

مقایسه کارایی برخی الگوریتم‌های طبقه‌بندی در مطالعه تغییرات لندفرم‌های بیابانی دشت یزد-اردکان

منیره رعیتی شوازی- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران.
امیر کرم* - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران.
حمیدرضا غفاریان مالگیری- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد.
عادل سپهر- استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵ تائید نهایی: ۱۳۹۶/۰۵/۱۹

چکیده

شناخت لندفرم‌ها و تغییرات آن‌ها از نیازهای اساسی ژئومورفولوژی مناطق بیابانی به‌منظور مدیریت آن‌هاست. یکی از روش‌هایی که در شناخت تغییرات لندفرم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد طبقه‌بندی پدیده‌ها و عوارض زمین با داده‌های سنجش از دور در زمان‌های مختلف می‌باشد. هدف از این پژوهش، کارایی سه الگوریتم نظارت‌شده حداکثر شباهت، فاصله ماهالانویس و حداقل فاصله برای طبقه‌بندی لندفرم‌های بخشی از دشت یزد-اردکان و بررسی تغییرات آن‌هاست. بدین منظور از تصاویر سنجنده های TM، ETM و OLI ماهواره Landsat مربوط به سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶، در بازه زمانی ۳۰ ساله استفاده شد. ابتدا تصحیحات لازم بر روی تصاویر انجام گردید و سپس با بازدیدهای میدانی و بر پایه نقشه‌های توپوگرافی، ژئومورفولوژی و تصاویر گوگل ارث، لندفرم‌های ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه تعریف و نمونه‌های آموزشی انتخاب گردید. نتایج ارزیابی دقت تصاویر طبقه‌بندی نشان داد الگوریتم حداکثر شباهت در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶، به ترتیب با دقت کلی ۹۱/۵۰، ۹۳/۲۲ و ۹۳/۳۵ و ضریب کاپا ۰/۸۷، ۰/۸۹ و ۰/۸۹ نسبت به دو الگوریتم دیگر، عملکرد بهتری در تهیه نقشه ژئومورفولوژی و تغییرات آن داشت. بر این اساس به‌منظور شناخت و وضعیت تغییرات لندفرم‌ها از روش آشکار سازی تغییرات "پس از طبقه‌بندی" از روش الگوریتم حداکثر شباهت استفاده شد و نقشه ماهیت تغییرات تهیه شد. همچنین نتایج طبقه‌بندی و تحلیل تغییرات لندفرم‌ها طی ۳۰ سال با روش الگوریتم حداکثر شباهت نشان داد که سبخا و لندفرم‌های موجود بروی دشت سرپوشیده به‌جز تپه‌های ما سهای موج‌دارای روند نزولی تا سال ۲۰۱۶ بودند و در تغییرات لندفرم‌های بیابانی منطقه عوامل طبیعی توأم با عوامل انسانی نقش داشتند. به‌طور کلی این نتایج نمایانگر آن است که در محدوده مورد مطالعه در طی ۳۰ سال، نه تنها بر وسعت اراضی بیابانی افزوده نشده است، بلکه از محدوده اراضی بیابانی کاسته شده و بر دیگر کاربری‌ها افزوده شده است. همچنین در شرق و غرب منطقه مرز لندفرم‌ها تغییر کرده است.

واژگان کلیدی: تغییرات لندفرم‌ها، الگوریتم‌های طبقه‌بندی، حداکثر احتمال، فاصله ماهالانویس، حداقل فاصله، دشت یزد-اردکان.

مقدمه

شناسایی لندفرم‌های مناطق بیابانی، طبقه‌بندی و تهیه نقشه آن‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، روشی برای آشکارسازی تغییرات این مناطق است. در امر مدیریت محیط، معمولاً ارزیابی ماهیت بلایای طبیعی، منابع طبیعی و به‌ویژه نحوه توزیع و تغییرات آن‌ها برحسب زمان، کاربری نقشه لندفرم و مطالعات ژئومورفولوژیکی را ضروری می‌سازد (ملاهمهر علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳، ۱۱۲). امروزه رویکرد سنتی تفسیر بصری در شناسایی لندفرم‌ها و تهیه نقشه آن‌ها، فاقد سرعت و دقت لازم است و از طرفی وجود مفسر متخصص نیز ضروری است. از این رو استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور (RS^1)، به‌منظور شناخت لندفرم‌ها نوعی ضرورت است (شایان و همکاران، ۱۳۹۱، ۲۰). همچنین داده‌های سنجش‌ازدوری به‌عنوان یک منبع اصلی برای مطالعات آشکارسازی تغییرات کاربرد دارند، چرا که تناوب زمانی بالا، فرمت دیجیتالی مناسب برای انجام دادن محاسبات، ایجاد یک دید اجمالی و انتخاب گسترده از دقت‌های طیفی و مکانی باعث این امر شده است. اهداف اصلی آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجش‌ازدوری، شامل مشخص کردن موقعیت هندسی، نوع تغییرات، کیفیت تغییرات و ارزیابی صحت نتایج آشکارسازی تغییرات هستند.

یکی از مراحل که در یک پروژه آشکارسازی تغییرات مورد استفاده قرار می‌گیرد فرآیند طبقه‌بندی داده‌های سنجش‌ازدوری می‌باشد. طبقه‌بندی را می‌توان یک فرآیند تصمیم‌گیری دانست که در آن داده‌های تصویری به کلاس‌های مشخص تخصیص می‌یابند (سعید زاده و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۱۲). طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای مهم‌ترین مرحله تفسیر اطلاعات ماهواره‌ای محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تهیه نقشه لندفرم‌های ژئومورفولوژی و بررسی تغییرات آن وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. انتخاب روش به هدف مطالعه و داده‌های در دسترس بستگی دارد. از متداول‌ترین روش‌های طبقه‌بندی می‌توان به روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال^۲ (ماسود^۳ و همکاران، ۲۰۰۶، ۱۵۶، لیلند^۴، ۱۹۹۴) اشاره کرد. روش‌های دیگر طبقه‌بندی مانند روش‌های حداقل فاصله^۵، فاصله ماهالانوبیس^۶ (مقیم و همکاران، ۱۳۹۵) و شبکه عصبی^۷ (فودی^۸، ۲۰۰۲، ۳۸۵۳، چن^۹ و همکاران، ۱۹۹۷، ۷۶۳، هووالد^{۱۰}، ۱۹۸۹)، نیز توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. شبکه‌های عصبی به دلیل ماهیت غیر پارامتریک و قابلیت‌هایشان برای بهره‌گیری از مثال‌ها و توانایی تعمیم آن‌ها، برای طبقه‌بندی نظارت‌شده^{۱۱} مناسب قلمداد می‌شوند (مانان^{۱۲} و همکاران، ۱۹۹۸، کازوگلو^{۱۳}، ۲۰۰۴، هسو^{۱۴}، ۲۰۰۲، فودی، ۲۰۰۴).

مطالعه پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که پیش‌ازاین در زمینه کاربرد روش‌های طبقه‌بندی موردنظر با سنجش‌ازدور در تهیه نقشه ژئومورفولوژی، مطالعاتی مشابه این پژوهش در منطقه مورد مطالعه صورت نگرفته است، اگرچه مطالعاتی در مناطق

- 1 - Remote Sensing
- 2 - Maximum Likelihood
- 3 - Masoud
- 4 - Lillesand
- 5 - Minimum Distance
- 6 - Mahalanobis Distance
- 7 - Neural Net
- 8 - Foody
- 9 - Chen
- 10 - Howald
- 11 - Supervised Classification
- 12 - Mannan
- 13 - Kavzoglu
- 14 - Hsu

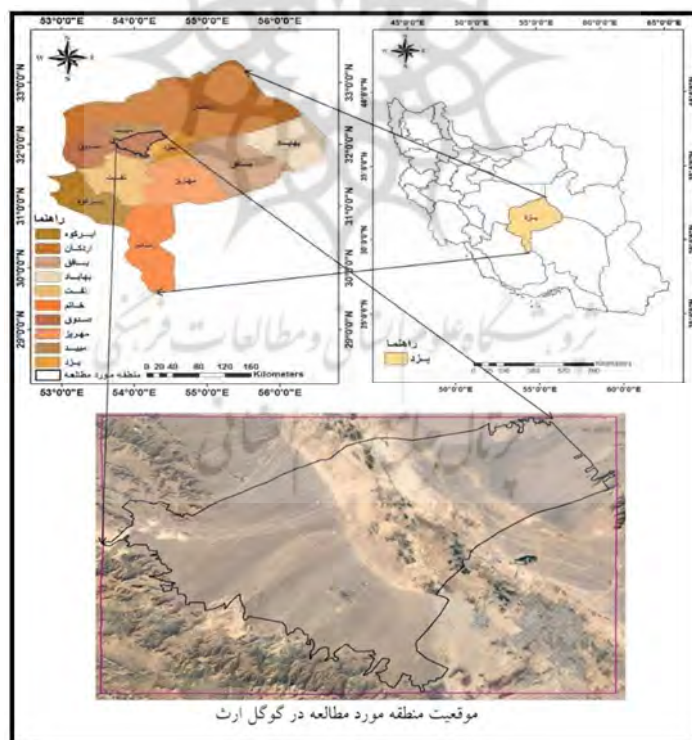
بیابانی دیگر با سنجش از دور انجام شده است؛ کرینسلی (۱۳۵۰) در گزارش مفصلی به مطالعه پلایاهای ایران با استفاده از علم دورسنجی پرداخت. در گزارش کرینسلی استفاده از عکس‌های هوایی در بیش از چهل سال پیش، بیانگر توجه ایشان به استفاده از تکنیک فتوژئولوژی و دورسنجی در مطالعاتی به مقیاس ناحیه‌ای می‌باشد. شایان و همکاران (۱۳۹۱) برای طبقه‌بندی لندفرم‌های منطقه خشک مرنجاب از پارامترهای مورفومتریک حاصل از مدل رقومی ارتفاعی^۱ SRTM و روش حداکثر شباهت استفاده کردند. نتایج حاصل از دقت طبقه‌بندی این پژوهش نشان داد که دقت کلی طبقه‌بندی حدود ۸۱ درصد و شاخص کاپا برابر ۰/۷۳ است. اکبری و همکاران (۱۳۸۶) به ارزیابی و طبقه‌بندی کاربری اراضی با سنجش از دور و GIS^۲ با توجه به خصوصیات ژئومورفولوژی در منطقه شمال شهر اصفهان پرداختند. در انجام این پژوهش، از داده‌های ماهواره‌ای TM^۳ سال ۱۳۶۹ و داده‌های ETM^۴ سال ۱۳۸۰ استفاده شد. داده‌های هر دو تصویر، با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده در ۹ کلاس، مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه کمی قرار گرفتند. ملامهر عزیزاده و همکاران (۱۳۸۳) به منظور تهیه نقشه لندفرم و نقش آن در برنامه‌ریزی محیطی، کارایی داده‌های سنجش از دور را مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس، ۲۷ لندفرم با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، اقلیمی و توپوگرافی استان سمنان از مدل رقومی ارتفاعی شناسایی شد. جمشید مقدم و همکاران (۱۳۹۳) به طبقه‌بندی پدیده‌های زمینی با تصاویر استر بر اساس نتایج پردازش داده‌های فرا طیفی هایپریون از دیدگاه کانی‌شناسی در منطقه لاهرود پرداختند. نقشه طبقه‌بندی در این پژوهش به سه روش پارامتریک حداکثر درست نمایی، حداقل فاصله و فاصله مایلانویس تهیه شد. نتایج نشان داد که روش حداکثر درست نمایی بهترین عملکرد را نسبت به دو روش پارامتریک دیگر دارد. عطاپورفرد و همکاران (۱۳۸۳) برای تعریف و طبقه‌بندی بیابان‌های ژئومورفولوژیکی استان تهران از روش مورفونبکی به‌عنوان مبنای استفاده کردند. در این راستا با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناختی و توپوگرافی و تلفیق داده‌های آن دو، عوارض ژئومورفولوژیکی خاص بیابان در منطقه شناسایی شد و سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست سنجنده ETM⁺ محدوده عوارض اصلاح و احیاناً بازسازی شدند. حبیبی و همکاران (۱۳۹۳) نقشه شدت بیابان‌زایی در رخصاره‌های ژئومورفولوژی در استان خوزستان را تهیه کردند. بدین منظور واحدهای کاری موجود در منطقه به‌عنوان نقشه پایه با تفکیک واحدها و تیپ‌های ژئومورفولوژی با استفاده از تصاویر ETM⁺ ۲۰۰۷ تهیه شد. علاوه بر معیارهای اصلی مدل شامل اقلیم، خاک، پوشش گیاهی، مدیریت و سیاست دو معیار فرسایش آبی و فرسایش بادی نیز در ارزیابی بیابان‌زایی استفاده شد. در نهایت پس از محاسبه امتیاز هر کدام از معیارها از طریق میانگین هندسی شاخص‌ها، امتیاز کلی وضعیت بیابان‌زایی در هر یک از واحدهای کاری مشخص شد. علوی پناه (۱۳۷۹) چهار منطقه کویری ایران را بر اساس داده‌های TM ماهواره لندست مربوط به پدیده‌های مختلف زمینی را ارزیابی کرد. در این پژوهش برای انتخاب ترکیب باندی مناسب، از روش‌های ماتریس همبستگی، تعیین حد شاخص مطلوب (OIF^۵)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA^۶) و تجزیه و تحلیل نمودار دوعیدی داده‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که در مطالعات مناطق گسترده کویری، قدرت تفکیک زمینی ممکن است اهمیت کمتری نسبت به قدرت تفکیک طیفی داشته باشد. بنابراین، ارزیابی میزان اطلاعات باند حرارتی برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. سیف و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی به شناسایی و جداسازی رخصاره‌های ژئومورفولوژی در بخشی از شمال پلایای گاوخونی پرداختند. برای دستیابی به این هدف از تصاویر کاذب رنگی با ترکیب باندی ۷، ۴، ۱ لندست TM و داده‌های ۶ باند انعکاسی سنجنده ETM⁺ ماهواره لندست ۷ استفاده کردند. علوی پناه و همکاران (۱۳۸۳) به منظور مطالعه یاردانگ‌های بیابان لوت از

- 1- Shuttle Radar Topography Mission
- 2- Geographic Information System
- 3- Thematic Mapper
- 4- Enhanced Thematic Mapper Plus
- 5 - Optimum Index Factor
- 6 - Principal Component Analysis

داده‌های ۶ باند انعکاسی سنجنده TM ماهواره لندست و تصاویر رنگی TM با ترکیب باندهای ۷، ۴ و ۲ استفاده کردند، نتایج نشان داد طبقه‌بندی مناطق یاردانگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مقدور می‌باشد. نتایج حاصل از روش به‌کارگیری فیلترینگ سوبل در جهت شمال غربی به جنوب شرقی نشان داد که این فیلتر برای نمایش وضعیت یاردانگ‌های منطقه مانند پشته‌ها و شیپارها و حتی خندق‌های فرسایشی مناسب است. هدف اصلی پژوهش حاضر، طبقه‌بندی لندفرم‌های ژئومورفولوژی بخشی از دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر لندست در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ است، بدین منظور از سه الگوریتم حداکثر شباهت، فاصله ماهالانویس و حداقل فاصله استفاده شد و کارایی این سه روش، مورد مقایسه قرار گرفتند. هدف دیگر این پژوهش، تحلیل تغییرات لندفرم‌ها طی ۳۰ سال آماری است که در این راستا مقایسه "پس از طبقه‌بندی" انجام و نقشه ماهیت تغییرات در دوره ۲۰۱۶-۱۹۸۷ تهیه شد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه دشت یزد-اردکان هست که از نظر مختصات جغرافیایی در عرض جغرافیایی $31^{\circ} 47' 16''$ درجه تا $32^{\circ} 13' 20''$ درجه شمالی و طول جغرافیایی $53^{\circ} 40' 37''$ درجه تا $54^{\circ} 27' 04''$ درجه شرقی قرار دارد و در سیستم UTM در زون ۳۹ است. این محدوده طبق آخرین تقسیمات سیاسی شامل بخش مرکزی و بخش خضرآباد از شهرستان صدوق استان یزد می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

متوسط حداقل دما بر اساس ایستگاه سینوپتیک یزد طی ۳۰ سال آماری، ۱۲/۱۴ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداکثر دما ۲۶/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین سالانه بارندگی نیز ۶۴/۳۸ میلی‌متر است. جهت غالب باد در شش ماه اول سال، شمال غربی و در چهار ماه از سال (آبان تا بهمن) جنوب شرقی است. بر اساس طبقه‌بندی دومارتون آب‌وهوای این منطقه

جزو اقلیم خشک و بیابانی با ضریب خشکی ۳/۲۴ محسوب می‌شود که دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد می‌باشد.

مساحت منطقه مورد مطالعه ۱۵۶۳/۱۱ کیلومتر مربع است. این منطقه یک چشم‌انداز ژئومورفولوژی واقع در مناطق بیابانی است که از بیرونی‌ترین قسمت به سمت مرکز شامل دو تیپ اصلی ناهمواری ۱- کوهستان ۲- دشت سر است. این دشت از شمال به چاله عقدا و از جنوب به کفه بهادران منتهی شده است. دو رشته شیرکوه از جنوب و کوه‌های خرائق از شمال و شمال شرق با جهت شمال غرب-جنوب شرق این دشت را احاطه کرده‌اند. در محدوده مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی ارتفاعی، حداقل ارتفاع ۱۱۰۰ متر و حداکثر ارتفاع ۲۰۲۷ متر است. در این محدوده بیشترین گسترش ارتفاعی، در محدوده‌های ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر و شیب غالب منطقه مورد مطالعه در محدوده ۰ تا ۲ درصد برآورد شد. شیب عمومی منطقه به سمت شرق و شمال شرق می‌باشد. اما در بعضی نقاط مانند اطراف روستای بهرام‌آباد و در امتداد طرفین جاده یزد-اردکان (منطقه تثبیت ماسه‌های روان) اختلاف شیب مشاهده می‌شود. در داخل دشت تپه‌هایی با شیب ملایم وجود دارد که جهت آن شمالی-جنوبی و گاهی شمال غربی-جنوب شرقی می‌باشد. سازند میلا، قدیمی‌ترین سازند منطقه است که مربوط به دوره کامبرین میانی است. در منطقه مورد مطالعه، مجموعه‌های مختلفی در زمان کواترنر تشکیل شده است. این رسوبات در سراسر دشت و نیز در پای ارتفاعات گسترش دارند. این مجموعه به‌طور عمده از نهشته‌های کواترنری، از پادگانه‌ها و دشت‌های آبرفتی و آبرفت‌های رودخانه‌ای که تمام کوهپایه‌ها و دشت‌ها و مسیل‌ها را پوشانده و نیز کفه‌های نمکی و رسی و ماسه‌های بادی تشکیل شده است. بیشترین مساحت خاک‌های منطقه مورد مطالعه به ترتیب رده‌های Aridisols و سپس Entisols را شامل می‌شوند.

روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش پیمایشی-تحلیلی است. در ابتدا اقدام به مطالعه و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و پردازش اولیه‌ی آن به‌منظور ایجاد پایگاه داده در محیط نرم‌افزاری شد، بدین منظور از تصاویر سنجنده های TM، ETM⁺، OLI ماهواره Landsat مربوط به سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ استفاده شد (جدول ۱). همچنین از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه ژئومورفولوژی (اختصاصی و همکاران، ۱۳۷۵)، تصاویر گوگل ارث، مشاهدات میدانی برای شناسایی لندفرم‌های منطقه و تهیه نقاط تعلیمی استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره Landsat مورد استفاده

شماره ردیف	شماره Landsat	سنجنده	شماره تصویر	تاریخ تصویربرداری	
				گذر/ردیف	شمسی میلادی
۱	۴-۵	TM	۱۲	۱۳۶۶/۳/۱	۲۲/۵/۱۹۸۷
۲	۷	ETM+	۶	۱۳۷۹/۴/۲۸	۱۷/۵/۲۰۰۰
۳	۸	OLI	۹	۱۳۹۵/۳/۱	۲۱/۵/۲۰۱۶

(مأخذ: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

سپس این داده‌ها با هدف استخراج اطلاعات مورد تحلیل قرار گرفتند. جهت تهیه نقشه لندفرم‌های ژئومورفولوژی از سه الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده شامل حداکثر شباهت، حداقل فاصله و فاصله ماها لانویس استفاده شد. یافته‌های این

مرحله جهت اعتبارسنجی از طریق نمونه‌های تعلیمی، کنترل شدند. سپس نقشه لندفرم‌ها در ۱۵ کلاس تهیه و به‌عنوان خروجی تحقیق معرفی گردید.

در این پژوهش به‌منظور پردازش تصاویر، تهیه‌ی نقشه‌های طبقه‌بندی لندفرم‌ها و تجزیه و تحلیل تغییرات آن‌ها از نرم‌افزارهای ENVI 5.3، ArcGIS 10.4.1 و Excel 2013 استفاده شد. مراحل انجام تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

الف) پیش‌پردازش و آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای

مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، یکی از مهم‌ترین مراحل در پردازش تصاویر است؛ چرا که تمامی مناسبات بعدی بر اساس تصویر تولیدی در این مرحله انجام می‌گیرد. نوع و نحوه انجام این عملیات بسته به عوامل مختلفی چون نوع داده‌های مورد استفاده و هدف تحقیق، متغیر خواهد بود. در این پژوهش ابتدا بروی تصاویر، در نرم‌افزار ENVI 5.3، تصحیح رادیومتری و سپس تصحیح اتمسفری با الگوریتم فلش^۲ انجام شد، با این الگوریتم تصاویر رادیانس به رفلکتانس تبدیل می‌شود. همچنین این الگوریتم، طول موج‌هایی را از گستره مرئی تا 1 میکرومتر را پوشش می‌دهد و بیشتر بر روی تصاویر چند طیفی و فرا طیفی کار می‌کند. این مدل می‌تواند تصویر را هم در هندسه دید قائم و هم در هندسه دید مایل از لحاظ تأثیرات اتمسفری تصحیح کند (صفری و همکاران، ۱۳۹۳: ۵).

ب) طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

برای انجام طبقه‌بندی نظارت‌شده، انتخاب نمونه‌های تعلیمی مورد نیاز از کلاس‌های مختلف با شناخت از منطقه و با استفاده از اطلاعات جانبی و بر مبنای DN^3 پیکسل‌های تصویر رنگی RGB^4 تصاویر ماهواره لندست صورت گرفت. انتخاب این تصویر رنگی، صرفاً جهت شناسایی کلاس‌های مورد نظر و انتخاب بهینه نمونه‌های تعلیمی بود. برای این منظور در منطقه مورد مطالعه به فراخور سهم هر طبقه تعداد مناسبی نمونه تعلیمی به‌طور تصادفی با استفاده از بررسی‌های میدانی، تصویر گوگل ارث و تصویر رنگی کاذب انتخاب شدند. در انتخاب نمونه‌های تعلیمی سعی شد ضمن اینکه معرف خوبی برای طبقات مورد نظر باشد، از پراکنش خوبی نیز برخوردار باشد. در ادامه به شرح مختصری از روش‌های مورد استفاده اشاره می‌شود:

۱) طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با روش حداکثر احتمال: از میان روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده، روش حداکثر احتمال تاکنون به‌عنوان دقیق‌ترین و پر استفاده‌ترین روش‌ها شناخته شده است. در روش مذکور فرض بر این است که همه‌ی مناطق آموزشی دارای پراکنش نرمال هستند. در حقیقت نمونه‌های کلاس‌های آموزشی باید معرف آن کلاس باشند، بنابراین تا حد امکان باید از تعداد نمونه‌های بیش‌تری استفاده شود تا تغییرات بسیاری از ویژگی‌های طیفی در این گستره‌ی پیوسته قرار گیرد. بنابراین شرط توزیع نرمال و تصادفی بودن نمونه‌های تعلیمی در روش بیشترین احتمال اهمیت خاصی دارد (فاطمی و رضایی، ۱۳۸۴، ۲۱۲).

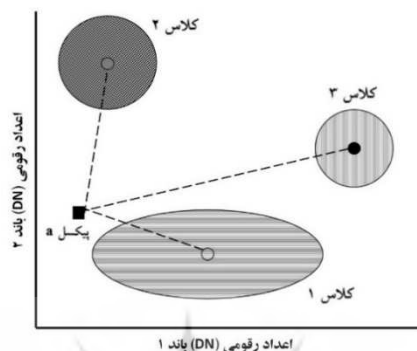
۲) طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با روش حداقل فاصله: روش حداقل فاصله یا به‌طور دقیق‌تر حداقل فاصله از میانگین برای کلاس‌ها، یک روش طبقه‌بندی است که در آن از داده‌های آموزشی فقط برای تعیین کلاس‌های متوسط استفاده می‌شود. در این روش نخست مقادیر میانگین طیفی در هر باند و برای هر کلاس تعیین می‌شود و پس از مشخص

2 - FLAASH

3 - Digital Number

4 - Red Green Blue

شدن پیکسلی که میانگین ارزش طیفی نمونه‌های انتخابی هر طبقه را به خود اختصاص داده است، فاصله اقلیدسی هر پیکسل طبقه‌بندی نشده با پیکسل‌های میانگین مقایسه می‌شود و پیکسل مورد نظر با کلاسی اختصاص می‌یابد که کمترین فاصله را با میانگین آن دارد (ریچاردز^۵، ۲۰۰۶). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است پیکسل a به کلاس ۱ تعلق می‌گیرد که کمترین مقدار فاصله را تا میانگین آن کلاس دارد. این نوع طبقه‌بندی از نظر ریاضی ساده و از نظر محاسباتی کاراست ولی مبنای نظری آن به اندازه طبقه‌بندی حداکثر مشابهت قوی نیست (تسو^۶ و همکار، ۲۰۰۹).



شکل ۲: تجسم شماتیک طبقه‌بندی حداقل فاصله از میانگین (سفیانیان و مدیان، ۱۳۹۰)

۳) طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با روش فاصله ماکسیمی: این روش یک طبقه‌بندی حساس به مقدار فاصله است که از روش‌های آماری برای هر کلاس استفاده می‌کند. این روش شبیه به طبقه‌بندی حداکثر مشابهت است اما فرض بر این است که تمام کلاس‌ها، کوواریانس یکسانی دارند بنابراین یک روش سریع‌تری است. همه پیکسل‌ها به نزدیک‌ترین کلاس طبقه‌بندی می‌شوند مگر اینکه یک آستانه‌ی فاصله در نظر گرفته شود که در این حالت برخی پیکسل‌ها ممکن است در طبقه‌بندی در نظر گرفته نشوند.

حاصل نتایج طبقه‌بندی تصاویر مورد استفاده نقشه‌هایی است که در آن‌ها به علت غیریکنواختی پدیده‌های مختلف در سطح زمین و همچنین حساسیت هر کدام از آن‌ها به بازتاب‌ها، دارای پیکسل‌های پراکنده و نامتجانس با کلاس‌های شناخته شده می‌باشد که به منظور به دست آوردن تصویر طبقه‌بندی شده مطلوب و با وضوح بیشتر و رفع حالت دانه فلفلی از فیلتر median در اندازه ۵×۵ استفاده شد.

ج) ارزیابی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده

در این مرحله نیاز به اطلاعات زمینی یا مناطق آزمایشی می‌باشد. مناطق آموزشی در حقیقت شامل نواحی نمونه از طبقات مورد نظر می‌باشد که معمولاً از طریق بازدیدهای میدانی و تصاویر گوگل ارث تهیه می‌گردند (آرخی، ۱۳۹۳، ۳۵). ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی شده به روش‌های مختلف، با قطع دادن هر یک از نقشه‌های طبقه‌بندی شده با نقشه واقعیت زمینی از دقت کل^۷ و ضریب کاپا^۸ انجام می‌گیرد (لو^۹ و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۷۵).

5 - Richards

6 - Tso

7 - Overall accuracy

8 - Kappa Coefficient

9 - Lu

دقت کلی از نسبت مجموع پیکسل‌هایی که درست طبقه‌بندی شده‌اند (در محور اصلی ماتریس طبقه‌بندی قرار دارند) به کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده به دست آمد. دقت کلی با رابطه ۱ قابل بیان می‌باشد:

$$OA = \frac{1}{N} \sum P_{ii} \quad \text{رابطه ۱:}$$

OA : دقت کلی، $\sum P_{ii}$: مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا، N : تعداد پیکسل‌های آزمایشی (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۳، ۷۰). با توجه به اینکه برای نهایی نمودن نقشه لندفرم، باید همه شاخص‌های درست و نادرست طبقه‌بندی با یک و یا چند شاخص آماری معتبر برآزش داده شود از شاخص کاپا استفاده می‌شود، این شاخص با رابطه ۲ قابل بیان هست (کنگلتون^{۱۰}، ۱۹۹۱، ۴۰). اگر مقدار کاپا برابر ۱ باشد درصد هماهنگی بسیار خوب است و اگر این ضریب صفر شود بیانگر عدم هماهنگی است.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n G_i C_i}{N^2 - \sum_{i=1}^n G_i C_i} \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این رابطه، K : شاخص کاپا، n : تعداد ردیف ماتریس طبقه‌بندی، $m_{i,i}$: تعداد مشاهدات در ردیف و ستون (محور اصلی ماتریس)، C_i : مجموع مشاهدات در ردیف (مجموع ردیف برای هر لندفرم)، G_i : مجموع مشاهدات در ستون (مجموع ستون برای هر لندفرم)، N : مجموع کل مشاهدات ماتریس طبقه‌بندی.

(د) آشکارسازی تغییرات^{۱۱}

در این پژوهش به منظور آشکارسازی تغییرات لندفرم‌های بیابانی از روش مقایسه "پس از طبقه‌بندی"^{۱۲} استفاده شد. در این روش، می‌توان به اطلاعات تغییرات "از-به" منطقه نیز دست یافت. با استفاده از این روش امکان تعیین تغییرات رخ داده در هر کلاس نسبت به کلاس دیگر وجود دارد. در نهایت نقشه خروجی ماهیت تغییرات در محیط GIS تهیه شد.

بحث و یافته‌ها

با توجه به بازبندی‌های میدانی، منابع موجود و نقشه دستی ژئومورفولوژی دشت یزد-اردکان (اختصاصی و همکاران، ۱۳۷۵)، نسبت به شناخت و تفکیک لندفرم‌های منطقه اقدام گردید. مشخصات کلاس‌های لندفرم در جدول ۲ ذکر شده است.

۱۰ - Congalton

۱۱ - Change Detection

۱۲ - Post Classification

جدول ۲: ویژگی کلاس‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه

طبقه	کلاس	ویژگی‌ها
۱	مخروط افکنه	در منطقه واریزه‌های بادبزی با منشأ آبرفتی در محدوده ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۰۲۷ متر از سطح دریا قرار دارند، بخشی از مخروط افکنه‌ها در زیر عناصر آبرفتی دشت‌سرهای لخت دفن شدند، آبراهه‌های متعدد توأم با پوشش قله‌سنگی تا سنگریزه پوشش سطحی آن‌هاست.
۲	دشت‌سر لخت	وجود شبکه‌های منفرد و به هم پیوسته آبراهه‌ها در این لندفرم توأم با تراس‌های جانبی، وجود آبرفت‌های دانه‌درشت و قله‌سنگ‌های مدور در آبراهه‌ها، انبوهی پوشش گیاهی ۲۰ درصد با تراکم بیشتر در مسیر آبراهه‌ها از ویژگی‌های این دشت‌سر در منطقه است.
۳	دشت رسی	به اصطلاح محلی، اراضی دقی بستر اصلی سایر لندفرم‌های موجود در دشت‌سر پوشیده هستند. در غالب نقاط این لندفرم، آثار فرسایش بادی به دلیل وجود خاک ریزدانه، به صورت پوسته پوسته شدن و شلجی شکل بر سطح خاک دیده می‌شود که به طور عام رأس آن‌ها به سمت شمال غرب است.
۴	دشت‌سر پوشیده	دشت‌سر پوشیده منطقه با شیب عمومی جنوب شرقی - شمال غربی به عنوان زهکش دشت‌سرهای اپانداز و لخت عمل می‌کنند که اغلب شیب شمالی - جنوبی و بالعکس دارند. ظهور لندفرم‌های متنوع فرسایش آبی و بادی به ویژه باد در آن.
۵	اینسلیبرگ	قله‌های منفرد که به صورت شکستگی و یا تغییر شیب ناگهانی در دشت‌سر لخت در غرب منطقه وجود دارند.
۶	دشت‌سر اپانداز	سطوحی نسبتاً هموار هستند که با شیب ملایم ۵-۱ درصد در حد واسط دشت‌سر لخت و پوشیده دیده می‌شوند. با کاهش شیب و سرعت جریان، ذرات نسبتاً درشت در بستر مسیل‌ها رسوب کرده و باعث تغییر دائمی بستر می‌شوند. تشکیل شبکه‌های متعدد آبراهه‌ای به نام اوئد در این واحد که در اصطلاح پخش آب نیز گفته می‌شود.
۷	کلوت	در منطقه رستاق بر سطح خاک‌های ریزدانه و دارای املاح، فرسایش توأم آبی - بادی موجب برجستگی‌های گنبدی شکل با ارتفاع متوسط ۱ متر شده که به آن‌ها در اصطلاح کلوت (کلوتک) و به فرورفتگی‌های کانال مانند آن یاردانگ گفته می‌شود. امتداد آن‌ها اغلب نشان‌دهنده جهت بادهای فرساینده از شمال غرب به جنوب شرق است.
۸	ارگ	منطقه مورد مطالعه، بخش شمال غربی ارگ یزد است که از مرفولوژی عمومی نامنظمی برخوردارند و به شکل سیلک خوشه‌ای در جهت منفی و به سمت راست (شرق و جنوب شرق) در حال تکامل است. در امتداد جنوب شرقی - شمال غربی از قدمت تپه‌های ماسه‌ای یزد کاسته شده و جوان‌ترین و درعین حال فعال‌ترین آن‌ها در محدوده حجت‌آباد و رستاق ملاحظه می‌شود. در این مناطق تپه‌های طولی و برخانوئید و برخان دیده می‌شود. *اشکال تراکمی دیگر مثل پیکان ماسه‌ای و نبکا نیز در کنار اشکال تپه‌های ماسه‌ای دیگر دیده می‌شود.
۹		تپه‌های طولی
۱۰		برخانوئید
۱۱	تپه‌ماهورها	تپه‌هایی با ارتفاع کمتر از ۲۵۰ متر، در امتداد شمال غرب - جنوب شرق در حدفاصل دشت‌سر اپانداز و پوشیده‌اند، مرتفع‌ترین آن‌ها تپه حاجی‌آباد رستاق هست که با پوشش غالب قله‌سنگ تا سنگریزه‌ای به صورت رگ ظاهر شده است.
۱۲	کوه‌های مرتفع	ارتفاعاتی شامل تشکیلات دوران مزوزوئیک، رخساره گرانیت و گرانودیوریت شیرکوه هستند که به صورت بیرون‌زدگی در جنوب، جنوب غرب و غرب منطقه و ارتفاعات خونزا نیز در شمال شرق منطقه مشاهده می‌شوند.
۱۳	گنبد نمکی	در حوالی تاق‌دیس حاجی‌آباد رستاق، سنگ‌های پالئوژن شامل تشکیلات نمکی با ضخامت زیاد رخنمون دارد و در بعضی از قسمت‌ها به سمت جنوب شرق به صورت گنبد‌های نمکی ظاهر شده است.
۱۴	سیخا	در دشت‌سر پوشیده و به ویژه در حدفاصل حاجی‌آباد تا اردکان، سفره‌های عدسی شکلی به صورت چاله‌های موقت شوره‌زار با منشأ تکتونیکی هستند که اغلب معلول ناهمواری‌های نئوژن دوران سوم می‌باشند. این اراضی در حاجی‌آباد به دلیل فراوانی نمک سدیم دار و بلورهای گچ، در مقابل فرسایش بادی بسیار حساس و ناپایدار است و در حال حاضر نیز در تشکیل تپه‌های ماسه‌ای محدوده حجت‌آباد و الله‌آباد نقش موثری ایفا می‌کند.

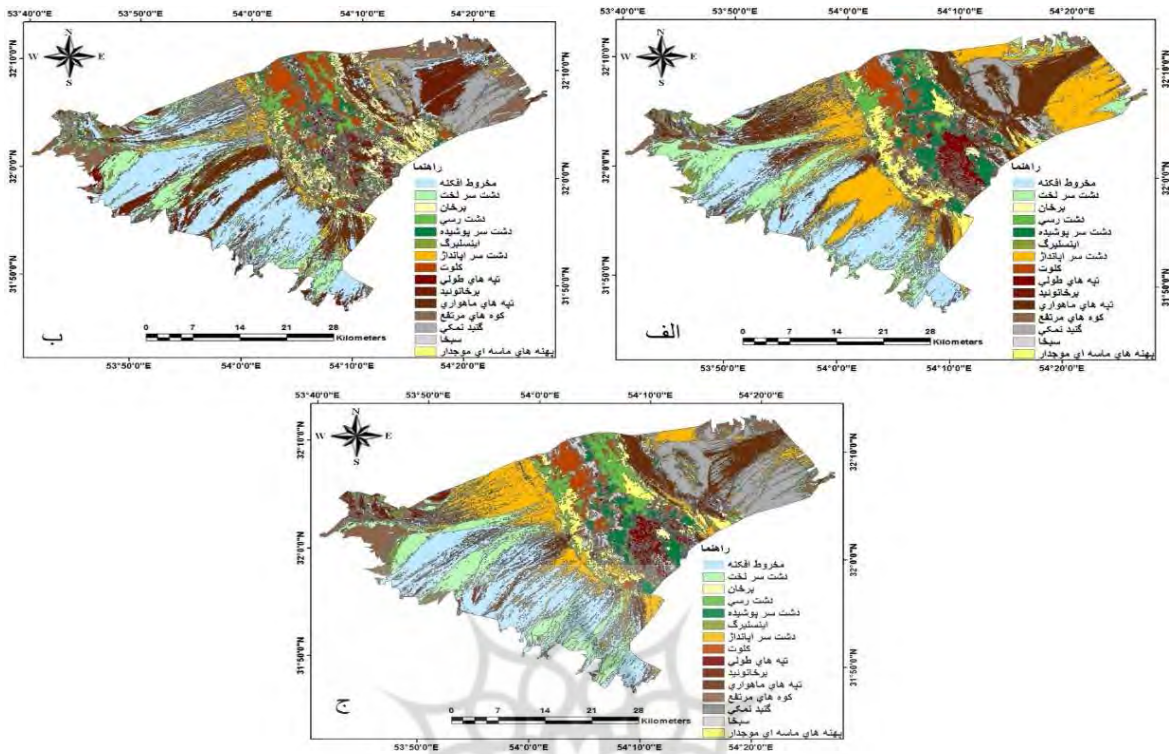
۱۵	تپه‌های ماسه‌ای موجدار	جزیی از دشت‌سر پوشیده‌اند. گاهی در مناطق برداشت با آبرفت ریزدانه، اشکالی فاقد ریپل مارک مشخص و با عناصر شن متوسط تا ماسه درشت دیده می‌شود؛ در محدوده بندرآباد و میمونه یزد و در نزدیکی ایستگاه تثبیت ماسه شهید بهجت حقیقی مشاهده می‌شوند.
----	---------------------------	---

(مأخذ: اختصاصی و همکاران، ۱۳۷۵، ۱۵۳ - ۱۰۰)

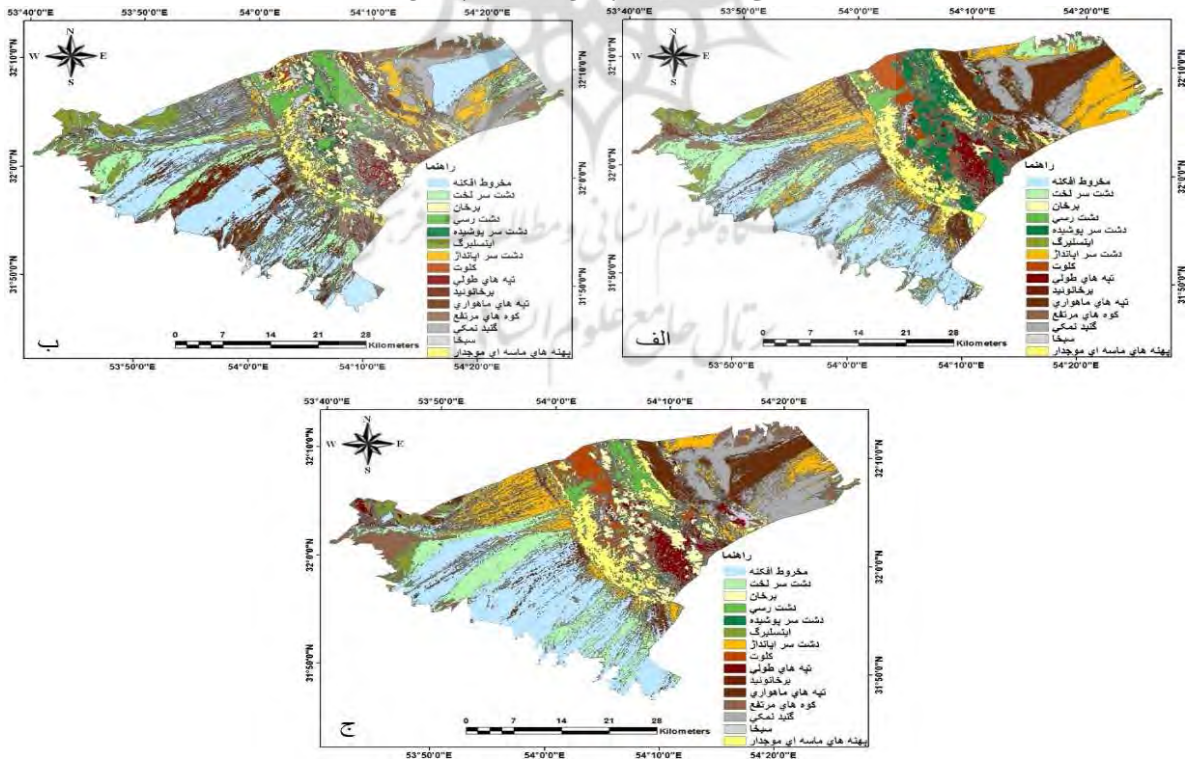
با توجه به اینکه در ارگ موجود در منطقه، اشکال تراکمی بادی دیگر مانند نبکا و پیکان ماسه‌ای نیز در ارگ دیده می‌شوند ولی چون در منطقه موردنظر در سال‌های گذشته به‌منظور تثبیت ماسه‌های روان، تاغکاری شده است؛ در طبقه‌بندی طیفی تصاویر، نبکا و پیکان ماسه‌ای به دلیل ماهیت طیفی مشابه با برخان، برخانوئید و تپه‌های طولی تاغکاری شده قابل تفکیک نبودند و بنابراین به‌طور کلی این اشکال تراکمی کوچک‌تر در کلاس ارگ قرار گرفتند و ۱۵ لندفرم ژئومورفولوژی در منطقه مشخص شدند (شکل ۳).



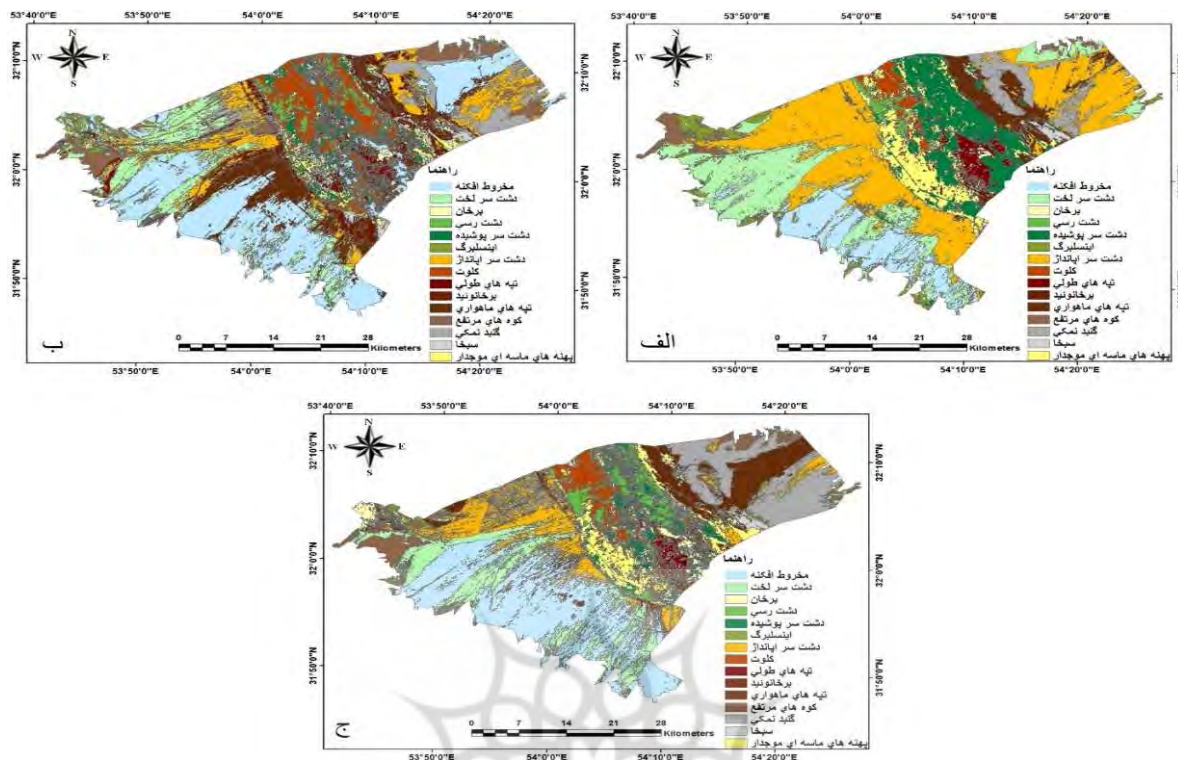
شکل ۳: نمونه‌ای از لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه: الف: تپه‌های ماسه‌ای ب: نبکا ج: گنبد نمکی د: تپه‌ماهورها در مرحله بعد پس از تصحیحات تصاویر، نقشه‌های ژئومورفولوژی طی ۳۰ سال آماری با سه الگوریتم طبقه‌بندی تصاویر حداکثر شباهت، حداقل فاصله، فاصله ماها لانویس تهیه شد (شکل ۴، ۵ و ۶).



شکل ۴: نقشه‌های ژئومورفولوژی سال ۱۹۸۷ حاصل از طبقه‌بندی تصاویر لندست به ۳ روش پارامتریک: الف) حداکثر شباهت (ب) حداقل فاصله ج) فاصله ماهالانویس (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶).



شکل ۵: نقشه‌های ژئومورفولوژی سال ۲۰۰۰ حاصل از طبقه‌بندی تصاویر لندست به ۳ روش پارامتریک: الف) حداکثر شباهت (ب) حداقل فاصله ج) فاصله ماهالانویس (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶).



شکل ۶: نقشه‌های ژئومورفولوژی سال ۲۰۱۶ حاصل از طبقه‌بندی تصاویر لندست به ۳ روش پارامتریک: الف) حداکثر شباهت (ب) حداقل فاصله ج) فاصله ماکسیمی (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶).

به‌منظور ارزیابی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از سه الگوریتم، دقت کل و ضریب کاپا طی ۳۰ سال محاسبه شد (جدول ۳) به‌طور کلی تفاوت‌های مطلق دقت طبقه‌بندی در میان سه روش طبقه‌بندی خیلی زیاد نیست. با این حال بسیاری از تفاوت‌ها از نظر آماری معنی‌دار هستند. نتایج نشان داد که بهترین الگوریتم جهت طبقه‌بندی لندفرم‌ها در سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶، حداکثر شباهت است که به ترتیب با دقت کلی ۹۱/۵۰، ۹۳/۲۲ و ۹۳/۳۵ و ضریب کاپا ۰/۸۷، ۰/۸۹ و ۰/۸۹ بالاترین دقت را داشت.

جدول ۳: ارزیابی دقت الگوریتم‌های طبقه‌بندی حداکثر شباهت، حداقل فاصله و فاصله ماکسیمی تصاویر ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶

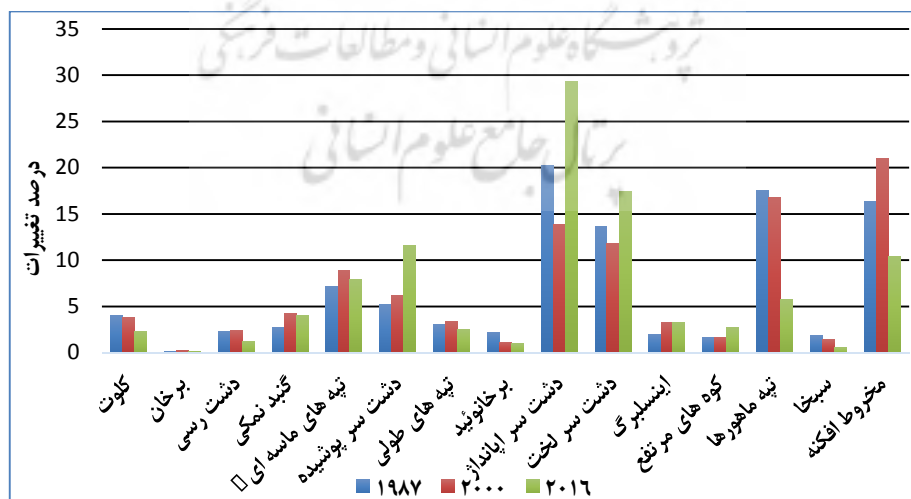
۲۰۱۶		۲۰۰۰		۱۹۸۷		الگوریتم‌های طبقه‌بندی
ضریب کاپا	دقت کل (درصد)	ضریب کاپا	دقت کل (درصد)	ضریب کاپا	دقت کل (درصد)	
۰/۸۹	۹۳/۳۵	۰/۸۹	۹۳/۲۲	۰/۸۷	۹۱/۵۰	حداکثر شباهت
۰/۸۶	۹۱/۹۱	۰/۸۷	۹۲/۴۵	۰/۸۳	۸۹/۳۱	فاصله ماکسیمی
۰/۷۹	۸۸/۶۲	۰/۸۰	۸۷/۶۶	۰/۸۲	۸۸/۸۵	حداقل فاصله

در نهایت به‌منظور بررسی ماهیت تغییرات از روش مقایسه "پس از طبقه‌بندی" استفاده شد که این روش بروی الگوریتم حداکثر شباهت که نتیجه مطلوب‌تری داشت اعمال شد. جدول ۴ تغییرات طبقات لندفرم‌ها برحسب مساحت و درصد در سه سال ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ و همچنین شکل ۷ آشکارسازی تغییرات لندفرم‌های ژئومورفیک را طی ۳۰ سال آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۴: تغییرات مساحت (هکتار و درصد) لندفرم‌های ژئومورفولوژی در دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۶

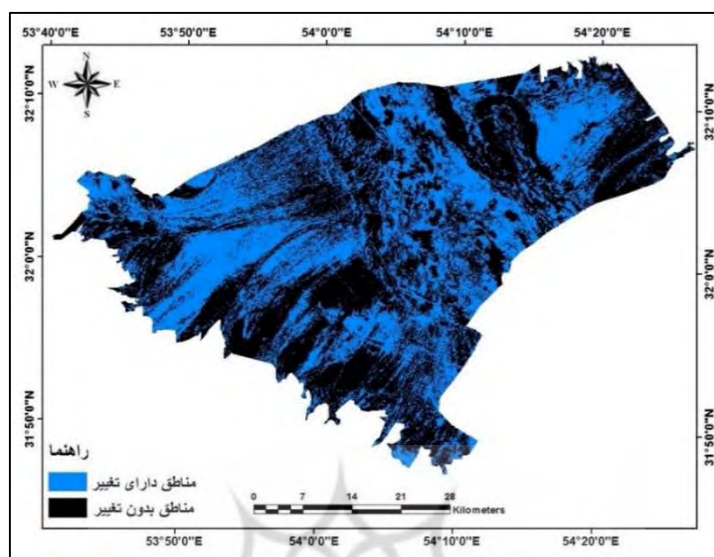
طبقه	کلاس	مساحت ۱۹۸۷		مساحت ۲۰۰۰		مساحت ۲۰۱۶	
		هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد
۱	مخروط افکنه	۲۵۵۵۰/۳۹	۱۶/۳۴	۳۲۸۹۱/۴۹	۲۱/۰۴	۱۶۲۴۹/۹۰	۱۰/۳۹
۲	دشت سر لخت	۲۱۳۶۷/۳۳	۱۳/۶۶	۱۸۳۸۵/۴۷	۱۱/۷۶	۲۷۲۲۹/۱۹	۱۷/۴۱
۳	برخان	۲۷۴/۸۵	۰/۱۷	۳۵۲/۸	۰/۲	۱۷۸/۴۸	۰/۱۱
۴	دشت رسی	۳۵۷۷/۹۸	۲/۲۸	۳۷۷۷/۵۷	۲/۴۱	۱۹۲۲/۵۶	۱/۲۲
۵	دشت سر پوشیده	۸۰۷۵/۸۵	۵/۱۶	۹۶۲۰/۶۴	۶/۱۵	۱۸۱۶۲/۵۲	۱۱/۶۱
۶	اینسلیبرگ	۳۱۳۹/۵۴	۲/۰۰۸	۵۰۷۲/۹۴	۳/۲۴	۵۰۸۲/۰۶	۳/۲۵
۷	دشت سر اپانداز	۳۱۶۱۵/۷۲	۲۰/۲۲	۲۱۶۶۲/۱	۱۳/۸۵	۴۵۸۹۵/۴۸	۲۹/۳۵
۸	کلوت	۶۲۵۰/۷۱	۳/۹۹	۵۸۹۱/۴۹	۳/۷۶	۳۶۳۷/۵۶	۲/۳۲
۹	تپه های طولی	۴۷۱۰/۱۸	۳/۰۱۳	۵۲۹۹/۲	۳/۳	۳۸۷۳/۱۵	۲/۴۷
۱۰	برخانوبند	۳۴۳۳/۰۵	۲/۱۹	۱۸۱۶/۵۶	۱/۱۶	۱۴۷۳/۲۷	۰/۹۴
۱۱	تپه ماهورها	۲۷۴۹۳/۶۶	۱۷/۵۸	۲۶۲۵۴/۰۸	۱۶/۷۹	۸۹۲۹/۶۸	۵/۷۱
۱۲	کوه های مرتفع	۲۴۹۴/۳۹	۱/۵۹	۲۶۲۲/۵۲۱۲	۱/۶۷	۴۱۹۱/۶۹	۲/۶۸
۱۳	گنبد نمکی	۴۲۸۱/۳۰	۲/۷۳	۶۶۷۷/۷۳	۴/۲۷	۶۳۲۷/۵۶	۴/۰۴
۱۴	سیخا	۲۸۳۵/۶۷	۱/۸۱	۲۱۴۹/۶۵	۱/۳۷	۸۲۱/۰۸۴	۰/۵۲
۱۵	تپه های ماسه ای موجدار	۱۱۲۱۰/۷۷	۷/۱۷	۱۲۸۳۷/۲۳	۸/۸۵	۱۲۳۳۷/۲۳	۷/۸۹
	جمع کل	۱۵۶۳۱۱/۴۷	۱۰۰	۱۵۶۳۱۱/۴۷	۱۰۰	۱۵۶۳۱۱/۴۷	۱۰۰

همانطور که از جدول مذکور و شکل ۶ مشخص است کلاس غالب در سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۶ کلاس دشت سر اپانداز است که در سال ۲۰۰۰ روند نزولی را طی کرده است. سپس تپه ماهورها با ۱۷/۵۸ درصد از کل منطقه در رتبه بعدی بیشترین مساحت در سال ۱۹۸۷ قرار دارد ولی روند نزولی ۱۱/۵۸ درصد تا سال ۲۰۱۶ داشته است. در سال ۱۹۸۷ کلاس برخان با ۰/۱۷ درصد کمترین مساحت را به خود اختصاص داده است و روند نزولی را با ۰/۱۱ درصد در سال ۲۰۱۶ طی کرده است.



شکل ۷: تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژی با الگوریتم حداکثر شباهت طی سال‌های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ در نهایت بر اساس نتایج نهایی حاصل از تجزیه و تحلیل‌ها، نقشه کلی ماهیت تغییرات منطقه طی ۳۰ سال آماری نیز تهیه شد که کلیه تغییرات ایجاد شده در لندفرم‌ها طی این دوره شامل کاهش و افزایش پیکسل به پیکسل آن‌ها، مناطق دارای

تغییر را نشان می‌دهند و همچنین مناطق بدون تغییر، کلیه پیکسل‌هایی از تصویر که هیچ تغییری از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶ نداشتند را نشان می‌دهد (شکل ۸).



شکل ۸: نقشه ماهیت تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژی در دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۶

نتیجه‌گیری

مناطق بیابانی از محیط‌های دینامیک و پویای ژئومورفولوژیکی در جهان و به‌خصوص در ایران محسوب می‌شوند که در نتیجه فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی، ممکن است بسط و گسترش نموده و یا محدود می‌شوند. استفاده از داده‌های دورسنجی در زمان‌های مختلف به دلیل ویژگی تکراری بودن و پوشش دادن وسیع، شناسایی و بررسی لندفرم‌های متغیر و پویا در مناطق بیابانی و تحلیل روند بیابان‌زایی را امکان‌پذیر می‌کند. بر این اساس روش‌های رقومی مختلفی جهت آشکارسازی و کشف تغییر و تحولات پدیده‌های سطح زمین در سنجش‌ازدور توسعه داده شده است. در این پژوهش با استفاده از سری داده چند طیفی و تعیین کارایی سه روش طبقه‌بندی، جهت تهیه نقشه لندفرم‌های ژئومورفیک منطقه و بررسی تغییرات آن‌ها پرداخته شد. نتایج حاصل از طبقه‌بندی لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه مشخص کرد که الگوریتم حداکثر شباهت، طبقه‌بندی دقیق‌تری را نسبت به الگوریتم‌های حداقل فاصله و فاصله ماله‌لانویس ارائه می‌دهد که نتیجه حاصله با نتایج شایان (۱۳۹۱) و نعیمی نظام‌آباد (۱۳۸۸)، مطابقت دارد. همچنین جدول درصد و مساحت تغییرات لندفرم‌ها در طی ۳۰ سال آماری نشان داد که لندفرم‌هایی مانند برخان، دشت رسی، تپه‌های طولی، برخان‌تپه و کلوت که در گستره توسعه شهر قرار داشته‌اند دارای روند نزولی بودند، این نتیجه با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد، همانطور که اختصاصی (۱۳۸۳) به این نتیجه رسید که ارگ یزد به دلیل تغییر کاربری تپه‌های ماسه‌ای به اراضی کشاورزی و غیره، با رشد منفی در سال‌های بین ۱۳۵۳ تا ۱۳۸۲ مواجه بوده است. نتایج مطالعه‌ای دیگر بیانگر این است که محدوده شهر اردکان با کاهش وسعت مناطق بیابانی به میزان ۱۶۰ هکتار و افزایش مساحت کاربری‌های دیگر بود (مرادی و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۰). قابل ذکر است که مساحت لندفرم‌های ناشی از تجمع ماسه‌ای شامل تپه‌های طولی، برخان و تپه‌های ماسه‌ای موجود، تا سال ۲۰۰۰ با افزایش ناچیزی مواجه شده است، این نتیجه نیز با نتایجی که میرباقری و همکاران (۱۳۸۷) در پایش تغییرات پوشش گیاهی دشت یزد-اردکان به دست آوردند، مطابقت دارد؛ بر اساس نتایج آن تحقیق، بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۸ نسبت به سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۹۹۰ کاهش ۱۲ میلی‌متری متوسط بارندگی رخ داده است و به تبع آن جنگل‌های دست کاشت کاهش یافتند و به این دلیل مساحت تپه‌های ماسه‌ای افزایش ناچیزی داشتند. همچنین بر اساس پژوهش حاضر مشخص شد که مساحت سبزا (اراضی شور)، طی ۳۰ سال دارای روند نزولی بوده است، تطابق این

نتیجه نیز با نتایج مطالعه میرباقری و همکاران (۱۳۸۷) نشان داد که با افزایش تعداد حفر چاه در دشت یزد-اردکان، امکان به زیر کشت بردن اراضی زیادی فراهم شده تا حدی که ۴۶۵ هکتار از اراضی شور را نیز ساکنین منطقه به زیر کشت برده‌اند. بنابراین در تغییرات لندفرم‌های بیابانی منطقه عوامل طبیعی توأم با عوامل انسانی نقش داشتند. همچنین نتایج نشان داد که دشت سر اpanداز و دشت سر لخت و پوشیده دارای روند صعودی قابل توجهی تا سال ۲۰۱۶ بودند. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج، تفکیک و تحلیل تغییرات لندفرم‌هایی مانند گنبد نمکی و اینسبرگ که در بازه‌های زمانی طولانی مدت ایجاد شده‌اند با روش الگوریتم حداکثر شباهت و طی ۳۰ سال آماری به راحتی امکان پذیر نیست زیرا بر اساس نتایج طی ۳۰ سال آماری دارای روند صعودی بودند و این به دلیل شباهت انعکاسات طیفی مجاور آن‌هاست که پیکسل‌های بیشتری را با این الگوریتم جایگزین پیکسل‌های این لندفرم‌ها کرده‌اند.

منابع

- آرخی، صالح، ۱۳۹۳، تهیه نقشه کاربری اراضی دشت عباس ایلام با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال، نشریه مرتع‌داری، سال اول، شماره ۲، صص ۴۳-۳۰.
- اختصاصی، محمدرضا، حسن احمدی، ناصر باغستانی، علی خلیلی و سادات فیض نیا، ۱۳۷۵، منشأیابی تپه‌های ماسه‌ای در حوزه دشت یزد-اردکان، چاپ اول، انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، تهران.
- اختصاصی، محمدرضا، ۱۳۸۳، بررسی مورفومتری و مورفودینامیک رخساره‌های فرسایش بادی دشت یزد-اردکان و تعیین شاخص‌های این فرایند جهت کاربرد در مدل‌های ارزیابی بیابان‌زایی، رساله دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی.
- اکبری، مرتضی، حمیدرضا کریم زاده، رضا مدرس و بهاره چکشی، ۱۳۸۶، ارزیابی و طبقه‌بندی بیابان‌زایی با فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی: منطقه خشک شمال اصفهان، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۴، شماره ۲، صص ۱۴۲-۱۲۴.
- جمشید مقدم، هادی؛ مجید محمدی اسکوئی و حمید ذکری، ۱۳۹۳، طبقه‌بندی تصاویر استر بر اساس نتایج پردازش داده‌های فراطیفی هایپریون از دیدگاه کانی‌شناسی در منطقه لاهرود، نشریه مهندسی معدن، دوره نهم، شماره ۲۵، صص ۱۰۸-۹۷.
- حبیبی، علیرضا، صمد شادفر و معصومه صادقی، ۱۳۹۳، بررسی شدت بیابان‌زایی در رخساره‌های ژئومورفولوژی با استفاده از GIS در استان خوزستان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال چهاردهم، شماره ۳۲، صص ۱۵۹-۱۴۱.
- سعیدزاده، فاطمه، محمودرضا صاحبی، حمید عبادی و وحید صادقی، ۱۳۹۴، آشکارسازی تغییرات تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه با استفاده از ترکیب روش‌های ماسک باینری و مقایسه پس از طبقه‌بندی، نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره پنجم، شماره ۳، صص ۱۲۸-۱۱۱.
- سفیانیان، علیرضا و ملیحه السادات مدنیان، ۱۳۹۰، مقایسه روش‌های طبقه‌بندی کننده حداکثر شباهت و حداقل فاصله از میانگین در تهیه نقشه پوشش اراضی، مطالعه موردی: استان اصفهان، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و خاک، سال پانزدهم، شماره ۵۷، صص ۲۶۴-۲۵۳.
- سیف، عبدالله و ملیحه محمدی، ۱۳۸۹، شناسایی و جداسازی رخساره‌های ژئومورفولوژی بخشی از پلاهای گاوخونی با استفاده از قابلیت‌های RS و GIS، نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۳، شماره ۴، صص ۴۸۸-۴۷۱.

- شایان، سیاوش، مجتبی یمانی، منوچهر فرج زاده و علی احمدآبادی، ۱۳۹۱، طبقه‌بندی نظارت‌شده لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مناطق خشک با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریک، مطالعه موردی: منطقه مرنجاب، سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال چهارم، شماره ۲، صص ۱۹-۲۸.
- صفری، عبدالرضا، حمیدرضا آوریده، سعید همایونی و صفا خزایی، ۱۳۹۳، برآورد عمق آب‌های ساحلی به کمک تصاویر سنجش‌ازدور فراطیفی، نشریه مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دوره ششم، شماره ۱، صص ۹-۱.
- عطاپورفرد، عباس، مجید حسینی و محمد خسروشاهی، ۱۳۸۳، شناسایی و تفکیک مناطق بیابانی از دیدگاه ژئومورفولوژیکی، مطالعه موردی: استان تهران، فصلنامه پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۱، شماره ۳، ۲۷۵-۲۸۶.
- علوی پناه، کاظم، حسن احمدی و چقی بایرام کمکی، ۱۳۸۳، مطالعه رخساره‌های ژئومورفولوژی منطقه یاردانگ بیابان لوت بر اساس تفسیر واحدهای فتومورفیک تصاویر ماهواره‌ای (TM)، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۷، شماره ۱، صص ۲۱-۳۴.
- علوی پناه، کاظم، ۱۳۷۹، ارزیابی کارایی باندهای طیفی ماهواره لندست TM در مطالعات کویرهای ایران، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۳، شماره ۱، صص ۶۷-۷۸.
- فاطمی، سید باقر و یوسف رضایی، ۱۳۸۴، مبانی سنجش‌ازدور، چاپ اول، انتشارات آزاده، تهران.
- کرینسلی، دانیل، ۱۳۵۰، مطالعه ژئومورفولوژی و آب‌وهوای گذشته (پلایای ایران)، سازمان جغرافیای کشور.
- مرادی، حمیدرضا، محمدرضا فاضل پور، حمیدرضا صادقی و زین‌العابدین حسینی، ۱۳۸۷، بررسی تغییر کاربری اراضی در بیابان‌زایی محدوده شهر اردکان با استفاده از سنجش‌ازدور، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۵، شماره ۱، صص ۱-۱۲.
- مقیمی، آرمین، حمید عبادی و وحید صادقی، ۱۳۹۵، مروری بر روش‌های شناسایی تغییرات از تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه با رویکرد پیکسل پایه و شیء پایه، نشریه مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دوره هفتم، شماره ۲، صص ۹۹-۱۱۰.
- ملامهر علیزاده، فاطمه، مهدی جنتی و سیاوش شایان، ۱۳۸۳، کارایی داده‌های سنجش‌ازدور (RS) در تهیه نقشه‌های لندفرم و نقش آن در برنامه‌ریزی محیطی، فصلنامه مدرس علوم انسانی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۱۱۱-۱۴۸.
- میرباقری، وهب، مهران برادران نصیری و محمد زارع ارنازی، ۱۳۸۷، بررسی امکان پایش تغییرات پوشش گیاهی دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست بین سال‌های ۱۹۷۶-۲۰۰۲، همایش ژئوماتیک ۸۷، تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- نعیمی نظام‌آباد، علی، منیژه قهرودی تالی و محمدرضا ثروتی، ۱۳۸۸، فصلنامه جغرافیایی سرزمین، سال ششم، شماره ۲۲، صص ۶۵-۵۹.
- یوسفی، صالح، مهدی تازه، سمیه میرزایی، حمیدرضا مرادی و شهلا توانگر، ۱۳۹۳، مقایسه الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در تهیه نقشه کاربری اراضی، مطالعه موردی: شهرستان نور، سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال پنجم، شماره ۳، صص ۶۷-۷۶.
- Chen, K S., Yen, S K. and Tsay, D W., 1997, Neural classification of SPOT imagery through integration of intensity and fractal information. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No.4, pp. 763-783.
- Congalton, R G., 1991, A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 37, No. 1, pp. 35-46.

- Foody, G M., 2002a, *Hard and soft classifications by a neural network with a non exhaustively defined set of classes*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.23, No. 18, pp. 3853–3864.
- Foody, G M., 2004b, *Supervised image classification by MLP and RBF neural networks with and without an exhaustively defined set of classes*. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 15, pp. 3091–3104.
- Howald, K J., 1989, *Neural network image classification*. *Proceedings of the ASPRS-ACSM Fall Convention (Falls Church, VA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing)*, pp. 207-215.
- Hsu, C, and Lin, C., 2002, *A comparison of methods for multi-class support vector machines*. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 13, No. 2, pp. 415–425.
- Kavzoglu, T, and Mather, P M., 2004, *The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification*. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 23, pp. 4907–4938.
- Lillesand, T M, and Kiefer, R W., 1994, *Remote sensing & image interpretation*, 3th Ed., John wiley and sons Inc., New York, 750 pp.
- Lu, D, Mausel, P, Brondizio, E, and Moran, E., 2004, *Change detection techniques*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, pp. 2365–2407.
- Mannan, B, Roy, J, and RAY, A K., 1998, *Fuzzy ARTMAP supervised classification of multi-spectral remotely-sensed images*. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 4, pp. 767–774.
- Masoud, A A, and Kike, K., 2006, *Arid land salinization detected by remotely – sensed land cover changes, A case study in the Siwa region. Nw Egypt*, *Journal of Arid Environments*, Vol. 66, pp. 151-167.
- Richards, J A, and Jia, X., 2006, *Remote Sensing Digital Image Analysis an Introduction; 4th Edition*, Springer, Germany, Berlin, Heidelberg.
- Tso, B, Mather, P M., 2009, *Classification Methods for Remotely Sensed Data*, 2nd edition, Taylor and Francis Pub, America.