



Geomorphometric Characterization of Dunes in the Rig-e-Yalan, Dasht-e-Lut: Aeolian Processes and Spatial Analysis

Abolghasem Goorabi  

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

Email: Goorabi@ut.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:

4 March 2025

Received in revised form:

11 June 2025

Accepted:

16 August 2025

pp.24-45

Keywords:

Rig-e Yalan (Dasht-e Lut)

Dune Morphology

Aeolian Wind Patterns

Geomorphometry

Google Earth Engine

ABSTRACT

This study aims to investigate the relationship between dune morphometric characteristics and aeolian wind patterns in the Rig-e Yalan sand sea, located in the Eastern Lut Desert, Iran, with the primary objective of identifying dominant and secondary wind directions based on geomorphic indicators derived from digital elevation data. Morphometric indices including slope, surface roughness, profile and plan curvature, topographic position index (TPI), relative position index (RPI), elevation difference, and sediment transport index (STI) were extracted from SRTM (30 m) digital elevation models using Google Earth Engine and GIS. To reduce topographic noise while preserving dune-scale features, a Gaussian kernel filter (radius = 15, sigma = 2) was applied. Spatial and statistical analyses were conducted to evaluate the relationships between dune morphology and inferred wind directions. The results indicate a dominant wind direction from the southeast and south (SE, S), with dune crest alignments oriented toward the northwest and north (NW, N). A negative symmetry index (-0.21) with a 95% confidence level supports this directional pattern. Higher mean slope (11.87°), surface roughness (13.90), and STI values (162.70) in the NW sector confirm sediment accumulation zones, while strong correlations between STI and surface roughness along the NW–SE axis reflect active aeolian transport dynamics. The findings demonstrate that DEM-derived morphometric analysis provides a reliable proxy for identifying wind regimes and aeolian processes in hyper-arid regions with limited meteorological data. This approach highlights the value of remote sensing for understanding dune dynamics, wind erosion processes, and desert landscape management, while acknowledging limitations related to DEM resolution and the lack of field-based wind observations.

Cite this article: Goorabi, A. (2025). Geomorphometric Characterization of Dunes in the Rig-e-Yalan, Dasht-e-Lut: Aeolian Processes and Spatial Analysis. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(2), 25-41.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.510974.1551](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.510974.1551)

Extended Abstract

Introduction

The morphology of dunes stands as a pivotal marker of aeolian processes and wind regimes in hyper-arid environments. Detailed geomorphometric analysis of dunes offers critical insights into sediment transport dynamics, wind-driven geomorphological processes, and the protracted evolution of desert landscapes. The Lut Desert (Dasht-e Lut) in eastern Iran ranks among the most hyper-arid regions globally, characterized by extreme temperatures, low relative humidity, and elevated aeolian activity. Within its eastern sector, the Rig-e Yalan sand sea showcases an extensive suite of megadune morphologies, including longitudinal (seif) and barchan forms, which have developed under the influence of prevailing and persistent wind regimes. Although this region holds substantial promise for advancing research into aeolian geomorphology, comprehensive morphometric studies leveraging remote sensing techniques remain notably limited. Further geomorphological investigation into the Rig-e Yalan sand sea could significantly enhance understanding of the interplay between prevailing wind conditions and dune morphology formation processes in hyper-arid settings. To date, the deployment of remote sensing and geospatial methodologies, such as geomorphometry, has been insufficiently explored in this context. This study aims to conduct a rigorous geomorphometric assessment of dunes within the Rig-e Yalan sand sea, employing Digital Elevation Models (DEM) and geospatial analysis techniques. The research is designed to identify the dominant wind direction, quantify dune geomorphometric characteristics, and analyze their linkage to aeolian sediment transport processes in this hyper-arid landscape.

Methodology

This investigation integrates remote sensing, Google Earth Engine (GEE), and Geographic Information Systems (GIS)-based morphometric analysis to examine the

aeolian geomorphology of the Rig-e Yalan dune field. The methodological framework encompasses data acquisition, preprocessing, geomorphometric analysis, and interpretation, structured as follows:

(1) Data Acquisition: The core dataset comprises the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model (DEM) with a 30-meter resolution, sourced from the United States Geological Survey (USGS). To corroborate dune morphology patterns and aeolian sediment transport, supplementary multispectral imagery from Landsat and Sentinel-2 satellites was incorporated. These datasets provide a robust foundation for analyzing topographic and surface reflectance variations across the hyper-arid landscape.

(2) Preprocessing: The SRTM DEM underwent processing within Google Earth Engine (GEE) and ArcGIS platforms. To refine data quality, a Gaussian kernel filter (radius 15, sigma 2) was applied, mitigating noise while retaining critical geomorphic signatures such as dune crests and interdune troughs. The study area perimeter was demarcated using a fusion of optical and radar-based satellite imagery, ensuring accurate delineation of the Rig-e Yalan dune field amidst its complex aeolian terrain.

(3) Geomorphometric Analysis: A suite of geomorphometric parameters was calculated to characterize the dune field's morphology and its interaction with wind regimes, including:

- **Slope (S):** Quantifies the inclination of dune surfaces, a primary control on aeolian sediment entrainment.
- **Aspect:** Reveals the azimuthal orientation of dune slopes, reflecting prevailing wind directions.
- **Surface Roughness (R):** Assesses terrain irregularity, a factor modulating wind flow patterns and sediment deposition processes.
- **Curvature (Total, Profile, and Plan):** Evaluates the three-dimensional geometry of dune crests and lee slopes,

influencing aeolian sediment redistribution and deposition zones.

- **Topographic Position Index (TPI):** *Distinguishes elevated dune ridges from interdune depressions, aiding in the classification of aeolian landforms.*
- **Relative Position Index (RPI):** *Measures dune elevation variations relative to adjacent terrain, providing insights into local topographic relief.*
- **Sediment Transport Index (STI):** *Estimates the potential for wind-driven sediment mobility across the dune field, linking geomorphology to aeolian dynamics.*

These indices were derived through advanced spatial analysis tools within GIS, with their spatial variability mapped to elucidate geomorphological patterns across the Rig-e Yalan dune field. Statistical correlation analyses were subsequently conducted to explore the interdependencies between these geomorphometric attributes and wind-induced sediment transport dynamics, enhancing understanding of aeolian process-form relationships in this hyper-arid environment.

Results and discussion

The findings reveal distinct geomorphometric patterns linked to aeolian processes in Rig-e Yalan:

3.1 Dominant Wind Directions:

Analysis of dune orientations and sediment transport indices suggests that the prevailing wind direction is from the southeast (SE) towards the northwest (NW). This is indicated by steeper lee slopes in the NW direction and windward slopes in the SE, confirming sediment transport trends.

3.2 Dune Morphometry and Spatial Patterns:

- The average slope of dunes is highest in the NW region (10.79°) and lowest in the SE (7.20°), suggesting that NW dunes experience higher sediment accumulation while SE dunes undergo more wind erosion
- Surface roughness values exhibit significant variation, with the highest values in NW dunes (12.83) and lower values in SE dunes (8.64), supporting the hypothesis that NW serves as a sediment deposition zone.

- STI values reinforce these patterns, as NW dunes show significantly higher sediment retention (STI = 146.14), whereas SE dunes have lower STI (60.61), indicating active erosion in the SE sector.

3.3 Wind-Erosion and Sediment Deposition:

The correlation between slope and surface roughness ($r = 0.9325$) highlights the role of wind strength in shaping dune morphology. The relationship between sediment transport index and elevation variations suggests that dunes act as dynamic sediment traps, influenced by seasonal wind fluctuations.

3.4 Influence of Secondary Winds:

While SE-NW is the dominant wind corridor, secondary wind interactions from the north (N) and northeast (NE) contribute to complex dune reorganization, creating asymmetrical ridge alignments. These secondary winds lead to partial redistribution of sediments in specific sub-regions, modifying local dune morphology. The morphometric patterns observed in this study align with previous global studies on aeolian environments, such as the Namib and Thar deserts. However, the unique geomorphic setting of Rig-e Yalan, with extreme climatic conditions and complex wind interactions, presents new insights into dune evolution in hyper-arid environments.

Conclusion

This study investigated the geomorphometric characteristics of dunes in the Rig-e Yalan sand sea, Lut Desert, to identify the dominant wind direction using SRTM digital elevation models and advanced analyses in Google Earth Engine and GIS. Findings revealed that the primary wind direction from southeast to northwest (SE-NW) shapes dune morphology, with erosion in SE slopes (mean slope 7.20°, STI=60.61) and sediment accumulation in NW (mean slope 10.79°, STI=146.14). Geomorphometric indices, particularly STI and RPI, accurately predicted wind direction by analyzing slope, surface roughness (NW: 12.83, SE: 8.64), and curvature patterns. Secondary winds (NE-SW and N-S) influence dune morphology in northeastern and southwestern sectors, respectively. Comparisons with global studies (Namib,

Thar, Lut) confirmed the findings and highlighted innovations in multi-directional wind analysis and comparative morphometric matrices. However, the 30-meter resolution of SRTM data and the absence of field-based wind measurements limited the precision of fine-scale analyses. These results enhance understanding of aeolian processes and support sustainable land management, wind erosion control, and environmental planning in arid regions. Future research should integrate field wind data, multi-temporal remote sensing, and CFD modeling to refine dune dynamics models.

Funding

There is no funding support.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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





پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ویژگی‌های ژئومورفومتریک تلماسه‌ها در ریگ یلان، دشت لوت: فرآیندهای بادی و تحلیل مکانی

ابوالقاسم گورابی

نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Goorabi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۱/۱۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۲۵

صص. ۴۱-۲۴

واژگان کلیدی:

ریگ یلان - دشت لوت،

مورفولوژی تلماسه،

الگوهای بادی،

ژئومورفومتری،

گوگل ارث انجین.

این پژوهش به بررسی ارتباط ویژگی‌های مورفومتریک تلماسه‌ها و الگوهای بادی در ریگ یلان، واقع در غرب دشت لوت، ایران، با استفاده از داده‌های مدل ارتفاعی رقومی پرداخته‌است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی جهات باد غالب و فرعی با تأکید بر ویژگی‌های ژئومورفیک تلماسه‌ها است. روابط بین شاخص‌های ژئومورفیک تلماسه‌ها و جهت‌گیری بادهای غالب با مطالعه و تحلیل آماری فضایی داده‌های مورفومتریک (شیب، زبری سطح، انحنای پروفیل، انحنای پلان، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص موقعیت نسبی، تفاوت ارتفاع، و شاخص حمل رسوب تعیین شده‌اند. در این راستا با بهره‌گیری از Google Earth Engine و GIS، شاخص‌های مورفومتریک از داده‌های 30 SRTM متر) محاسبه و با فیلتر کرنل گاوسی (شعاع ۱۵، سیگما ۲) نویزها کاهش یافتند. ارزیابی تأثیرات متقابل این شاخص‌ها نشان داد که تغییرات انحنای پروفیل و پلان تلماسه‌ها می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای شناسایی مناطق فرسایش‌پذیر در نظر گرفته شود. یافته‌های کلیدی نشان‌دهنده جهت باد غالب از جنوب شرقی و جنوب (SE, S)، با سشیخ‌های تلماسه‌ای در راستای شمال غربی و شمال (NW, N)، و شاخص تقارن ۰.۲۱- با سطح اطمینان بالا (۹۵٪) هستند. نتایج تحلیل‌ها (میانگین شیب ۱۱.۸۷ درجه در NW، زبری ۱۳.۹۰ در NW، و $STI=162.70$ در NW در NW) الگوهای سشیخ‌ها و گودال‌ها را در جهت‌های NW و SE تأیید کردند. نتایج همچنین نشان دادند که تغییرات شاخص حمل رسوب در امتداد محور NW-SE همبستگی بالایی با تغییرات زبری سطح دارد، که می‌تواند در مدل‌سازی پویایی تلماسه‌ها کمک کنند. نتایج همچنین بیانگر پتانسیل بالای داده‌های دورسنجی برای پایش تغییرات مورفولوژیکی در مناطق فراخشک و جایگزین مناسبی برای داده‌های میدانی در مناطقی که دسترسی به داده‌های بادشناسی محدود و ممکن نیست، است. این نتایج اهمیت تحلیل مورفومتریک مشتق‌شده از DEM را برای درک فرآیندهای بادی در بیابان‌ها، مدیریت منابع طبیعی، و پیش‌بینی فرسایش بادی برجسته می‌کنند. محدودیت‌هایی مانند فقدان داده‌های میدانی و بادی محلی، مسیرهای تحقیقاتی آینده را مشخص می‌کنند.

استناد: گورابی، ابوالقاسم . (۱۴۰۴). ویژگی‌های ژئومورفومتریک تلماسه‌ها در ریگ یلان، دشت لوت: فرآیندهای بادی و تحلیل مکانی. پژوهشهای

ژئومورفولوژی کمی. ۱۴(۲). ۴۱-۲۵.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.510974.1551

مقدمه

تلماسه‌ها^۱ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ژئومورفیکی در مناطق خشک، نقش کلیدی در درک فرآیندهای بادی^۲ و پویایی‌های شکل‌دهی مناظر بیابانی ایفا می‌کنند (بگنولد، ۱۹۸۴). این ساختارها نه‌تنها نشان‌دهنده رژیم‌های بادی غالب هستند، بلکه ابزاری علمی در پیش‌بینی فرسایش بادی، مدیریت منابع طبیعی، و مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در محیط‌های خشک، از اهمیت بسزایی برخوردارند (Scheidt, Ramsey, & Lancaster, 1995; Rahdari & Rodríguez-Seijo, 2021; Mashhadi, Ahmadi, Ekhtesasi, Feiznia, & Fegghi, 2007; Baas & Delobel, 2022). علاوه بر این، پویایی تلماسه‌ها می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای شناسایی تغییرات اقلیمی و بررسی تأثیر متغیرهای محیطی بر تکامل سامانه‌های بادی مورد استفاده قرار گیرد. دشت لوت (ریگ یلان)، واقع در شرق ایران، به‌عنوان یکی از گرم‌ترین و فعال‌ترین بیابان‌های جهان، میزبان انواع متنوعی از تلماسه‌ها، از جمله تلماسه‌های طولی (سیف) و هلالی (برخان)، است که تحت تأثیر الگوهای بادی شدید شکل گرفته‌اند (Chanteloube et al., 2022; Abdollahi & Yamani, 2009). شناخت جهت و شدت بادهای غالب در این منطقه، به‌ویژه با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفیک تلماسه‌ها، برای درک فرآیندهای ژئومورفیکی و کاربردهای زیست‌محیطی در ایران و مناطق خشک مشابه، ضروری است. در این راستا، ترکیب روش‌های تحلیل ژئومورفومتریک با داده‌های دورسنجی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره پویایی‌های بادی و نرخ مهاجرت تلماسه‌ها در دشت لوت ارائه دهد (Ehsani & Quiel, 2008; Houshang & Foroutan, 2014).

اهمیت مطالعه تلماسه‌ها در دشت لوت از دو جنبه کلیدی ناشی می‌شود: نخست، این منطقه به دلیل شرایط اقلیمی خشک و بادهای شدید، یکی از چشم‌اندازهای طبیعی منحصربه‌فرد جهان است که پتانسیل بالایی برای فرسایش بادی و جابه‌جایی رسوبات دارد (Chanteloube et al., 2022). دوم، تلماسه‌ها به‌مثابه کتابخانه تاریخی و آرشیوهای طبیعی، اطلاعات ارزشمندی درباره پویایی‌های بادی و تغییرات بلندمدت محیطی ارائه می‌دهند، که می‌تواند برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آبی، خاکی، و زیست‌محیطی در ایران مفید باشند. با این حال، مطالعات جامع و دقیق درباره پویایی و جهت‌گیری تلماسه‌ها در ریگ یلان، بخشی از دشت لوت، به‌ویژه با استفاده از روش‌های نوین دورسنجی، محدود بوده است (Ahmady-Birgani et al., 2017). به‌ویژه، استفاده از داده‌های *SRTM* با رزولوشن بالا در کنار الگوریتم‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند ابعاد جدیدی از روابط بین شکل تلماسه‌ها و رژیم‌های بادی را روشن کند. این شکاف پژوهشی، نیاز به تحلیل‌های مورفومتریک پیشرفته را با بهره‌گیری از داده‌های مدل‌های ارتفاعی رقومی (*DEMs*) برجسته می‌کند (Telbisz & Keszler, 2018; Blumberg, 2006).

ادبیات تحقیق موجود در حوزه ژئومورفولوژی تلماسه‌ها، به‌ویژه در بیابان‌های خشک، نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل‌توجهی در استفاده از داده‌های سنجش از دور برای تحلیل شکل و پویایی تلماسه‌هاست (Taniguchi, Endo, & Sekiguchi, 2012; Nazari Samani et al., 2016). برای مثال، تحقیقات در صحرای بزرگ آفریقا و بیابان‌های مرکزی آسیا نشان داده‌اند که شاخص‌های مورفومتریک، مانند شیب، انحناء، و زبری سطح، می‌تواند الگوهای بادی غالب را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند (Taniguchi, Endo, & Sekiguchi, 2012; Nazari Samani et al., 2016). لنکستر (۱۹۹۵) و گدال و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود بر تلماسه‌های نامیب، اهمیت تلفیق داده‌های *DEM* با تحلیل‌های *GIS* را برای درک جهت‌گیری تلماسه‌ها و رژیم‌های بادی تأکید کرده است. با این حال، این مطالعات اغلب در مناطق دیگر جهان متمرکز بوده‌اند و کمتر به مناطق خاص ایران، مانند دشت لوت، پرداخته‌اند. با توجه به ویژگی‌های خاص بیابان لوت، به‌عنوان یکی از داغ‌ترین نقاط کره زمین و دارای الگوهای بادی منحصربه‌فرد، بررسی دقیق تلماسه‌های این منطقه

¹ sand dunes

² aeolian processes

می‌تواند به تکمیل شکاف‌های موجود در پژوهش‌های ژئومورفیک جهانی کمک کند. علاوه بر این، شکاف‌هایی در ادبیات وجود دارد، از جمله کمبود تحلیل‌های مورفومتریک دقیق با داده‌های *SRTM* در ریگ یلان، و نیاز به بررسی جامع‌تر ویژگی‌های ژئومورفیک برای پیش‌بینی دقیق جهت باد غالب. این پژوهش با تمرکز بر این شکاف‌ها، رویکردی نوین برای تحلیل تلماسه‌ها در ریگ یلان ارائه می‌دهد.

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و پیش‌بینی جهت باد غالب در ریگ یلان با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفیک تلماسه‌هاست. این پژوهش نه تنها به بررسی تأثیر پارامترهای توپوگرافی بر الگوهای تلماسه‌ای می‌پردازد، بلکه تلاش دارد تا با تحلیل شاخص‌های مورفومتریک، روندهای بلندمدت تغییرات تلماسه‌ها را ارزیابی کند. این هدف با استفاده از داده‌های *DEM* مشتق شده از *SRTM* و محاسبه شاخص‌هایی مانند شیب، زبری، انحنا، پروفیل، انحنا، *RPI*، *TPI*، تفاوت ارتفاع، و *STI* محقق می‌شود. سؤالات کلیدی که این پژوهش به آن‌ها پاسخ می‌دهد شامل موارد زیر است: «جهت باد غالب در ریگ یلان چیست؟»، «چگونه ویژگی‌های ژئومورفیک (مثل شیب و انحنا) می‌توانند جهت باد را پیش‌بینی کنند»، و «نتایج این پژوهش چه تأثیری بر درک فرآیندهای بادی و مدیریت منابع در بیابان‌های خشک ایران دارند». پاسخ به این سؤالات نه تنها دانش مربوط به مورفولوژی تلماسه‌ها و رژیم‌های بادی در ریگ یلان را افزایش می‌دهد، بلکه بینش‌هایی برای شناخت نقش دانش ژئومورفومتری در کمی سازی فرایندهای ژئومورفیک، مدیریت منابع طبیعی، کنترل فرسایش بادی، و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی در دشت لوت و مناطق خشک مشابه در ایران فراهم می‌کند.

با توجه به اهمیت این موضوع، این پژوهش تلاش می‌کند تا با استفاده از روش‌های پیشرفته دورسنجی و تحلیل ژئومورفومتریک، به درک عمیق‌تری از پویایی تلماسه‌ها و الگوهای بادی در ریگ یلان دست یابد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در مناطق بیابانی ایران و جهان عمل کند، و راه‌حلی برای چالش‌های زیست‌محیطی، از جمله فرسایش بادی و تغییرات اقلیمی، ارائه دهد؛ همچنین، نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان جهت تثبیت تلماسه‌ها و کنترل اثرات منفی ناشی از فرسایش بادی مورد استفاده قرار گیرد.

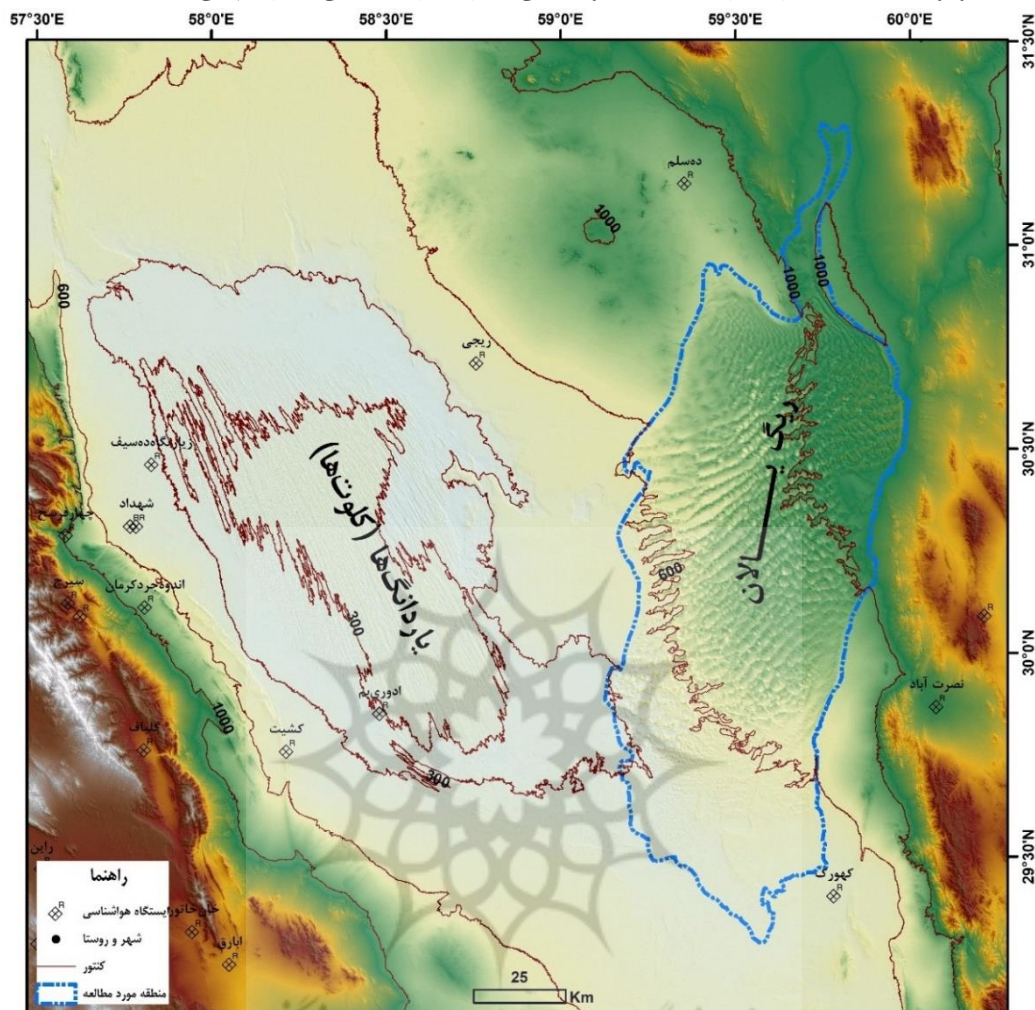
روش پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه (ریگ یلان)

منطقه ریگ یلان، واقع در غرب دشت لوت، ایران، یکی از مناطق بیابانی فراخشک در شرق ایران است (شکل ۱). *Error! Reference source not found.* این منطقه، با وسعت تقریبی ۹۸۰۰ کیلومتر مربع، بخشی از دشت لوت را تشکیل می‌دهد که به عنوان یکی از گرم‌ترین و خشک‌ترین بیابان‌های جهان شناخته می‌شود (Chanteloube et al., 2022; Abdollahi & Yamani, 2009). ریگ یلان میزبان انواع متنوعی از تلماسه‌ها، از جمله تلماسه‌های طولی (سیف) و هلالی (برخان)، است که تحت تأثیر بادهای شدید و شرایط اقلیمی خشک شکل گرفته‌اند. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های ژئومورفیکی این منطقه، به ویژه پویایی بادی و فرسایش، آن را به یک سایت ایده‌آل برای مطالعه فرآیندهای ژئومورفولوژیکی بادی (فرسایش بادی و جابه‌جایی رسوبات) تبدیل کرده است (Chanteloube et al., 2022; Ghazanfarpour et al., 2021).

اهمیت مطالعه ریگ یلان از منظر علمی و کاربردی، به دلیل نقش آن در درک الگوهای بادی و مدیریت منابع طبیعی در مناطق خشک ایران، برجسته است. شکل ۱. *Error! Reference source not found.* نشان‌دهنده محدوده دقیق منطقه ریگ یلان در دشت لوت و الگوی کلی توزیع تلماسه‌های آن است. بررسی جهت‌گیری و پویایی تلماسه‌ها می‌تواند در شناسایی الگوهای بادی گذشته و حال منطقه مؤثر باشد. عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه، اهمیت استفاده از روش‌های سنجش از دور را در شرایط فقدان داده‌های میدانی مستقیم افزایش می‌دهد. این روش‌ها امکان تحلیل دقیق‌تر

فرایندهای ژئومورفیک، نظارت بر تغییرات تلماسه‌ها و ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کنند.



شکل ۱ دشت لوت و موقع «ریگ یلان» منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و منابع

این پژوهش از داده‌های مدل ارتفاعی رقومی (DEM) برگرفته از مأموریت راداری توپوگرافی شاتل (SRTM)، که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) با رزولوشن ۳۰ متر ارائه شده، استفاده کرد. این داده‌ها برای منطقه ریگ یلان در دشت لوت جمع‌آوری و در محیط ابری پلتفرم Google Earth Engine (GEE) پردازش شدند. SRTM به دلیل پوشش منطقه و دقت مناسب آن در تحلیل‌های ژئومورفومتریک انتخاب شده است.

علاوه بر داده‌های SRTM، تصاویر اپتیک با رزولوشن بالا از ماهواره‌های Landsat و Sentinel-2 برای تعیین حدود و تأیید خروجی‌های تحلیل مورفومتریک و بررسی الگوهای توزیع مکانی تلماسه‌ها به کار گرفته شدند. تصاویر Sentinel-2 با رزولوشن مکانی ۱۰ متر و تصاویر Landsat با رزولوشن ۳۰ متر، امکان تحلیل دقیق‌تر ساختار تلماسه‌ها را فراهم کرده‌اند. این تصاویر، با تفکیک مکانی بهتر، به اعتبارسنجی الگوهای خط‌الرأس‌ها، ستیغ‌ها، گودال‌ها، و راستای گسترش تلماسه‌ها کمک می‌کنند (Ding et al., 2020).

مرز منطقه مورد مطالعه ابتدا با دقت بالا از طریق تلفیق داده‌های اپتیک و راداری (Sentinel-1) شناسایی و تعریف

شد. سپس، در پلتفرم *GEE*، محدوده‌ی دقیق منطقه مطالعه تعیین گردید تا تحلیل‌های مورفومتریکی به‌طور بهینه اجرا شوند. استفاده از داده‌های چندمنبعی و پردازش در *GEE*، دقت ارزیابی تلماسه‌ها و روند جابه‌جایی آنها را افزایش داده است.

ابزارها و نرم‌افزارها

ابزار اصلی این پژوهش *Google Earth Engine (GEE)* بوده است، یک پلتفرم پردازش ابری که برای تحلیل داده‌های ژئومورفیکی و دورسنجی به کار گرفته شده است. *GEE* به دلیل توانایی پردازش حجم وسیعی از داده‌های سنجنش از دور، از جمله *DEM*، تصاویر اپتیک و راداری، به‌عنوان ابزار اصلی در تحلیل‌های مورفومتریکی و پردازش مکانی انتخاب شد. از این پلتفرم برای پردازش داده‌های *SRTM*، استخراج شاخص‌های ژئومورفومتریکی، و انجام هموارسازی مکانی داده‌های ارتفاعی استفاده شد. علاوه بر آن این محیط برای اجرای، توابع طراحی شده مرتبط برای محاسبه شیب، جهت شیب و سایر شاخص‌های ژئومورفومتریکی به کار گرفته شده است.

علاوه بر *GEE*، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (*GIS*) برای تحلیل فضایی و بصری‌سازی و به‌عنوان ابزار مکمل برای پردازش‌های پیشرفته مکانی، تولید نقشه‌های ژئومورفیک، تحلیل‌های مرتبط با توزیع فضایی تلماسه‌ها، تحلیل انحنا و موقعیت نسبی، بررسی پروفیل تلماسه‌ها و تحلیل تفاوت‌های ارتفاعی در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. به منظور بهینه‌سازی پردازش داده‌های *DEM*، از متلب (*MATLAB*) و زبان برنامه‌نویسی پایتون (*Python*) برای انجام تحلیل‌های عددی و پردازش فیلترهای هموارسازی نیز بهره گرفته شد. در این پژوهش، ابتدا فیلترهای کرنل گاوسی با شعاع و سیگماهای متفاوت بررسی و سپس فیلتر کرنل گاوسی با شعاع ۱۵ پیکسل و سیگما ۲ برای کاهش نویز و بهبود دقت تحلیل‌های مورفومتریکی استفاده شده است.

روش‌های پردازش و تحلیل داده‌ها

۱. فیلتراسیون و هموارسازی

برای کاهش نویز و بهبود دقت تحلیل، از فیلتر کرنل گاوسی با شعاع ۱۵ پیکسل و سیگما ۲ استفاده شد. این فیلتر، که در *Google Earth Engine (GEE)* اعمال شد، داده‌های مدل رقومی ارتفاع را در راستای هدف پژوهش بهینه‌سازی کرده و جزئیات توپوگرافی را بدون از دست دادن اطلاعات کلیدی حفظ می‌کند. این رویکرد به کاهش تأثیر نویز ناشی از رزولوشن ۳۰ متری *SRTM* کمک کرد و دقت تحلیل‌های ژئومورفیک را افزایش داد.

۲. استخراج شاخص‌های مورفومتریکی

از نوآوری‌های این پژوهش، طراحی شاخص‌های ژئومورفیک برای تحلیل پویایی تلماسه‌ها و پیش‌بینی جهت باد غالب بوده است (جدول ۱). این شاخص‌ها شامل شیب (*Slope*)، جهت شیب (*Aspect*)، انحنا (*Curvature*)، شاخص موقعیت توپوگرافی (*TPI*)، شاخص موقعیت نسبی (*RPI*) و شاخص حمل رسوب (*STI*) هستند که برای شناسایی ستیغ‌ها، گودال‌ها، و پتانسیل حمل رسوبات بادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳. تحلیل جهت باد غالب

جهت باد غالب در منطقه ریگ یلان از طریق تحلیل الگوی جهت‌یابی تلماسه‌ها و شاخص‌های مورفومتریکی استخراج شد. بررسی شیب و دامنه‌های بادپناه نشان داد که شیب تند تلماسه‌ها معمولاً در جهت دور از باد و شیب ملایم‌تر در جهت منبع باد قرار می‌گیرد، که این امر به استنباط جهت بادهای غالب کمک می‌کند. برای تعیین جهت تلماسه‌های ریگ یلان و در نتیجه تعیین جهت باد غالب، از مدل رقومی ارتفاع *SRTM* و تحلیل‌های چندمعیاره استفاده شده است. سه روش تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفتند: (۱) تحلیل شیب (*Slope*) برای بررسی ارتفاع نسبی تلماسه‌ها؛ (۲) تحلیل جهت شیب (*Aspect*) برای تعیین جهت‌گیری دامنه‌های تلماسه؛ و (۳) تحلیل انواع انحنا (*Curvature*) برای بررسی شکل و پویایی تلماسه‌ها.

محدودیت‌های روش‌شناسی

رزولوشن ۳۰ متری مدل ارتفاعی *SRTM* ممکن است برخی از جزئیات دقیق‌تری از پویایی بادی و ساختارهای تلماسه‌ای را از دست بدهد. همچنین، فقدان داده‌های بادی محلی باعث شد که این مطالعه وابستگی بیشتری به شاخص‌های ژئومورفومتریک داشته باشد. در نهایت، فرآیند فیلتراسیون گاوسی اگرچه نویز را کاهش می‌دهد، ممکن است برخی از ویژگی‌های ریزتر تلماسه‌ها را نیز هموار کند.

این ترکیب روش‌ها امکان تحلیل جامع‌تر پویایی تلماسه‌ها و روند جابه‌جایی رسوبات بادی را فراهم کرده و به درک بهتر فرآیندهای ژئومورفولوژیکی منطقه ریگ یلان کمک کرده است.

جدول ۱: شاخص‌های مورفومتریک نوآورانه برای تحلیل تلماسه‌ها و پیش‌بینی باد غالب

شاخص	تعریف	کاربرد در پیش‌بینی باد غالب	معادله/روش محاسباتی ساده‌شده
شیب (Slope)	زاویه شیب سطح تلماسه برای شناسایی ستیغ‌ها و گودال‌ها	نشان‌دهنده جهت‌گیری ستیغ‌ها در سمت بادپناه با دقت بالا	محاسبه زاویه شیب نسبت به سطح افق با استفاده از مشتق‌گیری عددی از داده‌های DEM و هموارسازی با فیلتر گاوسی.
زبری سطح (Surface Roughness)	انحراف استاندارد ارتفاع برای نشان دادن شاخصه ناهمواری‌ها	شناسایی مناطق با فعالیت بادی شدید در جهت‌های غالب	محاسبه انحراف استاندارد ارتفاع در یک پنجره (۳×۳ پیکسل) با استفاده از داده‌های DEM هموارشده.
انحنای پروفیل (Profile Curvature)	سنجش خمیدگی در جهت شیب دامنه برای تشخیص ستیغ‌ها و گودال‌ها	پیش‌بینی ستیغ‌ها در سمت بادپناه با بزرگنمایی برای وضوح	محاسبه مشتق دوم ارتفاع در جهت شیب، با ضریب ۱۰۰۰ برای افزایش وضوح در شناسایی ناهمواری‌ها.
انحنای پلان (Plan Curvature)	خمیدگی در جهت عمود بر شیب برای تشخیص الگوهای افقی	شناسایی ساختارهای جانبی تلماسه مرتبط با باد غالب	محاسبه مشتق دوم ارتفاع در جهت عمود بر شیب، با ضریب ۱۰۰۰ برای تحلیل الگوهای افقی دقیق.
شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)	تفاوت ارتفاع با میانگین همسایگی برای پشته‌ها/دره‌ها	تشخیص نقاط مرتفع (ستیغ-خط‌الراس) و پست‌تر (گودال)	محاسبه تفاوت بین ارتفاع پیکسل مرکزی و میانگین ارتفاع پیکسل‌های همسایه در یک شعاع دایره‌ای ۵ پیکسلی.
شاخص موقعیت نسبی (RPI)	نسبت تفاوت ارتفاع به میانگین برای ناهمواری‌های محلی	شناسایی دقیق‌تر پشته‌ها و خط‌الراس‌ها و دره‌ها با بزرگنمایی	محاسبه نسبت تفاوت ارتفاع پیکسل مرکزی با میانگین همسایگی به میانگین، با ضریب ۱۰۰۰ برای وضوح بیشتر.
تفاوت ارتفاع (Height Variation)	انحراف استاندارد ارتفاع در شعاع مشخص	نشان‌دهنده ناهمواری‌های محلی و شدت باد غالب	محاسبه انحراف استاندارد ارتفاع در یک شعاع دایره‌ای ۵ پیکسلی با استفاده از داده‌های DEM هموارشده.
شاخص حمل رسوب (STI)	پتانسیل حمل رسوب بادی با تلفیق شیب و زبری	پیش‌بینی شدت فرآیندهای بادی و حمل رسوب در جهت غالب	محاسبه توان ۱,۳ شیب ضرب در توان ۰,۶ زبری سطح برای تخمین پتانسیل حمل رسوب بادی در مناطق خشک.

فرآیند تحلیل و متدولوژی پژوهش

شکل ۲ یک نمای کلی شفاف و گام‌به‌گام از متدولوژی پژوهش را نشان می‌دهد که در آن فرآیندهای تحلیلی مرتبط با تحلیل مورفومتریک تلماسه‌ها و الگوهای بادی در ریگ یلان نمایش داده شده است. این فلوچارت مراحل کلیدی را از جمع‌آوری داده‌های مدل ارتفاعی رقومی (*DEM*) مشتق‌شده از *SRTM* و تصاویر اپتیک با رزولوشن بالا تا پیش‌پردازش داده‌ها، محاسبه شاخص‌های مورفومتریک، تحلیل جهت‌های جغرافیایی، بصری‌سازی و اعتبارسنجی نتایج به‌صورت متوالی

و منطقی ترسیم می‌کند. این رویکرد نوآورانه، شفافیت و قابل تکرار بودن پژوهش را افزایش داده و امکان درک جامع فرآیندهای تحلیلی را برای پژوهشگران دیگر فراهم می‌کند. شکل ۲، با نمایش این گام‌های متوالی، یک ابزار بصری برای درک فرآیندهای تحلیلی ارائه می‌دهد و به پیش‌بینی دقیق‌تر جهت باد غالب و ارتباط آن با ویژگی‌های ژئومورفیک تلماسه‌ها کمک می‌کند.



شکل ۲: فرآیندهای تحلیل مورفومتریک ریگ‌ها و الگوهای بادی در ریگ یلان

به‌منظور کنترل دقت محاسبات مورفومتریک، از روش مقایسه‌ای بین شاخص‌های مشتق‌شده و داده‌های اولیه استفاده شد. علاوه بر این، همبستگی بین شاخص‌های کلیدی بررسی شد تا اطمینان حاصل شود که تحلیل‌های عددی از همگرایی مناسب برخوردارند.

بحث و یافته‌ها

یافته‌های این پژوهش، ویژگی‌ها و الگوهای مورفولوژیکی و بادی تلماسه‌ها در ریگ یلان را با استفاده از تحلیل‌های مورفومتریک مشتق‌شده از داده‌های مدل ارتفاعی رقومی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها، توزیع کمی، الگوهای فضایی، پویایی بادی، و ویژگی‌های تقارن تلماسه‌ها را در جهت‌های جغرافیایی مختلف گزارش می‌کنند. داده‌های عددی، الگوهای مکانی، و روابط پویایی بادی در قالب ویژگی‌های کمی، الگوهای فضایی و توپوگرافی، الگوهای تحلیلی، و ویژگی‌های تقارن و جهت‌گیری، به‌صورت جامع و شفاف مستند شده‌اند. این نتایج، با تأکید بر شفافیت و قابل تکرار بودن، مبنایی برای درک فرآیندهای ژئومورفیکی و بادی در منطقه فراهم می‌کنند و به شناسایی الگوهای کلیدی برای پیش‌بینی جهت باد غالب کمک می‌کنند.

۱. ویژگی‌های کمی مورفولوژیکی تلماسه‌ها

ویژگی‌های کمی و مورفولوژیکی تلماسه‌ها در منطقه ریگ یلان، با تمرکز بر توزیع و تنوع مورفومتریک در جهت‌های جغرافیایی، به‌صورت آماری در جدول ارائه شده است. این داده‌ها نشان می‌دهند که تلماسه‌های منطقه دارای الگوی مکانی-فضایی مشخصی هستند که ارتباط نزدیکی با فرآیندهای بادی غالب و شرایط ژئومورفوتری دارند.

براساس داده‌های به‌دست‌آمده، بیشترین سطح تلماسه‌ها در جهت جنوب شرقی (SE) با مقدار $۱۸۶۷,۷۳۵,۰۰$ ($۱۶,۲۳\%$) از کل فراوانی) و در جهت شمال غربی (NW) با مقدار $۱,۵۰۱,۵۸۸,۰۰$ ($۱۳,۰۴\%$) مشاهده می‌شود. این دو جهت بیشترین مساحت تلماسه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند، که نشان‌دهنده نقش بادهای غالب در شکل‌دهی و جابه‌جایی رسوبات بادی در منطقه هستند.

از نظر ویژگی‌های مورفومتریک، جهت شمال غربی (NW) دارای بیشترین میانگین شیب ($۱۰,۷۹$ درجه)، زبری سطح ($۱۲,۸۳$)، انحنا عمومی ($۶,۰۵$)، شاخص موقعیت توپوگرافی ($TPI = ۰,۰۴$)، انحنا پروفیل ($-۰,۰۱$)، انحنا پلان ($۰,۰۲$)،

شاخص موقعیت نسبی ($RPI = 0.25$)، اختلاف ارتفاع (15.46)، و شاخص حمل رسوب ($STI = 146.14$) است. این مقادیر نشان می‌دهند که این جهت به‌عنوان دامنه‌های پشت به باد (Lee) با شیب‌های تندتر و ناهمواری‌های بیشتر می‌تواند شناخته می‌شود. تفاوت در شیب و زبری سطح بین جهت‌های SE و NW نشان می‌دهد که SE به‌عنوان دامنه رو به باد^۱ دارای فرسایش بیشتر و شیب ملایم‌تر است، در حالی که NW به‌عنوان دامنه پشت به باد (Lee) دارای شیب بیشتر و تجمع رسوبات است. این ویژگی‌ها تأیید می‌کنند که باد غالب از SE به NW در حال وزش است.

در مقابل، جهت جنوب شرقی (SE) دارای مقادیر پایین‌تری از این شاخص‌ها است، از جمله شیب (7.20 درجه)، زبری سطح (8.64)، انحنای عمومی (4.16)، TPI (-0.06)، انحنای پروفیل (0.02)، انحنای طرح (0.04)، RPI (-0.19)، تفاوت ارتفاع (10.32)، و STI (60.61). مقادیر بالاتر زبری سطح (12.83) و شاخص حمل رسوب (146.14) در NW در مقایسه با مقادیر پایین‌تر این شاخص‌ها در SE (8.64 و 60.61) نشان می‌دهد که NW منطقه تجمع رسوبات است، در حالی که SE بیشتر تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارد.

تحلیل سایر جهت‌های جغرافیایی نشان می‌دهد که شیب در شمال (N) برابر 9.35 درجه، شمال شرقی (NE) و شرق (E) هر دو برابر 7.86 درجه، جنوب (S) برابر 6.96 درجه، جنوب غربی (SW) برابر 6.69 درجه، و غرب (W) برابر 7.78 درجه است. این اعداد نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه در ویژگی‌های تلماسه‌ها بین جهات مختلف است که مستقیماً به جهت باد غالب در منطقه مرتبط هستند. تفاوت ارتفاع بالاتر در NW (15.46) نسبت به SE (10.32) تأیید می‌کند که مناطق NW پناهگاه‌های طبیعی برای رسوبات بادی هستند، در حالی که SE به دلیل فرسایش بیشتر دارای ناهمواری کمتری است.

این تحلیل نشان می‌دهد که الگوی مورفومتریک تلماسه‌ها در منطقه ریگ یلان، به‌ویژه تفاوت در شیب و زبری سطح، می‌تواند برای استنباط جهت باد غالب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، شیب کم‌تر در دامنه‌های جنوب شرقی (SE) و شیب بیشتر در دامنه‌های شمال غربی (NW) نشان‌دهنده وزش باد غالب از جنوب شرقی (SE) به سمت شمال غربی (NW) است. این الگوی باد منجر به فرسایش دامنه‌های رو به باد (SE) و تجمع رسوبات در دامنه‌های پشت به باد (NW) شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های کمی و تقارن مورفولوژیکی تلماسه‌ها در جهت‌های جغرافیایی

جهت	فراوانی	Slope	Roughness	Curvature	TPI	Profile Curvature	Plan Curvature	RPI	Height Variation	STI
N	۱۱۲۰۹۲۷	۹.۳۵	۱۲.۳۱	۲.۱۵	۰.۰۰	-۰.۰۵	۰.۰۲	-۰.۲۸	۱۴.۷۱	۱۱۹.۶۹
NE	۱۰۲۵۵۲۸	۷.۸۶	۹.۶۷	۸.۲۷	۰.۰۶	-۰.۰۲	-۰.۰۴	-۰.۰۴	۱۱.۴۷	۷۹.۹۶
E	۱۳۳۸۶۱۲	۷.۸۶	۸.۵۴	۱۳.۴۹	۰.۰۴	۰.۰۲	-۰.۰۳	-۰.۰۵	۱۰.۱۵	۶۸.۴۰
SE	۱۸۶۷۷۳۵	۷.۲۰	۸.۶۴	۴.۱۶	-۰.۰۶	۰.۰۲	۰.۰۴	-۰.۱۹	۱۰.۳۲	۶۰.۶۱
S	۱۸۳۹۱۶۷	۶.۹۶	۹.۰۶	۰.۲۱	-۰.۰۹	۰.۰۰	۰.۰۷	-۰.۲۶	۱۰.۸۴	۶۲.۱۸
SW	۱۴۶۲۲۴۲	۶.۶۹	۸.۴۱	۳.۳۱	۰.۰۱	۰.۰۱	-۰.۰۳	-۰.۰۷	۹.۹۷	۵۶.۲۶
W	۱۳۵۴۲۹۷	۷.۷۸	۸.۸۱	۹.۴۱	۰.۰۷	-۰.۰۱	-۰.۰۶	-۰.۰۲	۱۰.۴۷	۷۳.۶۲
NW	۱۵۰۱۵۸۸	۱۰.۷۹	۱۲.۸۳	۶.۰۵	۰.۰۴	-۰.۰۱	۰.۰۲	-۰.۲۵	۱۵.۴۶	۱۴۶.۱۴

ماتریس همبستگی متغیرهای ژئومورفیک (جدول ۳) ارتباط میان شاخص‌های مورفومتریک تلماسه‌ها را در جهت‌های مختلف جغرافیایی تحلیل می‌کند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که شیب (S) دارای بالاترین همبستگی با زبری سطح ($r=0.9325$) و اختلاف ارتفاع (H_V) است. این ارتباط قوی بیانگر آن است که با افزایش شیب، میزان زبری سطح و تغییرات ارتفاعی نیز افزایش می‌یابد. این روند به‌ویژه در مناطق پشت به باد ($Lee-side$) مشهود است، جایی

^۱. Windward

که فرایندهای فرسایشی و انتقال رسوبات به صورت مؤثرتری عمل می‌کنند. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که این همبستگی‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار هستند، که تأییدی بر تأثیر قابل توجه شیب بر تغییرات ژئومورفیک تلماسه‌ها است.

علاوه بر این، تحلیل انحنای پروفیل (Pr_C) و انحنای پلان (PL_C) نشان می‌دهد که این متغیرها همبستگی متوسطی با سایر شاخص‌ها دارند ($r=0.4503$ و $r=-0.9103$ برای RPI). این میزان همبستگی، در مقایسه با شاخص‌هایی نظیر شیب و زبری سطح، کمتر است، که حاکی از نقش محدودتر انحنا در پویایی تلماسه‌ها است. یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین در مناطق بیابانی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تغییرات انحنای سطحی تأثیر کمتری بر توزیع رسوبات بادی و جهت‌یابی تلماسه‌ها دارد.

شاخص حمل‌ونقل رسوبات (STI)، که نشان‌دهنده میزان انتقال و جابه‌جایی مواد در تلماسه‌ها است، همبستگی بالایی با شیب ($r=0.9859$) و زبری سطح ($r=0.9764$) دارد. این ارتباط نشان می‌دهد که مناطق با شیب بیشتر و سطح ناهموارتر، پویایی رسوبی بالاتری دارند و مستعد جابه‌جایی بیشتر ذرات بادی هستند. علاوه بر این، همبستگی منفی شاخص موقعیت نسبی (RPI) با شیب ($r=-0.4437$) و اختلاف ارتفاع ($r=-0.6511$) بیانگر آن است که مناطق مرتفع‌تر معمولاً دارای شیب‌های ملایم‌تری هستند. این الگو نتیجه فرایند تجمع رسوبات در ارتفاعات بالاتر و فرسایش شدیدتر در نواحی پست‌تر است، که به طور مستقیم بر الگوی توزیع مواد تأثیر می‌گذارد.

بررسی دقیق‌تر داده‌های SE و NW نشان می‌دهد که در مناطق پشت به باد (NW)، مقدار STI بالاتر است، که نشان‌دهنده افزایش نرخ رسوب‌گذاری در این نواحی است. در مقابل، مقدار پایین STI در SE تأیید می‌کند که این نواحی بیشتر در معرض فرسایش بادی قرار دارند. این روند با تحلیل شیب و زبری سطح نیز همخوانی دارد، زیرا مناطق با شیب ملایم‌تر و زبری کمتر معمولاً تحت تأثیر فرسایش شدیدتر قرار دارند.

به طور کلی، نتایج جدول تأیید می‌کند که نواحی با شیب کمتر و زبری سطح پایین‌تر بیشتر در معرض فرسایش بادی هستند، در حالی که شیب‌های تندتر و زبری بالاتر عمدتاً در مناطق پشت به باد مشاهده می‌شود. همبستگی قوی بین STI و متغیرهای شیب و زبری سطح، اهمیت این دو شاخص را در پیش‌بینی الگوی حرکت تلماسه‌ها و جهت باد غالب برجسته می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند مبنای علمی معتبری برای مدل‌سازی دقیق‌تر دینامیک تلماسه‌ها و برنامه‌ریزی بهینه برای مدیریت مناطق بیابانی فراهم کنند.

جدول ۳: ماتریس همبستگی متغیرهای ژئومورفیک

	F	S	R	T C	TPI	Pr C	PL C	RPI	H V	STI
count	1.0000	-0.3296	-0.3134	-0.4276	-0.7702	0.5669	0.6455	-0.3859	-0.2939	-0.3336
STI	-0.3296	1.0000	0.9325	0.0928	0.3836	-0.5735	0.1105	-0.4437	0.9344	0.9859
RPI	-0.3134	0.9325	1.0000	-0.2315	0.1725	-0.7583	0.3057	-0.6419	0.9998	0.9764
T C	-0.4276	0.0928	-0.2315	1.0000	0.7371	0.3201	-0.7447	0.7303	-0.2357	-0.0530
TPI	-0.7702	0.3836	0.1725	0.7371	1.0000	-0.1574	-0.8733	0.6353	0.1617	0.3198
Pr C	0.5669	-0.5735	-0.7583	0.3201	-0.1574	1.0000	-0.1331	0.4503	-0.7474	-0.6622
PL C	0.6455	0.1105	0.3057	-0.7447	-0.8733	-0.1331	1.0000	-0.9103	0.3181	0.1735
RPI	-0.3859	-0.4437	-0.6419	0.7303	0.6353	0.4503	-0.9103	1.0000	-0.6511	-0.5199
H V	-0.2939	0.9344	0.9998	-0.2357	0.1617	-0.7474	0.3181	-0.6511	1.0000	0.9773
STI	-0.3336	0.9859	0.9764	-0.0530	0.3198	-0.6622	0.1735	-0.5199	0.9773	1.0000

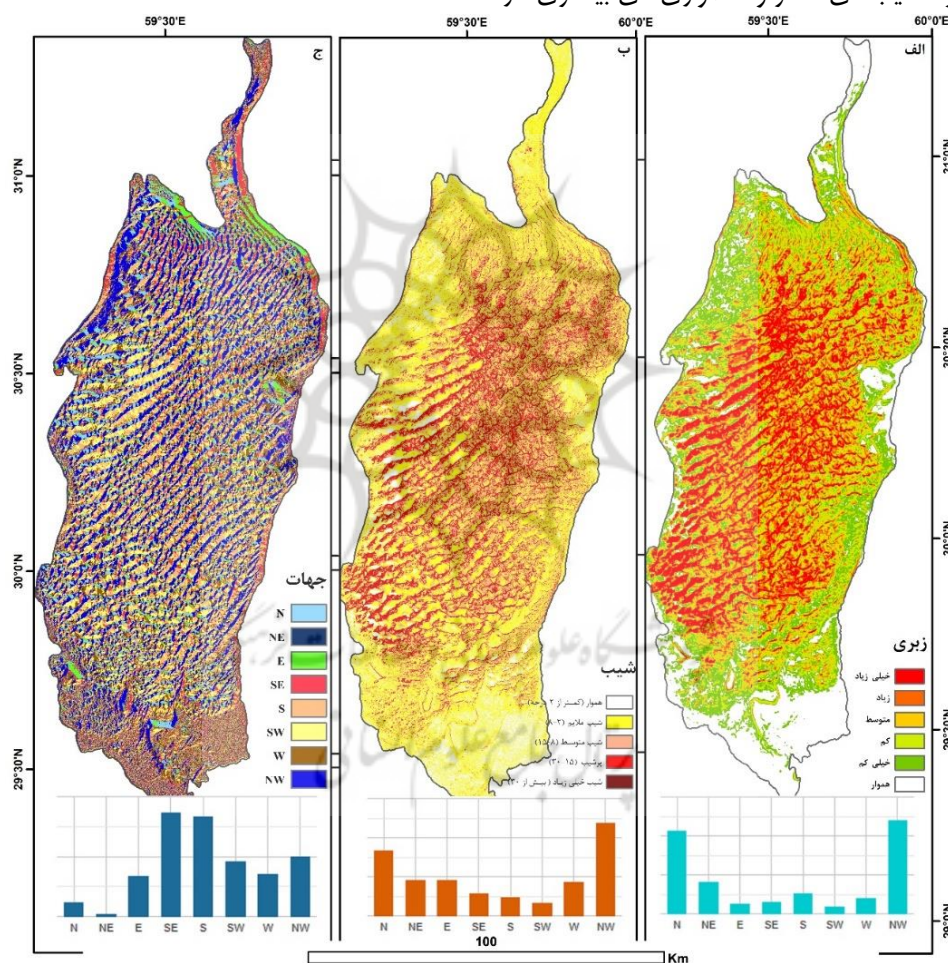
۲. الگوهای مکانی و توپوگرافیک تلماسه‌ها

تحلیل الگوهای مکانی و توپوگرافیک تلماسه‌ها در منطقه ریگ یلان، با استفاده از شاخص‌های مورفومتریک، نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در ساختار و پویایی این عوارض ژئومورفولوژیکی است. تلماسه‌ها به عنوان شاخص‌های محیطی پویای مناطق بیابانی، تحت تأثیر عوامل بادی، توپوگرافی سطحی و فرایندهای رسوب‌گذاری قرار دارند. داده‌های حاصل از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) و پردازش‌های مورفومتریک، به همراه تحلیل‌های کمی و بصری در شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵، نشان می‌دهند که شیب، زبری سطح، انحنای توپوگرافیک و شاخص‌های موقعیت ژئومورفولوژیک نقش کلیدی در تفکیک و تعیین الگوهای فضایی تلماسه‌ها دارند. این شاخص‌ها امکان بررسی دقیق فرایندهای بادی غالب و تأثیر آن‌ها بر تکامل

این ساختارهای ماسه‌ای را فراهم می‌کنند.

۲,۱ توزیع شیب و زبری سطح تلماسه‌ها

بررسی توزیع شیب (*Slope*) و زبری سطح (*Roughness*) که در شکل ۳ نمایش داده شده، نشان می‌دهد که شیب‌های تندتر عمدتاً در مناطق شمال غربی (NW) و شمالی (N) مشاهده می‌شوند، در حالی که شیب‌های ملایم‌تر در جنوب شرقی (SE) و جنوبی (S) قرار دارند. شیب‌های بیشتر در NW تأیید می‌کنند که این بخش‌ها عمدتاً دامنه‌های پشت به باد^۱ هستند، که تحت تأثیر تجمع رسوبات و فرآیندهای رسوب‌گذاری قرار دارند. در مقابل، شیب کمتر در SE و S نشان‌دهنده دامنه‌های رو به باد^۲ است که به دلیل فرسایش شدید، ناپایدارتر و کم‌شیب‌تر هستند. این الگوها با یافته‌های مطالعات قبلی در سایر مناطق بیابانی جهان (مانند صحرای نامیب و ارگ بزرگ آفریقا) همخوانی دارند، که نشان داده‌اند تلماسه‌های پشت به باد معمولاً شیب‌های تندتر و ناهمواری‌های بیشتری دارند.



شکل ۳ توزیع زبری، شیب و جهات جغرافیایی سطح در منطقه ریگ یلان

این نقشه‌ها توزیع زبری (الف)، شیب سطح (ب) و جهات جغرافیایی تلماسه‌ها (ج) را نمایش می‌دهند. نمودارهای پایین نشان‌دهنده توزیع این ویژگی‌ها در جهت‌های جغرافیایی مختلف هستند. بیشترین مقادیر شیب و زبری سطح در مناطق NW و NE مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر نیروهای بادی در این بخش‌ها است.

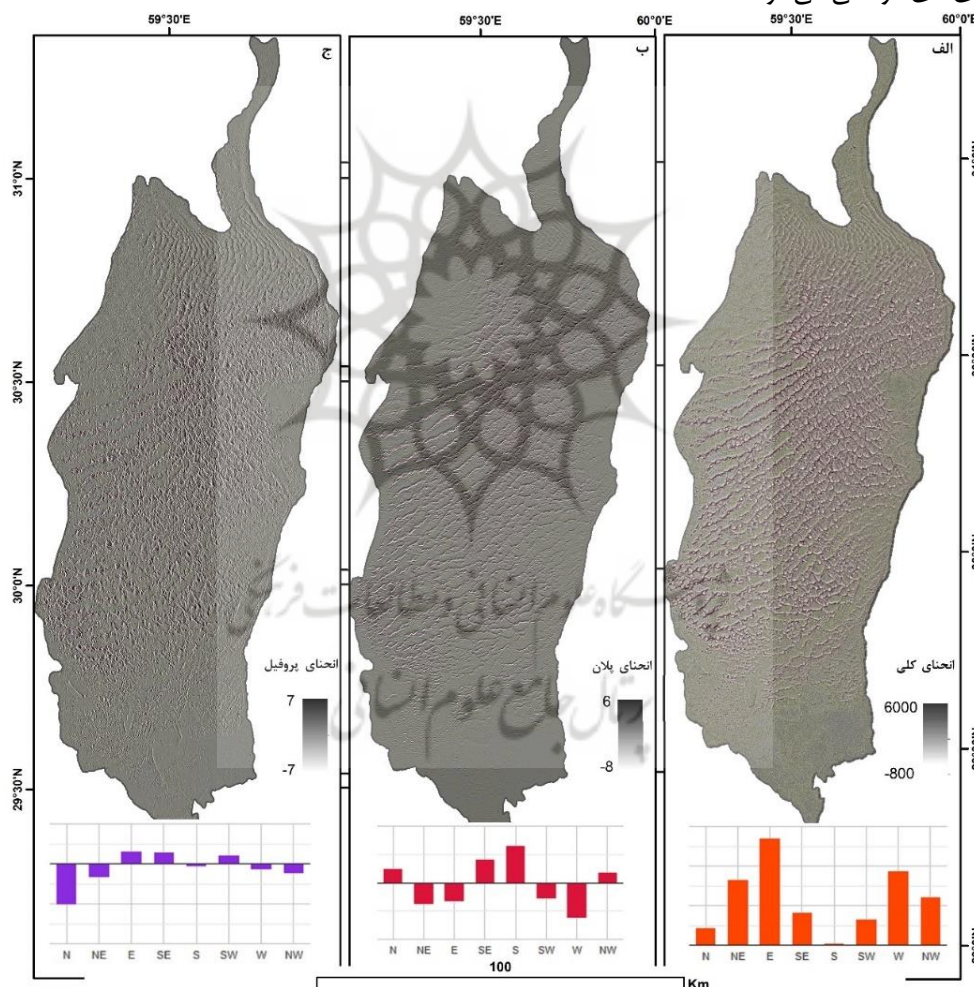
¹ Lee-side

² Windward-side

زبری سطح نیز همبستگی بالایی با شیب نشان می‌دهد، به‌طوری که در نواحی NW و N زبری سطح بالا است، که نشان‌دهنده ناهمواری‌های شدیدتر و ناپایداری‌های محلی در اثر جابه‌جایی رسوبات است. در مقابل، مقدار کم زبری سطح در SE و S تأیید می‌کند که این مناطق بیشتر تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارند و سطوح آن‌ها نسبتاً هموارتر است. این الگوها با داده‌های مطالعات میدانی انجام‌شده در بیابان‌های آسیای مرکزی و صحرای کالاهاری تطابق دارد، که نشان می‌دهند افزایش زبری سطح مستقیماً با نرخ بالای تغییرات تلماسه‌ای در ارتباط است.

۲,۲ تحلیل انحنای توپوگرافیک و تأثیر آن بر پایداری تلماسه‌ها

شکل ۴ توزیع انحنای کلی (Total Curvature)، انحنای پلان (Plan Curvature) و انحنای پروفیل (Profile Curvature) را در منطقه نشان می‌دهد. انحنای کلی، که نشان‌دهنده تغییرات گسترده در توپوگرافی است، در نواحی NW و NE بیشترین مقدار را دارد، که بیانگر تغییرات شدیدتر ارتفاعی و ناهمواری‌های بیشتر در این مناطق است. این الگوها تأیید می‌کنند که مناطق پشت به باد، علاوه بر شیب بالا، دارای تغییرات توپوگرافیک بیشتری نیز هستند که منجر به ناپایداری‌های موضعی می‌شود.



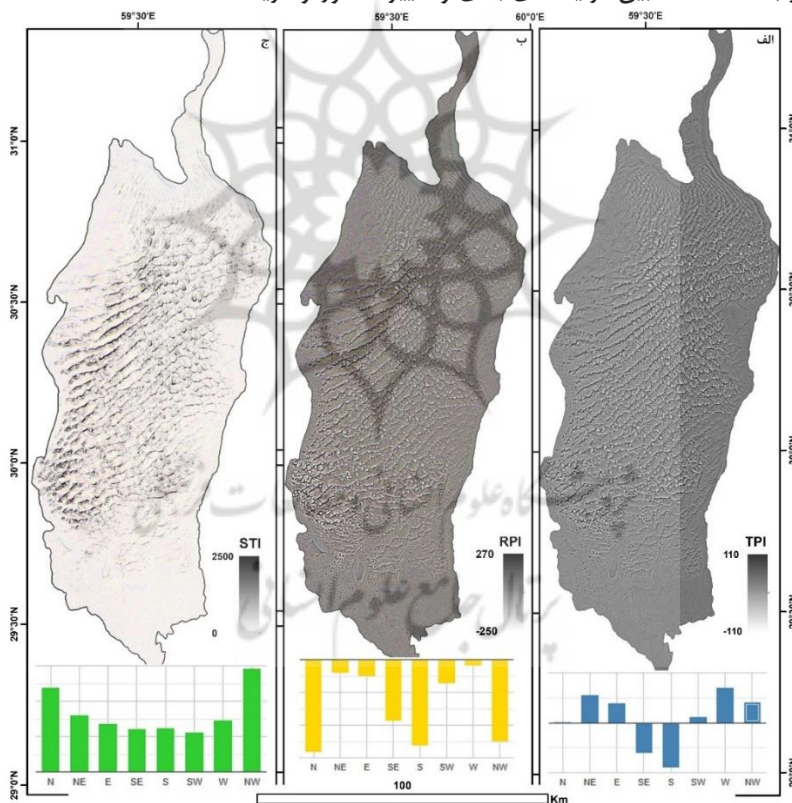
شکل ۴ توزیع انواع انحنای سطح در منطقه ریگ یلان

(الف) انحنای کلی، میزان تغییرات توپوگرافی را مشخص می‌کند که در NW و NE بیشترین مقدار را دارد؛ (ب) انحنای پلان، میزان تحدب و تقعر سطح تلماسه‌ها را نمایش می‌دهد که در جهت‌های مختلف متغیر است؛ (ج) انحنای پروفیل، تغییرات شیب را در امتداد محور طولی تلماسه‌ها نشان می‌دهد و نواحی فرسایش و انباشت را مشخص می‌کند. این شاخص‌ها درک بهتری از پویایی تلماسه‌ها و تأثیر فرآیندهای بادی ارائه می‌دهند.

انحنای پلان که میزان تحدب یا تقعر سطح را نمایش می‌دهد، در NW و NE دارای تغییرات بیشتری است، که نشان‌دهنده ناهمواری‌های محلی ناشی از تجمع و حرکت رسوبات است. در مقابل، در SE و S مقدار این شاخص نسبتاً کم‌تر است، که با نقش این مناطق به‌عنوان نواحی فرسایشی همخوانی دارد. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که تلماسه‌های واقع در پشت به باد، به دلیل تغییرات مورفولوژیک مداوم، دارای پایداری کمتری هستند.

انحنای پروفیل، که میزان تغییرات شیب را در امتداد دامنه‌های تلماسه‌ها اندازه‌گیری می‌کند، در مناطق NW و W مقدار بیشتری دارد. این نشان می‌دهد که این نواحی بیشتر در معرض تغییرات فرسایشی و جابه‌جایی رسوبات هستند. مطالعات پیشین در بیابان‌های ایران و عربستان نیز این نتایج را تأیید کرده‌اند، که انحنای بالا معمولاً با ناپایداری بیشتر تلماسه‌ها همراه است.

۲,۳ توزیع شاخص‌های مورفومتریک (STI, RPI, TPI) و تأثیر آن‌ها بر دینامیک تلماسه‌ها
تحلیل شاخص‌های حمل‌ونقل رسوبات (Sediment Transport Index – STI)، موقعیت نسبی (Relative Position Index – RPI) و موقعیت توپوگرافی (Topographic Position Index – TPI) که در شکل ۵ ارائه شده است، بیانگر ارتباط تنگاتنگ بین فرایندهای بادی و تغییرات مورفومتریک تلماسه‌ها است.



شکل ۵ توزیع شاخص‌های مورفومتریک تلماسه‌ها در منطقه ریگ یلان

(الف) شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) مناطق مرتفع و پست را مشخص کرده و روند کلی توپوگرافی را نمایش می‌دهد؛ (ب) شاخص موقعیت نسبی (RPI) موقعیت نسبی هر نقطه را نسبت به مناطق اطراف تعیین کرده و ارتباط آن با فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد؛ (ج) شاخص حمل‌ونقل رسوبات (STI) بیانگر شدت جابه‌جایی مواد و پویایی رسوبات در سطح تلماسه‌ها است که در NW و NE بیشترین مقدار را دارد. نمودارهای پایین هر نقشه، تغییرات این شاخص‌ها را در جهت‌های جغرافیایی مختلف نمایش می‌دهند.

مقادیر بالای STI در NW و NE نشان می‌دهد که این مناطق دارای نرخ جابه‌جایی رسوبات بالاتری هستند، که با

شیب زیاد و زبری بالای این مناطق همخوانی دارد. در مقابل، مقادیر پایین STI در SE و S نشان‌دهنده نقش این بخش‌ها در فرسایش و برداشت رسوبات است. این الگو تأیید می‌کند که جهت باد غالب از SE به NW است و رسوبات تحت تأثیر این الگو حرکت می‌کنند.

شاخص موقعیت نسبی (RPI) در SE و S دارای مقادیر منفی است، که نشان می‌دهد این نواحی در موقعیت‌های پایین‌دست قرار دارند و بیشتر تحت تأثیر فرسایش بادی هستند. در مقابل، مقادیر مثبت RPI در NW و N بیانگر ارتفاعات بالاتر و مناطق پایدارتر است، که ارتباط نزدیکی با تجمع رسوبات در این نواحی دارد.

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) نیز در NW و NE دارای مقادیر مثبت است، که نشان‌دهنده قرارگیری این مناطق در موقعیت‌های مرتفع‌تر و نسبتاً پایدارتر است. در مقابل، مقادیر منفی در SE و S تأیید می‌کند که این نواحی بیشتر در معرض فرسایش و انتقال رسوبات قرار دارند.

۳. تحلیل چندجهتی پویایی بادی و تأثیر آن بر تحول تلماسه‌های ریگ یلان

نزدیکترین ایستگاه‌های هواشناسی به ریگ یلان به ترتیب فاصله کهورک، نصرت آباد، دهنه‌باغی، چاه علاداد، ده‌سلم، ریجی و نه‌بندان هستند. جهت باد غالب در نصرت آباد شرقی بوده و حداکثر باد از ۴۰ درجه (شمال شرق) با سرعت ۱۶ متر بر ثانیه ثبت شده است (*Error! Reference source not found.*). تحلیل دینامیک تلماسه‌ها در مناطق بیابانی نیازمند بررسی دقیق الگوهای بادی و نحوه تعامل آن‌ها با ویژگی‌های مورفومتریک است. در منطقه ریگ یلان، جهت‌گیری و تحول تلماسه‌ها نه تنها تحت تأثیر باد غالب از جنوب شرقی (SE) به شمال غربی (NW) است، بلکه بادهای فرعی جنوب (S) به شمال (N) و شرق - شمال شرقی ($E-NE$) به غرب - جنوب غربی ($W-SW$) و همچنین جنوب غربی (SW) به شمال شرق (NE) بر تنظیم الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش تأثیرگذارند. این فرآیندها از طریق تحلیل داده‌های ارتفاعی، شاخص‌های مورفومتریک و مدل‌سازی همبستگی‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفته است (جدول ۳، شکل ۴ و شکل ۵).

۳.۱ تأثیر باد غالب بر جابه‌جایی رسوبات و تحول تلماسه‌ها

باد غالب از SE به NW نقش اصلی را در فرسایش نواحی SE و تجمع رسوبات در NW ایفا می‌کند. داده‌های شاخص‌های مورفومتریک (شکل ۵) نشان می‌دهد که در SE مقدار شاخص حمل‌ونقل رسوبات (STI) پایین و میزان فرسایش بالا است، در حالی که در NW مقدار STI افزایش یافته، که نشانه انباشت رسوبات و پایداری بیشتر تلماسه‌ها در این بخش است.

همچنین، شاخص موقعیت نسبی (RPI) در SE دارای مقادیر منفی و در NW مثبت است که نشان می‌دهد مناطق NW در موقعیت بالاتر و پایدارتر قرار دارند و SE به دلیل فرسایش بیشتر، نواحی پست‌تری را شامل می‌شود. بررسی شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در NW نشان می‌دهد که این نواحی نسبت به سطح زمین ارتفاع بیشتری دارند، در حالی که در SE مقادیر منفی TPI تأیید می‌کند که این مناطق بیشتر در معرض باد و فرسایش قرار گرفته‌اند.

این الگو با مطالعات انجام‌شده در سایر بیابان‌های جهان، از جمله بیابان نامیب (Lancaster, 1995)، بیابان تار (Singhvi et al., 2010) و بیابان لوت (Noroozi et al., 2021) مطابقت دارد، که همگی تأکید دارند باد غالب تعیین‌کننده اصلی در حرکت و تحول تلماسه‌ها است.

۳.۲ تأثیر بادهای فرعی بر تنظیم ساختار تلماسه‌ها

علاوه بر باد غالب $SE-NW$ ، بادهای جنوب (S) به شمال (N)، شرق - شمال شرق ($E-NE$) به غرب - جنوب غربی ($W-SW$) و جنوب غرب (SW) به شمال شرق (NE) تأثیر فرعی بر تنظیم الگوی تلماسه‌ها دارند. تحلیل همبستگی‌های آماری (جدول ۳ و بررسی مورفولوژی تلماسه‌ها (شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵) نشان می‌دهد که بادهای فرعی تأثیر قابل‌توجهی در

توزیع مجدد رسوبات در بخش‌های حواشی شرقی، شمال‌شرقی و جنوب‌غربی ریگ یلان دارند. مقادیر هریک از این شاخص‌ها (جدول ۲) و همبستگی بین دامنه‌ها (جدول ۳) تأیید می‌کند که اگرچه بادهای فرعی شدت کمتری نسبت به باد غالب دارند، اما در تنظیم مورفولوژی تلماسه‌ها و بازآرایی رسوبات نقش مهمی ایفا می‌کنند. این یافته‌ها با پژوهش ویگ و همکاران (۲۰۰۳) که بر تعامل نیروهای بادی در بیابان‌های آفریقا و خاورمیانه تمرکز داشتند، همخوانی دارد.

۳,۳ اثر ترکیبی بادهای بر تحول تلماسه‌ها

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تلماسه‌های ریگ یلان تحت تأثیر تعامل سه جهت بادی اصلی و فرعی قرار دارند. این تعاملات باعث ایجاد الگوهای مختلط جهت‌یابی در نواحی مختلف ریگ یلان و تغییرات در شکل و پایداری تلماسه‌ها شده است. داده‌های مورفومتریک نشان می‌دهد که محورهای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی، شرقی-غربی، شمال‌شرقی-جنوب‌شرقی و شمال‌غرب-جنوب‌شرق بترتیب در کل ریگ یلان، شرق، شمال‌شرق و جنوب‌غربی ریگ یلان غالب هستند (شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵). جدول ۱ نشان‌دهنده تحلیل اثر بادهای غالب و فرعی عمده بر تلماسه‌های منطقه ریگ یلان است. این جدول شامل تأثیر هر جهت بادی بر فرسایش، رسوب‌گذاری و پایداری تلماسه‌ها است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که ساختار تلماسه‌های منطقه ریگ یلان، محصول تعامل چندجهتی باد غالب و بادهای فرعی است. همان‌طور که جدول ۱ به‌روشنی نشان می‌دهد، جهت‌های مختلف بادی هرکدام تأثیر متمایز و مشخصی بر دینامیک فرسایش و رسوب‌گذاری دارند.

جدول ۱: تحلیل اثر جهت‌های بادی بر دینامیک تلماسه‌های ریگ یلان

جهت باد	ناحیه تحت تأثیر	نوع تأثیر	شاخص‌های مرتبط	اثرات ژئومورفیک
SE → NW	SE: فرسایش NW: رسوب‌گذاری	انتقال رسوبات اصلی	SE در STI ↓ ، NW در STI ↑ NW در RPI ↑	افزایش ارتفاع تلماسه‌ها در NW و کاهش در SE
N → S	S: فرسایش N: انتقال مواد	فرسایش موضعی	S در STI ↑ ، S در TPI ↓	تأثیر بر نواحی پست‌تر و تغییرات محلی تلماسه‌ها
NE → SW	NE: برداشت رسوبات SW: انباشت جزئی	تنظیم ساختار تلماسه‌ها	NE در سطح ↑ ، RPI ↑ در SW	افزایش زبری سطح در NE و بازآرایی تلماسه‌ها

جدول ۲، نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های مورفومتریک در پژوهش حاضر را با مطالعات دیگر در زمینه مورفودینامیک تلماسه‌ها مقایسه می‌کند. در این جدول، با تأکید بر تفاوت اثرات شاخص‌ها در جهت‌های مختلف، نشان داده شده است که نتایج این پژوهش همسو با الگوهای شناخته‌شده در تحقیقات پیشین است، اما تفاوت‌های قابل‌توجهی نیز در شدت و دامنه اثرات وجود دارد. از جمله این تفاوت‌ها، تأثیر بارز شاخص‌های STI و RPI در تعیین مرز بین مناطق تجمع و فرسایش است که به دقت در پژوهش حاضر مشخص شده است. این مقایسه نه تنها صحت نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند، بلکه نوآوری آن را در تفسیر دقیق‌تر روابط متقابل بین شاخص‌های مورفومتریک و دینامیک بادی برجسته می‌سازد.

جدول ۲: مقایسه تحلیلی شاخص‌های مورفومتریک تلماسه‌ها با پژوهش‌های معتبر جهانی

Lancaster (۱۹۹۵)	فرسایش جزئی S	تغییر متوسط زبری	SE فرسایش	شیب (Slope)
		بازآرایی SW	تجمع NW	
Livingstone et al . (۲۰۰۷)	کم تا متوسط در N-S	زیاد NE (تجمع)	کم در SE (فرسایش)	زبری سطح (Roughness)
		متوسط SW	زیاد در NW (تجمع)	
	تأثیر ضعیف در محور N-S	زیاد NE (تجمع جزئی)	زیاد NW (تجمع)	

Herrmann et al . (۲۰۱۲)		متوسط SW	کم SE	انحنای کلی (Total Curvature)
Lancaster (۱۹۹۵)	تأثیر جزئی (کم)	زیاد NE (تجمع)	زیاد NW (تجمع)	انحنای پلان (Plan Curvature)
Wiggs et al (۲۰۰۳)	تأثیر متوسط	متوسط SW	کم SE	شاخص موقعیت نسبی (RPI)
Goorabi et all (۲۰۱۷)	تأثیر فرسایشی جزئی در S	منفی NE	منفی SE (فرسایش)	شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)
Noroozi et al . (۲۰۲۱)	کم تا متوسط S (فرسایش)	متوسط تا زیاد NE (تجمع)	کم SE (فرسایش)	شاخص حمل و نقل رسوبات (STI)
	اثر متوسط (تجمع یا فرسایش)	اثر فرسایش قوی	اثر تجمع رسوبی مثبت و قوی	راهنما
	↑ و ↓ بیانگر جهت اثر (تجمع یا فرسایش)	اثر بسیار جزئی یا ناچیز	اثر ضعیف یا محلی	

نتایج این پژوهش نشان داد که تلماسه‌های ریگ یلان تحت تأثیر سه سیستم بادی اصلی قرار دارند: (۱) باد غالب SE-NW که نیروی اصلی انتقال مواد و شکل‌دهی تلماسه‌ها؛ (۲) باد فرعی NE-SW: تنظیم‌کننده زبری سطح و ناهمواری‌های موضعی؛ و (۳) باد فرعی N-S: که تأثیرگذار بر نرخ فرسایش و انتقال رسوبات در نواحی پست‌تر است. این تعامل پیچیده باعث شکل‌گیری الگوهای متنوعی از تغییرات مورفولوژیک شده و بر اساس داده‌های آماری، مکان‌یابی مناطق فرسایش و انباشت به‌طور مستقیم تحت تأثیر تعامل این بادهای قرار دارد. یافته‌های این پژوهش می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای مدل‌سازی دقیق‌تر تغییرات تلماسه‌ای، مدیریت بیابان‌زایی و طراحی راهکارهای پایدار برای کنترل فرآیندهای بادی در مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرند.

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه برای ردیابی تغییرات بلندمدت تلماسه‌ها، به‌کارگیری داده‌های میدانی باد و سنجش بادسنجی برای اعتبارسنجی مدل‌های مورفومتری و استفاده از مدل‌های عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تحلیل دقیق‌تر تعامل جریان‌های بادی، از جمله پیشنهادات و رویکردهایی هستند که می‌توانند به بهبود مدل‌های پیش‌بینی تحول تلماسه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کنند و اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت پایدار مناطق بیابانی فراهم آورند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی ویژگی‌های ژئومورفومتری تلماسه‌های ریگ یلان در دشت لوت و شناسایی جهت باد غالب با استفاده از تکنیک‌های ژئومورفومتری، داده‌های مدل ارتفاعی رقومی (SRTM) و تحلیل‌های پیشرفته در Google Earth Engine و GIS انجام شد. یافته‌ها نشان داد که باد غالب از جنوب شرقی به شمال غربی (SE-NW) عامل اصلی شکل‌دهی تلماسه‌ها است، با فرسایش شدید در دامنه‌های SE (شیب میانگین ۷٫۲۰ درجه، $STI=۶۰٫۶۱$) و تجمع رسوبات در NW (شیب میانگین ۱۰٫۷۹ درجه، $STI=۱۴۶٫۴۱$). شاخص‌های ژئومورفومتری، به‌ویژه STI و RPI، با تحلیل الگوهای شیب، زبری سطح (NW: ۱۲٫۳۸ و SE: ۸٫۶۴)، انحنای و جهت باد را با دقت پیش‌بینی کردند. بادهای فرعی NE-SW و N-S به‌ترتیب در بخش‌های شمال شرقی و جنوب غربی ریگ یلان، الگوهای مورفولوژیکی را تنظیم می‌کنند. مقایسه با مطالعات جهانی (نامیب، تار، لوت) نشان‌دهنده همخوانی نتایج و ارائه نوآوری‌هایی در تحلیل چندجهتی پویایی بادی و ماتریس‌های مقایسه‌ای است. با این حال، رزولوشن ۳۰ متری SRTM و فقدان داده‌های میدانی بادسنجی، دقت

تحلیل جزئیات ریز را محدود کرد. این یافته‌ها درک بهتری از فرآیندهای بادی فراهم کرده و برای مدیریت پایدار منابع، کنترل فرسایش بادی، و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی در مناطق خشک کاربرد دارند. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده از داده‌های میدانی باد، سنجش از دور چندزمانه، و مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای بهبود مدل‌سازی پویایی تلماسه‌ها استفاده کنند.

منابع

- مقصودی، م.، نگهبان، س.، باقری سید شکری، س.، و چزغه، س. (۲۰۱۲). مقایسه و تحلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی نیکاهای چهار گونه‌ی گیاهی در غرب دشت لوت (شرق شهداد - دشت تکاب). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۱)، ۵۵-۷۶. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2012.24734>
- Abdollahi, A., & Yamani, M. (2009). Observation (Geomorphology) of the largest mega sand of central Iran Desert, Lut, Using Remote sensing data. [Conference Paper]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-4174-1.pdf>
- Ahmadipour, A. (2015). Geomorphology of the Lut Desert: Processes and dune patterns. Pazhuhesh-Haye Joghrafiyayi, 27(104), 23-42.
- Ahmady-Birgani, H., McQueen, K., Moeinaddini, M., & Naseri, H. (2017). Sand dune encroachment and desertification processes of the Rigboland Sand Sea, Central Iran. Scientific Reports, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01796-z>
- Alavi Panah, S. K., Komaki, C. B., Goorabi, A., & Matinfar, H. R. (2007). Characterizing land cover types and surface condition of yardang region in Lut Desert (Iran) based upon Landsat satellite images. World Applied Sciences Journal, 2(3), 212-228. [http://www.idosi.org/wasj/wasj2\(3\)/11.pdf](http://www.idosi.org/wasj/wasj2(3)/11.pdf)
- Baas, A., & Delobel, L. (2022). Desert dunes transformed by end-of-century changes in wind climate. Nature Climate Change, 12, 999-1006. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01507-1>
- Bagnold, R. A. (1984). The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen.
- Blumberg, D. (2006). Analysis of large aeolian (wind-blown) bedforms using the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation data. Remote Sensing of Environment, 100(2), 179-189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.011>
- Chanteloube, C., Barrier, L., Derakhshani, R., Gadal, C., Braucher, R., Payet, V., Léanni, L., & Narteau, C. (2022). Source-To-Sink Aeolian Fluxes From Arid Landscape Dynamics in the Lut Desert. Geophysical Research Letters, 49. <https://doi.org/10.1029/2021GL097342>
- Chanteloube, C., Barrier, L., Derakhshani, R., Gadal, C., Braucher, R., Payet, V., Léanni, L., & Narteau, C. (n.d.). Source-to-sink aeolian fluxes from arid landscape dynamics in the Lut Desert. Geophysical Research Letters. <https://doi.org/10.1029/2021GL097342>
- Cooke, R. U., & Warren, A. (1982). Geomorphology in deserts. Berkeley, CA: University of California Press.
- Ding, C., Zhang, L., Liao, M., Feng, G., Dong, J., Ao, M., & Yu, Y. (2020). Quantifying the spatio-temporal patterns of dune migration near Minqin Oasis in northwestern China with time series of Landsat-8 and Sentinel-2 observations. Remote Sensing of Environment, 236, 111498. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111498>
- Ehsani, A. H., & Quiel, F. (2008). Application of self-organizing map and SRTM data to characterize yardangs in the Lut Desert, Iran. Remote Sensing of Environment, 112(7), 3284-3294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.04.007>
- Embrechts, M., & Ma, X. (2011). Geomorphometric analysis of dune fields using DEM data. Geomorphology, 130(3-4), 261-271.

- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Foroutan, M., & Zimbelman, J. R. (2016). Mega-ripples in Iran: A new analog for transverse aeolian ridges on Mars. *Icarus*, 274, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.03.025>
- Foroutan, M., & Zimbelman, J. R. (2016). Mega-ripples in Iran: A new analog for transverse aeolian ridges on Mars. *Icarus*, 274, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.03.025>
- Gadal, C., Delorme, P., Narteau, C., Wiggs, G., Baddock, M., Nield, J., & Claudin, P. (2022). Local wind regime induced by giant linear dunes: Comparison of ERA5-Land reanalysis with surface measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 185(3), 309–332. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00733-6>
- Ghazanfarpour, H., Pourkhosravani, M., Mousavi, S. H., & Mehrabi, A. (2021). Mathematical and statistical modeling of morphometric and planar parameters of barchans in Pashoeyeh Erg in the west of Lut Desert, Iran. *Journal of Arid Land*, 13, 801–813. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0102-5>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Houshang, E., & Foroutan, M. (2014). Analysis of mega-landforms in desert environment using artificial neural network, Iran's Lut and China's Qaidam Deserts. *Journal of Geomorphology*, 40, 515–527.
- Karami, M., & Ahmadi, A. (2017). Role of wind direction and uniformity in sand dune morphology evolution: Case study of Sadagh-Abad Erg, Bafgh. *Geographical Research Journal*, 32(4), 45–82.
- Lancaster, N. (1995). *Geomorphology of desert dunes*. Routledge.
- Maghsoudi, M., Moradi, A., Moradipour, F., & Nezammahalleh, M. A. (2019). Geotourism development in world heritage of the Lut Desert. *Geoheritage*, 11(2), 501–516. <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0303-2>
- Mashhadi, N., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M. R., Feiznia, S., & Feghhi, G. (2007). Analysis of sand dunes to determine wind direction and detect sand source sites (case study: Khartooran Erg, Iran). *Desert*, 12, 69–75. <https://doi.org/10.22059/JDESERT.2008.31068>
- Mohammadi, M., & Ghasemi, M. (2019). Analysis of SRTM data in geomorphological studies of Iran's deserts. *Earth and Environmental Sciences*, 15(3), 45–58.
- Nazari Samani, A., Khosravi, H., Mesbahzadeh, T., Azarakhshi, M., & Rahdari, M. (2016). Determination of sand dune characteristics through geomorphometry and wind data analysis in central Iran (Kashan Erg). *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2746-6>
- Noroozi, J., et al. (2021). Aeolian geomorphodynamics and sediment transport patterns in the Lut Desert. *Geomorphology*, 382, 107671.
- Rahdari, M., & 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>
- Rubin, D. M., & Hunter, R. E. (1987). Bedform alignment and stratigraphic patterns in aeolian environments. *Sedimentology*, 34(4), 839–849.
- Scheidt, S., Ramsey, M., & Lancaster, N. (2010). Determining soil moisture and sediment availability at White Sands Dune Field, New Mexico, from apparent thermal inertia data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3). <https://doi.org/10.1029/2009JF001378>

- Singhvi, A. K., Kar, A., & Thomas, D. S. G. (2010). Optically stimulated luminescence dating and aeolian processes: Insights from the Thar Desert. *Journal of Arid Environments*, 74(3), 377–387.
- Taniguchi, K., Endo, N., & Sekiguchi, H. (2012). The effect of periodic changes in wind direction on the deformation and morphology of isolated sand dunes based on flume experiments and field data from the Western Sahara. *Geomorphology*, 179, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.019>
- Telbisz, T., & Keszler, O. (2018). DEM-based morphometry of large-scale sand dune patterns in the Grand Erg Oriental (Northern Sahara Desert, Africa). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3738-5>
- Yamani, M., Goorabi, A., Mohammadkhan, S., & Hosseini, S. J. (2023). Evaluating the effects of neotectonic activities on basin shape indices (Case study: Zanjanrud sub-basins). *Earth Science Research Journal*, 15(2), 25–42. <https://doi.org/10.48308/esrj.2023.104054>
- Weaver, R. C., & Perroy, R. L. (2015). Remote sensing of dune morphology and dynamics. *Earth-Science Reviews*, 146, 87–105.
- Wiggs, G. F. S., Livingstone, I., & Warren, A. (2003). Sand dune dynamics in the southern Kalahari Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(6), 679–695

