



Quantitative Geomorphological Analysis of Sand Dunes Using UAV-based Aerial Mapping: A Case Study of Kalateh Mazinan, Razavi Khorasan Province

Mohammad Javad Yousefi¹, Mohsen Hosseinalizadeh² , Alireza Rashki³ , Ali Mohammadian Behbahani⁴ , Narges Kariminejad⁵ , Hamidreza Abbasi⁶

1. Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. **Email:** m.j.yousefi90@gmail.com
2. (Corresponding Author) Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. **Email:** mhalizadeh@gau.ac.ir
3. Department of Arid Zone and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. **Email:** a.rashki@um.ac.ir
4. Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. **Email:** mohammadian@gau.ac.ir
5. Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Iran. **Email:** narges.karimi.991@gmail.com
6. Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. **Email:** hamidabbasi9999@gmail.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

26 Nov 2025

Received in revised form:

16 Jan 2026

Accepted:

14 Mar 2026

pp.137-157

Keywords:

Sand dune dynamics,
Dimensional analysis of sand
dunes,
UAV
photogrammetry,
Temporal dune variations.

ABSTRACT

Sand dunes are among the most dynamic geomorphological landforms in arid and semi-arid regions. Investigating their spatial and temporal variations plays a crucial role in understanding aeolian erosion processes and effective land management. This study aimed to analyze the geometric and spatial changes of sand dunes in the Kalateh Mazinan area (Razavi Khorasan Province) between May 2022 and October 2024. Aerial mapping was conducted using a Phantom UAV, and the collected data were processed in Agisoft Metashape and Pix4D software to generate Digital Elevation Models (DEMs) and orthomosaic imagery. Within a GIS environment, several morphometric indices were extracted for five representative dunes, including precise location, perimeter, area, mean and maximum elevation, slope, windward and leeward arm lengths, major and minor arm dimensions, volume, and perimeter-to-area ratio. Furthermore, the spatial displacement of each dune was quantified by analyzing the shift in three key points over the 30-month interval. The results revealed that dune displacement ranged from 9.47 to 27.76 meters, with an overall mean displacement of 20.57 meters. Geometric modifications, particularly the extension of the windward arm, were consistent with the prevailing wind direction (northwest to southeast). In some instances, dune coalescence and significant changes in geomorphological structure were observed. These findings highlight the high degree of dune mobility in the study area and underscore the influence of aeolian processes on their evolution and positioning, providing valuable insights for future predictive modeling and environmental planning.

Cite this article: Yousefi M. J., Hosseinalizadeh M., Rashki A. R., Mohammadian Behbahani A., Kariminejad N., Abbasi H.R. (2026). Quantitative Geomorphological Analysis of Sand Dunes Using UAV-based Aerial Mapping: A Case Study of Kalateh Mazinan, Razavi Khorasan Province. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(4). 137-157.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.546502.1580](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.546502.1580)

Extended Abstract

Introduction

Sand dunes, especially barchan dunes, represent some of the most visually striking and dynamically responsive landforms in Earth's arid and semi-arid landscapes. Characterized by their crescentic shape, sharp horns, and steep slip faces, barchan dunes form under conditions of limited sand supply and unidirectional wind regimes. Their mobility and morphological plasticity make them sensitive indicators of environmental change, serving as natural recorders of wind patterns, sediment availability, and surface roughness. In regions such as the Kalateh Mazinan area in northeastern Iran — situated within the expansive arid belt of Razavi Khorasan Province — barchan dunes are not merely passive features but active agents of landscape transformation. Monitoring their behavior is critical not only for advancing fundamental geomorphological knowledge but also for practical applications including desertification control, infrastructure planning, agricultural zoning, and ecological conservation.

Despite their significance, comprehensive, high-resolution spatiotemporal analyses of barchan dune dynamics in Iran — and particularly in the Kalateh Mazinan region — remain scarce. Most previous studies have relied on coarse-resolution satellite imagery or infrequent field surveys, which often fail to capture the subtle yet critical micro-scale changes in dune morphology and position. This study addresses this gap by employing cutting-edge unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry to generate precise, time-series digital elevation models (DEMs) and orthophotos, enabling detailed quantification of dune migration and structural evolution over a 29-month interval (May 2022 to October 2024).

Methodology

The methodological framework of this research integrates advanced remote sensing techniques with classical geomorphometric analysis. Two high-resolution aerial surveys were conducted using a DJI Phantom 4 Pro

drone, capturing overlapping nadir and oblique imagery under optimal lighting and wind conditions to minimize motion blur and shadowing. The imagery was processed using industry-standard photogrammetric software — Agisoft Metashape and Pix4Dmapper — to reconstruct 3D point clouds, orthomosaics, and DEMs with centimeter-level accuracy. Five morphologically distinct barchan dunes were selected as representative samples based on their spatial distribution, isolation from neighboring features, and clarity of form. For each dune, a suite of 12 quantitative parameters was extracted: planimetric area, perimeter, mean and maximum elevation, volume, windward and leeward slope angles, lengths of both horns (arms), inter-arm width, and crestline orientation. Crucially, displacement was measured by tracking three fiducial points — the tips of the windward and leeward arms, and the apex of the crest — across the two epochs. The arithmetic mean of these three displacement vectors was taken as the representative migration distance for each dune.

Results and discussion

Results indicate a wide spectrum of dune mobility and morphological response. Total displacement ranged from 9.47 meters (Dune 5) to 27.76 meters (Dune 4), yielding a regional average migration rate of 20.57 meters over the study period — equivalent to approximately 8.5 meters per year. Dunes 1, 2, and 3 exhibited moderate volumetric growth (ranging from +3% to +7%) and elongation along the dominant northwest–southeast axis, suggesting sediment accumulation and forward propagation under consistent wind forcing. Dune 4, the most mobile feature, displayed morphological signs of coalescence with a neighboring dune, including flattening of the inter-dune depression and merging of slip faces — a phenomenon indicative of dune field maturation and potential transition toward transverse or barchanoid ridge forms. In contrast, Dune 5 remained relatively static, with minimal displacement and

unchanged volume, possibly due to local topographic sheltering, higher soil moisture retention, or the presence of sparse vegetation anchoring the surface sediment. Correlation analysis revealed that displacement rate was positively associated with initial dune volume and windward arm length in three of the five dunes, aligning with theoretical models that link dune size to mobility under constant wind stress. However, Dune 5's anomalous behavior — large size yet low mobility — underscores the influence of localized environmental controls, such as microtopography, sediment cohesion, or anthropogenic barriers. Slope asymmetry (steeper leeward faces) was consistent across all dunes and aligned with the regional wind regime, further validating the unidirectionality of aeolian transport in the study area. The discussion contextualizes these findings within broader aeolian geomorphology literature. The observed migration rates fall within the expected range for mid-latitude desert dunes under moderate wind regimes (cf. Baddock et al., 2011; Zhang et al., 2020). The detection of dune merging processes adds empirical support to conceptual models of dune field evolution, wherein isolated barchans progressively interact, coalesce, and reorganize into more complex morphologies. Methodologically, this study demonstrates that UAV-based photogrammetry offers unparalleled spatial and temporal resolution compared to traditional techniques, enabling detection of sub-meter-scale changes and facilitating process-based interpretation rather than mere descriptive mapping.

Conclusion

In conclusion, this research provides a robust, replicable framework for monitoring barchan dune dynamics using low-cost, high-efficiency UAV platforms. The findings confirm the dominant control of regional wind patterns on dune form and migration in Kalateh Mazinan, while also highlighting the modulating role of local factors. These insights are vital for predictive modeling of desert landscape evolution and for designing targeted interventions to mitigate dune encroachment

on human settlements and agricultural lands. Future research should expand the temporal scope of monitoring, integrate in-situ meteorological data (particularly wind speed and direction), and explore seasonal variations in dune activity to build more comprehensive predictive models under scenarios of climatic variability and land-use change.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

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

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

تحلیل ژئومورفولوژی کمی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از نقشه برداری هوایی پهپاد (مطالعه موردی: کلاته مزینان، استان خراسان رضوی)

محمدجواد یوسفی^۱، محسن حسینعلی‌زاده^۲، علیرضا راشکی^۳، علی محمدیان بهبهانی^۴، نرگس کریمی‌نژاد^۵، حمید عباسی^۶

۱- گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: m.j.yoosefi90@gmail.com

۲- گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: mhalizadeh@gu.ac.ir

۳- گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد، ایران. رایانامه: a.rashki@um.ac.ir

۴- گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: mohammadian@gu.ac.ir

۵- بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران. رایانامه: narges.karimi.991@gmail.com

۶- بخش تحقیقات بیابان، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران.

رایانامه: hamidabbasi9999@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۹/۰۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۲/۲۳

صص. ۱۳۶-۱۱۷

واژگان کلیدی:

پویایی تپه‌های ماسه‌ای

آنالیز ابعادی تپه‌های ماسه‌ای

فتوگرامتری پهپاد

تغییرات زمانی تپه‌های ماسه‌ای.

تپه‌های ماسه‌ای از پویاترین اشکال ژئومورفولوژیک مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌روند که مطالعه تغییرات مکانی و زمانی آن‌ها نقش مهمی در شناخت فرآیندهای فرسایش بادی و مدیریت سرزمین دارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل تغییرات هندسی و مکانی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه کلاته مزینان (خراسان رضوی) در دو بازه زمانی اردیبهشت ۱۴۰۱ و مهر ۱۴۰۳ انجام شد. برای این منظور، نقشه‌برداری هوایی با استفاده از پهپاد فانتوم انجام شده و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Agisoft Pix4D و Metashape پردازش و مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) و تصویر ارتوفتو تهیه شد. سپس با در محیط GIS، شاخص‌هایی نظیر موقعیت دقیق، محیط، مساحت، ارتفاع متوسط، حداکثر ارتفاع، شیب و طول بازوهای رو به باد و پشت به باد، اندازه بازوهای بزرگ و کوچک، حجم، و نسبت محیط به مساحت برای پنج تپه شاخص از محدوده مورد مطالعه استخراج شد. همچنین میزان جابه‌جایی مکانی هر تپه با تحلیل موقعیت سه نقطه کلیدی (راس و دو بازو) بین دو دوره زمانی (تقریباً ۳۰ ماهه) محاسبه شد. نتایج نشان داد که میزان جابه‌جایی تپه‌ها بین ۹/۴۷ تا ۲۷/۷۶ متر و میانگین کلی ۳۰ ماهه برابر با ۲۰/۵۷ متر بوده است (ماهانه بیش از نیم متر). همچنین، تپه‌هایی با سطح مقطع کشیده‌تر و بازوی بزرگ‌تر، جابه‌جایی بیشتری را تجربه کرده‌اند (حدود ۲۷ متر). تغییرات هندسی، به‌ویژه رشد طول بازوی رو به باد، با جهت غالب باد (شمال‌غرب به جنوب‌شرق) مطابقت داشته و در برخی موارد، ادغام تپه‌ها و تغییر ساختار ژئومورفولوژیک آن‌ها مشاهده شد. این یافته‌ها نشان‌دهنده پویایی بالای تپه‌های ماسه‌ای منطقه و تأثیر عوامل بادی در تحول فرم و موقعیت آن‌هاست و می‌تواند در مدل‌سازی تغییرات آینده و برنامه‌ریزی محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: یوسفی، محمدجواد، حسینعلی‌زاده، محسن، راشکی، علیرضا، محمدیان بهبهانی، علی، کریمی‌نژاد، نرگس و عباسی، حمیدرضا. (۱۴۰۵). تحلیل

ژئومورفولوژی کمی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از نقشه‌برداری هوایی پهپاد (مطالعه موردی: کلاته مزینان، استان خراسان رضوی). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی،

Doi: 10.22034/gmpj.2026.546502.1580

۱۴(۴)، ۱۵۷-۱۳۷.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تپه‌های ماسه‌ای به عنوان مهمترین برایندهای بادی همواره در حال حرکت و جابجایی هستند که مقدار این حرکت ناشی از جهت و شدت باد، توپوگرافی محل، رطوبت منطقه، پوشش گیاهی، سازندهای ریزدانه و فعالیتهای انسانی است (آرامش و همکاران، ۱۴۰۲). این تپه‌ها به طور مداوم به رژیم‌های باد، تأمین رسوب و تغییرات اقلیمی واکنش نشان می‌دهند و مطالعه مورفولوژی و تکامل مکانی-زمانی آن‌ها، اطلاعات ارزشمندی درباره فرآیندهای بیابان‌زایی، تغییرات سطح زمین و حساسیت بوم‌سازگان به تغییر ارائه می‌دهد (آندریو^۱ و همکاران، ۲۰۰۲؛ هاگن‌هالتز^۲ و همکاران، ۲۰۱۲؛ کوک^۳ و همکاران، ۲۰۰۲). اندازه‌گیری دقیق نرخ حرکت ماسه در تپه‌های ماسه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تغییرات سریع و نامنظم این لندفرم‌ها می‌تواند منجر به گسترش بیابان‌زایی، تهدید زیرساخت‌های انسانی، کاهش حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی و آسیب به بوم‌سازگان محلی شود (سیف و موسوی، ۱۳۹۱). پایش این نرخ‌ها، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، برای پیش‌بینی روندهای زیست‌محیطی و اتخاذ تدابیر مدیریتی مؤثر ضروری است. بنابراین، توسعه روش‌های دقیق و کارآمد برای ثبت و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی تپه‌های ماسه‌ای، از اولویتهای پژوهشی در حوزه ژئومورفولوژی محیط‌های خشک محسوب می‌شود. کمی‌سازی دقیق مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای برای درک فرآیندهای انتقال رسوب و مدیریت مؤثر مناظر خشک ضروری است (گروتولی^۴ و همکاران، ۲۰۲۱؛ گانکالوز^۵ و هنریکوز^۶، ۲۰۱۵). به‌ویژه مطالعات اخیر نشان داده‌اند که هیدرودینامیک زیرسطحی نیز می‌تواند در شکل‌گیری شکاف‌های تپه‌ای و پایداری آن‌ها نقش داشته باشد (باند^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). روش‌های سنتی برای تجزیه و تحلیل تغییرات تپه‌های ماسه‌ای، مانند بررسی‌های زمینی و عکاسی هوایی، اغلب به دلیل محدودیت در وضوح و فراوانی، قادر به ثبت تحولات مورفولوژیکی ظریف نیستند (جمز^۸ و همکاران، ۲۰۱۷؛ الترن^۹ و همکاران، ۲۰۱۵). در سال‌های اخیر، پهپادها (UAV) همراه با فتوگرامتری ساختار از حرکت (SfM) به عنوان ابزارهای قدرتمندی برای تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) و ارتوفتوهای با وضوح بالا معرفی شده‌اند که امکان تجزیه و تحلیل دقیق مکانی-زمانی ویژگی‌های سطحی را فراهم می‌کنند (روتینیکا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰؛ گروهمن^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰). مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) به ابزارهای ضروری در تحلیل ژئومورفومتری تبدیل شده‌اند که داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا را برای بررسی دقیق ویژگی‌های چشم‌انداز فراهم می‌کنند (رضایی عارفی و همکاران، ۱۴۰۴). مطالعاتی مانند پارادانوف^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از ترکیب UAV، GIS و داده‌های زیست‌محیطی، شیوه‌ای یکپارچه برای پایش تپه‌های ساحلی ارائه کرده‌اند که کاربرد آن برای مناطق داخلی نیز قابل تعمیم است. یکی از رویکردهای مؤثر در تعیین کمیت تغییرات توپوگرافی در طول زمان، شاخص DoD^{۱۳} است که امکان تشخیص تغییرات

¹ Andrews

² Hugenholtz

³ Kok

⁴ Grottoli

⁵ Gancalves

⁶ Henriques

⁷ Bond

⁸ James

⁹ Eltner

¹⁰ Rornicka

¹¹ Grohmann

¹² Prodanov

¹³ DEM of Difference

حجمی و ارتفاعی بین بازه‌های زمانی مورد مطالعه را فراهم می‌کند (ولنگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۵؛ سولازو^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). تجزیه و تحلیل DoD که در مورد تپه‌های ماسه‌ای اعمال می‌شود، الگوهای فرسایش و رسوب، تغییرات طول بازو و نوسانات ارتفاع – که شاخص‌های شدت فرآیندهای بادی هستند – را آشکار می‌سازد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، پژوهش‌های اخیر حاکی از آن است که مهاجرت تپه‌های ماسه‌ای نه تنها به باد، بلکه به نوسانات اقلیمی میان مدت و الگوهای فصلی نیز مرتبط است (دوران^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، با ادغام معیارهای مکانی مانند مساحت، محیط، شیب و ارتفاع، محققان می‌توانند تکامل ژئومورفولوژیکی را به صورت کمی ارزیابی کنند (کروز^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). اگرچه مطالعات متعددی به سیستم‌های ساحلی یا تپه‌های غول‌آسا پرداخته‌اند، تحقیقات محدودی بر روی تپه‌های ماسه‌ای کوچک داخلی با استفاده از بررسی‌های چندزمانه پهباد متمرکز شده‌اند (بورچی^۵ و تئورکاف^۶، ۲۰۲۴). پیشرفت‌های اخیر در پردازش تصویر و فیلترهای توپوگرافی، دقت DEM^۷ را حتی در محیط‌های دارای پوشش گیاهی یا با کنتراست کم بهبود بخشیده‌اند (گروهمن و همکاران، ۲۰۲۰؛ التتر و همکاران، ۲۰۱۵) و دامنه کاربرد این فناوری‌ها را گسترش داده‌اند. با وجود اهمیت بالای این موضوع، مطالعات دقیق و کمی درباره دینامیک تپه‌های ماسه‌ای در ایران، به‌ویژه با استفاده از داده‌های چندزمانه پهبادی، بسیار محدود است. اغلب پژوهش‌های داخلی بر توصیف اشکال و نقشه‌برداری ایستا متمرکز بوده‌اند و کمتر از فناوری‌هایی چون SfM، تحلیل حجمی دقیق، یا بررسی تغییرات مکانی در بازه‌های زمانی مشخص بهره گرفته‌اند. نبود داده‌های دقیق ژئورفرنس شده، کمبود استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی با تفکیک‌پذیری بالا، و تمرکز اندک بر تپه‌های داخلی کوچک، از جمله خلأهایی هستند که پژوهش حاضر تلاش دارد آن‌ها را پوشش دهد.

این مطالعه با هدف انجام تجزیه و تحلیل کمی ژئومورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای کوچک در اراضی ماسه‌ای جنوب روستای کلاته مزینان، با استفاده از دو مرحله نقشه‌برداری پهباد در سال‌های مختلف انجام شده است. در این مسیر، از DEM‌های مشتق‌شده از SfM و تحلیل معیارهای مکانی برای ارزیابی تغییرات مورفولوژیکی زمانی استفاده گردید. هدف نهایی، درک بهتر فرآیندهای بادی محلی و پیشنهاد یک گردش کار عملی و مقرون‌به‌صرفه برای پایش دقیق تپه‌های ماسه‌ای با بهره‌گیری از فناوری پهباد است. در شرایطی که خطر بیابان‌زایی در مناطق خشک ایران رو به افزایش است، چنین روش‌هایی می‌توانند بینش‌های عملی و ابزارهای مؤثری برای مدیریت پایدار زمین فراهم کنند (ولنگ و همکاران، ۲۰۲۵).

مواد و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه:

منطقه مطالعه‌شده در این تحقیق، شامل بخش‌هایی از دشت کلاته مزینان در استان خراسان رضوی است. این ناحیه در جنوب شهرستان داورزن و بین مختصات جغرافیایی ۳۶° ۴' ۱" تا ۳۶° ۴' ۴۴" شمالی و ۵۶° ۴۷' ۱۶" تا ۵۶° ۴۷' ۱۵" شرقی قرار دارد و وسعت تقریبی آن ۹ کیلومتر مربع برآورد شده است (شکل ۱). این منطقه در زون زمین‌شناسی کپه‌داغ

¹ Wang

² Solazzo

³ Durand

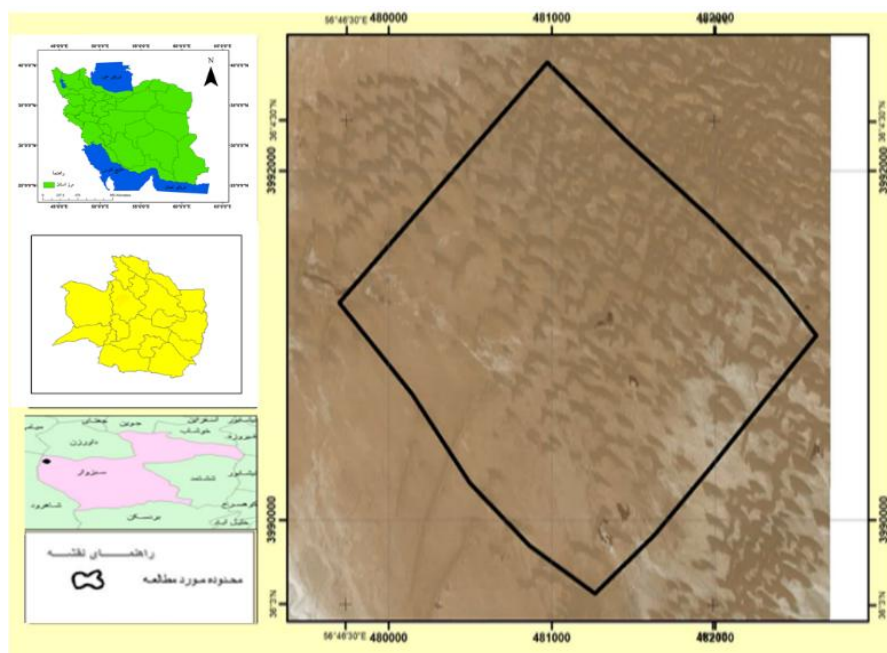
⁴ Cruz

⁵ Burchi

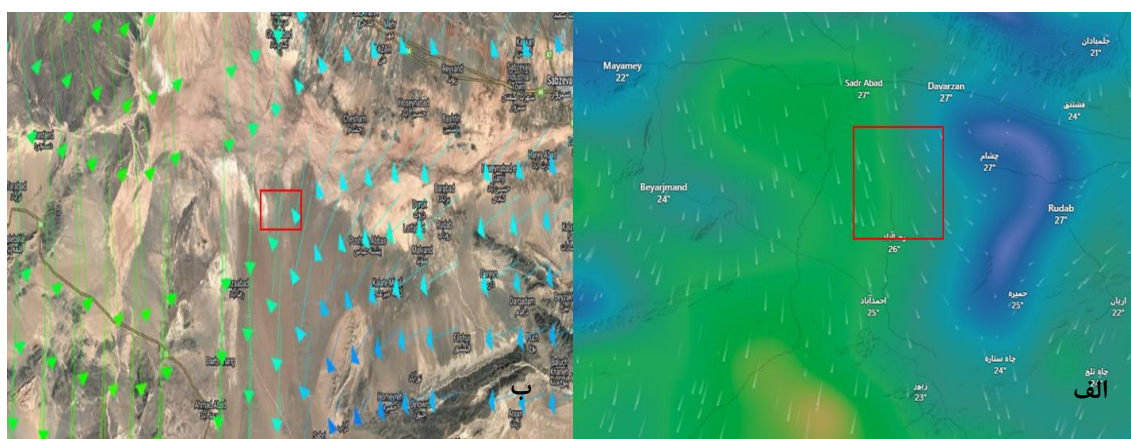
⁶ Theuerkauf

⁷ Digital Elevation Model

جنوبی جای گرفته و سطح آن را عمدتاً رسوبات آبرفتی کواترنری و نهشته‌های بادی تشکیل می‌دهند (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۳). فرم‌های تپه‌ای موجود ساختارهایی از نوع بارخان (هلالی) و طولی هستند که با جهت غالب باد، یعنی از شمال غربی به جنوب شرقی (شکل شماره ۲)، هم‌راستا هستند. اقلیم منطقه خشک و بیابانی است؛ میانگین بارندگی سالیانه کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه حدود ۱۶ °C می‌باشد. بر اساس بررسی‌های اقلیمی و تحلیل الگوی باد منطقه‌ای، مانند باد شمل و باد صحرایی غالب در شرق و شمال شرق ایران، جریان‌های غالب باد منطقه از نواحی شمال غربی به جنوب شرقی جهت‌گیری و ماسه‌برداری می‌کند. این رژیم بادی سبب شکل‌گیری مورفولوژی مشخصی در جهت‌گیری و مهاجرت تپه‌ها شده است (راهداری^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعه پیشین نگارنده (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۳) نشان داد پراکندگی فضایی تپه‌ها به صورت خوشه‌ای و جهت‌گیری آن‌ها منظم است؛ همچنین روابط بین محل قرارگیری تپه‌ها و منابع تامین ماسه (مانند تخت‌های آبرفتی بالادست و مناطق خشک) بررسی شده که به فهم بهتر پویایی سیستم تپه‌ای کمک می‌نماید.



شکل ۱. تصویر و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. جهت جریان باد در منطقه: (الف) تصویر گرفته شده از سایت windy، (ب) برگرفته شده از داده‌های سایت ERA5

¹ Rahdari

ب) روش تحقیق

داده‌برداری پهپادی^۱ در دو مرحله تصویربرداری هوایی با پهپاد DJI Phantom 4 Pro (دوربین FC6310 با رزولوشن ۲۰~ مگاپیکسل) انجام شد. مرحله نخست در اردیبهشت ۱۴۰۱ و مرحله‌ی دوم در مهر ۱۴۰۳ اجرا گردید. ارتفاع پرواز ۱۰۰~ متر تنظیم شد تا GSD^2 حدود ۵ تا ۱۰ cm/pix حاصل شود، مقداری که در مطالعات مشابه دقت قابل قبولی برای تعیین تغییرات حجم و مورفومتری ارائه داده است. (لاپورت^۳ و همکاران، ۲۰۲۰، وردازکو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰، فائلگا^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). نقاط کنترل زمینی (شکل ۳) (GCP^6) با استفاده از GNSS RTK مشخص شدند تا دقت ارتفاعی و مکانی مدل‌ها افزایش یابد. این روش دقت مدل‌سازی را تا حدود $2-3 \pm$ سانتی‌متر بهبود می‌دهد، همان‌گونه که در مطالعات مشابه گزارش شده است (کرادو و همکاران، ۲۰۲۱، لوپچینی^۷ و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که موقعیت‌یابی RTK روی پهپاد، در مواردی می‌تواند دقت قابل قبولی حتی بدون استفاده از GCP ‌ها فراهم کند (ایکاسو^۸ و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر این، به‌منظور کاهش اثرهای تحریف هندسی از جمله اثر کاسه‌ای^۹ در پردازش مدل‌های سه‌بعدی، برخی راهبردهای بهینه‌سازی هندسی از جمله افزایش پوشش عرضی و طولی و توزیع هدفمند نقاط کنترل مطابق پیشنهادات آیتلامالام^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۵) به‌کار گرفته شد.



شکل ۳: نمونه‌هایی از GCP ‌های نصب شده در منطقه مورد مطالعه

پردازش اولیه تصاویر^{۱۱}

داده‌ها با استفاده از Agisoft Metashape پردازش شدند. مراحل شامل:

- ¹ UAV Data Acquisition
- ² Ground Sampling Distance
- ³ Laporte
- ⁴ Verduzco
- ⁵ Faelga
- ⁶ Ground Control Point
- ⁷ Luppichini
- ⁸ Ekaso
- ⁹ Bowl Effect
- ¹⁰ Ait-Lamallam
- ¹¹ Photogrammetric Processing

هم‌ترازی تصاویر و تولید^۱، تولید ابر نقاط متراکم^۲، ساخت شبکه مش سه‌بعدی^۳، تولید مدل سطحی^۴، و سپس مدل رقومی ارتفاع (DEM)، تولید نقشه ارتوفتو^۵ با کیفیت بالا مطابق استاندارد (جاورنیک و همکاران، ۲۰۱۵، اسمیت و همکاران، ۲۰۱۴، آیتلامالام و همکاران، ۲۰۲۵) همکاران، ۲۰۲۵) RMSE نقاط کنترلی در مدل‌های خروجی پس از زمین مرجع کردن با GCPها، حدود ۱ تا ۳ سانتیمتر اندازه‌گیری شد (لوپچینی و همکاران، ۲۰۲۵).

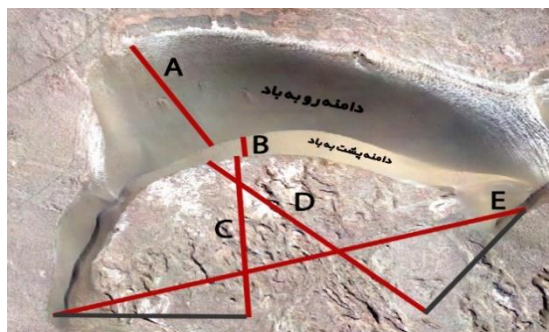
استخراج شاخص‌های مورفومتری^۶

برای هر تپه ماسه‌ای در دو دوره زمانی موردنظر، شاخص‌های زیر محاسبه و تحلیل شدند: مرکز مکانی (مختصات X, Y) - مساحت - محیط - نسبت محیط به مساحت که بازتاب‌دهنده پیچیدگی فرم سطحی است - ارتفاع میانگین و حداکثر - شیب رو به باد و پشت به باد طول یال‌ها طول بازوی کوچک و بزرگ و فاصله بین آن‌ها حجم تپه بر پایه DoD (شکل ۴).

پارامترها بر اساس استانداردهای مطالعات مشابه (سولازو و همکاران، ۲۰۱۸، فائلگا و همکاران، ۲۰۲۳) استخراج و با داده‌های DEM و ارتوفتو مقایسه شدند.

تحلیل تغییرات ارتفاعی با DoD

با تفاضل دو DEM حاصل از پرواز ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳، اختلاف حجم محاسبه شد که نشان‌دهنده تغییر حجم تپه‌های مورد مطالعه بود. این روش دقیق در مطالعات کاربردی مشابه برای پایش تپه‌ها با $RMSE < 0.1 \text{ m}$ استفاده شده است (گروهمن و همکاران، ۲۰۲۰، فائلگا و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۴: شاخص‌های بررسی شده برای تپه‌های ماسه‌ای (A) طول دامنه رو به باد (B) طول دامنه پشت به باد (C) طول بازوی کوچک (D) طول بازوی بزرگ (E) فاصله دو بازو

تحلیل مکانی و آماری

¹ Sparse Point Cloud

² Dense Point Cloud

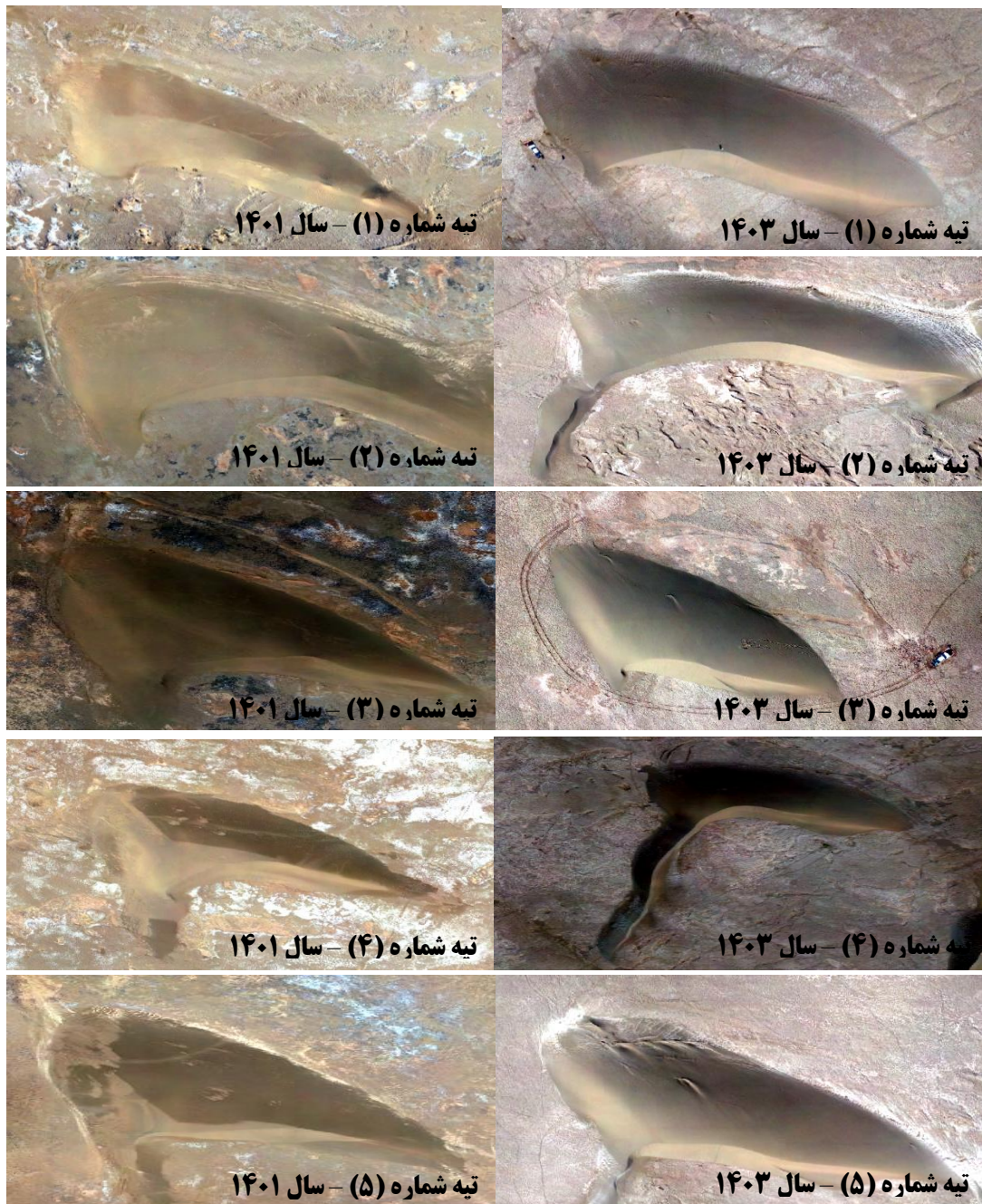
³ Mesh

⁴ DSM

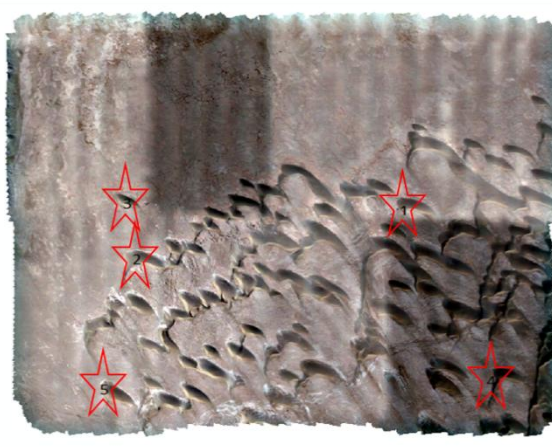
⁵ Orthomosaic

⁶ Morphometric Indices

پردازش‌های مکانی و مصورسازی نقشه‌ها در محیط *ArcGIS* انجام شد. تحلیل‌های آماری شامل بررسی تغییرات حجمی تپه‌ها، شاخص نسبت فرم، تغییرات شیب، و میزان مهاجرت افقی استخراج شده از موقعیت مرکز و طول بازوها بودند. با توجه به ادغام و تحول برخی تپه‌های ماسه‌ای در بازه بیش از دو سال، برای تحلیل دقیق‌تر، ۵ تپه‌ی نماینده از مناطق مختلف منطقه‌ی مورد مطالعه با پراکنش مکانی مناسب انتخاب شدند (شکل‌های ۵و۶). معیار انتخاب، وضوح شکل، تفکیک‌پذیری بالا و ثبت کامل در هر دو تصویر زمانی بوده است. تحلیل‌های بعدی بر اساس این نمونه‌ها انجام شد.



شکل ۵: تپه‌های ماسه‌ای منتخب برای بررسی شاخص‌های مورد مطالعه در پرواز اول و دوم



شکل ۶: تپه‌های ماسه‌ای منتخب برای بررسی شاخص‌های مورد مطالعه

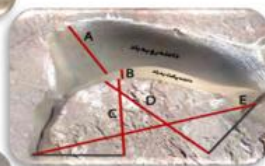
شکل ۷ نمودار جریانی پژوهش را نشان می‌دهد.

نصب و ثبت نقاط کنترل زمینی



تصویربرداری هوایی اول منطقه

بررسی شاخص‌های ژئومورفولوژی اشکال ماسه‌ای



تصویربرداری هوایی دوم منطقه

تولید ارتفاع و مدل ارتفاع دیجیتال



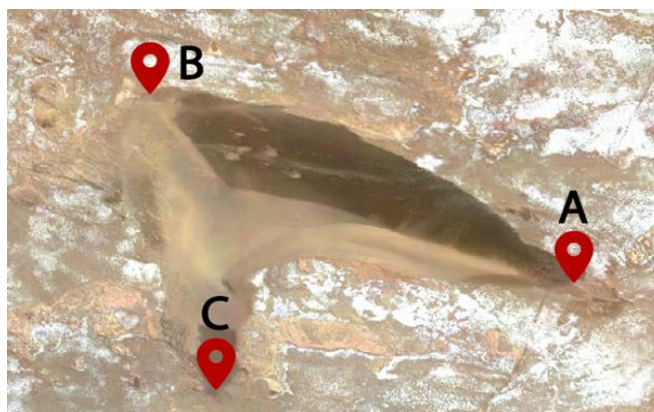
محاسبه DOD و تغییرات شاخص‌های بررسی شده

تحلیل و نتیجه‌گیری نهایی



شکل ۷: نمودار جریانی مراحل اجرایی تحقیق حاضر

به‌منظور سنجش میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای، از مقایسه موقعیت مکانی سه نقطه‌ی شاخص در هر تپه در بازه‌ی زمانی دو پرواز (اردیبهشت ۱۴۰۱ و مهر ۱۴۰۳) بهره‌گیری شد. این نقاط شامل راس تپه، انتهای بازوی بزرگ، و انتهای بازوی کوچک (شکل ۸) بودند که با دقت بالا در نقشه‌های ارتوفتو استخراج شده و موقعیت دقیق آن‌ها در هر دوره زمانی در محیط GIS برداشت گردید. برای هر تپه، فاصله بین نقاط هم‌نام در دو زمان مختلف با استفاده از ابزار اندازه‌گیری خطی در GIS محاسبه شد. سپس، میانگین فاصله‌ی سه نقطه به‌عنوان نمایه‌ای از میزان جابه‌جایی هر تپه در نظر گرفته شد. در گام نهایی، برای ارائه یک نمای کلی از رفتار حرکتی کل منطقه، میانگین جابه‌جایی پنج تپه منتخب به‌عنوان مقدار نهایی جابه‌جایی منطقه محاسبه شد. این روش، علاوه بر سادگی و دقت، امکان ردیابی رفتار غیرمتقارن یا چرخشی تپه‌ها را نیز فراهم می‌سازد (مطابق با رویکردهایی مشابه در مطالعات: یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱).



شکل ۸: نقاط مورد بررسی جهت تعیین میزان جابه‌جایی تپه ماسه‌ای

ج) یافته‌ها:

در شکل ۹ تصویری از ارتوفتوهای حاصل از دو پرواز ارائه شده است (محاسبه برخی از شاخص‌ها مانند اندازه طول بازوها، فاصله بین بازوها و ... بر اساس تصویر ارتوفتو صورت پذیرفت):

¹ Yang

ارتوفتوی تصویربرداری اول - 1401



ارتوفتوی تصویربرداری دوم - 1403



شکل ۹: ارتوفتوی حاصل تصویربرداری اول و دوم از منطقه مورد مطالعه

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی تپه‌ی شماره ۱ در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است همچنین تصویری از میزان جابه‌جایی این تپه نمایش داده شده است (شکل ۱۰):



شکل ۱۰: تصویری از میزان جابه‌جایی تپه شماره ۱ بین سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳

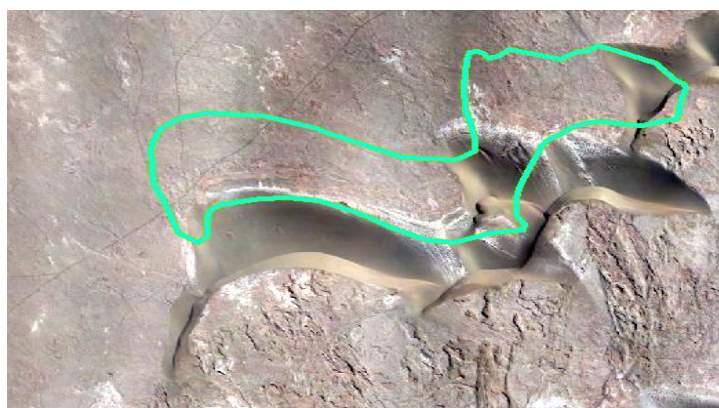
جدول ۱: بررسی شاخص‌ها مورفولوژی تپه شماره ۱

شاخص	مقدار در سال ۱۴۰۱	مقدار در سال ۱۴۰۳	تغییر (Δ)
محیط (m)	۳۲۰/۰۷	۲۸۴/۸۶	-۳۵/۲۱
مساحت (m ²)	۴۴۶۴/۹۷	۳۸۷۱/۰۱	-۵۹۳/۹۶
نسبت محیط به مساحت	۰/۷۲	۰/۷۳	-۰/۶۴۷
ارتفاع (m)	۲۰/۶۲	۷/۳۱	-۱۳/۳۱
شیب رو به باد (%)	۲۶۶/۴۹	۶۶/۱۱	-۲۰۰/۳۸
شیب پشت به باد (%)	۵۰/۳۲	۱۱۹/۹۲	۶۹/۶
حجم (m ³)	۶۰۳۶۶/۳۸	۱۳۸۹۶/۹۵	-۴۶۴۶۹/۴
طول دامنه رو به باد (m)	۵۴/۱۹	۲۶/۸۷	-۲۷/۳۲
طول دامنه پشت به باد (m)	۹/۶۳	۸/۵۹	-۱/۰۴
طول بازوی کوچک (m)	۷/۸۳	۷/۳۲	-۰/۵۱
طول بازوی بزرگ (m)	۸۴/۶۲	۷۴/۵۹	-۱۰/۰۳
فاصله بین دو بازو (m)	۱۰۴/۴۶	۶۷/۰۶	-۳۷/۴

جدول ۲: بررسی میزان جابه‌جایی تپه شماره ۱

شماره تپه	میزان جابه‌جایی بازوی راست (m)	میزان جابه‌جایی راس تپه (m)	میزان جابه‌جایی بازوی چپ (m)	میانگین جابه‌جایی (m)
۱	۱۹/۹۷	۲۳/۰۱	۲۰/۴۷	۲۱/۱۵

تپه شماره ۱ دارای مساحت نسبتاً متوسطی در بین تپه‌هاست و حجم قابل توجهی از ماسه را شامل می‌شود. میانگین ارتفاع آن در هر دو زمان (۱۴۰۱ و ۱۴۰۳) کاهش یافته است. شاخص طول بازوی بزرگ در این تپه نسبت به بازوی کوچک بسیار بیشتر بوده که نشان‌دهنده جهت‌گیری تپه در راستای باد غالب است. میزان جابه‌جایی نقاط کلیدی (میانگین ۲۱/۱۵ متر) در دو سال، حرکت متوسطی را نشان می‌دهد که بیانگر پویایی نه‌چندان شدید در این تپه نسبت به برخی دیگر است. نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی تپه‌ی شماره ۲ در جداول ۳ و ۴ آمده است، میزان جابه‌جایی این تپه نیز در تصویر ۱۱ آمده است:



شکل ۱۱: تصویری از میزان جابه‌جایی تپه شماره ۲ بین سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳

جدول ۳: بررسی شاخص‌های مورفولوژی تپه شماره ۲

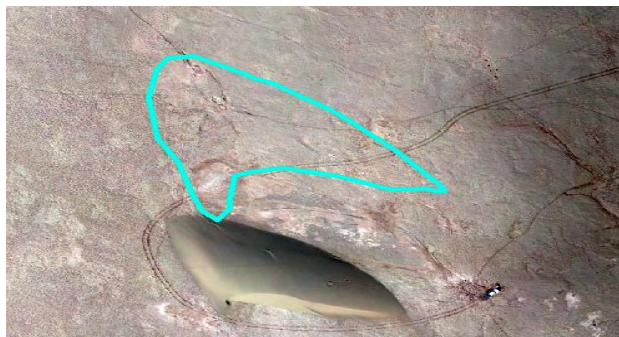
شاخص	مقدار در سال ۱۴۰۱	مقدار در سال ۱۴۰۳	تغییر (Δ)
محیط (m)	۷۵۳/۹۳	۴۸۲/۶۷	-۲۷۱/۲۶
مساحت (m ²)	۱۴۶۰۱/۹۴	۶۹۵۸/۹	-۷۶۴۳/۰۲
نسبت محیط به مساحت	۰/۰۵۱	۰/۰۶۹	۰/۰۱۸
ارتفاع (m)	۸/۸۵	۹/۸۱	۰/۹۶
شیب رو به باد (%)	۳۲/۷۹	۶۷/۶۵	۳۴/۸۶
شیب پشت به باد (%)	۳۶/۹۷	۱۰۱/۴۹	۶۴/۵۲
حجم (m ³)	۶۳۶۶۴/۴۵	۲۸۷۴۰/۳۵	-۳۴۹۲۴/۱
طول دامنه رو به باد (m)	۵۴/۶۹	۵۲/۷۸	-۱/۹۱
طول دامنه پشت به باد (m)	۱۳/۸۸	۹/۸۴	-۴/۰۴
طول بازوی کوچک (m)	۲۲/۵۹	۱۰/۶۱	-۱۱/۹۸
طول بازوی بزرگ (m)	۵۳/۲۲	۸۰/۸۲	۲۷/۶
فاصله بین دو بازو (m)	۱۱۹/۹۵	۱۲۳/۹۵	4

جدول ۴: بررسی میزان جابه‌جایی تپه شماره ۲

شماره تپه	میزان جابه‌جایی بازوی راست (m)	میزان جابه‌جایی راس تپه (m)	میزان جابه‌جایی بازوی چپ (m)	میانگین جابه‌جایی (m)
۲	۱۲/۹۵	۲۱/۱۹	۳۰/۸۸	۲۱/۶۷

تپه شماره ۲ طی دوره دو ساله، تغییرات قابل توجهی در شاخص‌های شکلی و هندسی خود تجربه کرده است. مساحت تپه حدود ۲۵٪ کاهش یافته و این رشد در راستای جهت باد غالب (شمال غرب به جنوب شرق) اتفاق افتاده است. افزایش طول بازوی بزرگ از ۵۳/۲۲ به ۸۰/۸۲ متر (افزایش ۲۷/۶۰ متر) نشان‌دهنده گسترش تپه در راستای باد است که با الگوی حرکتی معمول تپه‌های بارخان سازگار است. همچنین شیب‌های رو به باد و پشت به باد هر دو افزایش یافته‌اند که می‌تواند به دلیل افزایش تجمع رسوبات و تغییر در فرم‌های سطحی باشد. میانگین جابه‌جایی این تپه ۲۱/۶۷ متر محاسبه شده که به‌خوبی نشان می‌دهد تپه دارای تحرک نسبتاً بالا و فعال است، هرچند به نسبت تپه شماره ۴ (با بیش از ۲۷ متر جابه‌جایی)، تحرک آن کمتر است. افزایش نسبت محیط به مساحت نیز می‌تواند نشانه‌ای از کاهش فشردگی نسبی و گسترش

یکنواخت‌تر تپه باشد. نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی تپه‌ی شماره ۳ در جدول‌های ۵ و ۶ آمده است (شکل شماره ۱۲ میزان جابه‌جایی این تپه را نشان می‌دهد):



شکل ۱۲: تصویری از میزان جابه‌جایی تپه شماره ۳ بین سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳

جدول ۵: بررسی شاخص‌ها مورفولوژی تپه شماره ۳

شاخص	مقدار در سال ۱۴۰۱	مقدار در سال ۱۴۰۳	تغییر (Δ)
محیط (m)	۲۷۰/۱۵	۱۹۱/۹۴	-۷۸/۲۱
مساحت (m ²)	۲۹۸۹/۶۱	۱۸۷۴/۹۵	-۱۱۱۴/۶۶
نسبت محیط به مساحت	۰/۰۹۱	۰/۱۰۲	۰/۰۱۱
ارتفاع (m)	۷/۷۲	۵/۶۹	-۲/۰۳
شیب رو به باد (%)	۶۸/۸۹	۷۶/۱۷	۷/۲۸
شیب پشت به باد (%)	۲۶۳/۶۲	۱۰۹/۸۴	-۱۵۳/۷۸
حجم (m ³)	۱۲۸۲۵/۳۹	۵۷۹۳/۶۱	-۷۰۳۱/۷۸
طول دامنه رو به باد (m)	۵۲/۵۶	۴۰/۵۱	-۱۲/۰۵
طول دامنه پشت به باد (m)	۵/۸۹	۵/۱۸	-۰/۷۱
طول بازوی کوچک (m)	۱۶/۸۸	۸/۸۶	-۸/۰۲
طول بازوی بزرگ (m)	۲۹/۸۶	۳۸/۰۵	۸/۱۹
فاصله بین دو بازو (m)	۶۸/۸۸	۵۴/۱۶	-۱۴/۷۲

جدول ۶: بررسی میزان جابه‌جایی تپه شماره ۶

شماره تپه	میزان جابه‌جایی بازوی راست (m)	میزان جابه‌جایی راس تپه (m)	میزان جابه‌جایی بازوی چپ (m)	میانگین جابه‌جایی (m)
۳	۲۲/۴۷	۲۶/۹۷	۱۸/۶۹	۲۲/۷۱

تپه شماره ۳ یکی از تپه‌های نسبتاً بزرگ منطقه از نظر مساحت و حجم است و ویژگی‌های مورفولوژیکی آن نشان‌دهنده الگوی رشد و جابه‌جایی فعال در طول بازه زمانی دو ساله بین پروازهای پهبادی (اردیبهشت ۱۴۰۱ تا مهر ۱۴۰۳) است. در این تپه، میزان جابه‌جایی سه نقطه کلیدی شامل رأس تپه، انتهای بازوی بزرگ و بازوی کوچک به ترتیب ۲۶/۹۷، ۲۲/۴۷ و ۱۸/۶۹ متر بوده است. میانگین جابه‌جایی کلی تپه برابر با ۲۲/۷۱ متر برآورد شده که آن را در رده‌ی تپه‌های نسبتاً پرتحرک قرار می‌دهد. این مقدار، نسبت به تپه‌های ۱ و ۲ بیشتر بوده و از پویایی بالاتر ماسه در این ناحیه خاص خبر می‌دهد. جهت صحت سنجی بیشتر میزان جابه‌جایی این تپه بر روی تصاویر گوگل ارث نیز بررسی گردید (شکل ۱۳) و مشخص گردید که در بازه زمانی ۱۰ ساله نیز مقدار جابه‌جایی مشابه (۲۲/۸۰ متر در سال) داشته است. از نظر تغییرات شکلی، در تصاویر استخراج‌شده از داده‌های پهبادی، مشخص است که بازوی رو به باد (بزرگ) نسبت به بازوی پشت به باد (کوچک) رشد بیشتری داشته است که این الگو کاملاً با جهت باد غالب (شمال غرب به جنوب شرق) هم‌راستا می‌باشد.

همچنین، بخش رأس تپه نیز بیشترین میزان جابه‌جایی را ثبت کرده که نشان‌دهنده فشار مضاعف باد و تمرکز انرژی باد در بخش مرکزی تپه است. افزایش ارتفاع میانگین، تغییر در شیب یال‌ها و نیز توسعه سطحی تپه از دیگر ویژگی‌های قابل ذکر هستند. بر این اساس، تپه شماره ۳ در حال گسترش به سمت جنوب‌شرق منطقه است و احتمالاً در آینده با تپه‌های مجاور ادغام یا باعث تشکیل خوشه‌های ماسه‌ای بزرگ‌تری خواهد شد. در کنار این تغییرات، نسبت محیط به مساحت نیز کمی افزایش یافته که ممکن است نشان‌دهنده کاهش فشردگی تپه یا آغاز فرایند انشعاب یال‌ها باشد.



شکل ۱۳: تصویری از میزان جابه‌جایی تپه شماره ۳ بین سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۴۰۲

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی تپه‌ی شماره ۴ در جدول‌های شماره ۷ و ۸ آمده است، میزان جابه‌جایی این تپه نیز در تصویر شماره ۱۴ آمده است:



شکل ۱۴: تصویری از میزان جابه‌جایی تپه شماره ۴ بین سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳

جدول ۷: بررسی شاخص‌های مورفولوژی تپه شماره ۴

شاخص	مقدار در سال ۱۴۰۱	مقدار در سال ۱۴۰۳	تغییر (Δ)
محیط (m)	۳۱۸/۱۹	۴۴۲/۰۶	۱۲۳/۸۷
مساحت (m ²)	۳۵۶۸/۲۳	۴۰۸۰/۹۱	۵۱۲/۶۸
نسبت محیط به مساحت	۰/۰۸۹	۰/۱۰۸	۰/۰۱۹
ارتفاع (m)	۵/۹۹	۵/۲۶	-۰/۷۳
شیب رو به باد (%)	۲۴/۸۲	۵۸/۳۴	۳۳/۵۲
شیب پشت به باد (%)	۵۴/۳۱	۸۸/۷۶	۳۴/۴۵
حجم (m ³)	۹۵۲۷/۱۸	۸۵۲۹/۱۱	-۹۹۸/۰۷
طول دامنه رو به باد (m)	۳۷/۱۳	۲۱/۷۱	-۱۵/۴۲
طول دامنه پشت به باد (m)	۱۶/۶۵	۷/۷۵	-۸/۹
طول بازوی کوچک (m)	۳۰/۱۹	۱۳/۵۸	-۱۶/۶۱

طول بازوی بزرگ (m)	۳۸/۸۲	۸۸/۷۳	۴۹/۹۱
فاصله بین دو بازو (m)	۸۴/۰۴	۱۳۲/۱۱	۴۸/۰۷

جدول ۸: بررسی میزان جابه‌جایی تپه شماره ۴

شماره تپه	میزان جابه‌جایی بازوی راست (m)	میزان جابه‌جایی راس تپه (m)	میزان جابه‌جایی بازوی چپ (m)	میانگین جابه‌جایی (m)
۴	۲۱/۶۴	۱۹/۰۸	۴۲/۸۸	۲۷/۷۶

تپه شماره ۴ نیز مانند نمونه‌های پیشین، نشان‌دهنده رشد فعال و قابل توجه ماسه‌ای در طول بازه زمانی بررسی شده است. افزایش مساحت به میزان ۵۱۲/۶۸ متر مربع و کاهش چشمگیر حجم به مقدار ۹۹۸/۰۷- متر مکعب از جمله شاخص‌های بارز در پویایی این تپه می‌باشند. افزایش نسبت محیط به مساحت از ۰/۰۸۹ به ۰/۱۰۸ بیانگر تراکم ساختاری بیشتر و روند منظم‌شدن مرزهای تپه است. در واقع، فعالیت تپه همراه با فشردگی نسبی در هندسه آن صورت گرفته است که ممکن است تحت تأثیر جهت و شدت باد غالب منطقه باشد. شاخص‌های ارتفاعی نیز تغییر معنی‌داری را نشان می‌دهند، به‌ویژه کاهش ارتفاع میانگین (۰/۷۳- متر) که بیانگر افزایش فرسایش در بستر و سطح تپه است. هم‌زمان با این تغییر عمودی، هر دو یال (رو به باد و پشت به باد) کاهش طول داشته‌اند و بازوهای تپه نیز به‌طور تغییرات داشته‌اند. در بحث جابه‌جایی، این تپه بالاترین میزان جابه‌جایی در بین پنج تپه مورد مطالعه را داشته است، با میانگین جابه‌جایی ۲۷/۷۶ متر که به‌ویژه در بازوی پشت به باد (۴۲/۸۸ متر) بسیار چشمگیر است. این ویژگی نشان‌دهنده تأثیر غالب نیروی باد شمال‌غربی به جنوب‌شرقی و کشش قابل توجه ماسه‌ها در بخش‌های پشتی تپه است که با الگوی کلاسیک تپه‌های بارخان نیز همخوانی دارد. به طور کلی، تپه شماره ۴ یک نمونه بسیار پویا و در حال رشد از اشکال ماسه‌ای فعال است که هم در گسترش افقی و هم در تکامل عمودی تغییرات محسوس را تجربه کرده و می‌تواند شاخص مناسبی برای تحلیل تغییرات آتی مورفولوژیکی منطقه باشد.

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی تپه‌ی شماره ۵ در جدول‌های شماره ۹ و ۱۰ آمده است، میزان جابه‌جایی این تپه نیز در تصویر شماره ۱۵ آمده است:



شکل ۱۵: تصویری از میزان جابه‌جایی تپه شماره ۵ بین سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳

جدول ۹: بررسی شاخص‌های مورفولوژی تپه شماره ۵

شاخص	مقدار در سال ۱۴۰۱	مقدار در سال ۱۴۰۳	تغییر (Δ)
محیط (m)	۳۸۸/۰۱	۳۹۲/۳۳	۴/۳۲
مساحت (m ²)	۵۸۵۵/۱۴	۴۹۷۴/۳۵	-۸۸۰/۷۹

نسبت محیط به مساحت	۰/۰۶۶	۰/۰۸۷	۰/۰۱۲
ارتفاع (m)	۷/۵۹	۱۰/۱۲	۲/۵۳
شیب رو به باد (%)	۲۲/۳۸	۶۷/۰۶	۴۴/۶۸
شیب پشت به باد (%)	۳۸/۶۲	۱۰۴/۸۴	۶۶/۲۲
حجم (m ³)	۱۶۷۴۵/۶۹	۱۹۵۱۹/۰۶	۲۷۷۳/۳۷
طول دامنه رو به باد (m)	۷۳/۰۸	۴۸/۷۹	-۲۴/۲۹
طول دامنه پشت به باد (m)	۲/۱۵	۶/۸۱	۴/۶۶
طول بازوی کوچک (m)	۳۲/۶۵	۹/۹۷	-۲۲/۶۸
طول بازوی بزرگ (m)	۵۶/۴۸	۷۳/۰۴	۱۶/۵۶
فاصله بین دو بازو (m)	۸۲/۹۲	۱۰/۳۶	۱۸/۴۴

جدول شماره ۱۰: بررسی میزان جابه‌جایی تپه شماره ۵

شماره تپه	میزان جابه‌جایی بازوی راست (m)	میزان جابه‌جایی راس تپه (m)	میزان جابه‌جایی بازوی چپ (m)	میانگین جابه‌جایی (m)
۵	۱۰/۹۳	۹/۳۵	۸/۱۳	۹/۴۷

در مقایسه با سایر تپه‌های ماسه‌ای منطقه، تپه شماره ۵ دارای پویایی کمتر و تغییرات محدودتر در شاخص‌های ژئومورفولوژیکی می‌باشد. این موضوع از کاهش نسبتاً اندک مساحت (حدود ۸۸۰/۷۹- متر مربع) و همچنین افزایش در حجم (۲۷۷۳/۳۷+ متر مکعب) قابل برداشت است. افزایش اندک نسبت محیط به مساحت از ۰/۰۶۶ به ۰/۰۸۷، با وجود گسترش محدود، بیانگر ثبات نسبی در هندسه و مرزهای تپه است. همچنین افزایش اندک در ارتفاع میانگین (۲/۵۳+ متر) و حداکثر ارتفاع (۱۰/۱۲ متر) نشان می‌دهد که این تپه بیشتر در سطحی پایدار باقی‌مانده و روند رسوب‌گذاری نسبتاً کندی را تجربه کرده است. در شاخص‌های شیب و یال، تغییرات نیز ملایم و یکنواخت‌اند؛ به‌طوری که طول یال‌ها، بازوها و فاصله بین بازوها افزایش یافته‌اند، اما این تغییرات در مقایسه با دیگر تپه‌ها حداقلی است. این موضوع می‌تواند حاکی از قرار گرفتن این تپه در منطقه‌ای با شدت کمتر باد، یا محدودیت در تغذیه ماسه‌ای باشد. در بحث جابه‌جایی، تپه شماره ۵ دارای کمترین مقدار میانگین جابه‌جایی با مقدار ۹/۴۷ متر است. این عدد در مقایسه با تپه شماره ۴ (۲۷/۷۶ متر) تقریباً یک‌سوم است و نشان‌دهنده پایداری قابل توجه این تپه در برابر انتقال افقی ناشی از باد غالب شمال‌غرب به جنوب‌شرق می‌باشد. در مجموع، تپه شماره ۵ به‌عنوان تپه‌ای با پویایی کم، ساختاری نسبتاً متقارن و روندی پایدار در تغییرات مورفولوژیکی طی بازه زمانی دو ساله قابل معرفی است. همین ویژگی آن را به گزینه‌ای مناسب برای بررسی مناطق پایدارتر ماسه‌ای تبدیل می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل پنج تپه ماسه‌ای در منطقه کلاته مزینان استان خراسان رضوی، بیانگر پویایی چشم‌گیر این اشکال ژئومورفولوژیک طی بازه زمانی دو ساله میان پروازهای اردیبهشت ۱۴۰۱ و مهر ۱۴۰۳ است. بر اساس شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده، رفتار تپه‌ها را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد:

- تپه‌های با جابه‌جایی بالا و رشد حجمی محسوس (تپه‌های شماره ۱ و ۳)
- تپه‌های در حال تغییر فرم و جهت‌گیری بازوها (تپه‌های شماره ۲ و ۴)
- تپه‌ای با پایداری نسبی و کمترین تغییر مکانی و حجمی (تپه شماره ۵)

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که میانگین جابه‌جایی کلی تپه‌ها برابر با ۲۰۵۷ متر بوده که حاکی از دینامیسم قابل توجه تپه‌ها در این منطقه است. بررسی نرخ جابه‌جایی تپه‌ها در منطقه کلاته مزینان زمانی معنادارتر می‌شود که با سایر پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی مقایسه گردد. برای نمونه، در مطالعه‌ای در اطراف دریاچه ارومیه، نرخ مهاجرت سالانه تپه‌ها حدود ۲۰ متر گزارش شده که تقریباً با منطقه مورد مطالعه برابری می‌کند. در صحرای غربی مصر نیز پژوهشی دقیق توسط عبدالواحد^۱ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که تپه‌های بارخان در منطقه خارگا با نرخ ۳ تا ۱۰/۸۲ متر در سال جابه‌جا می‌شوند. همچنین، در بیابان‌های چین چن^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، نرخ مهاجرتی بین ۴/۷ تا ۹۵/۲ متر در سال گزارش شده است که بیانگر شدت بالای پویایی در آن منطقه است و موقعیت کلاته مزینان را در رده‌ی متوسط تا بالا از لحاظ دینامیسم قرار می‌دهد.

در سطح ملی، بررسی داده‌های حاصل از تپه‌های ایران در بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ نیز نشان داده که میزان جابه‌جایی تپه‌ها بین ۲ تا ۹۷ متر متغیر بوده است (خسروی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین در ناحیه مرزی سیستان و جنوب غرب افغانستان، مهاجرت‌هایی تا بیش از ۱۰۳ متر در سال نیز در برخی نواحی ثبت شده‌اند، اگرچه بسیاری از تپه‌ها نرخ‌هایی بسیار کمتر (۰/۲ تا ۲/۹ متر در سال) داشته‌اند (صافی و نادری، ۲۰۲۳). این پراکندگی بالا نشان می‌دهد که نرخ ثبت‌شده در منطقه مزینان در بخش بالایی طیف قرار می‌گیرد، به‌ویژه زمانی که شرایط باد غالب شمال‌غربی در نظر گرفته شود. در مجموع، افزودن این مقایسه‌ها نه تنها جایگاه منطقه کلاته مزینان را در زمینه دینامیک تپه‌ها مشخص می‌کند، بلکه اعتبار یافته‌های تحقیق حاضر را نیز با استناد به داده‌های جهانی و داخلی تقویت می‌نماید. بررسی رابطه بین شاخص‌های هندسی و میزان جابه‌جایی نشان داد که تپه‌هایی با ارتفاع میانی بیشتر و طول بازوی رو به باد طولانی‌تر تمایل بیشتری به جابه‌جایی و رشد حجمی دارند. همچنین، طول بازوی پشت به باد رابطه نزدیکی با جهت‌گیری حرکت و میزان کشیدگی تپه‌ها دارد. بررسی تغییرات حجمی نیز بیانگر آن است که رشد حجمی تپه‌ها الزاماً با میزان جابه‌جایی آنها همبستگی مستقیم ندارد؛ به‌طوری‌که تپه شماره ۲ بیشترین تغییر هندسی را داشته ولی از لحاظ جابه‌جایی کمتر از تپه‌های ۳ و ۴ جابه‌جا شده است. این نشان می‌دهد که برخی تپه‌ها به‌جای جابه‌جایی کامل، در حال تغییر ساختار و امتداد بازوها هستند. این نوع رفتار می‌تواند نشانه‌ای از آغاز ادغام احتمالی یا دگرگونی الگوهای رسوب‌گذاری تحت تأثیر شرایط موضعی باد و توپوگرافی باشد. با در نظر گرفتن جهت غالب باد از شمال غرب به جنوب شرق، مشاهده شد که تغییرات عمده‌ی هندسی و مهاجرت تپه‌ها نیز با این راستا هم‌راستا بوده و بازوهای رو به باد در اغلب موارد کشیدگی بیشتری یافته‌اند. این موضوع نشان‌دهنده هماهنگی کامل الگوی رشد تپه‌ها با دینامیک بادی غالب منطقه است. در مجموع، این پژوهش نشان داد که داده‌های حاصل از فتوگرامتری پهپادی، در کنار تحلیل‌های دقیق شاخص‌های هندسی، می‌توانند درک دقیق‌تری از الگوهای پویایی تپه‌های ماسه‌ای ارائه دهند. چنین اطلاعاتی برای پایش و مدیریت مناطق بیابانی، تحلیل فرسایش بادی و پیش‌بینی رفتار آینده اشکال ماسه‌ای از اهمیت بسیار بالایی برخوردارند. با توجه به تحلیل‌های صورت‌گرفته، به‌نظر می‌رسد برخی تپه‌ها به مرحله‌ای از بلوغ فرمی رسیده‌اند که در آن جابه‌جایی نسبت به تغییرات ساختاری اولویت کمتری دارد (نمونه بارز: تپه شماره ۲ و ۵). در مقابل، تپه‌هایی مانند شماره ۱ و ۳ نشان‌دهنده رفتارهای دینامیک فعال هستند که احتمالاً در مسیر ترکیب با سایر تپه‌ها یا ایجاد زنجیره‌های ماسه‌ای بزرگ‌تر قرار دارند. نکته قابل توجه دیگر، تأیید یافته‌های این پژوهش

¹ Abdel Wahed

² Chen

توسط مطالعات جدید بین‌المللی از سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ است. پژوهش‌هایی مانند اسمیت و همکاران (۲۰۲۳) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده‌اند که تحلیل‌های UAV-SfM می‌تواند تغییرات میکروژئومورفیک را با دقت بالا پایش کنند. همچنین فرناندز و همکاران (۲۰۲۵) استفاده از داده‌های ترکیبی GIS و پهپاد را برای پیش‌بینی مهاجرت تپه‌های ماسه‌ای در شرایط اقلیمی متغیر پیشنهاد کرده‌اند. از منظر داخلی نیز، تطبیق نتایج با مقاله‌ی فارسی پورمرتضی و همکاران (۱۴۰۲) که در منطقه بیابانی سیستان انجام شده، اهمیت فزاینده فتوگرامتری پهپادی در محیط‌های فراخسک ایران را برجسته می‌سازد. یافته‌های آن مطالعه نیز همانند پژوهش حاضر، به ضعف همبستگی بین جابه‌جایی و تغییرات حجمی تأکید داشته و نقش مؤلفه‌های هندسی مانند امتداد بازوها و ارتفاع را در تحلیل‌های رفتاری تپه‌ها کلیدی می‌داند. در سطح ملی، پژوهش‌هایی نظیر یوسفی و همکاران (۱۴۰۳)، در همین منطقه، بر تحلیل توزیع مکانی و برهم‌کنش تپه‌های ماسه‌ای تمرکز داشته‌اند؛ با این حال، این مقاله برای نخستین بار، تغییرات کمی و دینامیک هندسی-فضایی را با بهره‌گیری از داده‌های دقیق پروازی (UAV) و ترکیب آن با شاخص‌های تحلیلی گسترده بررسی کرده است. در مطالعات بین‌المللی نیز، پژوهش‌هایی مانند لیا^۱ و همکاران، ۲۰۲۱ و بورچین^۲ و هاگنهایتز، ۲۰۱۲ با تأکید بر استفاده از UAV و GIS در پایش تغییرات تپه‌ها، نشان داده‌اند که تپه‌ها در اقلیم‌های خشک، به‌ویژه در حضور باد غالب پایدار، با نرخ قابل پیش‌بینی جابه‌جا می‌شوند. یافته‌های این مطالعه نیز با آن‌ها هم‌راستا است، اما ویژگی متمایز پژوهش حاضر، تحلیل همزمان ساختار بازوها، ارتفاع‌ها و زوایای شیب در کنار جابه‌جایی است؛ چیزی که کمتر در پژوهش‌های مشابه دیده شده است. تحلیل جابه‌جایی‌ها نشان داد که تپه‌ها عمدتاً در امتداد باد غالب (شمال غرب به جنوب شرق) حرکت کرده‌اند و بازوهای رو به باد نیز اغلب رشد بیشتری نسبت به بازوهای پشت به باد داشته‌اند. این الگو، با مطالعات کلاسیک مانند لنکستر^۳، ۱۹۹۵ درباره نقش جهت باد در شکل‌گیری و توسعه تپه‌ها کاملاً سازگار است. در تپه‌های ۲ و ۴ که حجم بزرگ‌تر و مساحت بیشتری داشتند، روند جابه‌جایی نیز سریع‌تر بوده که احتمالاً به دلیل نرخ بالاتر فرسایش در نواحی شیب‌دار و باز بودن فضای توسعه در جهت باد بوده است. بررسی‌های ما نشان داد که برخی تپه‌ها در این بازه‌ی زمانی دچار ادغام شده‌اند و ساختارهای چندبخشی شکل گرفته است. این پدیده، به‌ویژه در تپه شماره ۲ و ۳ مشهود است. این نوع تغییرات معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت باد در بخش‌هایی از منطقه افزایش یابد یا میزان ذخیره ماسه در مسیرهای فرعی تغییر کند. ویگز^۴ و همکاران، ۲۰۰۶ نیز در مطالعه خود در بیابان‌های نامیب، به وقوع این پدیده در بازه‌های زمانی کوتاه اشاره کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، مشاهده‌ی رابطه‌ی معنادار بین برخی ویژگی‌های هندسی تپه‌ها (نظیر طول بازوها، محیط و ارتفاع) و میزان جابه‌جایی بود. هرچند این رابطه در همه تپه‌ها یکنواخت نبود، اما نشان داد که تپه‌هایی با یال بلندتر و ارتفاع میانگین کمتر، اغلب تحرک‌پذیرترند. این یافته با نتایج لیو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸ که تأکید داشتند تپه‌های کم‌ارتفاع با شیب ملایم‌تر تحرک بیشتری دارند، قابل تطبیق است. در مجموع، این پژوهش با ارائه یک مدل عملی برای تحلیل دقیق و چندبعدی رفتار تپه‌های ماسه‌ای در مقیاس زمانی کوتاه، الگویی علمی برای مطالعات مشابه فراهم کرده است. استفاده از فناوری UAV و ترکیب داده‌های ژئومورفومتریک با تحلیل‌های مکانی GIS، بستری مطمئن برای پایش دقیق اکوسیستم‌های بیابانی در آینده ارائه می‌دهد. این پژوهش نه تنها از

¹Lia²Barchyn³Lancaster⁴Wiggs⁵Liu

منظر علمی حائز اهمیت است، بلکه می‌تواند در مدیریت منابع بیابانی، پایش فرسایش بادی، و طراحی الگوهای پایداری سرزمینی در مناطق خشک ایران به کار گرفته شود.

منابع

- آرامش، م. ولی، ع. رنجبر، ا. (۱۴۰۲). بررسی شاخص‌های ژئومورفولوژیکی و رابطه آن با پوشش گیاهی در تپه‌های ماسه‌ای (مطالعه موردی: آران و بیدگل و کاشان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۲(۱)، ۱۱۴-۱۳۱.
- پورمرتضی، س.، غلامی، ح.، راشکی، ع. و مرادی، ن. (۱۴۰۲). برآورد کمی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از تصویربرداری با پهپاد در منطقه فراخشک سیستان. فصلنامه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۴(۴)، ۷۵-۹۲.
- رضایی عارفی، م.، مقیمی، ا.، جعفر بگلو، م.، حسینی، س.، فخری، م. (۱۴۰۴). تحلیل ژئومورفولوژیک منطقه کپه داغ با استفاده از تئوری گسیختگی سطحی پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۴)، ۲۰۳-۱۸۱.
- سیف، ع.، موسوی، س. (۱۳۹۱). ارزیابی شاخص‌های مورفودینامیک تپه‌های برخانی (مطالعه‌ی موردی: ریگ چاه‌جام)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۱)، ۱-۱۸.
- یوسفی، م. ج.، حسینی‌زاده، م.، راشکی، ع.، کریمی‌نژاد، ن.، عباسی، ح. و محمدیان بهبهانی، ع. (۱۴۰۳). تحلیل توزیع مکانی و برهم‌کنش تپه‌های ماسه‌ای موردی (منطقه کلاته مزینان). مهندسی اکوسیستم بیابان ۱۳(۴۲)، ۳۹-۵۲.
- Abdel Wahed, M., Khalifa, M. A., Abd El-Aal, A. K., & Hassan, M. A. (2023). Morphometry, migration rates, and environmental hazards of barchan dunes in the Kharga Depression, Western Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(2), 153. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11238-y>
- Ait-Lamallam, A., Lahrich, S., & El Khamlichi, A. (2025). Minimizing Bowl Effect in UAV Photogrammetry Using Optimized Flight Parameters. *Drones*, 9(6), 387. <https://doi.org/10.3390/drones9060387>
- Andrews, S., Bradbury, A., & Clayton, K. (2002). Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Journal of Coastal Research*, 18(4), 997-1002. <https://doi.org/10.2112/03A-0050.1>
- Burchi, R., & Theuerkauf, K. (2024). High-resolution comparison of LiDAR and sUAS-SfM DEMs in arid dune environments. *Scientific Reports*, 14, 63466.
- Barchyn, T. E., & Hugenholtz, C. H. (2012). Topographic and volumetric change in a dryland dune field using terrestrial laser scanning. *Geomorphology*, 188, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.016>
- Bond, H., Pontiki, M., Wengrove, M., Puleo, J. A., Evans, T. M., & Feagin, R. A. (2023). Beach and dune subsurface hydrodynamics and their influence on the formation of dune scarps. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(7), e2023JF007298. <https://doi.org/10.1029/2023JF007298>
- Chen, J., Zhang, Y., Li, F., & Wang, X. (2023). Real-Time Kinematic Positioning (RTK) for Monitoring of Barchan Dune Migration in the Kumtagh Desert, China. *Remote Sensing*, 15(19), 4728. <https://doi.org/10.3390/rs15194728>
- Corrado, P., Di Gennaro, S. F., & Mouratidis, V. (2021). Uncertainty of drone-derived DEMs and significance of detected morphodynamics in artificially scraped dunes. *Remote Sensing*, 13(9), 1823. <https://doi.org/10.3390/rs13091823>
- Cruz, C., O'Connell, J., McGuinness, K., Martin, J. R., Perrin, P. M., & Connolly, J. (2023). Assessing the effectiveness of UAV data for accurate coastal dune habitat mapping. *European Journal of Remote Sensing*, 56(1), 2191870. <https://doi.org/10.1080/22797254.2023.2191870>
- Durand, N., Tassi, P., Blanpain, O., & Lefebvre, A. (2025). Meteorological conditions influence the migration of a marine dune field in the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 130(5), e2024JF007731. <https://doi.org/10.1029/2024JF007731>
- Eltner, A., Jaud, M., Kaiser, A., & Mandlbürger, G. (2017). Radiometric correction and its impact on UAV-based 3D surface modeling in forested terrain. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.011>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellan, A. (2015). Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments of a promising tool for

- geoscientists. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 3, 1445–1508. <https://doi.org/10.5194/esurfd-3-1445-2015>
- Ekaso, D., Turan, O., & Ince, S. (2024). Accuracy Assessment of RTK and PPK GNSS Systems on UAVs in the Absence of GCPs. *Drones*, 9(4), 291. <https://doi.org/10.3390/drones9040291>
- Faelga, J., Corenblit, D., & Esteves, M. (2023). Monitoring Aeolian Landforms Using UAV-Derived DEMs: A Case Study from Northern Adriatic. *Remote Sensing*, 15(12), 3021. <https://doi.org/10.3390/rs15123021>
- Fernandez, T., Müller, C., & Zhao, H. (2025). Integrated UAV-GIS modeling of dune morphology under climate stress. *Journal of Arid Land Studies*, 34(2), 110–125.
- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Grohmann, C. H., Garcia, G. P. B., Affonso, A. A., & Albuquerque, R. W. (2020). Dune migration and volume change from airborne LiDAR, terrestrial LiDAR and Structure from Motion–Multi View Stereo. *Computers & Geosciences*, 143, 1045569. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.1045569>
- Grottoli, E., Biaisque, M., Rogers, D., Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. (2021). Structure-from-Motion-derived digital surface models from historical aerial photographs: A new 3D application for coastal dune monitoring. *Remote Sensing*, 13(1), 95. <https://doi.org/10.3390/rs13010095>
- Guillot, B., & Pouget, F. (2015). UAV application in coastal environment, example of the Oléron Island for dunes and dikes survey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W3, 321–326. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-321-2015>
- Hugenholtz, C. H., & Wolfe, S. A. (2012). Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews*, 111(3–4), 319–334. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.001>
- James, M. R., Robson, S., & Smith, M. W. (2017). Evaluating the precision and accuracy of structure-from-motion photogrammetry for geomorphic change detection. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 2375–2395. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- Javernick, L., Brasington, J., & Caruso, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>
- Khosravi, H., & Jafari, R. (2023). Aeolian geomorphology of ergs and dunefields in Iran: An overview. *Desert*, 28(1), 1–18. https://jdesert.ut.ac.ir/article_102461.html
- Kok, J. F., Parteli, E. J. R., Michaels, T. I., & Bou Karam, D. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics*, 75(10), 106901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>
- Lancaster, N. (1995). *Geomorphology of desert dunes*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315842513>
- Laporte-Fauret, Q., Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Michalet, R., & Rosebery, D. (2020). Coastal dune morphology evolution combining LiDAR and UAV surveys, Truc Vert beach 2011–2019. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 163–167. <https://doi.org/10.2112/SI95-032.1>
- Lia, A., & Han, Z. (2021). The moving trajectory fitting based on three-dimensional digital model of barchan dunes in Taklimakan Desert. *Open Journal of Environmental Biology*, 6(1), 15–25. <https://doi.org/10.17352/ojeb.000022>
- Liu, D., Zhao, L., Gao, S., Yin, Z., & Li, R. (2018). High-resolution UAV-based mapping of topographic change in desert dunes using structure from motion photogrammetry. *Aeolian Research*, 34, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.07.004>
- Luppichini, M., Mancini, F., & Bianchini, G. (2025). Influences of the Ground Control Point Configuration on UAV-derived SfM in Coastal Environments. *Journal of Coastal Research*, 41(2), 182–193. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-25-00023.1>
- Prodanov, B., Gushev, C., Sopotlieva, D., Valcheva, M., Bekova, R., Baltakova, A., Tzonev, R., & Popov, J. (2025). A standard procedure for dune mapping along the Bulgarian Black Sea coast: An integrated approach combining UAS photogrammetry, geomorphological and

- phytocoenological surveys. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1579724. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1579724>
- Rahdari, M. R., & Rodríguez-Seijo, A. (2021). Monitoring sand drift potential and sand dune mobility over the last three decades (Khartouran Erg, Sabzevar, NE Iran). *Sustainability*, 13(16), 9050. <https://doi.org/10.3390/su13169050>
- Rotnicka, J., Dłużewski, M., Dąbski, M., Rodzewicz, M., Włodarski, W., & Zmarz, A. (2020). Accuracy of the UAV-based DEM of beach–foredune topography in relation to selected morphometric variables, land cover, and multitemporal sediment budget. *Estuaries and Coasts*, 43(8), 1939–1955. <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00751-y>
- Safi, S., & Naderi, A. (2023). Recent trends in sand dune activity in the Helmand-Sistan basin: A multi-source remote sensing approach. *Studies in Drylands and Karst*, 9(2), 91–110. <https://oap.unige.ch/journals/sdk/article/view/1085>
- Smith, A., Jones, M., & Garcia, R. (2023). UAV photogrammetry for geomorphic change detection in arid environments. *Remote Sensing of Environment*, 291, 113437. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113437>
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2015). Structure-from-motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 39(2), 196–210. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Solazzo, D., Sankey, J. B., Sankey, T. T., & Munson, S. M. (2018). Mapping and measuring aeolian sand dunes with photogrammetry and LiDAR from unmanned aerial vehicles (UAV) and multispectral satellite imagery on the Paria Plateau, AZ, USA. *Geomorphology*, 319, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.023>
- Verduzco, P., & Hill, J. (2020). Quantifying volumetric change on coastal dunes using UAV-derived DEMs and DoD analysis. *Remote Sensing*, 12(18), 2956. <https://doi.org/10.3390/rs12182956>
- Wang, M., Li, H., Liu, Y., & Li, H. (2025). Multi-Source DEM vertical accuracy evaluation of Taklimakan Desert hinterland based on ICESat-2 ATL08 and UAV data. *Remote Sensing*, 17(11), 1807. <https://doi.org/10.3390/rs17111807>
- Wiggs, G. F. S., Thomas, D. S. G., & Searle, R. B. (2006). Interactions between aeolian dunes and fluvial environments: A review. *Earth-Science Reviews*, 80(3–4), 193–210. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.03.008>
- Yang, Z., Qian, G., Dong, Z., Tian, M., & Lu, J. (2021). Migration of barchan dunes and factors that influence migration in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Sand Sea, China. *Geomorphology*, 378, 107615. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107615>
- Yang, S., Lin, G., & Zevenbergen, C. (2019). Spatio-temporal migration patterns of barchan dunes in the Taklimakan Desert seen through remote sensing time series. *Aeolian Research*, 38, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2019.05.001>
- Zhang, L., Chen, Y., & Bao, W. (2024). Quantifying dune migration using UAV-based SfM in hyper-arid regions. *Aeolian Research*, 56, 100866. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100866>