

ارزیابی وضعیت مورفولوژی و مورفودینامیکی لندفرم‌های بادی و ارتباط آن با عوامل محیطی (مطالعه موردی: ریگ جازموریان)

مهران مقصودی^{۱*}، حمید گنجائیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

چکیده

موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا بخش زیادی از مناطق بیابانی آن را ریگزارها در بر گیرد. ازجمله ریگزارهای بزرگ ایران، ریگ جازموریان است. ریگ جازموریان که شامل انواع مختلفی از لندفرم‌های بادی (تپه‌های ماسه‌ای) است، دارای دینامیک فعالی است و با توجه به اهمیتی که در برنامه‌ریزی‌های محیطی دارد، در پژوهش حاضر به مطالعه آن پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، از تصاویر گوگل ارث و تصاویر ماهواره‌های مادیس و لندست به‌عنوان داده‌های اصلی پژوهش استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش، سامانه گوگل ارث انجین، گوگل ارث و ArcGIS بوده است. در پژوهش حاضر، ابتدا محدوده دقیق ریگ جازموریان ترسیم و سپس براساس مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای طبقه‌بندی شده است. در ادامه، نرخ جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای محاسبه و سپس ارتباط آن با وضعیت محیطی منطقه ارزیابی شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داده است که ریگ جازموریان 4261 km^2 وسعت دارد و دارای اشکال متنوعی از تپه‌های ماسه‌ای است. در بین تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان، تپه‌های خطی مرکب با حدود ۳۸٪، دارای وسعت بیشتری هستند. همچنین براساس نتایج به‌دست‌آمده، تپه‌های ماسه‌ای منطقه در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بین ۲m تا ۴۷m حرکت داشته‌اند. آنالیز مکانی جابه‌جایی صورت‌گرفته نشان داده است که بیشترین میزان جابه‌جایی مربوط به مناطق میانی ریگ جازموریان بوده است و به همین دلیل در این مناطق، بالاترین ضریب غلظت گردوغبار وجود داشته است.

کلیدواژه‌ها: دینامیک تپه‌های ماسه‌ای، مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای، طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای.

۱. استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، نویسنده مسئول، maghsoud@ut.ac.ir

۲. دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، h.ganjaian@ut.ac.ir

مقدمه

ریگزارها به دلیل مورفولوژی خاصی که دارند، از پدیده‌های منحصربه‌فرد مناطق بیابانی محسوب می‌شوند (ماهیو^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ مقصودی و همکاران، ۲۰۲۱؛ گوان^۲ و همکاران، ۲۰۲۵). ریگزارها از پراکندگی و وسعت زیادی در ایران برخوردارند (صفری نامیوندی و همکاران، ۲۰۲۳؛ گنجائیان و همکاران، ۲۰۲۵؛ مشهدی و همکاران، ۲۰۲۴).

بررسی وضعیت مکانی ریگزارهای ایران نشان داده است که شهرهای مهمی در مجاورت ریگزارها استقرار یافته‌اند و با توجه به اینکه تپه‌های ماسه‌ای این ریگزارها در طول سال دارای جابه‌جایی هستند، می‌توانند اثرات منفی زیادی بر نواحی سکونتگاهی و کاربری‌های انسانی از جمله اراضی کشاورزی داشته باشند (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۷). اثرات منفی ریگزارها بر محیط پیرامون سبب شده است تا این اشکال به‌عنوان یکی از لندفرم‌های مهم مناطق بیابانی محسوب شوند (لایونگستون^۳ و همکاران، ۲۰۱۰؛ نگهبان و همکاران، ۲۰۲۴).

ریگزارهای ایران با وجود گستردگی و اثرات منفی زیادی که بر محیط پیرامون داشته‌اند، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و با توجه به اینکه شناسایی ویژگی‌های این اشکال به شناخت پیچیدگی‌های شکلی این عوارض و دینامیک فعال آن‌ها کمک بسیاری می‌کند، مطالعه جامع در ارتباط با ریگزارها بسیار حائز اهمیت است. از جمله ریگزارهای دارای وسعت قابل توجه ایران، ریگ جازموریان است. ریگ جازموریان از اشکال متنوعی از تپه‌های ماسه‌ای تشکیل شده و مطالعات اولیه در ارتباط با این ریگ بیانگر فعال بودن آن است. در واقع، با توجه به وسعت زیاد ریگ جازموریان و فعال بودن آن و همچنین به دلیل اینکه در نزدیکی نقاط جمعیتی از جمله شهرهای ایرانشهر و بمپور قرار دارد، بررسی وضعیت مورفولوژی و دینامیک تپه‌های ماسه‌ای این ریگ بسیار حائز اهمیت است ولی تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با مورفولوژی و مورفودینامیک این ریگ صورت نگرفته است. با توجه به موارد ذکر شده، نبود مطالعات جامع در ارتباط با ریگ جازموریان

به‌عنوان یک خلأ مطالعاتی محسوب می‌شود که باید به آن توجه ویژه‌ای شود. در واقع، باید ضمن شناسایی ریگ جازموریان و تحلیل وضعیت دینامیک آن، یک طبقه‌بندی بومی برای بررسی وضعیت مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای آن ارائه شود که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده است.

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه، تحقیقات مختلفی در سطح جهان و ایران صورت گرفته است. نتایج تحقیقی در استرالیا نشان داده است که مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای تحت تأثیر سرعت و جهات بادهای منطقه، دارای تغییرات زیادی بوده است (دنیل و هاگس^۴، ۲۰۰۷). در تحقیقی دیگر، تأثیر تغییرات رژیم‌های بادی بر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای مناطق نشان داده شده است (سیلوسترو^۵ و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج مطالعات صورت گرفته در مناطق بیابانی مصر بیانگر تأثیر مستقیم شاخص‌های سرعت و جهت باد بر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای بوده است (هرهر^۶، ۲۰۱۸). تحقیقات صورت گرفته در بیابان تاکلاماکان نیز نشان داده است که تحت تأثیر جهت بادهای منطقه، بخش زیادی از تپه‌های ماسه‌ای این بیابان، دارای شکل طولی هستند (سان و ژاو^۷، ۲۰۲۲). در ایران نیز مطالعات صورت گرفته در ارتباط با ریگزارها نشان‌دهنده تأثیرگذاری مستقیم وزش همگرای بادهای بر شکل‌گیری ریگ‌های اطراف دشت کویر است (یمانی، ۲۰۱۵). این نتایج برای ریگ جن در جنوب دشت کویر نیز نشان داده شده است (فتحی و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج مطالعات صورت گرفته در ریگ زهک در شرق دشت سیستان بیانگر جابه‌جایی حدود ۱/۵m تپه‌های ماسه‌ای است (مقصودی و همکاران، ۲۰۲۰) و در تحقیقی دیگر، افزایش معنادار رسوبات رسی در حاشیه نیکاه‌ها نشان داده شده است (ربانی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین نتایج تحقیقی بیانگر رابطه معنادار بین میانگین شاخص تحرک، فعالیت و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای در ارگ جوان آب‌شیرین است (حسنی درآباد و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین بررسی مطالعات پیشین بیانگر کاربرد روش‌های سنجش از دوری در پایش وضعیت ریگزارها

4. Daniell & Hughes

5. Silvestro

6. Hereher

7. Sun & Gao

1. Mahyou

2. Guan

3. Livingstone

استان کرمان و سیستان و بلوچستان قرار دارد و نزدیک‌ترین شهرها به آن شامل شهرهای ایرانشهر، بمپور، بزمان، گلمورتی و اسپکه است (شکل ۱). ریگ جازموریان در چاله جازموریان قرار دارد و از چند بخش تشکیل شده است. کف چاله یا تالاب جازموریان رسی است که در بعضی از سال‌ها از آب پر شده و نیزارهای وسیعی منطقه را فرا می‌گیرد. رودخانه بمپور از سمت شرق و رودخانه هلیل رود از سمت غرب، این چاله را تغذیه می‌کنند. از نظر ارتفاعی، ریگزار جازموریان در مناطق پست چاله جازموریان قرار گرفته شده و به همین دلیل دارای ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر از سطح دریاست (آباد و همکاران، ۲۰۲۲). چاله جازموریان به‌عنوان یکی از دریاچه‌های فصلی کشور محسوب می‌شود که به‌دلیل شرایط اقلیمی منطقه و همچنین سدسازی‌های صورت گرفته، در بخش زیادی از سال خشک است. از نظر تقسیمات مورفوتکتونیک، چاله جازموریان از شمال توسط کوه شاه، کوه بزمان و جبال بارز از واحد کویر لوت و از جنوب توسط بلندی‌های بشاگرد از واحد مکران جدا شده است. از نظر وضعیت اقلیمی نیز با توجه به اختلاف ارتفاع زیادی که در منطقه وجود دارد، دارای تنوع اقلیمی بسیاری است، به‌طوری‌که میزان بارش سالانه چاله جازموریان حدود ۱۰۰mm و میانگین دمای آن در فصول گرم حدود ۴۰°C است. اما ارتفاعات حاشیه شمالی منطقه آن دارای بارندگی بیش از ۴۰۰mm در سال و میانگین دمای کمتری است (لطفی‌نسب و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین این چاله از نظر پوشش زمین نیز دارای تنوع زیادی است، به‌طوری‌که چاله جازموریان را ریگزارها، شوره‌زارها و پوشش گیاهی پراکنده در بر گرفته است و ارتفاعات اطراف را مراتع ضعیف شامل می‌شود (مقصودی و همکاران، ۲۰۱۸).

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، از تصاویر گوگل ارث و تصاویر ماهواره‌های مادیس به‌عنوان داده‌های اصلی پژوهش استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش، سامانه گوگل ارث انجین، گوگل ارث و نرم‌افزار ArcGIS 10.8 بوده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این پژوهش از چند مرحله تشکیل شده (شکل ۲) که در ادامه تشریح شده است.

نتایج تحقیقی نشان داده است که با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین می‌توان تغییرات تپه‌های ماسه‌ای را ارزیابی کرد (ون کوئیک^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). در تحقیقی دیگر، کاربرد تصاویر سستینال^۱ در پایش وضعیت دینامیکی و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای نشان داده شده است (بومکی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات صورت گرفته در شمال چین بیانگر کاربرد سامانه گوگل ارث انجین در ارزیابی وضعیت دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای شمال چین بوده است (چن^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعه تغییرات تپه‌های ماسه‌ای غرب مراکش نیز بیانگر کاربردی بودن تصاویر راداری در پایش میزان تغییرات بوده است (هرزوغ^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین تحقیقات صورت گرفته در صحرای باداین جاران^۵ کشور چین بیانگر کاربرد مدل رقومی ارتفاعی ۳۰m در استخراج تپه‌های ماسه‌ای با دقت ۹۰٪ است (جی^۶ و همکاران، ۲۰۲۵).

بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که در بیشتر تحقیقات یا به بررسی وضعیت مورفولوژی یا به بررسی وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای پرداخته شده است. در پژوهش حاضر، علاوه بر وضعیت مورفولوژی، به ارائه طبقه‌بندی ریگ جازموریان پرداخته شده است؛ همچنین ضمن ارزیابی میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان، به تحلیل ارتباط عوامل محیطی با تپه‌های ماسه‌ای این ریگزار پرداخته شده است. با توجه به موارد ذکر شده، هدف از پژوهش حاضر، ترسیم موقعیت دقیق ریگ جازموریان، طبقه‌بندی مورفولوژیکی و ارزیابی وضعیت دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای این ریگ است.

مواد و روش‌ها

موقعیت ریگ جازموریان

ریگ جازموریان از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول ۱۰' ۵۸° تا ۵۶' ۶۰° شرقی و عرض ۴۳' ۲۶° تا ۵۹' ۲۷° شمالی قرار گرفته است. از نظر تقسیمات سیاسی، این ریگزار در محدوده دو

1. Van Kuik
2. Boemke
3. Chen
4. Herzog
5. Badain Jaran
6. Ge

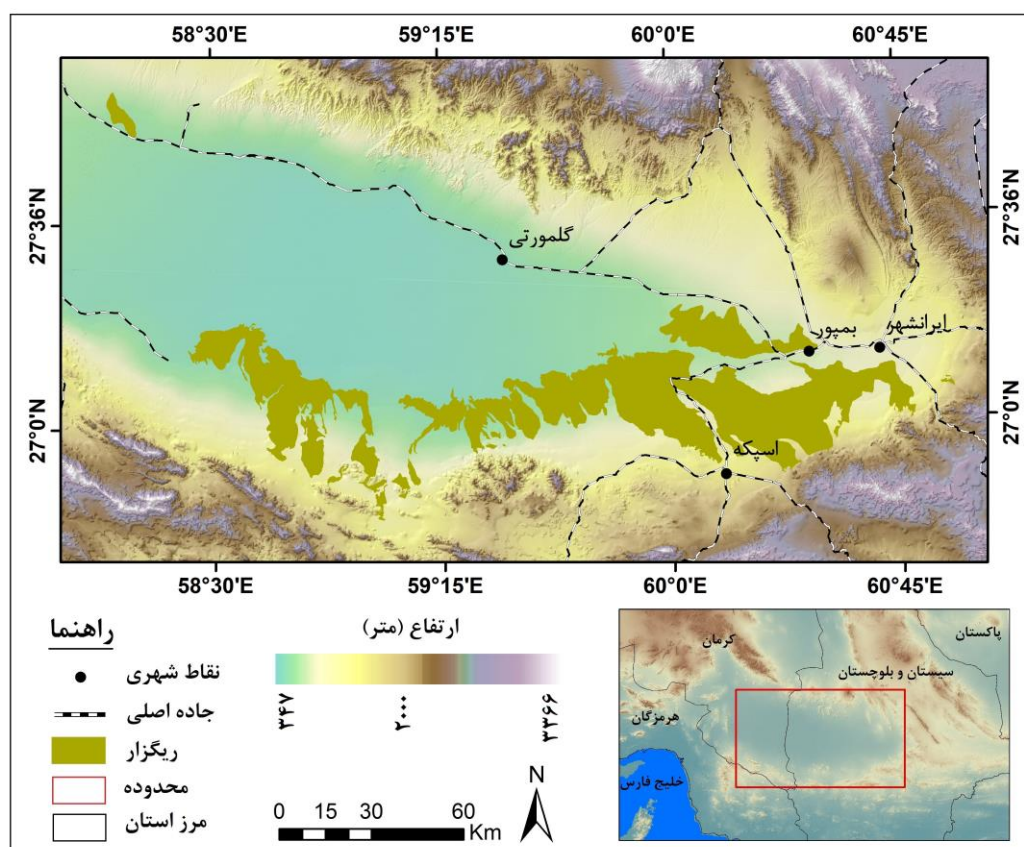


Figure (1): Location map of Jazmurian erg

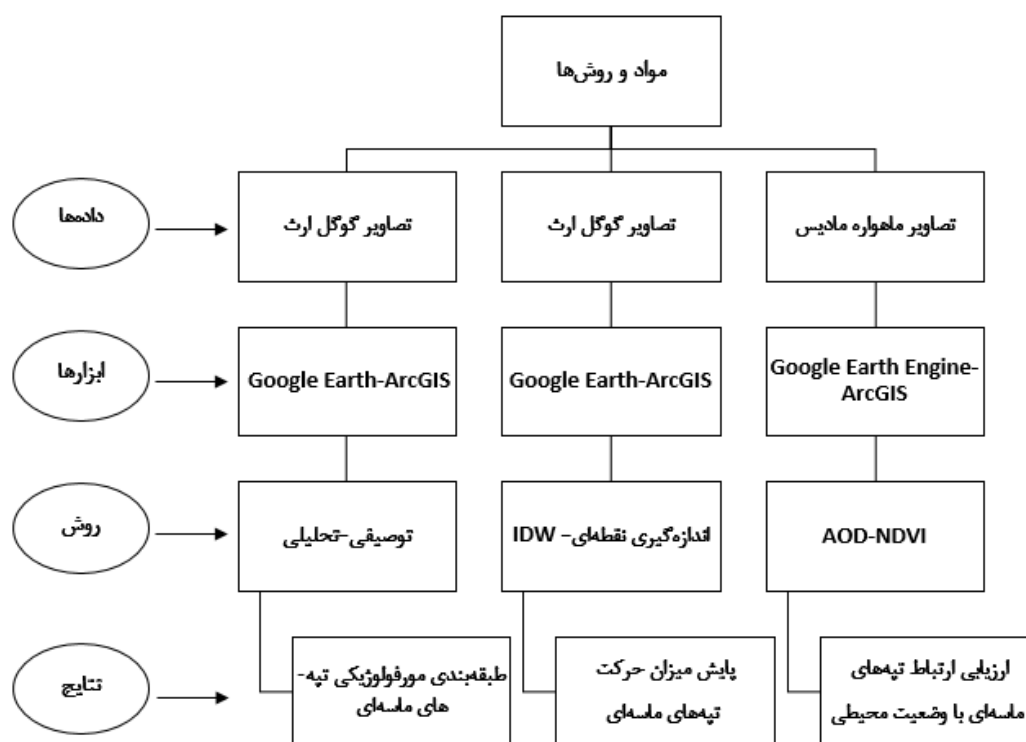
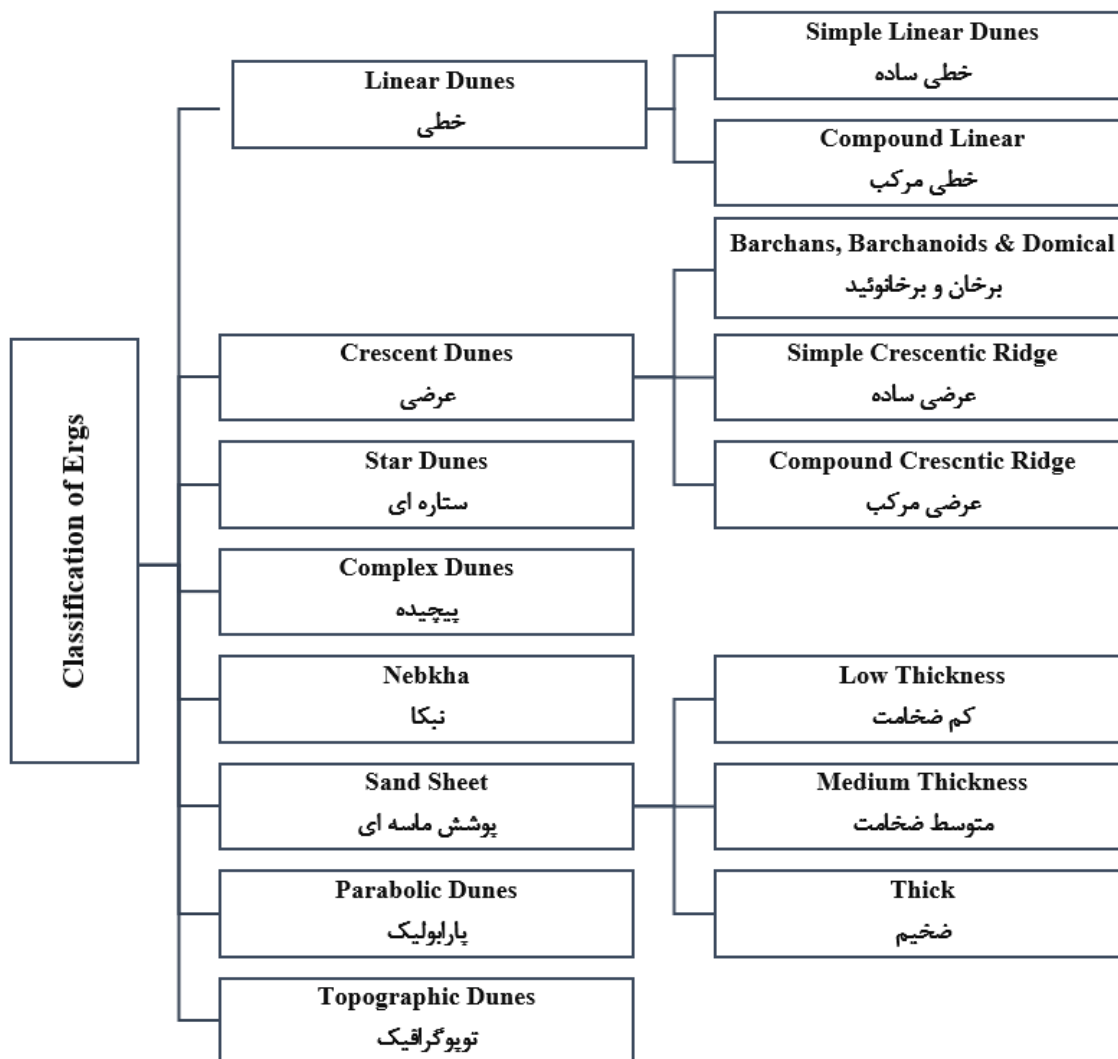


Figure (2): Research Materials and Methods Chart

توسط فرایبرگر در سال ۱۹۷۹ و لنکستر در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۹ و همچنین بر مبنای شکل ریگزارهای ایران، یک طبقه‌بندی بومی برای ریگزارهای ایران ارائه شده است (شکل ۳).

الف) طبقه‌بندی مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای: در این مرحله ابتدا با استفاده از تصاویر گوگل ارث، محدوده دقیق ریگ جازموریان ترسیم شد و سپس از نظر مورفولوژی و مورفومتری ارزیابی گردید. پس از ترسیم محدوده دقیق ریگ جازموریان، بر مبنای مطالعات پیشین از جمله طبقه‌بندی‌های صورت گرفته



شکل (۳): طبقه‌بندی بومی شده تپه‌های ماسه‌ای ایران (مقصودی و گنجاان، ۲۰۲۵)

Figure (3): Localized Classification of Sand Dune Types in Iran (Maghsoudi & Ganjaeian, 2025)

تپه‌های ماسه‌ای منفرد انتخاب و سپس بر مبنای همین تصاویر، میزان حرکت آن در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ اندازه‌گیری شده است. به منظور اندازه‌گیری میزان حرکت، ابتدا محدوده تپه ماسه‌ای در سال ۲۰۰۵ ترسیم شده و سپس محدوده همان تپه ماسه‌ای در سال ۲۰۲۰ نیز ترسیم شده و با اندازه‌گیری میزان تغییرات، میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای اندازه‌گیری شده

ب) پایش میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای: در این مرحله به منظور ارزیابی وضعیت جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای، از ۸۱ نقطه نمونه استفاده شده است. انتخاب نقاط نمونه براساس شکل ریگزارها و میزان حرکت آن‌ها بوده، به طوری که در مناطق دارای اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای و فعال، تعداد نقاط نمونه بیشتر بوده است. در واقع، با استفاده از تصاویر گوگل ارث،

AOD، ارزش بین صفر تا ۱ داده شده و سپس در نرم افزار ArcGIS، ضریب همبستگی آن‌ها محاسبه شده است.

نتایج

مورفومتری ریگ جازموریان

ریگ جازموریان با مساحت 4261 km^2 ، بخش زیادی از چاله جازموریان را در بر گرفته است. ارتفاع این ریگ در مناطق مختلف متفاوت بوده و در بین 370 m تا 950 m از سطح دریا قرار دارند. طول ریگ جازموریان از غرب به شرق، یعنی از سمتی که رودخانه بمپور وارد جازموریان می‌شود تا بخش‌هایی که رودخانه هلیل رود به صورت واگرا پخش می‌شود، حدود 235 km است. البته این در صورتی است که کل ریگ را متصل به هم بدانیم. شایان ذکر اینکه ریگ به علت انقطاعی که در وسط وجود دارد، به دو بخش غربی و شرقی تقسیم می‌شود اما این منطقه خالی از ریگ چندان بزرگ نبوده و می‌توان ریگ را یکپارچه در نظر گرفت. عرض ریگ هم در عریض‌ترین بخش به حدود 50 km می‌رسد.

طبقه‌بندی لندفرم‌های بادی ریگ جازموریان

تپه‌های ماسه‌ای با توجه به تأثیرگذاری عوامل مختلف، می‌توانند به صورت اشکال مختلفی ظاهر شوند و همچنین تحت تأثیر عوامل دینامیک، می‌توانند به صورت فعال و غیرفعال باشند. در پژوهش حاضر، پس از شناسایی ریگزارها و ترسیم محدوده آن‌ها، دو نوع طبقه‌بندی صورت گرفته است. ابتدا با توجه به شکل ظاهری به ۱۲ دسته تقسیم شده‌اند و در ادامه با توجه به میزان فعالیتی که در طی سال‌های اخیر داشته‌اند به ۳ دسته فعال، نیمه فعال و غیرفعال تقسیم شده‌اند.

الف) طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای براساس شکل ظاهری: در این پژوهش پس از ترسیم محدوده تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان، بر مبنای تحقیقات پیشین (فرایرگر، ۱۹۷۹؛ لنکستر، ۲۰۰۹؛ مقصودی و گنجائیان، ۲۰۲۵) و وضعیت مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای منطقه، ریگ جازموریان به طبقات مختلفی تقسیم شده است. این ریگ یکی از معدود ریگ‌های

است. پس از انتخاب نقاط نمونه و اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی رخ داده، در نهایت با استفاده از روش درون‌یابی IDW^1 یا فاصله وزنی معکوس، نقشه وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در محدوده ریگ جازموریان تهیه شده است. شایان ذکر است که به منظور اطمینان از دقت هندسی تصاویر، نقاط کنترل ثابت (نظیر جاده‌ها، ساختمان‌ها و عوارض طبیعی پایدار) در دو دوره زمانی مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا هرگونه خطای مکانی احتمالی به حداقل برسد.

ج) ارزیابی ارتباط تپه‌های ماسه‌ای با وضعیت محیطی: در این مرحله به منظور ارزیابی ارتباط جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای و وضعیت محیطی منطقه، با استفاده از تصاویر ماهواره مادیس، سامانه گوگل ارث انجین و ضریب NDVI، نقشه تراکم پوشش گیاهی منطقه تهیه شده است و سپس با استفاده از تصاویر ماهواره مادیس و شاخص AOD^2 عمق آتیکتی آئروسول، نقشه میزان غلظت گردوغبار منطقه مورد مطالعه در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ تهیه شده است. در تعیین شاخص AOD از رابطه (۱) به منظور نرمال کردن شاخص استفاده می‌شود و مقادیر بین صفر و ۱ قرار می‌گیرند و در صورتی که مقدار عددی آن بالای ۰/۵ باشد، بیانگر غلظت بالای گردوغبار منطقه است (رابطه ۱):

$$AOD_{normal} = (AOD - Min) / (Max - Min) \quad (1)$$

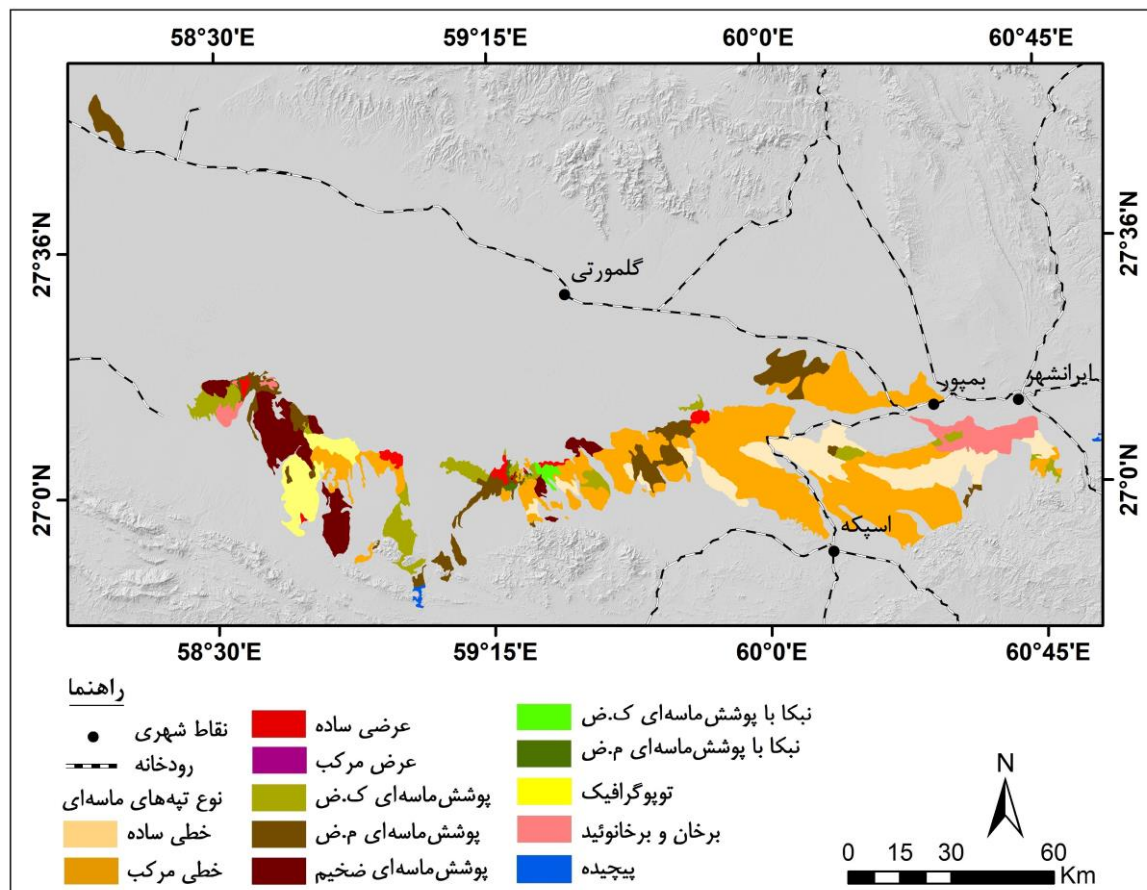
در این رابطه، Min کمترین و Max بیشترین مقدار عددی به دست آمده از شاخص AOD است. به طور معمول، در صورتی که مقادیر این شاخص کم‌تر از ۰/۵ باشد، هوای منطقه تقریباً صاف است و در صورتی که بیش از ۰/۷ باشد، دارای غلظت گردوغبار بالاست (تائو^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). پس از تهیه نقشه‌های شاخص NDVI و ضریب AOD، به منظور ارزیابی وضعیت همبستگی آن‌ها با میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای، ضریب همبستگی پیکسلی آن‌ها محاسبه شده است. به منظور ارزیابی ضریب همبستگی پیکسلی، به نقشه میزان جابه‌جایی حرکت تپه‌های ماسه‌ای، شاخص NDVI و ضریب

4. Fryberger
5. Lancaster

1. Inverse Distance Weighting
2. Depth Optical Aerosol
3. Tao

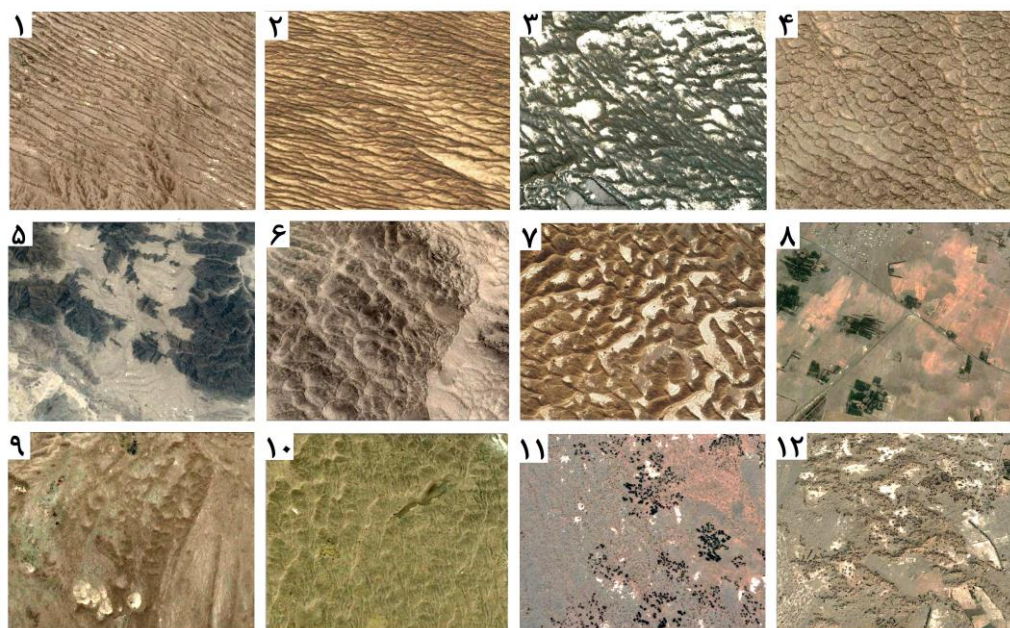
به سمت جازموریان جریان پیدا می‌کند. این مورد را در نواحی غربی ریگ به وضوح می‌توان مشاهده نمود. بخشی از ریگ از نواحی کوهستانی جنوبی گذشته و تپه‌های بالارونده یا توپوگرافیک را ایجاد نموده که از نظر وسعت در نوع خود در کشور بسیار بزرگ است. همچنین بخشی از ریگ، به‌ویژه در بخش غربی از ریگ‌های دیرینه محسوب می‌شود که در حال حاضر پوشش گیاهی خوبی داشته و نیمه‌فعال محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، پس از ترسیم محدوده ریگزارها، محدوده ترسیم شده بر مبنای شکل ریگزارها به ۱۲ طبقه تقسیم شده است (شکل ۴ و ۵).

ایران است که تپه‌های خطی آن نسبتاً زیاد است. البته ریگ‌های ساحلی از این قاعده مستثنی هستند. تپه‌های خطی بسیار گسترده و تپیک در غرب ریگ گسترش وسیعی دارند که در برخی موارد بین آن‌ها پهنه‌های رسی قرار گرفته است و دارای جهت شرقی غربی هستند. بین این عناصر خطی پوشش گیاهی نسبتاً خوبی وجود دارد که وجود نبکا نیز از مشخصه‌های دیگر آن‌هاست. تپه‌های خطی هم از نوع ساده هستند و هم از نوع مرکب که مورد آخر افزایش پیچیدگی باد و تأثیر سایر عوامل را در شکل‌گیری آن‌ها به نمایش می‌گذارد. در ریگ جازموریان، به سمت نواحی کوهستانی جنوبی بر پیچیدگی ریگ افزوده می‌شود که ناشی از تأثیر بادهایی است که از نواحی کوهستانی



شکل (۴): نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌های بادی ریگ جازموریان؛ ک.ض: کم ضخامت؛ م.ض: متوسط ضخامت

Figure (4): Map of the classification of aeolian landforms of Jazmurian erg



شکل (۵): تصویر ماهواره‌ای از اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای ۱. عرضی ساده، ۲. عرضی مرکب، ۳. خطی ساده، ۴. خطی مرکب، ۵. توپوگرافیک، ۶. پیچیده، ۷. برخان و برخانوئید، ۸. پوشش ماسه‌ای کم ضخامت، ۹. پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت، ۱۰. پوشش ماسه‌ای ضخیم، ۱۱. پوشش ماسه‌ای کم ضخامت و نبکا، ۱۲. پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و نبکا

Figure (5): Satellite image of different types of sand dunes: 1. Simple Crescentic Ridge, 2. Compound Crescentic Ridge, 3. Simple Linear Dunes, 4. Compound Linear, 5. Topographic Dunes, 6. Complex Dunes, 7. Barchans & Barchanoids, 8. Sand Sheet Low Thickness, 9. Sand Sheet Medium Thickness, 10. Sand Sheet Thick, 11. Sand Sheet Low Thickness & Nebkha, 12. Sand Sheet Medium Thickness & Nebkha

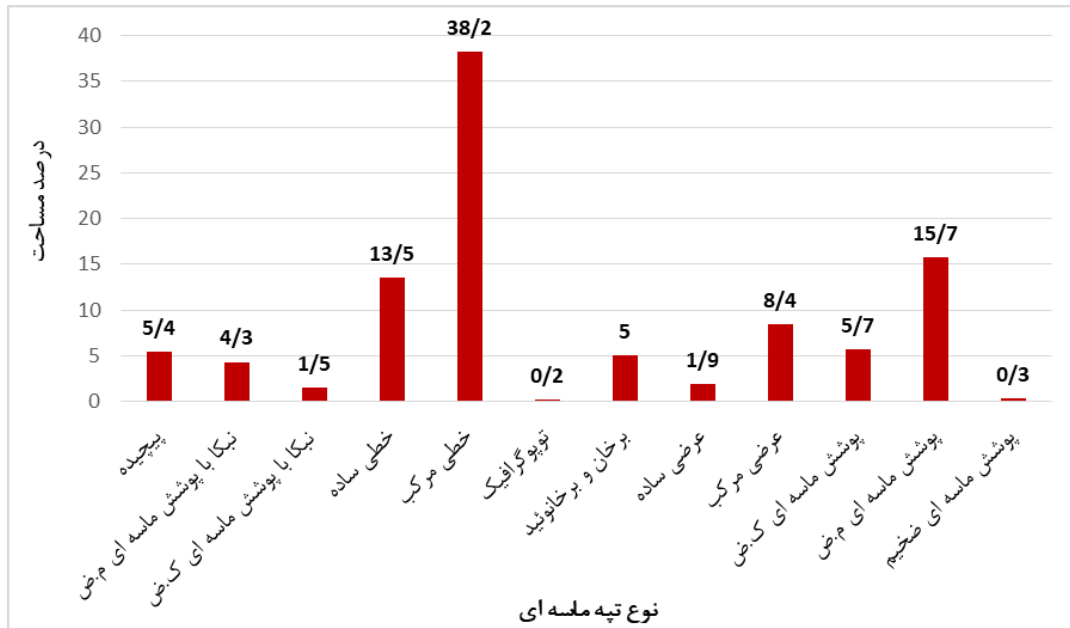
نتایج محاسبه مساحت و درصد مساحت طبقات (جدول ۱ و شکل ۶) نشان داده است که بخش زیادی از ریگ جازموریان را تپه‌های خطی مرکب در بر گرفته است، به‌طوری‌که این تپه‌ها با ۱۶۴۹km^2 ، $۳۸/۲\%$ از ریگ جازموریان را شامل می‌شود.

همچنین پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت با ۶۶۹km^2 ، معادل $۱۵/۷\%$ و تپه‌های ماسه‌ای خطی ساده با ۵۷۷km^2 ، $۱۳/۵\%$ از ریگ جازموریان را در بر گرفته‌اند.

جدول (۱): مساحت و درصد مساحت طبقات تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان

Table (1): Area and percentage of area of sand dune classes in Jazmorian er

ردیف	نوع تپه‌های ماسه‌ای	مساحت (km^2)	مساحت (%)
۱	پیچیده	۲۲۸	۵/۴
۲	نبکا با پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت	۱۸۳	۴/۳
۳	نبکا با پوشش ماسه‌ای کم ضخامت	۶۲	۱/۵
۴	خطی ساده	۵۷۷	۱۳/۵
۵	خطی مرکب	۱۶۴۹	۳۸/۲
۶	توپوگرافیک (در جایی که تپه‌های ماسه‌ای بر روی ناهمواری‌ها قرار دارند مانند تپه‌های ماسه‌ای موجود بر روی تپه‌ها یا دامنه‌ها)	۱۰	۰/۲
۷	برخان و برخانوئید	۲۱۲	۵
۸	عرضی ساده	۸۱	۱/۹
۹	عرضی مرکب	۳۵۷	۸/۴
۱۰	پوشش ماسه‌ای کم ضخامت	۲۴۳	۵/۷
۱۱	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت	۶۶۹	۱۵/۷
۱۲	پوشش ماسه‌ای ضخیم	۱۳	۰/۳



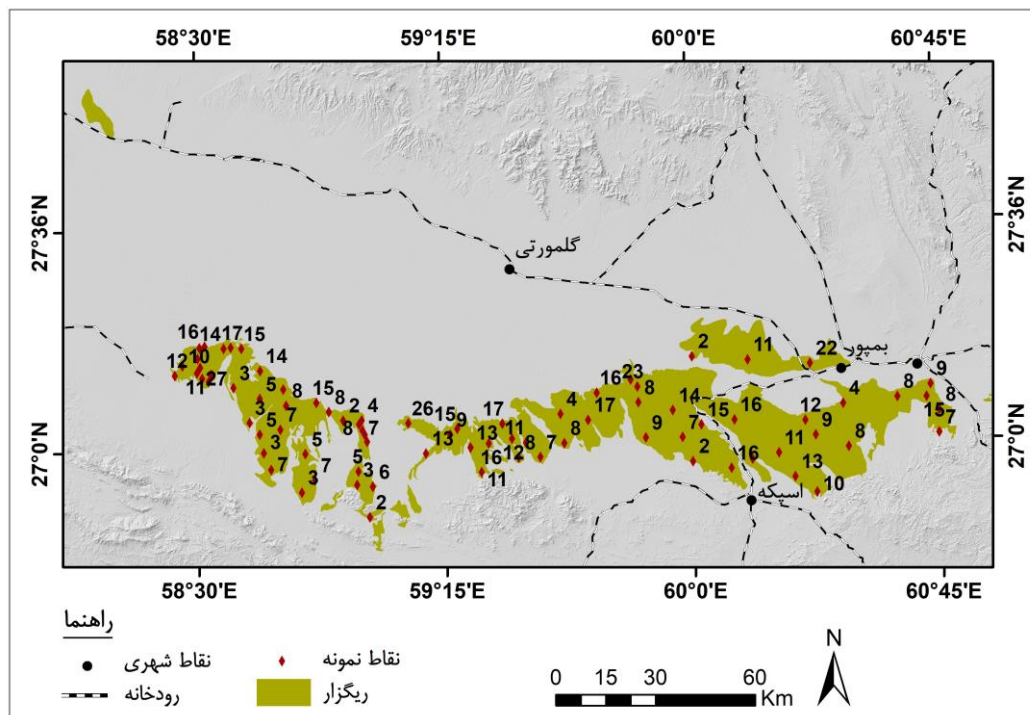
شکل (۶): نمودار مساحت و درصد مساحت طبقات تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان

Figure (6): hart of area and percentage of area of sand dune classes in Jazmurian erg

۴۷m در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ حرکت داشته است که بخش‌هایی از مناطق مرکزی و غربی ریگ جازموریان و همچنین بخش‌های از مناطق شرقی آن بیش از ۴۰m حرکت داشته‌اند و سایر مناطق این ریگ کمتر از ۲۰m حرکت داشته است (شکل ۸).

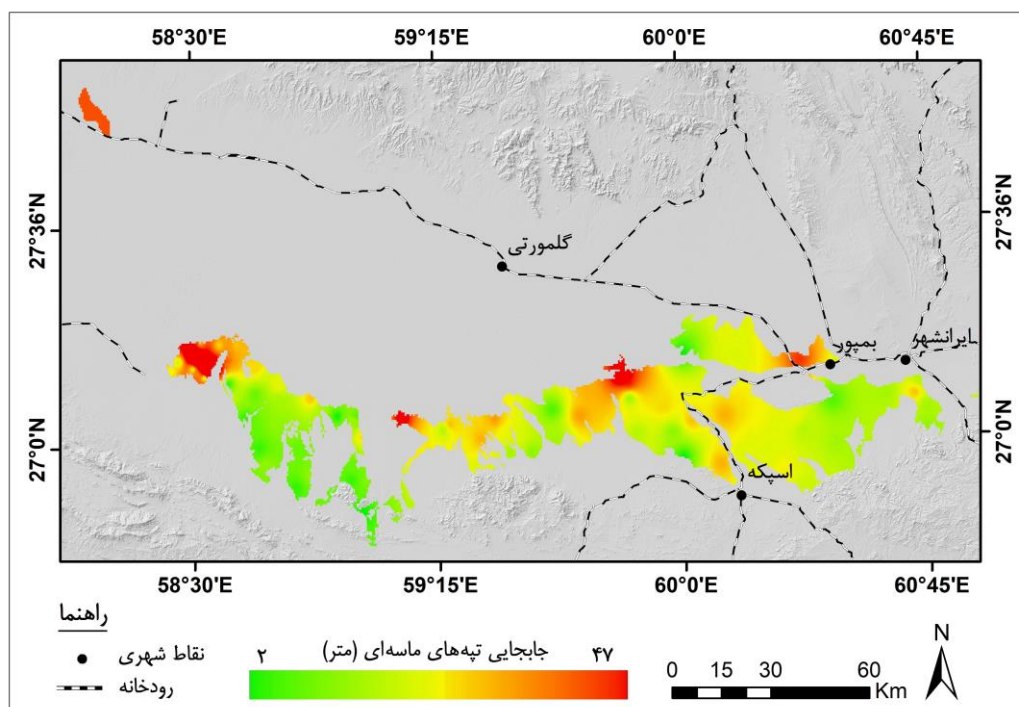
ب) پایش تغییرات تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان

پس از اندازه‌گیری حرکت تپه‌های ماسه‌ای در نقاط نمونه، با استفاده از روش درون‌یابی IDW، نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان تهیه شده است (شکل ۷). براساس نقشه تهیه‌شده، تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان بین ۲m تا



شکل (۷): نقشه موقعیت و جابه‌جایی نقاط نمونه در ریگ جازموریان

Figure (7): Map of location and displacement of sample points in Jazmurian erg

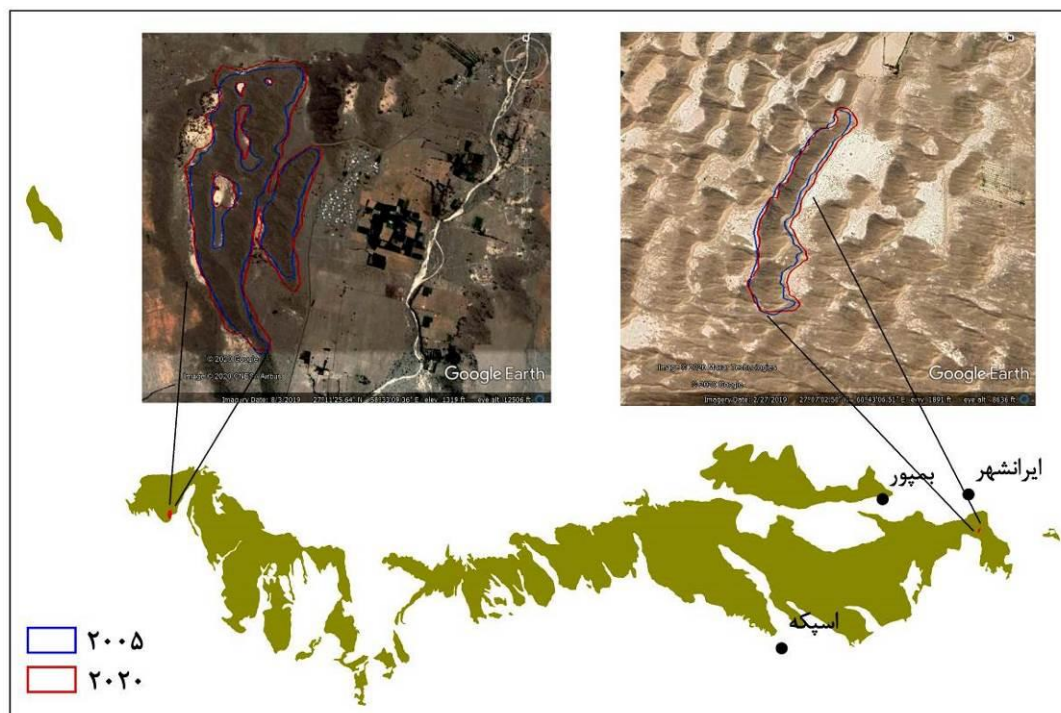


شکل (۸): نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ جازموریان

Figure (8): Map of sand dune movement in Jazmurian erg

جازموریان نشان داده شده که براساس نتایج حاصل، میزان تغییرات در تپه ماسه‌ای بخش غربی حدود ۱۰m و در تپه ماسه‌ای بخش شرقی حدود ۱۵m در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بوده است (شکل ۹).

براساس نتایج به دست آمده بیشتر تغییرات صورت گرفته در این ریگ به صورت پخش شدگی بوده و رأس تپه‌های ماسه‌ای را با تغییر مواجه کرده است. در ادامه، نمونه‌هایی از میزان تغییرات دو تپه ماسه‌ای در بخش‌های غربی و شرقی ریگ



شکل (۹): نمونه‌هایی از میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان

Figure (9): Examples of sand dune displacement in Jazmurian erg

بحث

ارزیابی ارتباط جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای و وضعیت

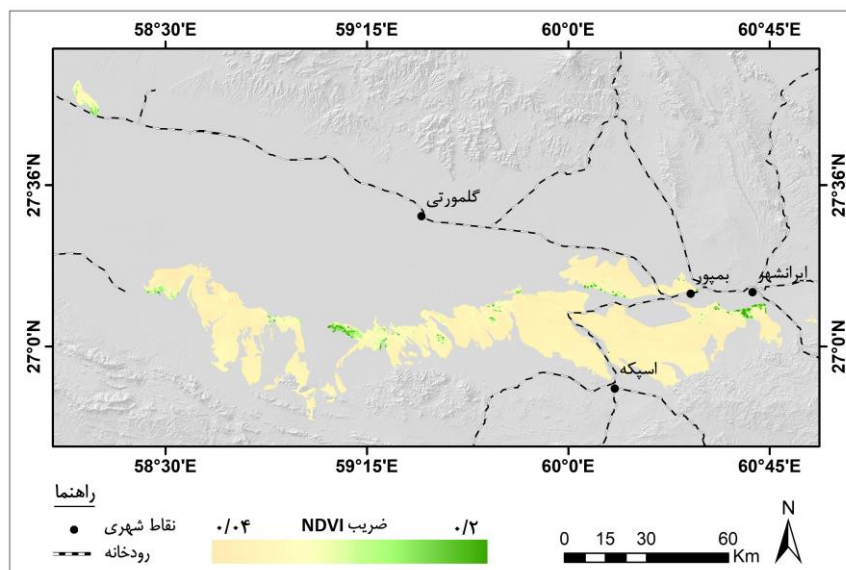
محیطی منطقه

وضعیت هیدروژئومورفولوژی، اقلیم و پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پویایی و تغییر شکل تپه‌های ماسه‌ای به شمار می‌روند (دیائو^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ریگ جازموریان، که از نظر بارش فقیر و از نظر دمایی بسیار گرم است، ناپایداری سطح زمین در اثر کاهش پوشش گیاهی و افزایش فعالیت بادهای غالب، باعث تحرک شدید تپه‌ها می‌شود. درعین‌حال، این تغییرات ژئومورفولوژیک خود اثر قابل توجهی بر محیط پیرامون دارند و در تشدید گردوغبار، تغییر الگوهای ته‌نشست ذرات و کاهش کیفیت زیست‌محیطی منطقه نقش دارند. در ادامه به بررسی تفصیلی دو شاخص محیطی مهم شامل تراکم پوشش گیاهی و غلظت گردوغبار پرداخته می‌شود و ارتباط آن‌ها با میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای تحلیل می‌گردد.

- وضعیت تراکم پوشش گیاهی ریگ جازموریان: برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی، از داده‌های ماهواره مادیس در بستر سامانه Google Earth Engine و شاخص NDVI استفاده شد (شکل ۱۰). نتایج حاصل نشان داد که بیشینه مقدار NDVI در محدوده ریگ جازموریان حدود ۰/۲ است که

بیانگر تراکم بسیار پایین پوشش گیاهی در این منطقه می‌باشد. این وضعیت به‌طور مستقیم با اقلیم خشک، کمبود رطوبت و شوری بالای خاک ارتباط دارد.

پوشش گیاهی در مناطق ماسه‌ای معمولاً نقش مهمی در تثبیت سطح تپه‌ها دارد. ریشه‌ها موجب درهم‌تنیدگی ذرات ماسه و کاهش فرسایش بادی می‌شوند و تاج گیاهان با ایجاد مانع در برابر باد، سرعت جریان هوا را در سطح زمین کاهش می‌دهد. بنابراین، در مناطقی که پوشش گیاهی از بین رفته یا بسیار تنک است، شرایط برای تحرک تپه‌ها فراهم می‌شود. نتایج تحلیل همبستگی پیکسلی بین شاخص NDVI و میزان جابه‌جایی تپه‌ها، ضریب همبستگی ۰/۵۱ را نشان داد. این مقدار گرچه متوسط است، اما از لحاظ آماری معنادار بوده و نشان می‌دهد که افزایش تراکم پوشش گیاهی با کاهش سرعت و جابه‌جایی تپه‌ها همراه است. این یافته با نتایج پژوهش‌های مشابه در مناطق ماسه‌ای ایران از جمله ریگ خوزستان (مقصودی و گنجائیان، ۲۰۲۵) هم‌خوانی دارد. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های مرکزی و جنوبی ریگ جازموریان که از تراکم پوشش گیاهی بسیار کمی برخوردارند، بیشترین تحرک ماسه‌ای را نشان می‌دهند. این مسئله ضرورت برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع طبیعی، احیای پوشش گیاهی و تثبیت زیستی تپه‌ها را دوچندان می‌کند.

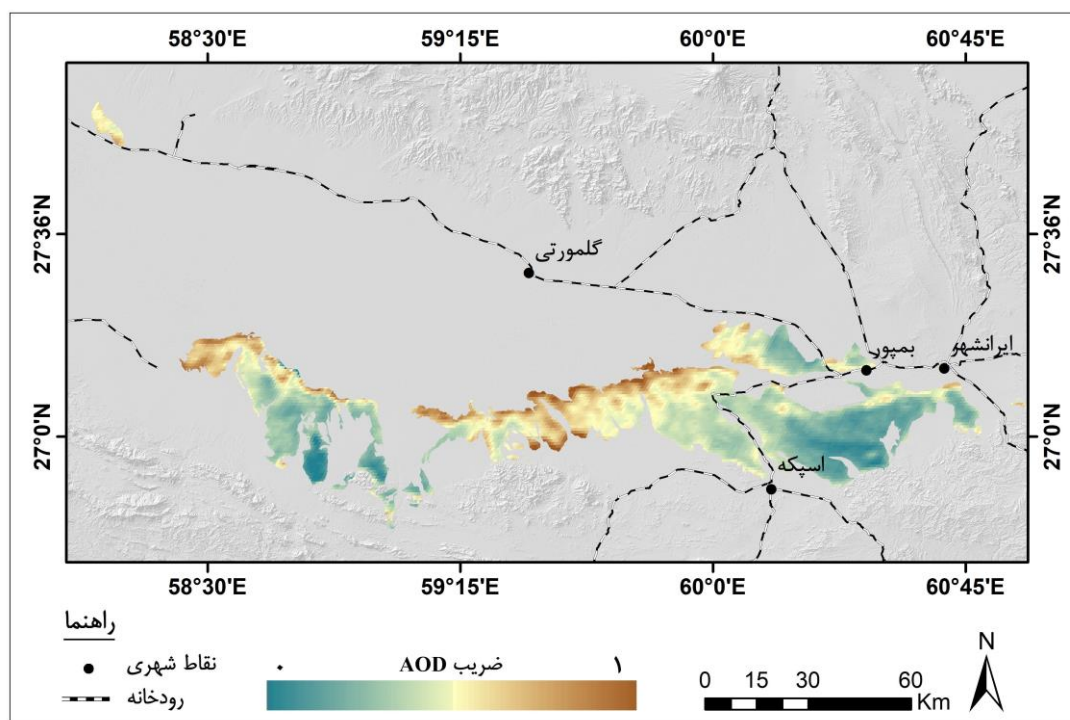


شکل (۱۰): نقشه ضریب NDVI ریگ جازموریان

Figure (10): NDVI map of Jazmorian erg

دارای تپه‌های فعال ماسه‌ای سهم قابل توجهی در پدیده گردوغبار منطقه‌ای دارند. تحلیل هم‌زمان شاخص‌های NDVI و AOD در ارتباط با جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای، بیانگر یک چرخه بازخوردی منفی میان پوشش گیاهی و فعالیت ماسه‌ای و یک بازخورد مثبت میان حرکت تپه‌ها و غلظت گردوغبار است. به عبارت دیگر، کاهش پوشش گیاهی باعث افزایش تحرک تپه‌ها می‌شود و این افزایش تحرک نیز با افزایش غلظت گردوغبار همراه است که خود می‌تواند اثرات منفی بیشتری بر پوشش گیاهی و زیست‌بوم منطقه داشته باشد. از منظر ژئومورفولوژی، پویایی بالای تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان، نتیجه تعامل میان انرژی باد، کمبود رطوبت، نبود پوشش گیاهی تثبیت‌کننده و ویژگی‌های زمین‌ساختی دشت است. بنابراین، شناخت این روابط نه تنها در درک فرایندهای شکل‌زایی بیابان‌ها اهمیت دارد، بلکه می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی، کنترل فرسایش بادی و کاهش پدیده گردوغبار در جنوب شرق ایران فراهم آورد.

- ارزیابی شاخص AOD ریگ جازموریان: برای تحلیل ارتباط بین فعالیت‌های ماسه‌ای و وضعیت گردوغبار منطقه، از داده‌های ماهواره مادیس و شاخص عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ استفاده شد (شکل ۱۱). نقشه‌های حاصل نشان می‌دهد که مقادیر بالای AOD عمدتاً در نواحی مرکزی و غربی ریگ جازموریان مشاهده می‌شود؛ این بخش‌ها همان مناطقی هستند که بیشترین میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در آن‌ها ثبت شده است. ضریب همبستگی محاسبه‌شده بین شاخص AOD و میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای برابر ۰/۵۶ بوده که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین افزایش فعالیت تپه‌ها و افزایش غلظت گردوغبار است. این امر بیانگر آن است که فرایندهای بادی فعال در منطقه نه تنها موجب جابه‌جایی ماسه‌ها می‌شوند، بلکه منبع اصلی تولید و انتقال ذرات معلق در جو نیز محسوب می‌گردند. نتایج حاضر با مطالعات انجام‌شده در سایر بیابان‌های ایران، از جمله ریگ خوزستان و دشت لوت تطابق دارد و نشان می‌دهد که مناطق



شکل (۱۱): نقشه ضریب AOD ریگ جازموریان

Figure (11): AOD map of Jazmuriya erg

نتیجه‌گیری

همین مسئله زمینه را برای حرکت تپه‌های ماسه‌ای فراهم کرده است. همچنین میزان غلظت گردوغبار در مناطق میانی ریگ جازموریان دارای ضریب بالاتری است و با توجه به اینکه در این مناطق، میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای بیشتر است، بین دینامیک تپه‌های ماسه‌ای و ضریب AOD، رابطه معنی‌داری وجود دارد. مجموع یافته‌های این پژوهش علاوه بر افزایش شناخت از پویایی ژئومورفولوژیکی منطقه، کاربردهایی در مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی محیطی و کنترل فرسایش بادی دارد. نتایج حاصل می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی، اجرای طرح‌های تثبیت ماسه‌های روان، توسعه پوشش گیاهی مقاوم به خشکی و طراحی سامانه‌های هشدار سریع گردوغبار باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی‌های زمانی، تغییرات آینده ریگزار شبیه‌سازی شود تا برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای حفاظت از منابع و کنترل فرایندهای بیابان‌زایی در منطقه جازموریان صورت گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل طرح پژوهشی بنیاد ملی علم ایران به شماره ۹۸۰۷۶۳۵ بوده است.

نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان داده است که ریگ جازموریان با وسعت حدود 4261 km^2 کیلومتر مربع، بخش زیادی از چاله جازموریان را در بر گرفته است و از جمله ریگزارهای بزرگ کشور محسوب می‌شود. این ریگزار تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی و توپوگرافی دارای اشکال متنوعی است، به‌طوری‌که براساس تقسیم‌بندی صورت گرفته در پژوهش حاضر، به ۱۲ شکل تقسیم شده است (شکل ۴). براساس نتایج حاصل، بخش زیادی از ریگ جازموریان را تپه‌های خطی مرکب، پوشش ماسه‌ای با ضخامت متوسط و تپه‌های ماسه‌ای خطی ساده را شامل می‌شود که به‌ترتیب $37/7\%$ ، $15/7\%$ و $13/5\%$ از وسعت ریگ جازموریان را در بر گرفته‌اند (جدول ۱). نتایج پژوهش حاضر نشان داده که حدود 85% از ریگ جازموریان دارای وضعیت فعالی است و نتایج ارزیابی حرکت نقاط نمونه نیز نشان داده است که تپه‌های ماسه‌ای ریگ جازموریان در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ بین ۲m تا ۴۷m حرکت داشته‌اند (شکل ۸). همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داده است که بین دینامیک تپه‌های ماسه‌ای با تراکم پوشش گیاهی و غلظت گردوغبار منطقه، ارتباط معناداری برقرار است. براساس نتایج حاصل از شاخص NDVI، میزان تراکم پوشش گیاهی در محدوده ریگ جازموریان بسیار کم است که

منابع

1. Abad, B., Salahi, B., Raispour, K., & Moradi, M. (2022). Combined Estimation of Nighttime Land Surface Temperature in Jazmourian Drainage Basin Using MODIS Sensor Data of Terra/Aqua Satellites. *Earth and Space Physics*, 48(1), 93-111. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.323427.1007318> [In Persian]
2. Boemke, B., Turki, I., Brull, C., & Lehmkuhl, F. (2023). Assessing complex aeolian dune field morphology and evolution with Sentinel-1 SAR imagery – Possibilities and limitations. *Aeolian Research*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2023.100876>
3. Chen, Y., Yizhaq, H., Mason, J.A., Zhang, X., & Xu, Z. (2021). Dune bistability identified by remote sensing in a semi-arid dune field of northern China. *Aeolian Research*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100751>
4. Daniell, J., & Hughes, M. (2007). The morphology of barchan-shaped sand banks from western Torres Strait, Northern Australia. *Sedimentary Geology*, 202, 638-652. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.07.007>
5. Diao, Y., Wang, C., Huang, J., Zhang, L., Hu, H., Bai, J., & Yang, C. (2025). Feasibility study on desert sand solidification using biomimetic mineralization method: Mechanical properties and wind erosion resistance. *Construction and Building Materials*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139995>
6. Fattahi, Y., Nazari-Saman, A., Abbasi, H.R., & Ahmadi, H. (2017). A comparative study of wind directions and sand dunes morphology of Jen erg. *Researches in Earth Sciences*, 8(1), 1-17. https://esrj.sbu.ac.ir/article_96161.html [In Persian]
7. Fryberger, S.G. (1979). Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (Ed.), *A Study of Global*

- Sand Seas. *Geological Survey Professional Paper*, 137-169.
<https://www.researchgate.net/publication/349216893>
8. Ganjaeian, H., Mohammadian, K., Javedani, M., & Safari Namivandi, M. (2023). Analysis of Desertification Potential of Yazd Province Using DVI Indicators. *Desert Management*, 11(2), 35-48. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2023.2004871.1419> [In Persian]
 9. Ganjaeian, H., Mohammadian, K., Nosrati, M., & Javedan, M. (2025). Assessing the status of Khuzestan Reg activity and its risks using Google Earth Engine. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 4(13), 1-22. <https://doi.org/10.22034/rsgi.2025.61672.1075> [In Persian]
 10. Ge, M., Li, F., Ma, J., Yu, F., & Cui, L. (2025). An automatic method for extracting sand dunes based on slope cost distance from digital elevation models. *Advances in Space Research*, 75(1), 248-263. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.034>
 11. Guan, C., Hasi, E., & Tang, K. (2025). Grain size characteristics of the reticulate dunes of the Hobq Desert. *Journal of Arid Environments*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105279>
 12. Hasani Dorabad, F., Mashhadi, N., & Keshtkar, A. (2023). Morphology, mobility and grain size characteristics in new sand dunes (Case study: young Erg of Abshirin). *Physical Geography Research*, 55(4), 123-145. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.361806.1007780> [In Persian]
 13. Hereher, M. (2018). Geomorphology and drift potential of major aeolian sand deposits in Egypt. *Geomorphology*, 304, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.041>
 14. Herzog, M., Schmitt, A., & Bubenzer, O. (2024). Reconstructing star dune dynamics using ground penetrating radar – How movement shapes complex surface structures. *Aeolian Research*, 67-69. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100920>
 15. Lancaster, N. (1995). The Geomorphology of Desert Dunes. *Routledge, London*, 290 P. <http://dx.doi.org/10.4324/9780203413128>
 16. Lancaster, N. (2009). Dune morphology and dynamics. In: Parsons A J, Abrahams AD (eds) *Geomorphology of desert environments*. Springer, 824 P. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9-18>
 17. Livingstone, I., Bristow, C., Bryant, R.G., Bullard, J., White, K., Wiggs, G.F.S., Baas, A.C.W., Bateman, M.D., & Thomas, D.S.G. (2010). The Namib Sand Sea Digital Database of aeolian dunes and key forcing variables. *Aeolian Research*, 2, 93-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.08.001>
 18. Lotfinasabasl, S., Khosroshahi, M., Saeedifar, Z., & Dargahian, F. (2019). Precipitation Trend Analysis and Drought Assessment of Jazmurian Basin Using Trend Analysis Methods and Optimized Drought Indices. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(4), 923-943. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.118624>
 19. Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Aeolian Geomorphology of Ergs and Dunefields in Iran. *Desert*, 30(1), 41-66. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.102461>
 20. Maghsoudi, M., Fathollahzadeh, M. and Ganjaeian, H. (2021). Monitoring changes in wind speed and their effect on the displacement of sand dunes in the Lut Desert. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30(118), 113-126. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246137> [In Persian]
 21. Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Classification and analysis of the morphological and dynamic status of sand dunes (Case study: Khuzestan Reg). *E.E.R.*, 15(2), 1-19. <http://dx.doi.org/10.61186/jeer.15.2.1>
 22. Maghsoudi, M., Ganjaeian, H., & Hoseini, S. (2018). Evaluating the Effectiveness of Supervised and Unsupervised Classification Methods in Monitoring Regs (Case Study: Jazmourian Reg). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 9(32), 81-92. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161472.html
 23. Maghsoudi, M., geravand, F., Abdinejad, B.R. & Pirani, P. (2020). Monitoring Changes in Sand Dunes by Analyzing Satellite Images and Wind Station Data (Case Study: Zahak Erg Region in the East of Sistan Plain). *Geography and Environmental Planning*, 31(3), 131-148. <https://doi.org/10.22108/gep.2020.123597.1317> [In Persian]
 24. Maghsoudi, M., Navidfard, A., & Mohammadian, A., (2017). The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data. *Natural Environment Change*, 3(1), 33-43. <https://doi.org/10.22059/jnec.2017.225011.62>
 25. Mahyou, H., Tychon, B., Balaghi, R., Mimouni, J., & Paul, R. (2010). Désertification des parcours arides au Maroc. *Tropicultura*, 28(2): 107-114. <https://www.researchgate.net/publication/46378957>
 26. Mashhadi, N. (2024). The Morphodynamics of Sand Dunes and Wind Patterns (Case Study: New and Young Arg in Southeast of Qom). *Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 317-338. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.76706.1227> [In Persian]
 27. Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghaysarian, S.S., & Ebrahimi, A. (2024). Identifying dust centers and analyzing the factors affecting their occurrence based on remote sensing data (Case study: Southwest Iran). *Geography and environmental hazards*, 13(4), 386-405. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.89088.1504> [In Persian]
 28. Rabbani, A., Mohseni, N., & Hossein-Zadeh, S. (2021). Studying the role of geomorphic processes in the morphology of semi-arid sand dunes. *Geography and Environmental Hazards*, 9(36), 105-93.

- <https://doi.org/10.22067/geoeoh.2021.68982.1021> [In Persian]
29. Safari Namivandi, M., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A., & Ebadinezhad, S. (2023). Evaluation of desertification risk potential using DVI model (Case study: northern regions of Semnan province). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 14(53), 1-17.
<https://doi.org/10.22034/jargs.2023.397791.1032> [In Persian]
 30. Silvestro, S., Achill Di, G., & Ori, G.G. (2010). Dune morphology, sand transport pathways and possible source areas in east Thaumasia Region (Mars). *Geomorphology*, 121, 84-97.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.019>
 31. Sun, W., & Gao, X. (2022). Geomorphology of sand dunes in the Taklamakan Desert based on ERA5 reanalysis data. *Arid Environments*, 207.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104848>
 32. Tao, M., Wang, J., Li, R., Chen, L., Xu, X., Wang, L., Tao, J., & Xiang, J. (2020). Characterization of Aerosol Type over East Asia by 4.4 km MISR Product: First Insight and General Performance. *JGR Atmospheres*, 125(13).
<https://doi.org/10.1029/2019JD031909>
 33. Van Kuik, N., De Vries, J., Schwarz, C., & Ruessink, G. (2022). Surface-area development of foredune trough blowouts and associated parabolic dunes quantified from time series of satellite imagery. *Aeolian Research*, 57.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100812>
 34. Yamani, M. (2015). The effect of converging winds on the morphology and settlement of sand dune areas around the desert plain. *Iranian Quaternary Quarterly*, 1(2), 112-99.
<https://doi.org/10.22034/irqua.2015.701857> [In Persian]

The Morphology and Morphodynamics of Aeolian Landforms in the Jazmurian Erg: An Analysis of Environmental Controls

Mehran Maghsoudi,^{1*} Hamid Ganjaeian²

Received: 03/10/2025

Accepted: 16/11/2025

Extended Abstract

Introduction: Sand dunes are distinctive features of arid landscapes, notable both for their tourism potential and the environmental hazards associated with their dynamic morphology. In Iran, sand dunes are widespread and cover extensive areas. Given their active morphodynamics, these dunes can pose significant risks to nearby infrastructure and land use, including agricultural areas and residential zones, many of which are situated in close proximity to dune fields. In recent years, sand dunes have been increasingly recognized as mobile elements of desert systems. Understanding their characteristics is essential to deciphering the complex processes that drive their activity and evolution. Despite the considerable extent of dunes across Iran's deserts, they remain inadequately studied, with a notable lack of comprehensive research on their morphological diversity and behavior. This gap underscores the need for detailed investigation into the morphology of Iran's sand dunes. The present study aims to address this by not only identifying and analyzing the dynamic state of dunes and the factors influencing them but also by proposing a localized classification framework tailored to specific ergs. Such a classification would enable systematic categorization of dunes within each sand sea. The Jazmurian Erg, one of the largest dune fields in Iran, was selected as the study area due to its considerable size and proximity to population centers such as Iranshahr and Bampur. Assessing the morphological and morphodynamic status of its dunes is therefore of considerable practical importance—an objective that this research seeks to fulfill.

Materials and Methods: This study employed multiple data sources, including MODIS and Landsat satellite imagery, Google Earth images, and statistical data on wind speed and direction. The primary analytical tools consisted of ArcGIS for spatial mapping, Google Earth Engine for generating vegetation density and dust concentration maps, and Google Earth for creating shapefiles and assessing sand dune dynamics. The research was conducted in three sequential stages: The precise boundaries of the Jazmurian Erg were delineated using Google Earth imagery. Following this delineation, a comprehensive morphometric analysis was conducted. Based on morphological characteristics, the erg was systematically classified into distinct dune types. To evaluate dune mobility, 81 sample points were strategically selected across the study area. Using time-series imagery from Google Earth and Landsat platforms, the displacement rates of individual dunes were quantified over a 15-year period (2005-2020). To investigate the relationship between dune dynamics and environmental conditions, vegetation density maps were generated using MODIS satellite data processed through Google Earth Engine, applying the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Additionally, dust concentration patterns were analyzed through Aerosol Optical Depth (AOD) index calculations derived from MODIS imagery spanning 2018-2023.

Results and Discussion: The Jazmurian Erg, spanning an area of 4,261 km², constitutes a significant geomorphic feature within the Jazmurian Basin. Classification of dune morphologies reveals that compound linear dunes are the dominant landform, covering 1,649 km² (37.7% of the total erg area). Additional extensive forms include sand sheets of medium thickness and simple linear dunes, occupying 669 km² (15.7%) and 577 km² (13.5%) of the erg, respectively. Displacement analysis conducted between 2005 and 2020 indicates dune movement ranging from 2 to 47 meters across the study area. The most significant migration rates (>40 meters) were observed in central, western, and certain eastern sectors of the erg, while remaining areas showed more modest displacement of less than 20 meters. This translates to an annual migration rate varying between 0.15 and approximately 3 meters, highlighting considerable spatial variation in dune activity across the Jazmurian Erg.

Conclusion: This study demonstrates that the Jazmurian Erg represents a significant geomorphological feature, covering an extensive portion of the Jazmurian Basin and ranking among Iran's largest sand dune systems. The erg exhibits considerable morphological diversity, with dune forms classified into 12 distinct types influenced by varying climatic and topographic conditions. Analysis confirms that the Jazmurian dunes maintain active dynamics, showing a significant correlation with environmental parameters, particularly vegetation density and dust concentration. The

1. Professor of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding Author); Email: maghsoud@ut.ac.ir

2. Ph. D of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran; Email: h.ganjaeian@ut.ac.ir

DOI: 10.22052/deej.2025.257208.1113

notably low NDVI values across the erg indicate sparse vegetation cover, creating conditions favorable for dune mobility. Furthermore, areas exhibiting higher aerosol optical depth (AOD) values, particularly in central sectors, correlate strongly with observed increases in dune displacement rates. The findings collectively indicate that environmental factors drive active dune dynamics within the Jazmurian Erg. Given the potential for these mobile sediments to generate dust sources and encroach upon agricultural lands and human infrastructure, the implementation of targeted stabilization measures is strongly recommended to mitigate environmental and socio-economic impacts.

Keywords: Sand dune dynamics, Sand Dune Morphology, Classification of Sand Dune.