), e4666.

Zahabnazouri, S., Wigand, P.E. and Jabbari, A., 2021. Biogeomorphology of mega nebkha in the Fahraj Plain, Iran: Sensitive indicators of human activity and climate change. Aeolian research, v. 49, 100652.

Zhang, H., Li, S., Mason, J.A., Yizhaq, H., Gui, D. and Xu, Z., 2024. Biogeomorphological niche of a landform: Machine learning approaches reveal controls on the geographical distribution of Nitraria tangutorum nebkhas. Earth Surface Processes and Landforms, v. 49(5), p. 1515-1529.