

ارزیابی پویایی تپه‌های ماسه‌ای حاشیه پلایای دامغان (کویر حاج‌علی‌قلی) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و طبقه‌بندی شیء‌گرا

عباس‌علی افضلی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی محیطی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
مجتبی یمانی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
محمد شریفی‌کیا - دانشیار، گروه سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس
شیرین محمدخان - استادیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

چکیده

جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای تهدیدی دائمی برای زیرساخت‌های حمل و نقل، اراضی کشاورزی، و سکونتگاه‌های پیرامون پلایای دامغان است. با وجود پژوهش‌های انجام‌شده در این منطقه، با هدف منشأیابی رسوبات بادی، تحقیق حاضر دیدگاهی متفاوت برای ارزیابی مقادیر و جهت حرکت تپه‌های ماسه‌ای به‌وسیله سنجش تغییرات هم‌دوسی راداری و طبقه‌بندی شیء‌گرا ارائه می‌دهد. در این تحقیق، ضمن بررسی کتابخانه‌ای، از روش‌های دورسنجی و پیمایشی برای دستیابی به اهداف استفاده شده است. نخست داده‌های راداری ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ برای سنجش تغییر مقادیر هم‌دوسی و شناسایی تپه‌های فعال و تعیین واحد کاری تحلیل شد. با توجه به پراکنش نامنظم تپه‌های ماسه‌ای، واحد کاری به ۱۶ بلوک دارای یک تپه شاهد تقسیم شد. سپس، پردازش تصاویر Bird's eye و Geo eye با هدف استخراج جبهه بادپناه به‌عنوان محل استقرار تپه‌ها در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶ به‌وسیله طبقه‌بندی شیء‌گرا انجام گرفت. سپس، با استفاده از لایه‌های مستخرج، مقادیر جابه‌جایی توسط مدل بهینه‌شده گای استخراج و آزمون محاسبه شد. یافته‌ها مقادیر جابه‌جایی ۲۲/۴ متری، با آزمون ۱۳۵ درجه را در بازه زمانی سیزده‌ساله نشان می‌دهد. اعتبارسنجی یافته‌ها با خروجی تحلیل آماری جهت باد در همین بازه و مقایسه آن با خروجی پردازش‌ها بیانگر انتخاب صحیح قطعه شاهد بوده است.

واژگان کلیدی: آشکارسازی تغییرات، پلایای دامغان، فرسایش بادی، مخاطره طبیعی.

مقدمه

آسیب‌های ناشی از حرکت تپه‌های ماسه‌ای، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل محیطی و اجتماعی-اقتصادی، در مناطق بیابانی روند روزافزونی دارد (العلی و همکار، ۲۰۱۳: ۶۱). بسیاری از جوامع و سکونتگاه‌های حاشیه مناطق بیابانی، که در مرحله رشد و توسعه قرار دارند، اغلب تحت تأثیر خسارات ناشی از حرکت تپه‌های ماسه‌ای هستند (نوازور، ۲۰۱۳: ۹۴؛ بنلا و همکاران، ۲۰۰۳: ۷۴). این پدیده می‌تواند برای زیرساخت‌های این مناطق نیز زیان‌بار باشد (نیانگ، ۲۰۰۸: ۲۰۱؛ قنوشی، ۲۰۰۷: ۲۰۰؛ ساحره، ۲۰۰۸: ۱۳۷؛ ماهیو، ۲۰۱۰: ۱۰۸).

مطالعه فرسایش و فرایندهای بادی با کار بگنولد (۱۹۵۴) آغاز شد (واریس، ۲۰۱۲: ۴۱) و به طور کلی ورود بگنولد به این حوضه می‌تواند نقطه عطفی در مطالعه حرکت رسوبات بادی باشد و شاید به همین دلیل چاکرین (۱۹۹۶) پیشینه تاریخی آن را به سه دوره-قبل از دهه ۱۹۴۰ (ماقبل بگنولد)، ۱۹۴۰-۱۹۸۰ (دوره بگنولد)، و ۱۹۸۰ (پس از بگنولد)

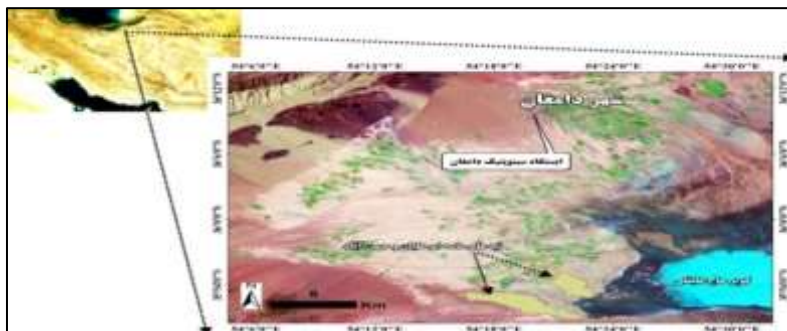
تقسیم می‌کند. پس از پیشرفت‌های چشم‌گیری که در رویکردهای آزمایشگاهی و فیزیکی به‌وقوع پیوست، هم‌زمان با آن، ابزارها و داده‌های سنجش از دور توانستند عناصر و نیروهای دخیل در فرسایش بادی را دقیق‌تر بررسی کنند. علاوه بر این، در روش‌ها و الگوریتم‌های تفسیر عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و همچنین ظهور سریع ژئومورفولوژی سیاره‌ای (سیارات غیر از زمین) تحول جدیدی پیش آمد. به‌طوری‌که توانستند از طریق جست‌وجو در سایر سیارات (به‌عنوان مثال، مأموریت ماژلان ۱۹۹۰ در سیارهٔ ونوس به‌منظور برداشت اطلاعاتی در مورد فرایندها و اشکال بادی) به قیاس‌ها و مشابهت‌ها دست یابند و از این طریق تحولات جدیدی در حوزهٔ ژئومورفولوژی و فرایندهای بادی به‌دست آمد.

از آنجا که دانش به‌دست‌آمده از طریق بررسی ویژگی‌های مناطق بیابانی برای برنامه‌ریزی سکونتگاه‌ها و پیشرفت ضروری است، رویکردهای یکپارچه با استفاده از مجموعه داده‌های سنجش از دور در طیف وسیعی از مقیاس‌های مکانی و زمانی کاربرد پیدا می‌کند. زیرا این رویکردها برای افزایش دقت در رصد زمین ضرورتی انکارناپذیر است (عبدالکریم و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۱۰). در این زمینه تکنیک سنجش از دور نیز به صورت گسترده استفاده شد (مینگو، ۲۰۰۱: ۱۳۱؛ الهادی و همکاران، ۲۰۰۹: ۶۳۵). زیرا مشاهدهٔ زمین از فضا برای نظارت بر پویایی سطح زمین و کاوش در ویژگی‌های ژئومورفیک و زمین‌شناسی نزدیک به سطح موضوعی کلیدی است (عبدالکریم و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۳۱). تاکنون، با استفاده از داده‌های رایگان لندست، مطالعات زیادی برای طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای انجام گرفته است (لیو هاجینگ، ۲۰۰۸: ۶۲۹). قابلیت‌های تصاویر Quick Bird، ASTER، و LiDAR برای مطالعهٔ منابع تولید ماسه، شناخت مسیر حرکت، و مورفومتری و مهاجرت آن‌ها بسیار زیاد است (بورک و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۵۰؛ بانبزر و بولتون، ۲۰۰۸: ۲۲۳؛ بلراد و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۵۳۶؛ هس، ۲۰۰۹: ۴۲۸؛ هاگنهورتز و همکار، ۲۰۱۰: ۹۸۸). در بیشتر مطالعات انجام‌گرفته از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی پایین و برخی داده‌ها با دقت مکانی بالا برای استخراج خودکار و نیمه‌خودکار تپه‌های ماسه‌ای بهره برده شده است (قدیری و همکاران، ۲۰۱۲: ۵۴؛ هرمس و همکاران، ۲۰۱۲: ۵۳). ناگفته نماند، با وجود دقت مکانی بالا، هزینهٔ تهیهٔ این تصاویر نیز زیاد است. از این رو، برخی پژوهشگران تمایل دارند از تصاویر ارائه‌شده توسط گوگل و بینگ استفاده کنند (داکیر و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۳؛ ونارد و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۰؛ تائوبنوک و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۱۸). اما با پرتاب دو ماهوارهٔ راداری سنجش از دور ERS در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۵، ارزش تصاویر همدوس رادار با گشودگی مصنوعی InSAR، که توسط پردازش جفت تصویر SAR محاسبه می‌شود، شناخته شد. این تصاویر به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی سودمند در زمینهٔ مطالعات محیطی (از جمله پدیده‌های پویا همچون لندفرم‌های ناشی از مورفودینامیک باد) مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفت (ماسونت و فیگل، ۱۹۹۸). تلاش‌های صورت‌گرفته توسط محققان با هدف ارزیابی پویایی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از داده‌های راداری و تکنیک تداخل سنجی تفاضلی و سنجش همدوسی بازتاب راداری شامل پژوهش بودارت و همکاران (۲۰۱۰)، کلوسان و همکاران (۲۰۱۷)، هاویوی و همکاران (۲۰۱۸)، جابر و همکاران (۲۰۱۸)، آبا و همکاران (۲۰۱۹)، عبدالکریم و همکاران (۲۰۲۰)، و مانزونی و همکاران (۲۰۲۱) قابل ذکر است. در ایران نیز در غالب مطالعات صورت‌گرفته در منطقهٔ بیابانی همچون حاشیهٔ پلائیای حاج‌علی‌قلی در دشت دامغان به بررسی و ارزیابی تغییرات در دوره‌های بلندمدت مبادرت شده که عمدتاً ماهیتی از جنس منشأیابی رسوبات داشته‌اند. برای نمونه، می‌توان به پژوهش اختصاصی (۱۳۸۵)، احمدی و همکاران (۱۳۸۰)، فرجی (۱۳۸۸)، مقصودی و همکاران (۱۳۹۰)، و پریمی و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد. عطامرادی (۱۳۷۸)، زهتابیان و همکاران (۱۳۸۲)، علوی‌پناه و همکاران (۱۳۸۳)، و مرتضایی فریزه‌ندی و شهبازی (۱۳۹۰) نیز در پژوهش‌هایشان با استفاده از داده‌های دورسنجی چندطیفی و عملیات صحرایی به ارزیابی و طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای پرداخته‌اند.

هدف از این تحقیق به‌کارگیری داده‌های سری زمانی Sentinel-1 IW SAR در منطقه مورد بررسی برای تشخیص تغییرات سطحی رخ داده در کوتاه‌مدت ناشی از فعالیت مورفودینامیکی باد است. همچنین، نگارندگان تصمیم دارند میزان اثربخشی کاربرد توأمان داده‌های راداری و اپتیکی و همچنین مدل‌های طبقه‌بندی شیء‌گرا را در آشکارسازی وقایع و تغییرات مورفولوژیکی سطوح و فرم‌های ماسه‌ای آزمون کنند. از همین رو در پژوهش حاضر برای شناخت مورفودینامیک باد و ارزیابی جهت و مقادیر جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای به‌مثابه پدیده پویای مورفولوژیک قرار است در قدم اول با استفاده از داده‌های راداری^۱ IW سنتینل ۱ با قدرت تفکیک مکانی کمتر از پنزده متر و تکنیک CCD اشکال و سطوح پویا و غیرپویای ماسه‌ای شناسایی شود. در گام بعدی نیز نگارندگان مصمم‌اند پس از تعیین واحدهای کاری، با بهره‌گیری از طبقه‌بندی نیمه‌خودکار شیء‌گرا بر پایه پردازش تصاویر اپتیک ماهواره‌ای Bird's eye و Geo eye (با قدرت تفکیک کمتر از ۱ متر) به طبقه‌بندی و استخراج فرم‌های ماسه‌ای و ارزیابی مقادیر و راستای جابه‌جایی‌ها اقدام کنند تا بتوانند به ابعاد تحرک تپه‌های ماسه‌ای دست یابند.

محدوده مورد مطالعه

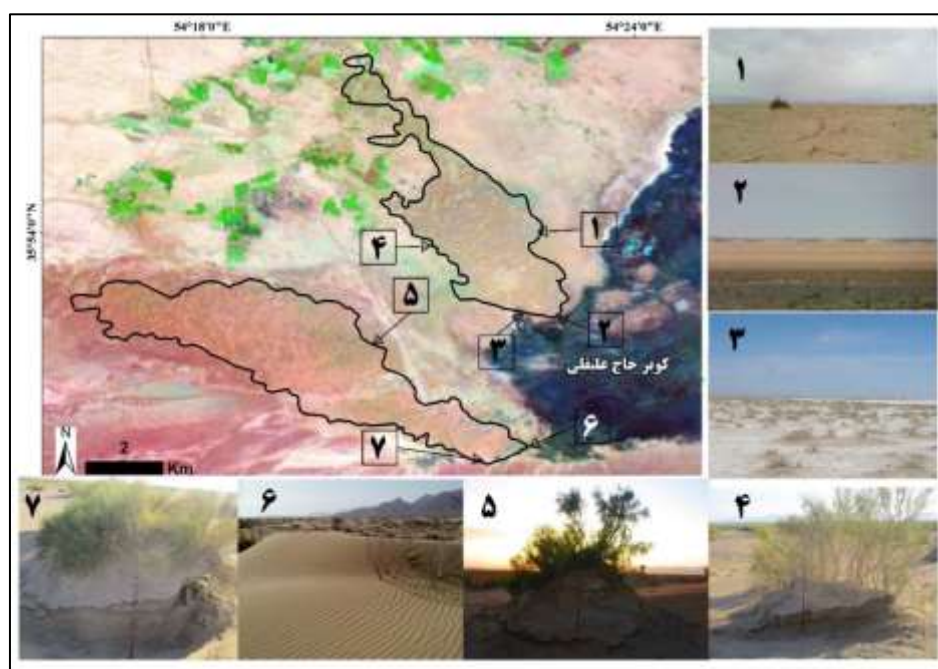
منطقه مورد بررسی در مختصات جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۴ و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ تا ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این محدوده از نظر تقسیمات هیدرولوژیکی نیز در حوضه آبریز دشت کویر قرار گرفته است. چاله دامغان از منظر ژئومورفولوژیکی یک واحد پیکرشناسی وسیع و نسبتاً همواری است که گردنه‌های کم‌ارتفاع و وسیعی ارتباط پلایای دامغان را در مرکز با دشت‌های پیرامون آن برقرار می‌کند. آب‌های سطحی و زیرزمینی در این گستره با شیب ملایمی به سمت پلایای دامغان در بخش جنوبی منتهی می‌شوند. تبخیر شدید این آب‌ها، به‌ویژه در فصل گرم، محدوده وسیعی از مرکز و شمال دشت را به شورزار تبدیل کرده است. منطقه دارای اقلیم بیابانی گرم و خشک و میانگین بارندگی آن حدود ۱۰۰ میلی‌متر در سال است. با توجه به شرایط ذکرشده، منطقه مورد مطالعه به دلیل سرشت بیابانی مستعد تسلط فرایندهای مورفودینامیک بادی است. با حرکت از حاشیة این دشت به سمت جنوب و مرکز (پلایای دامغان)، تأثیر حرکت ماه‌های بادی بر سکونتگاه‌ها و اراضی زراعی روند افزایشی پیدا کرده و به همان نسبت تلاش ساکنان برای مهار و کنترل تأثیرات نامطلوب آن بیشتر می‌شود. یکی از این اقدامات، احداث دیواره‌هایی کشیده و عمود بر جهت وزش باد غالب است که در اصطلاح محلی به آن «دیوار باد» می‌گویند.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت توده‌های ماسه‌ای در غرب پلایای دامغان

مواد و روش‌ها

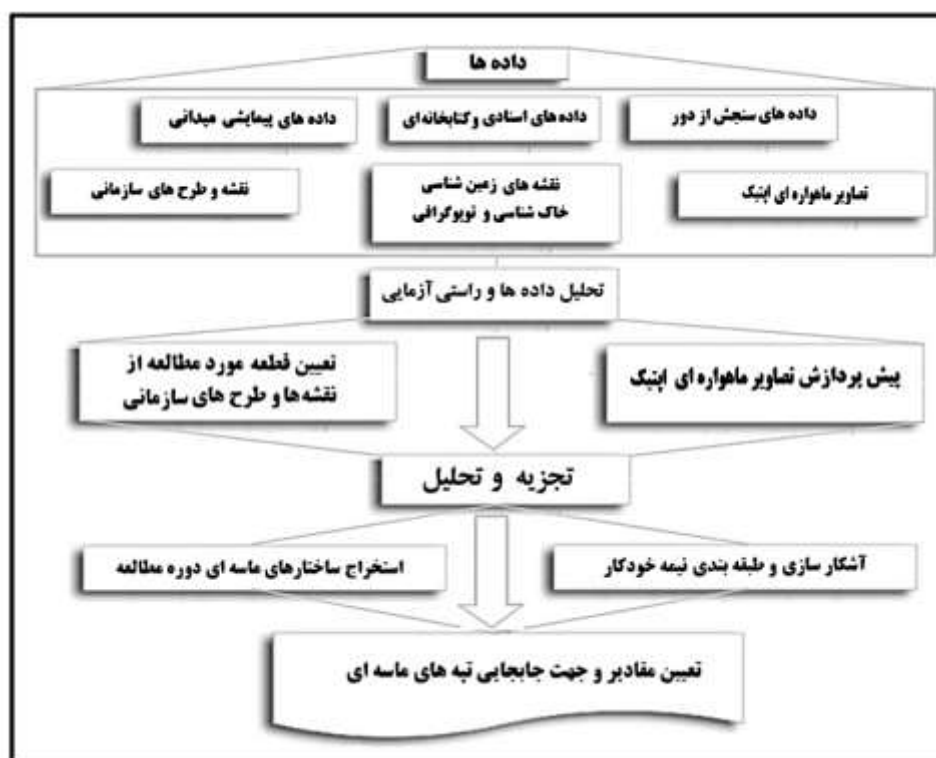
هدف کلی در پژوهش پیش رو بررسی تحرک تپه‌های ماسه‌ای به‌عنوان بخشی از مخاطرات طبیعی فعال در منطقه و ارزیابی مقدار و دامنه تغییرات زمانی و مکانی آن‌هاست. روش پژوهش کتابخانه‌ای، دورسنجی، و پیمایشی است. اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس دو مفهوم قطعه‌بندی و طبقه‌بندی استوار است. در ابتدا براساس داده‌ها و اطلاعات موجود از جمله داده‌های کتابخانه‌ای و اسنادی و نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و نیز بررسی‌های میدانی، عرصه مورد مطالعه و بخش‌های پیرامونی بررسی شد. سپس، بر اساس یافته‌ها، نقشه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی و ژئومورفولوژی تهیه شد. در مرحله بعد بر پایه نقشه‌های تهیه و اقتباس شده و همچنین برداشت‌های میدانی حدود گسترش لندفرم‌های ماسه‌ای و همجواری آن‌ها با چشم‌اندازهای پیرامونی تعیین حدود شده است (شکل‌های ۲ و ۴).



شکل ۲. بررسی میدانی حدود لندفرم‌های ماسه‌ای برای تهیه نقشه‌ها

در مرحله بعد به‌منظور تعیین واحدهای کاری، با استفاده از تکنیک ^۱CCD با کمک تصاویر راداری Sentinel-1 (در طول موج C و در حالت IW) مبادرت به آشکارسازی بخش‌های فعال و غیرفعال فرم‌های ماسه‌ای شد. از دو تداخل‌نگار راداری (مقدم و مؤخر) مربوط به دو تاریخ ۲۰۱۷/۰۵/۱۴ و ۲۰۱۸/۰۳/۲۲ برای استخراج هم‌دوسی استفاده شد (شکل ۵). زیرا اساس پردازش تصاویر راداری و استخراج تداخل‌نگار اندازه‌گیری اختلاف فاز امواج تابیده‌شده از سنجنده و بازتاب‌شده از سطح بین تصاویر مقدم و مؤخر است. این تکنیک حدوث تغییرات ارتفاعی را در سطح زمین آشکار می‌کند.

1. Coherency Change Detection



شکل ۳. نمودار مفهومی فرایند پژوهش

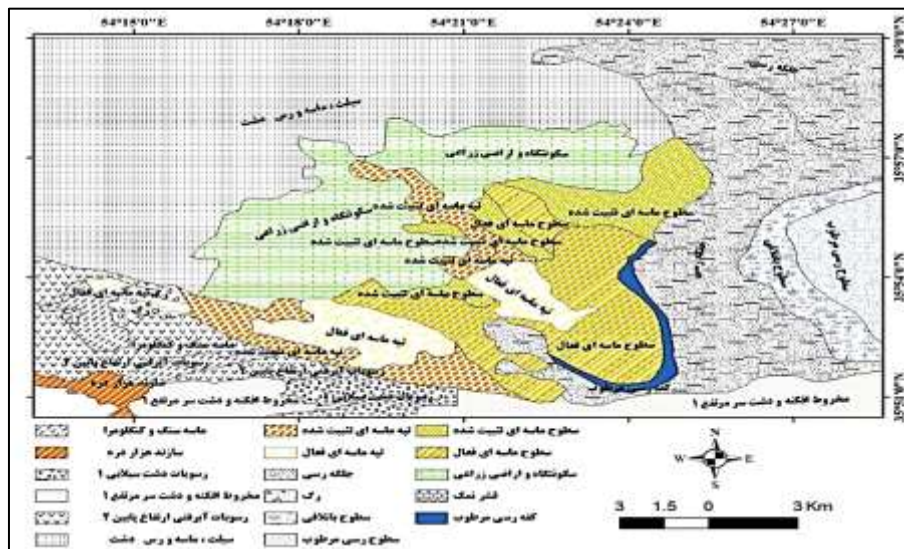
با مشخص شدن واحدهای کاری، تشخیص و استخراج خودکار تپه‌های ماسه‌ای هدف‌گذاری شد. به این منظور، روش طبقه‌بندی شیء‌گرا از تکنیک سلسله‌مراتبی پایین به بالا و طبقه‌بندی نزولی با استفاده از تکنیک عرصه در حال رشد استفاده شد (شکل ۶). همچنین، پس از استخراج تپه‌های ماسه‌ای، با بهره‌گیری از طبقه‌بندی شیء‌گرا، مقادیر و جهت جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای نیز با استفاده از مدل بهینه‌شده گای (۱۹۹۵) (لوین و بندور، ۲۰۰۴) (رابطه ۳) استخراج و گلماسه‌های مربوطه ترسیم شد. تحلیل و ترسیم گلبادهای مربوط به آمار وزش باد ایستگاه سینوپتیک دامغان (نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه) (شکل ۱) در دوره آماری ۱۳۸۴-۱۳۹۶ نیز با هدف راستی‌آزمایی یافته‌های گام قبل انجام گرفت.

تعیین واحدهای کاری

داده‌های مورد استفاده در این بخش مشتمل بر تصاویر راداری سری زمانی مقدم ۱۴/۰۵/۲۰۱۷ و مؤخر ۲۲/۰۳/۲۰۱۸ مربوط به سنجنده Sentinel-1 است. اساس ایده در تکنیک CCD بر این حقیقت استوار است که در مناطق مشخص و برای زمانی معلوم همه تغییرات ایجادشده در یک چشم‌انداز می‌تواند با استفاده از داده‌های راداری SLC^۱ و با استخراج اطلاعات و مقادیر همدوسی آشکارسازی شود. توضیح اینکه در سیستم‌های راداری اختلاف فاز بین پالس‌های ارسالی و برگشتی همراه با دامنه سیگنال برگشتی برای هر پیکسل تصویر SAR ثبت می‌شود. بنابراین، مجموعه داده شامل اختلاف فاز و دامنه پالس به صورت SLC ارائه می‌شود و به همین دلیل برای محاسبه اختلاف فاز لازم است حداقل یک زوج تصویر SLC از یک منطقه موجود باشد (ماتر، ۲۰۰۵: ۲۵۱). این تکنیک براساس تصاویر همدوس راداری بوده و

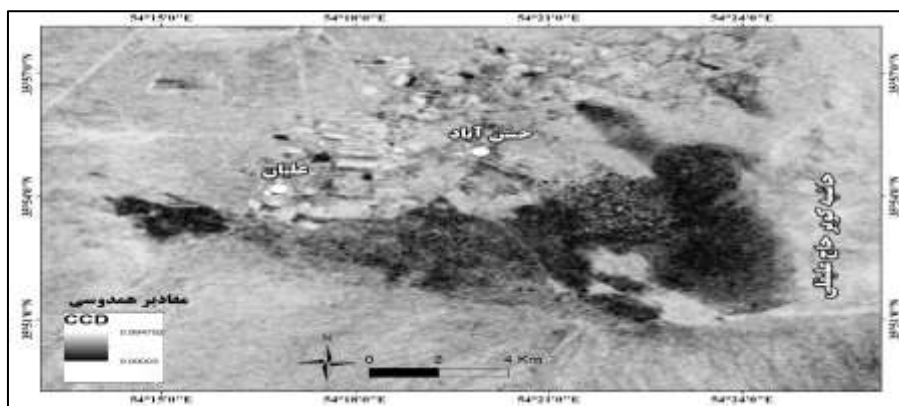
1. Single Look Complex

موسوم به CCD یا آشکارسازی تغییرات با استفاده از همدوسی است (کلوزن و همکار، ۲۰۱۷: ۱۵۶-۱۵۷). در تکنیک CCD، فاز زوج تصویر SAR با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری متداخل می‌شود. با این روش حتی تغییرات جزئی و اندک در مؤلفه‌های توپوگرافی سطح لندفرم در منطقه برداشت تصویر می‌تواند تشخیص داده شود.



شکل ۴. سطوح کاربری و پهنه‌های لندفرمی در حاشیه پلایا و دشت دامغان

برای تشخیص اینکه در منطقه مورد نظر تغییر رخ داده است یا نه، دو تصویر از یک سطح و زاویه فرود مشابه ولی زمان متفاوت برداشت شده است. مقادیر همدوسی (در بازه ۰-۱) از عدد صفر (کمترین همدوسی و بیشترین تغییر) تا یک (بیشترین همدوسی و کمترین تغییر) متغیر است. جایی که تغییر رخ نداده باشد مقادیر (همدوسی) کمترین تغییر را خواهد داشت. ولی زمانی که پیکسل‌ها متفاوت باشند بیانگر رخداد تغییر است. به بیان دیگر، سلول‌هایی با مقادیر همدوسی بالا نماد عوارض غیرفعال و غیرپویا (همچون تپه‌های تثبیت‌شده) و سلول‌های دارای همدوسی پایین نمایانگر عوارض و لندفرم‌های پویا و دینامیک (مثل تپه‌ها و لندفرم‌های بادی فعال) خواهند بود (شکل ۵).

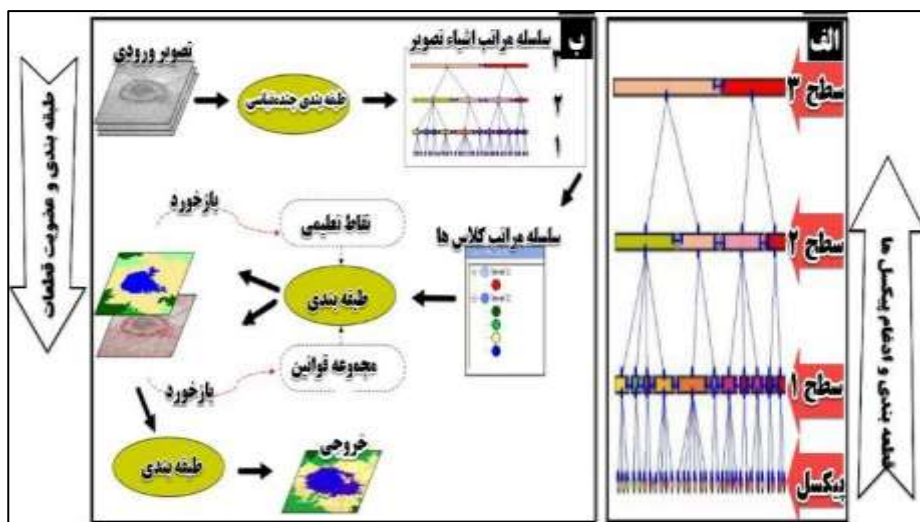


شکل ۵. پهنه‌بندی مقادیر همدوسی و آشکارسازی تپه‌های ماسه‌ای فعال

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در پژوهش

۲۰۱۷-۰۵-۱۴	داده‌های ماهواره سنتینل ۱	تصاویر راداری	داده‌های دورسنجی
۲۰۱۸-۰۳-۲۲	تصویر ماهواره Bird,s eye	تصاویر اپتیک	
۲۰۰۳	تصویر ماهواره‌ای Geo eye		
۲۰۱۶	تصویر ماهواره‌ای لندست ۸	نقشه‌ها	داده‌های اسنادی و سازمانی
۲۰۱۹-۰۶-۲۴	زمین‌شناسی و خاک‌شناسی	طرح‌ها	
-	بیابان‌زدایی	داده‌های اقلیمی	پیمایش
۱۳۹۹-۱۳۴۸	پارامترهای جهت و مدت باد	برداشت GPS	
۱۳۸۴-۱۳۹۶	ارزیابی صحت نقشه ژئومورفولوژی		

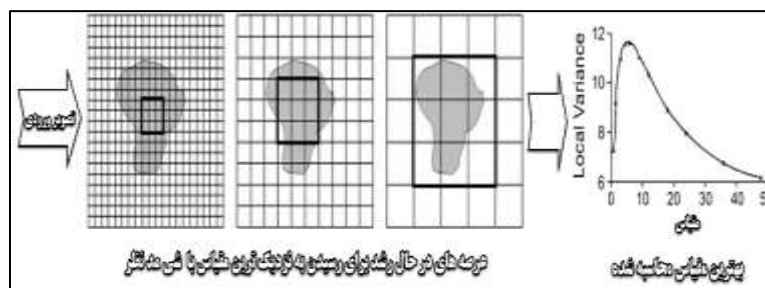
پس از شناسایی با مناطق پویا و طبقه‌بندی آن‌ها، قطعه‌ای با ابعاد $600 * 600$ متر جانمایی شد (شکل ۱۵). به‌منظور برآورد میزان جابه‌جایی افقی تپه‌های فعال، داده‌های ماهواره‌ای با دقت مکانی بالا مشتمل بر تصاویر Bird,s eye و Geo eye در دو مقطع زمانی ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶ تهیه و تصحیحات رادیومتریک و هندسی بر روی آن‌ها اعمال شد. عمل بارزسازی تصاویر با استفاده از مدل سوپل^۱ انجام گرفت (شکل‌های ۹ و ۱۰). بر پایه این روش، دامنه‌های خلاف جهت باد، که از نظر بازتاب امواج الکترومغناطیس دارای مقادیر بیشتر با قابلیت تشخیص از بخش‌های دیگر تپه‌ها و پهنه‌های ماسه‌ای مابین آن‌ها بودند، به‌عنوان شاخص قابل سنجش در ارزیابی میزان و الگوی تحرک اشکال ماسه‌ای آشکارسازی شد.



شکل ۶. نمودار مفهومی فرایند سلسله‌مراتبی قطعه‌بندی و طبقه‌بندی. الف) فرایند ادغام پیکسل‌های همگن و تبدیل به عناصر تصویر روند پایین به بالا؛ ب) عضویت قطعات به کلاس‌های مختلف اشیا روند بالا به پایین

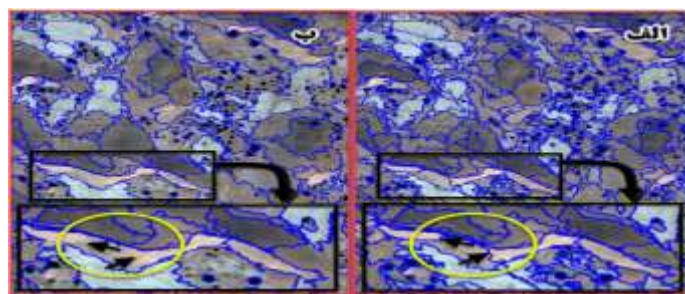
قطعه‌بندی

قطعه‌بندی یک روش طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی از پایین به بالا (شکل ۶- الف) با تکنیک عرصه در حال رشد^۱ است (ادغام پیکسل‌ها). فرایند اجرای این طبقه‌بندی از سطح پیکسل آغاز می‌شود. اساس روش طبقه‌بندی (شکل‌های ۶ و ۷)، ادغام پیکسل‌های همگن، و تبدیل به عناصر تصویر به منظور جداسازی از قطعات ناهمگن مجاور است (اسکای، ۲۰۰۲: ۲). درجه ناهمگنی درون یک شیء- تصویر توسط اندازه‌گیری مفهومی به نام «پارامتر مقیاس» کنترل می‌شود (دراگوت و همکاران، ۲۰۱۰: ۸۵۹).



شکل ۷. روش واریانس محلی (اقتباس از دراگوت و همکاران، ۲۰۱۱)

در بسیاری از مراحل بعدی، اشیای کوچک‌تر تصویر ادغام و به اشیای بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. اگر کوچک‌ترین رشد (محدوده رشد)، بر اساس مقیاس، به حد آستانه برسد، فرایند بررسی و ادغام متوقف خواهد شد. به بیان دیگر، پارامتر مقیاس مشخص‌کننده حداکثر همگنی ارزش پیکسل‌های همجوار به منظور استخراج اجزای تصویر است. و در صورتی که میزان پارامتر مقیاس افزایش یابد، دامنه جست‌وجو افزایش می‌یابد و پیکسل‌های همجوار نیز که نزدیک به مقادیر تشکیل‌دهنده یک شیء یا یک فرماند در این طبقه‌بندی جای خواهند گرفت (شکل ۸).



شکل ۸. تأثیر تغییر پارامتر مقیاس در ادغام طبقات کوچک‌تر و آشکارسازی فرم‌ها: الف) عدد مقیاس ۶۰، ب) عدد مقیاس ۱۰۰

اگرچه طبقه‌بندی یک تصویر دارای اشیای مختلف گامی اساسی در تکنیک طبقه‌بندی شیء‌گراست، در حال حاضر، یک روش قطعی برای انتخاب مقیاس مناسب برای طبقه‌بندی وجود ندارد. در عین حال، ابزاری به نام برآورد پارامتر مقیاس (ESP)^۲ وجود دارد که بر پایه ایده واریانس محلی (LV)^۳ استوار است (شکل ۷). یعنی این ابزار ناهمگنی شیء را در یک چشم‌انداز ملاک عمل قرار می‌دهد و می‌تواند در تعیین بهترین مقیاس برای طبقه‌بندی تصویر

1. Region Growing
2. Estimation of Scale Parameter
3. Local Variance

به‌کار رود (شکل ۸- الف و ب). ابزار ESP با رویکردی از پایین به بالا، اشیای موجود در تصویر را در سطح مقیاس چندگانه تولید می‌کند و واریانس محلی را برای هر مقیاس محاسبه می‌نماید (دراگوت و همکاران، ۲۰۱۰: ۸۵۹؛ دراگوت و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۶۳).

طبقه‌بندی

مرحله دوم شامل طبقه‌بندی شیء‌گرا بر پایه خروجی فرایند قطعه‌بندی استوار است. نتایج حاصل از قطعه‌بندی در این مرحله با هدف طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی چندسطحی بالا به پایین (شکل ۶- ب) با استفاده از مفهوم فازی لجیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش فازی لجیک بدین سبب انتخاب شد که این روش به قطعات ایجادشده اجازه می‌دهد تا به عضویت بیش از یک کلاس دربیایند (شاکلفورد، ۲۰۰۳: ۱۹۲). به‌علاوه، این روش امکان ادغام فرضیات تقریبی پارامترها و ارزیابی نهایی از طریق ترکیب آن‌ها را فراهم می‌کند. مجموعه‌های فازی کلاس‌هایی با نمرات و ارزش‌های پیوسته از میزان عضویت در یک کلاس هستند (یاگر، ۱۹۸۷: ۲). برای ایجاد قوانین فازی پیشرفته، مجموعه‌های فازی می‌توانند با هم ترکیب شوند. این ترکیب مقدار فازی را که از دسته‌های فازی دیگر به‌دست آمده مجدداً بررسی می‌کند. عملگرهای لجیک «یا»، «و» و «نه» هستند (بنز و همکاران، ۲۰۰۴: ۲۴۱) که به‌منظور افزایش احتمال تعلق اعضا به کلاس‌ها از عملگرهای حداقل و حداکثر نیز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، اگرچه سطوح ماسه‌ای مابین تپه‌های ماسه‌ای و دامنه‌های پشت به باد آن‌ها از نظر بازتاب طیفی مقادیر نزدیک به یکدیگر را دارند، بر اساس مقادیر نسبت فشردگی (نسبت طول به عرض) در یک کلاس قرار نمی‌گیرند. بنابراین، در این پژوهش، طبقه‌بندی عمدتاً بر پایه شکل (پلان) عوارض انجام گرفت. یعنی اطلاعات مفهومی و سلسله‌مراتبی و چندسطحی و طیفی با هدف پشتیبانی از صحت طبقه‌بندی استفاده شد (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌ها و قوانین استفاده‌شده برای ایجاد قوانین طبقه‌بندی و استخراج اجزا و عناصر مورد نظر از درون تصویر

ماهواره‌ای در نرم‌افزار eCognition

قوانین و ویژگی‌ها		
هندسی	سلسله‌مراتب	طیفی
۱. مساحت، ۲. نسبت طول و عرض	مقادیر فاکتور مقیاس	انعکاس یا درخشندگی

یافته‌های پژوهش

استخراج اشکال ماسه‌ای

آشکارسازی تصاویر ماهواره‌ای قدم اول برای آماده‌سازی تصویر جهت استخراج عناصر تصویر از جمله تپه‌های ماسه‌ای است. آشکارسازی تصویر تکنیکی است که در زمینه پردازش تصویر ماهواره‌ای برای بهبود تجسم ویژگی‌ها مورد نیاز است و هدف از آشکارسازی در این پژوهش ایجاد تمایز طیفی در اجزای مختلف یک تپه ماسه‌ای (مثل دامنه پشت به باد) جهت ایجاد تمایز قابل تشخیص هندسی توسط الگوریتم شیء‌گرا بین آن جزء با دیگر اجزاست. با توجه به اهمیت جبهه پشت به باد، در فرایند شناسایی جابه‌جایی و حرکت تپه‌ماسه‌ای و ضریب فشردگی کمتر آن نسبت به بخش‌های دیگر یک تپه‌ماسه‌ای (شکل ۱۳) به‌منظور آشکارسازی از روش سوبل^۱ به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از تکنیک آشکارسازی

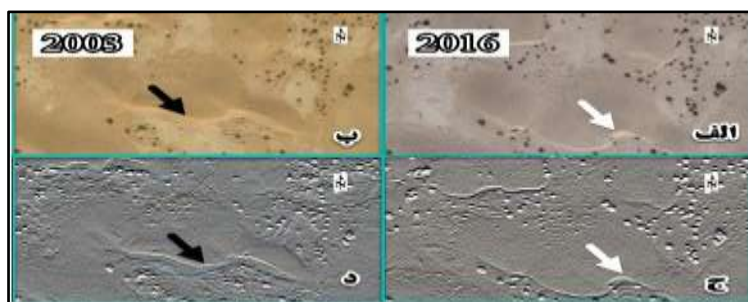
1. Sobel Edge Enhancement

لبه^۱ استفاده شد. شیوه یادشده با استفاده از مقادیر رقومی پیکسل (DN)^۲ و جست‌وجوی فراوانی بیشترین ناپیوستگی (شکل ۹) مرزهای روشن‌تر را از محیط‌ها یا عناصر مجاور متمایز می‌کند. فیلتر سوبل بر روی دو تصویر ماهواره‌ای Bird,s eye مربوط به سال ۲۰۰۳ و تصویر Geo eye مربوط به سال ۲۰۱۶ در محیط نرم‌افزار Envi اعمال شد.

		الف		
DN		-1	0	1
		-2	0	2
		-1	0	1
		ب		
DN		1	2	1
		0	0	0
		-1	-2	-1

شکل ۹. نحوه آرایش سطری (الف) و ستونی (ب) در فیلتر سوبل و آشکارسازی روشن‌ترین مرز (اقتباس از دیوید، ۲۰۱۵)

خروجی حاصل از اعمال این فیلتر تصویری است که در آن جبهه بادپناه تپه‌ماسه‌ای با وضوح رادیومتریک از سطوح ماسه‌ای اطراف خود مشخص شده است (شکل ۱۰).



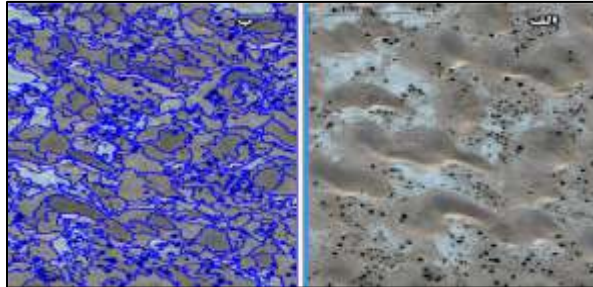
شکل ۱۰. نتیجه اعمال فیلتر سوبل بر روی تصاویر ماهواره‌ای ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶ (الف و ب: قبل از اعمال فیلتر، ج و د: پس از اعمال فیلتر)

تشخیص و استخراج تپه‌های ماسه‌ای

برای تشخیص خودکار لبه‌ها از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا استفاده شد. در طبقه‌بندی شیء‌گرا، علاوه بر استفاده از ارزش‌های رادیومتریک، می‌توان کلاس‌هایی تشکیل داد که بر اساس هندسه و عناصر مؤثر در تشخیص آن شکل می‌گیرد. در این طبقه‌بندی، فقط به جای ارزش‌گذاری بر روی پیکسل‌ها (به‌طور منفرد و مستقل) به الگوی فضایی اشیاء و فرم‌ها (که از کنار هم قرارگیری پیکسل‌ها به‌وجود می‌آیند) هم توجه می‌شود. به همین دلیل، تشکیل قطعات اولیه با استفاده از فاکتور مقیاس ۱۰۰ (شکل ۵-ب) انجام گرفت. زیرا فاکتور مقیاس تعیین‌کننده حداکثر عدم تجانس در تفکیک

1. Edge Enhancement
2. Digital Number

اشکال است (شکل ۱۱). پس از تعیین قطعات، از مقادیر و ارزش‌های طیفی، مورفولوژیکی و هندسی نیز به‌منظور بالابردن دقت طبقه‌بندی استفاده شد که به این منظور مجموعه‌ای از قوانین طیفی و هندسی (جدول ۲) ایجاد و اجرا شد.

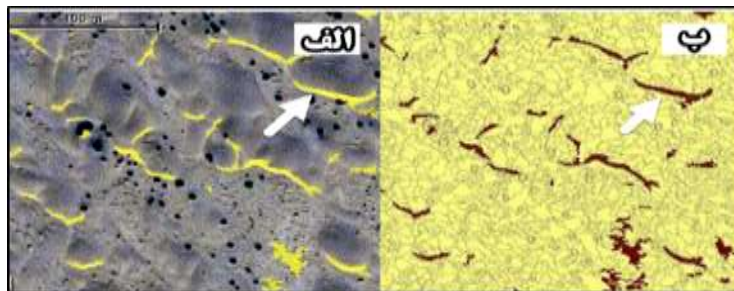


شکل ۱۱. قطعه‌بندی تصویر ماهواره‌ای به‌منظور استخراج قطعات متجانس با فاکتور مقیاس ۱۰۰: الف) قبل از قطعه‌بندی، ب)

پس از عملیات قطعه‌بندی

قانون‌های مورد استفاده عبارت‌اند از میزان روشنایی^۱ و فشردگی^۲. نخست با تحلیل مقادیر میانگین حد آستانه روشنایی با مقدار ۱۶۵ و الگوی کلی دامنه‌های پشت به باد تپه‌های ماسه‌ای که مقادیر بیشتری از انعکاس را داشتند به‌عنوان لایه اول ایجاد شد (شکل ۱۲). در این رابطه، ناهمگونی طیفی یک شیء - تصویر به‌عنوان مجموع انحرافات استاندارد از مقادیر طیفی σ_k هر لایه ضرب در وزن همان لایه (w_k) محاسبه شده است (رابطه ۱).

$$h = \sum_{k=1}^n W_k \cdot \sigma_k \quad \text{رابطه (۱)}$$

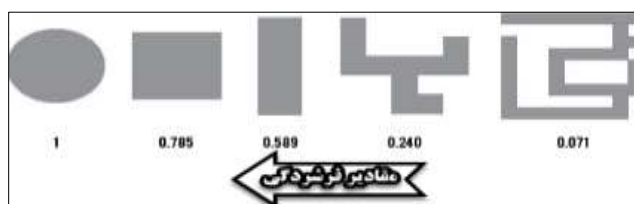


شکل ۱۲. نتیجه حاصل از اعمال حد آستانه روشنایی: الف) تصویر فیلترشده، ب) قطعه‌بندی بر اساس قانون حد آستانه روشنایی

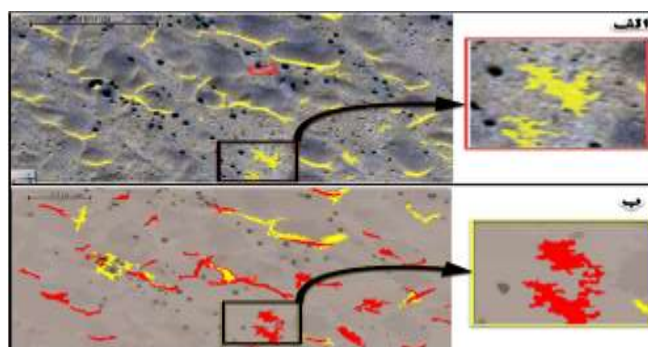
سپس، با توجه به الگوی هندسی، دامنه‌های خلاف جهت وزش باد با استفاده از قانون مقادیر فشردگی (رابطه ۲)، پیکسل‌هایی که به اشتباه و فقط به‌دلیل ویژگی طیفی وجود داشتند از طبقات حذف شدند (شکل ۱۴). یادآوری می‌شود که در مرحله قبل این دامنه‌ها به‌عنوان دامنه بادپناه شناخته شده بودند.

$$cpt = L/(\sqrt{n}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه: Cpt^1 فشردگی؛ میزان نزدیکی پیکسل‌هایی است که در یک شیء در حالت خوشه‌ای دسته‌بندی شده‌اند نسبت به حالت دایره، n تعداد پیکسل‌های موجود در یک شیء و L محیط شیء است. در قانون فشردگی و براساس رابطه ۲، کلاس‌های تشکیل شده هر قدر دارای مقادیر کمتر فشردگی باشند (یعنی به شکل بیضوی و کشیده یا نواری نزدیک باشند)، شانس تعلق آن‌ها به کلاس لبه بادپناه تپه‌های ماسه‌ای (بر اساس فرم دامنه‌های پُرشیب و پشت به باد تپه‌ها) بیشتر خواهد بود. و، بالعکس، هر قدر میزان فشردگی بیشتر باشد، مشابهت بیشتری با فرم دایره خواهند داشت (شکل ۱۳).

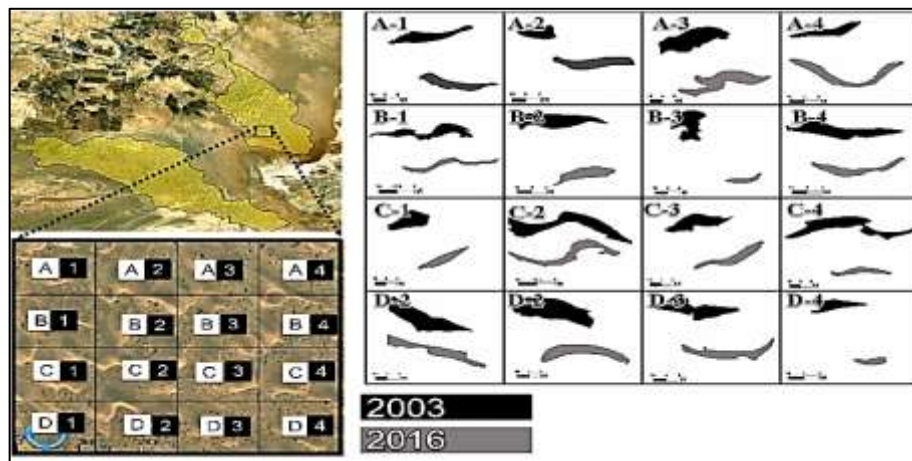


شکل ۱۳. ارتباط هندسه و ضرایب فشردگی



شکل ۱۴. الف) کلاس شیب‌های خلاف جهت باد بر اساس مقادیر طیفی؛ ب) کلاس شیب‌های خلاف جهت باد بر اساس مقادیر فشردگی (در تصویر ب پیکسل‌هایی با عضویت اشتباه (مربوط به مرحله قبل) حذف شده‌اند. این پیکسرها در تصویر با رنگ قرمز نمایش داده شده است).

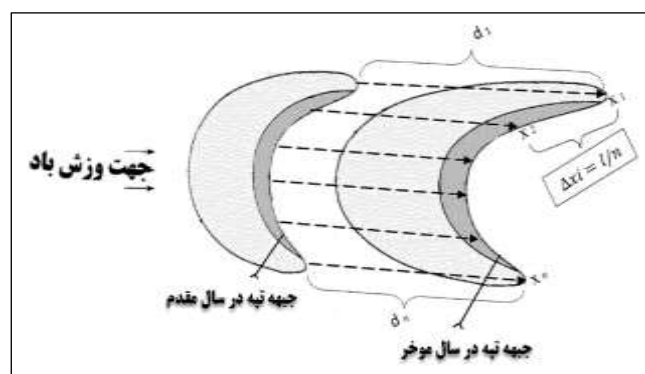
عملیات قطعه‌بندی، اعمال فیلتر سوبل، قوانین حد آستانه روشنایی و قانون فشردگی و سپس طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی برای دو تصویر مقدم و مؤخر با روندی که پیش‌تر گفته شد انجام شد. این دو تصویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶ می‌باشند. در این تصاویر، لایه مربوط به تپه‌های ماسه‌ای در بلوک‌های شانزده‌گانه برای هر دو دوره مورد اشاره استخراج شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. خروجی نهایی قطعه‌بندی و طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و استخراج حدود تپه‌های ماسه‌ای در بلوک‌های شانزده‌گانه برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶

محاسبه جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای

میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای با در نظر گرفتن لبه انتهایی دامنه پشت به باد (خط الرأس) انجام شده است. این جابه‌جایی در زمان‌های پیاپی و با اندازه‌گیری فاصله بین دو جبهه متوالی انجام گرفته است. در این ارتباط، هر خط نمایانگر استقرار لبه بادپناه در سال‌های مقدم و مؤخر است. به این منظور، چندین ترانسکت بین این دو لبه ترسیم شد که طول میانگین آن‌ها بیانگر میانگین فاصله طی‌شده تپه‌ماسه‌ای در دو مقطع زمانی پیاپی است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. شکل مفهومی محاسبه فاصله طی‌شده بر اساس مقادیر میانگین

$$\frac{\text{مساحت}}{\text{طول}} = \frac{\sum di}{\sum \Delta xi} = \frac{\sum di * L/n}{L} = 1/n * \sum di \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه: L طول جبهه تپه‌ماسه‌ای، X_i فاصله بین فلش‌ها در طول جبهه تپه‌ماسه‌ای، d_i فاصله طی‌شده در راستای فلش / خط مشخص، و n تعداد فلش‌های استفاده‌شده در مدل.

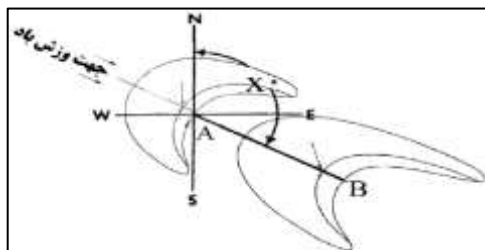
بر پایه این رابطه، پراکندگی نامنظم تپه‌های ماسه‌ای در قطعه شاهد در نظر گرفته شد. سپس، با استفاده از شبکه‌بندی مربع، کل منطقه به شانزده بلوک با ابعاد $150 * 150$ متر تقسیم شد. در مرحله بعد در درون هر یک از این بلوک‌ها یک تپه به‌عنوان شاهد برای اندازه‌گیری مقادیر و جهت جابه‌جایی در نظر گرفته شد (شکل ۱۶). با استفاده از ترانسکت‌هایی که متناظر جبهه انتهایی هر تپه را در سال‌های مقدم و مؤخر به یکدیگر متصل می‌کند، فواصل جابه‌جایی در بخش‌های

قدامی، میانی، و انتهایی هر تپه اندازه‌گیری شد. در نهایت، با میانگین‌گیری و با استفاده از مدل بهینه‌شده گای (۱۹۹۹) (لوین و بندور، ۲۰۰۴) (رابطه ۳)، مقدار عددی شاخص برای هر تپه‌ماسه‌ای به‌عنوان مقدار جابه‌جایی به‌دست آمد. عدد به‌دست‌آمده به‌طور میانگین برای هر بلوک (جدول ۳) و پس از آن برای قطعه شاهد ۲۲/۴ متر است. با توجه به دوره زمانی سیزده‌ساله و میانگین مسافت طی‌شده، تپه‌های ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه به‌طور میانگین ۱/۷ متر در سال جابه‌جایی دارند.

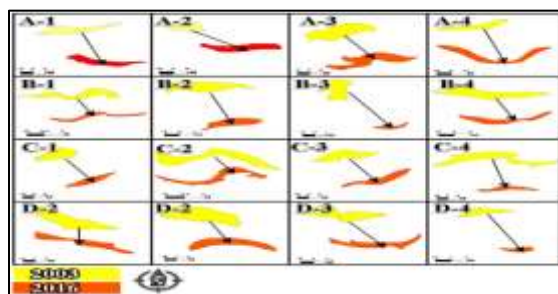
جدول ۳. ارقام مربوط به میزان و آزمون جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در بلوک‌های شانزده‌گانه (واحدها به متر)

قطعه	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
طول	۲۳٫۸	۲۰٫۲	۲۴٫۶	۱۸٫۳	۲۹٫۱	۲۳٫۱	۲۰٫۹	۲۲٫۴	۱۴٫۲	۳۱٫۵	۲۳٫۹	۲۷٫۰	۱۷٫۵	۲۱٫۷	۱۸٫۷	۲۱٫۸
آزمون ^۰	۱۵۸	۱۴۸	۱۵۳	۱۷۳	۱۵۱	۱۴۵	۱۵۶	۱۴۵	۱۶۶	۱۴۶	۱۶۳	۱۳۹	۱۶۲	۱۵۵	۱۲۹	۱۵۶

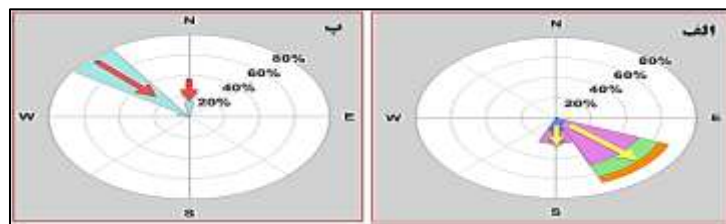
برای اندازه‌گیری جهت جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای، محور تقارن هر تپه به‌عنوان محور اصلی انتخاب شد. سپس، حد ابتدایی و انتهایی این محور بر روی جبهه بادپناه تپه‌های ماسه‌ای در هر دو سال مقدم و مؤخر در نظر گرفته شد (شکل ۱۷). بر اساس خطوط ترسیم‌شده بین دو جبهه در سال‌های مقدم و مؤخر، خط آزمون یا راستای حرکت نسبت به شمال ترسیم شد (جدول ۳ و شکل ۱۸). در نهایت، آزمون به‌دست‌آمده برای جهت غالب حرکت تپه‌ها با زاویه ۱۳۵ درجه (شمال غرب - جنوب شرق) محاسبه و گل ماسه آن ترسیم شد (شکل ۱۹).



شکل ۱۷. نحوه محاسبه آزمون جابه‌جایی تپه‌ماسه‌ای در سال‌های مقدم و مؤخر. محور AB نقطه آغاز و پایان و راستای حرکت و X آزمون آن را نسبت به شمال نشان می‌دهد



شکل ۱۸. خطوط جبهه انتهایی تپه‌های ماسه‌ای در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۶



شکل ۱۹. دیاگرام‌های الف و ب به ترتیب گل ماسه و گلباد منطقه را طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ نشان می‌دهند (بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک دامغان)

جدول ۴. پارامترهای سرعت و جهت وزش باد برای دوره آماری ۱۳۸۴-۱۳۹۶ متعلق به ایستگاه سینوپتیک دامغان

سال	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶
جهت (درجه)	۳۱۰	۳۶۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۱۰	۳۶۰	۳۱۰	۳۰۰	۳۱۵	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰
سرعت (گره)	۲۹	۲۵	۲۹	۳۱	۳۱	۳۶	۳۵	۳۰	۲۵	۲۱	۲۹	۲۸	۲۸

با هدف راستی‌آزمایی، نتایج حاصل از سنجش مقدار و جهت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در دوره زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۳ با داده‌های ماهانه و سالانه پارامترهای سرعت و جهت باد مقایسه و تحلیل شد و سپس گلباد مربوطه رسم گردید (جدول ۴ و شکل ۱۹-الف). تحلیل فراوانی داده‌های باد در دوره زمانی پژوهش نشان از غلبه ۸۰ درصدی وزش باد از سمت شمال غرب دارد. این باد غالب با راستای جابه‌جایی ۷۵ درصد از تپه‌های ماسه‌ای منطقه رابطه معنی‌داری را نشان می‌دهد. آزمون ۱۸۰ درجه‌ای جهت حرکت ۲۵ درصد از تپه‌های ماسه‌ای، با فراوانی ۱۵ درصدی وزش باد نیز به تأیید و تقویت این ارتباط کمک می‌کند (شکل ۱۹-الف و ب).

بحث و نتیجه‌گیری

برای ارزیابی حرکت تپه‌های ماسه‌ای دو چالش اساسی وجود دارد: یکی تنوع فراگیر انواع فرم‌های ماسه‌ای در یک پهنه است. این تنوع از نظر مقیاس و نوع داده متفاوت است. یعنی از سطوح ماسه‌ای و موج سطحی آن‌ها گرفته تا مورفولوژی تپه‌های مرتفع ماسه‌ای هریک دارای هندسه، دینامیک، و حرکت خاص به خود هستند. به طوری که تغییرات ارتفاعی و افقی رخ داده گاهی از چند میلی‌متر تا چندین متر است؛ دوم اینکه استخراج فرم‌های ماسه‌ای نیازمند روش‌هایی است که علاوه بر استفاده از طیف الکترومغناطیس باید بتواند ویژگی‌های فرمی و شکلی را نیز در فرایند پردازش داده‌ها دخالت دهد. این دخیل کردن داده‌ها، باید نهایتاً به یک خروجی منتهی شود که نزدیک‌ترین حالت نسبت به واقعیت است. از طرف دیگر، چون فرسایش بادی فرایندی ماهیتاً پویاست، فرم‌های ناشی از آن نیز در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت روی داده و منطقه‌ای وسیع را دربر می‌گیرد. این پژوهش، رویکردی جدید برای تشخیص دینامیک اشکال ماسه‌ای با استفاده از داده‌های راداری و تکنیک تداخل‌سنجی است. بدین منظور، از تصاویر اپتیک با دقت مکانی بالا بهره گرفته شده و طبقه‌بندی شیء‌گرا پیشنهاد شده است.

نتایج پژوهش از پردازش داده‌های راداری با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی و بهره‌گیری از تکنیک سنجش تغییرات همدوسی امواج راداری منعکس شده از سطوح ماسه‌ای حاصل شده است. سطوح ماسه‌ای در نظر گرفته شده سطوحی هستند که در معرض فرسایش و مورفودینامیک باد بوده و با توجه به ویژگی‌های داده‌های راداری (طول موج و اثرپذیری

از خواص فیزیکی سطوح بازتاب‌کننده همچون تغییرات جزئی ارتفاعی در حد سانتی‌متر و کمتر) آن‌گونه که انتظار می‌رفت توانست به‌خوبی ماهیت دینامیک تپه‌های ماسه‌ای فعال و غیرفعال را تشخیص دهد. داده‌های به‌دست‌آمده به‌صورت مقادیر رقومی پیوسته (تپه‌های کاملاً فعال تا کاملاً تثبیت‌شده) توانستند این تغییرات را به‌خوبی به‌نمایش بگذارند. از سوی دیگر، مزیت بهره‌بردن از چنین تکنیکی توانست شناخت دقیق‌تری از تغییرات مورفومتریک بسیار کوچک و در مقیاس زمانی کوتاه را آشکار نماید. حال آنکه بهره‌گیری صرف از داده‌های اپتیک ماهواره‌ای یا عکس‌های هوایی به دلیل ماهیت این نوع داده‌ها (برداشت داده در بازه طول موج مرئی یا مادون قرمز) اولاً زمانی می‌تواند مفید واقع شود که تغییرات رخ داده به جابه‌جایی افقی منجر شود؛ ثانیاً، این تغییرات (طبق مفهوم اندازه قابل سنجش)^۱ از نظر ابعاد دوبرابر یا حداقل برابر با قدرت تفکیک تصویر و یا عکس باشد. در این صورت، شاید توسط کاربر یا الگوریتم‌های پردازش تصویر بخشی از آن قابل آشکارسازی و تفسیر باشد.

ارزیابی و پایش تغییرات ناشی از مورفودینامیک باد (جهت و مقدار جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای) در بازه زمانی طولانی‌تر هدف بعدی پژوهش بود. چون منطقه مورد بررسی وسعت زیادی داشت و حجم داده‌های ورودی به فرایند ارزیابی بسیار زیاد بود، این مسئله، استخراج مقادیر نسبی تغییرات همدوسی و تحلیل نقش آن‌ها را در ساختارهای ماسه‌ای مشکل می‌ساخت. زیرا این عوامل همگی معلول تغییرات رخ داده ناشی از عملکرد مورفودینامیک باد هستند. از این رو، در گام بعدی این امکان فراهم شد تا با کاستن هزینه‌ها و صرف زمان کمتر بتوانیم قطعه شاهد را انتخاب کنیم. این قطعه در قسمتی قرار گرفته بود که دارای کمترین میزان همدوسی و بیشترین تغییر بود. به همین دلیل، برای مراحل بعدی مطالعه انتخاب شد. لازمه استخراج دقیق‌تر از جهت و میزان جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای، دستیابی به عناصر و اشیا در تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی (مقدم و مؤخر) بود. از آنجا که تباین ضعیف رادیومتریک در عوارضی مانند تپه‌های ماسه‌ای وجود دارد و این تباین هم در بخش‌های مختلف خود عارضه و هم نسبت به عرصه مستقر در آن دیده می‌شود، بهترین روش برای طبقه‌بندی و استخراج فرم‌ها تأکید بر هندسه و ویژگی‌هایی بود که بتواند هندسه یک شیء را به‌نمایش بگذارد. به همین دلیل، با انتخاب و اجرای الگوریتم طبقه‌بندی نیمه‌خودکار شیء‌گرا دستیابی به حدود و گستره فرم‌های ماسه‌ای امکان‌پذیر و با خطای کمتری همراه شد. همچنین، این تحقیق نشان داد برای شناسایی و استخراج لندفرم‌های ماسه‌ای تلفیق ویژگی‌های فرمی و طیفی می‌تواند نتیجه‌ای دقیق‌تر به‌دست دهد. اعمال این الگوریتم بر روی تصاویر ماهواره‌ای سال‌های مقدم و مؤخر و خروجی حاصل از آن معرف دامنه‌های بادپناه تپه‌ها بود. با استفاده از این ویژگی، این الگوریتم امکان مقایسه و ارزیابی تغییرات صورت‌گرفته را میسر ساخت. نتیجه این بخش از پژوهش حاکی از جابه‌جایی ۲۲/۴ متری تپه‌ها عمدتاً در جهت جنوب غربی در بازه زمانی سیزده‌ساله و متوسط ۱/۷ متر برای هر سال بوده است. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، مقادیر و زوایای به‌دست‌آمده، آمار ماهانه و سالانه پارامترهای سرعت و جهت باد تحلیل و گلبادهای منطقه نیز ترسیم و تحلیل شد. این تحلیل که از طریق مقایسه گلباد (تحلیل داده‌های باد) و گلماسه (تحلیل داده‌های جابه‌جایی ماسه) انجام شده، نشان از رابطه معنی‌داری در فراوانی و راستای حرکت تپه‌های ماسه‌ای دارد. به‌طوری‌که فراوانی ۸۰ درصدی بادهای شمال غرب- جنوب شرقی با آزمون ۱۳۵ درجه در حرکت ۷۵ درصد از تپه‌های ماسه‌ای نقش داشته‌اند. علاوه بر این، وزش بادهایی با فراوانی ۱۵ درصد و با آزمون ۱۸۰ درجه، راستای حرکت ۲۵ درصد از تپه‌های ماسه‌ای را تعیین کرده‌اند.

منابع

- پریمی، م.؛ خانه باد، محمد؛ موسوی حرمی، رضا و محبوبی، اسدالله (۱۳۹۴). رسوب‌شناسی و مورفومتری تپه‌های ماسه‌ای (نوع برخان و نبکا) حاشیة کویر حاج‌علی‌قلی واقع در جنوب دامغان - ۱۳۹۴، فصل‌نامه کواترنری ایران، دوره ۱، ش ۳، صص ۲۵۵-۲۶۴.
- زهتابیان، غ.؛ علوی‌پناه، سیدکاظم و احسانی، امیرهوشنگ (۱۳۸۲). بررسی و تفکیک خاک‌های حاشیة پلايا با استفاده از داده‌های رقومی ماهواره لندست 7 ETM+ مطالعه موردی: پلايای دامغان، پژوهش و سازندگی، دوره ۱۶، ش ۱، صص ۳۰-۳۸.
- عظامرادی، ب. (۱۳۷۸). بررسی اشکال و نوع تپه‌های ماسه‌ای به‌منظور مبارزه با فرسایش بادی در ارگ دامغان، دانشگاه تهران، مرکز تحقیقات کویری و بیابانی ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
- علوی‌پناه، ک.؛ احسانی، امیرهوشنگ و امیدی، پرویز (۱۳۸۳). بررسی بیابان‌زایی و تغییرات اراضی پلايای دامغان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه و چندطیفی، بیابان، ج ۹، ش ۱، صص ۱۴۴-۱۵۴.
- مرتضایی فریزه‌ندی، ق. و شهبازی، رضا (۱۳۹۰). بررسی فرایند بیابان‌زایی با استفاده از معیار فرسایش و با تأکید بر نقش کاربری اراضی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چشمه‌علی دامغان)، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، صص ۴۵-۵۲.
- مقصودی، م.؛ یمانی؛ مشهدی، ناصر؛ تقی‌زاده، مهدی و ذهاب ناظوری، سمیه (۱۳۹۰). شناسایی منابع ماسه‌های بادی ارگ نوق با استفاده از تحلیل باد و مورفومتری ذرات ماسه، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، س ۲۲، شماره پیاپی ۴۳، ش ۳، صص ۱-۱۶.
- Abba, M.; Essahlaoui, A.; Elkharki, O. and Mechbough, J. (2019). The Use of Interferometric Coherence of Sentinel-1a Images to Study Silting in South-East Morocco, *Annals of Ecology and Environmental Science*, Vol. 3, No. 4, PP. 37-49.
- Abdelkareem, M.; Gaber, A.; Abdalla, F. and El-Din, GK. (2020). Use of optical and radar remote sensing satellites for identifying and monitoring active, inactive landforms in the driest desert in Saudi Arabia, *Geomorphology*, Vol. 362, PP. 107-197.
- Alali, A. and Benmohammadi, A. (2013). L'ensablement dans la plaine de Tafilalet (Sud Est du Maroc), *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, No. 16, PP. 53-75.
- Alawi panah, K.; Ehsani, Amirushang and Omidi, Parviz (2004). Investigation of desertification and land degradation in Damghan playa using multispectral and multi-spectral satellite data, *Desert*, Vol. 9, Issue 1, PP. 144-154.
- Atamoradi, B. (1999). *Investigation of the shape and type of sand dunes in order to harness wind erosion in Damghan erg*, Tehran University, Kavir and Desert Research Center of Iran, Master's thesis.
- Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London.
- Benalla, M.; Alem, E.M.; Rognon, P.; Desjardins, R.; Hilali, A. and Khardi, A. (2003). Les dunes du Tafilalet (Maroc) : dynamique éolienne et ensablement des palmeraies. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 14, No. 2, PP. 73-83.
- Benz, U.; Hofmann, P.; Willhauck, G.; Lingenfelder, I. and Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 58, PP. 239-258.

- Bodart, C. and Ozer, A. (2018). Detection and monitoring of sand dune mobility in southeast Niger using multi-temporal coherence images.
- Bodart, C.; Ozer, A. and Derauw, D. (2010). Suivi de l'activité des dunes au Niger au moyen de la cohérence interférométrique ERS 1/2, BSGl, viewed 25 December 2020, <<https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=1012>>.
- Bourke, M. C.; Ewing, R. C.; Finnegan, D. and McGowan, H. A. (2009). Sand dune movement in the Victoria Valley, Antarctica. *Geomorphology*, 109: 148-160.
- Bubbenzer, O. and Bolten, A. (2008). The use of new elevation data (SRTM/ASTER) for the detection and morphometric quantification of Pleistocene megadunes (draa) in the eastern Sahara and the southern Namib. *Geomorphology*, 102: 221-231.
- Bullard, J. E.; White, K. and Livingstone, I. (2011). Morphometric analysis of aeolian bedforms in the Namib Sand Sea using ASTER data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 1534-1549.
- Dakir, D.; Rhinane, H.; Saddiqi, O.; El Arabi, E. and Baïdder, L. (2016). Automatic extraction of dunes from google earth images new approach to study the dunes migration in the laâyoune city of morocco., *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W1,
- Damien Closson and Nada Milisavljevic (2017). *In SAR Coherence and Intensity Changes Detection*, DOI: 10.5772/65779.
- Drăguț, L.; Eisank, C. and Strasser, T. (2011). Local variance for multi-scale analysis in geomorphometry', *Geomorphology*, Vol. 130, No. 3-4, PP. 162-172.
- Drăguț, L.; Tiede, D. and Levick, SR. (2010). ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 24, No. 6, PP. 859-871.
- El Ghannouchi, A., 2007, *Dynamique éolienne dans la plaine de Souss: Approche modélisatrice de la lutte contre l'ensablement*, Mémoire de thèse de l'Université Mohammed V – Agdal Faculté Des Sciences, Rabat, Maroc, 193p.
- Elhadi, E. M.; Zomrawi, N. and Guangdao, Hu. (2009). Landscape Change and Sandy Desertification Monitoring and Assessment. *American Journal of Environmental Sciences*, 5: 633-638.
- Gaber, A.; Abdelkareem, M.; Abdelsadek, I. S.; Koch, M. and El-Baz, F. (2018). Using InSAR coherence for investigating the interplay of fluvial and aeolian features in arid lands: Implications for groundwater potential in Egypt, *Remote Sens*, Vol. 10, No. 6, PP. 1-18.
- Gay Jr., S.P. (1999). Observations regarding the movement of barchan sand dunes in the Nazca to Tanaca area of southern Peru. *Geomorphology* 27: 279-293.
- Ghadiry, M.; Shalaby, A. and Koch, B. (2012). A new GIS-based model for automated extraction of Sand Dune encroachment case study: Dakhla Oases, western desert of Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 15: 53-65.
- Haijiang, L.; Chenghu, Z.; Weiming, C.; En, L. and Rui, L. (2008). Monitoring sandy desertification of Otindag Sandy Land based on multi-date remote sensing images. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 627-635.
- Havivi, S.; Amir, D.; Schwartzman, I.; August, Y.; Maman, S.; Rotman, SR. and Blumberg, DG. (2018). Mapping dune dynamics by InSAR coherence, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 43, No. 6, PP. 1229-1240.

- Hermas, E.; Leprince, S. and Abou El-Magd, I. (2012). Retrieving sand dune movements using sub-pixel correlation of multi- temporal optical remote sensing imagery, northwest Sinai Peninsula, *Egypt Remote Sensing of Environment*, 121: 51-60.
- Hesse, R. (2009). Using remote sensing to quantify aeolian transport and estimate the age of the terminal dune field Dunas Pampa Blanca in southern Peru. *Quaternary Research*, 71: 426-436.
- Hugenholtz C. H. and Barchyn, T. E. (2010). Spatial analysis of sand dunes with a new global topographic dataset: New approaches and opportunities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 986-992.
- Klir, G.J. and Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Application*. 1st ed., Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Losson, D. and Milisavljevic, N. (2017). *In SAR Coherence and Intensity Changes Detection*, Mine Action - The Research Experience of the Royal Military Academy of Belgium.
- Mahyou, H.; Tychon, B.; Balaghi, R.; Mimouni, J. and Paul, R. (2010). Désertification des parcours arides au Maroc. *Tropicultura*, 28(2): 107-114.
- Mainguet, M.; Dumay, F.; Oould, EL.; Hacen, M. L. and Maefoudh, A. (2001). Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne : période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo-sahélienne. *Télédétection*, Vol. 2, No. 2, PP. 129-136.
- Massonnet, D. and Feigl, KL. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, Vol. 36, No. 4, PP. 441-500.
- Mather, P.M. . (2005). *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Niang, A. J. (2008). *Les processus morphodynamique, indicateurs de l'état de la désertification dans le sud-ouest de la Mauritanie*. Approche par analyse multi source. Mémoire de thèse de l'Université de Liège, 286p.
- Nouaceur, Z. (2013). Nouakchott, une capitale au péril des vents de sable, de l'ensablement et des inondations. *Sécheresse*, 24: 182-93.
- Sahraoui, A. (2008). *Erosion éolienne et risque d'ensablement dans la région de Barika: Approche quantitative et cartographie automatique*. Mémoire de thèse Université El Hadj Lakhder-Batna Faculté des Sciences Département des Sciences de la Terre, Algérie, 132p.
- Schiewe, J. (2012). Segmentation of high-resolution remotely sensed data – concepts, applications and problems. In: *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottawa.
- Shackelford, Aaron K. (2003). Student Member, IEEE, and Curt H. Davis, Senior Member, IEEE. A hierarchical fuzzy classification approach for high-resolution multispectral data over urban areas., *Ieee transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 41, No. 9.
- Shiran Havivia, Doron Amirb, Ilan Schwartzmanb, Yitzhak Augustc, Shimrit Mamand, Stanley R. Rotmanb, Dan G. Blumberga, (2017). Mapping dune dynamics by InSAR coherence., *Earth Surface Processes and Landforms*, p 1-36
- Taubenböck, H. T.; Esch, A.; Wurm, M.; Roth, A. and Dech, S. (2010). Object-based feature extraction using high spatial resolution satellite data of urban areas, *Journal of Spatial Science*, Vol. 55, No. 1, 117-132.
- Tchakerian, VP. (1996). *Desert Aeolian Processes*, Dordrecht Springer Netherlands.
- Tsoar, H. (2002). Climatic Factors Affecting Mobility and Stability of Sand Dunes, *Proceedings of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference*, P. 423.

- Tsoar, H.A. and Blumberg, D.G. (2002). Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 1147-1161.
- Venard, C.; Delaitre, E.; Callot, Y.; Ouessar, M. and Ouerchfani, D. (2010). Exploitation d'images satellitaires à très haute resolution spatiale fournies par Google earth Exemple d'application à l'étude d'olivearie en Tunisie. *Revue Télédétection*, 2010, Vol. 9, No. 1, PP. 59-71.
- Vermeesch, P. and Drake, N. (2008). Remotely sensed dune celerity and sand fluxmeasurements of the world's fastest barchans (Bodele, Chad). *Geophysical Research Letters*, 35.
- Vries, S.; Southgate, H.N.; Kanning, W. and Ranasinghe, R. (2012). Dune behavior and aeolian transport on decadal timescales, *Coastal Engineering*, Vol. 67, PP. 41-53.
- Yager, R. (1987). *Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers by L. Zadeh*, New York, John Wiley.
- Perimi. M., Khaneabad M., Mousavi Harami. R. & Mahboubi. A. (2015) Sedimentology and morphometry of sand dunes (Barkhan and Nebka type) on the margin of Haj Ali Gholi desert located in the south of Damghan - 2015, Quaternary Journal of Iran, Volume 1, Issue 3, pp. 255-264.
- Zehtabian, G.R. ; Alavi Panah, S. K. and Ehsani, A. H. (2003). Investigation and Separation of Playa Marginal Soils Using Landsat 7 ETM Digital Data + Case Study: Damghan Playa, Research and Construction, Volume 16, Issue 1, pp. 30-38.
- Atamoradi, B. (1999). Investigation of shapes and types of sand dunes to combat wind erosion in Damghan Erg, University of Tehran, Desert Research Center of Iran, M.Sc. Thesis.
- Mortezaei Frizhendi. Gh., Shahbazi. R. (2011) Investigation of desertification process using erosion criteria and emphasizing the role of land management, *Desert Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 144-154.
- Maghsoudi, M. ; Yamani. M. Mashhadi, N.; Taghizadeh, M. and Zahab Nazouri, S. (2011). Identification of wind sand sources in Arg-e-Nogh using wind analysis and morphometry of sand particles, *Journal of Geography and Environmental Planning*, Q22, Serial Issue 43, Vol. 3, pp. 1-16.