

طبقه بندی و آشکار سازی تغییرات لندفرم های ژئومورفولوژی و شبیه سازی تغییرات با سلول های خودکار مارکوف (مطالعه موردی: حوضه آبریز سجاسرود)

موسی عابدینی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
حسن مظفری - دانش آموخته دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
مهدی فعال نذیری - دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

چکیده

شناسایی لندفرم های ژئومورفولوژی از لحاظ منشأ شکل گیری و روند تغییرات آنها در گذشته، حال و آینده بسیار حائز اهمیت است. به همین علت موانع طبیعی و گستردگی پهنه های مورد مطالعه و مطالعات میدانی را با چالش روبرومی سازد. برای حل این گونه مشکلات استفاده از تکنولوژی های سنجش از دور جهت مدیریت محیطی و مخاطرات طبیعی ضروری می باشد. یکی از جدید ترین روش ها، بهره گیری از توانایی های تصاویر ماهواره ای در جهت استخراج و بررسی تغییرات لندفرم ها در بازه های زمانی مختلف و پیش بینی تغییرات آن هادر آینده است. در همین راستا برای شناسایی لندفرم های حوضه آبریز سجاسرود و بررسی روند تغییرات و پیش بینی تغییرات تا سال ۲۰۵۰، از تصاویر ماهواره ای TM و OLI در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ بهره گرفته شد. در ادامه جهت شناسایی لندفرم ها از مطالعات و برداشت های میدانی و نرم افزار Google Earth و نقشه توپوگرافی و تجزیه مولفه های اصلی با تصاویر لندست استفاده گردید. پس از انجام تصحیحات لازم بر روی تصاویر ماهواره ای، روش طبقه بندی حداکثر احتمال برای طبقه لندفرم ها بکار گرفته شد. نتایج نشان داد پهنه های پوشش گیاهی و دشت آبرفتی به ترتیب ۴۷/۱۵۹ و ۵۷/۲۶ درصد افزایش مساحت و در مقابل کوه ها و تپه ها، پادگانه های آبرفتی، مخروط افکنه ها و آبرفت های جدید با کاهش مساحت مواجه بوده اند و همینطور نتایج الگوریتم MNF نشان داد بیشترین شدت و سرعت تغییرات مربوط به دشت های آبرفتی با مساحت ۹۸۹۲/۴۵ و کوه ها و تپه ها ۹۴۸۱/۱۳ هکتار و کمترین سرعت تغییرات مربوط به پادگانه های آبرفتی با میزان ۱۰/۳۶ هکتار است. در نهایت نتایج شبیه سازی CA-MARCOV نشان داد که در ۳۲ سال آینده مخروط افکنه ها با مساحت ۶۴/۹۷- کیلومتر مربع بیشترین تغییرات کاهشی، پوشش گیاهی و آبرفت های جدید به ترتیب با مساحت ۱۲۰/۹۶ و ۰/۲۳ کیلومتر مربع بیشترین تغییرات افزایشی را خواهند داشت.

واژگان کلیدی: لند فرم، طبقه بندی، مدل مارکوف، حوضه رودخانه سجاسرود.

مقدمه

ژئومورفولوژی یک نظام علمی بین رشته‌ای پویا در صدد شناخت و مشخص کردن رابطه علت و معلولی تغییرات سطح لیتوسفر زمین است. در این راستا روش پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی با پیشرفت‌های علمی شگرف در فنون و روش‌شناسی علوم مرتبط به لحاظ، نوع، سرعت، دقت اصولی‌تر و دقیق‌تر شده است (عابدینی، ۱۳۹۵). نقشه‌برداری و اندازه‌گیری تغییرات ژئومورفولوژیکی ابزار ارزشمند برای بسیاری از کاربردهای مربوط به فرسایش و توسعه چشم‌انداز است. لذا ارزیابی میزان و نرخ تغییرات ژئومورفولوژیکی به دلیل کمبود داده‌های میدانی و اندازه‌گیری کمی می‌تواند چالش برانگیز باشد (اندرس^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، تحولات در فناوری ارتفاع سنجی هوایی مانند سفینه فضایی و (KPA^۲) (اسمیت^۳ و همکاران، ۲۰۰۹، ۱۵۷) اسکنر لیزر هوایی (لیو^۴، ۲۰۰۸)، ترویج تولید مدل‌های ارتفاع دیجیتالی چندمنظوره یا مدل‌های زمین (DEMs / DTMs) که به‌طور بالقوه می‌توانند به‌عنوان منبع برای تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری تغییر ژئومورفولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد (میتاسووا^۵ و همکاران، ۲۰۰۹؛ ونتورا^۶ و همکاران، ۲۰۱۱). در چند دهه اخیر استفاده از فناوری ماهواره و ابزارهای سنجش از دور به‌ویژه در زمینه‌های جغرافیایی به‌سرعت توسعه یافته است، به شکلی که امروزه یکی از روش‌های بسیار مفید و کارآمد محسوب می‌شود. افزایش قدرت تفکیک تصاویر تا حد چند متر موجب گشته است که حتی در کارهای تفصیلی مورد استفاده قرار گیرند (یمانی، ۱۳۹۴).

در این میان استفاده از تصاویر ماهواره ای در زمینه تهیه نقشه‌های ژئومورفولوژی چنان کارآمدند که باوجود نداشتن دید استریوسکوپی، به‌تدریج جایگزین نقشه‌های ژئومورفولوژی عکس‌های هوایی مقیاس بزرگ شده‌اند (شایان و همکاران، ۱۳۸۴). شناسایی لند فرم‌های مختلف در یک منطقه یا حوضه آبریز و تهیه نقشه در بازه زمانی مختلف و تحلیل روند تغییرات آن‌ها از جمله کاربردهای اختصاصی تصاویر ماهواره‌ای است. در امر مدیریت محیط، معمولاً ارزیابی ماهیت بلایای طبیعی، منابع طبیعی و به‌ویژه نحوه توزیع و تغییرات آن‌ها برحسب زمان، کاربرد نقشه لند فرم و مطالعات ژئومورفولوژیکی را ضروری می‌سازد (شایان و همکاران، ۱۳۸۴). همچنین داده‌های سنجش از دوری 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 سنجش از دوری، شامل مشخص کردن موقعیت هندسی، نوع تغییرات، کیفیت تغییرات و ارزیابی صحت نتایج آشکارسازی تغییرات هستند (کرم و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به رقومی بودن تصاویر ماهواره‌ای، تفکیک خودکار لند فرم‌ها بر اساس باندهای تصویری در محدوده طیف الکترومغناطیس امکان‌پذیر است. این موضوع شاید مهم‌ترین ویژگی کاربرد تصاویر در تهیه نقشه‌های ژئومورفولوژی جدید باشد. این امکان به‌ویژه برای انجام دادن پهنه‌بندی‌هایی مثل پهنه‌های کروئولوژیک، لیتولوژیک و توپوگرافیک فراهم است. علاوه بر این، پهنه‌هایی که تحت تأثیر فرایندهای سطحی از وحدت مورفولوژیک برخوردارند، مانند دشت‌های آبرفتی، سطوح ماسه‌ای پادگانه‌های آبرفتی، اراضی شور و زمین‌هایی که از نظر شکل لند فرمی دارای وجوه مشترک‌اند، مانند اراضی تپه‌ماهوری یا اراضی خندقی کار تفکیک و پهنه‌بندی آن‌ها را بسیار آسان و دقیق کرده است (یمانی، ۱۳۹۲).

سطح لیتوسفر زمین مدام بواسطه عملکرد سیستماتیک نیروهای بیرونی و درونی در حال تغییر و تحول می‌باشد، که همان جریان انرژی و ماده است (عابدینی، ۱۳۹۵). افزایش فزاینده جمعیت جهان، دخالت‌های عمدتاً غیراصولی، موجب تشدید

¹ -Anders

² - Kite aerial photography

³ - Smith

⁴ - Liu

⁵ - Mitasova

⁶ - Ventura

شدت و فرکانس وقوع بلایای طبیعی، از جمله زمین لغزش، فرونشست زمین، ریزش، سیلاب و غیره شده است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). لذا برای پی بردن به کمیت و کیفیت این تغییرات ژئومورفیک نیاز به طبقه بندی و مقایسه روند تغییرات در بازه های زمانی مختلف توسط تصاویر ماهواره ای ضروری است. محققین ژئومورفولوژی در ایران و سایر کشورها با مدل ها و روش های مختلف در خصوص استخراج لند فرم ها و روند تغییرات آن کار کرده اند. از جمله روش هایی که بیشتر به آن پرداخته شده است، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) است. در کنار آن استخراج لند فرم ها از طریق تصاویر ماهواره ای، لیدار و رادری نیز کم و بیش کار شده است. ولی متأسفانه در خصوص روند تغییرات زمانی لندفرم های ژئومورفولوژی بخصوص پیش بینی سال های آتی تغییرات مثل مدل CA-MARKOV کم کار شده است. در این میان باز پژوهشگران ایرانی پرکار بوده اند از جمله شایان و همکاران (۱۳۸۴) به منظور تهیه نقشه لند فرم و نقش آن در برنامه ریزی محیطی، کارایی داده های سنجش از دور را مورد بررسی قرار دادند و با تلفیق داده های طیفی لندست ETM+ با داده های دارای توان مکانی بالا IRS-PAN ۲۷ لند فرم را با توجه به ویژگی های زمین شناسی، اقلیمی و توپوگرافی استان سمنان استخراج کردند.

مکرم و همکاران (۱۳۹۵) مقایسه طبقه بندی لند فرم ها با استفاده از روش های قدیمی (استفاده از ارتفاع و شیب و انحناء) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در جنوب بجنورد را انجام دادند و ضمن مشخص کردن مساحت هر یک از کلاس های لند فرم ها روش (TPI) را در مقایسه با روش قدیمی به علت نمایش جزئیات بیشتر پهنه های طبقه بندی مناسب دانستند.

کرم و همکاران (۱۳۹۶) طبقه بندی لند فرم های بخشی از دشت اردکان - یزد را با استفاده از روش های نظارت شده و تصاویر ماهواره ای TM و OLI لندست ۸ انجام داده اند و روند تغییرات آن را بین سال های ۱۹۸۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ محاسبه نموده اند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد لندفرم های موجود بروی دشت سر پوشیده به جز تپه ها ماسه ای مواج، دارای روند نزولی تا سال ۲۰۱۶ بودند و در تغییرات لندفرم های بیابانی منطقه عوامل طبیعی توأم با عوامل انسانی نقش داشتند. اندریانی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی و تحلیل تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش های شی گرا و زنجیره مارکوف در حوضه آبریز زلیبیر چای در آذربایجان شرقی و غربی و همچنین جهت پیش بینی تغییرات در سال ۲۰۳۰، با بهره از تصاویر ماهواره ای لندست پرداختند که نتایج پژوهش آن ها نشان داد افزایش مساحت کاربری های مسکونی، باغات و زراعت آبی در طی زمان وجود داشته و و این امر نشان از مصرف زیاد آب در منطقه است و با پیش بینی صورت گرفته توسط محققان این پژوهش در پانزده سال آینده کاربری های کم مصرف مثل گندم آبی به محصولات زراعی تبدیل می شوند.

علی آبادی و همکاران (۱۴۰۰) به پیش بینی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلولهای خودکار مطالعه موردی: حوزه شیرکوه، پرداختند در این پژوهش از تصاویر ماهواره ای لندست برای سال های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ با روش طبقه بندی پیکسل پایه استفاده و جهت پیش بینی تغییرات با روش مارکوف برای سال ۲۰۲۴ اقدام گردید که نتایج روند تغییرات کاربری اراضی در ۱۶ سال مورد بررسی (۲۰۰۰ و ۲۰۱۶) نشان داد که به طور متوسط سالانه ۱۶۱/۸۵ هکتار از مراتع غنی، ۱۳۱/۱۴ هکتار از مراتع فقیر و ۷/۷۲ هکتار از مساحت اراضی کشاورزی کاسته و ۴۵/۱۶ هکتار در هر سال به کاربری شهری و ۲۶۵/۷۲ هکتار به مناطق صخره ای و سنگلاخی اضافه شده است. دلیل افزایش مساحت مناطق صخره ای و سنگلاخی ها به دلیل کاهش مساحت مراتع بوده است. نتایج پیش بینی پوشش اراضی در سال ۲۰۲۴ نشان داد که ۰/۵۵ درصد از کاربری کشاورزی، ۰/۸۲ درصد از مرتع غنی، ۰/۸۰ درصد مرتع فقیر، ۰/۵۱ درصد اراضی شهری و ۰/۹۷ درصد مناطق صخره ای و سنگلاخی بدون تغییر باقی می ماند که مناطق صخره ای و سنگلاخی های پایداری نسبتاً بالا و اراضی کشاورزی و شهری پایداری کمتری خواهند داشت.

عابدینی و محمدزاده شیشه‌گران (۱۴۰۱) برای بررسی تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با سطح آب‌های زیرزمینی و مخاطرات آن در شهرستان ملارد با بهرمندی از سری تصاویر ماهواره‌ی لندست برای سال ۲۰۲۰ از تصاویر ماهواره لندست ۸ برای سنجنده OLI به منظور استخراج نقشه کاربری اراضی استفاده کرده‌اند و با به این نتیجه رسیدند که میانگین عمق آب‌زیرزمینی در تمام کاربریها به جز اراضی مراتع طبیعی، روند کاهشی محسوسی داشته است.

اندرس^۱ و همکاران، (۲۰۱۳) با استفاده از مدل‌های رقومی چند زمانه لیدار پدیده‌های ژئومورفولوژی غرب اتریش رو با روش شیء‌گرا بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳ انجام دادند و ضمن رضایت کامل از خروجی کارشان آن‌ها را در راستای نظارت بر خطر و خطرات طبیعی، میزان تحولات تغییرات و ارزیابی آسیب‌پذیری لند فرم‌های ژئومورفولوژی مناسب دانستند. گوها^۲ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از باندهای مادون قرمز دور و نزدیک تصاویر لندست ۸ و تصاویر ماهواره ALOS-DEM, Polarsar و رادار را برای ریخت‌شناسی مخروط افکنه‌های رودخانه‌های ماهانانتا^۳ و تیستا^۴ استفاده کردند. با بررسی GPR^۵ در طول ترانکست انتخاب‌شده، متوجه شدند جابجایی عمودی در توالی رسوبات ته‌نشین شده اخیر در رژیم مخروط افکنه ناشی از اختلالات پس از انباشت رسوبات است.

سولازو و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی یکی از لند فرم‌های ژئومورفولوژی یعنی تپه‌های ماسه‌ای گرند کنیون ایالت آریزونا آمریکا را با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین و تصاویر لیدار و ماهواره با توان تفکیکی بالا بررسی کردند و موفق به تولید نقشه ژئومورفولوژی تپه‌های شنی و ماسه‌ای در محل مورد مطالعه شدند. ضمن برآورد میزان حجم شن و ماسه در خصوص استفاده از دستاوردشان برای محاسبه حجم رسوب و دینامیک ناشی از این تپه در محل تلاقی رودخانه‌های پاربا و کلرادو و سایر مطالعات مرتبط مفید دانستند.

چی و همکاران (۲۰۱۸) ضمن مقایسه روش‌های طبقه سخت با شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص اخیر رو به علت انعکاس بهتر تغییرات لند فرم در فواصل کم، مناسب‌تر از روش‌های دیگر تشخیص دادند. این مطالعه در شهر گانزو در شمال شرق شهرستان شینفنگ در استان جیانگشی انجام گرفت. لند فرم‌های این منطقه در ۱۰ طبقه با استفاده از مدل TPI استخراج گردید.

نیرو همکاران (۲۰۲۱)، روش (TPI) را در حوضه رودخانه‌های ایتیککارا و کالدا، جنوب غربی گتس، کراالا، هند انجام دادند. لند فرم‌های این حوضه در ۱۰ طبقه تهیه کردند و درصد وسعت هر کدام از طبقات را مانند کانیون‌ها، ستیخ‌ها، تپه‌ها، کوه‌های مرتفع و بستر رودخانه‌ها و غیره مشخص کردند و نتیجه گرفتند می‌توان از یافته‌های این تحقیق در احداث و ایجاد انواع کاربری‌ها و امور کشاورزی استفاده کرد. همان‌طور که ملاحظه گردید روش‌ها و مدل‌های گوناگونی برای نمایش لند فرم‌ها و بررسی روند تغییرات آن وجود دارد.

هدف اصلی در این پژوهش طبقه‌بندی، آشکار سازی و شبیه سازی تغییرات لند فرم‌های اصلی و مهم حوضه آبریز سچاسرود با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم طبقه بندی نظارت شده حداکثر احتمال بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ و همچنین پیش بینی تغییرات با استفاده روش مارکوف برای سال ۲۰۵۰ می باشد.

¹ - Anders

² - Guha

³ Mahananda

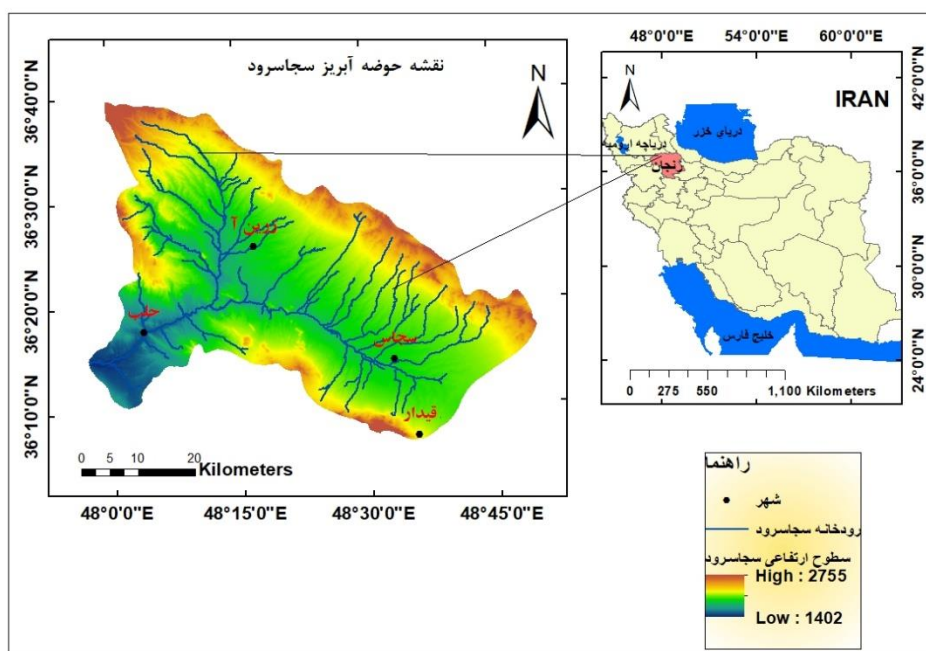
⁴ - Tista

⁵ - Ground-penetrating radar

⁶ - Xiong

معرفی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز سجاسرود در شمال غرب ایران، جنوب استان زنجان، در موقعیت عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه واقع گردیده است (شکل ۱). بر اساس مطالعات انجام شده حدود ۲۴۹۴ کیلومتر مربع وسعت داشته که ۱۲۹۸ کیلومتر مربع آن را نهشته‌های آبرفتی و مابقی را ارتفاعات تشکیل داده‌اند. در این حوضه آبریز دشت‌ها به صورت تپه‌ماهوری و دره‌ای و ناهموار هستند که توسط ارتفاعات بلند و یا نهشته‌های پلیپلئوستوسن کم ارتفاع از هم جدا می‌شوند. رودخانه سجاسرود از سمت شرق و از دشت مزید آباد سرچشمه گرفته و با روند شرقی - غربی پس از عبور از شهر سجاس در پایاب روستای ینگگی کند به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد این محدوده، با ارتفاع متوسط ۱۶۵۰ متر، از غرب به کوه‌های ماه‌نشان از شمال به کوه‌های سلطانیه و از جنوب به کوه‌های قیدار محدود است. پست‌ترین نقطه، با ارتفاع ۱۴۰۶ متر در محل تلاقی سجاسرود به رودخانه قزل‌اوزن و مرتفع‌ترین نقطه به ارتفاع ۲۶۰۰ متر در جنوب منطقه قرار دارد. مهم‌ترین مرکز مسکونی در این منطقه شهر سجاسرود و ایجرود با ارتفاع ۱۷۴۰ و ۱۷۳۹ متری از سطح دریا در قسمت میانی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه و جنوب و جنوب غربی استان زنجان قرار دارد (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵، ۲۲). (شکل ۱) نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

میانگین درجه حرارت سالانه در ایستگاه باران سنجدی حلب واقع در جنوب غربی حوضه آبریز سجاسرود با ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد (برای دوره‌ی آماری ۱۹ ساله) می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه در این ایستگاه ۳۹۰/۹۲ میلی‌متر و بیشترین بارش در فروردین‌ماه با میزان ۶۷/۶ و کمترین میزان آن در شهریور ماه، ۲/۱ میلی‌متر رخ داده است. نوع اقلیم حوضه آبریز بر اساس مدل دمارتن نیمه‌خشک و آمبرژه نیمه‌خشک سرد می‌باشد (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵، ۳۴). از نظر لیتولوژی از سنگ‌های اندزیتی، بازالتی، آهکی، ماسه‌سنگ، دولومیت، مارن و آبرفت‌های عصر حاضر تشکیل شده است. تحولات زمین‌شناسی این حوضه از دوران پرکامبرین تا زمان حال را دربر می‌گیرد و به علت اثر نیروهای تکتونیکی در محدوده کوهستانی حوضه، انواع گسل‌ها شکل گرفته است.

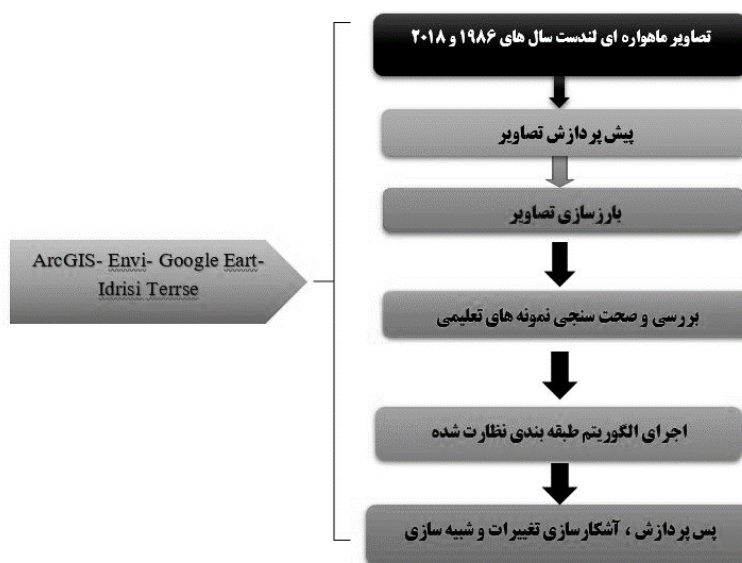
روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت پیمایشی-تحلیلی است. برای انجام و جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های میدانی و کتابخانه‌ای استفاده گردید. به منظور جمع‌آوری اطلاعات اولیه از تصاویر ماهواره‌ای لندست TM و OLI مربوط به سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۱۸ استفاده گردید (جدول ۱). در این راستا علاوه بر مطالعات میدانی گسترده از تصاویر گوگل ارث و نقشه‌های توپوگرافی منطقه نیز برای شناسایی هرچه بهتر لند فرم‌ها استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده‌شده (منبع: متادینا)

ردیف	نوع سنجنده	گذر و ردیف	تاریخ تصویربرداری
۱	TM	۳۵/۱۶۶	۱۹۸۶/۰۷/۰۲
۲	OLI	۳۵/۱۶۷	۲۰۱۸/۰۷/۰۱
۳	OLI	۳۵/۱۶۶	۲۰۱۸/۰۷/۱۰

پس از تهیه داده‌های مورد نیاز برای آشکارسازی و تشخیص بهتر لند فرم‌های ژئومورفولوژی مطابق شکل (۲) مراحل مختلف پردازش تصاویر انجام گردید. سپس جهت طبقه‌بندی از نمونه‌های تعلیمی که قبلاً تصحیح رادیومتریک و اتمسفری روی آن‌ها انجام گرفته بود، استفاده گردید. با استفاده از فرایند آزمایش و خطا بهترین روش برای نمونه‌های تعلیمی از طریق تولید لایه وکتوری روی تصاویر و تبدیل آن‌ها به نمونه‌های تعلیمی در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 به دست آمد. در مرحله بعد با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال اقدام به طبقه‌بندی لند فرم‌های سطحی محدوده مورد مطالعه گردید. سرانجام با استفاده از توابع مربوط به بررسی روند تغییرات لند فرم‌ها، میزان تغییرات و شبیه‌سازی تا سال ۲۰۵۰ انجام گردید. در فرایند انجام این پژوهش از نرم‌افزارهای ENVI 5.3, ArcGIS 10.1 EXCEL 2013 و IDRISI TERRSE بهره گرفته شد.



شکل ۲: روند نمای پژوهش (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

الف) پیش پردازش و آماده سازی تصاویر ماهواره‌ای

مرحله پیش پردازش 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 (کرم و همکاران، ۱۳۹۶). در این تحقیق ابتدا تصحیح هندسی و رادیومتری و سپس تصحیح اتمسفری به روش FLAASH انجام گردید. تصحیح هندسی معمولاً انحرافات در تصاویر رقومی همچون تغییرات در ارتفاع، سرعت سکوی سنجنده، انحنای زمین و جابجایی پستی و بلندی رخ می‌دهد که باعث می‌شود نتوان این گونه تصاویر را به عنوان نقشه استفاده نمود. تصحیح هندسی جبران این انحرافات است. به گونه‌ای که باید تصویر تصحیح شده، قابلیت انطباق با نقشه را داشته باشد. بر روی تصاویر دو نوع تصحیح سامانمند و غیر سامانمند صورت می‌پذیرد. تصحیح سامانمند قبل از اینکه تصاویر در دسترس کاربران قرار بگیرد انجام می‌شود اما تصحیح غیر سامانمند با زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره‌ای و نمونه برداری مجدد توسط کاربر صورت می‌گیرد (ارجمند زاده و همکاران، ۱۳۹۷) در این تحقیق از طریق تابع Reproject Raster مختصات UTM تصویر ۱۹۸۶ تصحیح گردید. خطای رادیومتری به دلیل تفاوت شرایط اتمسفری، ارتفاع خورشید و آزیموت آن در هنگام ثبت داده‌ها توسط سنجنده رخ می‌دهد. خطاهای ایجاد شده در تصویر ناشی از داده‌های اولیه، خطاهایی که به دلیل داده‌های نادرست سبب جدا شدن تصویر می‌شود و پیکسل‌های اطلاعاتی اسکن نشده که باعث بروز اشکال در تصویر می‌شود به عنوان نمونه‌هایی از این خطاها بوده که در نرم‌افزار Envi در مبحث پیش پردازش قابل رفع می‌باشند (ارجمند زاده و همکاران، ۱۳۹۷). تصحیحات رادیومتری بدون توجه به مکان و مشخصات هندسی اجزای تصویر فقط با مقادیر درجات خاکستری پیکسل‌ها کار کرده و سعی در تصحیح آن‌ها دارند. تصحیحات رادیومتری خود برای کاهش و یا حذف دو نوع خطای عمده بکار می‌روند که عبارت‌اند از: خطاهای اتمسفری و خطاهای دستگاهی (حسینی تبار و همکاران، ۱۳۹۵). بعد از رفع خطاهای هندسی و رادیومتری تصاویر برای رفع خطای اتمسفری از روش FLAASH استفاده گردید. این روش یکی از بهترین روش‌های تصحیح اتمسفری محسوب می‌شود. برای انجام تصحیح جزئی اتمسفری به روش FLAASH باید تصویر مورد نظر از نوع رادیانس با فرمت BIL باشد. این روش از مدل انتقال رادیانس MODTRAN4 برای حذف اثرات اتمسفری استفاده می‌کند. به علاوه این روش ابزاری است که طول موج‌های مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ کوتاه را تا محدوده ۵ / ۲ میکرومتر پشتیبانی می‌کند (جوی زاده و همکاران، ۱۳۹۶).

ب) پردازش تصاویر ماهواره‌ای (تحلیل‌های طیفی و طبقه‌بندی تصاویر)

همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد برای طبقه‌بندی تصاویر به علت نبود تصاویر با توان تفکیک مکانی بالا از روش پیکسل پایه استفاده شد. ضمن استفاده از ابزارهای شناختی دیگر و مطالعات میدانی، از روش تفکیک مجموعه‌های طیفی و تجزیه مؤلفه‌های اصلی بخصوص برای شناسایی بعضی از لند فرم‌ها مانند واحد کوهستانی و مخروط افکنه استفاده گردید. سپس از طریق ایجاد لایه‌های وکتوری روی تصاویر ماهواره‌ای و تبدیل آن‌ها به نمونه‌های آموزشی، تصاویر طبقه‌بندی ایجاد شد. به طور کلی، منظور از طبقه‌بندی اطلاعات ماهواره‌ای با روش تفسیر رقومی، تفکیک مجموعه‌های طیفی مشابه و تقسیم‌بندی تصاویر به گروه‌ها یا طبقاتی است که در هر طبقه، طیف‌ها با یک ارزش واحد قرار می‌گیرند. (از نظر آماری قابل تفکیک نیستند) به عبارت دیگر، وقتی بر روی تصاویر و یا مجموعه‌های اطلاعاتی، طبقه‌بندی انجام می‌شود، در واقع، طبقه‌بندی طیفی به عمل آمده و در تصویر جدید، هر طبقه با کلاس معرف پدیده‌ای خاص با یک ارزش طیفی واحد است (زبیری و مجد، ۱۳۹۲).

ج) طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست با روش پیکسل پایه و الگوریتم حداکثر احتمال

طبقه‌بندی حداکثر احتمال دقیق‌ترین و پر استفاده‌ترین روش نظارت‌شده است. فرآیند طبقه‌بندی حداکثر احتمال فرض را بر این می‌گذارد که داده‌های آماری آموزشی برای هر کلاس در هر باند، به صورت نرمال توزیع شده‌اند. بنابراین برای داده‌های آموزشی با هیستوگرام‌های Π مدی در یک باند منفرد، مناسب نیستند در چنین شرایطی هر یک از مدها احتمالاً نماینده کلاس‌های جداگانه‌ای هستند و لازم است نرم‌افزار طبقه‌بندی کننده، برای آن‌ها مجدداً آموزش داده شوند. به این ترتیب، هیستوگرام‌های تک مدی با توزیع گوسن که شرط توزیع نرمال را برآورد می‌کند، به وجود می‌آید (آرخی و مومنی طارم‌سری، ۱۳۹۴).

د) زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار

آندری آندریچ مارکوف روسی در سال ۱۹۰۷ زنجیره مارکوف را ارائه کرد که دنباله‌ای از فرایندهای تصادفی بود که در آن نتیجه هر فرایند در هر زمان، تنها به نتیجه فرایند در زمان مجاور آن بستگی دارد. (نوریس، ۱۹۹۸) مدل مارکف به طور معمول در پیش بینی ویژگی‌های جغرافیایی بدون هیچ اثر ثانوی استفاده می‌شود و در حال حاضر به یک روش پیش بینی مهم در تحقیقات جغرافیایی تبدیل شده است (سنگ و همکاران، ۲۰۱۱). زنجیره مارکف تغییرات کاربری زمین را از یک دوره به دوره دیگر را بیان کرده و از آن به عنوان پایه‌ای برای نقشه‌سازی تغییرات آینده استفاده می‌کند. این کار با استفاده از توسعه یک ماتریس احتمال انتقال تغییرات کاربری زمین از زمان ۱ به زمان ۲ انجام می‌گیرد که به عنوان پایه‌ای برای نقشه‌سازی دوره‌های زمانی آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت. بر اساس احتمال شرطی فرمول بیز، پیش بینی تغییر کاربری اراضی در مدل مارکف با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (میتسووا و همکاران، ۲۰۱۱).

$$S(t+1) = pij * s(t) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$I+st$ و st ، وضعیت کاربری زمین در زمانهای $t+1$ و t ، pij احتمال وضعیت i ام و وضعیت j ام می‌باشد. مدل سلول‌های خودکار مارکوف مدل $CA - Markov$ تلفیقی از سلول‌های خودکار، زنجیره مارکوف و تخصیص چندمنظوره اراضی است که برای پیش بینی تغییرات آینده لندفرم و کاربری اراضی به کار می‌رود. در ابتدا با به کار گیری مدل زنجیره مارکوف احتمال تغییر طبقات نقشه کاربری به یکدیگر در قالب ماتریس احتمال تغییر وضعیت کاربری‌ها و بر مبنای تغییرات مساحتی به وقوع پیوسته بین زمان ما و t محاسبه می‌گردد. خروجی مدل مارکوف (ماتریس تغییر وضعیت کاربری‌ها) از نظر ماهیت غیرمکانی است. به عبارتی، در آن هیچ دانش و آگاهی از موقعیت جغرافیایی کاربری‌های زمین وجود ندارد. برای پیش بینی موقعیت مکانی کاربری‌ها لندفرم‌ها در زمان $t+1$ تکنیک سلول‌های خودکار به همراه این مدل استفاده می‌شود. به این صورت که نقشه آینده لندفرم‌ها با استفاده از نقشه‌های شایستگی تبدیل ژئوفورم‌ها با اعمال فیلتر مجاورت و طی فرآیند تخصیص چند منظوره اراضی تهیه می‌گردد. در حقیقت مدل سلول‌های خودکار مارکوف مؤلفه‌های مجاورت مکانی و دانش کاربر نسبت به توزیع مکانی احتمال تبدیل لندفرم‌ها و کاربری‌ها را به مدل زنجیره مارکوف اضافه می‌کند (فتحی زاد و همکاران ۱۳۹۷). در این پژوهش، مدل‌های موجود در نرم افزار ادیسی ترست برای شبیه سازی لندفرم‌های ژئومورفولوژی در حوضه آبریز ساجسارود بکار گرفته شد.

ه) ارزیابی صحت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

بررسی نتایج طبقه‌بندی یکی از مراحل مهم است لذا ارائه نتایج طبقه‌بندی بدون هیچ‌گونه پارامتری که کیفیت با صحت این نتایج را بیان کند، از ارزش آن‌ها می‌کاهد و در بعضی مواقع آن‌ها را بدون استفاده می‌کند. براین این نکته را باید در

نظر داشت که همیشه در کنار انجام طبقه بندی، نتایج آن نیز ارزیابی شده و به کاربر عرضه گردند. متداول ترین روش های برای ارزیابی کمی صحت طبقه بندی، انتخاب تعدادی پیکسل از پیکسل های نمونه معلوم و مقایسه کلاس آن ها با نتایج طبقه بندی هست. این داده های معلوم را واقعیت زمینی با داده های مرجع می نامند. انجام نمونه برداری از طریق بازدید زمینی یا با استفاده از داده های قبلی نظیر نقشه های موجود یا تصاویر هوایی - فضایی موجود، صورت می پذیرد. ارزیابی خطا و برآورد سخت طبقه بندی معمولاً بر اساس پارامترهای آماری است که از ماتریس خطا استخراج می شوند ماتریس خطا که ماتریس ابهام نیز نامیده می شود حاصل مقایسه پیکسل به پیکسل، پیکسل های معلوم در واقعیت زمینی با پیکسل های متناظر در نتایج طبقه بندی است. دو پارامتر اصلی که برای ارزیابی صحت طبقه بندی استفاده می شوند صحت کلی و ضریب کاپا می باشند

صحت کلی میانگینی از طبقه بندی است که نسبت پیکسل های صحیح طبقه بندی شده به جمع کل پیکسل های معلوم را نشان می دهد. یکی دیگر از پارامترهای سخت که از ماتریس خطا استخراج می شود ضریب کاپا است. ضریب کاپا طبقه بندی کاملاً تصادفی محاسبه می کند. به این معنی که مقدار کاپا صحت طبقه بندی را نسبت به یک طبقه بندی را نسبت به حالتی که یک تصویر کاملاً به صورت تصادفی طبقه بندی شود به دست می دهد. این کار را می توان به این صورت معنی کرد که پس از حذف تأثیر شانس در طبقه بندی مقدار تطابق با واقعیت زمینی محاسبه خواهد شد. متداول ترین روش برای ارزیابی کمی دقت طبقه بندی انتخاب یک سری پیکسل های نمونه معلوم و مقایسه کلاس ها با نتایج طبقه بندی است (حسنی تبار و جعفرزاده، ۱۳۹۵).

دقت کلی از نسبت مجموع پیکسل هایی که درسته طبقه بندی شده اند در محور اصلی ماتریس به کل پیکسل های طبقه بندی شده به دست آمد. دقت کلی با رابطه (۲) قابل بیان هست.

$$OA = \frac{1}{N} \sum p_{ii} \quad \text{رابطه (۲)}$$

OA دقت کلی، $\sum p_{ii}$: مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا، N: تعداد پیکسل های آزمایشی با توجه به اینکه برای نهایی نمودن نقشه لند فرم، باید همه شاخص های درست و نادرست طبقه بندی با یک و یا چند شاخص آماری معتبر برازش داده شود از شاخص کاپا استفاده می شود، این شاخص با رابطه ۳ قابل بیان هست اگر مقدار کاپا برابر ۱ باشد در صد هماهنگی بسیار خوب است و اگر این ضریب صفر شود بیانگر عدم هماهنگی است.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n G_i C_i}{N^2 - G_i C_i} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، K: شاخص کاپا، N: تعداد ردیف ماتریس طبقه بندی، $m_{i,i}$: عداد مشاهدات در ردیف و ستون (محور اصلی ماتریس)، C_i : مجموع مشاهدات در ردیف (مجموع ردیف برای هر لند فرم)، G_i : مجموع مشاهدات در ستون (مجموع ستون برای هر لند فرم)، N: مجموع کل مشاهدات ماتریس طبقه بندی (کرم و همکاران، ۱۳۹۶).

د) آشکارسازی لند فرم ها

برای آشکارسازی تغییرات در دو مقطع زمانی تصاویر ماهواره ای از روش پس از طبقه بندی و تابع Change Detection Statistics استفاده گردید. این مدل به صورت آماری تغییرات لند فرم ها را در دو دوره مورد مطالعه نشان می دهد. سپس تابع Image Change Workflow در نرم افزار انوی و مدل سلول های خودکار مارکف برای پیش بینی تغییرات در آینده استفاده شد.

بحث و یافته ها

با توجه به شناخت منطقه و بازدید میدانی شکل (۴)، استفاده از نقشه رقومی توپوگرافی با فاصله منحنی های ۲۰ متر و استفاده از تصاویر گوگل ارث لند فرم های سطحی (پلی گونی) مهم ژئومورفولوژی حوضه آبریز سجاسرود شناسایی شد. لند فرم های سطحی مهم ژئومورفولوژی این حوضه آبریز که با روش های مذکور شناسایی شدند عبارت اند از کوه ها، تپه ها،

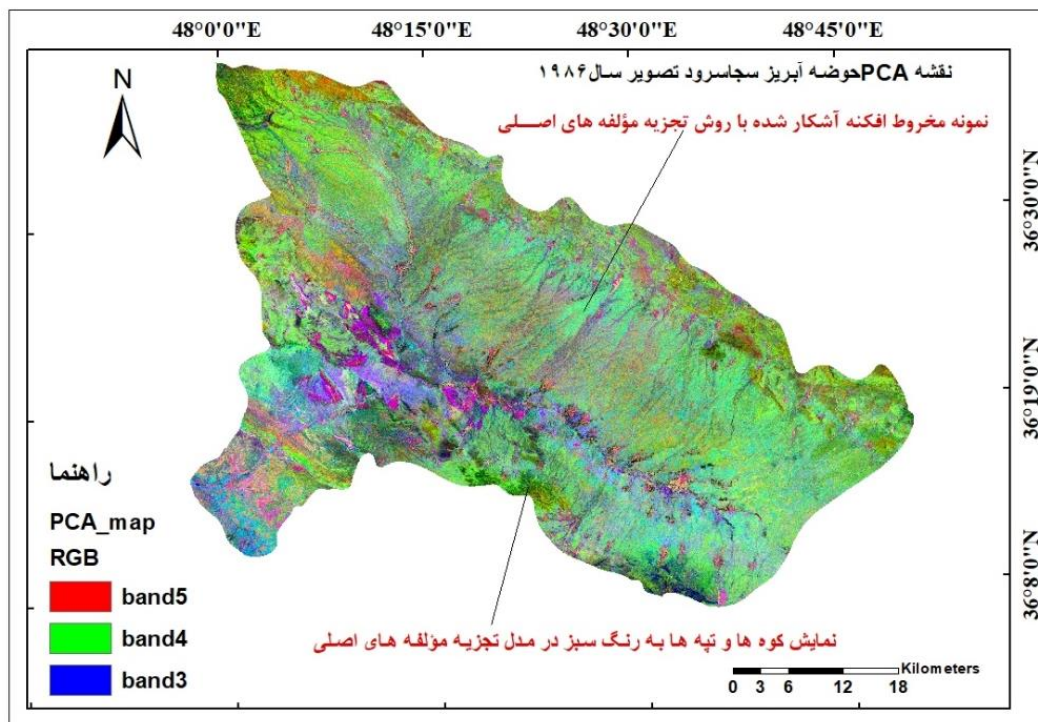
مخروط افکنه‌ها، دشت آبرفتی، تراس‌های کوهستانی و رودخانه‌ای، آبرفت‌های اخیر و پوشش گیاهی. چون هدف تحقیق بررسی روند تغییرات پدیده‌های ژئومورفولوژی سطحی و مهم بود، از پدیده‌های ژئومورفولوژی دیگر که از نظر فراوانی و نوع با هدف تحقیق سازگار نبود، چشم‌پوشی گردید.



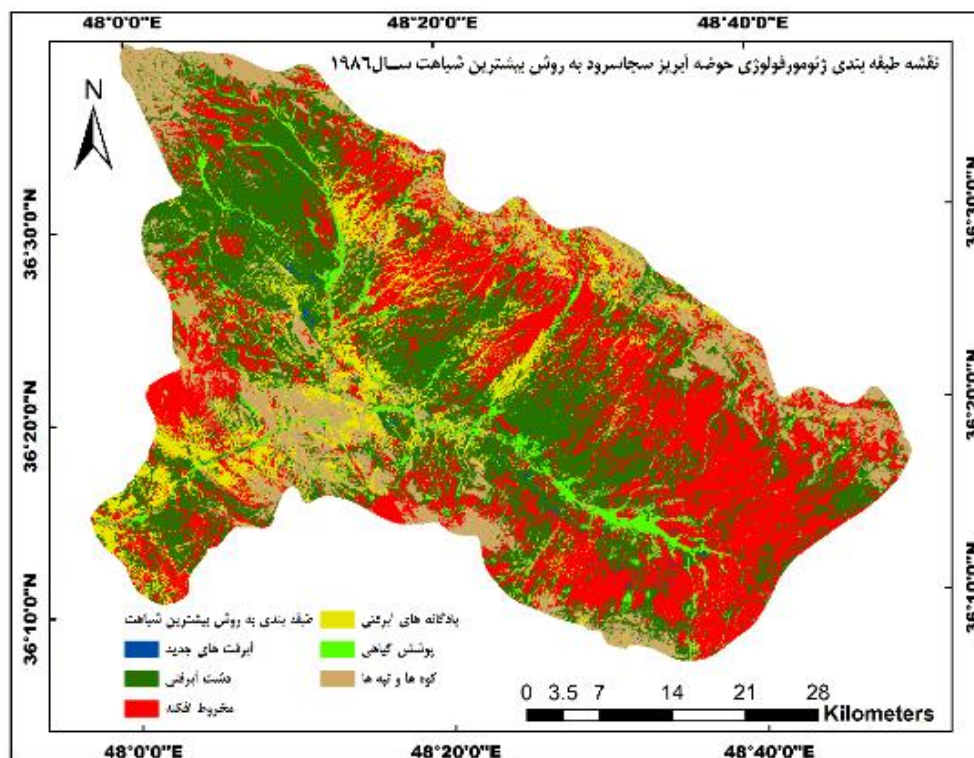
شکل ۴: چشم اندازی از لند فرم‌های حوضه آبریز ساجسرود (منبع: سایت داخلی)

پس از انجام فرایندهای مربوط به پیش‌پردازش در مرحله پردازش با بهره‌گیری از ترکیب رنگی RGB و ترکیب رنگی کاذب (FCC^۱)، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و فیلترهای بافتی نسبت به شناسایی بصری لند فرم‌های ژئومورفولوژی مهم اقدام گردید. شکل (۵) نمونه‌ای از روند شناسایی لند فرم‌هایی مانند مخروط افکنه‌ها و کوه‌ها و شکل (۶ و ۷) نقشه‌های ژئومورفولوژی حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌شده را نشان می‌دهد. بعد از شناسایی کلی اشکال ژئومورفولوژی از روش‌های مختلف، جهت طبقه‌بندی نهایی تصاویر، ابتدا از طریق ترسیم لایه‌های وکتوری روی تصاویر RGB نسبت به ویرایش جدول اطلاعاتی آن اقدام گردید. سپس لایه‌های وکتوری تبدیل به نمونه‌های تعلیمی برای هر کلاس گردید. سرانجام با استفاده از نمونه‌های تعلیمی الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمالاً اجرا گردید.

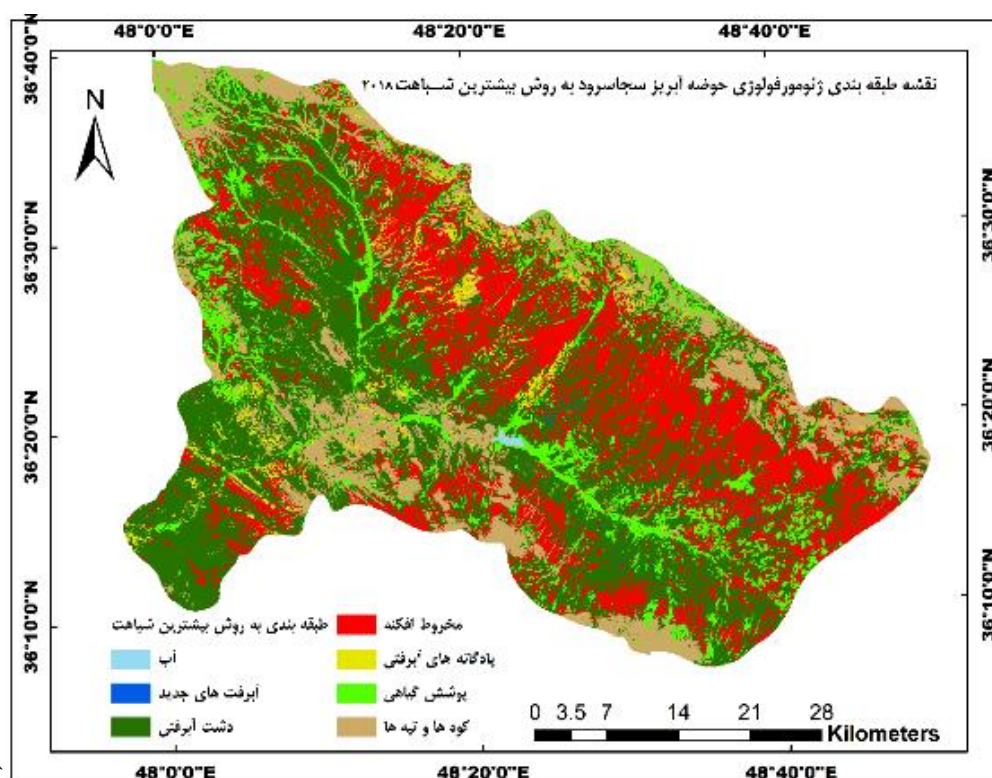
^۱ - false color composite



شکل ۵: نقشه PCA جهت شناسایی بهتر لند فرم ها ژئومورفولوژی (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۶: نقشه های ژئومورفولوژی حاصل از طبقه بندی نظارت شده بین سال های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۷: نقشه‌های ژئومورفولوژی حاصل از طبقه‌بندی نظارت‌شده بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

ارزیابی صحت طبقه‌بندی

جهت سنجش میزان صحت و دقت نقش‌های طبقه‌بندی از شاخص صحت کلی، ضریب کاپا، استفاده گردید. در جدول (۲) نتایج حاصل از ارزیابی صحت و دقت طبقه بندی آورده شده است.

جدول ۲: ارزیابی دقت طبقه‌بندی الگوریتم حداکثر شباهت (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

۲۰۱۸		۱۹۸۶		سال
ضریب کاپا	دقت کل (به درصد)	ضریب کاپا	دقت کل (به درصد)	الگوریتم طبقه‌بندی
۰/۹۵۸۷	۹۸/۱۸	۰/۹۶	۹۷/۷۰	حداکثر شباهت

در ادامه به منظور آشکارسازی میزان تغییرات لند فرم‌های ژئومورفولوژی، در فرایند پس پردازش، از دو تابع تحلیل روند تغییرات در نرم‌افزار ENVI روی نقشه طبقه‌بندی شده حداکثر شباهت استفاده گردید. خروجی این توابع در قالب جدول (۳) و شکل (۸) آورده شده است. علاوه بر این به جهت پیشی بینی تغییرات تا سال ۲۰۵۰ از سلول‌های خودکار زنجیره مارکوف نیز با استفاده از نرم افزار ادریسی ترست بهره گرفته شد. در این میان ماتریس‌های احتمال انتقال و مساحت انتقال جدول (۵۴) با زنجیره مارکوف به دست آمد. آنچه از جداول (۵، ۴، ۳) و شکل (۷) استنباط می‌شود تغییرات گسترده در مساحت لند فرم‌های سطحی ژئومورفولوژی مهم حوضه آبریز سجاجسروود است که نشان از پویایی فرایندهای مؤثر در لند فرم‌ها و عملکرد قوی نیروهای زمین‌ساخت به‌خصوص دینامیک بیرونی و فعالیت‌های انسانی در تحول و تکامل فرم‌های ژئومورفولوژی است. با توجه به آمار و اطلاعات به دست آمده در طول ۳۲ سال، مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌های کوهستانی

و رودخانه‌ای بیشترین تغییر کاهشی را داشتند. در عوض مساحت دشت‌های آبرفتی و پوشش گیاهی شکل (۷ و ۸) تغییر افزایشی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. مساحت نواحی کوهستانی، تپه‌ماهوری و آبرفت‌های اخیر نیز تغییر کاهشی ناچیزی را نشان می‌دهند. مدل مارکوف مطابق با جدول (۴) نشان داد به ترتیب آبرفت‌های جدید، پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌ها بیشترین انتقال پیکسل به لندفرم دشت آبرفتی داراست. همچنین طبق جدول (۵) بیشترین جابجایی مساحت مربوط به مخروط افکنه‌ها و دشت آبرفتی است. علل این کاهش‌ها و افزایش‌ها بیش از همه به فعالیت‌های گسترده کشاورزی در سه دهه گذشته گسترش مخروط افکنه‌ها، پادگانه‌های آبرفتی و آبرفت‌های جدید ارتباط وسیع با میزان نزولات جوی به خصوص بارش برف دارد که متأسفانه در سه دهه گذشته با کاهش مواجه بودند. از طرفی فعالیت‌های کشاورزی طی سه دهه اخیر با رشد سرسام‌آوری روبرو بوده که هم باعث تغییر کاربری در بستر ژئوفرم‌های گوناگونی مانند مخروط افکنه، دامنه کوه‌ها، تپه‌ها، پادگانه‌ها و بستر آبرفت‌های اخیر شده است و هم ویژگی فیزیکی و شیمیایی و زیستی عوارض سطح زمین دچار تغییر و دگرگونی گردیده است. به علت اینکه در فرایند طبقه‌بندی پیکسل مبنا کوچک‌ترین تغییر در عوارض سطح زمین در باندهای طیفی مختلف تصاویر ماهواره‌ای خود را نشان می‌دهد، لذا تغییرات مکانی از نظر مساحت و شکل در طول یک دوره ۳۰ ساله کاملاً طبیعی و منطقی است. فعالیت‌های مربوط به کریوکلستی، ترموکلستی و بارش برف و باران دائماً سبب فرسایش پهنه‌های کوهستانی و تپه‌ماهوری می‌شوند. از طرفی فعالیت‌های کشاورزی در دامنه کوه‌ها و تپه‌ها بازتاب امواج الکترومغناطیسی ماهواره‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در نتیجه ممکن است در طبقه‌بندی تصاویر بخش‌هایی از لند فرم‌های ذکر شده در کلاس مربوط به پوشش گیاهی قرار بگیرند. البته با توجه فعال بودن فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه از نقش اثر گذار این عامل نباید غافل شد.

جدول ۳: ماتریس تغییرات مساحت لند فرم‌های ژئومورفولوژی به کیلومتر مربع نسبت به هم در طول دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ و درصد تغییرات کلاس‌های مختلف و تصویر طبقه‌بندی شده به روش حداکثر شباهت (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۱)

نوع لند فرم	مخروط افکنه	دشت آبرفتی	آبرفت‌های جدید	پادگانه‌های آبرفتی	کوه‌ها و تپه‌ها	پوشش گیاهی	مجموع ردیف	مجموع کلاس‌ها
مخروط افکنه	۴۰۱/۶۸	۲۰۳/۶۳	۰/۲۵	۲۶/۸	۲۵/۷۹	۲/۶۶	۶۶۰/۸۲	۶۶۱/۰۳
دشت آبرفتی	۳۵۴/۱۷	۵۴۱/۹۶	۷/۵۶	۱۲۴/۲۳	۷۷/۴۳	۱۶/۲۹	۱۱۲۱/۶۵	۱۱۲۲/۲۵
آبرفت‌های جدید	۰/۶۳	۱/۸۲	۰/۰۷	۰/۰۱	۰	۰/۰۲	۲/۵۴	۲/۵۴
پادگانه آبرفتی	۷/۰۱	۵/۱۸۷	۰/۰۱	۳۹/۶۵	۱۱/۱۱	۰/۳۴	۶۳/۹۹	۶۴/۰۵
پوشش گیاهی	۵۶/۸۳	۶۶/۹۹	۰/۱۲	۵/۳۴	۵۴/۲۴	۷۳/۵۸	۲۵۷/۱۱	۲۵۷/۳۹
منابع آب	۰/۲۸	۰/۵۵	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۸	۲/۲۶	۲/۲۶
کوه‌ها و تپه‌ها	۲۳/۶۱	۶۵/۵۶	۰/۹۶	۵۶/۰۹	۲۳۶/۴۹	۵/۴۹	۳۸۸/۲	۳۸۸/۸۷
مجموع کلاس‌ها	۸۴۴/۶۶	۸۸۶/۶۵	۸/۹۸	۲۵۲/۵۲	۴۰۵/۹۱	۹۹/۱۹	۰	۰
تغییرات مساحت	۴۴۲/۹۸	۳۴۴/۶۹	۸/۹۱	۲۱۲/۸۷	۱۶۹/۴۲	۲۵/۶۱	۰	۰

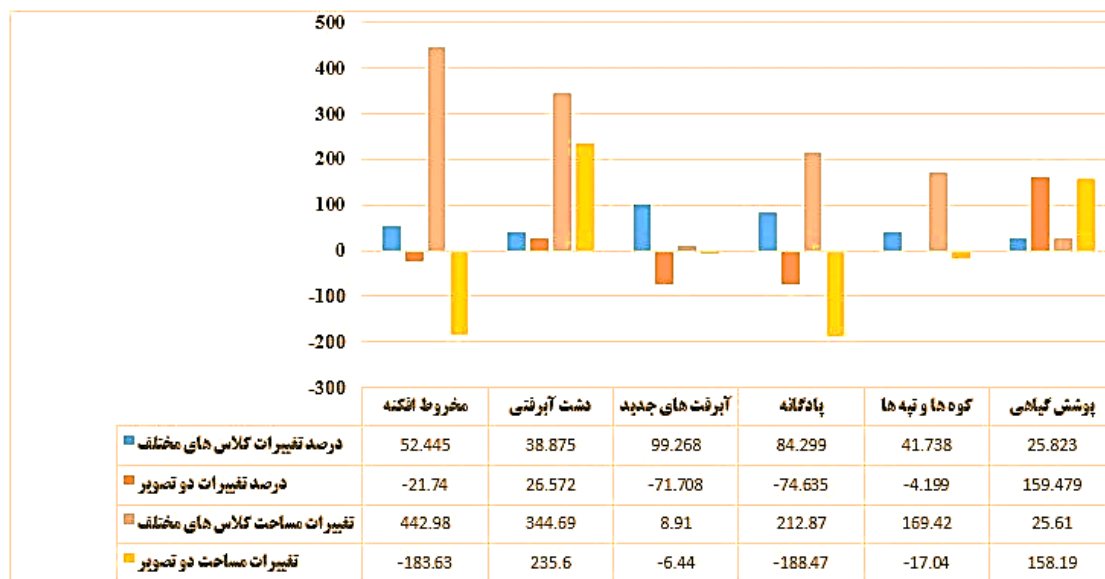
کلاس‌ها							
تغییرات مساحت دو تصویر	-۱۸۳/۶۳	۲۳۵/۶	-۶/۴۴	-۱۸۸/۴۷	-۱۷/۰۴	۱۵۸/۱۹	.
درصد تغییرات کلاس‌ها	۵۲/۴۴	۳۸/۸۷	۹۹/۲۷	۸۴/۳۰	۴۱/۷۴	۲۵/۸۲	.
درصد تغییرات دو تصویر	-۲۱/۷۴	۲۶/۵۷	-۷۱/۷۱	-۷۴/۶۳	-۴/۲۰	۱۵۹/۴۸	.

جدول ۴: ماتریس احتمال انتقال پیکسل‌های یک کلاس به کلاس دیگر بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ با استفاده از مدل مارکوف (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

نام کلاس	مخروط افکنه	دشت آبرفتی	آبرفت‌های جدید	پادگانه آبرفتی	کوه‌ها و تپه‌ها	پوشش گیاهی
مخروط افکنه	۰,۴۴۴۰	۰,۴۴۷۶	۰,۰۰۰۵	۰,۰۰۸۹	۰,۰۳۰۸	۰,۰۶۸۱
دشت آبرفتی	۰,۲۲۷۲	۰,۵۹۵۷	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۷۲	۰,۰۸۳۵	۰,۰۸۵۴
آبرفت‌های جدید	۰,۰۲۲۱	۰,۸۲۵۶	۰,۰۰۲۰	۰,۰۰۰۰	۰,۱۳۸۲	۰,۰۱۲۱
پادگانه آبرفتی	۰,۰۹۹۶	۰,۴۹۴۱	۰,۰۰۰۰	۰,۱۴۳۷	۰,۳۳۹۸	۰,۰۲۲۸
کوه‌ها و تپه‌ها	۰,۰۵۹۴	۰,۱۹۳۲	۰,۰۰۰۰	۰,۰۲۴۵	۰,۵۸۵۲	۰,۱۳۷۶
پوشش گیاهی	۰,۰۳۰۰	۰,۱۸۴۴	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۳۳	۰,۰۵۹۸	۰,۷۲۲۵

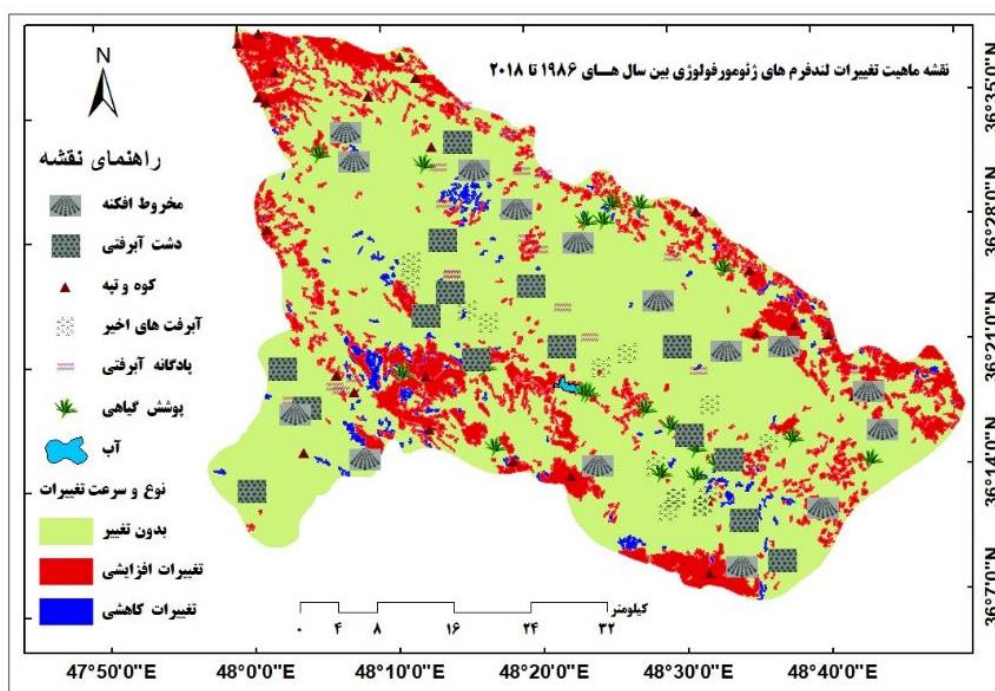
جدول ۵: ماتریس انتقال مساحت از ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ به درصد با استفاده از مدل مارکوف (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

نام کلاس	مخروط افکنه	دشت آبرفتی	آبرفت های جدید	پادگانه آبرفتی	کوه ها و تپه ها	پوشش گیاهی
مخروط افکنه	۴۹/۵۲	۲۶/۰۳	۱۸/۹۷	۱۷/۸۷	۵/۴۴	۱۱/۸۱
دشت آبرفتی	۴۴/۳۲	۶۰/۶۰	۷۹/۹۱	۲۵/۰۷	۲۵/۸۲	۲۵/۸۹
آبرفت های جدید	.	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰
پادگانه آبرفتی	۰/۹۹	۰/۵۵	۰/۰۰	۲۵/۵۶	۰۳/۷۶	۰/۳۵
کوه ها و تپه ها	۳/۹۰	۶/۶۲	۰/۲۲	۲۸/۹۵	۶۰/۸۹	۱۴/۰۵
پوشش گیاهی	۱/۲۸	۴/۱۰	۰/۶۷	۲/۵۴	۴/۰۴	۴۷/۸۹



شکل ۸: نمودار تغییرات مساحت و درصد کلاس ها و نقشه های طبقه بندی شده مربوط به دوره زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

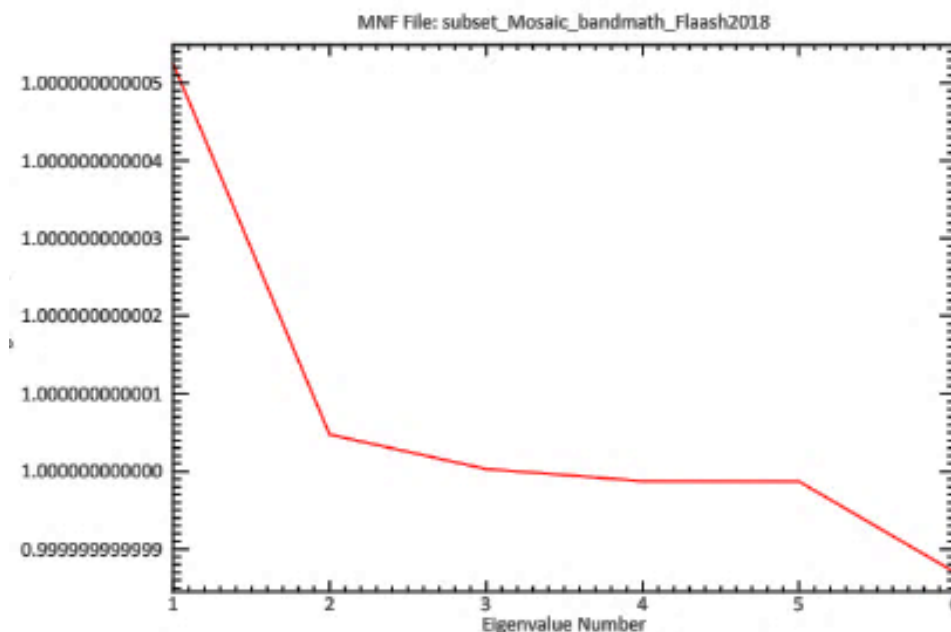
در شکل (۹) روند تغییرات لند فرم ها را از لحاظ شدت یا عدم شدت تغییرات ملاحظه می کنید. منظور از روند افزایشی و یا کاهشی، بیشتر شدت و سرعت تغییرات است. البته متناسب با نوع عملکرد نیروها، طی ۳۲ سال گذشته تغییرات شکلی و مکانی در بستر رودخانه، دامنه ها، تپه ماهورها و تراس های آبرفتی و سایر اشکال ژئومورفولوژی روی داده است. ولی هدف نقشه (شکل ۹) بیشتر نمایش شدت یا ضعف عوامل و نیروهای اثرگذار در روند تغییرات لند فرم ها است.



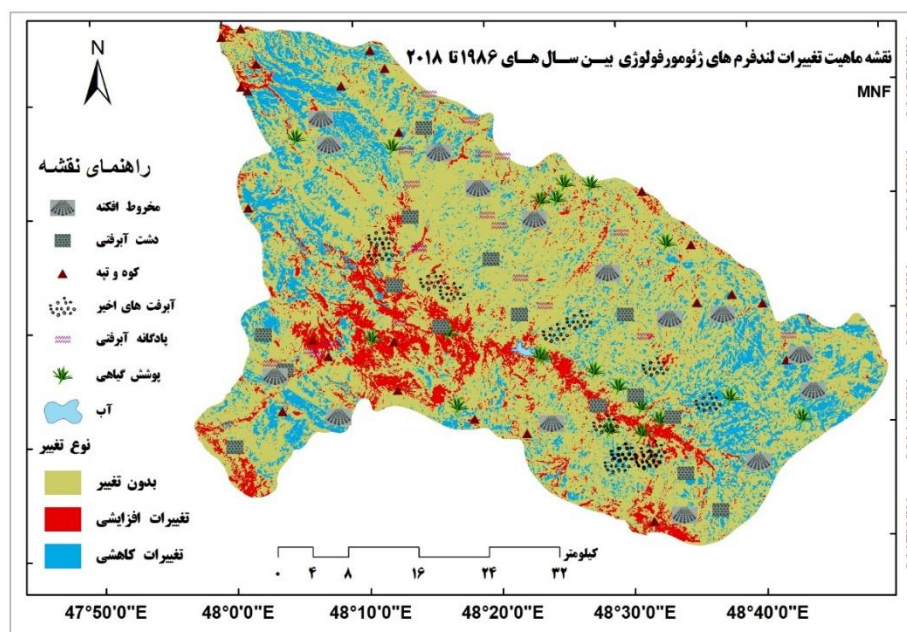
شکل ۹: نقشه روند تغییرات بر روی نقشه طبقه‌بندی حداکثر شباهت با استفاده از الگوریتم (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

الگوریتم Image Change Workflow علاوه بر اعمال بر روی تصاویر طبقه‌بندی شده برای تصاویر RGB و الگوریتم‌های دیگر مانند PCA، MNF قابل اجرا است. به منظور مقایسه و درک بهتر روند تغییرات بین تصاویر ماهواره ای ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ بعد از انجام مرحله پیش‌پردازش الگوریتم MNF^۱ برای هر دو تصویر صورت گرفت. این روش مدل تصحیح شده PCA است. حجم وسیع داده‌های سنجنش از دور در تصاویر چند طیفی و فرا طیفی، اغلب باعث بروز مشکلاتی در تجزیه و تحلیل این تصاویر می‌شود. در این گونه تصاویر پیکسل‌های تصویر پس‌زمینه تصویر مختلط است و بنابراین تصاویر از وضوح کافی، برخوردار نیست. این اختلاط محقق را به خصوص در فرآیند طبقه‌بندی تصاویر با مشکل مواجه می‌سازد و محقق در مواجهه با پیکسل‌های مخلوط نخواهد توانست کلاس درست را اختصاص دهد و اغلب پیکسل‌های مخلوط در کلاس اشتباه قرار خواهد گرفت. یکی از روش‌های متداول برای رفع ابهام پیکسل‌های مخلوط روش MNF است. این تبدیل یک تبدیل خطی است که برای مشخص کردن بُعد و حجم اصلی تصویر، جدا کردن نویز از دیگر اطلاعات و کاهش میزان پردازش در مرحله بعد استفاده می‌شود (بینقی، و همکاران، ۱۳۹۳، ۳۹). بعد از ایجاد تصاویر MNF دو زمانه با استفاده از الگوریتم Image Change Workflow که یکی از بهترین توابع نرم‌افزار ENVI برای آشکارسازی تغییرات سری زمانی است، نسبت به آشکارسازی تغییرات لند فرم‌ها در حوضه مورد مطالعه پرداخته شد. تصاویر ورودی تصاویر MNF بود. از باند یک MNF به علت برخورداری از بیشترین اطلاعات طیفی شکل (۱۰) برای آشکارسازی استفاده گردید. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، بیشترین اطلاعات در باند یک قرار دارد. لذا باند یک برای الگوریتم Image Change Workflow معرفی شد. سرانجام نقشه (شکل ۱۱) به‌عنوان خروجی این تابع به دست آمد.

^۱ - Minimum Noise Fraction Transform



شکل ۱۰: نمودار اطلاعات طیفی باندهای تابع *mnf* تصویر لندست OLI (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۱۱: نقشه روند تغییرات لند فرم های حوضه آبریز سجاجسروود با استفاده از الگوریتم *Image Change Workflow* و تابع *MNF* (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

بعد از ترسیم و استخراج نقشه آشکارسازی تغییرات لند فرم ها برای درک بهتر و تجزیه و تحلیل راحت تر، نقشه تغییرات مربوط به دو دوره زمانی (*MNF*) با نقشه لند فرم های حاصل از طبقه بندی حداکثر احتمال در محیط نرم افزار *ArcGIS* تلفیق گردید و اطلاعات آماری زیر به دست آمد. در بخش نرخ تغییرات افزایشی دشت آبرفتی با رقم ۹۸۹۲/۴۵ هکتار بیشترین و در بخش تغییرات کاهش مخروط افکنه ها با رقم ۱۸۵۶۰/۳۸ هکتار بیشترین سهم را به خود اختصاص دادند.

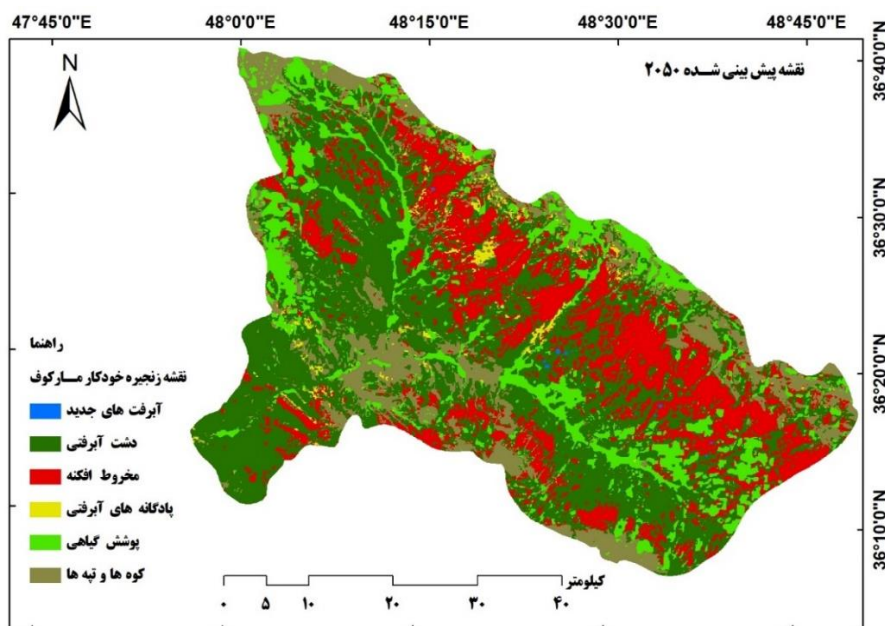


شکل ۱۲: نمودار انطباق لند فرم‌های ژئومورفولوژی با میزان روند تغییرات افزایشی با استفاده از روش MNF (تهیه: نگارندگان، ۱۴۰۱)



شکل ۱۳: نمودار انطباق لند فرم‌های ژئومورفولوژی با میزان روند تغییرات کاهش‌ی با استفاده از روش MNF (تهیه: نگارندگان، ۱۴۰۱)

نقشه شبیه سازی (پیش بینی) سلول های خودکار مارکوف جدول (۶) و شکل (۱۴) نشان داد به جزء سطوح پوشش گیاهی و آبرفت های جدید بقیه ژئوفرم ها با کاهش مساحت روبرو می شوند. مدل CA-MARKOV با استفاده از نتایج ۳۲ سال قبل نسبت به پیش بینی تغییرات لندفرم در ۳۲ سال آتی نموده است. چون در دوره قبلی نرخ مساحت پوشش گیاهی بیشتر بود و از طرفی با گسترش روزافزون فعالیت های کشاورزی بسیاری از لندفرم های سطحی حوضه تحت پوشش گیاهان قرار می گیرند. بنابراین مساحت پوشش گیاهی افزایش چشم گیری خواهد داشت.



شکل ۱۴: نقشه شبیه سازی (پیش بینی) تا سال ۲۰۵۰ مدل سلول های خودکار مارکوف (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

جدول ۶: نتایج مدل شبیه سازی شده سال ۲۰۵۰ CA-MARKOV و مقایسه آن با نقشه لندفرم های ۲۰۱۸ (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)

طبقه	نوع لندفرم	مساحت به کیلومتر مربع ۲۰۱۸	مساحت به کیلومتر مربع مدل سلول های خودکار ماکوف سال ۲۰۵۰	تفاضل مساحت مدل پیش بینی نسبت به مساحت تصویر ۲۰۱۸
1	مخروط افکنه	۶۵۴/۹۱	۵۸۹/۹۴	-۶۴/۹۷
2	دشت آبرفتی	۱۱۴۵/۷۷	۱۱۲۸/۸۴	-۱۶/۹۳
3	آبرفت های جدید	۱/۳۶	۱/۵۹	۰/۲۳
4	پادگانه های آبرفتی	۵۴/۱۰	۳۳/۱۰	-۲۴/۹۴
5	کوه و تپه	۳۸۵/۶۵	۳۷۱/۳۶	-۲۴/۲۸
6	پوشش گیاهی	۲۵۰/۳۵	۳۷۱/۳۱	۱۲۰/۹۶

نتیجه گیری

پدیده های ژئومورفولوژی دائماً توسط نیروهای زمین ساخت، عوامل دینامیک بیرونی مانند اقلیم و فعالیت های انسانی دستخوش تغییر و دگرگونی هستند. در گذشته های دور ریشه یابی تغییرات گسترده پدیده های ژئومورفولوژی کاری زمان بر و طاقت فرسا بود. ولی در سال های اخیر به لطف فناوری های سنسجش از دور ثبت کوچک ترین تغییرات محیطی کار را برای پژوهش گران ژئومورفولوژی راحت تر کرده است. منطقه کوهستانی حوضه آبریز سجا سرود و پدیده های متنوع ژئومورفولوژی آن به واسطه فرایندهای مختلف ژئومورفولوژی در حال تغییر و تحول است. برای بررسی تغییرات ژئومورفولوژی لند فرم های سطحی این حوضه آبریز و کشف تغییرات ۳۲ ساله آن از تصاویر ماهواره ای لندست کمک گرفته شد. بعد از انجام مراحل پیش پردازش، پردازش و پس پردازش، ژئو فرم ها با استفاده از روش طبقه بندی نظارت شده به روش حداکثر شباهت استخراج گردید. سپس با به کارگیری دو تابع Change Detection Statistics و Image Change Workflow در محیط نرم افزار ENVI که در زمینه آشکارسازی تغییرات کاربرد دارند، نسبت به استخراج تغییرات به شکل آماری و نقشه

اقدام گردید. نتایج مدل آماری Change Detection Statistics نشان داد پهنه‌های پوشش گیاهی و دشت آبرفتی به ترتیب ۱۵۹/۴۷ و ۲۶/۵۷ درصد نسبت به ۳۲ سال قبل مساحت شان افزایش یافته است. در مقابل کوه‌ها و تپه‌ها، پادگانه‌های آبرفتی، مخروط افکنه و آبرفت‌های جدید جدول (۳) با کاهش مساحت مواجه بودند. مقایسه نتایج جدول (۳) با نتایج جداول (۵۴) حاصل از مدل مارکف تفاوت چندانی نشان نمی‌دهد و به نوعی اعتبارسنجی دیگری برای صحت خروجی هر دو مدل محسوب می‌گردد. این نتایج با نتایج تحقیق شایان (۱۳۹۱) و کرم (۱۳۹۶) از نظر تغییرات مساحت لند فرم‌ها همسو هست. بدین معنی که تحقیقات این محققین هم نشان از تغییرات در مساحت لندفرم‌ها را منعکس کرده است. الگوریتم Image Change Workflow شدت روند تغییرات را با استفاده از تابع MNF طبق شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) آشکار و نمایان ساخت. بزرگ‌ترین تغییرات افزایشی مربوط به دشت‌های آبرفتی و کوه‌ها و تپه‌ها و بزرگ‌ترین تغییرات کاهش‌ی مربوط به مخروط افکنه است. نتایج جدول (۶) که مقایسه بین نقشه ۲۰۱۸ با نقشه پیش‌بینی ۲۰۵۰ است حاکی از افزایش مساحت پوشش گیاهی و آبرفت‌های جدید و کاهش مساحت سایر لندفرم‌ها است. این امر کاملاً منطقی است زیرا با گسترش توسعه فیزیکی شهرها و روستاها، گسترش صنایع و به زیر کشت بردن پهنه‌های مربوط به سطوح مخروط افکنه‌ها و دشت آبرفتی، کوهپایه‌ها و اراضی تپه‌ای بر وسعت نواحی دارای پوشش گیاهی افزوده شده و از سایر عوارض کاسته خواهد شد. پیشنهاد می‌گردد در راستای حل مشکلات مدیریت محیط و مخاطرات طبیعی و زیست‌محیطی پژوهشگران پرتلاش ژئومورفولوژی کشور و جهان روند تغییرات پدیده‌های ژئومورفولوژی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی مطلوب رصد کرده و مسئولین جهانی و کشوری را از نتایج فاجعه‌بار فعالیت‌های نادرست انسانی آگاه سازند تا شاید مرهمی باشد بر کالبد نیمه‌جان لندفرم‌های گوناگون ژئومورفولوژی که روز به روز با دخالت‌های غیر منطقی انسان در محیط به سوی ناتعادلی پیش می‌روند.

منابع

- -آرخی، ص؛ و مومنی طارم‌سری، م. (۱۳۹۴). آموزش تصویری نرم افزار انوی ۵. استان گلستان: دانشگاه گلستان. ۵۲۴ صفحه.
- -ارجمند زاده، ر؛ دبیری، رح؛ و الماسی، ع. (۱۳۹۷). کاربرد نرم افزار ENVI در علوم زمین. تهران: آذرین مهر.
- -اندریانی، ص؛ نیکجو م؛ رضائی مقدم م؛ مختاری م. (۱۳۹۷). تحلیل تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش‌های شی‌گرا و زنجیره مارکوف در حوضه آبریز زلیبیرچای واقع در آذربایجان شرقی و غربی. فصلنامه جغرافیا و توسعه. دوره ۱۶. صفحات ۳۷-۵۰.
- -بینقی، م؛ علی آبادی، ک؛ احمدی، ا. (۱۳۹۳). شناسایی اهداف محیطی با استفاده از روش MTMF و MNF (مطالعه‌ی موردی جنوب غرب سبزوار). ژئومورفولوژی کاربردی ایران، ۲(۳)، ۳۲-۴۶.
- -جوی زاده، س؛ قمرزاده، م؛ براهیمی، م؛ و شمس آبادی، م. (۱۳۹۶). آموزش کاربردی ENVI (مقدماتی و پیشرفته). تهران: انتشارات دانشگاهی کیان.
- -حسنی تبار، م؛ و جعفرزاده، ج. (۱۳۹۵). گامی نو در پردازش تصاویر ماهواره ای (مبانی و کاربرد) Envi 5.3. تهران: ناقوس.
- -رضایی مقدم، م ح؛ نیکجو، م؛ و کیانی، و. (۱۳۹۵). تحلیل کمی مورفولوژی مجرای رودخانه سجاسرود قبل و بعد از احداث سد گلابر (پایین دست سد) (پایان‌نامه کارشناسی ارشد). دانشگاه تبریز، دانشگاه تبریز.
- -زبیری، م؛ و مجد، ع (۱۳۹۲). آشنایی با فن‌سنجش از دور و کاربرد در منابع طبیعی. تهران: دانشگاه تهران، موسسه انتشارات و چاپ.
- -سیاوش ش؛ ملامهرعلیزاده ف؛ جنتی م. (۱۳۸۴). کارایی داده‌های سنجش از دور (RS) در تهیه نقشه‌های لندفرم و نقش آن در برنامه‌ریزی محیطی. فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۹(۴)، ۱۱۱-۱۴۸.

- -فتحی زاد، ح؛ زارع، م؛ کریمی، ح؛ و خنامانی، ع. (۲۰۱۸). شبیه سازی زمانی- مکانی تغییرات سیمای سرزمین با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول های خودکار (مطالعه موردی: منطقه خشک و نیمه خشک میمه دهلران). خشکبوم، ۱۱(۱)، ۲۶-۱۱.
- -کرم، ا؛ رعیتی شوازی، م؛ حمیدرضا غفاریان مالمیری؛ و سپهر ع. (۱۳۹۶). مقایسه کارایی برخی الگوریتم های طبقه بندی در مطالعه تغییرات لندفرم های بیابانی دشت یزد-اردکان. مجله پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۶(۱)، ۵۷-۷۳.
- -مکرّم، م؛ و حجتی م. (۱۳۹۵). مقایسه طبقه بندی لندفرم ها با استفاده از روش های قدیمی (استفاده از ارتفاع و شیب و انحناء) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در جنوب بجنورد. اکوپرشیا، ۴(۲)، ۱۳۴۳-۱۳۵۷
- -عابدینی، م؛ محمدزاده شیشه گران، م. (۱۴۰۱). تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با سطح آب های زیرزمینی و مخاطرات آن (مطالعه موردی: شهرستان ملارد) (مدیریت مخاطرات محیطی) دانش مخاطرات سابق، ۹(۱)، ۴۴-۳۱
- -عابدینی، م؛ عشقی چهاربرج، ع؛ سعیده علوی (۱۴۰۱) ارزیابی میزان تاب آوری کالبدی شهر در سناریوهای مختلف زلزله (مطالعه موردی منطقه شش تهران، نشریه فضای جغرافیایی. ۷۸ (۲۲)، ۲۱۳-۱۹۳.
- -عابدینی، م. (۱۳۸۵). ژئومورفولوژی تکتونیکی (جلد اول)، چاپ اول ۱۳۹۵. نشر دانشگاه محقق اردبیلی. ۲۹۲ صفحه.
- -علی آبادی، فهمیه؛ زارع، محمد؛ مالمیری، غفاریان؛ (۱۴۰۰). پیش بینی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلولهای خودکار (مطالعه موردی: حوزه شیرکوه). فصلنامه جغرافیا و توسعه. سال نوزدهم، شماره ۶۲ صفحات ۲۷۰-۲۵۱.
- -یمانی، م. (۱۳۹۴). نقشه های ژئومورفولوژی روش ها و تکنیک ها. تهران: دانشگاه تهران.
- -Anders, N. S.; Seijmonsbergen, A. C.; & Bouten, W. (2013). Geomorphological Change Detection Using Object-Based Feature Extraction From Multi-Temporal LiDAR Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6), 1587-1591.
- -Guha, Arindam; Roy, Priyom; Singh, Swati; & Kumar, K. Vinod. (2018). Integrated Use of LANDSAT 8, ALOS-PALSAR, SRTM DEM and Ground GPR Data in Delineating Different Segments of Alluvial Fan System in Mahananda and Tista Rivers, West Bengal, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(4), 501-514.
- -Liu, Xiaoye. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31-49.
- -Mitasova, Helena; Overton, Margery F.; Recalde, Juan José; Bernstein, David J.; & Freeman, Christopher W. (2009). Raster-Based Analysis of Coastal Terrain Dynamics from Multitemporal Lidar Data. *Journal of Coastal Research*, 507-514.
- -Mitsova, Diana; Shuster, William; & Wang, Xinhao. (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 141-153.
- -Nair, Hema C.; Joseph, Ammini; & Padmakumari Gopinathan, Vinod. (2021). GIS Based landform classification using digital elevation model: a case study from two river basins of Southern Western Ghats, Kerala, India. *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Norris, J. R. (1998). *Markov Chains*. Cambridge University Press.
- -Qi, Wenjuan; Yang, Xiaomei; Wang, Zhihua; Li, Zhi; Yang, Fengshuo; & Zheng, Zhiling. (2018). Fast Landform Position Classification to Improve the Accuracy of Remote Sensing Land Cover Mapping. *Earth Sciences*, 7(1), 23.

- -Sang, Lingling; Zhang, Chao; Yang, Jianyu; Zhu, Dehai; & Yun, Wenju. (2011). Simulation of Land Use Spatial Pattern of Towns and Villages Based on CA-Markov Model. *Math. Comput. Model.*, 54(3-4), 938–943.
- -Smith, Mike J.; Chandler, Jim; & Rose, James. (2009). High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(1), 155-161.
- -Solazzo, Daniel; Sankey, Joel B.; Sankey, Temuulen Ts.; & Munson, Seth M. (2018). Mapping and measuring aeolian sand dunes with photogrammetry and LiDAR from unmanned aerial vehicles (UAV) and multispectral satellite imagery on the Paria Plateau, AZ, USA. *Geomorphology*, 319, 174-185.
- -Ventura, Guido; Vilaro, Giuseppe; Terranova, Carlo; & Sessa, Eliana Bellucci. (2011). Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3237-3248.
- -Xiong, Li-Yang; Zhu, A.-Xing; Zhang, Lei; & Tang, Guo-An. (2018). Drainage basin object-based method for regional-scale landform classification: a case study of loess area in China. *Physical Geography*, 0(0), 1-19.