



Modeling the Geomorphological Development Stages of the Kaluts (Yardangs) in the Lut Desert World Heritage Site and Their Comparison with the Yardangs of the Aeolis Region on Mars

Atefeh Hesarakizad¹  , Mehran Maghsoudi² 

1. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: hesarakizad.atefe@ut.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: maghsoud@ut.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

10 May 2025

Received in revised form:

7 July 2025

Accepted:

4 September 2025

pp.37-58

Keywords:

Yardangs,

Lut Desert,

Aeolis Region (Mars),

Aeolian erosion,

3D modeling of yardangs.

ABSTRACT

Yardangs are recognized as one of the most prominent geomorphological features in arid regions, typically observed as eroded ridges separated by U-shaped troughs and characterized by intricate networks of corridors and rugged crests. Investigating the morphometric characteristics of these geological structures is critical for identifying their geomorphological indices. In this study, the yardangs of Iran's Lut Desert are compared with those in the Aeolis region of Mars. To analyze the Lut Desert yardangs, Landsat satellite imagery was employed, and data on the frequency, velocity, and intensity of prevailing winds were evaluated using Global Mapper software. Additionally, Rhino software with the Grasshopper plugin was utilized to model the evolutionary stages of the yardangs and reconstruct their three-dimensional morphology. The results revealed that yardangs in both regions exhibit sharp, elongated structures with parallel grooves, shaped predominantly by aeolian erosion. Furthermore, the orientation of the yardangs and their intervening corridors in both regions aligns northwest-southeast. The findings also indicated that the Lut Desert yardangs are predominantly in a mature stage of development, whereas those in the Aeolis region of Mars are classified as "whaleback" or "hogback" yardangs, categorized as middle-aged. This distinction suggests that the Aeolis yardangs on Mars are likely older than those in the Lut Desert.

Cite this article: Hesarakizad, A. and Maghsoudi, M. (2025). Modeling the Geomorphological Development Stages of the Kaluts (Yardangs) in the Lut Desert World Heritage Site and Their Comparison with the Yardangs of the Aeolis Region on Mars. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3). 37-58.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.512496.1553](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.512496.1553)

Extended Abstract

Introduction

The Lut Desert in Iran, one of the hottest and most arid deserts on Earth, hosts an extensive array of yardangs, whose unique geological and climatic conditions provide an ideal natural laboratory for studying erosional processes. In contrast, the Aeolis region of Mars, extensively explored by NASA's orbiters and rovers, features yardangs that exhibit striking morphological parallels to their terrestrial counterparts in terms of shape, orientation, and erosion patterns. A comparative analysis of these two regions offers valuable insights into the influence of climatic factors, material composition, and erosional dynamics in two distinct yet analogous environments. One effective approach to investigating these phenomena is the geomorphological modeling of yardang development stages, which enables the simulation of their formation, growth, and evolutionary trajectories over time. Such modeling not only enhances our understanding of the environmental and geological drivers behind yardang evolution but also facilitates a more precise comparative framework between terrestrial and Martian analogs. In this study, geomorphological modeling techniques, including three-dimensional reconstruction, are employed to simulate the developmental stages of the Lut Desert yardangs and compare them with those in the Aeolis region of Mars. The research pursues two primary objectives: first, to identify the dominant processes governing yardang formation in the Lut Desert and on Mars, and second, to analyze the key factors influencing these processes across both planetary contexts.

Methodology

In this study, Landsat 9 satellite imagery was initially acquired via Google Earth Engine for the Lut Desert region. A digital elevation model (DEM) of the area was subsequently extracted from the United States Geological Survey (USGS) database. Following this, the yardangs within the Lut Desert were systematically identified. To evaluate these geomorphological structures and assess the role of wind in yardang formation, the DEM

data were integrated into the Global Wind Atlas platform. Key parameters, including the frequency, velocity, and intensity of prevailing winds, were then computed and analyzed.

Results and discussion

Wind Frequency, Velocity, and Power

The results revealed that the predominant wind frequency in the Lut Desert yardangs is 30%, with winds predominantly originating from the northwest. Wind velocity emerged as a critical factor in yardang formation, with 50% of measured wind speeds attributed to the dominant northwest winds in the study area. The third parameter, wind power, demonstrated that northwest winds account for 60% of the total wind energy in the Lut Desert. This high wind power underscores the significant erosional capacity of northwestern winds to modify surface features and induce substantial changes in geomorphological structures. Wind power is directly correlated with its capacity to transport and displace sedimentary particles, a process that profoundly influences yardang morphology.

Processes Driving the Genesis and Evolution of Lut Desert Yardangs

The findings indicate that the Lut Desert yardangs have evolved through the interplay of endogenic and exogenic processes. Aeolian and hydrological forces, combined with lithological variations, have generated diverse erosional patterns in the region, ultimately producing the distinct geomorphological forms of the Lut yardangs.

Developmental Stages of Lut Desert Yardangs

Analysis of the Lut Desert yardangs enabled the proposal of a five-stage developmental model. This model not only provides a comprehensive explanation of yardang evolution but also facilitates the interpretation of how factors such as wind dynamics, hydrological activity, lithology, and environmental conditions collectively shape these structures. The model assigns primary agency to aeolian processes in yardang formation and serves as a holistic framework for studying yardangs in extraterrestrial contexts, including Mars.

Analysis of Martian Yardangs

The yardangs in the Aeolis Planum region of Mars are predominantly classified as "hogback" types, characterized by rounded forms, layered and dendritic structures on their upper surfaces. These features distinguish them morphologically from yardangs observed in other planetary regions. Prominent attributes include truncated heads, aligned wings, and conical tails. The widespread distribution of these yardangs in Aeolis Planum, along with their unique structural traits, highlights their significance as analogs for comparative planetary geomorphology studies.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that aeolian erosion is the primary force driving the formation and evolution of yardangs in both regions. Persistent, high-energy winds have sculpted elongated, linear landforms by removing loose and less resistant materials through abrasion and deflation processes. The dominant orientation of yardangs in both areas aligns with the prevailing wind direction, as evidenced by the northwest-southeast elongation of yardangs and their intervening corridors in both the Lut Desert and Aeolis Planum on Mars. However, the directional patterns of prevailing winds differ between the two regions: winds in Aeolis Planum predominantly blow from the southeast to the northwest, whereas in the Lut Desert, the dominant winds follow a northwest-southeast trajectory. This divergence in wind regimes reflects distinct climatic conditions and dynamic wind patterns across the two planetary environments.

In terms of evolutionary stages, the Lut Desert yardangs are predominantly in a mature developmental phase, characterized by elongated ridges, narrow corridors, and steep windward slopes. In contrast, the Aeolis Planum yardangs are primarily classified as "whaleback" or "hogback" types, indicative of advanced-stage erosion and geomorphological evolution. These observations suggest that the Martian yardangs in Aeolis Planum are temporally older than their terrestrial counterparts in the Lut Desert, having undergone prolonged

erosional processes under Mars' unique atmospheric and geological conditions.

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.

مدل‌سازی مراحل توسعه ژئومورفولوژیکی کلات‌های (یاردانگ‌های) میراث جهانی بیابان لوت و مقایسه آن با یاردانگ‌های منطقه آئولیس مریخ

عاطفه حصارکی‌زاد^۱✉، مه‌رمان مقصودی^۲ 

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه hesarakizad.atefe@ut.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: maghsoud@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳	
صص. ۶۱-۴۲	
واژگان کلیدی: یاردانگ، بیابان لوت، آئولیس مریخ، فرسایش بادی، مدل‌سازی سه‌بعدی یاردانگ.	یاردانگ‌ها به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین اشکال مورفولوژیکی در مناطق بیابانی شناخته می‌شوند و معمولاً به‌صورت تپه‌های فرسایش‌یافته‌ای مشاهده می‌شوند که توسط فرورفتگی‌های U شکل و با مجموعه‌ای از راهروها و پشته‌های ناهموار از یکدیگر تفکیک می‌شوند. بررسی ویژگی‌های مورفومتریک این سازه‌های زمین‌شناختی برای شناسایی شاخص‌های ژئومورفولوژیکی آن‌ها اهمیت بالایی دارد. در این پژوهش، یاردانگ‌های بیابان لوت ایران با یاردانگ‌های منطقه آئولیس در مریخ مقایسه شده‌اند. برای تحلیل یاردانگ‌های بیابان لوت، از تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شده و داده‌های مربوط به فراوانی، سرعت و شدت بادهای غالب با استفاده از نرم‌افزار Global Mapper ارزیابی گردیده است. همچنین، برای مدل‌سازی مراحل تکامل یاردانگ‌ها و بازسازی سه‌بعدی آن‌ها، از نرم‌افزار راینو و پلاگین گرس‌هاپر بهره گرفته شده است. نتایج پژوهش نشان داد که یاردانگ‌های هر دو منطقه، تحت تأثیر فرسایش بادی، دارای ساختارهای تیز و باریک با شیارهای موازی هستند. علاوه بر این، جهت کشیدگی یاردانگ‌ها و دالان‌های میان آن‌ها در هر دو منطقه، شمال غربی - جنوب شرقی است. همچنین، یافته‌ها نشان داد که یاردانگ‌های بیابان لوت عمدتاً در مرحله بلوغ قرار دارند، درحالی‌که در آئولیس مریخ، یاردانگ‌های غالب از نوع "پشت‌ماهی" یا "گوژپشتی" بوده و در طبقه یاردانگ‌های میان‌سال دسته‌بندی می‌شوند. این تفاوت نشان می‌دهد که یاردانگ‌های منطقه آئولیس مریخ احتمالاً قدمت بیشتری نسبت به یاردانگ‌های بیابان لوت دارند.

استناد: حصارکی‌زاد، عاطفه و مقصودی، مه‌رمان. (۱۴۰۵). مدل‌سازی مراحل توسعه ژئومورفولوژیکی کلات‌های (یاردانگ‌های) میراث جهانی بیابان لوت و مقایسه آن با یاردانگ‌های منطقه آئولیس مریخ. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۴(۳)، ۵۸-۳۷.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.512496.1553

مقدمه

اصطلاح «یاردانگ^۱» برای نخستین بار توسط هَدین (هَدین^۲، ۱۹۰۳) در مطالعات خود درباره آسیای مرکزی معرفی شد. این واژه ریشه در زبان اویغوری^۳ دارد (دینگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۰) و در زبان فارسی معادل «کلوت» به کار می‌رود (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱). یاردانگ یک عارضه ژئومورفولوژیکی ناشی از فرسایش بادی است که در آن برجستگی‌ها با راهروهای فرسایشی متناوب قرار می‌گیرند (بارچین و هوگنهورلتز^۵، ۲۰۱۵؛ بارچین^۶، ۲۰۱۸). این پدیده دارای شکلی آیرودینامیکی است که با جریان‌های آشفته محصور بین دیواره‌ها مرتبط است (بارچین، ۲۰۱۸؛ وارد و گرلی^۷، ۱۹۸۴؛ گودی^۸، ۲۰۰۸؛ پلتیر^۹، ۲۰۱۸؛ پلتیر و همکاران، ۲۰۱۸). یاردانگ‌ها از اواخر قرن نوزدهم مورد توجه پژوهشگران و کاوشگران قرار گرفته‌اند (استاف^{۱۰}، ۱۸۸۷؛ والتر^{۱۱}، ۱۹۸۱) و در طیف گسترده‌ای از مناطق خشک جهان شناسایی شده‌اند (شکل ۱). این اشکال ژئومورفولوژیکی در مناطقی همچون بیابان لوت در ایران (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۹)، صحراهای مصر (بروکس^{۱۲}، ۲۰۰۱) و لیبی (دونگ و دونگ^{۱۳}، ۲۰۱۵)، صحرای کومتاگ^{۱۴} در شمال غربی چین (دونگ و همکاران، ۲۰۱۲)، حوضه کایدام^{۱۵} در شمال غربی چین (حلیموف و فرز^{۱۶}، ۱۹۸۹؛ وانگ و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۸) و آرژانتین (اینبار و ریسو^{۱۸}، ۲۰۰۱) مشاهده شده‌اند. علاوه بر این، شواهد نشان می‌دهد که یاردانگ‌ها در بسیاری از دیگر مناطق جهان نیز توسعه یافته‌اند (دونگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ دونگ و دونگ، ۲۰۱۵).

یاردانگ‌ها پدیده‌هایی ژئومورفولوژیکی هستند که عمدتاً در مناطق دارای بادهای شدید، اقلیم خشک و بسترهای مستعد فرسایش شکل می‌گیرند (احمدی، ۱۳۸۷؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵) و اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی شرایط اقلیمی، فرآیندهای هوازگی و تأثیر بادهای غالب بر سطح زمین ارائه می‌دهند. فرآیندهای فرسایشی ناشی از بادهای تک‌جهتی و جریان‌های آبی، عامل اصلی ایجاد و گسترش این اشکال زمین‌شناختی محسوب می‌شوند (گودی و میدلتون^{۱۹}، ۲۰۰۶؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴). علاوه بر این، عوامل دیگری نظیر بادساییدگی^{۲۰}، انقباض^{۲۱}، بریدگی‌های ناشی از جریانات آب^{۲۲}، شکاف‌های ناشی از خشک و تر شدن ر سوبات^{۲۳}، سقوط و ریزش ناگهانی^{۲۴}، هوازگی و حرکت توده‌ای نیز در شکل‌گیری و تکامل آن‌ها نقش دارند (احسانی و فروتن، ۱۳۹۳).

1 - Yardang

2 - Hedin

3 - Uyghur word

4 - Ding

5 - Barchyn and Hugenholtz

6 - Barchyn

7 - Ward and Greeley

8 - Goudie

9 - Pelletier

10 - Stapff

11 - Walther

12 - Brookes

13 - Dong and Dong

14 - Kumtagh Desert

15 - Qaidam Basin

16 - Halimov and Fezer

17 - Wang et al

18 - Inbar and Risso

19 - Goudie & Middleton

20 - Wind Abrasion

21 - Deflation

22 - Fluvial Incision

23 - Desiccation Cracks

24 - Slumping

شکل‌گیری و تکامل یاردانگ‌ها نتیجه تعامل عوامل زمین‌شناسی، اقلیمی و فرسایشی است (گودی، ۲۰۰۷). ویژگی‌های سنگ‌بستر، ساختار زمین‌شناختی و میزان سختی و نفوذپذیری لایه‌های رسوبی بر مورفولوژی آن‌ها تأثیرگذارند (گوتیرز-الورزا و همکاران^۱، ۲۰۰۲). علاوه بر این، شدت و جهت بادهای غالب و شرایط هیدرولوژیکی منطقه، نرخ فرسایش و توسعه یاردانگ‌ها را تعیین می‌کنند (گودی، ۲۰۰۷). فرآیندهای فرسایشی گوناگونی از جمله بادساییدگی، فرسایش شیاری، هوازدگی فیزیکی و انقباض‌های ناشی از تغییرات رطوبتی، در شکل‌دهی و توسعه آن‌ها نقش دارند. افزون بر این، تغییرپذیری در جنس و ساختار لایه‌های رسوبی موجب شکل‌گیری انواع مختلف یاردانگ‌ها می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به اشکال وال‌مانند، دوکی شکل، گوژپشته، یال دنداندار، مخروطی، هرمی و طولی اشاره کرد (هاگت و شاتل‌ورث^۲، ۲۰۲۲). یاردانگ‌ها در مناطق مختلفی از جمله سطح زمین (دونگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ دونگ و دونگ، ۲۰۱۵)، سیاره مریخ (وارد، ۱۹۷۹) و سیاره زهره (ترگو^۳، ۱۹۹۲) شناسایی شده‌اند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵). بیابان لوت در ایران، یکی از گرم‌ترین و خشک‌ترین بیابان‌های جهان (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵)، دارای گستره‌ای وسیع از یاردانگ‌ها است (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱) که به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و اقلیمی، محیطی ایده‌آل برای مطالعه فرآیندهای فرسایشی محسوب می‌شود (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵). در مقابل، منطقه آئولیس مریخ که توسط مدارگردها و مریخ‌نوردهای ناسا مورد بررسی قرار گرفته، میزبان یاردانگ‌هایی است که از نظر شکل، جهت‌گیری و الگوی فرسایش، شباهت‌های قابل توجهی به نمونه‌های زمینی دارند (وارد، ۱۹۷۹؛ داسیلوا و همکاران^۴، ۲۰۱۰؛ شیائو و همکاران^۵، ۲۰۱۷؛ وانگ و همکاران^۶، ۲۰۱۸). مقایسه این دو منطقه می‌تواند در شناخت تأثیر عوامل اقلیمی، ترکیب مواد سازنده و دینامیک فرسایشی در دو محیط متفاوت اما مشابه، نقش مؤثری ایفا کند. یکی از روش‌های کارآمد در بررسی این پدیده، مدل‌سازی مراحل توسعه ژئومورفولوژیکی یاردانگ‌ها است که می‌تواند روند شکل‌گیری، رشد و تکامل این اشکال فرسایشی را در طول زمان شبیه‌سازی کند. مدل‌سازی این فرآیندها نه تنها به درک بهتر نقش عوامل محیطی و زمین‌شناختی در تکامل یاردانگ‌ها کمک می‌کند، بلکه امکان مقایسه دقیق‌تر بین نمونه‌های زمینی و مریخی را نیز فراهم می‌سازد. در این پژوهش، تلاش شده است تا با استفاده از مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی، مراحل توسعه یاردانگ‌های بیابان لوت شبیه‌سازی و با یاردانگ‌های منطقه آئولیس مریخ مقایسه شود.

پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی مراحل توسعه ژئومورفولوژیکی یاردانگ‌های بیابان لوت و مقایسه آن با یاردانگ‌های منطقه آئولیس مریخ انجام شده است. تمرکز اصلی مطالعه بر بازسازی روندهای فرسایشی مؤثر بر شکل‌گیری و تحول این اشکال زمین‌ساختی در دو محیط اقلیمی متمایز، اما با سازوکارهای مشابه بوده است. در این راستا، از رویکردی کیفی مبتنی بر تحلیل ساختاری، شواهد میدانی، و مطالعات پیشین بهره گرفته شده تا درک بهتری از فرآیندهای ژئومورفولوژیکی مؤثر بر تشکیل یاردانگ‌ها حاصل شود. این پژوهش به‌طور خاص دو هدف کلیدی را دنبال می‌کند: نخست، شناسایی فرآیندهای مؤثر در ایجاد یاردانگ‌ها در بیابان لوت و سطح مریخ، و دوم، تحلیل عوامل تأثیرگذار بر این فرآیندها در چارچوب تطبیقی ژئومورفولوژی سیاره‌ای.

¹ - Gutiérrez-Elorza et al

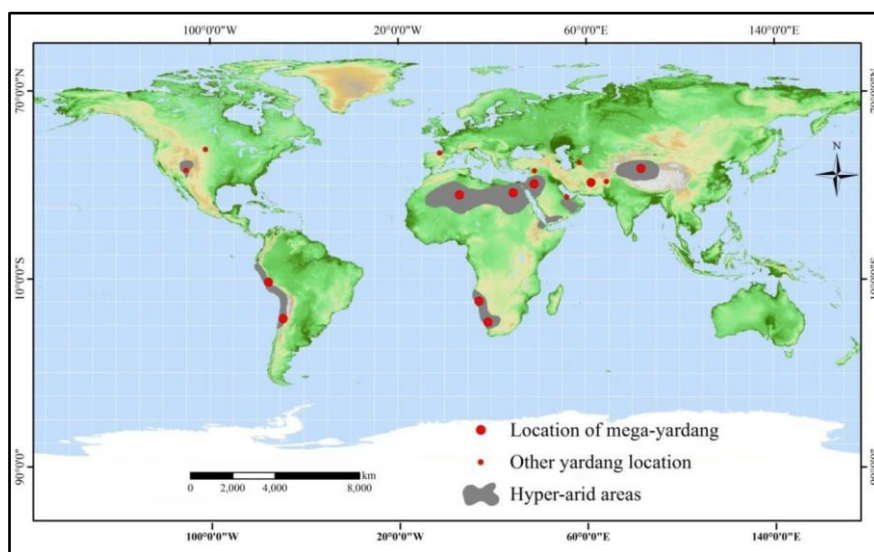
² - Huggett & Shuttleworth

³ - Trego

⁴ - De Silva et al

⁵ - Xiao et al

⁶ - Wang et al



شکل ۱: توزیع یاردانگ‌ها و مگایاردنگ در سراسر جهان (برگرفته از گودی، ۲۰۰۷)

مبانی نظری

شکل‌گیری و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی یاردانگ

یاردانگ‌ها عوارض ژئومورفولوژیکی هستند که در نتیجه فرسایش بادی بر روی مواد رسوبی نرم یا نیمه‌سخت شکل می‌گیرند (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶) و معمولاً دارای جهت‌گیری موازی با بادهای غالب منطقه هستند (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱). این پدیده به دلیل تفاوت در میزان فرسایش لایه‌های سخت و نرم ایجاد شده و به اشکال کشیده و آیرودینامیکی با دامنه‌های تند و سطحی هموار تبدیل می‌شود (پوتر و همکاران^۱، ۲۰۲۳). یاردانگ‌ها نه تنها بر روی زمین بلکه در سطح مریخ نیز مشاهده شده‌اند، که نشان‌دهنده تأثیرپذیری آن‌ها از فرآیندهای فرسایشی مشابه در محیط‌های مختلف سیاره‌ای است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵).

یاردانگ‌های توسعه‌یافته دارای شکلی اشک‌مانند^۲ هستند (که به «پشت‌نهنگی^۳» یا «شیبه بچه‌قورباغه^۴» نیز شناخته می‌شوند) و با سری گرد و دمی باریک مشخص می‌شوند که تحت تأثیر جریان هوا شکل می‌گیرد (بارچین، ۲۰۱۸). فرسایش بادی و سایش، فرم‌های آیرودینامیکی^۵ مشابهی را ایجاد می‌کنند، در حالی که عوامل غیربادی بر تنوع مورفولوژیکی یاردانگ‌ها تأثیر دارند. زمانی که فرآیندهای بادی غالب باشند، یاردانگ‌ها در مراحل مختلف تکامل خود ویژگی‌های مشخصی را نشان می‌دهند (بروکس، ۲۰۰۱). بر این اساس، می‌توان یک مدل کلی برای فرآیندهای یاردانگ ارائه داد که در ادامه به بررسی عوامل بادمحور، عوامل غیربادی، و مدل مورفولوژیکی پرداخته خواهد شد.

– عوامل بادمحور

به طور کلی عوامل بادمحور به دو گروه فرسایش بادی و سایش ناشی از باد و غلبه نیروی باد تقسیم‌بندی می‌شوند. فرسایش بادی شامل دو فرآیند بادروبی و سایش بادی است که هر دو در تکامل یاردانگ‌ها نقش دارند (لایتی^۶، ۲۰۱۱). در مورد تأثیرگذاری این دو فرآیند، دیدگاه‌های متفاوتی وجود دارد؛ برخی بادروبی را عامل اصلی رشد یاردانگ‌ها می‌دانند،

^۱ - Pötter et al
^۲ - Teardrop shape
^۳ - Whaleback
^۴ - Tadpole-like
^۵ - Aerodynamic
^۶ - Laity

زیرا می‌تواند حجم زیادی از مواد را جابه‌جا کرده و ناهمواری‌های معکوس ایجاد کند (گودی، ۲۰۰۸). در مقابل، برخی محققان سایش ناشی از جریان باد و ذرات ماسه را مؤثرتر می‌دانند، زیرا عمدتاً موجب فرسایش بخش‌های پایینی یاردانگ‌ها می‌شود (گودی، ۲۰۰۷؛ بروکس، ۲۰۰۱). سایش می‌تواند عمق دره‌های یاردانگ را افزایش دهد، اما برای این فرآیند، بادروبی نیز ضروری است، زیرا در غیر این صورت رسوبات انباشته‌شده مانع فرسایش عمقی خواهند شد (بارچین و هوگنهلتر، ۲۰۱۵؛ بارچین، ۲۰۱۸). همچنین، جنس سنگ‌شناسی یاردانگ‌ها تعیین‌کننده میزان تأثیرگذاری این فرآیندهاست؛ سایش در سنگ‌های سخت نقش غالب دارد، درحالی‌که بادروبی در رسوبات نرم مانند بسترهای دریاچه‌ای قدیمی اهمیت بیشتری می‌یابد (گودی و ویلز^۱، ۲۰۱۵). علاوه‌براین، غلبه نیروی باد یکی دیگر عوامل موثر بر یاردانگ‌ها، است؛ زیرا جهت‌گیری آن‌ها با بادهای غالب محلی مطابقت دارد و نه با ساختارهایی مانند درزه‌ها یا گسل‌ها (بروکس، ۲۰۰۱). بنابراین، می‌توان از یاردانگ‌ها به‌عنوان شاخصی برای تشخیص جهت باد استفاده کرد (وارد، ۱۹۷۹). مطالعات جدید نشان می‌دهد که باد عامل اصلی در شکل‌گیری یاردانگ‌ها است، درحالی‌که خشک‌سالی شرایط مساعد را فراهم می‌کند (هو و همکاران^۲، ۲۰۱۷). گودی (۲۰۰۷) بیان می‌کند که مگا-یاردانگ‌ها عمدتاً در مناطقی با بارندگی سالانه کمتر از ۵۰ میلی‌متر شکل می‌گیرند. بااین‌حال، در مناطقی با رطوبت بیشتر، یاردانگ‌ها در صورتی تشکیل می‌شوند که میانگین سرعت باد بیش از ۴ متر بر ثانیه باشد (دینگ و همکاران، ۲۰۲۰).

– عوامل غیر بادی

عوامل غیر بادی مانند هوازدگی، جریان‌های آبی، حرکات توده‌ای و ویژگی‌های زمین‌شناسی (لیتولوژی و ساختارهای زمین‌شناختی) بر شکل‌گیری و تنوع مورفولوژیکی یاردانگ‌ها تأثیر می‌گذارند. بر اساس نظریه کمترین مقاومت، نسبت ابعادی ایده‌آل برای یاردانگ‌های قطره‌ای شکل عدد ۴ در نظر گرفته شده است (وارد و گرلیلی، ۱۹۸۴)، اما مطالعات نشان داده‌اند که این نسبت متغیر است (دینگ و همکاران، ۲۰۲۰). تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که شیب و جهت‌گیری لایه‌های زمین‌شناسی بر نسبت ابعادی یاردانگ‌ها تأثیر دارد، به‌طوری‌که لایه‌های شیب‌دارتر، نسبت‌های ابعادی کوچک‌تری ایجاد می‌کنند (هو و همکاران، ۲۰۱۷؛ پلتیر، ۲۰۱۸). بااین‌حال، مطالعات جدید تأکید دارند که لیتولوژی در مقایسه با جهت‌گیری لایه‌ها تأثیر بیشتری بر ابعاد و شکل یاردانگ‌ها دارد (دینگ و همکاران، ۲۰۲۰).

– مدل مورفولوژیکی

توسعه یاردانگ‌ها در دو مرحله رخ می‌دهد: تقویت ناهمواری‌ها و هموارسازی سطح زمین (بارچین، ۲۰۱۸). رشد یاردانگ‌ها زمانی ادامه می‌یابد که نرخ فرسایش عمقی از فرسایش سطحی بیشتر باشد، اما در نهایت زوال آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است (بارچین و هوگنهلتر، ۲۰۱۵). این زوال با افزایش فاصله میان یاردانگ‌ها همراه شده و ممکن است با یک چرخه جدید از فرسایش بادی دنبال شود (بروکس، ۲۰۰۱). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فرآیند شکل‌گیری و تحول یاردانگ‌ها را می‌توان در قالب یک مدل چهار مرحله‌ای توصیف کرد که در آن، علاوه بر تأثیر باد، عوامل زمین‌شناختی و ویژگی‌های رسوبی نیز نقش تعیین‌کننده دارند. این مدل نه‌تنها به درک یاردانگ‌های زمینی کمک می‌کند، بلکه برای مطالعه یاردانگ‌های مریخ نیز کاربرد دارد، زیرا فرایندهای فرسایشی مشابهی در هر دو سیاره مشاهده شده است (دینگ و همکاران، ۲۰۲۰).

مطالعات نشان می‌دهند که یاردانگ‌ها ابتدا بر روی سطوح تحت تأثیر فرآیندهای هیدرولوژیکی شکل گرفته و سپس تحت تأثیر باد به اشکال کشیده و آیرودینامیکی تغییر می‌یابند (الدوساری و همکاران^۳، ۲۰۰۹). همچنین، تحقیقات نشان

¹ - Goudie and Viles

² - Hu et al

³ - Al-Dousari et al

می‌دهند که در مراحل اولیه، ارتفاع یاردانگ‌ها افزایش یافته و سپس با زوال تدریجی کاهش می‌یابد (حلیموف و فزر، ۱۹۸۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌های منطقه‌ای شامل مراحل جوانی، بلوغ، پیشرفته و پایانی در مصر (بروکس، ۲۰۰۱) و مراحل جنینی، نوجوانی، بلوغ و زوال در چین (دونگ و همکاران، ۲۰۱۲) هستند.

فرآیند شکل‌گیری یاردانگ با افزایش و سپس کاهش برجستگی‌های توپوگرافی همراه است، درحالی‌که فاصله بین آن‌ها افزایش و عرضشان کاهش می‌یابد (حلیموف و فزر، ۱۹۸۹؛ بارچین و هوگنهورلتز، ۲۰۱۵). در مرحله جنینی، عوامل مختلفی در شکل‌گیری آن تأثیر دارند. در مرحله نوجوانی، برجستگی‌های طولانی شکل اولیه یاردانگ را تشکیل داده و به تدریج بریده شده و به اشکال اشک‌مانند تکامل می‌یابند (دینگ و همکاران، ۲۰۲۰).

یاردانگ‌ها بر روی زمین در مراحل اولیه تشکیل، اشکال گوناگونی به خود می‌گیرند و در این فرآیند، عوامل غیربادی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. شیارهایی که توسط باد ایجاد می‌شوند، از صدها متر تا چند سانتی‌متر اندازه دارند و نقش کلیدی دارند (بروکس، ۲۰۰۱؛ بریستو و همکاران^۱، ۲۰۰۹). آبراهه‌های اولیه (وارد و گریلی، ۱۹۸۴؛ الدوساری و همکاران، ۲۰۰۹) یا کانال‌های دیرینه (ژنگ و همکاران^۲، ۲۰۰۲) در حوضه‌های آبریز، منشأ اصلی تشکیل یاردانگ‌ها هستند. شکاف‌های ناشی از هوازگی فیزیکی نیز ممکن است در رسوبات دریاچه‌ای یاردانگ‌ها را ایجاد کنند. همچنین، لایه‌های سخت و نرم ناشی از حرکات تکتونیکی، می‌توانند به تشکیل یاردانگ‌ها منجر شوند (هو و همکاران، ۲۰۱۷؛ پلتیر و همکاران، ۲۰۱۸).

محدوده مورد مطالعه

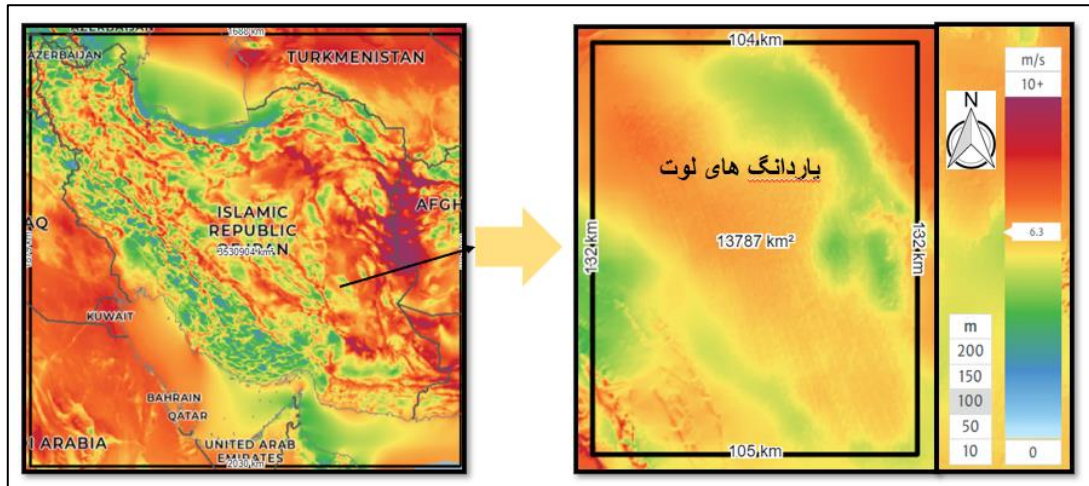
بیابان لوت ایران

بیابان لوت، با مساحتی در حدود ۵۱،۸۰۰ کیلومتر مربع، در جنوب شرق ایران و در محدوده سه استان کرمان، سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی واقع شده است (شکل ۲). این منطقه بخشی از حوزه آبخیز لوت محسوب می‌شود که گستره‌ای بالغ بر ۱۷۵،۰۰۰ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. دشت لوت، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و خشک‌ترین بیابان‌های جهان، یک فرونشست نامتقارن است که در طول زمان تحت تأثیر فرآیندهای ژئومورفولوژیک شکل گرفته است. میانگین بارندگی سالانه این منطقه، بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی ایران، کمتر از ۵۰ میلی‌متر است و شاخص خشکی آن، مطابق تعریف برنامه محیط‌زیست سازمان ملل، کمتر از ۱ می‌باشد (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۹). دمای هوای این منطقه نیز در بازه‌ای بین ۱۱ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است (احسانی، ۱۳۸۹).

از برجسته‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژیک بیابان لوت می‌توان به یاردانگ‌ها اشاره کرد که در دو مقیاس مگایاردانگ‌ها و یاردانگ‌های کوچک دیده می‌شوند. یاردانگ‌های کوچک این منطقه مساحتی بالغ بر ۵۶۶/۰۶ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهند که معادل ۰/۵۵ درصد از مساحت کل بیابان لوت است. در مقابل، مگایاردانگ‌های منحصربه‌فرد و گسترده، که عمدتاً در نواحی غربی دشت لوت مشاهده می‌شوند، وسعتی در حدود ۶۶۱۹/۳۳ کیلومتر مربع دارند و ۶/۴۴ درصد از این بیابان را به خود اختصاص داده‌اند. این عوارض ژئومورفولوژیک، به‌واسطه فرسایش بادی شدید، دالان‌هایی ایجاد کرده‌اند و ارتفاع یاردانگ‌های بیابان لوت به حدود ۱۵۵ متر می‌رسد (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۹). فرآیندهای فرسایشی که در شکل‌گیری این پدیده‌ها نقش داشته‌اند، عمدتاً ناشی از بادهای شمال غربی - جنوب شرقی با سرعتی در حدود ۶ متر بر ثانیه هستند که در طول زمان بر روی چشم‌انداز بیابان تأثیرگذار بوده‌اند (احسانی، ۱۳۸۹).

^۱ - Bristow et al

^۲ - Zheng et al



شکل ۲: موقعیت و مدل رقومی ارتفاع یاردانگ های بیابان لوت

منطقه آئولیس پلانوم مریخ^۱

مریخ، به عنوان نزدیک ترین همسایه زمین در منظومه شمسی، دارای میانگین دمای سطحی بین ۱۲۳- تا ۳۳- درجه سانتی گراد است. در برخی مناطق عرض های جغرافیایی میانی نیمکره جنوبی، طی فصل تابستان، دمای روزانه ممکن است به حداکثر ۲۷ درجه سانتی گراد برسد (کار، ۲۰۰۷). جو کنونی مریخ بسیار رقیق است، به طوری که فشار جوی سطحی آن تنها ۰/۵ تا ۱ درصد فشار جو زمین است. ترکیب اصلی جو این سیاره را دی اکسید کربن (حدود ۹۵ درصد) تشکیل می دهد، در حالی که نیتروژن و آرگون نیز به میزان اندکی در آن حضور دارند (رید و لوئیس، ۲۰۰۷).

سرعت باد سطحی در نقاط مختلف مریخ تفاوت های چشمگیری دارد. برای نمونه، در محل فرود ویکینگ، سرعت باد معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه متغیر بوده و در شرایط خاص ممکن است به ۱۵۰ متر بر ثانیه نیز برسد (چمبرلین^۴ و همکاران، ۱۹۷۶). در مقابل، داده های به دست آمده از ایستگاه نظارت محیطی رورور (REMS) در مأموریت MSL نشان می دهند که سرعت باد در این ایستگاه از ۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه نوسان داشته و اغلب در بازه ۲ تا ۶ متر بر ثانیه قرار دارد (ویودز-موریس^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس مطالعات مختلف، در نیمی از سال مریخی^۶، طوفان های گرد و غبار فعال شده و از مهم ترین عوامل تغییرات سطحی این سیاره محسوب می شوند. داده های حاصل از اکتشافات دورسنجی نشان می دهند که بادهای، نقش کلیدی در ایجاد اشکال زمین شناسی متعددی، از جمله یاردانگ ها، ایفا کرده اند (چمبرلین و همکاران، ۱۹۷۶؛ ویودز-موریس و همکاران، ۲۰۱۷). در همین راستا، این پژوهش به بررسی یاردانگ های منطقه آئولیس پلانوم در عرض جغرافیایی ۲/۸۳۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۴۷/۶۴۷ درجه شرقی می پردازد (شکل ۳).

^۱ - Aeolis Planum on Mars

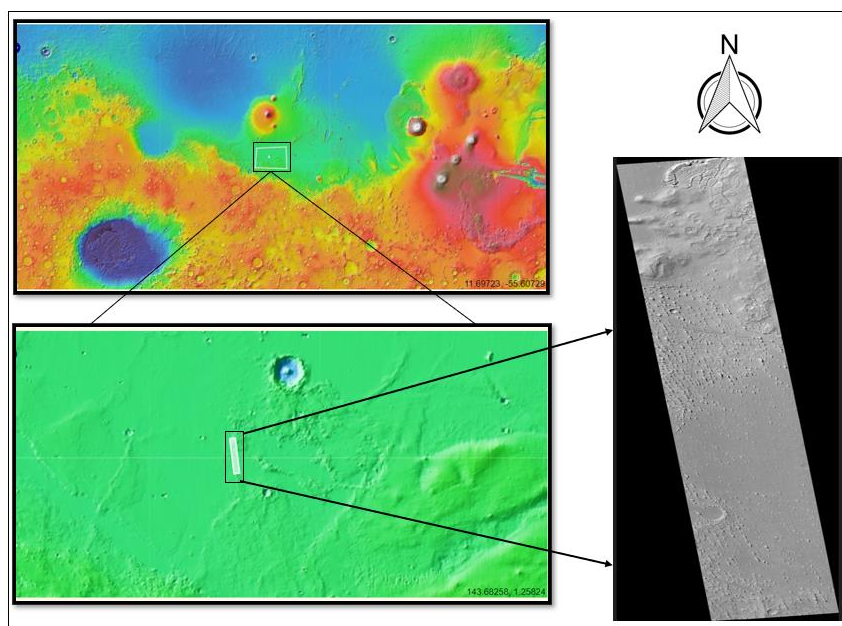
^۲ - Carr

^۳ - Read and Lewis

^۴ - Chamberlain

^۵ - Viúdez-Moreiras

^۶ - یک سال مریخی تقریباً ۶۸۷ روز زمینی طول می کشد، که معادل تقریباً ۱/۸۸ سال زمینی است. بنابراین، نیمی از سال مریخی حدود ۳۴۴ روز زمینی خواهد بود.



شکل ۳: یاردانگ‌های منطقه‌ی آنولیس پلانوم مریخ (تصاویر ماهواره‌ای)

روش پژوهش

در این پژوهش، فرایند گردآوری و تحلیل داده‌ها با استفاده از ترکیبی از تصاویر ماهواره‌ای، مدل‌های رقومی ارتفاع و داده‌های میدانی صورت گرفته است. در گام نخست، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ با بهره‌گیری از بستر گوگل ارث انجین^۱ برای محدوده بیابان لوت دریافت گردید. به موازات این مرحله، نقشه مدل رقومی ارتفاع این منطقه از طریق پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۲ استخراج شد. بر اساس این داده‌ها، یاردانگ‌های موجود در محدوده مورد مطالعه شناسایی و موقعیت آن‌ها در نقشه‌های تهیه شده مشخص گردید (شکل ۲). در ادامه، به منظور تحلیل نقش جریان‌های بادی در شکل‌گیری این ساختارهای ژئومورفولوژیکی، داده‌های مدل رقومی ارتفاع منطقه در محیط اطلس جهانی باد^۳ بارگذاری شد و پارامترهای اقلیمی از جمله فراوانی، سرعت و قدرت باد در راستاهای مختلف محاسبه و تحلیل گردید. داده‌های حاصل از این مراحل، مبنای مطالعات میدانی قرار گرفت و طی مشاهدات میدانی و تصویربرداری میدانی که در تاریخ ۱۴۰۳/۸/۱۰ انجام شد، اطلاعات تکمیلی درباره ویژگی‌های هندسی و مورفولوژیکی یاردانگ‌های منتخب گردآوری گردید. پس از تکمیل مرحله گردآوری داده‌ها، فرایند مدل‌سازی مراحل تکامل یاردانگ‌های بیابان لوت با بهره‌گیری از نرم‌افزار راینو^۴ و افزونه گرس‌هاپر^۵ انجام گرفت. نرم‌افزار راینو به‌عنوان یکی از ابزارهای پیشرفته در حوزه طراحی سه‌بعدی و مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده شناخته می‌شود. این نرم‌افزار مبتنی بر منحنی‌های نرَبز^۶ عمل می‌کند که در مقایسه با مدل‌های مش‌محور مورد استفاده در نرم‌افزارهایی نظیر تری‌دی‌اس مکس^۷، اسکچ‌آپ^۸ و اتوکد^۹، از دقت و انعطاف‌پذیری بالاتری در بازنمایی اشکال پیچیده و تبدیل مدل‌های مجازی به نمونه‌های واقعی برخوردار است.

^۱ Google Earth Engine

^۲ - United States Geological Survey (USGS)

^۳ - Global Wind Atlas

^۴ - Rhinoceros

^۵ - Grasshopper3D

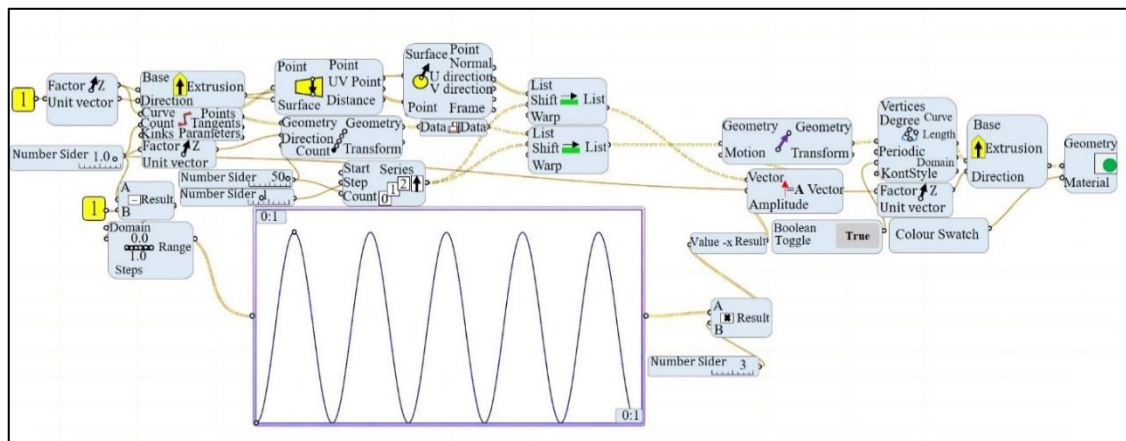
^۶ - Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)

^۷ - 3ds Max

^۸ - SketchUp

^۹ - AutoCAD

در این پژوهش، به منظور بازنمایی فرایند تکامل یاردانگ‌ها، از رویکرد طراحی پارامتریک استفاده شد؛ رویکردی که پیوندی میان طراحی و برنامه‌نویسی ایجاد کرده و امکان تعریف الگوهای مولد، تکرارپذیر و تغییرپذیر را بر اساس مجموعه‌ای از پارامترهای ورودی فراهم می‌سازد. در این راستا، افزونه گرس‌هاپر، که توسط دیوید راتن توسعه یافته و تحت عنوان گرس‌هاپر تری‌دی^۵ عرضه شده است، به‌عنوان ابزار اصلی مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. از ویژگی‌های مهم این افزونه، قابلیت ایجاد الگوریتم‌های مدل‌سازی بدون نیاز به کدنویسی متنی است؛ به گونه‌ای که طراحان قادرند از طریق رابط گرافیکی، متغیرهای مورد نظر خود را تعریف و در لحظه، تغییرات مدل را مشاهده و ارزیابی نمایند. این قابلیت موجب شد تا مراحل مختلف تکامل هندسی یاردانگ‌های بیابان لوت با دقت بالا در محیط دیجیتال شبیه‌سازی گردد و الگوریتم‌های پارامتریک تدوین شده در نهایت منجر به تولید مدل‌های سه‌بعدی این اشکال ژئومورفولوژیکی شد (شکل ۴).



شکل ۴: الگوریتم مدل‌سازی پارامتریک یاردانگ‌های لوت

برای شناسایی یاردانگ‌های مریخ، از داده‌های تصویری سامانه HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) که پیشرفته‌ترین دوربین ارسال شده به یک سیاره دیگر محسوب می‌شود، استفاده شد (McEwen et al., 2007). این سامانه یکی از شش ابزار مدارگرد شناسایی مریخ است که در سال ۲۰۰۵ پرتاب و از سال ۲۰۰۶ تصویربرداری از سطح این سیاره را آغاز کرده است. قابلیت تصویربرداری این سامانه با وضوح ۳۰ سانتی‌متر در هر پیکسل، آن را به یکی از دقیق‌ترین ابزارهای موجود در مطالعه سطح مریخ تبدیل کرده است (NASA/JPL-Caltech/UA Arizona). تصویر مورد استفاده در این پژوهش از نوع نزولی^۱ بوده و عرض منطقه ثبت‌شده در تصاویر سیاه‌وسفید برابر با ۵۰ کیلومتر است. مشخصات دقیق این تصویر در جدول ۱ و فرایند کلی پژوهش در شکل ۵ ارائه شده است (Xiao, 2021).

^۱ - Descending

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره HiRISE از یاردانگ‌های منطقه آنولیس پلانوم (NASA/JPL-Caltech/UArizona)

تاریخ برداشت	۱۳ مارس ۲۰۱۲
زمان محلی مریخ	۱۵:۱۵
عرض جغرافیایی (مرکز)	۲/۸۳۶ درجه
طول جغرافیایی (شرق)	۱۴۷/۶۴۷ درجه
ارتفاع فضاپیما	۲۷۲/۶ کیلومتر
محدوده مقیاس تصویر اصلی	بنابراین اشیاء با عرض ۱۷۳ سانتی‌متر تفکیک می‌شوند (۲×۲ binning) با ۵۷/۸ سانتی‌متر/پیکسل
مقیاس پیش‌بینی شده نقشه	۵۰ سانتی‌متر/پیکسل و شمال بالاست
طرح‌ریزی نقشه	مستطیل شکل
زاویه انتشار	۲۰/۱ درجه
زاویه فاز	۳۷/۳ درجه
زاویه تابش خورشیدی	۵۲ درجه، با خورشید در حدود ۳۸ درجه بالاتر از افق
طول جغرافیایی خورشیدی	۸۲/۶ درجه، بهار شمالی
آزیموت شمالی	۹۶ درجه
آزیموت زیر خورشیدی	۳۷/۷ درجه



شکل ۵. فرآیند انجام پژوهش

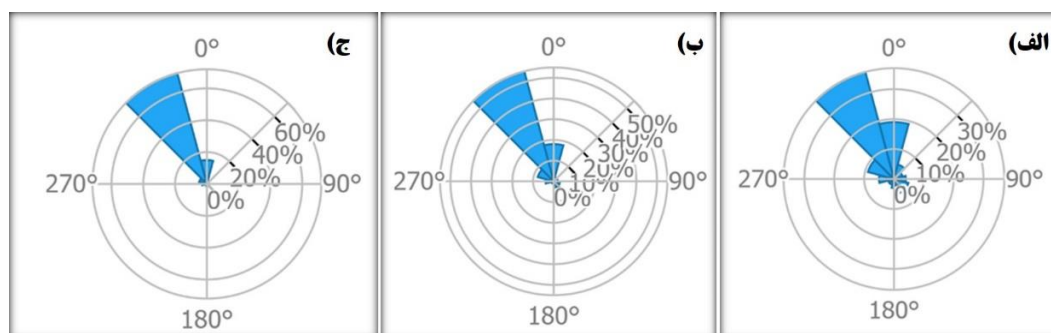
نتایج

مطالعه مورفومتریکی یاردانگ ها و ویژگی های مرتبط با آن ها در بیابان ها به دلیل تأثیرات مهمی که در فرآیندهای رسوبی و مورفولوژیکی محیط های خشک دارند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این تحقیقات می تواند به درک بهتر الگوهای باد، پدیده های فرسایشی و تغییرات محیطی کمک کند. در این بخش، فراوانی، سرعت، و قدرت گلباد در یاردانگ های بیابان لوت محاسبه و تحلیل شده است.

- فراوانی، سرعت و قدرت گلباد

نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی باد در یاردانگ های بیابان لوت ۳۰ درصد است و این بادهای از سمت شمال غرب می وزند (شکل ۶-الف). این میزان بالا نشان دهنده آن است که بادهای شمال غربی به طور پیوسته و با فراوانی زیاد در این منطقه حاضر هستند و تأثیرات زیادی در فرآیندهای فرسایشی و ایجاد ساختارهای ژئومورفولوژیکی مانند یاردانگ ها دارند. فراوانی بالا همچنین نشان می دهد که بادهای شمال غربی به طور مرتب و مداوم در این ناحیه می وزند و موجب شکل گیری ویژگی های خاصی در سطح زمین می شوند. علاوه بر فراوانی، سرعت باد نیز عامل مهمی در شکل گیری یاردانگ ها است. به طوریکه ۵۰ درصد از سرعت بادهای غالب شمال غرب در محدوده مورد مطالعه تعلق دارد (شکل ۶-ب). سرعت بالای این بادهای نقش زیادی در تسریع فرآیندهای فرسایش و انتقال رسوبات دارد. بادهای با سرعت زیاد می توانند ذرات ریز را جابه جا کنند و سطح یاردانگ ها را دستخوش تغییرات سریع تری کنند. سرعت باد به ویژه در مناطق بیابانی که جابه جایی رسوبات و فرسایش توسط باد امری رایج است، تأثیر عمیقی بر ویژگی های زمین شناسی دارد. سومین پارامتر، قدرت باد است. طبق نتایج، بادهای شمال غرب در یاردانگ های بیابان لوت ۶۰ درصد قدرت دارند (شکل ۶-ج). قدرت بالا این بادهای نشان دهنده آن است که بادهای شمال غربی می توانند تأثیرات زیادی بر سطح زمین بگذارند و موجب تغییرات عمده ای در ساختارهای ژئومورفولوژیکی شوند. قدرت باد ارتباط مستقیم با توانایی آن در انتقال و جابه جایی ذرات رسوبی دارد و این فرآیند به شدت بر شکل گیری یاردانگ ها تأثیر می گذارد.

در نهایت، به طور کلی می توان گفت که بیشترین فراوانی باد در یاردانگ های بیابان لوت مربوط به بادهای شمال غربی است که تأثیر بسزایی در تشکیل و توسعه یاردانگ ها در این منطقه دارند. این بادهای با ویژگی های خاص خود از جمله فراوانی بالا، سرعت زیاد و قدرت زیاد، نقش کلیدی در فرآیندهای فرسایش و شکل گیری ساختارهای مورفولوژیکی دارند و باعث می شوند که یاردانگ ها به طور خاص در این ناحیه شکل گیرند. این تحلیل ها نشان دهنده ارتباط تنگاتنگ بین ویژگی های باد و ساختارهای زمین شناسی در محیط های خشک و نیمه خشک هستند.



شکل ۶: الف) فراوانی گلباد در مرکز یاردانگ های بیابان لوت؛ ب) سرعت گلباد در مرکز یاردانگ های بیابان لوت و ج) قدرت گلباد در مرکز یاردانگ های بیابان لوت

مدل مورفولوژیکی یاردانگ‌های بیابان لوت

فرآیندهای مورفولوژیکی در بیابان لوت که منجر به شکل‌گیری یاردانگ‌ها می‌شوند، شامل دو دسته متضاد از عوامل فرسایشی هستند: یکی فرآیندهایی که به تقویت و رشد ناهمواری‌ها و یاردانگ‌ها کمک می‌کنند، و دیگری فرآیندهایی که به هموارسازی و کاهش برجستگی‌های زمین می‌انجامند. در شرایطی که سرعت فرسایش سطحی یاردانگ‌ها (پایین آمدن یا هموارسازی یاردانگ‌ها)، که موجب کاهش ارتفاع سطح زمین می‌شود، از سرعت فرسایش بادی (عمیق‌تر شدن دالان‌های بین یاردانگ‌ها) که باعث تغییر شکل و جابه‌جایی مواد سطحی است، کندتر باشد، یاردانگ‌ها به رشد و توسعه خود ادامه می‌دهند. به عبارت دیگر، زمانی که فرسایش بادی بر فرسایش عمودی غالب شود، ساختارهای یاردانگ بزرگ‌تر و متمایزتر می‌شوند.

برعکس، زمانی که این نسبت معکوس شود و فرسایش سطحی یاردانگ‌ها از فرسایش بادی پیشی بگیرد، یاردانگ‌ها به تدریج تحلیل می‌روند و فرسایش‌های بیشتری باعث کاهش شکل‌گیری این ساختارها می‌شود. با این حال، علی‌رغم تحلیل و کاهش اندازه یاردانگ‌ها، نابودی کامل آن‌ها بعید به نظر می‌رسد. در طول زمان و با افزایش فاصله میان یاردانگ‌ها، فرآیند هموارسازی که موجب کاهش برجستگی‌های زمین می‌شود، به تدریج می‌تواند اثرات فرسایش بادی را کاهش داده و یاردانگ‌ها را کمتر قابل مشاهده کند.

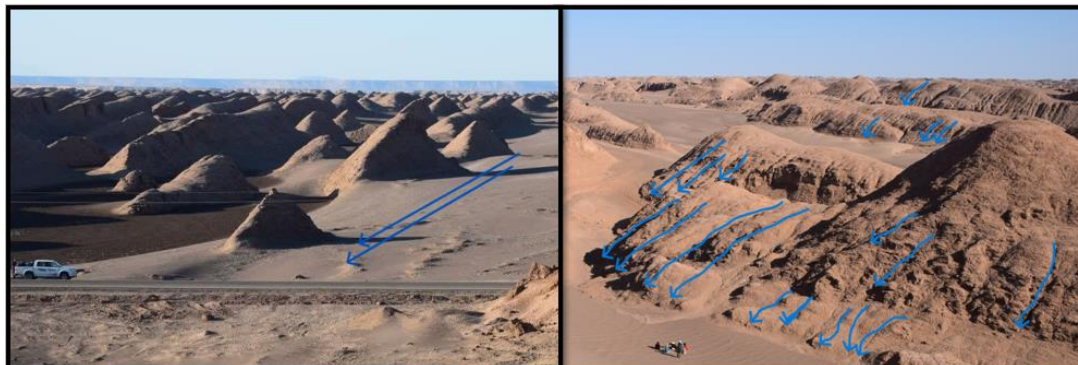
در این میان، باید توجه داشت که پایان فرآیند تحلیل یاردانگ‌ها تنها موقتی است. چراکه پس از دوره‌ای از هموارسازی، ممکن است شرایط محیطی مجدداً به گونه‌ای تغییر کند که فرآیندهای فرسایش بادی دوباره آغاز شوند. این تغییرات می‌تواند به شکل‌گیری یاردانگ‌های جدید منتهی شود و یک چرخه جدید از فرسایش و شکل‌گیری ساختارهای مورفولوژیکی را در پی داشته باشد. بنابراین، مدل مورفولوژیکی یاردانگ‌ها در بیابان لوت یک فرآیند پویا و تکراری است که تحت تأثیر مداوم عوامل محیطی و فرسایشی قرار دارد.

فرآیندهای مؤثر در پیدایش و تکامل یاردانگ‌های بیابان لوت

نتایج مطالعات انجام شده در ارتباط با یاردانگ‌های بیابان لوت به همراه شواهد میدانی نشان می‌دهد که پیدایش و تکامل یاردانگ‌های بیابان لوت نتیجه‌ی تعامل پیچیده‌ی عوامل درونی و بیرونی است که در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بر شکل‌گیری این عوارض ژئومورفولوژیک اثرگذارند (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴). (شکل ۷ و ۸). از مهم‌ترین عوامل درونی می‌توان به ویژگی‌های ساختاری و لیتولوژیکی بستر زمین‌شناختی اشاره کرد که میزان مقاومت در برابر فرسایش را تعیین می‌کنند. در کنار این عوامل، فرآیندهای بیرونی، به‌ویژه بادهای غالب تک‌جهتی، نقشی تعیین‌کننده در فرسایش انتخابی و شکل‌دهی به این ساختارهای آبی-بادی در بیابان لوت ایفا می‌کنند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴) (شکل ۷-الف). علاوه بر اثر مستقیم باد، سیستم‌های هیدرولوژیکی و جریان‌های آب سطحی در پیرامون یاردانگ‌های بیابان لوت از طریق تغییرات در رژیم فرسایشی و انتقال رسوبات، نقش مهمی در تحول مورفولوژیکی آن‌ها دارند (احسانی، ۱۳۸۹) (شکل ۷-ب). منابع ذرات فرسایشی موجود در مجاورت یاردانگ‌های بیابان لوت نیز به‌عنوان عامل تسریع‌کننده‌ی فرسایش بادی، در فرآیند تخریب و توسعه‌ی این عوارض ژئومورفیک مؤثر هستند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵). در مرحله‌ی تکامل، فرآیندهای متعددی از جمله ریزش‌های ناگهانی ناشی از تضعیف ساختاری و هوازگی فیزیکی (شکل ۸-الف)، فرسایش خندقی ناشی از جریان‌های سطحی و تغییرات رطوبتی (شکل ۸-ب) بر تغییر شکل یاردانگ‌های بیابان لوت اثر می‌گذارند. این عوامل، در تعامل با یکدیگر، سبب توسعه‌ی ویژگی‌های خاص ژئومورفولوژیک این سازه‌ها می‌شوند.

بدین ترتیب، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که یاردانگ‌های بیابان لوت تحت تأثیر هم‌زمان فرآیندهای درونی و بیرونی شکل گرفته و تکامل یافته‌اند. فرآیندهای بادی و هیدرولوژیکی، همراه با تفاوت‌های لیتولوژیکی، موجب ایجاد

الگوهای فرسایشی متنوع در این منطقه شده و در نهایت، اشکال ژئومورفولوژیک متمایز یاردانگ‌های بیابان لوت را پدید آورده‌اند.



الف

ب

شکل ۷: الف) بادهای تک‌جهتی در شکل‌دهی یاردانگ‌های لوت، ب) سیستم جریان‌های آبی در شکل‌دهی یاردانگ‌های لوت



الف

ب

شکل ۸: الف) ریزش در شکل‌دهی و فرسایش یاردانگ‌های لوت، ب) فرسایش خندقی در یاردانگ‌های لوت

مراحل توسعه یاردانگ‌های بیابان لوت

توسعه یاردانگ‌ها در بیابان لوت یک فرآیند پیچیده و تدریجی است که تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل محیطی و طبیعی قرار دارد. این فرآیند طی مراحل مختلفی به وقوع می‌پیوندد که هر یک ویژگی‌ها و شرایط خاص خود را دارند. در ابتدا، باد یا آب به سطح زمین برخورد کرده و ذرات ریز سنگی را از سطح جدا می‌کنند. سپس این ذرات به کمک باد جابه‌جا شده و به مناطق پایین‌تر منتقل می‌شوند. در این مراحل اولیه، سطح زمین به تدریج دستخوش تغییرات می‌شود که منجر به ایجاد شیارها و فرورفتگی‌هایی در آن می‌گردد. با گذشت زمان، این تغییرات به تدریج به یاردانگ‌های کامل و شکل‌گیری ناهمواری‌ها منتهی می‌شود. باین‌حال، هم‌زمان با توسعه یاردانگ‌ها، فرآیندهای تخریبی نیز می‌تواند موجب تحلیل این ساختارها شود.

مطالعات انجام شده بر روی یاردانگ‌های بیابان لوت این امکان را فراهم می‌آورد که یک مدل پنج مرحله‌ای برای توسعه یاردانگ‌ها ارائه شود. این مدل تأثیر اصلی را برای عوامل بادی در روند شکل‌گیری یاردانگ‌ها قائل است، و می‌توان آن را به‌عنوان یک چارچوب کلی برای مطالعه یاردانگ‌ها در دیگر سیارات، از جمله مریخ، به کار گرفت. این مدل کمک می‌کند

تا فرآیند تکامل یاردانگ‌ها را به صورت یک چرخه پویا و مستمر درک شود. در ادامه، مراحل مختلف فرآیند توسعه یاردانگ‌های لوت بیان شده است:

(۱) مرحله جنینی: در این مرحله، اولین نشانه‌های شکل‌گیری یاردانگ‌ها به صورت شکاف‌ها، گودی‌های کوچک (شکل ۹-الف)، شیارها (توسط آب یا باد) (شکل ۹-ب) و گسل‌ها (شکل ۹-ج) در سطح زمین ظاهر می‌شود. این یاردانگ‌ها در این مرحله بسیار حساس به تغییرات محیطی هستند و ممکن است به سرعت از بین بروند. عواملی مانند نوع سنگ‌ها، جهت باد و میزان رطوبت تأثیر عمده‌ای در شکل‌گیری و رشد این یاردانگ‌ها دارند. در این مرحله، فرآیندهای اولیه فرسایش که توسط باد یا آب انجام می‌شوند، اثرگذارترین عامل در شکل‌گیری این ساختارها هستند.

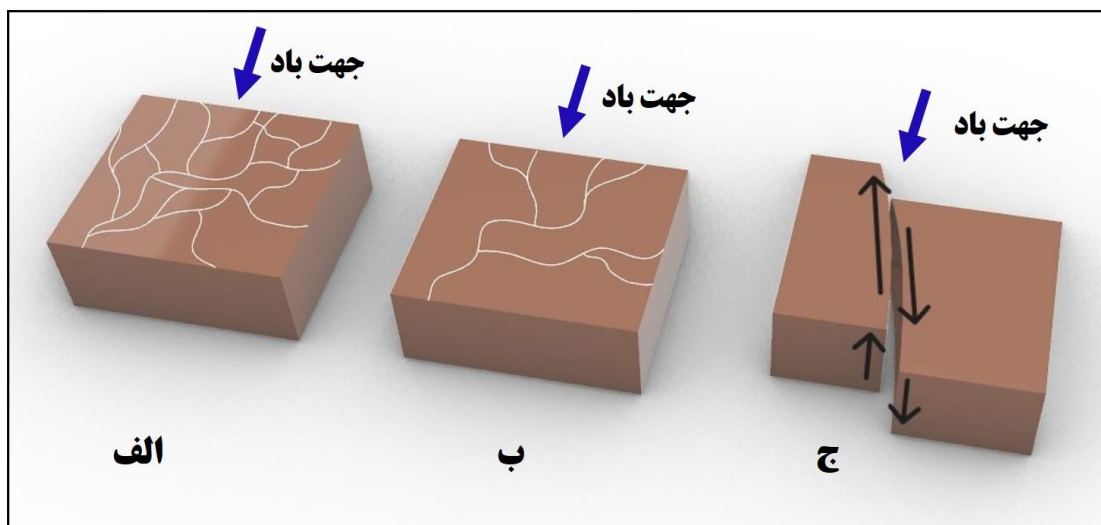
(۲) مرحله جوانی: در این مرحله، یاردانگ‌ها به‌طور قابل‌توجهی شروع به شکل‌دهی الگوهای منظم می‌کنند. این الگوها شامل راهروها و پشته‌های موازی در جهت باد هستند. در این مرحله، تغییرات قابل‌توجهی در ابعاد یاردانگ‌ها مشاهده می‌شود. باد به‌عنوان عامل اصلی فرسایش در این مرحله نقش مهمی در شکل‌گیری ویژگی‌های سطحی یاردانگ‌ها ایفا می‌کند، که موجب توسعه و رشد آن‌ها می‌شود (شکل‌های ۱۰-الف و ۱۱-الف).

(۳) مرحله بلوغ: در این مرحله، سرعت رشد یاردانگ‌ها به‌طور قابل‌توجهی کندتر می‌شود. این روند به تدریج منجر به کاهش ارتفاع یاردانگ‌ها و کاهش شیب‌های آن‌ها می‌گردد. بسیاری از یاردانگ‌ها در این مرحله شکلی اشکی یا همان «یاردانگ‌های پشت ماهی» پیدا می‌کنند. این تغییرات به دلیل کاهش شدت فرسایش و کاهش سرعت حرکت ذرات معلق در هوا رخ می‌دهد (شکل‌های ۱۰-ب و ۱۱-ب).

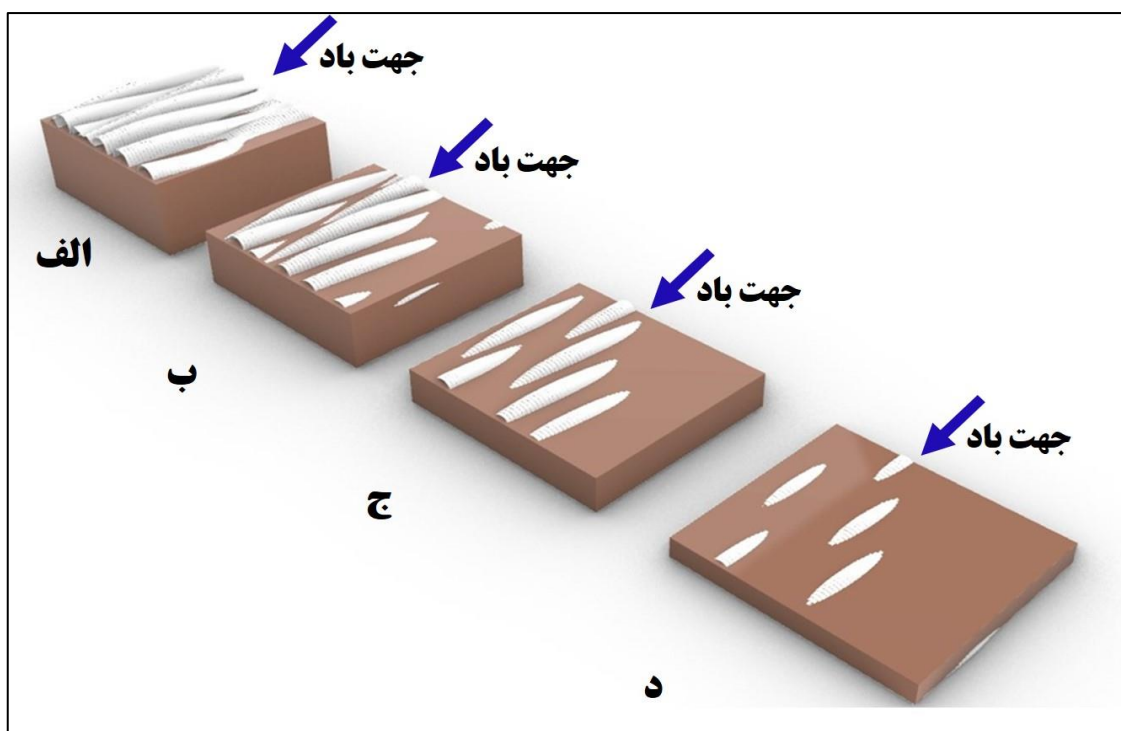
(۴) مرحله میان‌سالی: در این مرحله، یاردانگ‌ها به شکل ساده‌تری در می‌آیند. ارتفاع آن‌ها کاهش می‌یابد و شیب‌ها به‌طور قابل‌توجهی ملایم‌تر می‌شوند. فرسایش بادی هنوز به آرامی به تخریب و کاهش ابعاد یاردانگ‌ها ادامه می‌دهد، اما شدت آن کمتر از مراحل قبلی است. این مرحله نشان‌دهنده یک دوره تثبیت نسبی در فرآیند فرسایش است (شکل‌های ۱۰-ج و ۱۱-ج).

(۵) مرحله پیری: در این مرحله، فرسایش بادی به‌شدت بر یاردانگ‌ها تأثیر گذاشته و آن‌ها را به تدریج تخریب می‌کند. ارتفاع یاردانگ‌ها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و شکل آن‌ها تغییرات عمده‌ای را تجربه می‌کند. درنهایت، این یاردانگ‌ها به‌طور کامل از بین می‌روند و سطح زمین به حالت اولیه خود باز می‌گردد. این مرحله نمایانگر پایان عمر یاردانگ‌ها است، جایی که اثرات فرسایش به اوج خود می‌رسد و تنها تکه‌هایی از آن‌ها باقی می‌ماند (شکل‌های ۱۰-د و ۱۱-د).

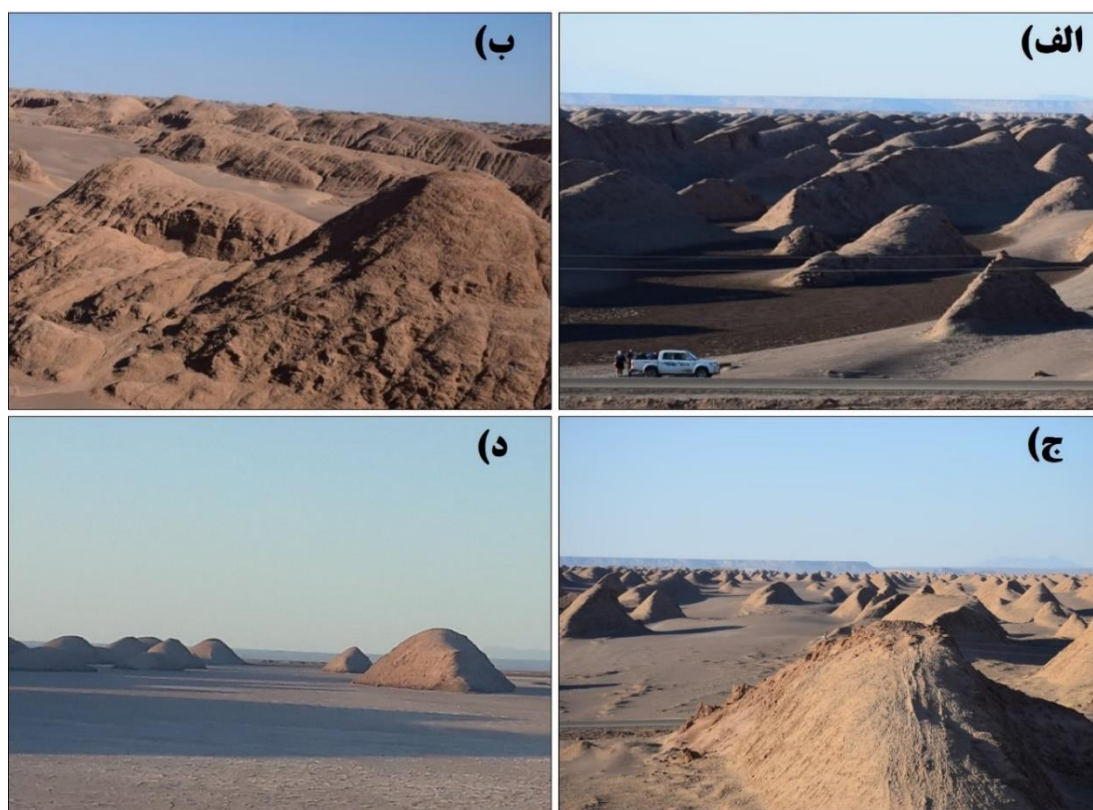
این مدل پنج مرحله‌ای نه تنها فرآیند تکامل یاردانگ‌ها را به‌طور کامل توضیح می‌دهد، بلکه به تحلیل و تفسیر تأثیرات عوامل مختلف مانند باد، آب، نوع سنگ‌ها و دیگر ویژگی‌های محیطی بر شکل‌گیری و تحلیل این ساختارهای طبیعی می‌پردازد.



شکل ۹: الف) مرحله جنینی یاردانگ به صورت شکافها یا گودی های کوچک؛ ب) یاردانگ جنینی به صورت شیارها به وسیله آب یا باد؛ ج) تشکیل یاردانگ جنینی توسط گسل.



شکل ۱۰: الف) مرحله جوانی یاردانگ؛ ب) مرحله بلوغ یاردانگ؛ ج) مرحله میان سالی یاردانگ؛ د) مرحله پیری یاردانگ



شکل ۱۱: تصاویری از مراحل توسعه یاردانگ‌های بیابان لوت (الف) مرحله جوانی یاردانگ؛ (ب) مرحله بلوغ یاردانگ؛ (ج) مرحله میان‌سالی یاردانگ؛ (د) مرحله پیری یاردانگ

تحلیل یاردانگ‌های مریخ

یاردانگ‌های موجود در منطقه آتولیس پلانوم مریخ، از نوع گوژپشتی^۱ بوده و با ویژگی‌های خاص خود، به شکل‌های گرد و با ساختارهای لایه‌ای و شاخه‌ای بر روی قسمت بالایی مشخص می‌شوند. این یاردانگ‌ها به‌ویژه در این منطقه، به‌طور فراوان دیده می‌شوند و دارای ویژگی‌هایی هستند که در مقایسه با دیگر مناطق سیاره‌ای از نظر ساختار و شکل ظاهری متمایز می‌گردند. از جمله ویژگی‌های بارز این یاردانگ‌ها می‌توان به سرهای کوتاه، بال‌های هم‌تراز و دم‌های مخروطی اشاره کرد. در برخی موارد، این یاردانگ‌ها دارای مراکز باریکی هستند که خود نشانه‌ای از پیچیدگی‌های فرسایش و تغییرات ساختاری در این منطقه است (شکل ۱۲-*c*).

یاردانگ‌های منطقه آتولیس پلانوم علاوه بر ویژگی‌های ظاهری، دارای ساختارهای لایه‌ای نیز هستند (شکل ۱۲-*a*)، که برخی از این لایه‌ها شکسته و با سطوح خشن ترکیب شده‌اند (شکل ۱۲-*b*). این ویژگی‌ها در کنار یکدیگر نشان‌دهنده فرآیندهای فرسایشی پیچیده‌ای هستند که طی زمان در این منطقه رخ داده است. علاوه بر این، فواصل میان یاردانگ‌ها نسبتاً زیاد است و سطح منطقه به‌طور کلی نسبت به دامنه‌های اطراف خود خشن‌تر به نظر می‌رسد. چنین ویژگی‌هایی می‌تواند ناشی از فرسایش‌های طولانی‌مدت ناشی از باد و دیگر عوامل محیطی باشد که باعث شکل‌گیری این ساختارها شده است.

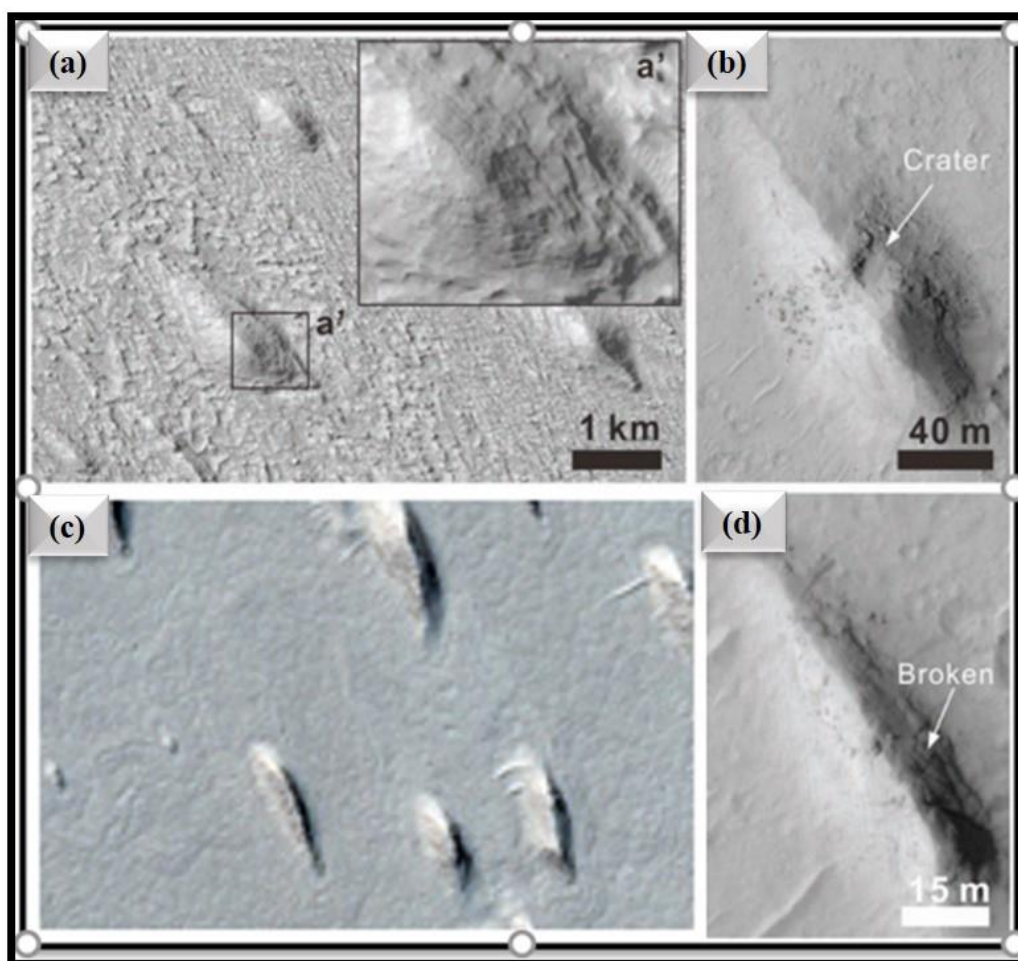
یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته یاردانگ‌های منطقه آتولیس، حضور فراوان یاردانگ‌های نوع پشت ماهی است که به شکل‌های کشیده و با خط الراس مشخص در جهت جنوب شرق به شمال غرب قرار دارند (شکل ۱۲-*c*). این خط

¹ - Hunchback

الراس‌ها به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر جهت باد و فرآیندهای فرسایشی بر شکل‌گیری این یاردانگ‌ها هستند. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در کنار ساختارهای چندلایه‌ای یاردانگ‌های نوع پشت ماهی، به‌طور ویژه در شمال آئولیس پلانوم قابل مشاهده است. ساختارهای چندلایه‌ای این یاردانگ‌ها دارای ترک‌ها و بلوک‌های مشخصی هستند که بر روی سطوح آن‌ها نمایان است. نوارهای تاریک نیز بر روی دامنه‌های این یاردانگ‌ها دیده می‌شود که به‌طور واضحی نشان‌دهنده تأثیرات فرسایشی باد بر این ساختارها است.

فواصل میان یاردانگ‌ها در منطقه آئولیس پلانوم، علاوه بر اینکه زیاد است، کف این گودال‌ها نیز بسیار گسترده و صاف است. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده فرسایش‌های مداوم و تأثیرات باد بر شکل‌دهی به این ساختارها هستند. همچنین، فواصل بین یاردانگ‌ها توسط ریپل مارک‌ها و گرد و غبار پوشیده شده است که خود بیانگر فرآیندهای بادی و جهت حرکت باد در این منطقه است. حضور این ریپل مارک‌ها به‌وضوح جهت باد موازی در منطقه آئولیس پلانوم را نشان می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مهم در تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی سیاره مریخ مورد استفاده قرار گیرد.

این تحلیل‌ها و ویژگی‌ها، نه‌تنها کمک می‌کند تا یاردانگ‌های مریخ بهتر درک شود، بلکه می‌تواند به شبیه‌سازی و مطالعه فرآیندهای مشابه در دیگر سیارات نیز کمک کنند. بنابراین، این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان یک مبنای علمی در مطالعات مربوط به ژئومورفولوژی مریخ و دیگر سیارات سنگی مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۱۲: یاردانگ‌های آئولیس؛ (a) تصویر CTX از منطقه آئولیس؛ (b) ر سوبات لایه‌ای یاردانگ‌های منطقه آئولیس؛ (c) نمایی از یاردانگ‌ها آئولیس؛ (d) نمونه‌ای از یاردانگ کوچک منطقه آئولیس (منبع، تصاویر HiRISE)

بحث

مقایسه‌ی یاردانگ‌های بیابان لوت و یاردانگ‌های آئولیس مریخ نشان‌دهنده‌ی شباهت‌ها و تفاوت‌های قابل‌توجهی است که می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای فرسایش بادی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی در دو سیاره مختلف کمک کند. این پژوهش ابعاد مختلف شباهت‌ها و تفاوت‌های یاردانگ‌ها را از منظر شکل ظاهری، ترکیب رسوبی، فرآیندهای تشکیل، مقیاس، سن و ترکیب مورد بررسی قرار می‌دهد (جدول‌های ۲ و ۳).

اولین شباهت برجسته میان یاردانگ‌های بیابان لوت و آئولیس مریخ، شکل ظاهری آن‌ها است. هر دو نوع یاردانگ‌ها، به‌ویژه در اثر فرسایش باد، ویژگی‌هایی تیز و باریک با شیارها و خطوط موازی از خود برجای می‌گذارند که نشان‌دهنده‌ی فرآیند مشابه فرسایش بادی در این دو ناحیه است. این ویژگی‌ها نه تنها در بیابان لوت بلکه در آئولیس نیز به‌وضوح قابل مشاهده است و نشان‌دهنده‌ی تأثیرات یکسان و جهانی فرسایش باد در شکل‌گیری یاردانگ‌ها در محیط‌های بیابانی و خشک است. این شباهت در اشکال تیز و باریک و خطوط موازی نشان‌دهنده‌ی ساختارهای لایه‌ای و انعطاف‌پذیری هر دو محیط در برابر نیروهای باد است. ترکیب رسوبی یاردانگ‌ها در هر دو ناحیه نیز شباهت‌های مهمی دارد. یاردانگ‌های بیابان لوت و آئولیس مریخ عمدتاً از رسوبات سست مانند ماسه و سیلت تشکیل شده‌اند که به‌راحتی تحت تأثیر فرسایش باد قرار می‌گیرند. این رسوبات به‌ویژه در بیابان لوت به‌طور گسترده‌ای وجود دارند و در مریخ نیز ترکیب مشابهی از مواد رسوبی یافت می‌شود که در کنار اثرات فرسایشی باد، منجر به شکل‌گیری این ویژگی‌های مورفولوژیکی می‌شود. علاوه بر این، فرآیندهای تشکیل یاردانگ‌ها در هر دو ناحیه نیز مشابه هستند. به‌طور خاص، فرسایش باد و طوفان‌های شن در هر دو محیط نقش اساسی در شکل‌گیری این ساختارهای پیچیده دارند. در هر دو سیاره، باد به‌عنوان عامل اصلی فرسایش، رسوبات سطحی را جابجا می‌کند و آن‌ها را به‌صورت خطوط موازی و شیارهای عمیق در سطح زمین به نمایش می‌گذارد. این شباهت در فرآیندهای فرسایش بادی تأکید بر این دارد که یاردانگ‌ها به‌عنوان یک ویژگی مشترک، به شیوه مشابهی تحت تأثیر نیروهای محیطی مشابه شکل می‌گیرند.

باوجود شباهت‌های قابل‌توجه، یاردانگ‌های بیابان لوت و یاردانگ‌های آئولیس مریخ تفاوت‌های عمده‌ای نیز دارند که به‌ویژه از نظر مقیاس، سن و ترکیب قابل‌توجه است. یکی از اصلی‌ترین تفاوت‌ها در مقیاس این یاردانگ‌ها است. یاردانگ‌های بیابان لوت نسبت به یاردانگ‌های آئولیس مریخ کوچک‌تر هستند. بلندترین یاردانگ‌های بیابان لوت حدود ۱۵۵ متر ارتفاع دارند، درحالی‌که یاردانگ‌های آئولیس مریخ به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر و گسترده‌تر هستند و طول برخی از آن‌ها به چندین کیلومتر و ارتفاع آن‌ها به صدها متر می‌رسد. این تفاوت مقیاس ممکن است به تفاوت‌های اقلیمی، جغرافیایی و همچنین تاریخچه‌ی فرسایش در این دو ناحیه ارتباط داشته باشد.

دومین تفاوت مهم، تفاوت در سن یاردانگ‌ها است. یاردانگ‌های بیابان لوت در طول هزاران سال یا دهه‌ها شکل گرفته‌اند، درحالی‌که یاردانگ‌های آئولیس مریخ بسیار قدیمی‌تر از یاردانگ‌های بیابان لوت هستند و احتمالاً میلیون‌ها سال قدمت دارند. این تفاوت در سن می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تفاوت‌های فرسایشی در مقیاس زمانی طولانی‌تر در مریخ و در مقیاس زمانی کوتاه‌تر در بیابان لوت باشد. به‌علاوه، وجود یاردانگ‌های قدیمی‌تر در مریخ ممکن است به دلیل شرایط محیطی متفاوت و نبود شرایط پایدار آبی مشابه در مریخ باشد که باعث حفظ این ویژگی‌ها در مدت‌زمان طولانی شده است. تفاوت دیگر در ترکیب رسوبی یاردانگ‌ها است. در بیابان لوت، یاردانگ‌ها به‌طور معمول دارای رنگ‌های متنوع هستند که به ترکیب مختلف رسوبات در سطح این بیابان وابسته است. این ترکیب‌های رسوبی رنگی متنوع نشان‌دهنده‌ی تنوع مواد اولیه و فرآیندهای رسوبی است که به شکل‌گیری یاردانگ‌ها در این ناحیه کمک کرده است. در مقابل، یاردانگ‌های آئولیس مریخ عمدتاً به دلیل وجود مواد معدنی خاص و گرد و غبار موجود در جو مریخ رنگ مایل به قرمز دارند. این ویژگی می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تفاوت‌های شیمیایی در ترکیب سطح مریخ و فرآیندهای فرسایشی در مقایسه با زمین باشد.

جدول ۲: مهم‌ترین شباهت‌ها یاردانگ‌های بیابان لوت و یاردانگ‌های آنولیس مریخ

ویژگی	یاردانگ‌های بیابان لوت	یاردانگ‌های آنولیس مریخ
شباهت‌ها	شکل ظاهری	هر دو نوع یاردانگ به دلیل فرسایش باد، اشکالی تیز و باریک با شیارها و خطوط موازی دارند (احسانی، ۱۳۸۹ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Xiao, 2021؛ De Silva et al., 2010).
	ترکیب رسوبی	یاردانگ‌های هر دو ناحیه عمدتاً از رسوبات سست، مانند ماسه و سیلت تشکیل شده‌اند (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹؛ Xiao, 2021؛ De Silva et al., 2010).
	فرایند تشکیل	فرآیندهای مشابهی مانند فرسایش باد و طوفان‌های شن در شکل‌گیری یاردانگ‌ها در هر دو ناحیه نقش دارند (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹؛ Xiao, 2021؛ Wang et al., 2018).
	باد	باد به‌عنوان عامل اصلی فرسایش، رسوبات سطحی را جابجا کرده و ساختارهای باریک و شیاردار ایجاد می‌کند (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Xiao, 2021؛ De Silva et al., 2010؛ Wang et al., 2018).

جدول ۳: مهم‌ترین تفاوت‌های یاردانگ‌های بیابان لوت و یاردانگ‌های آنولیس مریخ

ویژگی	یاردانگ‌های بیابان لوت	یاردانگ‌های آنولیس مریخ
تفاوت‌ها	مقیاس	بلندترین یاردانگ‌های بیابان لوت به حدود ۱۵۵ متر ارتفاع می‌رسند و طول کوتاه‌تری نسبت به یاردانگ‌های آنولیس مریخ دارند (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۹).
	سن	یاردانگ‌های بیابان لوت در طی هزاران تا ده‌ها هزار سال شکل گرفته‌اند (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۵).
	ترکیب	یاردانگ‌های بیابان لوت رنگ‌های متنوع‌تری دارند که به نوع رسوبات موجود در آنها بستگی دارد (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹).
	ثبات ساختاری یاردانگ‌ها	پایداری در طول میلیون‌ها سال به دلیل نبود تغییرات شدید اقلیمی (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹).
	فعالیت‌های جوی مؤثر	طوفان‌های گرد و غبار عظیم، فشار جوی پایین، نبود رطوبت قابل‌توجه (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱؛ احسانی، ۱۳۸۹).
		تغییرات و فرسایش تدریجی به دلیل پویایی بیشتر شرایط محیطی. (Wang et al., 2018; Chen et al., 2021; Xiao, 2021)

نتیجه‌گیری

بیابان لوت ایران، به دلیل عوارض ژئومورفولوژیکی منحصر به فرد خود، همواره مورد توجه پژوهشگران حوزه ژئومورفولوژی و فرایندهای فرسایشی بوده است. در این پژوهش، یاردانگ‌های این منطقه با یاردانگ‌های آنولیس پلانوم در مریخ مقایسه شدند تا شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها از منظر فرایندهای تشکیل، جهت‌یابی، و مراحل تکامل مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرسایش بادی، نیروی اصلی در شکل‌گیری و توسعه یاردانگ‌های هر دو ناحیه

است. بادهای قوی و پایدار، از طریق فرآیندهای برداشت و سایش، مواد سست و کم‌مقاومت را حذف کرده و عوارض خطی و کشیده‌ای را ایجاد کرده‌اند. جهت‌گیری غالب یاردانگ‌ها در هر دو منطقه عمدتاً تحت تأثیر جهت وزش باد غالب است، به طوری که روند کشیدگی یاردانگ‌ها و دالان‌های بین آن‌ها در آئولیس مریخ و بیابان لوت، هر دو در راستای شمال غربی-جنوب شرقی شکل گرفته‌اند. با این حال، جهت وزش باد غالب در این دو منطقه تفاوت‌هایی دارد؛ بادهای غالب در آئولیس پلانوم عمدتاً از سمت جنوب شرقی به شمال غربی می‌وزند، در حالی که در بیابان لوت، بادهای غالب در راستای شمال غربی-جنوب شرقی هستند. این تفاوت در الگوی باد، بیانگر شرایط اقلیمی متفاوت و تغییرات دینامیکی باد در دو سیاره است. از منظر مراحل تکامل، یاردانگ‌های بیابان لوت عمدتاً در مرحله بلوغ قرار دارند و با ساختارهای کشیده، دالان‌های باریک، و دامنه‌های رو به باد با شیب تند مشخص می‌شوند. در مقابل، یاردانگ‌های آئولیس مریخ به میزان بیشتری شامل یاردانگ‌های نوع پشت ماهی یا گوژپستی هستند که نشان‌دهنده مراحل پیشرفته‌تر فرسایش و تکامل ژئومورفولوژیکی آن‌ها است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که یاردانگ‌های آئولیس مریخ، از نظر زمانی، نسبت به یاردانگ‌های بیابان لوت قدیمی‌تر بوده و تحت فرآیندهای فرسایشی طولانی‌تری قرار گرفته‌اند.

اگرچه یاردانگ‌های بیابان لوت و یاردانگ‌های آئولیس مریخ از نظر شکل ظاهری، ترکیب رسوبی و فرآیندهای تشکیل شباهت‌های قابل توجهی دارند، تفاوت‌های عمده‌ای در مقیاس، سن و ترکیب شیمیایی آن‌ها مشاهده می‌شود که این دو ناحیه را از یکدیگر متمایز می‌کند. بررسی این شباهت‌ها و تفاوت‌ها نه تنها درک عمیق‌تری از فرآیندهای فرسایش بادی و تأثیرات آن در محیط‌های سیاره‌ای مختلف ارائه می‌دهد، بلکه به توسعه مدل‌های دقیق‌تری از ژئومورفولوژی سیارات کمک می‌کند. این یافته‌ها به ویژه در مطالعات تطبیقی و تحقیقات فضایی حائز اهمیت بوده و می‌توانند مبنایی برای شبیه‌سازی فرآیندهای فرسایشی در دیگر سیارات باشند. به طور کلی، مقایسه ژئومورفولوژیکی یاردانگ‌های این دو منطقه نقش مهمی در تحلیل تحولات اقلیمی گذشته، درک دینامیک سطحی مریخ و زمین، و بررسی تأثیر باد در شکل‌دهی به چشم‌اندازهای سیاره‌ای دارد. این مطالعه می‌تواند به پژوهش‌های آینده در زمینه زمین‌شناسی سیاره‌ای و فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در محیط‌های مختلف کمک کرده و چارچوبی برای مطالعات مقایسه‌ای گسترده‌تر فراهم سازد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند بستری مناسب برای گسترش مطالعات تطبیقی در زمینه ژئومورفولوژی سیاره‌ای فراهم آورد، به ویژه در تحلیل مقایسه‌ای یاردانگ‌های زمین و مریخ. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته تحلیل مورفومتریک (مانند تحلیل شاخص‌های هندسی، آماری و فراکتالی)، به مقایسه‌ی نظام‌مند یاردانگ‌های واقع در بیابان لوت ایران - که به عنوان یکی از خشک‌ترین و بادخیزترین مناطق جهان شناخته می‌شود - با یاردانگ‌های سطح مریخ پرداخته شود.

منابع

- احسانی، ا.ه.، ۱۳۸۹، ژئومورفولوژی مگایاردانگ‌های لوت، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، صص ۶۳-۷۸.
- احسانی، ا.ه.، و فروتن، م.، ۱۳۹۳. پهنه‌بندی کمی زمین دیس‌های بزرگ محیط بیابانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (مقایسه کویرهای لوت ایران و کایدام چین). محیط‌شناسی، ۴۰(۲)، ۵۱۵-۵۲۷.
- احمدی، ح.، ۱۳۸۷. ژئومورفولوژی کاربردی: بیابان - فرسایش بادی (جلد ۲). انتشارات دانشگاه تهران.
- مشهدی، ن.، علوی پناه، س.ک.، و احمدی، ح.، ۱۳۸۱. مطالعه ژئومورفولوژی یاردانگ‌های لوت، بیابان، جلد ۷، شماره ۲، صص ۲۵-۴۳،۴.
- مقصودی، م.، حاجی‌زاده، ع.، نظام محله، م.ع.، و بیاتی صداقت، ز.، ۱۳۹۴. بررسی شرایط محیطی دیرینه کلوتهای تخم‌مرغی شکل دشت لوت با استفاده از دانه سنجی، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۴، شماره ۹۶، صص ۵۱-۶۴.
- مقصودی، م.، خان بابایی، ز.، محمدی، ا.، محبوبی، ص.، و بهاروند، م.، ۲۰۱۶. مطالعه شرایط محیطی دریاچه‌های پلویال ایران با استفاده از شواهد رسوبی (مطالعه موردی: کلوتهای بیابان لوت). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸(۱)، ۱۲۵-۱۴۲.

- Al-Dousari, A. M., Al-Elaj, M., Al-Enezi, E., & Al-Shareeda, A. (2009). Origin and characteristics of yardangs in the Um Al-Rimam depressions (N Kuwait). *Geomorphology*, 104(3-4), 93-104.
- Barchyn, T. E. (2018). Modeling the mechanisms behind yardang evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 618-621.
- Barchyn, T. E., & Hugenholtz, C. H. (2015). Yardang evolution from maturity to demise. *Geophysical Research Letters*, 42(14), 5865-5871.
- Bristow, C. S., Drake, N., & Armitage, S. (2009). Deflation in the dustiest place on Earth: the Bodélé Depression, Chad. *Geomorphology*, 105(1-2), 50-58.
- Brookes, I. A. (2001). Aeolian erosional lineations in the Libyan Desert, Dakhla region, Egypt. *Geomorphology*, 39(3-4), 189-209.
- Carr, M. H. (2007). *The Surface of Mars*. Cambridge University Press
- Chamberlain, T. E., Cole, H. L., Dutton, R. G., Greene, G. C. and Tillman, J. E. (1976). Atmospheric Measurements on Mars: the Viking Meteorology Experiment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 57, 1094-1104.
- Chen, L., Xu, Y., & Li, B. (2021). Comparative study of the geomorphological characteristics of valley networks between Mars and the Qaidam Basin. *Remote Sensing*, 13(21), 4471.
- De Silva, S. L., Bailey, J. E., Mandt, K. E., & Viramonte, J. M. (2010). Yardangs in terrestrial ignimbrites: Synergistic remote and field observations on Earth with applications to Mars. *Planetary and Space Science*, 58(4), 459-471.
- Ding, Z., Zhao, J., Wang, J., & Lai, Z. (2020). Yardangs on Earth and implications to Mars: A review. *Geomorphology*, 364, 107230.
- Dong, R., Z. Dong, 2015. Aesthetic evaluation of Yardang landforms landscape: the Dunhuang Yardang National Geo-park Example, *Sciences in Cold and Arid Regions*, 7; 265-271.
- Dong, Z., Lv, P., Lu, J., Qian, G., Zhang, Z., & Luo, W. (2012). Geomorphology and origin of yardangs in the Kumtagh Desert, Northwest China. *Geomorphology*, 139, 145-154.
- Goudie, A. S. (2007). Mega-yardangs: A global analysis. *Geography Compass*, 1(1), 65-81.
- Goudie, A. S. (2008). The history and nature of wind erosion in deserts. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 36(1), 97-119.
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Science & Business Media.
- Goudie, A., & Viles, H. A. (2015). *Landscapes and landforms of Namibia* (p. 164). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Gutiérrez-Elorza, M., Desir, G., & Gutiérrez-Santolalla, F. (2002). Yardangs in the semiarid central sector of the Ebro Depression (NE Spain). *Geomorphology*, 44(1-2), 155-170.
- Halimov, M., & Fezer, F. (1989). Eight yardang types in Central Asia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 33(2), 205-217.
- Hu, C., Chen, N., Kapp, P., Chen, J., Xiao, A., & Zhao, Y. (2017). Yardang geometries in the Qaidam Basin and their controlling factors. *Geomorphology*, 299, 142-151.
- Huggett, R., & Shuttleworth, E. (2022). *Fundamentals of Geomorphology* (5th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003251156>
- Inbar, M., & Risso, C. (2001). Holocene yardangs in volcanic terrains in the southern Andes, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(6), 657-666.
- Laity, J. E. (2011). Wind erosion in drylands. *Arid zone geomorphology: Process, form and change in drylands*, 539-568.
- Maghsoudi, M., Moradi, A., Moradipour, F., & Nezammahalleh, M. A. (2019). Geotourism development in world heritage of the Lut Desert. *Geoheritage*, 11, 501-516.

- Mandt, K., de Silva, S., Zimbelman, J., & Wyrick, D. (2009). Distinct erosional progressions in the Medusae Fossae Formation, Mars, indicate contrasting environmental conditions. *Icarus*, 204(2), 471-477.
- McEwen, A. S., Dundas, C. M., Mattson, S. S., Toigo, A. D., Ojha, L., Wray, J. J., ... & Thomas, N. (2014). Recurring slope lineae in equatorial regions of Mars. *Nature geoscience*, 7(1), 53-58.
- Pelletier, J. D. (2018). Controls on yardang development and morphology: 2. Numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 723-743.
- Pelletier, J. D., Kapp, P. A., Abell, J., Field, J. P., Williams, Z. C., & Dorsey, R. J. (2018). Controls on yardang development and morphology: 1. Field observations and measurements at Ocotillo Wells, California. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 694-722.
- Pötter, S., Lehmkuhl, F., Weise, J., Zykina, V. S., & Zykina, V. S. (2023). Spatiotemporal model for the evolution of a mega-yardang system in the foreland of the Russian Altai. *Aeolian Research*, 61, 100866.
- Read, P. L. and Lewis, S. R. (2004). *The Martian Climate Revisited: Atmosphere and Environment of a Desert Planet*. Springer Science & Business Media.
- Stapff, F. M. (1887). Karte des unteren Khuisetals. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 33, 202-14.
- Trego, K. D. (1992). Yardang identification in Magellan imagery of Venus. *Earth, Moon, and Planets* (ISSN 0167-9295), vol. 58, no. 3, p. 289, 290., 58, 289.
- Viúdez-Moreiras, D., Gómez-Elvira, J., Newman, C., Navarro, S. and Marin, M. (2017). Gale Wind Speed Weibull Distribution Based on the First Two Years of REMS Wind Data, The Sixth International Workshop on the Mars Atmosphere: Modelling and observation, Granada, Spain, p. 1108.
- Walther, J. (1891). *Die Denudation in der Wüste*. Akademi der Wissenschaften: Mathematisch-Physicalische Klasse, Abhandlungen, 16, 435-461.
- Wang, Y., Chen, T., Chongyi, E., An, F., Lai, Z., Zhao, L., & Liu, X. J. (2018). Quartz OSL and K-feldspar post-IR IRSL dating of loess in the Huangshui river valley, northeastern Tibetan plateau. *Aeolian research*, 33, 23-32.
- Wang, J., Xiao, L., Reiss, D., Hiesinger, H., Huang, J., Xu, Y., ... & Komatsu, G. (2018). Geological features and evolution of Yardangs in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China): A terrestrial analogue for Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(9), 2336-2364.
- Ward, A. W. (1979). Yardangs on Mars: Evidence of recent wind erosion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B14), 8147-8166.
- Ward, A. W., & Greeley, R. (1984). Evolution of the yardangs at Rogers Lake, California. *Geological Society of America Bulletin*, 95(7), 829-837.
- Xiao, L., Wang, J., Dang, Y., Cheng, Z., Huang, T., Zhao, J., ... & Komatsu, G. (2017). A new terrestrial analogue site for Mars research: the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 164, 84-101.
- Xiao, L. (Ed.). (2021). *Mars on Earth: A study of the Qaidam Basin* (Vol. 5). World Scientific.
- Zheng, B. X., Zheng, L. Y., & Hu, X. H. (2002). Distribution and characteristics of yardang landform and its formation period, west to Yumenguan, Gansu. *Journal of Desert Research*, 22(1), 40.