



تحلیل روند پوشش گیاهی و پایش سلامت بوم‌سازگان با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: منطقه فندقلو)

رقیه جهدی^{۱*} و کیومرث سفیدی^۲

^۱دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
^۲استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶)

چکیده

مقدمه: بوم‌سازگان‌های طبیعی در ایران تحت تأثیر آشفتگی‌های بی‌سابقه از جمله تغییرات اقلیمی مانند خشکی، آفات و بیماری‌ها، گونه‌های مهاجم و در نتیجه تغییرات پوشش گیاهی قرار دارند. تحلیل روند پوشش گیاهی و پایش سلامت بوم‌سازگان‌ها در مقیاس منطقه‌ای برای ارزیابی وضعیت در حال تغییر بوم‌سازگان‌ها و اطلاع‌رسانی مدیریت عوامل آشفتگی محیطی ضروری است. با این حال، این تحلیل‌ها تنها براساس بررسی‌های میدانی دشوار است. سنجش از دور امکان ارزیابی‌های جامع بوم‌سازگان‌ها در مناطق وسیع را فراهم می‌کند و تغییرات آنها را می‌توان در طول زمان با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی در تصاویر ماهواره‌ای چندزمانی مشاهده کرد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق از سری‌های زمانی تصاویر Landsat-7 ETM⁺ و Landsat 8 OLI/TIRS مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل روند پوشش گیاهی و پایش سلامت بوم‌سازگان‌ها در منطقه فندقلو (انتهای غربی هیرکانی در شرق اردبیل) استفاده شد. همچنین از آزمون ناپارامتری روند من-کندال (M-K) برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پوشش گیاهی استفاده شد.

یافته‌ها: براساس نتایج تغییرات کاربری اراضی در منطقه پژوهش، کاهش پوشش گیاهی در همه بوم‌سازگان‌های طبیعی شامل جنگل (۸/۵- درصد)، مرتع (۱۶/۵- درصد) و مناطق آبی (۱۷/۲- درصد) به دست آمد. در مقابل، مناطق کشاورزی (۱۴/۷ درصد) و انسان‌ساز (۳۰/۹ درصد) در دوره زمانی پژوهش افزایش نشان دادند. همچنین نتایج تغییر شاخص سلامت (NDVI) در طول دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۳ نشان‌دهنده روند قهوه‌ای شدن پوشش گیاهی (کاهش) در منطقه فندقلو است. افزون بر این، نتایج آزمون روند M-K نشان‌دهنده این است که NDVI یک روند افزایشی خطی معنی‌دار از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱، یک روند افزایشی خطی غیرمعنی‌دار از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ و یک روند کاهشی خطی غیرمعنی‌دار از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ داشته است.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه تحلیل روند پوشش گیاهی و شاخص سلامت مبتنی بر NDVI می‌تواند نشانه‌های ارزشمندی درباره برخی فرایندها ارائه دهد که برای ارزیابی‌های اکولوژیکی مانند ساده‌سازی و تخریب بوم‌سازگان یا تشدید فعالیت‌های کشاورزی مرتبط باشد. با توجه به روند کاهشی بوم‌سازگان‌های طبیعی و تهدید سلامت توصیه می‌شود برنامه‌های حفاظتی همسو با طبیعت در زمینه افزایش پوشش گیاهی و سلامت آن اعمال شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی اکولوژیکی، تحلیل روند، شاخص سلامت، منطقه فندقلو، Landsat.

مقدمه

گونه‌ها، ساختار جنگل و کیفیت رویشگاه که ممکن است بر روند بوم‌سازگان جنگل و همچنین سلامت جنگل تأثیر بگذارد، باید برای اکتشاف بهتر سلامت جنگل در نظر گرفته شود.

سنجش از دور بینش‌های ارزشمندی را درباره انواع چالش‌های محیط زیستی رو به گسترش امروزی ارائه می‌کند. نقش مهم سنجش از دور در اکولوژی و مدیریت جنگل شامل کاربردهای متنوعی مانند نقشه‌برداری از توزیع بوم‌سازگان‌های جنگلی و تشخیص ساختار سه‌بعدی جنگل‌هاست (Lechner et al., 2020). در دهه‌های گذشته، سنجش از دور به یک منبع مهم داده تبدیل شده و انواع مختلف سنجنده و سکو برای نقشه‌برداری متغیرهای مختلف جنگل استفاده شده است. سلامت جنگل متغیر مهمی است که پایش آن برای تصمیم‌گیری مدیریت جنگل ضرورت دارد. با این حال، ارزیابی و پایش سلامت جنگل تنها براساس بررسی‌های میدانی جنگل دشوار است (Meng et al., 2016). سنجش از دور قبلاً توانایی خود را در ارائه داده‌های مربوط به سلامت جنگل نشان داده است. سنجش از دور ماهواره‌ای برای نقشه‌برداری، کمی‌سازی و پایش سلامت جنگل‌های منطقه‌ای و جهانی، داده‌های اساسی را برای مشاهده الگوها و فرایندهای مکانی و زمانی جنگل فراهم می‌کند (Pause et al., 2016). داده‌ها و تکنیک‌های سنجش از دور نه تنها می‌توانند به شناسایی آسیب درخت و آشفستگی‌های جنگل کمک کنند، بلکه پتانسیل پایش سلامت جنگل را نیز دارند. برای مثال، هنگامی که پوشش گیاهی تحت تنش قرار می‌گیرد، محتوای کلروفیل کاهش و تجزیه مولکول‌های کلروفیل افزایش می‌یابد که خود بر رنگدانه‌های برگ گیاهان تأثیر می‌گذارد (Sims & Gamon, 2002). شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف که از قرمز، لبه قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده می‌کنند، مانند شاخص پوشش گیاهی تفاوت نرمال شده (NDVI)، به تغییرات کلروفیل حساس‌اند و بنابراین، پتانسیل تشخیص آلودگی و آسیب را دارند.

سلامت جنگل، اصطلاحی علمی است که در جنگلداری برای توصیف وضعیت توده جنگل استفاده می‌شود (Meng et al., 2016). طبق تعریف O'Laughlin & Cook (2003) سلامت جنگل شرایطی از بوم‌سازگان‌های جنگلی تعریف شده که پیچیدگی خود را در عین تأمین نیازهای انسان حفظ می‌کند. در این تعریف، تعاریف جنگل، بوم‌سازگان و سلامت ادغام شده و تلاش زیادی برای ترکیب دیدگاه‌های اجتماعی و اکولوژیکی و اقتصادی صورت گرفته که توسط سرویس جنگل ایالات متحده پذیرفته شده است و اغلب در پژوهش‌های جنگلداری استفاده می‌شود. برای ارزیابی شرایط فعلی سلامت جنگل و پایش پویایی آن، به اندازه‌گیری سلامت جنگل یا نحوه نمایش کمی سلامت جنگل نیاز است. به عبارت دیگر، ارزیابی سلامت جنگل برای استفاده در مدیریت جنگل نیازمند توسعه شاخص‌های اکولوژیکی عملی و مناسب است؛ یعنی شاخص‌هایی بدون ابهام و قابل پایش مقرون به صرفه (Freer-Burton et al., 2022). برخی از پژوهش‌های پیشین به استخراج معیارهای کمی، یعنی شاخص‌های مختلف سلامت جنگل مانند تنوع زیستی، پوشش گیاهی، وضعیت تاج درخت، مشخصات خاک، جوامع گل‌سنگ، تنوع قارچ میکوریزا و گونه‌های جانوری برای ارزیابی سلامت جنگل پرداخته‌اند (Evangelides & Nobajas, 2020; Lausch et al., 2018). این پژوهش‌ها امکان درک و ارزیابی کمی و پایش سلامت جنگل را فراهم کرده‌اند. با این حال، این شاخص‌ها اغلب بر یک جنبه برای توصیف وضعیت سلامت تمرکز دارند. سازوکاری که سلامت جنگل را تعیین می‌کند، فرایندی پیچیده است که ممکن است شامل تعامل پیچیده بین عناصر زنده و غیرزنده باشد (Zhou et al., 2020). در نتیجه اگر فقط یک جنبه را بررسی کنیم، ممکن است سلامت جنگل به طور کامل نشان داده نشود. بنابراین جنبه‌های بیشتری مانند پوشش گیاهی، ترکیب

شده‌اند و چه آنهایی که این آشفتگی‌ها را تجربه نکرده‌اند. هدف این پژوهش، بیان کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و GIS برای تشخیص تغییر پوشش زمین و پایش سلامت بوم‌سازگان‌ها مبتنی بر شاخص‌های پوشش گیاهی در بخشی از جنگل‌های هیرکانی در منطقه فندقلو در شهرستان نمین، استان اردبیل است. فندقلو یک منطقه بینابینی آب‌وهوای خشک و سرد ناحیه اردبیل با آب‌وهوای گرم و مرطوب ناحیه گیلان است. در گذشته، به دلیل شکننده بودن محیط اکولوژیکی از جمله شیب تند منطقه جنگلی که موجب تشدید حساسیت خاک به فرسایش آبی شده (Asghari et al., 2015) و نیز استفاده ناپایدار از زمین توسط انسان، فرسایش خاک شدیدی در منطقه رخ داده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فرسایش و رسوب‌دهی، نخست تحت تأثیر پوشش گیاهی (شاخص NDVI) است (Kashi et al., 2016). در پژوهش قبلی در منطقه فندقلو روند کاهشی پوشش جنگل در دوره پژوهش (۲۰۱۹-۲۰۲۵) و نیز پیش‌بینی شده (۲۰۱۹-۲۰۲۵) مشاهده شد (Valizadeh Kamran et al., 2023). برای افزایش داده‌های موجود به منظور بررسی کاهش جنگل‌ها، شناسایی نقاط داغ تنش جنگل در مکان و زمان، در حالت بهینه در زمان واقعی باید امکان بررسی‌های فعلی در شرایط استرس‌زا فراهم شود (Buras et al., 2021). سنجش از دور ماهواره‌ای وسیله‌ای برای دستیابی به چنین اطلاعاتی در مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد. به این معنا که ماهواره‌ها اطلاعاتی را درباره بازتاب سطح پوشش گیاهی ارائه می‌دهند که می‌تواند به شاخص‌های پوشش گیاهی و/یا محصولاتی که به‌منزله شاخص‌هایی برای وضعیت جنگل عمل می‌کنند ترجمه شود (Rita et al., 2020). این مطالعه با هدف پایش زمان واقعی وضعیت جنگل در کنار تحلیل تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی در انواع پوشش زمین جنگل، مرتع و کشاورزی با استفاده از سری‌های زمانی تصاویر لندست انجام گرفت.

شاخص‌های اصلی سلامت جنگل عبارت‌اند از وضعیت پوشش گیاهی، کیفیت خاک، آب و تعداد پرندگان و آفات است (Freer-Burton et al., 2022). ارزیابی سلامت پوشش گیاهی می‌تواند شامل اندازه‌گیری سطح بیماری و آفات، آسیب پوشش گیاهی، نرخ رشد، تنوع گونه‌ها و توانایی بازسازی باشد (Trumbore et al., 2015). همچنین می‌تواند شامل وضعیت تاج پوشش جنگل با در نظر گرفتن لایه‌های تاج پوشش معمولی، زیراشکوب و گونه‌های مورد انتظار باشد (Forbes et al., 2020). پژوهش‌های متعددی برپایه سنجش از دور برای استخراج متغیرهای سلامت جنگل مانند شناسایی آفات و بیماری‌ها (Murfit et al., 2016)، بازسازی پس از آتش‌سوزی (Evangelides & Nobajas, 2020)، مرگ‌ومیر، زوال و استرس (Assal et al., 2016) انجام گرفته است. بسیاری از محققان از تصاویر Landsat برای بررسی سلامت جنگل مبتنی بر شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده کرده‌اند (Zhu et al., 2016; Langner et al., 2016). پوشش گیاهی به‌طور کلی از طریق مشاهده بصری اندازه‌گیری می‌شود که تعیین کمیت آن دشوار است. این می‌تواند شامل مشاهدات میدانی و/یا سنجش از دور برای ارزیابی وضعیت ساختاری و مورفولوژیکی پوشش گیاهی و تاج درخت باشد (Lausch et al., 2018). سنجش از دور ابزاری است که به‌راحتی برای تشخیص و پایش شرایط سطح زمین به‌صورت مکانی و چندزمانی استفاده می‌شود. استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای از طریق استخراج شاخص پوشش گیاهی در حال حاضر به‌طور گسترده‌ای برای تشخیص و پایش شرایط پوشش گیاهی استفاده می‌شود. شاخص پوشش گیاهی با تشخیص سلامت پوشش گیاهی همبستگی قوی دارد (O'Connell et al., 2010). تجزیه و تحلیل شاخص پوشش گیاهی، رویکردی برای تعیین وضعیت جنگل‌هاست، چه جنگل‌هایی که دچار آشفتگی‌هایی مانند آتش‌سوزی

روش‌هایی شامل آزمون ناپارامتری من- کندال (M-K) برای تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی NDVI در منطقه پژوهش از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. با توجه به افزایش دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای در سراسر جهان، روش ارائه شده در این پژوهش برای نقشه برداری تغییرات زمانی- مکانی و پایش سلامت، پتانسیل خوبی برای کاربردهای آتی مدیریت سیمای سرزمین ارائه می‌کند.

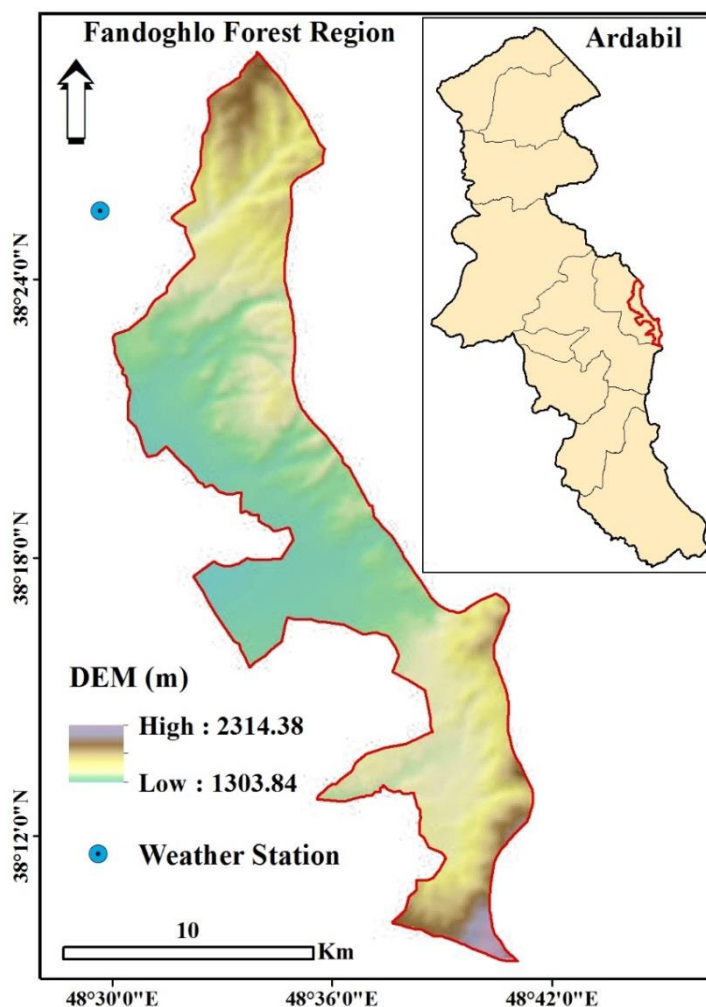
مواد و روش‌ها
منطقه پژوهش

منطقه پژوهش در شرق اردبیل (شهرستان نمین) بین $38^{\circ}31'$ تا $48^{\circ}34'$ طول شرقی و $38^{\circ}22'$ تا $38^{\circ}24'$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت منطقه

روش‌هایی شامل آزمون ناپارامتری من- کندال (M-K) برای تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی NDVI در منطقه پژوهش از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. با توجه به افزایش دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای در سراسر جهان، روش ارائه شده در این پژوهش برای نقشه برداری تغییرات زمانی- مکانی و پایش سلامت، پتانسیل خوبی برای کاربردهای آتی مدیریت سیمای سرزمین ارائه می‌کند.

مواد و روش‌ها
منطقه پژوهش

منطقه پژوهش در شرق اردبیل (شهرستان نمین) بین $38^{\circ}31'$ تا $48^{\circ}34'$ طول شرقی و $38^{\circ}22'$ تا $38^{\circ}24'$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت منطقه



شکل ۱- نقشه موقعیت و مدل رقومی ارتفاع منطقه پژوهش

Figure 1. Location map and digital elevation model of the study area

شیوه اجرای پژوهش

یکی از راه‌حل‌های پایش مناطق بزرگ و کشف مسائل بسیار پیچیده بوم‌سازگان‌ها، استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای است. داده‌های لندست برای بررسی بوم‌سازگان‌ها مناسب است، زیرا اندازه تفکیک مکانی متوسط ۳۰ متر و انواع باندهای مرئی تا باند مادون قرمز موج کوتاه را ارائه می‌دهد و افزون بر این، از سال ۱۹۸۴ تداوم زمانی خوبی را حفظ کرده است که برای بررسی سری زمانی طولانی مناسب است. در این پژوهش از داده‌های بازتاب سطحی لندست-۵ (سنجنده TM برای سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۴)، لندست-۷ (سنجنده ETM+ برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸) و لندست-۸ (سنجنده OLI/TIRS برای سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۴ و ۲۰۲۳-۲۰۱۹) استفاده شد (شکل ۲). از داده‌های واقع در منطقه پژوهش (ردیف/مسیر ۳۳/۱۶۷ در سیستم مرجع جهانی) با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متری، استفاده شد. داده با پوشش ابری کمتر از ۷۰ درصد در ماه‌های تابستان (ژوئن-آگوست) در تجزیه و تحلیل استفاده شد. زمان تابستان، بهترین دوره برای پایش سلامت (یا نظارت بر خسارت) است. در مرحله پیش‌پردازش تصاویر در نرم‌افزار ENVI 5.6، در ابتدا تصاویر دچار نقص در تصحیح خط اسکن، مانند لندست-۷ (ETM+)، با استفاده از نرم‌افزار GAP-Fill تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و سازمان فضایی آمریکا اصلاح شد. برای دستیابی به مقدار بازتاب دقیق روی تصویر، کالیبراسیون رادیومتری و تصحیح جوی FLAASH (تجزیه و تحلیل سریع خط دید اتمسفر از طریق طیف ابر مکعب) برای همه تصاویر انجام گرفت. افزون بر این، تصحیح هندسی برای سازگاری خوب موقعیت فضای تصاویر توسعه یافت. تصاویر به روش استفاده از نقاط کنترل زمینی (مستخرج از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ منطقه) با خطای هندسی نیم‌پیکسل از نظر هندسی تصحیح شد (RMSE = 0.57 - 0.63).

به منظور تهیه نقشه طبقات پوشش، نقشه پایه منطقه پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth تهیه شد. برای تفسیر تصاویر، از نرم‌افزارهای ENVI 5.6 و ArcGIS 10.8 برای تهیه نقشه طبقه‌بندی پوشش اراضی منطقه پژوهش با در نظر گرفتن داده‌های پیمایش میدانی با کاربرد نقشه پایه برای شناسایی طبقات مختلف پوشش‌ها استفاده شد. همچنین بررسی میدانی برای ثبت طول و عرض جغرافیایی طبقات مشخص پوشش انجام گرفت. از دانش پیمایش میدانی، پنج طبقه پوشش زمین برای بررسی شناسایی شد. داده تعلیمی (در مجموع ۱۰۰ نمونه) برای هر کدام از طبقات پوشش زمین به صورت تصادفی از منطقه پژوهش جمع‌آوری شد که ۷۰ نمونه آن برای طبقه‌بندی اراضی (۱۴ نمونه برای هر طبقه پوشش) و بقیه برای ارزیابی صحت استفاده شد. براساس گزارش Thanh & Kappas (2017) پیکسل‌های تعلیمی که حداقل ۰/۲۵ درصد از منطقه پژوهش را پوشش می‌دهند اغلب توصیه می‌شود. نمونه‌های انتخاب‌شده در این تحقیق در مجموع ۵۲۳،۵۷۲ پیکسل را برای داده‌های آموزشی پوشش دادند (۰/۲۹ درصد از کل منطقه پژوهش). با استفاده از این اطلاعات به‌عنوان داده تعلیمی و الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)، طبقه‌بندی پوشش زمین انجام گرفت. در حین بررسی منابع، مشخص شد که SVM کاربرد بیشتری داشته و برای استفاده دقت مناسبی دارد (Najafi et al., 2017). با توجه به ارزیابی صحت تصاویر استفاده‌شده در این پژوهش، آماره‌های صحت کلی بیش از ۹۲ درصد و ضریب کاپا بیش از ۰/۸۹ برای کل تصاویر طبقه‌بندی‌شده به دست آمد.

بعد از تهیه نقشه‌های پوشش اراضی در دوره پژوهش، اندازه تغییر برای هر طبقه پوشش زمین با کم کردن پوشش منطقه در سال آخر از پوشش منطقه در سال اول (رابطه ۱) به صورت زیر محاسبه شد:

برای به دست آوردن نرخ تغییر سالانه برای هر نوع پوشش زمین، تفاوت بین سال آخر تا سال اول که نشان‌دهنده میزان تغییر بین سال‌هاست، بر تعداد سال پژوهش یعنی ۲۰۲۳-۲۰۰۳ (۲۰ سال) تقسیم شد (رابطه ۳).

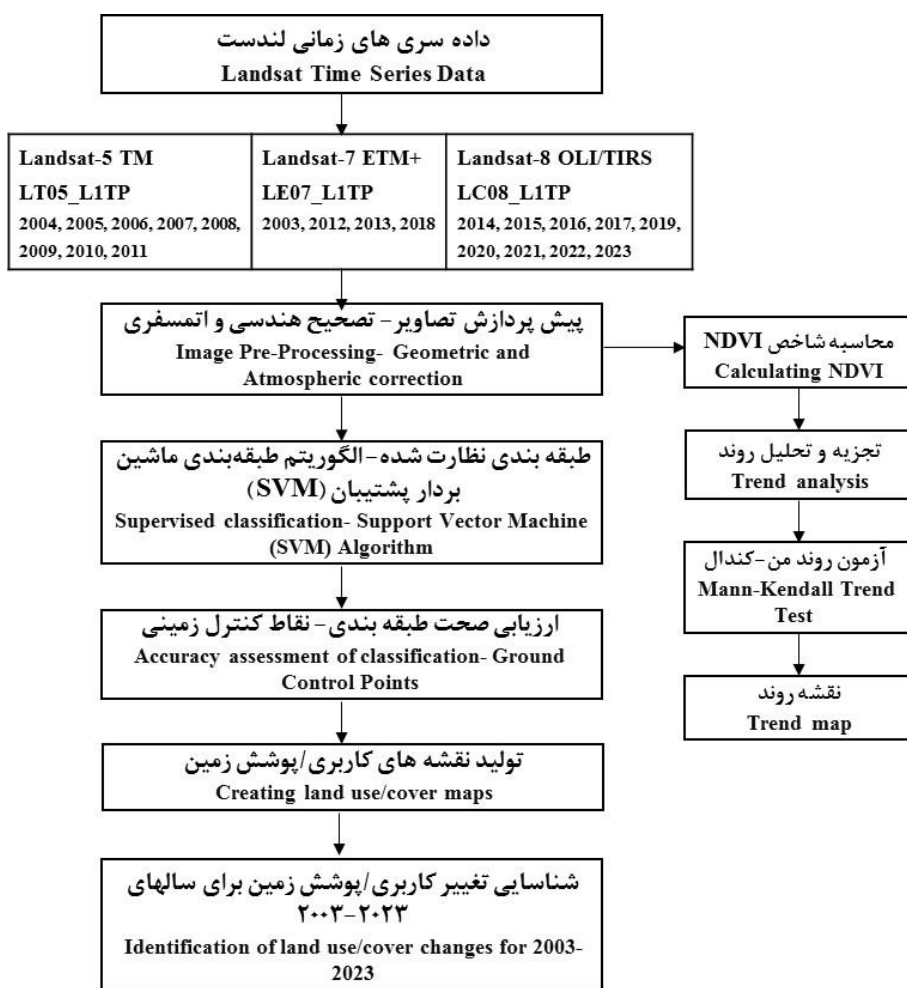
تعداد سال / (اندازه (مساحت به هکتار) سال اول - رابطه ۳ اندازه (مساحت به هکتار) سال آخر) = نرخ تغییر سالانه (هکتار)

نمودار شماتیک گردش کار در شکل ۲ ارائه شده است.

اندازه (مساحت به هکتار) سال اول - اندازه رابطه ۱ (مساحت به هکتار) سال آخر = اندازه (مساحت به هکتار) تغییر

سپس درصد تغییر (روند) برای هر نوع پوشش زمین با تقسیم اندازه تغییر بر سال پایه (سال اول) محاسبه شد و همان‌طور که در رابطه ۲ نشان داده شده است در ۱۰۰ ضرب شد.

اندازه (مساحت به هکتار) سال اول / (۱۰۰ × رابطه ۲ اندازه (مساحت به هکتار) تغییر) = درصد تغییر



شکل ۲- نمودار شماتیک (فلوچارت) مراحل پژوهش
Figure 2. The flowchart of the steps of this study

(Xue & Su, 2017). در این میان، شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI) از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌ها محسوب شده و برای تحقیقات در زمینه‌های پوشش زمین جهانی و منطقه‌ای،

انواعی از شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی با هدف تخمین غیرفعال پارامترهای بیوفیزیکی براساس تشعشعات طیفی سنجش از دور توسعه یافته‌اند. در حال حاضر ۴۰ شاخص پوشش گیاهی تعریف شده است

پژوهش با مرور زمان سبتر می‌شود یا قهوه‌ای‌تر از آزمون روند استفاده شد. به عبارت دیگر، هدف تعیین افزایش یا کاهش بودن مقادیر NDVI به‌طور کلی در طول دو دهه گذشته است. آزمون M-K آزمون ناپارامتریک مناسبی برای مدیریت داده‌های توزیع‌شده غیرنرمال است که به‌طور گسترده برای نشان دادن روندها در داده‌های سری زمانی آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی کاربرد دارد (Liu et al., 2022). این آزمون به تداخل چند نقطه پرت حساس نیست و به‌ویژه برای داده‌های سری زمانی کوتاه‌مدت مؤثر است (Hamed, 2009). در پژوهش‌های متعددی از این آزمون برای تعیین روند تغییرات پوشش گیاهی استفاده شده است (Zhou et al., 2021; Huang et al., 2020). مراحل اجرای این آزمون براساس پژوهش (Qu et al., 2022) به‌صورت زیر است:

برای سری زمانی x با n نمونه، ستون ترتیب S_k را می‌توان با رابطه ۵ محاسبه کرد:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k = 2, 3, \dots, n, \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن r_i با رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ +0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i. \quad \text{رابطه ۶}$$

ستون ترتیب S_k مقدار تجمعی شماره مقادیری است که در زمان i بیشتر از مقدار در زمان j هستند. آماره UF_k را می‌توان با شرط استقلال تصادفی سری زمانی با رابطه ۷ تعریف کرد:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad K = 1, 2, \dots, n, \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن $UF_1 = 0$ و $\text{var}(S_k) = \tau(S_k)$ به ترتیب میانگین و واریانس S_k است.

هنگامی که x_1, x_2, \dots, x_n مستقل هستند و توزیع پیوسته یکسانی دارند، $\text{var}(S_k) = \tau(S_k)$ و $E(S_k)$ را می‌توان با رابطه ۸ محاسبه کرد:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, n, \quad \text{رابطه ۸}$$

طبقه‌بندی پوشش گیاهی و تغییرات فنولوژیکی استفاده می‌شود. این شاخص نسبت نرمال‌شده بین انرژی بازتاب‌یافته در ناحیه قرمز جذب کلروفیل و انرژی منعکس‌شده در ناحیه مادون قرمز نزدیک به دلیل پراکندگی نور در حجم بین سلولی مزوفیل برگ‌ها را بیان می‌کند و شاخصی از «سبز بودن» پوشش گیاهی را ارائه می‌دهد که به‌نوعی با شاخص سطح برگ سبز و محتوای کلروفیل مرتبط است (Delegido et al., 2013). به عبارت دیگر، NDVI تفاوت مقادیر انعکاس ارزش‌های بازتاب مادون قرمز نزدیک و قرمز مرئی است که بر بازتاب نرمال شده است. شاخص NDVI به‌طور کلی به‌عنوان شاخص سلامت جنگل استفاده می‌شود و مقادیر آن میزان کیفیت و سلامت نسبی جنگل را نشان می‌دهد (Tuominen et al., 2009). برای بررسی سلامت جنگل، محاسبه شاخص NDVI برای تصاویر انتخاب‌شده انجام گرفت. اختلال اتمسفر یکی از ضعف‌های استفاده از الگوریتم NDVI است. اختلالات اتمسفری ممکن است سبب شود که مقادیر NDVI بسیار کم باشد. ذرات آئروسول کوچک موجب افزایش مقدار NDVI می‌شوند، درحالی که ذرات آئروسول بزرگ سبب کاهش مقدار NDVI می‌شوند (Sanjaya et al., 2020). در این پژوهش با تصحیحات اتمسفری روی تصاویر انتخاب‌شده این مشکل حل شد. برای محاسبه NDVI از رابطه ۴ استفاده شد:

$$\text{رابطه ۴} \quad \text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

NIR: باند مادون قرمز نزدیک (لندست-۸، باند ۵؛ لندست-۷: باند ۴)

R: باند قرمز (لندست-۸، باند ۴؛ لندست-۷: باند ۳)
براساس نقشه NDVI، دامنه تغییرات از -۱ به +۱ دست می‌آید.

در نهایت، از آزمون ناپارامتری روند من-کنندال (M-K) برای تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی NDVI در بوم‌سازگان‌های جنگل و مرتع در منطقه پژوهش از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. برای اینکه مشخص شود پوشش گیاهی زمینی در منطقه

معنی‌دار و کاهش معنی‌دار) طبقه‌بندی و مساحت آن محاسبه شد.

نتایج

تغییر پوشش زمین

در ابتدا نتایج شناسایی طبقات پوشش زمین و ارزیابی تغییر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندزمانی از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ ارائه می‌شود. نقشه‌های پوشش اراضی مستخرج از تصاویر در ابتدا و انتهای دوره پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج ارزیابی تغییرات در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق، پوشش‌های منطقه پژوهش به پنج گروه کشاورزی، جنگل، مرتع، مناطق انسان‌ساز و آبی دسته‌بندی شدند. در سال ۲۰۰۳، از میان پوشش‌های شناسایی شده، بالاترین رده طبقه مرتع (۷۵۸۲/۵ هکتار، ۴۲ درصد از کل مساحت منطقه) و پس از آن کشاورزی (۶۵۶۴/۴ هکتار، ۳۶/۴ درصد) و جنگل‌های طبیعی (۲۳۰۵/۸ هکتار، ۱۲/۸ درصد) بود. پوشش‌های زمین باقی‌مانده، مناطق انسان‌ساز (۸/۷ درصد) و مناطق آبی (۰/۲۱ درصد) بودند. براساس نتایج طبقه‌بندی تصویر سال ۲۰۲۳، بالاترین رده منطقه کشاورزی (۷۵۲۹ هکتار، ۴۱/۷ درصد از کل منطقه) و پس از آن مرتع با ۶۳۳۶/۱ هکتار (۳۵/۱ درصد) و جنگل با سهم ۱۱/۷ درصد (۲۱۱۰/۶ هکتار) بود. پوشش‌های باقی‌مانده عبارت بود از مناطق انسان‌ساز (۱۱/۳ درصد) و مناطق آبی (۰/۱۷ درصد؛ جدول ۱).

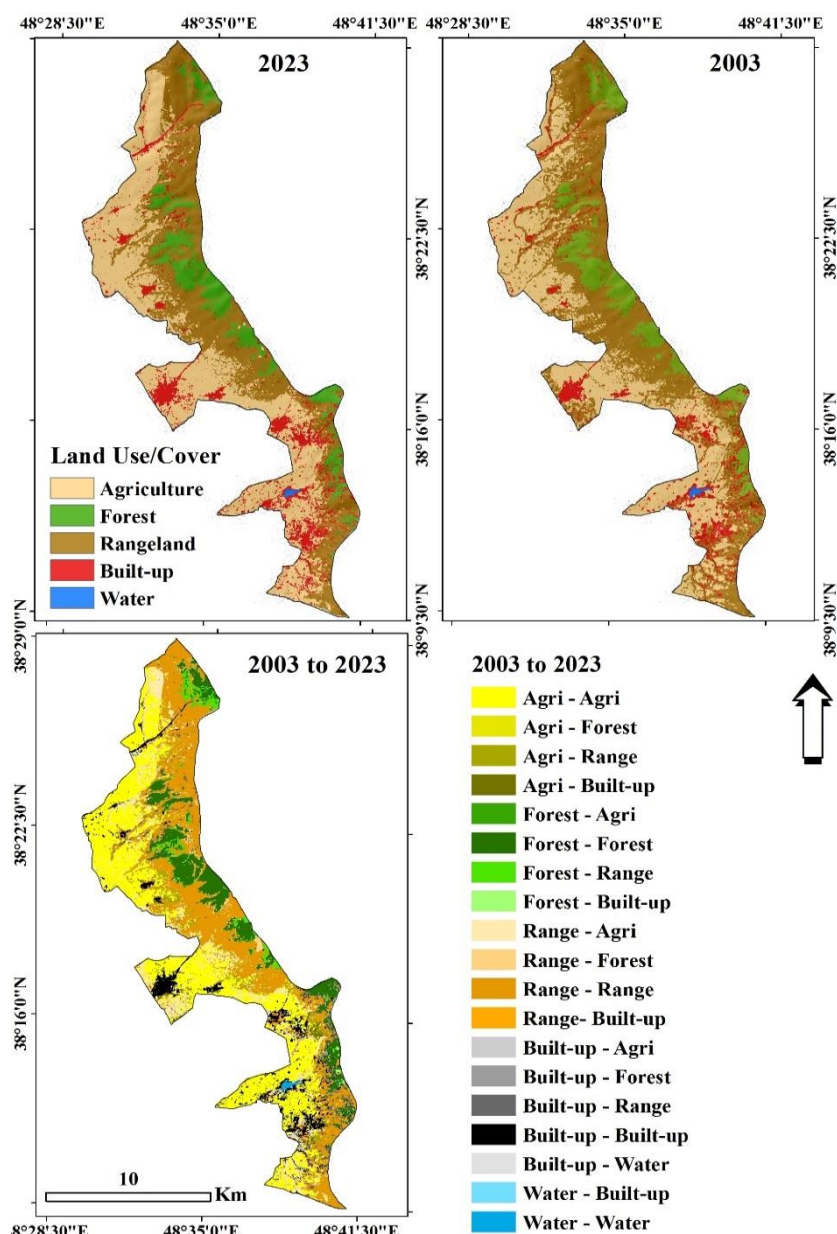
که در آن UF_k توزیع نرمال استاندارد است که می‌تواند با توجه به ترتیب سری زمانی x_1, x_2, \dots, x_n محاسبه شود. سپس، فرایند بالا به ترتیب معکوس سری زمانی x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 تکرار شد و $UF_k UB_k = -$ و $UB_k = 0$ به دست آمد. با توجه به سطح معناداری α ، برای مثال $\alpha = 0.05$ ، مقدار بحرانی $u_{0.05} = \pm 2$ ، منحنی‌های آماری UF_k و UB_k ، خطوط مستقیم ± 2 را می‌توان در یک گراف نمایش داد.

در این پژوهش از سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ برای تشخیص روند سالانه NDVI استفاده شد. اصل روند تغییر سری‌های زمانی و آزمون نقطه جهش به شرح زیر است. اگر UF_k در محدوده مقدار بحرانی (± 2) تغییر کند، روند تغییر و جهش معنی‌دار نیست. اگر مقدار $UF_k > 0$ باشد، دنباله یک روند صعودی و در غیر این صورت، روند نزولی را نشان می‌دهد. فراتر رفتن مقدار UF_k از خط بحرانی، نشان‌دهنده روند صعودی یا نزولی معنی‌دار است. اگر منحنی‌های UF_k و UB_k در خط بحرانی همدیگر را قطع کنند، زمان مربوط به تقاطع زمانی است که جهش در آن شروع می‌شود (Qu et al., 2022).

در این مطالعه روندهای معنادار افزایشی و کاهش‌ی NDVI در حدود اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.8 به دست آمد که آماره $u_{0.05} = \pm 2$ در سه محدوده (بدون تغییر معنی‌دار، افزایش

جدول ۱- ارزیابی تغییر پوشش اراضی منطقه پژوهش در دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۳
Table 1. Evaluation of land cover changes for the study area in 2003-2023

پوشش زمین Land cover	2003		2023		تغییر پوشش زمین: ۲۰۰۳-۲۰۲۳ Land use Change: 2003-2023		
	مساحت (هکتار) Area (ha)	درصد زمین % of Land	مساحت (هکتار) Area (ha)	درصد زمین % of Land	بزرگی سطح (هکتار) Magnitude area (ha)	درصد تغییر % Change	نرخ تغییر سالانه (هکتار) Annual rate of change (ha)
Agriculture کشاورزی	6564.44	36.36	7529.04	41.70	(+) 964.59	(+) 14.69	(+) 48.23
Forest جنگل	2305.80	12.77	2110.63	11.69	(-) 195.17	(-) 8.46	(-) 9.76
Rangeland مرتع	7582.53	42.00	6336.12	35.09	(-) 1246.41	(-) 16.44	(-) 62.32
Built-up انسان‌ساز	1564.33	8.66	2047.72	11.34	(+) 483.39	(+) 30.90	(+) 24.17
Water آب	37.11	0.21	30.71	0.17	(-) 6.40	(-) 17.25	(-) 0.32



شکل ۳- طبقات پوشش زمین و تغییرات آن در دوره پژوهش (۲۰۰۳-۲۰۲۳) در منطقه فندقلو

Figure 3. Land cover classes and its changes in the study period (2003-2023) in Fandoghlo region

نشان می‌دهد. براساس نتایج جدول ۲، از ۲۳۰۵/۸ هکتار وسعت پوشش جنگل در سال ۲۰۰۳، حدود ۲۰ درصد (۴۶۵/۴ هکتار) به دیگر طبقات پوشش زمین تبدیل شده که بیشترین این تبدیل به پوشش مرتع بوده است. افزون‌بر این، از ۷۵۸۲/۵ هکتار وسعت پوشش مرتع در سال ۲۰۰۳، در حدود ۲۱۰۷/۱ هکتار به دیگر طبقات پوشش زمین تبدیل شده که بیشترین این تبدیل به پوشش کشاورزی بوده است.

افزون‌بر نمایش مکانی تغییرات طبقات پوشش زمین در دوره پژوهش (۲۰۰۳-۲۰۲۳) در شکل ۳، در جدول ۲ ماتریس انتقال طبقات پوشش زمین به یکدیگر در این دوره ارائه شده است. در این ماتریس، ردیف‌ها نشان‌دهنده طبقات پوشش زمین در سال ۲۰۰۳ و ستون‌ها نشان‌دهنده طبقات پوشش زمین در سال ۲۰۲۳ است. عناصر قطری نیز نسبتی از هر طبقه پوشش زمین را بدون تغییر مکانی در دوره پژوهش

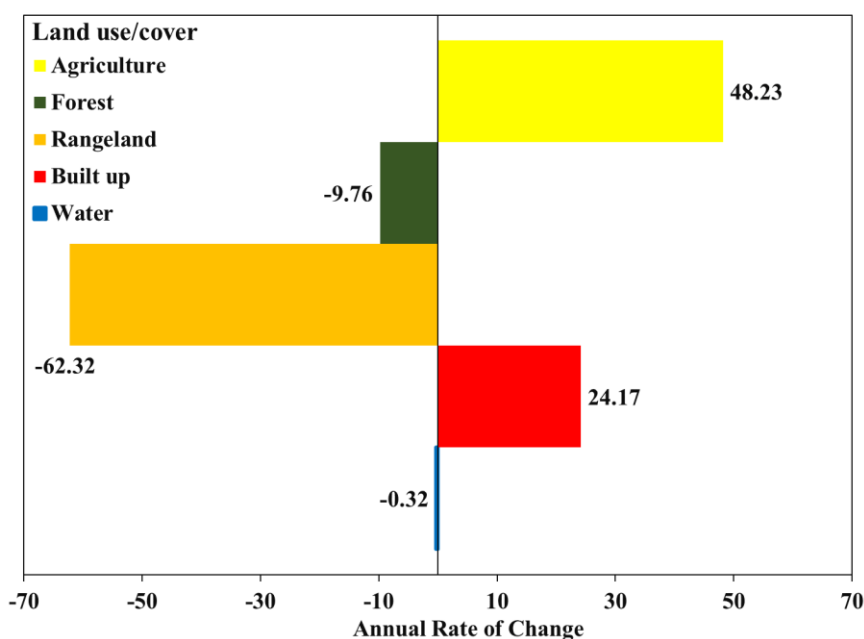
جدول ۲- ماتریس احتمال انتقال پوشش زمین منطقه پژوهش در دوره ۲۰۲۳-۲۰۰۳

Table 2. Land cover transfer matrix for the study area in 2003-2023

پوشش زمین Land cover	کشاورزی Agriculture	جنگل Forest	مرتع Rangeland	انسان‌ساز Built-up	آب Water	کل ۲۰۰۳ Total 2003
کشاورزی Agriculture	6311.8	0.2	637.5	579.7	0.0	7529
جنگل Forest	16.3	1645.2	357.5	91.6	0.0	2110.6
مرتع Rangeland	1501.9	161.7	4229	443.5	0.0	6336.1
انسان‌ساز Built-up	286.2	116	449.7	1194.7	1.2	2047.7
آب Water	0.0	0.0	0.0	5.9	24.8	30.7
کل ۲۰۲۳ Total 2023	8116.2	1923.1	5673.7	2315.3	26	18054.2

اراضی در طی ۲۰ سال دوره پژوهش نشان دادند. مناطق آبی نیز با وجود سطوح بسیار محدود در منطقه پژوهش، دارای روند تغییر منفی بود (۶/۴ درصد تغییر). این روندهای منفی را می‌توان تهدیدی جدی برای پایداری منطقه در نظر گرفت. در مقابل، مناطق کشاورزی و انسان‌ساز در دوره زمانی پژوهش تغییر مثبتی را نشان دادند. مشاهده شد که حدود ۹۶۴/۶ هکتار از زمین با درصد تغییر حدود ۱۴/۷ درصد و نرخ تغییر سالانه ۴۸/۲ در طی ۲۰ سال مدنظر، به مناطق کشاورزی اضافه شده است (جدول ۱، شکل ۴).

تغییرات در پوشش‌های زمین (شکل ۴) براساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۱ ارزیابی شد. این تغییرات الگوی نامنظمی را در منطقه پژوهش از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ نشان داد. تغییر پوشش اراضی تغییرات منفی را در مورد همه بوم‌سازگان‌های طبیعی نشان داد. حدود ۱۹۵/۲ هکتار از مساحت جنگل طبیعی در این دوره کاهش یافته که تغییر منفی (۸/۴۶ درصد) را نشان می‌دهد. افزون‌بر این جنگل‌زدایی، سطح مراتع نیز روند کاهشی نشان داد (در حدود ۱۶/۵ درصد تغییر). مراتع بیشترین نرخ تغییر سالانه (۶۲/۳) را نسبت به بقیه طبقات پوشش



شکل ۴- تغییر نسبی در پوشش اراضی در منطقه پژوهش در ۲۰۲۳-۲۰۰۳

Figure 4. Relative change in land cover in the study area in 2003-2023

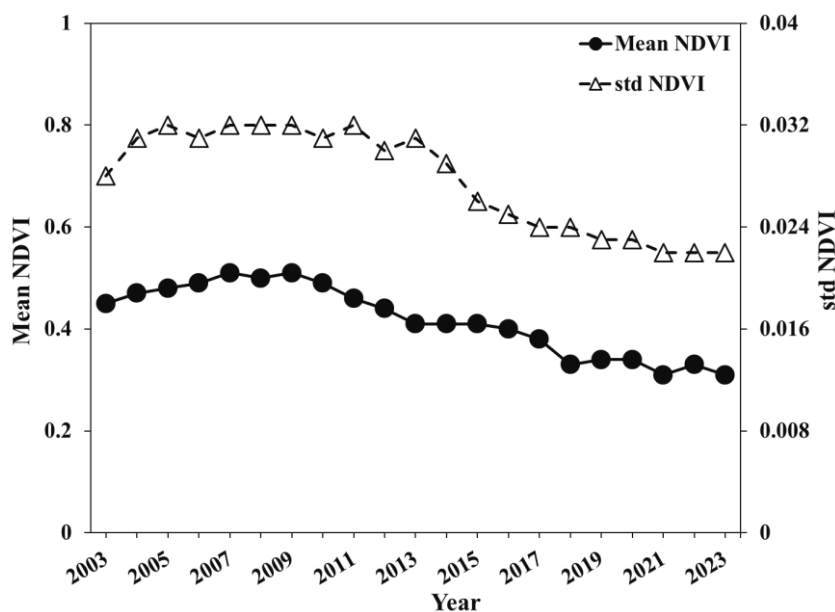
و ۸۴ درصد از سطح خود بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ بدون تغییر باقی ماندند. تبدیل عمده پوشش اراضی بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۲۳ در این منطقه، به غیر از تبدیل بین انواع مختلف پوشش گیاهی طبیعی (جنگل و مرتع)، مربوط به تبدیل این پوشش‌های گیاهی طبیعی به زمین کشاورزی است (۱۵۱۸/۲ هکتار). نتایج تغییر پوشش اراضی گسترش سریع زمین‌های کشاورزی را در منطقه پژوهش (تغییر مثبت ۱۴/۷ درصد) برجسته کرده است.

تغییر شاخص سلامت (NDVI)

در این پژوهش، تغییرات مکانی-زمانی شاخص NDVI در بوم‌سازگان‌های طبیعی (جنگل و مرتع) منطقه پژوهش تجزیه و تحلیل شد. در طول دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۳، پوشش گیاهی در منطقه فندقلو به طور کلی یک روند قهوه‌ای شدن (کاهش سبزیگی) را با نوسان‌های مشخص تجربه کرده است. با توجه به شکل ۵، میانگین و انحراف معیار NDVI در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۲۳ نسبت به سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۳ کاهش زیادی داشته است.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، یکی از تغییرات پوشش اراضی اصلی در منطقه پژوهش، تغییرات بین پوشش‌های گیاهی جنگل و مرتع است. مهم‌ترین تغییر پوشش اراضی (در تعداد هکتار) تبدیل جنگل‌های طبیعی به مرتع (۳۵۷/۵ هکتار) بود (حدود ۱۷ درصد). این کاهش جنگل‌های طبیعی در منطقه به میزان محدودی (۲/۵ درصد) با تبدیل مراتع به جنگل طبیعی (۱۶۱/۷ هکتار) خنثی شده است. همچنین، حدود ۵ درصد از جنگل‌ها به مناطق انسان‌ساز (۹۲ هکتار) و زمین کشاورزی (۱۷/۳ هکتار) تبدیل شد. ۳۰/۷ درصد از مراتع نیز به مناطق انسان‌ساز (حدود ۴۴۳/۵ هکتار) و زمین کشاورزی (حدود ۱۵۰۲ هکتار) تبدیل شد. از سوی دیگر، کشاورزی افزایش سطح زیادی داشت (۱۱۸۰۴/۴ هکتار). این گسترش مهم محصولات فصلی و چندساله بیشتر به دلیل تبدیل مراتع بود (۱۵۰۲ هکتار).

با وجود تغییرات اشاره‌شده، اکثریت سطح در منطقه پژوهش (۷۴ درصد) تغییرات پوشش اراضی را تجربه نکردند. سه نوع پوشش گیاهی اصلی یعنی جنگل، مرتع و کشاورزی به ترتیب در بیش از ۶۷، ۷۸،

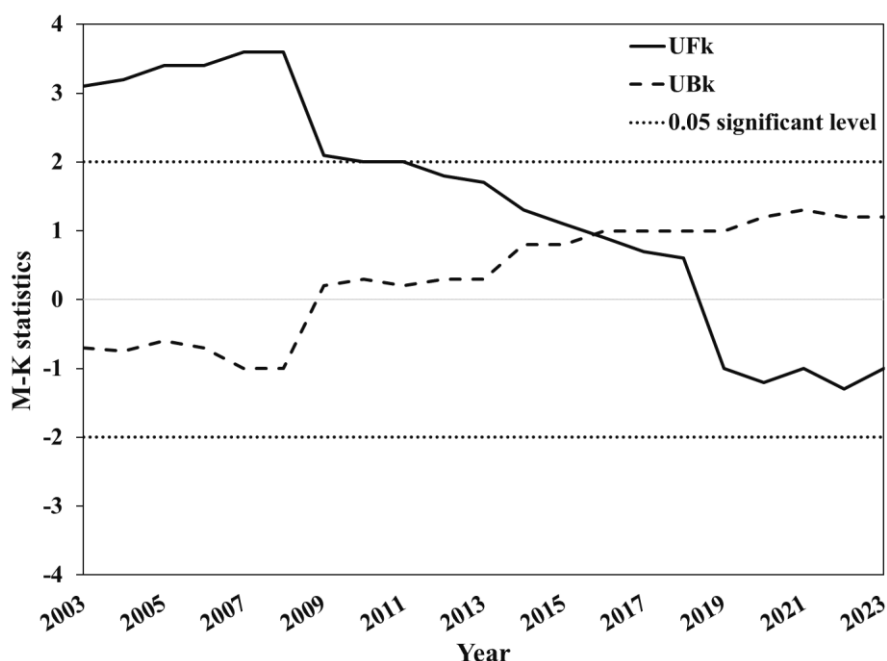


شکل ۵- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد NDVI برای دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۳ در بوم‌سازگان‌های طبیعی (جنگل و مرتع) در منطقه پژوهش

Figure 5. Average changes and standard deviation of NDVI for 2003-2023 in the natural ecosystems (forest and rangeland) in the study area

نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به منحنی UF_k قبل از سال ۲۰۱۱ از سطح معنی‌داری ($\alpha = 0.05$) فراتر رفت و در واقع از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱، NDVI افزایش چشمگیری یافت. UF_k مقادیر منحنی بعد از سال ۲۰۱۱ از سطح معنی‌داری ($\alpha = 0.05$) فراتر نرفتند که نشان می‌دهد NDVI از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ روند نزولی غیرمعنی‌داری داشته است.

همچنین، تجزیه و تحلیل روند تغییر میانگین ارزش NDVI در بوم‌سازگان‌های طبیعی (جنگل و مرتع) که حدود ۵۳ درصد از منطقه پژوهش را در بر می‌گیرند، از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ با روش آزمون روند M-K در شکل ۶ ارائه شد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، تقاطع منحنی UF_k و منحنی UB_k در اطراف سال ۲۰۱۶ است که یک نقطه جهش را



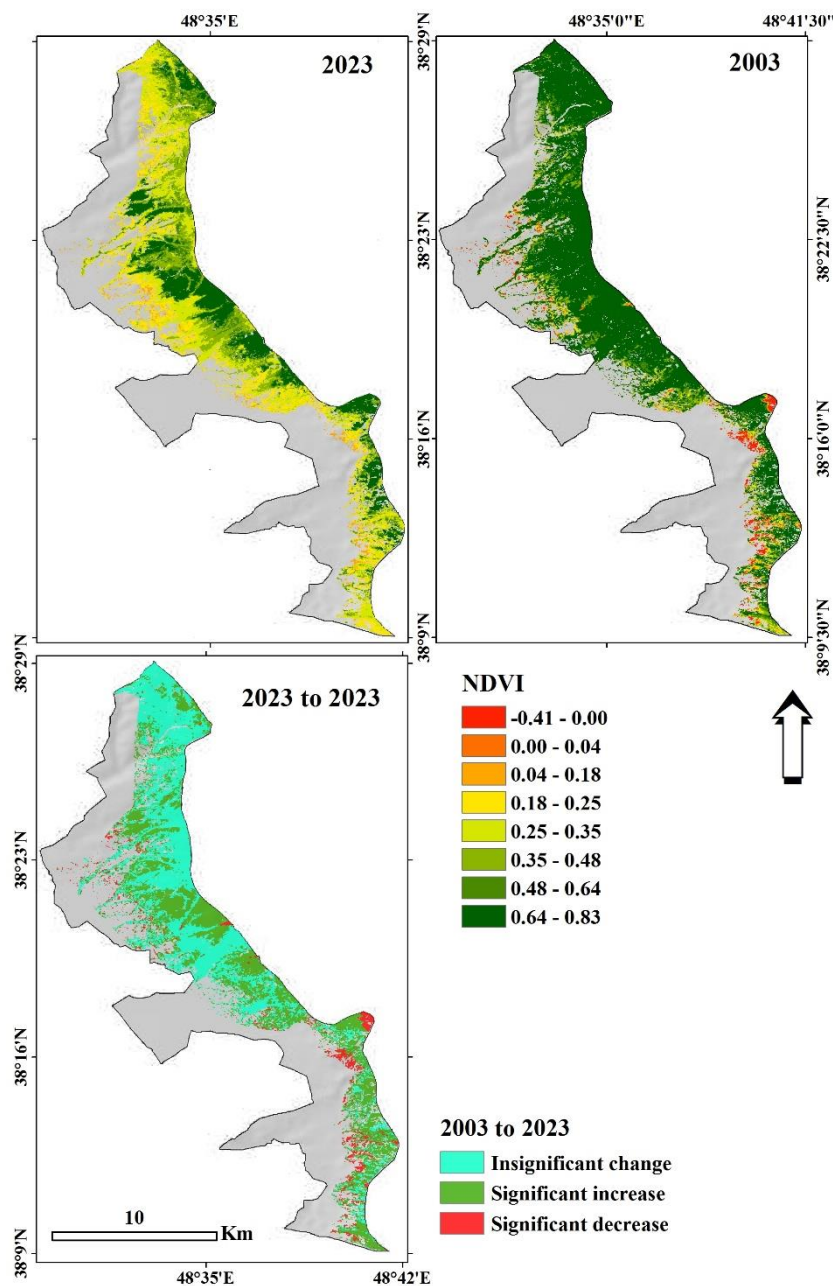
شکل ۶- نقطه جهش میانگین تابستانه NDVI محاسبه شده با روش آزمون روند M-K و بررسی تغییرات بین سالانه در بوم‌سازگان‌های طبیعی (جنگل و مرتع) در منطقه پژوهش

Figure 6. Mutation point of the NDVI summer average calculated by the Mann-Kendall (MK) trend test method and examining the inter-annual changes in the natural ecosystems (forest and rangeland) in the study area

غیرمعنی‌دار از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ و یک روند کاهشی خطی غیرمعنی‌دار از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ داشته است.

درباره تهیه نقشه مناطق با تغییرات مهم NDVI، براساس شکل ۷، ۵۲ درصد از جنگل‌ها و مراتع منطقه پژوهش تغییر معنی‌داری را در NDVI تجربه نکردند، اما ۴۳ درصد افزایش معنی‌دار NDVI و ۶ درصد کاهش معنی‌دار داشتند.

روش آزمون روند MK برای آزمایش NDVI سالانه در دوره پژوهش استفاده شد و نقطه جهش تقریباً در سال ۲۰۱۶ به دست آمد (شکل ۶). بنابراین سری زمانی NDVI سالانه به دو بخش ۲۰۰۳-۲۰۱۶ و ۲۰۱۶-۲۰۲۳ تقسیم شد و برآزش خطی تکه‌ای انجام گرفت. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که NDVI یک روند افزایشی خطی معنی‌دار از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱، یک روند افزایشی خطی



شکل ۷- توزیع مکانی NDVI در دوره پژوهش (۲۰۲۳-۲۰۰۳) و تغییرات مهم NDVI در بوم‌سازگان‌های طبیعی (جنگل و مرتع) در منطقه پژوهش

Figure 7. Spatial distribution of NDVI in the study period (2003-2023) and the significant change in NDVI in the natural ecosystems (forest and rangeland) in the study area

طی دوره پژوهش به دست آمد. این روندهای منفی را می‌توان تهدیدی جدی برای پایداری منطقه در نظر گرفت. دلایل این روندهای منفی ممکن است رهاسازی جنگل‌ها و اجرا نشدن برنامه مشخص مدیریتی یا حفاظتی در منطقه به همراه نبود پایش و نظارت منظم توسط بخش جنگل همراه با تجاوز گسترده و برداشت

بحث

براساس نتایج این پژوهش، بسیاری از پوشش‌ها پس از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۳ به طرز چشمگیری تغییر یافتند. تغییر منفی چشمگیری در مساحت جنگل‌های طبیعی به همراه مراتع (با بیشترین نرخ تغییر سالانه نسبت به بقیه طبقات پوشش اراضی) در

تحلیل پوشش و تغییر پوشش زمین در منطقه پژوهش، از دست دادن خالص به نسبت کم در پوشش گیاهی بومی و سطوح بالایی از تبدیل را نشان داد که نگرانی‌هایی را درباره اثر بخشی حفاظت کلی این منطقه و مدیریت قانونی آنها ایجاد می‌کند. در این منطقه، تبدیل عمده پوشش اراضی، مربوط به تبدیل پوشش‌های گیاهی طبیعی (جنگل و مرتع) به زمین کشاورزی بود. با وجود ممنوع بودن این تبدیل در کشور و به ویژه در مناطق حفاظت شده. گسترش سریع زمین‌های کشاورزی در منطقه پژوهش، بازتاب نرخ نگران‌کننده گسترش کشاورزی در کل کشور در نتیجه افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی است. مطابق گزارش (IPBES (2019) تبدیل زیستگاه‌های طبیعی به زمین‌های کشاورزی عامل اصلی تخریب بوم‌سازگان زمینی و خطر انقراض گونه‌ها در سراسر جهان است که تنوع زیستی و رفاه انسان را تهدید می‌کند.

زیستگاه‌های طبیعی جنگل اغلب با هدف ایجاد چمنزارهای جدید برای دامداری پاکسازی شدند. با این حال تبدیل به محصولات زراعی نیز مسئول بخش غیرقابل اغماض جنگل‌زدایی است. در مورد تبدیل جنگل‌ها به مراتع، حتی اگر مقدار به نسبت متناسبی از پوشش گیاهی طبیعی در مراتع حفظ شده باشد، این مراتع به سختی به سطوح تنوع زیستی جنگلی بدون مداخلات بازسازی فعال بازمی‌گردند. به تازگی نشان داده شده است که تبدیل جنگل به مرتع بر میکروارگانیسم‌ها تأثیر می‌گذارد و سبب همگن‌سازی زیستی جوامع می‌شود (Rodrigues et al., 2012). در سال‌های اخیر، تبدیل جنگل به مرتع سبب تغییرات زیادی در سیمای سرزمین منطقه شده است. از سوی دیگر این تبدیل جنگل به مرتع، خطر تبدیل آتی مرتع به مناطق کشاورزی را افزایش می‌دهد. در جبهه‌های پیشگام در حاشیه جنگل، کشاورزی به طور معمول یک مرحله گذار بین قطع جنگل و ایجاد مرتع دائمی است (Parsons, 1976). تقاضای فزاینده برای محصولات محلی در منطقه ممکن است تبدیل جنگل

ناپایدار منابع طبیعی باشد. جمعیت زیادی در مجاورت منطقه جنگلی فندقلو زندگی می‌کنند که برای امرار معاش خود به شدت به منابع آن وابسته‌اند. همچنین فعالیت‌های تفریحی گسترده در این منطقه آسیب‌های شدیدی به جنگل‌ها وارد کرده است (Keivan Behjou, 2012). افزون بر این، چرای خارج از ظرفیت در مراتع که از بهترین مراتع استان هستند و نبود نظارت کافی دستگاه‌های اجرایی بر تغییر کاربری اراضی از مهم‌ترین دلایل تخریب هستند.

در مقابل، مناطق کشاورزی و انسان‌ساز با نرخ تغییر سالانه زیاد، در دوره زمانی پژوهش، تغییر مثبتی نشان دادند. طبق پژوهش Sarparast et al. (2020) سه عامل اصلی سبب افزایش مناطق کشاورزی در شمال شرق ایران شده که شامل ورود فناوری و ماشین‌آلات کشاورزی، صنعت حفاری چاه‌های عمیق و سال‌های مرطوب است که مردم را به کشت زمین‌ها ترغیب می‌کند. افزون بر این، بیشترین درصد تغییر در مناطق انسان‌ساز در مقایسه با بقیه طبقات پوشش اراضی به دست آمده است. مطابق با نتایج این پژوهش، در تحقیق Teimouri et al. (2023) در شمال غرب ایران نتایج نشان داد که مناطق انسان‌ساز در دو دهه گذشته بیشترین تغییرات با روند افزایشی را داشته، در حالی که مناطق سبز روند کاهشی داشته است. این روند نشان‌دهنده ناپیکارچگی پوشش زمین و رشد درون‌افزاست که سبب گسترش مناطق انسان‌ساز شده است.

در مجموع، کشاورزی بیشترین گسترش و مراتع بیشترین تلفات سطحی را داشتند که تا حد زیادی به دلیل تبدیل کاربری آنها به کشاورزی است. مناطق انسان‌ساز نیز گسترش زیادی یافتند که ۸۶ درصد آن ناشی از تبدیل مناطق مرتعی و کشاورزی به مناطق انسان‌ساز است. این تبدیل‌های به نسبت نامتعادل بین پوشش‌های طبیعی جنگل و مرتع و پوشش‌های غیرطبیعی، سبب از دست دادن خالص زیاد در پوشش گیاهی طبیعی در منطقه شده است.

مناطق با روند افزایش پوشش گیاهی اغلب در بخش‌های مرتفع منطقه پژوهش پراکنش دارند که نتیجه برخورداری از خاک‌های حاصلخیزتر و منابع آب کافی در این مناطق است. افزایش پوشش گیاهی در مناطق مرتفع‌تر در پژوهش (Zhan et al., 2021) نیز گزارش شده است. در مقابل، مناطقی با روند کاهش پوشش گیاهی اغلب در مناطق با توپوگرافی به نسبت مسطح و کم‌ارتفاع و نزدیک به سکونتگاه‌های انسانی متمرکزند. به عبارتی مناطقی که کاهش معنی‌دار را نشان می‌دهند، اغلب در بخش‌های نزدیک به مناطق انسان‌ساز و کشاورزی توزیع شده‌اند.

فراتر از گسترش ظرفیت تشخیص تغییر با امکان تشخیص تغییر شرایط افزون‌بر تغییر انتقالی (Woodcock et al., 2020)، معیارهای مبتنی بر NDVI ارائه شده در این پژوهش، همچنین مزایای تحلیل‌های مبتنی بر پیکسل را ارائه می‌دهند. این مزایا شامل پیوستگی زمانی و مکانی، مشاهدات در مقیاس خوب و نمایش سیمای سرزمین مبتنی بر گرادیان است. با این حال، برخلاف تجزیه و تحلیل تغییر پوشش زمین که اطلاعات ساده و شهودی را ارائه می‌دهد، بررسی‌های میدانی برای به دست آوردن تفسیرهای دقیق از فرایندهای محلی در پس‌زمینه پویایی پوشش گیاهی مشاهده شده لازم است. از طریق این روش، معیارهای مبتنی بر NDVI می‌توانند نشانه‌های ارزشمندی درباره برخی فرایندها ارائه دهند که ممکن است با ارزیابی‌های اکولوژیکی مانند ساده‌سازی و تخریب زیستگاه یا تشدید فعالیت‌های کشاورزی مرتبط باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش پتانسیل ترکیب داده‌های تغییر پوشش زمین و معیارهای سیمای سرزمین مبتنی بر NDVI را برای به دست آوردن اطلاعات تکمیلی و مشخص مکانی درباره تغییرات سیمای سرزمین در بوم‌سازگان‌های هیرکانی منطقه فندقلو نشان می‌دهد.

به مرتع را تحریک کند. در دهه‌های گذشته سطح مراتع کشت شده و تعداد کل دام‌های گوشتی افزایش زیادی یافته است. در کنار افزایش درک پیامدهای اکولوژیکی تبدیل جنگل به مرتع، اقدامات مدیریتی فشرده مانند کاربرد کودهای باارزش و کمیاب و چرای چرخشی بادقت مدیریت شده، احتمالاً برای حفظ بهره‌وری مراتع موجود در شرایط آب‌وهوای خشک و در نتیجه کاهش تجاوز به مناطق جنگلی ضروری خواهد بود. این پژوهش امکان شناسایی این مناطق را فراهم می‌کند که با نظارت تکمیلی در محل برای بررسی نحوه مدیریت این مناطق و ارزیابی سطوح تنوع زیستی آنها در مقایسه با مناطق جنگلی سابق مرتبط است.

افزون‌بر تغییرات پوشش زمین در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای NDVI حاکی از روند کاهشی پوشش گیاهی یا تشدید قهوه‌ای شدن پس از سال ۲۰۰۳ در منطقه فندقلو است که همسو با یافته‌های (Valizadeh Kamran et al., 2023) در این منطقه در نمایش روند کاهش پوشش گیاهی است. این نتیجه‌گیری مشابه یافته (Qu et al., 2022) است که دریافتند NDVI در دهه‌های گذشته به دلیل خشکسالی در منطقه پژوهش در مقیاس بزرگ کاهش یافت. همچنین بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی براساس روش آزمون روند M-K نشان‌دهنده یکسان نبودن تغییرات در منطقه پژوهش است که در پژوهش (Dastigerdi et al., 2022) نیز انواع روند افزایشی و کاهشی معنی‌دار و غیرمعنی‌دار در داده‌های NDVI مشاهده شد. با وجود این، در بررسی تغییرات پوشش جنگلی در غرب ایران توسط Maroufzade & Attarod (2021) روند تغییرات شاخص NDVI در دوره پژوهش معنی‌دار نبود. در این پژوهش، افزایش معنی‌دار اغلب در بخش‌های جنوب شرقی و در پایین دست و قسمت بالایی رودخانه‌های جنگل‌های فندقلو شامل مشه‌سویی، سوهاچایی، نیارق و سقزچی چای توزیع شده است. مطابق با نتایج این پژوهش،

تغییرات اساسی در جنگل‌ها، مراتع و زمین‌های کشاورزی وجود دارد. بنابراین روش‌شناسی یکپارچه در این پژوهش، راهی عملی و امیدوارکننده برای ارزیابی‌های دقیق‌تر از پویایی سیمای سرزمین ارائه می‌دهد که می‌تواند به تصویر کامل‌تری از تغییرات عملکردی سیمای سرزمین بینجامد و سبب بهبود درک ما از پیوندهای بین پویایی سیمای سرزمین و فرایندهای اکولوژیکی شود.

سپاسگزاری

از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اردبیل بابت در اختیار قرار دادن کارشناس در پیمایش میدانی بسیار سپاسگزاریم.

بیشتر پژوهش‌ها از تجزیه و تحلیل تغییر پوشش زمین برای پایش پویایی سیمای سرزمین استفاده می‌کنند. در این پژوهش، با ترکیب تجزیه و تحلیل تبدیل پوشش زمین با تشخیص تغییر مبتنی بر شاخص پوشش گیاهی، تغییر پوشش زمین مشخص شد و حتی تغییرات پوشش گیاهی در مناطقی که هیچ تبدیل پوشش زمین مشاهده نشده بود شناسایی شد. این مورد به‌ویژه در منطقه پژوهش ما مشهود بود، زیرا ۷۴ درصد از منطقه تغییر پوشش زمین را در طول دوره پژوهش تجربه نکرده بودند، اما تغییرات در پوشش گیاهی از جمله فنولوژی، بهره‌وری و تغییرات ساختاری را تجربه کردند. براساس نتایج این پژوهش، در مناطقی با تغییر به نسبت کم پوشش زمین،

References

- Asghari, S.H., Dizajghoorbani Aghdam, S., & Esmali, A. (2015). Investigation te Spatial Variability of some Soil Physical Quality Indices in Fandoghlu Region of Ardabil Using Geostatistics. *Journal of Water and Soil*, 28(6), 1271-1283. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.33460>. (In Persian)
- Assal, T.J., Anderson, P.J., & Sibold, J. (2016). Spatial and temporal trends of drought effects in a heterogeneous semi-arid forest ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 365, 137–151. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.017>
- Buras, A., Rammig, A., & Zang, C.S. (2021). The European Forest Condition Monitor: Using Remotely Sensed Forest Greenness to Identify Hot Spots of Forest Decline. *Frontiers in Plant Science*, 12, 689220. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689220>
- Dastigerdi, M., Nadi, M., Raeini Sarjaz, M., & Kiapasha, K. (2022). Vegetation trend analysis using NDVI time series of Modis satellite in the northeast of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29(1), 135-150. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.20208.3554>
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C.M., Rivera, J.P., Alonso, L., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 46, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.12.001>
- Evangelides, C., & Nobajas, A. (2020). Red-Edge Normalised Difference Vegetation Index (NDVI705) from Sentinel-2 imagery to assess post-fire regeneration. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100283. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100283>
- Forbes, C.T., Chandler, M.A., Bhattacharya, D., Carroll Steward, K., Blake, J., Johnson, V., Morrow, M., Mason, W., & DeGrand, T. (2020). Fostering climate literacy with global climate models in secondary science classrooms: Insights from a collaborative partnership. In Teaching Climate Change in the United States. J.A. Henderson and A. Drewes, Eds., Routledge Advances in Climate Change Research, Routledge, pp. 29-43. <http://dx.doi.org/10.4324/9780367179496-3>
- Freer-Burton, J.K.A., Kay, F.P., Anderson, G.H., & Radloff, M.E. (2022). What are the main indicators of forest health in Riccarton Bush and how can they be assessed and monitored?. School of Earth and Environment, University of Canterbury, GEOG309: Research for Resilient Environments and Communities October 21, 2022.

- Hamed, K.H. (2009). Exact distribution of the Mann–Kendall trend test statistic for persistent data. *Journal of Hydrology*, 365(1–2), 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.024>
- Huang, C., Yang, Q., & Huang, W. (2021). Analysis of the Spatial and Temporal Changes of NDVI and Its Driving Factors in the Wei and Jing River Basins. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 11863. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211863>
- IPBES. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G.F., Midgley, P., Miloslavich, Z., Molnár, D., Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany, 56 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- Jahdi, R., Arabi, M., & Bussotti, F. (2020). Effect of environmental gradients on leaf morphological traits in the Fandoghlo forest region (NW Iran). *iForest*, 13, 523-530. <https://doi.org/10.3832/ifor3391-013>
- Kashi Zenouzi, L., Ahmadi, H., & Nazari Samani, A. (2016). Using Statistical Hydrogeomorphology Method for Estimating Sediment Yield of Watersheds (Case study: Zonouz Chay and Zilber Chay watersheds). *Journal of Watershed Management Research*, 6(12), 166-174. (In Persian). <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-567-en.html>
- Keivan Behjou, F. (2012). Measuring damage to residual shrubs due to recreational activity in Fandoghlo forest. *Iranian Journal of Forest*, 4(3), 231-242. (In Persian)
- Langner, A., Miettinen, J., Stibig, H.J. (2016). Monitoring forest degradation for a case study in Cambodia—comparison of Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. In: Proceedings of ESA Living Planet Symposium held 9-13 May 2016 in Prague, Czech Republic. Edited by L. Ouwehand. ESA-SP Volume 740, ISBN: 978-92-9221-305-3, p.200
- Lausch, A., Bastian, O., Klotz, S., Leitão, P.J., Jung, A., Rocchini, D., Schaepman, M.E., Skidmore, A.K., Tischendorf, L., & Knapp, S. (2018). Understanding and assessing vegetation health by in situ species and remote-sensing approaches. *Methods in ecology and evolution*, 9(8), 1799-1809. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13025>
- Lechner, A.M., Foody, G.M., & Boyd, D.S. (2020). Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth*, 2(5), 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>
- Liu, S., Xie, Y., Fang, H., Du, H., & Xu, P. (2022). Trend Test for Hydrological and Climatic Time Series Considering the Interaction of Trend and Autocorrelations. *Water*, 14(19), 3006. <https://doi.org/10.3390/w14193006>
- Maroufzade, E., & Attarod, P. (2021). Are variations of forest vegetation consistent with trends of meteorological parameters in the northern Zagros region of Iran?. *Iranian Journal of Forest*, 12(4), 449-466. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/ijf.2021.127780>
- Meddens, A.J.H., & Hicke, J.A. (2014). Spatial and temporal patterns of Landsat-based detection of tree mortality caused by a mountain pine beetle outbreak in Colorado, USA. *Forest Ecology and Management*, 322, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.037>
- Meng, J., Li, S., Wang, W., Liu, Q., Xie, S., & Ma, W. (2016). Mapping Forest Health Using Spectral and Textural Information Extracted from SPOT-5 Satellite Images. *Remote Sensing*, 8, 719. <https://doi.org/10.3390/rs8090719>
- Murfitt, J., He, Y., Yang, J., Mui, A., & De Mille, K. (2016). Ash Decline Assessment in Emerald Ash Borer Infested Natural Forests Using High Spatial Resolution Images. *Remote Sensing*, 8, 256. <https://doi.org/10.3390/rs8030256>

- Najafi, A., Azizi Ghalati, S., & Mokhtari, M.H. (2017). Assessment Kernel Support Vector Machines in Classification of Landuses (Case Study: Basin of Cheshmeh kileh-Chalkrod). *Journal of Watershed Management Research*, 8(15), 92-101. (In Persian). <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-846-en.html>
- O'Connell, R.M., Rao, D.S., Chaudhuri, A.A., & Baltimore, D. (2010). Physiological and pathological roles for microRNAs in the immune system. *Nature Reviews Immunology*, 10(2), 111-22. <https://doi.org/10.1038/nri2708>
- O'Laughlin, J., & Cook, P.S. (2003). Inventory-based forest health indicators: Implications for national forest management. *Journal of Forestry*, 101, 11–17. <http://dx.doi.org/10.1093/jof/101.2.11>
- Parsons, J.J. (1976). Forest to pasture: development or destruction?. *Revista de Biología Tropical*, 24(1), 121-38.
- Pause, M., Schweitzer, C., Rosenthal, M., Keuck, V., Bumberger, J., Dietrich, P., Heurich, M., Jung, A., & Lausch, A. (2016). In Situ/Remote Sensing Integration to Assess Forest Health—A Review. *Remote Sensing*, 8, 471. <https://doi.org/10.3390/rs8060471>
- Qu, W., Jin, Z., Zhang, Q., Gao, Y., Zhang, P., & Chen, P. (2022). Estimation of Evapotranspiration in the Yellow River Basin from 2002 to 2020 Based on GRACE and GRACE Follow-On Observations. *Remote Sensing*, 14, 730. <https://doi.org/10.3390/rs14030730>
- Rita, A., Camarero, J.J., Nolè, A., Borghetti, M., Brunetti, M., Pergola, N., Serio, C., Vicente-Serrano, S.M., Tramutoli, V., & Ripullone, F. (2020). The impact of drought spells on forests depends on site conditions: the case of 2017 summer heat wave in southern Europe. *Global Change Biology*, 26, 851–863. <https://doi.org/10.1111/gcb.14825>
- Rodrigues, J.M.R., Pellizari, V.H., Mueller, R., Baek, K., Jesus, E.C., Paula, F.S., Mirza, B., Hamaoui, G.S., Tsai, S.M., Feigl, B., Tiedje, J.M., Bohannan, B.J., & Nüsslein, K. (2012). Conversion of the Amazon Rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 988–993. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220608110>
- Rostamikia, Y., Tabari Kouchaksaraei, M., Asgharzadeh, A., & Rahmani, A. (2017). Effect of Growth Promoting Rhizobacteria on growth and nutrient elements of common hazelnut (*Corylus avellana* L.) seedlings in Ardabil Fandoqlou nursery. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(1), 116-126. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2017.109781>. (In Persian)
- Sanjaya, R.S., Anggraini, M.F., & Pratama, M.Z. (2020). Peat forest health analysis on landsat 8 OLI / TIRS imagery using NDVI method in Kotawaringin Timur Regency. *Sociae Polites: Majalah Ilmiah Sosial Politik*, 21(2), 209-217. <http://dx.doi.org/10.33541/sp.v21i3.2257>
- Sarparast, M., Ownegh, M., & Sepehr, A. (2020). Investigation the driving forces of land-use change in northeastern Iran: Causes and effects. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100348. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100348>
- Sims, D.A., & Gamon, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Teimouri, R., Ghorbani, R., Karbasi, P., & Sharifi, E. (2023). Investigation of land use changes using the landscape ecology approach in Maragheh City, Iran. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 13, 271–284. <https://doi.org/10.1007/s13412-023-00822-z>
- Thanh, N.P., & Kappas, M. (2017). Comparison of Random Forest, k-Nearest neighbor, and support Vector Machine Classifiers for Land Cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*, 18, 18. <https://doi.org/10.3390/s18010018>
- Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2015). Forest health and global change. *Science*, 349(6250), 814-818. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac6759>

- Tuominen, J., Lipping, T., Kuosmanen, V., & Haapanen, R. (2009). Remote Sensing of Forest Health. *Geoscience and Remote Sensing*. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/8283>.
- Valizadeh Kamran, K., Sadegih, M., & Hejazi, S.A. (2023). Modeling Land Changes forest Using by LCM in Fandoqhlo Forest Area (Ardabil). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 52(4), 172-104. <http://dx.doi.org/10.22034/JCEE.2021.43502.1984>. (In Persian)
- Woodcock, C.E., Loveland, T.R., Herold, M., & Bauer, M.E. (2020). Transitioning from change detection to monitoring with remote sensing: A paradigm shift. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111558. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111558>
- Xue, J.R., & Su, B.F. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zhan, Y., Fan, J., Meng, T., Li, Z., Yan, Y., Huang, J., Chen, D., & Sui, L. (2021). Analysis on vegetation cover changes and the driving factors in the mid-lower reaches of Hanjiang River Basin between 2001 and 2015. *Open Geosciences*, 13(1), 675-689. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0259>
- Zhou, Y., Fan, J., & Wang, X. (2020). Assessment of varying changes of vegetation and the response to climatic factors using GIMMS NDVI3g on the Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 15(6), e0234848. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234848>
- Zhu, C., Zhang, X., Zhang, N., Hassan, M.A., & Zhao, L. (2018). Assessing the Defoliation of Pine Forests in a Long Time-Series and Spatiotemporal Prediction of the Defoliation Using Landsat Data. *Remote Sensing*, 10, 360. <https://doi.org/10.3390/rs10030360>



Trend Analysis of Vegetation and Monitoring of Ecosystem Health using Remote Sensing (Case Study: Fandoghlo Region)

R. Jahdi^{1*} and K. Sefidi²

¹Associate Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

²Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

(Received: 22 August 2023; Accepted: 25 February 2024)

Abstract

Introduction: Natural ecosystems in Iran are under the influence of unprecedented disturbances, including climate changes such as drought, pests and diseases, invasive species, and as a result, vegetation changes. Trend analysis of vegetation and ecosystem health monitoring on a regional scale is necessary to evaluate the changing status of ecosystems and inform the management of environmental disturbance factors. However, these analyses and monitoring are difficult only based on field investigations. Remote sensing provides the possibility of comprehensive evaluations of ecosystems in large areas, and their changes can be observed over time using vegetation indicators in multi-temporal satellite images.

Materials and Methods: This research is based on the time series of Landsat-7 ETM+ and Landsat 8 OLI/TIRS images related to the years 2003 to 2023 and Geographic Information Systems used for analyzing vegetation trends and monitoring the health of the ecosystems in the Fandoghlo region (farthest end of the western Hyrcanian region located in the east of Ardabil). The non-parametric Mann-Kendall (M-K) trend test was used to analyze the spatial-temporal changes of vegetation in the study area.

Results: Based on the results of land cover changes in the study area, the reduction of vegetation cover was found in all natural ecosystems, including forests (-8.5 %), rangeland (-16.5 %), and water bodies (-17.2 %). On the other hand, agriculture (14.7 %) and built-up (30.9 %) areas showed an increase during the study period. Furthermore, the results of the changes in health index (NDVI) during the period 2003-2023 indicate a trend of vegetation browning (decrease) in the Fandoghlo region. In addition, the results of the M-K trend test show that NDVI had a significant linear increasing trend from 2003 to 2011, a non-significant linear increasing trend from 2011 to 2016, and a non-significant linear decreasing trend from 2016 to 2023.

Conclusion: In this study, the analysis of the trend of vegetation cover and health index based on NDVI can provide valuable indications about some processes that are relevant for ecological assessments such as the simplification and destruction of ecosystems or the intensification of agricultural activities. Considering the declining trend of natural ecosystems and the threat to health, it is recommended to implement conservation programs in line with nature to increase the vegetation cover and its health.

Keywords: Ecological assessment, Fandoghlo region, Health index, Landsat, Trend analysis.