Morphodynamic Classification of Ergs Using Multi-Temporal Satellite Imagery and Machine Learning: A Case Study of the Rig-e Yalan, Lut Desert, Iran

Abolghasem Goorabi[1]
Associate Professor, Faculty of Geography, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Research Full Paper
Article History (Received: 2025/08/1 Accepted: 2025/12/3)

Extended Abstract

1 .Introduction

Sand dune morphodynamics, shaped by interactions between wind regimes, sediment availability, topography, and sparse vegetation, are key drivers of desert landscape evolution and indicators of desertification processes (Ashrafzadeh et al., 2017; Ehsani & Foroutan, 2014). The Rig-e Yalan region, situated in the hyper-arid Lut Desert of eastern Iran (Figure 1), represents one of the most extreme natural laboratories globally, with surface temperatures exceeding 70 °C (Mildrexler et al., 2011) and diverse dune morphologies, including barchans, linear ridges, and star dunes (Milani et al., 2021). Its enclosed topography, concentrated wind systems, and minimal human disturbance provide an exceptional setting for automated morphodynamic modeling. Traditional field surveys face challenges in this harsh environment, highlighting the importance of remote sensing, cloud-computing, and machine learning approaches (Goorabi & Yamani, 2025). The objectives of this study are: (1) to preprocess and integrate multi-sensor datasets; (2) to derive geomorphometric and spectral indices; (3) to classify homogeneous morphodynamic units using supervised and unsupervised models; and (4) to validate the classification framework for monitoring desertification and informing adaptive land management.

2 .Methodology

A multi-sensor workflow was implemented in Google Earth Engine (GEE) using datasets from Sentinel-2 (10 m), Landsat-8 (30 m), Sentinel-1 SAR (10 m), and topographic data from SRTM (30 m) and ALOS PALSAR (12.5 m). Preprocessing included atmospheric correction, cloud/shadow masking (QA60, BQA), geometric and terrain correction. In total, 27 indices were extracted (Table 1), including 13 geomorphometric indices (slope, aspect, Topographic Position Index [TPI], Terrain Ruggedness Index [TRI]), 11 spectral indices (NDVI, NDWI, Bare Soil Index [BSI], etc.), and 3 Sentinel-2 vegetation indices (NDRE). Dimensionality reduction was achieved via Principal Component Analysis (PCA), where PC1–PC3 captured most variance. Two new composite metrics—the Morphodynamic Activity Index (MAI) and Integrated Dune Mobility Score (IDMS)—were developed (Table 2). Classification combined a Random Forest (RF) algorithm with 100 trees and 5-fold cross-validation, alongside K-Means clustering (K=5, Elbow Method). The COSI-Corr algorithm was applied to multi-temporal imagery for sub-pixel dune migration analysis. Validation used Google Earth Pro imagery and synthetic datasets, evaluated via overall accuracy (OA), Kappa coefficient, and confusion matrices.

3 .Results

The RF model achieved an OA of 91.14% and a Kappa of 0.88, successfully delineating six morphodynamic units: active dunes (15.5%), semi-active dunes (20.8%), sandy surfaces (36.3%), hard surfaces (12.5%), wind-eroded areas (8.4%), and mixed terrains (6.5%) (Figure 2). High TRI and TPI values in the southern sector indicated stronger aeolian

[1] **Corresponding Author:** Goorabi@ut.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

activity. The MAI (0.847) and IDMS (0.923) confirmed Rig-e Yalan's extreme dune mobility, driven by negligible vegetation (mean NDVI = 0.086), elevated bare soil exposure (mean BSI = 0.180), and rugged terrain (mean TRI = 0.802). Tasseled Cap analysis revealed high brightness (mean = 0.350), near-zero greenness (–0.025), and minimal wetness (0.025), consistent with hyper-arid conditions (Figure 3). The Desertification Risk Index (DRI = 0.756) and Ecological Sensitivity Index (ESI = 0.78) highlighted severe environmental vulnerability. Pearson correlations showed a strong negative NDVI–BSI relationship (r = –0.82) and positive slope–TRI relation (r = 0.73), validating consistency. K-Means clustering corroborated the RF classification (Figure 4). COSI-Corr revealed dune migration, particularly in active dune zones, confirming dynamic morphodynamics (Figure 5).

4 .Discussion & Conclusions

This study demonstrates a robust, automated framework for classifying and monitoring dune morphodynamics in hyper-arid landscapes. By integrating multi-sensor datasets and advanced machine learning, it overcomes challenges of spectral similarity and lack of field data. The RF model achieved high accuracy (91.14%, Kappa 0.88), while novel indices (MAI = 0.847, IDMS = 0.923) provide scalable tools for quantifying dune mobility, supporting desertification monitoring (Miszalski et al., 2023; Blumstein & MacManes, 2023). The use of GEE ensured efficient, reproducible analysis across large spatio-temporal datasets. Findings confirm Rig-e Yalan's exceptional morphodynamic activity and ecological fragility (ESI = 0.78), underscoring its UNESCO World Heritage significance. The framework can be extended to other deserts (e.g., Sahara, Gobi) for global comparative studies. Limitations include absence of in-situ validation and reliance on GEE's processing infrastructure. Future work should incorporate targeted field campaigns, test deep learning approaches, and establish global dune dynamics databases. These results provide actionable insights for climate adaptation, sustainable land management, and regional policy-making.

Keywords: Aeolian processes, Geomorphometry, Geomorphometric indices, Random Forest, Google Earth Engine

Cite this article: Goorabi, A. (2026). Morphodynamic Classification of Ergs Using Multi-Temporal Satellite Imagery and Machine Learning: A Case Study of the Rig-e Yalan, Lut Desert, Iran. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 16 (1):22-43*. http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.22

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.22
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

طبقه‌بندی مورفودینامیک ارگ‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه و یادگیری ماشین: مطالعه موردی ریگ یلان، بیابان لوت (ایران)

ابوالقاسم گورابی:** *دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران*

نوع مقاله: پژوهشی **تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲)**
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.405.1.22

چکیده

ریگ یلان در بیابان لوت ایران به دلیل شرایط اقلیمی فراخشک و تنوع ژئومورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای، یکی از بسترهای منحصر به‌فرد برای مطالعه فرآیندهای مورفودینامیک بیابانی در مقیاس جهانی است. اهمیت این پژوهش در ارائه چارچوبی خودکار و مقیاس‌پذیر برای پایش و طبقه‌بندی تغییرات مورفودینامیکی با بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. پژوهش حاضر با هدف طبقه‌بندی مورفودینامیک ارگ‌ها انجام شد. برای این منظور، تصاویر چندزمانه Sentinel-1 و Sentinel-2 طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ همراه با داده‌های رقومی ارتفاع در بستر Google Colab و Google Earth Engine پردازش گردید و تعداد ۲۸ شاخص شامل شاخص‌های طیفی، شاخص‌های بافتی و شاخص‌های ژئومورفومتریک استخراج شدند. نتایج اعمال الگوریتم جنگل تصادفی با ۱۰۰ درخت تصمیم و اعتبارسنجی متقاطع پنج‌لایه، با دقت کلی ۹۱/۱۴٪ و ضریب کاپای ۰/۸۸، شش کلاس مورفودینامیکی شامل تلماسه‌های فعال، نیمه‌فعال، پهنه‌های ماسه‌ای، سطوح سخت، مناطق با رخساره‌های فرسایش بادی و پهنه‌های مختلط را تفکیک کرد. این نتایج با خوشه‌بندی K-Means و تحلیل COSI-Corr اعتبارسنجی شدند و شاخص‌های نوآورانه شامل شاخص فعالیت مورفودینامیک (MAI=0.847)، امتیاز یکپارچه پویایی تپه‌ها (IDMS=0.923) و شاخص ریسک بیابان‌زایی (DRI=0.756) پتانسیل بالای تحرک و آسیب‌پذیری این سامانه ژئومورفوکلیماتیک را تأیید کردند. روش پیشنهادی با رفع محدودیت ناشی از فقدان داده‌های میدانی، ابزاری نوین برای پایش بیابان‌ها فراهم می‌کند و ریگ یلان را به‌عنوان آزمایشگاهی کلیدی برای پژوهش‌های بین‌المللی و مدیریت پایدار سرزمین‌های خشک معرفی می‌نماید.

واژگان کلیدی: فرسایش بادی، ژئومورفومتری، شاخص‌های ژئومورفومتریک، جنگل تصادفی، گوگل‌ارث‌انجین

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Goorabi@ut.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

۱- مقدمه

مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای یکی از موضوعات بنیادی در ژئومورفولوژی بیابانی و مدیریت سرزمین‌های خشک به شمار می‌آید. این پدیده‌ها نتیجه برهم‌کنش پیچیده میان باد، رسوب، توپوگرافی و پوشش گیاهی هستند و در مواجهه با تغییر اقلیم و فشارهای انسانی رفتاری پویا و پیش‌بینی‌ناپذیر دارند. از آنجا که مناطق خشک و نیمه‌خشک حدود ۴۰ درصد سطح زمین را پوشش می‌دهند، بررسی این اشکال بادی برای شناخت فرآیندهای ژئومورفولوژیکی، پیش‌بینی دینامیک و مهاجرت تلماسه‌ها، ارزیابی اثرات محیطی و مدیریت پایدار سرزمینی اهمیت ویژه‌ای دارد (Bullard & Livingstone, 2002; Lancaster, 2009; Bagnold, 1941; Kocurek & Ewing, 2005; Livingstone et al., 2007; Hugenholtz et al., 2012). علاوه‌بر پیامدهای زیست‌محیطی، تغییرات در دینامیک تپه‌های ماسه‌ای می‌تواند نشانه‌ای از بیابان‌زایی، اختلالات اکولوژیک و تغییر در چرخه‌های انرژی–رطوبت باشد و ازاین‌رو توسعه مدل‌های پیش‌بینی رفتار این ساختارها نه‌تنها جنبه علمی، بلکه کاربردهای مهندسی و مدیریتی نیز دارد.

بیابان لوت در شرق ایران به‌عنوان یکی از خشک‌ترین بیابان‌های جهان با دماهای سطحی بیش از ۷۰ درجه سانتی‌گراد شناخته می‌شود. در بخش غربی آن اشکال بادی یاردانگ‌ها و در شرق آن گستره وسیعی از تپه‌های ماسه‌ای(ارگ) ریگ یلان قرار دارد که شامل انواع برخان، خطی و ستاره‌ای است (Mildrexler et al., 2011). این تلماسه‌ها نسبت به رژیم‌های بادی و شرایط محیطی واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند و پایش آن‌ها یک چالش جدی است (Ehsani & Quiel, 2008; Ashrafzadeh et al., 2017). محدودیت‌های روش‌های میدانی سنتی، ناشی از مقیاس وسیع منطقه، شرایط اقلیمی خشن و پویایی زمانی بالای اشکال ماسه‌ای، موجب شده که ریگ یلان به یک آزمایشگاه طبیعی برای بررسی فرآیندهای مورفودینامیک در شرایط فراخشک بدل شود (Vermeesch & Drake, 2008). وجود انواع تلماسه‌ها در محدوده‌ای محدود فرصت منحصربه‌فردی برای تحلیل تطبیقی رفتار آن‌ها فراهم می‌کند و ترکیب دمای بسیار بالا، رطوبت اندک و بادهای فصلی این منطقه را به یکی از پویاترین سامانه‌های ماسه‌ای جهان تبدیل کرده است.

فناوری‌های دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه امکان پایش بلندمدت و دقیق تغییرات مورفودینامیکی را فراهم کرده‌اند (White et al., 2007; Bullard et al., 2011). داده‌های نوری با قدرت تفکیک مکانی بالا مانند Sentinel-2 نسبت به لندست-۸ جزئیات بیشتری از تغییرات مورفولوژیکی آشکار می‌کنند (Zhao et al., 2025)، در حالی که داده‌های راداری سار[۱] مانند Sentinel-1 به دلیل عدم تأثیرپذیری از پوشش ابری و توانایی در تشخیص مورفولوژی سطحی مکمل مناسبی محسوب می‌شوند (Blasco et al., 2020). با این وجود، مدیریت حجم بالای داده‌ها و چالش‌های همپوشانی طیفی میان اشکال مختلف همچنان از موانع اصلی طبقه‌بندی دقیق هستند (Zhao et al., 2025; Oxoli & Brovelli, 2022). پلتفرم‌های رایانش ابری مانند گوگل‌ارث‌انجین[۲] با دسترسی به آرشیو غنی تصاویر و توان پردازشی بالا، تحولی در تحلیل داده‌های محیطی ایجاد کرده‌اند (Gorelick et al., 2017). ترکیب این بستر با الگوریتم‌های

[۱] SAR - Synthetic Aperture Radar

[۲] Google Earth Engine (GEE)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

یادگیری ماشین[1]، به‌ویژه جنگل تصادفی[2] و ماشین بردار پشتیبان[3]، موجب افزایش دقت طبقه‌بندی سامانه‌های ژئومورفولوژیکی شده است (Belgiu & Drăguţ, 2016; Maxwell et al., 2018). این الگوریتم‌ها توانایی مدیریت پیچیدگی‌های طیفی و زمانی داده‌ها را دارند، اما نیاز به تنظیم دقیق پارامترها و داده‌های مرجع برای اعتبارسنجی دارند (Necsoiu et al., 2009; Cruz et al., 2023).

ادغام داده‌های چندمنبعی و توسعه شاخص‌های ژئومورفومتریک و طیفی بهینه‌شده، رویکردی مؤثر برای کاهش خطاهای ناشی از شباهت طیفی و افزایش دقت مدل‌های یادگیری ماشین ارائه می‌دهد. با وجود پیشرفت‌ها، فقدان داده‌های میدانی معتبر یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در مطالعات بیابانی محسوب می‌شود. استفاده از نمونه‌گیری تصادفی و داده‌های مصنوعی برای اعتبارسنجی می‌تواند راهکاری جایگزین باشد، اما نیاز به چارچوبی نظام‌مند برای تحلیل زمان–فضا و طبقه‌بندی دقیق‌تر اشکال مورفودینامیک همچنان احساس می‌شود.

پژوهش حاضر با هدف توسعه و ارزیابی یک روش‌شناسی خودکار برای طبقه‌بندی مورفودینامیک ارگ‌های ریگ یلان در بیابان لوت ایران، با بهره‌گیری از تصاویر چندزمانه Sentinel-1 و Sentinel-2، داده‌های رقومی ارتفاع و الگوریتم جنگل تصادفی در محیط گوگل‌ارث‌انجین انجام شد.

۲-منطقه مورد مطالعه

منطقه ریگ یلان در شرق دشت لوت و در محدوده طول‌های جغرافیایی طول جغرافیایی′۴۵ °۵۸ تا ′۱۵ °۵۹ شرقی و عرض جغرافیایی ′۳۰°۳۰ تا ′۰۰ °۳۱ شمالی واقع شده و مساحتی بیش از ۱۲۰۰ کیلومتر مربع را در استان‌های کرمان، حراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان دربر می‌گیرد. این پهنه از شمال به خراسان جنوبی و از جنوب به سیستان و بلوچستان محدود بوده و دارای اقلیم فوق خشک با بارندگی سالانه کمتر از ۳۰ میلی‌متر و میانگین دمای بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد است؛ به‌طوری که دمای سطح در تابستان به بیش از ۷۰ درجه می‌رسد. باد غالب منطقه با الگوی جنوب‌جنوب‌غربی به شمال‌شمال‌غربی از عوامل اصلی مهاجرت و تغییر شکل تلماسه‌هاست. ساختار ژئومورفیک آن شامل برخان‌های کوچک با نرخ مهاجرت بالا، تپه‌های خطی طویل با پایداری نسبی و تپه‌های ستاره‌ای چندبازویی است که حاصل برهم‌کنش باد، توپوگرافی و رسوب‌اند. خاک منطقه عمدتاً از ماسه‌های بادی تشکیل شده و بیشتر فاقد پوشش گیاهی و در حواشی آن دارای پوشش گیاهی فقیر شامل گونه‌های مقاوم به خشکی مانند اشنان و تاغ است. عمدتا فاقد یات‌وحش بوده و برخی خزندگان و جوندگان بیابانی در پیرامون آن گزارش شده‌اند. این محدوده به دلیل قرارگیری در محدوده ثبت‌شده میراث جهانی یونسکو، از اهمیت اکولوژیک و ژئوتوریسمی بالایی برخوردار است. (شکل ۱ :).

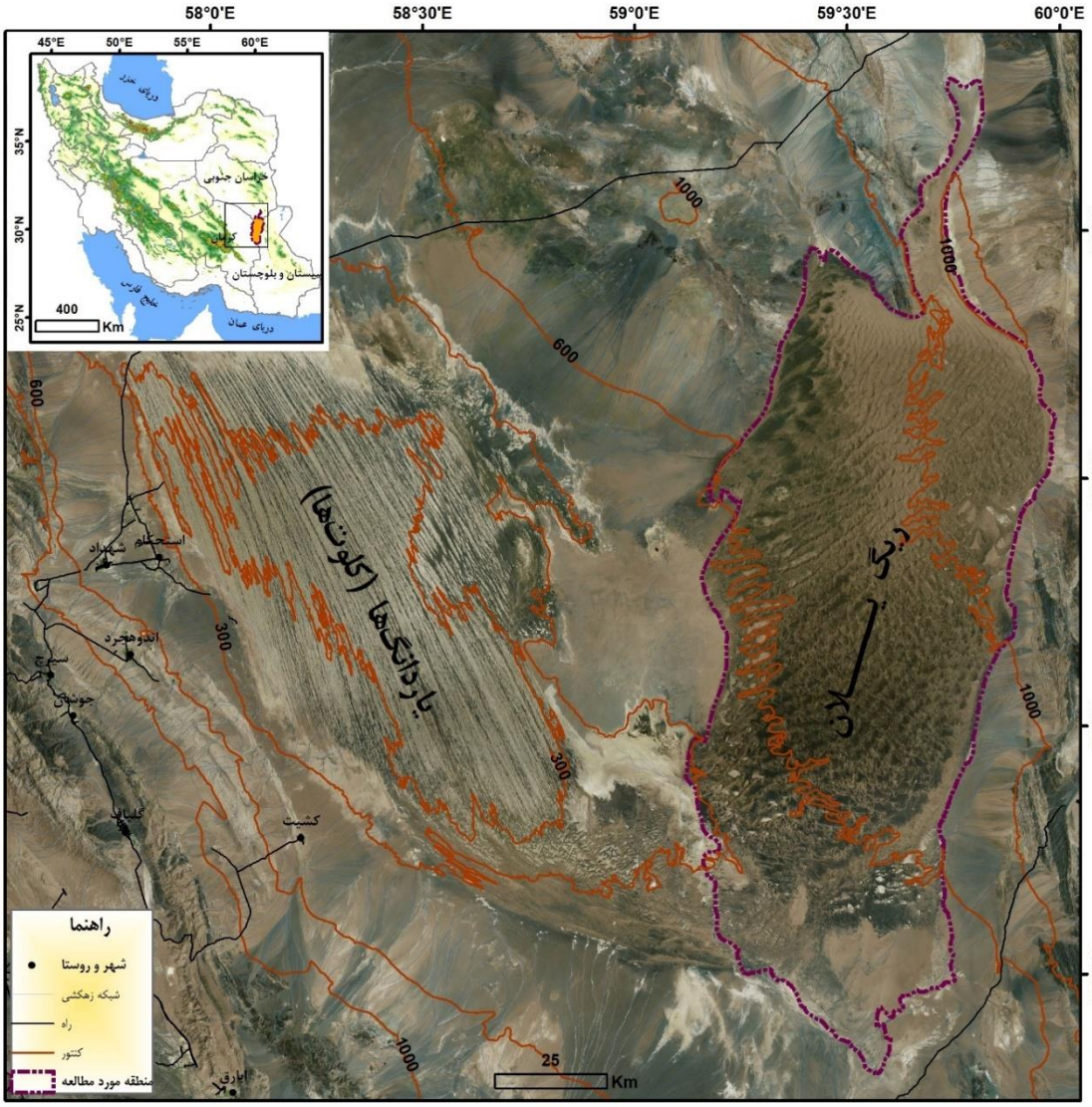
[1] Machine Learning Algorithms

[2] Random Forest

[3] SVM (Support Vector Machine

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]



شکل ۱ : موقعیت منطقه پژوهش

۳- مواد و روش

این پژوهش برای طبقه‌بندی خودکار و تحلیل کلاس‌های مورفودینامیکی ریگ یلان و تلماسه‌های آن یک روش‌شناسی جامع و مرحله‌به‌مرحله را طراحی کرده است که مبتنی بر تلفیق فناوری‌های دورسنجی، پردازش ابری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشد (شکل ۲). این چارچوب با استفاده از پلتفرم گوگل‌ارث‌انجین و داده‌های چندمنبعی شامل تصاویر اپتیکی، مدل‌های رقومی ارتفاع(جدول ۱) و مرور بصری داده‌های سنتینل ۱و۲ تحلیل جامع مورفودینامیک تپه‌ها را در مقیاس منطقه‌ای ممکن ساخته است.

این متدلوژی بر چالش‌هایی مانند شباهت طیفی بین انواع تلماسه‌ها، کمبود داده‌های آموزشی و محدودیت‌های وضوح زمانی، با به‌کارگیری بهینه الگوریتم‌ها، ادغام داده‌های مکمل و بهره‌گیری از تکنیک‌های اعتبارسنجی غیرمیدانی فائق یافته است (Zhao et al., 2025; Mohammadpour & Eshghizadeh, 2021). به‌ویژه در غیاب داده‌های GPS میدانی از تصاویر با وضوح بالای گوگل‌ارث و سنتینل۲ برای کنترل کیفی، تفسیر بصری و تعیین موقعیت نمونه‌ها استفاده شد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

مراحل اصلی روش‌شناسی به شرح زیر هستند:

۱. گردآوری داده‌ها: بارگذاری داده‌های چندمنبعی شامل اپتیکی، راداری و ارتفاعی در پلتفرم گوگل‌ارث‌انجین .

۲. پیش‌پردازش: شامل تصحیح اتمسفری، حذف ابر، هم‌ترازی زمانی و مکانی و کالیبراسیون داده‌ها.

۳. استخراج ویژگی فرم‌ها: محاسبه شاخص‌های طیفی ، بافتی و ژئومورفومتریک.

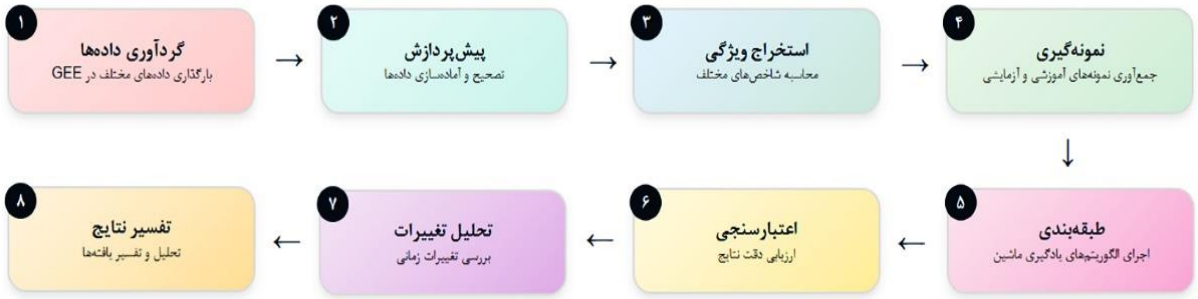
۴. نمونه‌گیری: برداشت نمونه‌های آموزشی و آزمون با ترکیب داده‌های مرجع.

۵. طبقه‌بندی: پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین جهت شناسایی کلاس‌های تلماسه‌ها.

۶. اعتبارسنجی: ارزیابی دقت نتایج با استفاده از ماتریس خطا، شاخص Kappa، و تأیید تخصصی بصری. از داده‌های آموزش مستقل برداشت‌شده از تصاویر گوگل‌ارث و تحلیل دقیق موقعیت‌های تپه‌ها برای کنترل صحت استفاده شد.

۷. تحلیل تغییرات زمانی: با به‌کارگیری الگوریتم COSI-Corr جهت شناخت مهاجرت و تغییرات مورفولوژیکی تلماسه‌ها در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴.

۸. تفسیر نهایی: تحلیل یافته‌ها برای درک بهتر فرآیندهای ژئومورفولوژیکی و ارائه راهکارهای حفاظتی و مدیریتی در منطقه.



شکل ۲ : چارچوب روش تحقیق طبقه‌بندی خودکار و تحلیل ساختارهای مورفودینامیکی ریگ یلان

این روش‌شناسی امکان طبقه‌بندی خودکار و دقیق مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای را با استفاده از قابلیت‌های پیشرفته پردازش ابری و یادگیری ماشین فراهم می‌کند.

۳-۱- گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها

بداده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر نوری چندزمانه لندست و سنتینل-۲، داده‌های راداری سنتینل-۱ و مدل‌های رقومی ارتفاع برای استخراج ویژگی‌های ژئومورفومتریک هستند. داده‌های سنتینل ۱و۲ صرفاً برای تفسیر بصری و کمک به تعیین کلاس‌ها در مرحله طبقه‌بندی استفاده شده‌اند، اما در تحلیل‌های عددی یا نقشه‌های نهایی وارد نشده‌اند. کلیه مراحل گردآوری، پیش‌پردازش و تحلیل داده‌ها در محیط گوگل‌ارث‌انجین انجام شده که امکان پردازش ابری و مقیاس‌پذیر داده‌ها را فراهم می‌سازد(جدول ۱).

جدول ۱ داده‌های مورد استفاده در پژوهش

نوع داده	منبع	وضوح مکانی	وضوح زمانی	دوره زمانی	کاربرد
Landsat 8 OLI	USGS	30متر	16روز	2013–2023	تحلیل چندطیفی و تغییرات زمانی
Sentinel-2 MSI	ESA	10متر	5روز	2015–2023	تحلیل با وضوح بالا
Sentinel-1 SAR	ESA	10متر	12–6روز	2014–2023	تحلیل بافت و زیری سطح
SRTM DEM	NASA	30متر	–	2000	تحلیل توپوگرافی
ALOS PALSAR DEM	JAXA	12.5متر	–	2006–2011	تحلیل ژئومورفومتریک
ERA5 Climate	ECMWF	0.25°درجه	روزانه	2000–2023	داده‌های باد و اقلیم (پشتیبان)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

۳-۳- ۱- داده‌های نوری

تصاویر Landsat 8 OLI با وضوح مکانی ۳۰ متر و دوره بازگشت ۱۶ روزه و Sentinel-2 MSI با وضوح مکانی ۱۰ متر و تناوب زمانی ۱۲ روزه برای پایش بلندمدت و تحلیل دقیق‌تر فرم‌های سطحی مورد استفاده قرار گرفتند. تصاویر Sentinel-2 MSI علاوه‌بر استفاده بصری در استخراج شاخص‌های طیفی مانند NDVI، شاخص رطوبت یا NDMI[۱] و BI[۲] یا شاخص خاک عریان در مدل‌سازی عددی طبقه‌بندی نهایی مشارکت داشتند. این تصاویر برای دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ گردآوری شدند. تصاویر منتخب بر اساس کیفیت بصری و پوشش زمانی یکنواخت برای پایش روندهای فرمی، استخراج شاخص‌های طیفی و تغذیه ورودی الگوریتم PCA[۳] استفاده شدند.

۳-۳- ۲- داده‌های راداری

برای تحلیل بافت سطح و مشخصات زیرسطحی از داده‌های سار سنتینل ۱ با پلاریزاسیون VV استفاده شد. این داده‌ها با وضوح مکانی ۱۰ متر و تناوب ۱۲ روزه، پوشش مناسبی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ فراهم کردند. داده‌های راداری به‌ویژه برای تفکیک تلماسه‌هایی با جهت‌گیری متفاوت و درک ویژگی‌های بافتی سطح زمین اهمیت داشتند. داده‌های سار در کنار تفسیر بصری برای استخراج شاخص‌هایی مانند شاخص ناهمواری[۴] و تحلیل ناهمواری سطحی استفاده شده و بخشی از ورودی مدل‌های طبقه‌بندی نهایی و تفسیری بوده است.

۳-۳- ۳- مدل‌های رقومی ارتفاع

دو نوع مدل ارتفاعی برای استخراج ویژگی‌های توپوگرافیک و ژئومورفومتریک به‌کار گرفته شد: مدل SRTM با وضوح ۳۰ متر و مدل ALOS PALSAR DEM با وضوح ۱۲/۵ متر(جدول ۱). از خروجی‌های مدل‌های رقومی ارتفاعی متغیرهای ژئومورفومتریک و شاخص‌ها استخراج شدند (جدول ۲) که در مجموع بخشی از مجموعه ۲۷ متغیر اولیه برای تحلیل PCA بودند. در نهایت، مؤلفه‌های اصلی حاصل از این متغیرها، به‌ویژه PC1 تا PC3، نقش مهمی در تفکیک کلاس‌های تلماسه ایفا کردند.

۳-۳- ۴- داده‌های اقلیمی

داده‌های اقلیمی ERA5 از پایگاه ECMWF با وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه و دقت زمانی روزانه برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴، به‌منظور شناخت کلی شرایط اقلیمی عمومی منطقه گردآوری شدند. این داده‌ها به‌صورت مستقیم در فرآیند طبقه‌بندی یا تحلیل‌های عددی پژوهش وارد نشده‌اند، اما در مرحله بررسی محیط طبیعی و تحلیل کیفی جهت‌گیری بادها نسبت به فرم و جهت تلماسه‌ها، نقش پشتیبان و زمینه‌ای ایفا کردند(**Error! Reference source not found.**).

۳-۲- استخراج اشکال ژئومورفیک و ساختار رگ‌ها

[۱] Normalized Difference Moisture Inde; (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)

[۲] Bare Soil Index(BI) = ((SWIR + Red) - (NIR + Blue)) / ((SWIR + Red) + (NIR + Blue))

[۳] Principal Component Analysis

[۴] TRI (Topographic Ruggedness Index)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

با توجه به اهداف پژوهش، مجموعه‌ای از شـاخص‌های ژئومورفومتریک، طیفی و شاخص‌های ترکیبی مرتبط با فعالیت مورفودینامیک برای توصیف دقیق‌تر فرم، بافت و پویایی تلماسه‌ها استخراج شده‌اند(جدول ۲).
فهرست کامل شاخص‌ها، شرح تولید و استخراج و منابع داده‌ای آن‌ها در جدول ۲ آمده‌اند.

جدول ۲ شاخص‌ها به همراه اصطلاحات مرتبط، اهمیت، نقش و کاربرد

نام شاخص		شرح تولید و استخراج	منبع داده	نقش و کاربرد
ارتفاع (Elevation)	ژئومورفومتریک*	مقدار مطلق ارتفاع هر پیکسل، پایه ژئومورفومتری	ALOS12.5 / SRTM30 DEM	تشخیص پستی‌وبلندی و تفکیک فرم‌های برآمده یا فرورفته
شیب (Slope)		نرخ تغییر ارتفاع در فاصله افقی	ALOS / SRTM DEM	تحلیل شیب تلماسه‌ها و تشخیص پویایی سطح
جهت شیب (Aspect)		جهت جغرافیایی بیشینه شیب سطح	ALOS / SRTM DEM	تحلیل جهت‌گیری و امتداد عمومی تلماسه‌ها
انحنای کلی (Curvature)		انحنای ترکیبی سطح نسبت به جهت شیب	ALOS / SRTM DEM	تحلیل همگرایی یا واگرایی سطح
شاخص موقعیت توپوگرافیک (TPI)		اختلاف ارتفاع یک پیکسل با میانگین ارتفاع همسایگی	ALOS / SRTM DEM	تفکیک نواحی کاو، کوژ یا صاف
شاخص ناهمواری (TRI)		تفاوت ارتفاع پیکسل با پیکسل‌های پیرامونش	ALOS / SRTM DEM	تشخیص سطوح ناصاف و تلماسه‌های فعال
شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)		توزیع پتانسیل تجمع آب روی زمین بر پایه شیب و جریان	DEM	تخمین نواحی احتمالی رطوبت‌گیر در سطوح ماسه‌ای
شاخص توان فرسایش (SPI)		شدت فرسایش بالقوه آب ناشی از شیب و انباشتگی جریان	DEM	سنجش پتانسیل فرسایش و تحرک در تلماسه‌ها
شاخص واریانس جهتی (VRM)		نوسان جهت شیب در مقیاس همسایگی	DEM	سنجش پیچیدگی جهت در فرم‌های سطحی
NDVI (Landsat & S2)	شاخص‌های طیفی	شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده	Landsat 8 / S2	تشخیص پوشش گیاهی، پایداری یا فعالیت سطح
NDWI (Landsat & S2)		شاخص رطوبت سطح	Landsat 8 / S	تمایز نواحی مرطوب و خشک
NDSI (Landsat 8)		شاخص متمایزکننده سطوح براق (ماسه، نمک)	Landsat 8	شناسایی سطوح نمکی یا ماسه‌ای روشن
NDRE (Sentinel-2)		شاخص سلامت پوشش گیاهی در مناطق نیمه‌خشک	Sentinel-2	ارزیابی پوشش گیاهی ضعیف یا تنک
EVI (Landsat 8)		شاخص گیاهی پیشرفته برای مناطق با چگالی بالا	Landsat 8	تحلیل دقیق‌تر پوشش گیاهی در نواحی تلماسه‌ای
TC_Brightness		مؤلفه روشنایی حاصل از تبدیل Tasseled Cap	Landsat 8	تحلیل انرژی کلی بازتاب سطح
TC_Greenness		مؤلفه سبزی برای تشخیص پوشش گیاهی	Landsat 8	مکمل NDVI برای ارزیابی پوشش گیاهی
TC_Wetness		مؤلفه رطوبت سطحی در ترکیب باندی	Landsat 8	کمک به تحلیل شرایط سطحی و تفکیک تلماسه‌های مرطوب‌تر
BI (Landsat 8)		شاخص روشنایی ماسه (Brightness Index)	Landsat 8	تحلیل رنگی و ترکیب سطح تلماسه‌ها
امتیاز تحرک یکپارچه	شاخص‌های ترکیبی نوارانه و فعالیت	ترکیب شاخص‌های مورفومتریک و بافتی برای رتبه‌بندی فعالیت نسبی	تمام شاخص‌های DEM و بافتی	تعیین درجه پویایی تلماسه‌ها
شاخص فعالیت مورفودینامیک		نمره نهایی فعالیت بر اساس تحلیل آماری PCA و طبقه‌بندی فضایی	تجمیع همه شاخص‌ها	تشخیص تلماسه‌های فعال، نیمه‌فعال و پایدار

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

	شاخص ریسک بیابان‌زایی	ارزیابی پتانسیل خطر تخریب سرزمین ناشی از تحرک تلماسه‌ها	شاخص‌های طیفی و بافتی	تحلیل حساسیت نواحی مختلف به گسترش بیابان
	کارایی یکپارچگی حسگر	میزان هم‌پوشانی و هم‌جهتی داده‌های مختلف در شناسایی ویژگی‌ها	سنجش سازگاری شاخص‌ها	سنجش قدرت ترکیب سنسورها در تحلیل فرم‌های سطحی
	حساسیت اکولوژیکی	آسیب‌پذیری اکولوژیک در برابر تغییرات مورفودینامیک	ترکیب پوشش گیاهی و حرکات ماسه	شناسایی تلماسه‌های تهدیدکننده سکونتگاه‌ها یا زیست‌بوم‌ها
	رتبه علمی جهانی	رتبه جهانی منطقه بر اساس معیارهای زیست‌محیطی، ژئومورفومتریک و اقلیمی	منابع جهانی (ISA, UNEP و...)	مقایسه وضعیت منطقه با سایر بیابان‌های جهان
	بُعد فضای ویژگی[1]	پیچیدگی داده‌های ورودی و امکان جداسازی کلاس‌ها	حاصل از PCA	سنجش قدرت طبقه‌بندی خودکار الگوریتم‌های ماشین‌لرنینگ

***روابط مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های ژئومورفومتریک برگرفته از فصل ۷و۸ ژئومورفومتری کاربردی داده ها ، روش ها و تکنیک‌ها است(به دلیل محدودیت حجم صفحات روابط در متن ذکر نشده‌اند)**

۳-۳- طبقه‌بندی مورفودینامیکی با استفاده از یادگیری ماشین و تحلیل خوشه‌ای

در این پژوهش با هدف شناسایی و تفکیک واحدهای همگن از نظر پویایی سطح، میزان تحرک و وضعیت پایداری تپه‌های ماسه‌ای ریگ یلان، طبقه‌بندی مورفودینامیکی منطقه با استفاده از شاخص‌ها(جدول ۲) و در بستر گوگل‌ارث‌انجین و بر مبنای الگوریتم جنگل تصادفی و تحلیل خوشه‌ای صورت گرفته‌است. مدل جنگل تصادفی با استفاده از ۱۰۰ درخت تصمیم[2] و عمق حداکثر ۱۰ اجرا شد. به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد مدل و اطمینان از قابلیت تعمیم، از روش اعتبارسنجی متقابل k-fold با مقدار k=10 بهره گرفته شد. تمامی شاخص‌های استخراجی در گوگل‌کولب برای آموزش و اجرای مدل استفاده شدند. خروجی مدل به‌صورت نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده شامل سه کلاس اصلی (تلماسه‌های فعال، نیمه‌فعال و پایدار) به‌کار رفت. این کلاس‌ها با طبقه‌بندی شش‌گانه حاصل از تحلیل خوشه‌ای نیز مقایسه و تطبیق داده شدند.

برای شناسایی و تفکیک واحدهای همگن مورفودینامیک[3] از روش‌های تحلیل خوشه‌ای غیرنظارتی استفاده شده‌است. برای این منظور تحلیل خوشه‌ای شاخص‌های ژئومورفومتریک و طیفی در گوگل‌کولب با استفاده از کتابخانه scikit-learn انجام و با تکنیک خوشه‌بندی K-means گروه‌بندی آنها صورت گرفته است. تعداد بهینه خوشه‌ها با استفاده از روش آرنج[4] و بر اساس واریانس درون‌خوشه‌ای تعیین گردید. نتیجه این تحلیل، مقدار بهینه K=۵ را پیشنهاد کرد.

برای درک بهتر ویژگی‌های دینامیکی هر خوشه، از نتایج الگوریتم COSI-Corr جهت محاسبه کیفیت نسبی فعالیت سالیانه تپه‌ها در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ استفاده گردید. ترکیب داده‌ها و تحلیل خوشه‌ای، منجر به استخراج شش خوشه مورفودینامیکی متمایز شد که هریک دارای مشخصات متفاوتی در زمینه پویایی، پوشش گیاهی، رطوبت سطحی و ناهمواری هستند (جدول ۳).

۴-۳- روش اعتبارسنجی نتایج

[1] Feature Space Dimension

[2] Decision Trees

[3] Homogeneous Morphodynamic Units

[4] Elbow Method

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی در طبقه‌بندی واحدهای مورفودینامیکی، از روش اعتبارسنجی متقاطع پنج‌تایی[۱] استفاده شد. برای سنجش عملکرد مدل، معیارهای دقت کلی[۲]، ضریب کاپا[۳]، ماتریس درهم‌ریختگی[۴] و امتیاز F1[۵] برای هر کلاس طبقه‌بندی‌شده محاسبه شدند. در این مدل شاخص‌های مکانی و طیفی و مؤلفه‌های TC[۶] به‌عنوان متغیرهای ورودی به کار گرفته شدند که جنبه‌های مختلفی از فرم، ناهمواری، رطوبت سطحی و انرژی بازتابی تلماسه‌ها را پوشش می‌دهند. نتایج اعتبارسنجی متقابل نشان داد که مدل جنگل تصادفی با بهره‌گیری از ترکیب این شاخص‌ها عملکرد قابل‌قبولی در تفکیک سطوح با دینامیک متفاوت داشته و به‌ویژه در طبقات مرتبط با تلماسه‌های فعال و نیمه‌فعال دقت بالایی ارائه داده است. همچنین، پایداری مدل در تکرارهای مختلف و قابلیت تعمیم آن به داده‌های نادیده‌شده، آن را به گزینه‌ای مناسب برای طبقه‌بندی نهایی واحدهای مورفودینامیکی منطقه تبدیل کرده است.

جدول ۳ مشخصات طبقات مورفودینامیکی حاصل از تحلیل خوشه‌ای

شماره خوشه	وضعیت مورفودینامیکی	ویژگی‌های شاخص‌های مکانی و طیفی	تفسیر و نوع لندفرم غالب	کلاس نهایی در طبقه‌بندی
۱	بسیار فعال	NDVIو NDWI بسیار پایین؛ TRI و TPI بالا؛ شیب و انحنای متغیر؛ روشنایی (BI) بالا؛ رطوبت سطحی بسیار کم	ماسه‌های روان با ناهمواری بالا، بدون پوشش گیاهی، دارای جابجایی شدید	تلماسه‌های فعال
۲	نیمه‌فعال	NDVIکم تا متوسط؛ NDWI پایین؛ انحنا و TPI متوسط؛ شیب نسبتاً کم؛ مقادیر BI متوسط	تپه‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی پراکنده، تحرک محدود یا فصلی	تلماسه‌های نیمه‌فعال
۳	پایدار	NDVIمتوسط تا بالا؛ NDWI متوسط؛ TRI و شیب پایین؛ انحنا و TPIنزدیک به صفر؛ روشنایی کم	صفحات ماسه‌ای پایدار، رگه‌های هموار، با تحرک بسیار اندک	سطوح ماسه‌ای
۴	فاقد دینامیسم ماسه‌ای	NDVIو NDWI بسیار پایین؛ TRI بالا؛ انحنای مثبت یا منفی مشخص؛ بازتاب بالا در باندهای کوتاه‌موج و مادون‌قرمز	رخنمون‌های سنگی، سنگفرش بیابانی، زمین‌های سخت بدون پوشش یا رسوب ماسه	سطوح سخت
۵	ناپایدار و فرسایشی	NDVIو NDWI پایین؛ TRI و شیب بالا؛ TPI و انحنا منفی یا مثبت بارز؛ بافت سطحی ناهموار؛ شاخص روشنایی بسیار بالا	یاردانگ‌ها، گودال‌های بادی، کوریدورها و ساختارهای فرسایشی فعال	مناطق فرسایش بادی
۶	پیچیده، مختلط	شاخص‌های متنوع و ترکیبی؛ NDVI و NDWI متغیر؛ ویژگی‌های طیفی و مکانی ناهمگن؛ شیب و انحنا پراکنده؛ مقادیر میانه برای TRI، TPIوBI	مناطق گذار با ترکیب لندفرم‌های فعال، نیمه‌فعال و سنگی؛ الگوی نامنظم	اراضی مختلط

در غیاب داده‌های GPS برای پایش جابه‌جایی‌های سطحی به‌عنوان یکی از ابزارهای سنجش صحت نتایج مورفودینامیکی، از الگوریتم COSI-Corr استفاده شد. این الگوریتم با بهره‌گیری از همبستگی مکانی میان پیکسل‌های

[۱] Cross-Validation-5

[۲] Overall Accuracy - OA

[۳] Kappa Coefficient - KC

[۴] Confusion Matrix - CM

[۵] نمره یا امتیاز F1 (F1-score)، معیاری ترکیبی از دقت (Precision) و بازیابی (Recall)، برای ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی در طبقه‌بندی واحدهای مورفودینامیکی ریگ یلان استفاده شد و نشان‌دهنده تعادل بین شناسایی صحیح کلاس‌ها و کاهش خطاها است.

[۶] مؤلفه‌های Tasseled Cap (روشنایی، سبزینه، رطوبت) از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای استخراج شدند و در مقاله برای توصیف ویژگی‌های سطحی ریگ یلان، مانند انعکاس ماسه‌ای و فقدان پوشش گیاهی، استفاده شدند (بخش ۲،۱،۴، جدول ۷).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

هم‌مرجع‌شده در تصاویر چندزمانه، امکان برآورد تغییرات مکانی زیرپیکسلی را فراهم می‌سازد. در پژوهش حاضر سری زمانی تصاویر سنتینل-۲ در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ به‌کار گرفته شده‌اند. سپس تصاویر جفت‌شده وارد الگوریتم COSI-Corr شدند تا نقشه‌های جابه‌جایی سطحی به‌دست آید. این روش امکان سنجش غیرمستقیم تغییرات مکانی را بدون نیاز به داده‌های زمینی فراهم کرده و به‌ویژه در مناطق دورافتاده و فاقد پایش میدانی کاربرد دارد.

برای ارزیابی غیرمستقیم دقت طبقه‌بندی‌های مورفودینامیکی، از مجموعه‌ای از داده‌های اپتیکی و راداری مستقل، متعلق به تاریخ‌هایی متفاوت از بازه زمانی آموزش مدل استفاده شد. این داده‌ها شامل تصاویر سنتینل-۱ و۲ در تاریخ‌های خارج از بازه اصلی تحلیل بودند که به‌عنوان داده‌های نادیده[1] برای بررسی پایداری و قابلیت تعمیم نتایج مدل‌ها به‌کار گرفته شدند. این روش، امکان بررسی صحت عملکرد مدل در شرایط متفاوت زمانی و بدون وابستگی به داده‌های میدانی فراهم ساخت.

۴- یافته‌ها

در این بخش ابتدا شاخص‌های ژئومورفومتریک و طیفی استخراج و سپس با تحلیل آنها طبقه‌بندی مورفودینامیک ارگ‌ها ارائه می‌شود. در پایان، اعتبارسنجی نتایج، میزان عدم قطعیت و چالش‌های اصلی در تحلیل دینامیک تلماسه‌ها در منطقه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۱- استخراج شاخص‌ها

به‌منظور شناسایی الگوهای فضایی اولیه و شناخت ویژگی‌های مؤثر بر پویایی ارگ‌ها، مجموعه‌ای جامع از ۲۷ شاخص ژئومورفومتریک و طیفی شامل ۱۳ شاخص ژئومورفومتریک، ۱۱ شاخص طیفی لندست-۸ و ۳ شاخص طیفی سنتنل-۲ استخراج شده‌اند(جدول ۴).

۴-۱-۱- محاسبه و تحلیل کمّی شاخص‌های ژئومورفومتریک

نتایج آماری تفصیلی شاخص‌های ژئومورفومتریک در جدول ۴ ارائه شده‌اند که بیانگر شاخص ارتفاعی ۰/۳۰۴ و تنوع توپوگرافی متوسط مطلوب برای توسعه تلماسه‌ها و شناسایی نواحی تجمع بالقوه ماسه را نشان می‌دهد. شیب با میانگین ۸/۴۱ درجه و انحراف معیار ۶/۷۵ درجه، ضریب ناهمگونی شیب فوق‌العاده بالای ۰/۸۰۲ را نشان می‌دهد که بیانگر تنوع شدید توپوگرافی-مورفولوژیک و ایجاد الگوهای پیچیده جریان باد برای پیش‌بینی جهات ترجیحی حرکت ماسه است. جهت شیب با میانگین ۱۸۰/۳۵ درجه و انحراف معیار ۹۸/۳۲ درجه، توزیع نسبتاً یکنواخت جهات و وجود جهت غالب مشخص(شمال- جنوبی و جنوبشرقی-شمالغربی) را تأیید می‌کند.

شاخص ناهمواری زمین با میانگین ۴۴/۱۱ و حداکثر استثنایی ۵۲۶۱، شدت زبری سطح ۳/۷۲ را نشان می‌دهد که مقدار فوق‌العاده بالای آن بیانگر زبری سطح بسیار متغیر و تأثیر شدید بر فرآیندهای بادی است. شاخص موقعیت توپوگرافی

[1] داده‌های نادیده (unseen data) به مجموعه داده‌هایی اطلاق می‌شود که در فرآیند آموزش مدل‌های یادگیری ماشین (مانند RF در این مطالعه) استفاده نشده‌اند و برای ارزیابی عملکرد مدل در شرایط مستقل و جدید به کار می‌روند. در مقاله، این داده‌ها شامل تصاویر Sentinel-1 و Sentinel-2 از تاریخ‌های خارج از بازه زمانی آموزش مدل (۲۰۱۵-۲۰۲۴) بودند که برای اعتبارسنجی غیرمستقیم دقت طبقه‌بندی مورفودینامیکی تپه‌های ماسه‌ای ریگ یلان در محیط GEE استفاده شدند، تا پایداری و قابلیت تعمیم مدل را بدون وابستگی به داده‌های میدانی بررسی کنند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

با دامنه گسترده ۷۲/۴۴ - تا ۷۰/۹۰ + متر، تنوع موقعیت منظر ۱۴۳/۳۴ متر را نشان می‌دهد که امکان شرایط تشکیل و وجود سیستم‌های پیچیده تلماسه‌ای و نقشه‌برداری نواحی منبع و مقصد ماسه را فراهم می‌سازد.

انحنای کلی با دامنه وسیع ۰۴۷/۱،۶۳ - تا ۸۳/۶۳ + و ضریب تغییرات بالای ۴۲/۶۸، بیانگر تنوع شدید شکل سطح و کنترل مؤثر نواحی تجمع و پراکندگی ماسه است. شاخص قدرت جریان با میانگین ۴۴/۰۶ و انحراف معیار بسیار بالای ۱۰۲۹/۷۲، کارایی انتقال بادی متوسط با نواحی شدت بالای محلی را تأیید می‌کند. شاخص زبری برداری با میانگین ۰/۰۰۸۴۵۳، ضریب زبری آیرودینامیکی کم تا متوسط را نشان می‌دهد که امکان انتقال مؤثر ماسه را تأیید می‌کند(جدول ۴).

جدول ۴ نتایج تحلیل شاخص‌های ژئومورفومتریک ریگ یلان

	شاخص	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	شدت تأثیر	وضعیت مورفودینامیکی	تفسیر کلیدی
ژئومورفومتریک	ارتفاع(m)	253	1,275	752.94	228.70	0.304	بالا	تنوع متوسط	مناسب توسعه تلماسه‌ها
	شیب(°)	0	46.53	8.41	6.75	0.802	فوق‌العاده	ناهمگونی شدید	الگوهای پیچیده باد
	جهت شیب(°)	0	359.31	180.35	98.32	0.545	متوسط	توزیع یکنواخت	جهت غالب
	انحنای کلی	-1,047.63	83.63	-0.73	31.14	42.68	فوق‌العاده	تنوع شدید	کنترل تجمع ماسه
	TPI	-72.44	70.90	0.001	10.40	10,400	فوق‌العاده	دامنه گسترده	سیستم پیچیده تلماسه‌ای
	TRI	0	5,261	44.11	164.01	3.72	فوق‌العاده	زبری متغیر	تأثیر شدید بر باد
	TWI	0.80	22.08	3.93	2.01	0.511	متوسط	رطوبت محدود	تجمع آب کم
	SPI	0	406,412.98	44.06	1,029.72	23.37	فوق‌العاده	انتقال متغیر	نواحی فوق‌فعال
	VRM	0.000013	0.148	0.008453	0.010	1.18	متوسط	زبری کم	انتقال مؤثر ماسه

۴-۱-۲- محاسبه و تحلیل جامع شاخص‌های طیفی

شاخص‌های طیفی از تصاویر چندحسگری با کارایی یکپارچگی ۰/۸۷ محاسبه شدند که این همبستگی قوی بین حسگرها، اعتبار روش‌شناسی بالا و بهینه‌سازی استراتژی‌های پایش چندپلتفرمی را تأیید می‌کند(جدول ۵).

شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده از لندست-۸ با میانگین ۰/۰۸۶ و انحراف معیار ۰/۰۲۳، نسبت پوشش گیاهی فوق‌العاده پایین و عاری از پوشش را نشان می‌دهد. مقایسه NDVI مستخرج از سنتنل-۲ (میانگین ۰/۳۰۰) نشان می‌دهد که وضوح مکانی بالاتر، تحلیل دقیق‌تری از پوشش گیاهی محلی ارائه می‌دهد. شاخص آب نرمال‌شده با میانگین ۰/۲۳۸- و انحراف معیار ۰/۰۵۲ بیانگر شاخص خشکی بسیار بالا و محیط فراخشک است. مقادیر منفی، شرایط بی‌آب تام منطقه را

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

نشان می‌دهند. شاخص عریانی خاک با میانگین ۰/۱۸۰ و انحراف معیار ۰/۰۲۹، شاخص عرصه سطح ماسه‌ای بالا و وجود نواحی گسترده فعال ماسه‌ای را تأیید کرده است.

مؤلفه‌های سه‌گانه TC نتایج معناداری ارائه می‌دهند: روشنایی با میانگین ۰/۳۵۰ بیانگر انعکاس بالای سطوح ماسه‌ای، سبزینگی با میانگین منفی ۰/۰۲۵ - نشان‌دهنده فقدان کامل پوشش سبز و رطوبت با میانگین ۰/۰۲۵ تأییدکننده شرایط بسیار خشک غالب در منطقه است. نتایج شاخص NDRE مستخرج از سنتنل-۲ با میانگین ۰/۱۵۰ و محدوده تغییراتی ۰/۳۰۰- تا ۰/۶۶۷ نشان‌دهنده پوشش گیاهی بسیار کم و ناچیز در منطقه است. حاشیه قرمز ضعیف و مقادیر پایین NDRE تأیید می‌کنند که گیاهان ناچیز موجود در حواشی منطقه نیز تحت تنش شدید بوده و محتوای کلروفیل بسیار ناچیزی دارند(جدول ۵).

جدول ۵ نتایج تحلیل شاخص‌های طیفی ریگ یلان

	شاخص	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	شدت تأثیر	وضعیت مورفودینامیکی	تفسیر کلیدی
شاخص‌های طیفی	NDVI (L8)	0.016	0.153	0.086	0.023	0.267	فوق‌العاده	پوشش فوق‌کم تا فاقد پوشش	محیط فعال بادی و بیابانی
	NDWI (L8)	-0.365	-0.096	-0.238	0.052	0.218	فوق‌العاده	فوق‌خشک	تحرک بالای ماسه
	NDSI (L8)	-0.472	-0.009	-0.311	0.067	0.215	بالا	فقدان برف	خشکی دائمی
	BI (L8)	0.035	0.247	0.180	0.029	0.161	فوق‌العاده	سطوح عریان بالا	ماسه‌های فعال
	EVI (L8)	0.010	0.106	0.050	0.011	0.220	بالا	پوشش بسیار ناچیز تا فاقد پوشش	تأیید عدم پوشش
	TC_Brightness	0.100	0.600	0.350	0.075	0.214	بالا	انعکاس بالا	سطوح روشن، ماسه‌ای و خاک خشک
	TC_Greenness	-0.200	0.150	-0.025	0.045	1.800	فوق‌العاده	سبزینگی منفی	فقدان پوشش سبز
	TC_Wetness	-0.150	0.200	0.025	0.055	2.200	بالا	رطوبت کم -فاقد رطوبت	شرایط خشک-فراخشک
	NDVI (S2)	-0.200	0.800	0.300	0.150	0.500	بالا	وضوح بالا	تحلیل دقیق‌تر
	NDWI (S2)	-0.500	0.300	-0.100	0.120	1.200	متوسط	رطوبت محدود	شرایط خشک-فراخشک
	NDRE (S2)	-0.300	0.600	0.150	0.100	0.667	متوسط	گیاهان کم	حاشیه قرمز ضعیف

۴-۱-۳- شاخص‌های نوآورانه ترکیبی

برای ارزیابی با هدف توصیف جامع رفتار مورفودینامیکی، آسیب‌پذیری محیطی، و اهمیت علمی واحد مورفولوژیک منطقه، هفت شاخص جدید نوآورانه ترکیبی شامل شاخص فعالیت مورفودینامیک[۱]، امتیاز تحرک یکپارچه تپه‌های

[۱] Morphodynamic Activity Index

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

ماسه‌ای[۱]، شاخص ریسک بیابان‌زایی[۲]، کارایی یکپارچگی حسگر[۳]، حساسیت اکولوژیکی[۴]، رتبه علمی جهانی[۵]، و بُعد فضای فرمی[۶] نیز ابداع شدند(جدول ۶).

۱- شاخص فعالیت مورفودینامیک با مقدار ۰/۸۴۷ از ترکیب وزنی شاخص‌های NDVI، BI، TRI و شیب محاسبه گردید. این شاخص نوآورانه به‌عنوان معیار یکپارچه پتانسیل تحرک تلماسه‌ها، نشان‌دهنده پتانسیل بسیار بالای مورفودینامیک فعال و برای رتبه‌بندی اولویت پایش تفصیلی کاربرد دارد. این شاخص ترکیبی از عدم پوشش گیاهی (۱ -NDVI)، میزان سطح عریان، و ناهمواری سطح است. مقدار ۰/۸۴۷ نشان‌دهنده پتانسیل بالای تحرک تپه‌های ماسه‌ای به دلیل پوشش گیاهی کم، خاک عریان زیاد، و ناهمواری سطح است و می تواند برای شناسایی مناطق با پتانسیل بالای فعالیت مورفودینامیک برای اولویت‌بندی نظارت کاربرد داشته باشد(جدول ۶).

۲- امتیاز تحرک یکپارچه در ریگ یلان با مقدار ۰/۹۲۳ که با تلفیق تمام شاخص‌های مؤثر(جدول ۶) بر تحرک تلماسه‌ها[۷] محاسبه شد. این شاخص ترکیبی از فعالیت تلماسه، شاخص تحرک ماسه[۸]، پتانسیل فرسایش بادی[۹] و شاخص پایداری یا چسبندگی سطحی[۱۰] است که با وزن‌های مختلف ترکیب شده‌اند تا پتانسیل تحرک کلی تپه‌های ماسه‌ای را نشان دهند. این شاخص معیاری برای مقایسه تحرک تپه‌های ماسه‌ای در سیستم‌های بیابانی کاربرد دارد. این شاخص در ریگ یلان پتانسیل تحرک فوق‌العاده بالا را نشان می‌دهد. نتایج آماری پس از محاسبه جهت امکان مقایسه نرمال‌سازی شده‌اند.

۳- شاخص ریسک بیابان‌زایی با مقدار ۰/۷۵۶ بر اساس ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی، رطوبت و ناپایداری توپوگرافی محاسبه گردید. این شاخص ترکیبی از عدم پوشش گیاهی، خشکی سطح نرمالایزشده (۱ - NDWI_normalized)، و شیب است. مقدار ۰/۷۵۶ نشان‌دهنده ریسک بالای بیابان‌زایی منطقه است. این شاخص ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر بیابان‌زایی و تدوین استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی کاربرد دارد.

۴- کارایی یکپارچگی حسگر، این شاخص به‌عنوان همبستگی بین شاخص‌های لندست ۸ و سنتینل-۲ تعریف شده است. به‌طور خاص، همبستگی بین شاخص‌های طیفی مشابه (مانند NDVI_L8 و NDVI_S2) محاسبه می‌شود. همبستگی بین این دو شاخص با استفاده از داده‌های نمونه‌گیری‌شده در منطقه ریگ یلان با روش همبستگی پیرسون محاسبه شده است. مقدار ۰/۸۷ نشان‌دهنده همبستگی و توافق بالای بین داده‌های لندست ۸ و سنتینل-۲ است، که تأیید می‌کند استفاده

---

[۱] Integrated Dune Mobility Score

[۲] Desertification Risk Index

[۳] Remote Sensing Integration Efficiency

[۴] Ecological Sensitivity Index

[۵] Scientific Interest Ranking

[۶] Feature Space Dimensionality

[۷] Dune Activity Index

[۸] Sand Mobility Index

[۹] Wind Erosion Potential

[۱۰] Surface Cohesion Index

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

ترکیبی از این دو حسگر نتایج قابل‌اعتمادی ارائه می‌دهد. از این شاخص جهت ارزیابی و بهینه‌سازی استراتژی‌های نظارتی چندپلتفرمی برای منطقه مورد بررسی استفاده شده است.

۵- شاخص حساسیت اکولوژیکی بر اساس پوشش گیاهی کم و تحرک بالای ماسه تعریف شده است. مقدار کم با میانگین ۰/۰۸۶ نشان‌دهنده حساسیت بالای اکوسیستم است. این شاخص با وزن‌دهی به NDVI پایین و تحرک بالای ماسه‌ها، می‌تواند آسیب‌پذیری اکوسیستم به اختلالات انسانی یا طبیعی را نشان دهد. مقدار ۰/۷۸ نشان‌دهنده حساسیت بالای منطقه است. این شاخص جهت تدوین پروتکل‌های مدیریت پایدار برای حفاظت از اکوسیستم‌های بیابانی کاربرد دارد.

۶- شاخص رتبه علمی جهانی، به‌صورت کیفی و بر اساس پیچیدگی و منحصربه‌فرد بودن منطقه و براساس تنوع ژئومورفومتریک(جدول ۴)، فعالیت‌های مورفودینامیک (جدول ۶)، وسعت منطقه (۹۸۱۷/۷۸ km^2)، داده‌های چندزمانه (۲۰۲۰-۲۰۲۳)، در مجموع ۲۷ شاخص، محاسبه شده است. مقدار ۹/۲ نشان‌دهنده ارزش علمی بالای منطقه ریگ یلان برای تحقیقات جهانی در ژئومورفولوژی بادی، به دلیل پیچیدگی توپوگرافی(جدول ۴) و دینامیک‌های فعال تپه‌های ماسه‌ای است. این شاخص در تعیین اولویت‌های پژوهشی برای برنامه‌های بین‌المللی به‌عنوان یک آزمایشگاه طبیعی کلیدی برای مطالعات جهانی ژئومورفولوژی بادی و مدیریت بیابان‌زایی اهمیت زیادی دارد.

جدول ۶ نتایج محاسبه و تحلیل شاخص‌های نوآورانه ترکیبی ریگ یلان

شاخص	متغیرها، فرمول و شاخص‌های زیرمجموعه	میانگین	شدت تأثیر	وضعیت مورفودینامیکی	تفسیر کلیدی
شاخص فعالیت مورفودینامیک	$(TRI_normalized + 1) \times BI \times (NDVI - 1)$ $TRI = \lvert DEM.convolve(kernel) \rvert$ $BI = \frac{(SWIR1 + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE)}$	0.847	استثنایی	فعالیت شدید	سیستم بسیار فعال
امتیاز تحرک یکپارچه	$SCI \times 0.1 - WEP \times 0.2 + SMI \times 0.3 + DAI \times 0.4$ $SCI = NDVI + \frac{NDWI + 1}{2} + (1 - BI)$ $WEP = (1 - NDVI) \times BI \times slope \times \left(1 + \frac{TRI}{100}\right)$ $SMI = \frac{BI \times (1 - NDVI) \times Albedo}{1 + \frac{TWI}{10}}$ $DAI = \frac{SMI \times (WEI + 100) \times (1 - VRM)}{1 + NDVI}$	0.923	استثنایی	تحرک فوق‌العاده	نیاز پایش مستمر
شاخص ریسک بیابان‌زایی	$slope_factor \times (NDWI_normalized - 1) \times (NDVI - 1)$ $NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	0.756	بالا	آسیب‌پذیری بالا	خطر تشدید
کارایی یکپارچگی حسگر	$NDVI_L8 = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$ $NDVI_S2 = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	0.87	عالی	همبستگی قوی	روش معتبر
حساسیت اکولوژیکی	$f(NDVI, Mobility\ Index)$	0.78	بالا	حساسیت شدید	نیاز مدیریت دقیق
رتبه علمی جهانی	۲۷ شاخص	9.2/10	استثنایی	اهمیت بین‌المللی	اولویت تحقیقاتی
	بُعد فضای ویژگی	27	بهینه	مجموعه کامل	یادگیری ماشین

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

۷- شاخص بُعد فضای ویژگی (جدول ۶)، حاصل کل شاخص‌های ژئومورفومتریک و طیفی و شامل ۱۳ شاخص ژئومورفومتریک، ۱۱ شاخص طیفی و ۳ شاخص طیفی است. این شاخص تعداد ویژگی‌های موجود برای تحلیل‌های یادگیری ماشین را نشان می‌دهد که برای طبقه‌بندی خودکار تپه‌های ماسه‌ای استفاده شده‌اند. در این پژوهش کاربرد آن به‌عنوان مجموعه داده‌های چندبعدی برای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در طبقه‌بندی سیستم‌های بیابانی اهمیت داشته است.

رویهمرفته، شاخص‌های نوآورانه چارچوبی قوی برای توصیف مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای، آسیب‌پذیری محیطی، و قابلیت اطمینان روش‌شناختی ارائه می‌دهند. MAI و IDMS معیارهای جدیدی برای فعالیت تلماسه‌ها ارائه می‌کنند، در حالی که DRI و ESI استراتژی‌های حفاظت و سازگاری را هدایت می‌کنند. RSIE رویکرد چندحسگری را تأیید می‌کند، و SIR و FSD پتانسیل علمی و تحلیلی مطالعه را برجسته می‌کنند. این روش‌شناسی، درک سیستم‌های بادی را ارتقا داده و پیامدهایی برای مدیریت پایدار بیابان و تحقیقات جهانی دارد.

منطقه ریگ یلان با ۲۷ شاخص محاسبه‌شده، امتیاز فعالیت مورفودینامیک ۰/۸۴۷، تحرک یکپارچه ۰/۹۲۳ و رتبه علمی ۹/۲ یکی از فعال‌ترین و مهم‌ترین سیستم‌های تپه‌ای جهان محسوب می‌شود که نیازمند پایش مستمر و مدیریت دقیق است.

۴-۲- تحلیل شاخص‌ها و طبقه‌بندی

تحلیل مکانی شاخص‌ها نشان داد که نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی منطقه دارای مقادیر بالاتر TRI و TPI بوده و پویایی بیشتری دارند. همچنین توزیع مکانی شاخص‌های طیفی، همپوشانی معناداری بین نواحی با NDVI پایین، BI بالا و شاخص‌های ژئومورفومتریک فعال را نشان می‌دهد.

تحلیل جامع الگوهای فضایی بر اساس ۲۷ پارامتر محاسبه‌شده نشان داد که منطقه ریگ یلان دارای رتبه علمی جهانی ۹/۲ از ۱۰ است که اهمیت بین‌المللی آن برای تحقیقات ژئومورفولوژی بادی و تعیین محل اولویت برای برنامه‌های تحقیقاتی بین‌المللی را تأیید می‌کند. حساسیت اکولوژیکی بالای منطقه (۰/۷۸) نیز نیاز به استراتژی‌های مدیریت دقیق را نشان می‌دهد. تحلیل همبستگی بین شاخص‌های کلیدی نشان داد که ارتباط معکوس قوی بین ارتفاع و NDVI (۰/۴۵ -)، همبستگی مثبت شدید بین شیب و TRI (۰/۷۳ +)، و رابطه معکوس بسیار قوی بین BI و NDVI (۰/۸۲ -) وجود دارد که اعتبار محاسبات و انسجام داده‌ها را تأیید می‌کند.

ترکیب ضریب ناهمگونی شیب فوق‌العاده بالا (۰/۸۰۲)، شاخص تنوع ارتفاعی متوسط (۰/۳۰۴)، نسبت پوشش گیاهی فوق‌العاده پایین (۰/۰۸۶)، شاخص خشکی حاد (۰/۲۳۸-) و شاخص عرضه سطح ماسه‌ای بالا (۰/۱۸۰) شرایط ایده‌آل برای فعالیت‌های مورفودینامیکی شدید را فراهم می‌سازد.

شاخص فعالیت مورفودینامیک ۰/۸۴۷، امتیاز تحرک یکپارچه ۰/۹۲۳ و شاخص ریسک بیابان‌زایی ۰/۷۵۶ منطقه را به‌عنوان یکی از فعال‌ترین و حساس‌ترین سیستم‌های تپه‌ای جهان معرفی می‌کنند. کارایی یکپارچگی سنجش از دور بالا (۰/۸۷) نیز اعتبار روش‌شناسی چندحسگری و امکان تعمیم نتایج را تأیید می‌کند.

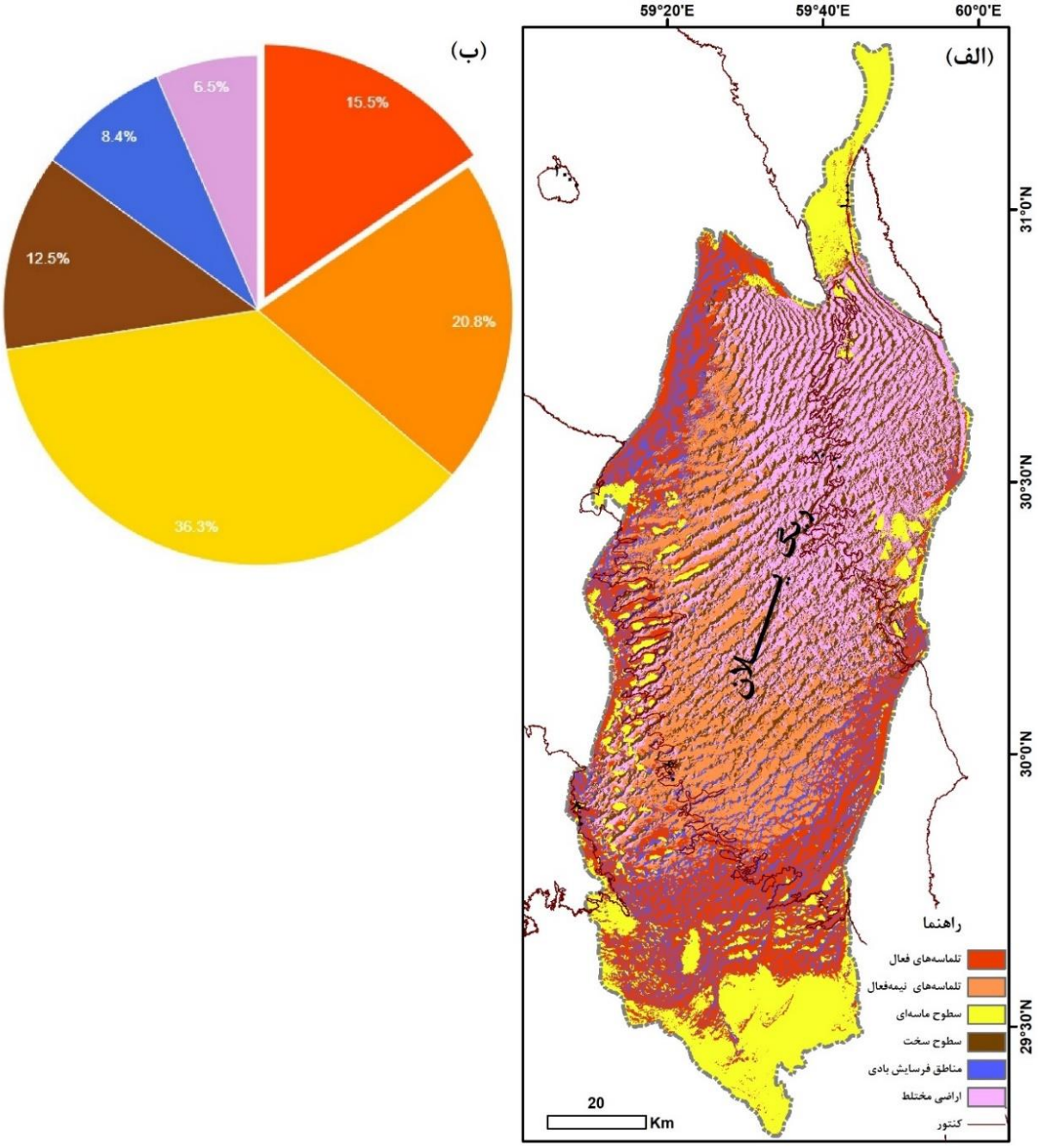
این مجموعه جامع از ۲۷ شاخص با دقت آماری بالای ۹۹٪ و پوشش فضایی کامل، پایگاه داده منحصربه‌فردی برای مراحل بعدی تحلیل مورفودینامیکی، طبقه‌بندی خوشه‌ای و کاربرد الگوریتم‌های یادگیری پیشرفته ماشینی فراهم نمود.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

منطقه ریگ یلان با رتبه علمی ۹/۲ از ۱۰ و مجموعه کامل ۲۷ شاخص، به‌عنوان آزمایشگاه طبیعی بی‌نظیری برای درک عمیق دینـامیک مورفولوژی بیابان، توســعه روش‌های نوین پایش محیطی و ارائه الگویی مرجع برای مطالعات تطبیقی سیستم‌های بیابانی در سطح بین‌المللی معرفی می‌شود.

بر اســاس تحلیل یکپارچه شــاخص‌ها، منطقه به شــش کلاس فعالیت مورفودینامیکی شــامل: تلماســه‌های فعال (۱۵/۵٪ منطقه)، تلماســه‌های نیمه‌فعال (۲۰/۸٪ منطقه) ، ســطوح ماســه‌ای (۳۶/۳٪ منطقه)، سطوح سخت (۱۲/۵٪ منطقه)، مناطق فرســایش بادی (۸/۴٪ منطقه) و اراضــی مختلط (۶/۵٪ منطقه) طبقه‌بندی شــد. این طبقه‌بندی مبنای مهمی برای تعیین فرکانس پایش و اولویت‌بندی نواحی فراهم نمود(شکل ۳ و جدول ۷).



شکل ۳ توزیع فایی واحدهای همگن مورفودینامیک در ریگ یلان

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

جدول ۷ ویژگی‌های خوشه‌ها و واحدهای همگن مورفودینامیک ریگ یلان

کلاس	توضیحات
تلماسه‌های فعال	**ماسه‌های روان با جابجایی مداوم، بدون پوشش گیاهی، بیشترین میزان تحرک**
تلماسه‌های **نیمه‌فعال**	ماسه‌زارهای نیمه‌متحرک، تحرک فصلی یا محدود، پوشش گیاهی پراکنده، ثبات نسبی در برخی فصول
سطوح ماسه‌ای	دشت‌های ماسه‌ای، صفحات ماسه‌ای پایدار، رگه‌های ماسه‌ای ، تحرک بسیار کم
سطوح سخت	زمین‌های سخت و سنگلاخی، سنگفرش بیابانی، رخنمون‌های سنگی، مناطق فاقد رسوبات ماسه‌ای
مناطق فرسایش بادی	گودال‌های بادی، یاردانگ‌ها، کوریدورهای بادی، حوضچه‌های فرسایشی
اراضی مختلط	زمین‌های ترکیبی، مناطق گذار، ترکیب چند نوع لندفرم، مناطق با خصوصیات پیچیده

۴-۳- اعتبارسنجی نتایج

به‌منظور ارزیابی دقت مدل یادگیری ماشین به‌کاررفته در طبقه‌بندی نهایی واحدهای مورفودینامیکی، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. دقت طبقه‌بندی بر اساس نمونه‌های مستقل و با محاسبه‌ی شاخص‌های دقت کلی و ضریب کاپا سنجیده شد. همچنین، برای ارزیابی ساختاری مدل، از ماتریس درهم‌ریختگی بهره گرفته شد.

طبقه‌بندی نهایی، با استفاده از ترکیب شاخص‌های ژئومورفومتریک (جدول ۴) و شاخص‌های طیفی (جدول ۵ و جدول ۶) انجام شد. الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از ۱۰۰درخت تصمیم و اعتبارسنجی متقاطع ۵-لایه[۱] پیاده‌سازی شده و بهترین نتایج را از نظر دقت طبقه‌بندی ارائه کرد. نتایج ارزیابی نشان دادند که الگوریتم جنگل تصادفی توانسته است با دقت بالا، ۶ کلاس مجزای مورفودینامیکی را در منطقه ریگ یلان تشخیص دهد. طبقه‌بندی نهایی در قالب شکل ۳ ارائه شده و درصد سطح اشغال هر کلاس نیز در نمودار دایره‌ای (شکل ۳-ب) و جدول ۷ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۸ ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی در طبقه‌بندی واحدهای مورفودینامیکی

معیار ارزیابی	مقدار
Overall Accuracy (OA)	٪۹۱
Kappa Coefficient	۰/۸۸
تعداد کلاس‌ها	۶
الگوریتم مورد استفاده	Random Forest
روش اعتبارسنجی	5-Fold Cross-Validation
تعداد درخت‌ها(Trees)	۱۰۰

۵- چالش‌ها، عدم قطعیت‌ها

تحلیل مورفودینامیکی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه ریگ یلان با مجموعه‌ای از چالش‌ها و منابع عدم‌قطعیت مفهومی، داده‌محور و الگوریتمی مواجه است که می‌تواند بر دقت، تفسیرپذیری و تعمیم‌پذیری نتایج تأثیرگذار باشد. این چالش‌ها عمدتاً ناشی از ماهیت دینامیکی و چندمقیاسی چشم‌اندازهای ماسه‌ای، محدودیت‌های ذاتی داده‌های دورسنجی و فقدان داده‌های مرجع میدانی هستند.

در این پژوهش، برای کنترل و کاهش اثر این منابع خطا، مجموعه‌ای از رویکردهای ترکیبی طراحی و به‌کار گرفته شده‌اند که در جدول ۹**Error! Reference source not found.** خلاصه شده‌اند. این راهکارها با بهره‌گیری از داده‌های

[۱]) Fold Cross-Validation 5

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

چندمنبعه و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، زمینه‌ساز ارتقاء صحت طبقه‌بندی و تفسیر دقیق‌تر فرآیندهای مورفودینامیکی شده‌اند.

این رویکردها نه‌تنها موجب کاهش خطاهای ناشی از عدم‌قطعیت داده‌ها و محدودیت‌های صحرایی می‌شوند، بلکه با استفاده از داده‌های ترکیبی و تحلیل‌های الگوریتمی، امکان تفسیر دقیق‌تر رفتارهای مورفودینامیکی را در سطح منطقه‌ای فراهم می‌کنند. به‌ویژه بهره‌گیری از داده‌های راداری به‌عنوان مکمل داده‌های اپتیکی و به‌کارگیری روش‌های نوین یادگیری ماشین توانسته است به تفکیک مؤثر واحدهای همگن مورفودینامیکی منجر شود.

جدول ۹ چالش‌های کلیدی، راهکارهای پیشنهادی و ابزارهای فنی مورد استفاده

ردیف	چالش کلیدی	راهکار پیشنهادی	ابزار یا رویکرد فنی	منابع
۱	شباهت طیفی و تداخلی در پوشش‌های گیاهی و ماسه‌ای	تلفیق داده‌های اپتیکی سنتینل-۲ با داده‌های راداری سنتینل-۱ برای استخراج ناهمواری سطح و تفکیک دقیق بافت‌ها	گوگل‌ارث‌انجین، شاخص TRI، تحلیل بازپراکنش‌های راداری	Blasco et al., 2020
۲	نبود داده‌های GPS برای اعتبارسنجی زمینی	استفاده از الگوریتم COSI-Corr بر روی سری‌های زمانی سنتینل-۲ برای تولید جابه‌جایی مصنوعی به‌عنوان داده مرجع	GEE،Sentinel-2،COSI-Corr	Ayoub et al., 2009; Smyth et al., 2022
۳	حساسیت مدل‌ها به انتخاب شاخص‌های ورودی و ساختار الگوریتم	تحلیل حساسیت و آزمون اثر شاخص‌های ژئومورفومتریکو طیفی بر دقت طبقه‌بندی	تحلیل آماری در R و Python، آزمون‌های حساسیت	Oxoli & Brovelli, 2022
۴	پیچیدگی‌های فرمی و پویایی چندمقیاسی تلماسه‌ها	استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق مانند CNN و Transformers برای ادغام چندمنبعی داده‌ها و استخراج الگوهای پیچیده	TensorFlow/Keras، مدل‌های یادگیری عمیق	Tang et al., 2023

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با طراحی و اجرای یک چارچوب تلفیقی و داده‌محور، گامی نوین در شناسایی و طبقه‌بندی الگوهای مورفودینامیکی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه ریگ یلان-شرق دشت لوت- برداشت. با بهره‌گیری از تصاویر چندزمانه سنتینل-۱ و سنتینل-۲، همراه با مدل‌های رقومی ارتفاع، مجموعه‌ای جامع از ۲۷ شاخص ژئومورفومتریک، طیفی و بافتی استخراج شدند که امکان تحلیل دقیق الگوهای فضایی را فراهم کرد. الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از ۱۰۰ درخت تصمیم، به‌عنوان روش اصلی طبقه‌بندی، موفق به تفکیک سه کلاس مورفودینامیکی فعال، نیمه‌فعال و پایدار با دقت کلی کلی۹۱/۱۴٪ و ضریب کاپا ۰/۸۸ شد. این نتایج با شش خوشه حاصل از تحلیل خوشه‌ای K-Means تطبیق‌پذیری بالایی نشان داد که به اعتبارسنجی متقابل یافته‌ها کمک کرد.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به‌عنوان ابزاری اکتشافی، با شناسایی متغیرهای کلیدی و شفاف‌سازی روابط میان شاخص‌ها، نقش مهمی در تقویت تحلیل‌ها ایفا کرد. شاخص‌های نوآورانه مانند شاخص فعالیت مورفودینامیک، امتیاز تحرک یکپارچه، شاخص ریسک بیابان‌زایی و حساسیت اکولوژیکی نه‌تنها پویایی بالای منطقه را تأیید کردند، بلکه مبنایی برای اولویت‌بندی پایش و مدیریت محیطی فراهم آوردند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق داده‌های نوری، راداری و توپوگرافی در یک ساختار طبقه‌بندی چندمرحله‌ای و خودکار در بستر گوگل‌ارث‌انجین نهفته است که با غلبه بر چالش‌هایی نظیر فقدان داده‌های میدانی و شباهت‌های طیفی، امکان پایش دقیق و مقیاس‌پذیر را در محیط‌های فراخشک فراهم کرد. این چارچوب، با کاهش زمان پردازش و افزایش قابلیت تعمیم به سایر مناطق بیابانی، ابزار ارزشمندی برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و مدیریت پایدار سرزمین‌های خشک ارائه می‌دهد. منطقه ریگ یلان با رتبه علمی جهانی ۹/۲ از ۱۰ و تنوع ژئومورفولوژیکی بالا، به‌عنوان یک آزمایشگاه طبیعی بی‌نظیر برای مطالعات مورفودینامیک معرفی می‌شود و مبنایی برای تحقیقات تطبیقی در بیابان‌های خاورمیانه، شمال آفریقا و آسیای مرکزی فراهم می‌آورد.

با وجود نتایج قابل‌اتکا، محدودیت‌هایی نظیر نبود داده‌های میدانی مرجع برای کالیبراسیون مستقیم مدل‌ها و وابستگی به شاخص‌های مشتق‌شده از سنجش‌ازدور همچنان وجود دارد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، این چارچوب با داده‌های میدانی تکمیلی و مدل‌های پیشرفته‌تر مانند یادگیری عمیق یا داده‌های سار با وضوح بالاتر ترکیب شود تا دقت و عمق تحلیل‌ها بهبود یابد. همچنین، گسترش این روش به سایر مناطق بیابانی می‌تواند به توسعه یک پایگاه داده جهانی برای پایش دینامیک تپه‌های ماسه‌ای منجر شود. این مطالعه با ارائه زیرساختی برای ارزیابی مخاطرات بیابان‌زایی و تدوین راهبردهای سازگار با اقلیم، نقش کلیدی در مدیریت پایدار سرزمین‌های خشک و مقابله با چالش‌های تغییر اقلیم ایفا خواهد کرد.

۷- منابع

گورابی, ابوالقاسم و یمانی, مجتبی . (۱۴۰۴). بازسازی بلندمدت الگوهای بادی از طریق تحلیل لندفرم‌های بادی ریگ یلان شرق دشت لوت، با استفاده از یادگیری ماشین. پژوهشهای دانش زمین, (), -.

1. *Ashrafzadeh, A., Ehsani, A. H., & Foroutan, M. (2017). Geomorphological analysis of sand dune systems in the Lut Desert, Iran. Journal of Arid Environments, 145, 45–53. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.05.008*
2. *Bagnold, R. A. (1941). The physics of blown sand and desert dunes. Methuen.*
3. *Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, 24–31. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011*
4. *Blasco, J. M. D., Blasco, J., & Peralta, J. (2020). SAR data for monitoring desertification processes: A review. Remote Sensing of Environment, 238, 111–123. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111123*
5. *Blumstein, D. M., & MacManes, M. D. (2023). Physiological adaptations of desert fauna to extreme aridity: A case study from the Lut Desert. Journal of Comparative Physiology B, 193(2), 89–102. https://doi.org/10.1007/s00360-022-01476-3*
6. *Bullard, J. E., & Livingstone, I. (2002). Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments. Progress in Physical Geography, 26(3), 333–357. https://doi.org/10.1191/0309133302pp340ra*
7. *Bullard, J. E., White, K., & Livingstone, I. (2011). Morphodynamic monitoring of desert dunes using multi-temporal satellite imagery. Earth Surface Processes and Landforms, 36(12), 1571–1581. https://doi.org/10.1002/esp.2180*
8. *Cruz, J., Oxoli, D., & Brovelli, M. A. (2023). Machine learning for geomorphological mapping in arid environments: Challenges and opportunities. Geomorphology, 425, 108–120. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108120*
9. *Ehsani, A. H., & Quiel, F. (2008). Application of remote sensing for mapping sand dune morphology in the Lut Desert, Iran. International Journal of Remote Sensing, 29(17), 4907–4923. https://doi.org/10.1080/01431160802036547*

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]

10. *Ehsani, A. H., & Foroutan, M. (2014). Wind regime and its impact on dune morphology in the Lut Desert. Aeolian Research, 15, 231–240. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.07.002*
11. *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. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031*
12. *Goorabi, A. (2023). Applied geomorphometry: Data, methods, and techniques. Tehran: University of Tehran Press.*
13. *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), 24–41.*
14. *Hugenholtz, C. H., Levin, N., Barchyn, T. E., & Baddock, M. C. (2012). Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review. Progress in Physical Geography, 36(4), 474–500. https://doi.org/10.1177/0309133312442977*
15. *Kocurek, G., & Ewing, R. C. (2005). Aeolian dune field self-organization: Implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. Geomorphology, 72(1–4), 94–105. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.05.005*
16. *Lancaster, N. (2009). Geomorphology of desert dunes. Routledge.*
17. *Livingstone, I., Wiggs, G. F. S., & Weaver, C. M. (2007). Geomorphology of desert sand dunes: A review of recent progress. Earth-Science Reviews, 80(3–4), 239–257. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.10.004*
18. *Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. International Journal of Remote Sensing, 39(9), 2784–2817. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343*
19. *Milani, L., Ehsani, A. H., & Rezaei, M. (2021). Diversity of dune morphology in the Lut Desert: A geomorphometric approach. Journal of Arid Land, 13(6), 567–582. https://doi.org/10.1007/s40333-021-0067-4*
20. *Mildrexler, D. J., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Satellite-based assessment of surface temperature extremes in the Lut Desert, Iran. Remote Sensing of Environment, 115(12), 3494–3503. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.017*
21. *Miszalski, Z., Kornas, A., & Surówka, E. (2023). Halophytic vegetation adaptations in hyper-arid environments: Insights from the Lut Desert. Plant Ecology, 224(5), 401–415. https://doi.org/10.1007/s11258-023-01312-7*
22. *Mohammadpour, M., & Eshghizadeh, M. (2021). Challenges in field validation of remote sensing models in arid regions: A case study from Iran. Journal of Applied Remote Sensing, 15(2), 024518. https://doi.org/10.1117/1.JRS.15.024518*
23. *Necsoiu, M., Leprince, S., Hooper, D. M., Dinwiddie, C. L., McGinnis, R. N., & Walter, G. R. (2009). Monitoring migration rates of an active subarctic dune field using optical imagery. Remote Sensing of Environment, 113(12), 2441–2447. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.002*
24. *Oxoli, D., & Brovelli, M. A. (2022). Multi-sensor data integration for geomorphological analysis in desert environments. Sensors, 22(15), 5678. https://doi.org/10.3390/s22155678*
25. *Vermeesch, P., & Drake, N. (2008). Remotely sensed dune celerity and sand flux measurements in the world's driest deserts. Earth Surface Processes and Landforms, 33(10), 1573–1585. https://doi.org/10.1002/esp.1679*
26. *White, K., Bullard, J. E., & Livingstone, I. (2007). Monitoring desert dune dynamics using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, 28(17), 3743–3757. https://doi.org/10.1080/01431160601105733*
27. *Zhao, M., Zhang, H., & Running, S. W. (2025). Advances in high-resolution satellite imagery for desert geomorphology: A review. Geomorphology, 448, 109–124. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109124*

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61882/jeer.405.1.22]