



پایش تخریب جنگل‌های زاگرس شمالی با استفاده از الگوریتم BFASST (مطالعه موردی: بخشی از جنگل‌های سروآباد)

صبری رسولی^{۱*}، امیر اسلام بنیاد^۲ و ساسان وفايي^۳

^۱دانشجوی دکتری جنگلداری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران

^۲استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران

^۳کارشناس سنجش از دور، دفتر جنگلداری و امور بهره‌برداری، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵)

چکیده

مقدمه: جنگل‌های زاگرس از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های جنگلی کشور از نظر اکولوژیک و اقتصادی هستند که متأسفانه همواره تحت تأثیر عوامل مخرب و تغییرات کاربری اراضی قرار داشته است. یکی از راهکارهای مناسب برای تعیین مقدار و روند این تغییرات استفاده از سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای و مدل BFASST است، چراکه این مدل می‌تواند روند تغییرات بلندمدت، فصلی و ناگهانی را همزمان تفکیک کند. قابلیت این الگوریتم در بررسی بوم‌سازگان‌های کشور به‌ویژه جنگل‌های زاگرس به‌ندرت استفاده و گزارش شده است. از این‌رو هدف این پژوهش، استفاده از الگوریتم BFASST برای پایش و ارزیابی تغییرات در بخشی از جنگل‌های بلوط زاگرس در شهرستان سروآباد است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش پویایی پوشش جنگلی در بخشی از جنگل‌های شهرستان سروآباد در استان کردستان به‌عنوان نمونه‌ای از جنگل‌های زاگرس، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ (۲۰ سال) تجزیه و تحلیل شد. با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ و الگوریتم BFASSTspatial، تغییرات پوشش جنگلی منطقه بررسی شد. ابتدا با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده بیشترین احتمال، روی تصویر شهریور ۱۳۸۰، طبقه جنگل از دیگر کاربری‌های منطقه جدا شد. بعد از جداسازی طبقه جنگل، شاخص NDVI این طبقه، از همه تصاویر سری زمانی ۲۰ ساله استخراج شد. در نهایت یک سری زمانی فشرده، از همه تصاویر NDVI طبقه جنگل تشکیل و برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد و دوره مرجع و حد آستانه تعیین شد. در مجموع ۱۷۴ تصویر از تصاویر ماهواره‌های سری لندست پردازش شد. برای ارزیابی صحت مدل BFASSTspatial در تشخیص تغییر کاربری جنگل نیز ۴۰۹ نقطه به‌طور تصادفی انتخاب شد.

یافته‌ها: در این تحقیق، با آزمون و خطا، پنج سال ابتدایی دوره تحقیق، دوره مرجع در نظر گرفته شد. نمودار الگوریتم BFASSTspatial نشان‌دهنده یک نقطه شکست و افت ناگهانی در سال ۱۳۹۳ است. همچنین آشکارسازی تغییرات نشان داد که ۵۸۹ هکتار (۴/۶ درصد) از جنگل‌های منطقه، طی دوره تحقیق از بین رفته است. در نقشه اراضی جنگلی تخریب‌شده با حد آستانه ۰/۲۵-، مدل BFASSTspatial نشان‌دهنده تغییر با صحت کاربر ۸۷/۱ درصد، صحت تولیدکننده ۸۵/۹ درصد و صحت کلی ۸۶ درصد است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که مدل BFASSTspatial با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی و با تعیین پیکسل‌های تخریب‌شده جنگل‌های بلوط در منطقه با صحت بیش از ۸۵ درصد، توانایی مناسبی در تعیین حدود جغرافیایی اراضی تخریب‌شده دارد و می‌تواند ابزاری در نظارت بر محیط‌های جنگلی در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: حد آستانه، دوره مرجع، زاگرس، سری زمانی، لندست.

مقدمه

جنگل‌ها از مهم‌ترین منابع اکولوژیکی کره زمین به شمار می‌آیند که کارکرد آنها نقش اساسی در حفظ تعادل چرخه طبیعت دارد. افزون بر این، وجود جنگل‌ها مانع وقوع بسیاری از بلایای طبیعی است و می‌تواند از تهدیدهای طبیعی جلوگیری کند (Ajin et al., 2016). جنگل‌های زاگرس وسیع‌ترین ناحیه رویشی ایران است که با مساحت حدود ۵ میلیون هکتار، ۴۰ درصد کل جنگل‌های ایران را در بر می‌گیرد (Zand et al., 2021; Azizi et al., 2015). حدود ۷۰ درصد تیپ گونه‌های جنگلی زاگرس را گونه بلوط تشکیل می‌دهد (Pourhashemi & Sadeghi, 2020; Mirmosavei & Kareime, 2013). جنگل‌های غرب کشور افزون‌بر تولید چوب، به دلیل تأثیر مهم در تنظیم آب و خاک و تعادل اکولوژیک و همچنین کارکرد اساسی در شرایط اجتماعی-اقتصادی و بوم‌شناختی، باید ارزیابی کمی و کیفی دقیق شوند، چراکه با تخریب بیشتر و تحول شرایط طبیعی این مناطق، بازسازی آنها به آسانی میسر نخواهد بود (Hosseinzadeh et al., 2004). به همین دلیل به دست آوردن اطلاعات به‌روز از وضعیت کمی و کیفی جنگل‌ها، می‌تواند در تعیین ضوابط منطقی و علمی به منظور اعمال مدیریت صحیح و حفظ و بهره‌برداری هر چه اصولی‌تر از این منابع بسیار ارزشمند باشد. از آنجا که تغییر کاربری اراضی و تخریب جنگل‌ها نشان‌دهنده ارتباط مستقیم و متقابل انسان و محیط زیست طبیعی است، درک بهتر فرایندهای اجتماعی و بیوفیزیکی ایجادکننده تغییرات و تخریب اراضی، می‌تواند اثر مهمی در سیاستگذاری و اجرای اقدامات پیشگیرانه و تصمیم‌ها داشته باشد. از این‌رو، پژوهش‌های تغییر کاربری اراضی و تخریب جنگل‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و مجریان در پشتیبانی از تصمیم‌هایشان درکی کلی بدهد (Vu et al., 2014).

با به‌کارگیری سنجش از دور، می‌توان روند تغییرات طیف پیکسل‌های ثبت‌کننده پوشش گیاهی را برای شناسایی مناطق تحت تغییرات سریع

شناسایی کرد. از این‌رو استفاده از داده‌های سنجش از دور با هدف بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی در بازه‌های زمانی طولانی و در سطح گسترده، آنها را به ابزاری کارآمد برای بررسی پویایی‌های پوشش گیاهی تبدیل کرده است (Harris et al., 2014). مدل‌های مختلفی برای آشکارسازی تغییرات و بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی ایجاد شده که مدل BFAST¹ و تحلیل سری‌های زمانی از آن دست است. به کمک سری‌های زمانی می‌توان الگوها، روندها و تغییرات فصلی را در طول زمان شناسایی و بر اساس آنها پیش‌بینی‌هایی از آینده ارائه کرد. یکی از راهکارهای پایش پوشش گیاهی، تعیین روند مربوط به تخریب آن است و مناسب‌ترین داده‌ها برای تحلیل روند تغییرات پدیده‌های طبیعی و انسانی، سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای است (Hashemi Dareh Badami et al., 2015; Mirahsani et al., 2018). مدل BFAST هم‌زمان تغییرات بلندمدت، فصلی و نقاط شکست ناگهانی را در یک دوره زمانی مشخص می‌کند. دقت زیاد این مدل در تشخیص تغییرات ناگهانی موقت یا فصلی از تغییرات واقعی پوشش گیاهی است که در بسیاری از مدل‌های دیگر دیده نمی‌شود؛ با این حال این مدل به محاسبات پیچیده و بسیار تخصصی نیاز دارد. از دیگر مزایای این مدل، انعطاف‌پذیری زیاد در صورت نقض داده‌ها در طول دوره بررسی (Verbesselt et al., 2010) و کاربرد گسترده در تشخیص اختلالات محیطی زیستی و غیرزیستی مانند خشکسالی، آتش‌سوزی و تغییرات پوشش گیاهی (Verbesselt et al., 2010; Watts & Laffan, 2014) در کشاورزی (Atzberger, 2013) و مناطق جنگلی (Lambert et al., 2013; Lambert et al., 2015; Schmidt et al., 2015) است. پژوهش‌های متعددی قابلیت الگوریتم BFAST و سری‌های زمانی لندست را با استفاده از انواع شاخص پوشش گیاهی طیفی در تشخیص تغییرات و نظارت بر جنگل‌زدایی

1. Breaks for Additive Seasonal and Trend

ترکیه، از الگوریتم BFAST به همراه داده‌های سری زمانی لندست استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این الگوریتم ابزاری مناسب برای شناسایی آشفتگی‌های جنگل است، اما دقت آن به نوع جنگل و مقیاس آشفتگی وابسته است. همچنین در پژوهشی دیگر در جنگل‌های منطقه لمناس یونان، استفاده از الگوریتم BFAST نشان داد که کشف و زمان‌بندی تخریب ناشی از آتش‌سوزی جنگل با تخمین مناسبی همراه است (Vasios et al., 2025).

به‌طور کلی یافته‌های پژوهش‌های یادشده، بیان می‌کند که الگوریتم BFAST ابزاری دقیق و قابل اعتماد در بررسی و تعیین مقدار و زمان تغییرات کاربری اراضی (مانند تغییرات اراضی جنگلی) است؛ اما قابلیت این الگوریتم در بررسی بوم‌سازگان‌های کشور به‌ویژه جنگل‌های زاگرس به‌ندرت استفاده و گزارش شده است. از این‌رو هدف این پژوهش، بررسی الگوریتم ریاضی پرفدرت BFAST در پایش و ارزیابی تغییرات کمی و کیفی جنگل‌های بلوط زاگرس در بخشی از جنگل‌های شهرستان سروآباد با توجه به نقش جنگل‌های این منطقه در حفاظت از آب و خاک و جلوگیری از فرسایش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در سری زمانی بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ است. علت انتخاب این دوره به پیشنهاد اداره منابع طبیعی شهرستان سروآباد، تخریب و آتش‌سوزی زیاد در این دامنه زمانی است. نتایج این تحقیق می‌تواند گامی مهم در پایش دقیق تغییرات جنگل‌های زاگرس و ارائه داده‌های قابل اعتماد برای مدیریت پایدار این بوم‌سازگان ارزشمند باشد.

مواد و روش‌ها

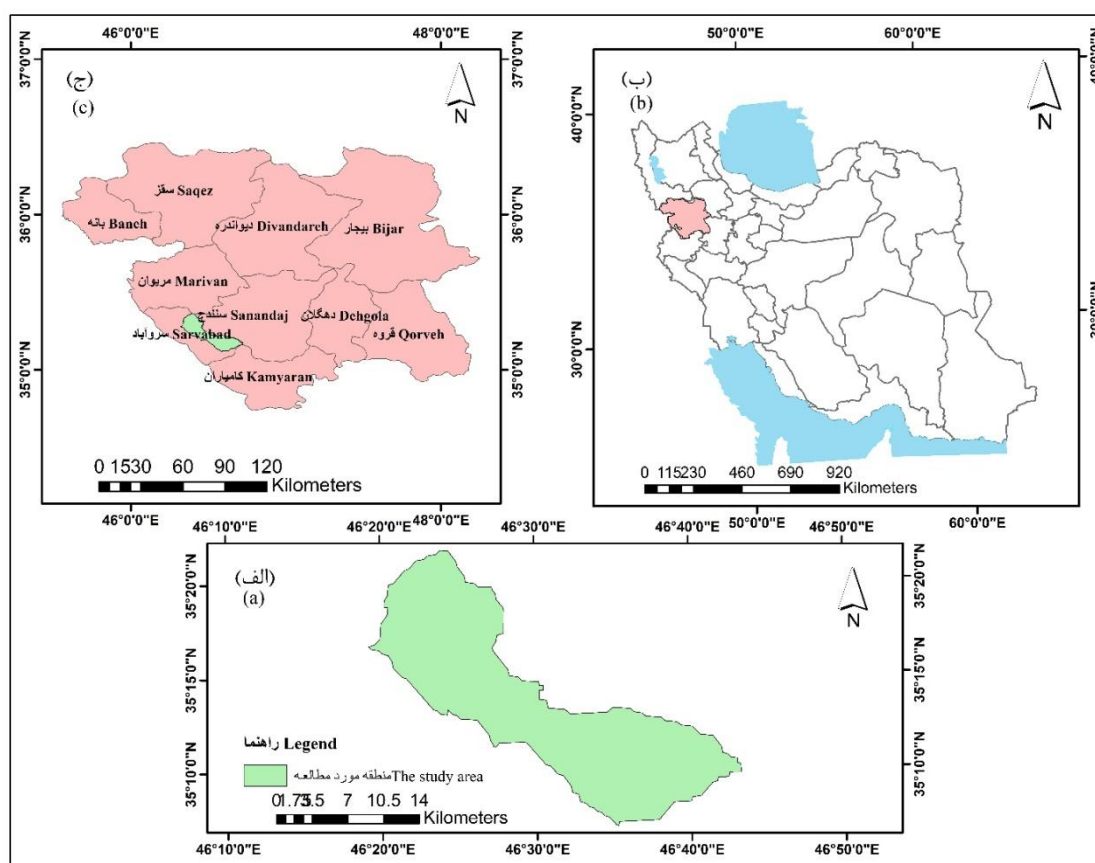
منطقه پژوهش

منطقه پژوهش، بخشی از شهرستان سروآباد در غرب استان کردستان به مساحت ۳۲۷۲۳ هکتار است که حدود ۱۲۰۰۰ هکتار از آن را جنگل‌های طبیعی پوشانده است و از نظر جغرافیایی در طول

اثبات کرده‌اند (Schmidt et al., 2015; Gao et al., 2021; Smith et al., 2019; Bueno et al., 2020; Lu et al., 2016). Shiravand et al. (2020) در پژوهشی با استفاده از مدل BFAST و تصاویر ماهواره‌ای به پایش و ارزیابی تغییرات پوشش و زوال جنگل‌های بلوط در استان لرستان در دوره آماری (۲۰۱۷-۲۰۰۰) پرداخته‌اند. نتایج نشان داد در طول دوره پژوهش، بیش از ۴۲۸۰۴ هکتار (۱/۵ درصد) از جنگل‌های بلوط استان از بین رفته است. Potter (2019) از سری زمانی شاخص NDVI ۲۵۰ متری MODIS به‌عنوان ورودی روش BFAST برای ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی ناشی از آتش‌سوزی‌های جنگلی در پارک ملی یلو استون (ایالات متحده آمریکا) استفاده کرد. این پژوهش نتیجه گرفت که BFAST می‌تواند نقاط سوخته و نیز مناطق در حال رشد مجدد پس از تخریب را نشان دهد. Wu et al. (2020) با استفاده از تصاویر سری زمانی لندست در دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ و مدل BFAST برای نقشه‌برداری از تغییرات کاربری جنگل در منطقه تالاب دریاچه دونگ‌تینگ غربی در چین استفاده کردند. تغییرات چند نوع جنگل، مانند تبدیل از جنگل به کاربری‌های دیگر، تبدیل از جنگل به کاربری‌ها به جنگل و تبدیل از جنگل به جنگل (مانند کاشت مجدد پس از جنگل‌زدایی) و کاربری‌های زمین قبل و بعد از تغییر، به‌طور مؤثر با ادغام الگوریتم‌های BFAST و جنگل تصادفی با سری زمانی ماهانه NDVI، با صحت کلی ۸۷/۸ درصد شناسایی شدند. Rodriguez et al. (2024) در منطقه‌ای جنگلی در کانادا با استفاده از سری زمانی تصاویر مودیس و الگوریتم BFAST به بررسی تغییرات پوشش گیاهی در روندی بلندمدت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ذکرشده توانایی زیادی در شناسایی مناطق تخریب‌شده دارد. Mashhadi et al. (2022) با هدف پایش آشفتگی‌های (همانند قطع و آتش‌سوزی) جنگل‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ منطقه مرمره

بارندگی سالیانه ۶۵۰-۷۰۰ میلی‌متر است که حداکثر آن از اواسط مهر شروع می‌شود و تا اواسط اردیبهشت ادامه دارد. متوسط ارتفاع منطقه ۱۶۰۰ متر از سطح دریاست. میانگین درجه حرارت در فصل تابستان ۲۶ و در زمستان ۴ درجه سانتی‌گراد است (Mohammadi Sarvaley et al., 2013).

شرقی ۱۳' ۱۹" تا ۱۴' ۴۳" و عرض شمالی ۰' ۳۵' ۷" تا ۳۵' ۲۱' ۴۴" قرار دارد. وجود کوه‌های اورامانات و شاهو و رطوبت ابرهای باران‌زای مدیترانه، شرایط را برای جنگلی شدن این منطقه فراهم کرده است، بنابراین دامنه‌های شهرستان پوشش جنگلی مناسبی دارند و تراکم تاج‌پوشش در جنگل‌های منطقه در طبقه متوسط قرار دارد. مقدار متوسط



شکل ۱- (الف) موقعیت جغرافیایی منطقه (ب) در کشور (ج) در استان کردستان.

Figure 1. (a) Geographical location of the study area (b) in the country (c) and in the Kurdistan province

درصد). بعد از تاریخ ۳۱ می ۲۰۰۳، تصاویر سنجنده ETM+ لندست ۷ به علت نقص سیستم تصویربرداری، در حالت SLC-off اخذ می‌شوند و دارای گپ‌هایی هستند که باید قبل از به کارگیری، این خطا با استفاده از روش‌های خاص برطرف یا از تصاویر جایگزین استفاده شود. بنابراین از تصاویر لندست ۵ به عنوان جایگزین و گزینه اول برای به حداقل رساندن فاصله بین داده‌ها استفاده شد و تنها در صورت در دسترس

شیوه اجرای پژوهش

برای پایش تغییرات پوشش جنگل‌های بلوط شهرستان سروآباد از تصاویر سری زمانی ماهواره لندست سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ استفاده شد. این تصاویر شامل ماهواره‌های لندست ۵ (سنجنده TM)، لندست ۷ (سنجنده ETM+) و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ است. سعی شد تصویری انتخاب شوند که کمترین درصد ابری را داشته باشند (کمتر از ۵

سال ۱۳۸۰ تا پایان سال ۱۳۹۹ با دامنه زمانی یک‌ماهه تشکیل شد. به دلیل شرایط جوی تعداد تصاویرها در هر سال متفاوت است (جدول ۱). همچنین به منظور ارزیابی دقت مدل در تشخیص تغییر کاربری جنگل‌های منطقه، از تصاویر گوگل‌ارث به عنوان داده‌های مرجع در اعتبارسنجی استفاده شد.

نبودن لندست ۵ یا ابری بودن در زمانی خاص، از تصاویر لندست ۷ استفاده شد. داده‌های استفاده شده دارای سطح پردازش L2 بودند که تصحیحات رادیومتریکی، اتمسفری و هندسی روی آنها اعمال شده است. در این تحقیق ۱۷۴ تصویر، سری زمانی تصاویر لندست در یک دوره زمانی ۲۰ ساله از ابتدای

جدول ۱- تعداد تصاویرهای استفاده شده برای هر سال

Table 1. Number of available images for each year

تعداد تصاویر	سال	تعداد تصاویر	سال	تعداد تصاویر	سال	تعداد تصاویر	سال
Number of Images	Year	Number of Images	Year	Number of Images	Year	Number of Images	Year
11	1395	9	1385	10	1390	7	1380
8	1396	11	1386	8	1391	6	1381
10	1397	9	1387	9	1392	5	1382
9	1398	8	1388	8	1393	8	1383
9	1399	11	1389	10	1394	8	1384

T_t در زمان T_{t-1} و T_t حاصل می‌شود (Gholamnia et al., 2019). بسته BFASTSpatial، یک خانواده از الگوریتم‌هایی است که شامل پیش‌پردازش تصاویر و اجرای الگوریتم BFAST روی سری زمانی است که توسط Verbesselt et al. (2010) و Verbesselt et al. (2012) ارائه و در نرم‌افزار R توسعه داده شده است. ورودی این مدل سری زمانی تک‌متغیره همراه با شاخص‌های قابل تنظیم است. برای شناسایی تغییرات پوشش جنگل، تنها مقدار آن پیکسل‌هایی که به عنوان نقطه شکست معرفی شده‌اند در نظر گرفته می‌شود که مقدار منفی آن با جنگل‌زدایی یا تخریب و مقدار مثبت با بازسازی یا جنگل‌زایی مرتبط است.

انتخاب دوره مرجع

فرض صفر BFASTSpatial این است که مشاهده در دوره تاریخی $t = 1, 2, 3, \dots, m$ بدون تغییر است و می‌تواند برای مدل‌سازی رفتار مدنظر با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شود؛ بنابراین یک دوره تاریخی پایدار را درست قبل از شروع دوره نظارت مشخص می‌کند. این دوره زمانی را می‌توان به صورت دستی یا خودکار (بر اساس داده‌های موجود) شناسایی

روش BFAST Spatial

الگوریتم ریاضی BFAST، پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای را به سه جزء روند، تغییرات فصلی و نویز تبدیل کرده و از آنها برای تشخیص تغییرات استفاده می‌کند و اساس آن به صورت آنالیز تکراری است (Verbesselt et al., 2010). شکل ساده مدل تجزیه (رابطه ۱) به شرح زیر است:

$$Y_t = T_t + S_t + e_t \quad (t = 1, 2, 3, \dots, m) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن Y_t داده مشاهده شده در زمان t و T_t ، S_t و e_t به ترتیب نشان‌دهنده روند داده، تغییرات فصلی داده و مؤلفه باقی‌مانده یا نویز داده در زمان t است. m نشان‌دهنده تعداد نقاط شکست است. مؤلفه روند (T_t) با توابع خطی متعدد بین زمان‌های متوالی $t-1$ و t تعریف می‌شود و طبق رابطه ۲ می‌باشد.

$$T_t = \alpha_i + \beta_i t \quad \text{رابطه ۲}$$

در اینجا، T_t روند مشاهدات، α_i نقطه شکست و $\beta_i t$ شیب مدل خطی است که می‌تواند برای به دست آوردن مقدار و جهت تغییر ناگهانی و شیب تغییر تدریجی بین نقاط شکست مشخص شده استفاده شود. مقدار تغییر ناگهانی در نقطه شکست بر اساس تفاوت

تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی و در واقع بررسی الگوهای فصلی پوشش گیاهی سطح زمین می‌پردازد (De Beurs & Henebry, 2010).

تهیه نقشه کاربری جنگل

به منظور جلوگیری از تداخل اراضی جنگلی و دیگر پوشش‌های زمین در تحلیل نهایی، طبقه جنگل با استفاده از طبقه‌بندی کننده بیشترین احتمال (Maximum Likelihood) از تصویر شهریور ۱۳۸۰ از دیگر کاربری‌های منطقه جدا شد. دلیل انتخاب این ماه از سال برای طبقه‌بندی این است که جنگل‌های بلوط در این ماه به اوج سرسبزی خود رسیده و از نظر رفتار طیفی به بیشترین تفاوت خود با دیگر کاربری‌های منطقه می‌رسند. همچنین کاربری‌هایی مانند کشاورزی و مرتع که بازتاب طیفی مشابهی با کاربری جنگل دارند، خشک یا برداشت شده‌اند (Vafaei et al., 2013). دیگر طبقات منطقه شامل اراضی کشاورزی، مرتع و اراضی صخره‌ای بودند. بعد از جداسازی طبقه جنگل، شاخص NDVI این طبقه از همه تصاویر سری زمانی ۲۰ ساله استخراج شد. در نهایت یک سری زمانی فشرده (Time series stack)، از همه تصاویر NDVI طبقه جنگل تشکیل و برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد. نقشه پوشش اراضی در نرم‌افزار ENVI 5.6 و تحلیل سری زمانی در نرم‌افزار R 3.5.2 صورت گرفت.

تعیین حد آستانه

برای شناسایی تغییرات پوشش جنگل، تنها مقدار آن پیکسل‌هایی که به عنوان نقطه شکست معرفی شده‌اند، در نظر گرفته شده است که مقدار منفی آن با جنگل‌زدایی یا تخریب و مقدار مثبت با بازسازی یا جنگل‌زایی مرتبط است. با این حال، برای تعریف تغییرات پوشش جنگلی تنها وجود یا نبود نقاط شکست کافی نیست، زیرا نمی‌تواند به طور مستقیم به تغییرات مرتبط باشد. برای جلوگیری از تشخیص مثبت غلط، تعریف یک حد آستانه ضروری است.

کرد. آن بخش از فاصله زمانی که برای به دست آوردن تغییرات، تجزیه و تحلیل می‌شوند، دوره نظارت نام دارد. تشخیص تغییرات بر اساس دوره پیش از دوره نظارت (دوره مرجع یا دوره مدت زمان ثابت) تعریف می‌شوند. در این تحقیق، با آزمون و خطا، پنج سال ابتدایی دوره تحقیق، به عنوان دوره مرجع در نظر گرفته شد و ۱۵ سال بعد از آن دوره نظارت است.

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص NDVI یکی از شاخص‌های پایه، پرکاربرد و بسیار رایج در بررسی‌های پوشش گیاهی، سلامت گیاهان و تغییرات زمانی پوشش گیاهی است (Zhao & Qu, 2024; Huang et al., 2021). برگ گیاهان بخشی از طیف الکترومغناطیسی را برای فرایند فتوسنتز جذب می‌کند (به ویژه در باند قرمز مرئی)، اما به طور چشمگیری بخش مادون قرمز نزدیک، طیف الکترومغناطیسی را به دلیل ساختار سلول‌های تشکیل دهنده برگ منعکس می‌کند. NDVI از این ویژگی‌های جذب و بازتاب استفاده می‌کند و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۳} \quad NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR بازتابندگی در باند مادون قرمز نزدیک و RED بازتابندگی در باند قرمز است. از آنجا که NDVI ارتباط خطی با تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (fAPAR) و ارتباط مثبت با تراکم تاج پوشش و شادابی گیاه دارد، شاخصی برای ارزیابی فعالیت پوشش گیاهی است (Fensholt et al., 2004). ماهواره‌هایی که از چند دهه قبل کره زمین را روزانه پایش می‌کنند، تولید سری زمانی از داده‌های NDVI را میسر کرده‌اند. روند تغییرات ارزش‌ها در سری زمانی NDVI برای دستیابی به اهداف گوناگون مانند تغییرات فصلی پوشش‌های گیاهی، وضعیت محصولات کشاورزی یا تخریب و بیابان‌زایی بررسی می‌شود (De Jong et al., 2011). در بررسی تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر اساس سری زمانی NDVI، به

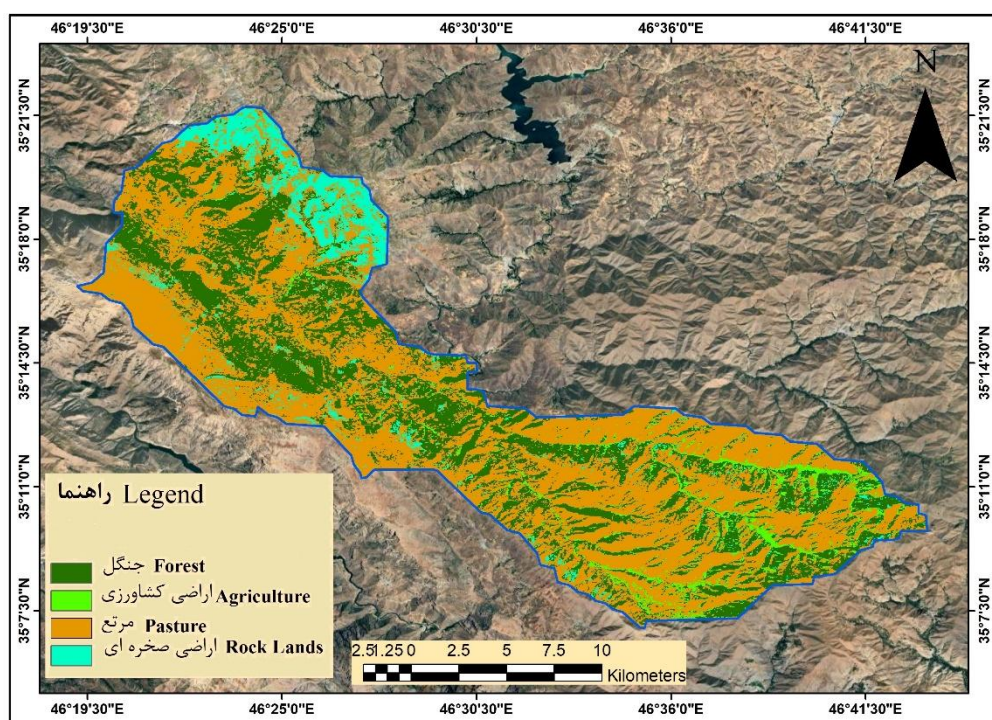
نتایج

بررسی روند تغییرات درازمدت پوشش جنگل‌های بلوط زاگرس در شهرستان سروآباد با استفاده از سری زمانی بر اساس الگوریتم BFASTSpatial روی داده‌های ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ اجرا و آنالیز آماری شد. پس از دریافت، آماده‌سازی و تحلیل سری‌های زمانی داده‌های لندست، مناطق تخریب‌شده جنگلی بلوط با استفاده از این داده‌ها و روش‌های توضیح داده‌شده تعیین شدند. در شکل‌های ۲ و ۳، به‌ترتیب نقشه کاربری اراضی منطقه پژوهش با استفاده از الگوریتم بیشترین احتمال برای ابتدای دوره (شهریور ۱۳۸۰) و موقعیت کاربری‌های جنگل که روی تصاویر گوگل‌ارث جانمایی شده نشان داده شده است.

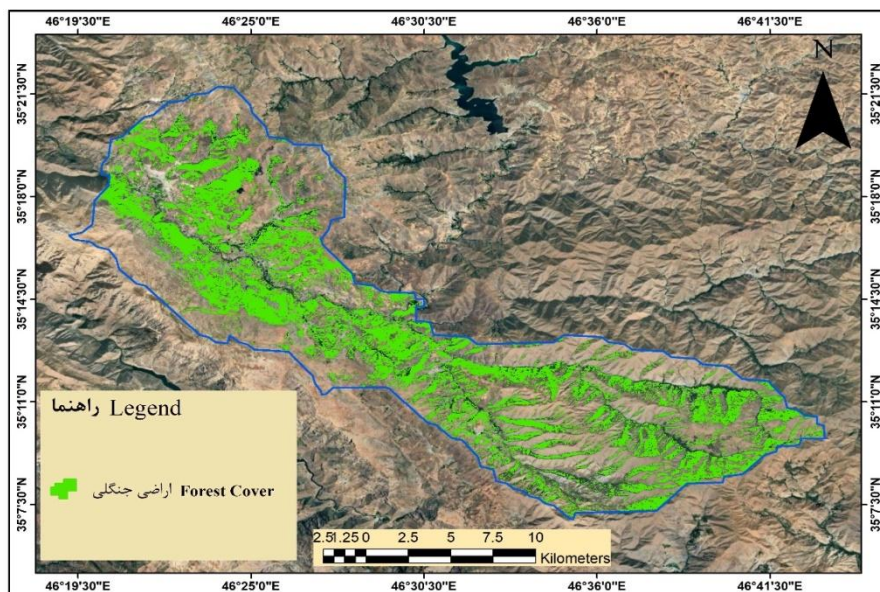
فرمول و رابطه خاصی برای تعیین حد آستانه وجود ندارد و باید به‌صورت آزمایش و خطا این حد را برای تشخیص شکست‌ها به دست آورد. حد آستانه باید چند بار تغییر داده شود تا جایی که بیشترین دقت را داشته باشد و مبنای مقایسه تصاویر گوگل‌ارث است. برای هر حد آستانه، نتایج با این تصویرها ارزیابی می‌شوند تا بهترین حد آستانه انتخاب شود.

ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی دقت مدل BFASTSpatial در تشخیص آشفستگی و تخریب مناطق جنگلی، در مجموع ۴۰۹ نقطه از مناطقی که جنگل‌زدایی در آنها رخ داده است و همچنین از مناطق بدون تغییر، به‌طور تصادفی انتخاب شد. این نمونه‌های تعلیمی از روی تصاویر گوگل‌ارث و دوره نظارت انتخاب شدند.



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی منطقه پژوهش
Figure 2. The land use map of the study area

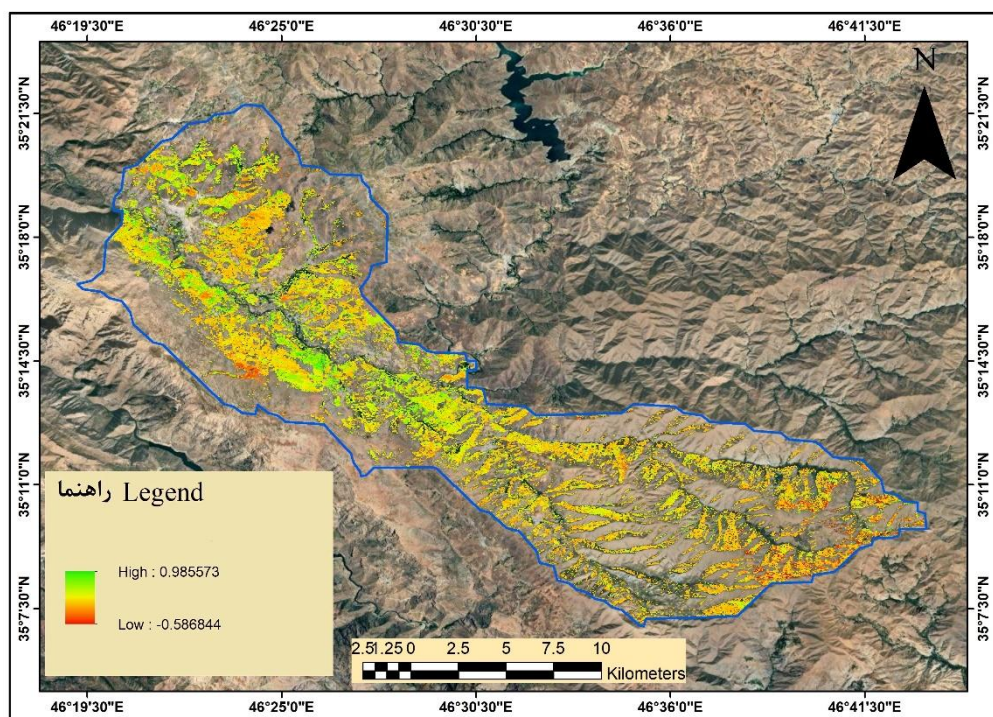


شکل ۳- پوشش جنگلی منطقه پژوهش
Figure 3. Forest cover of the study area

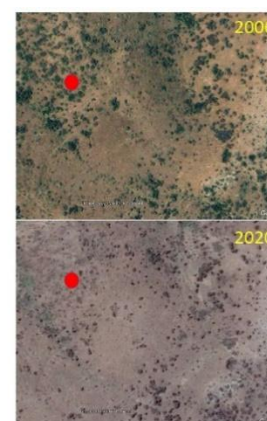
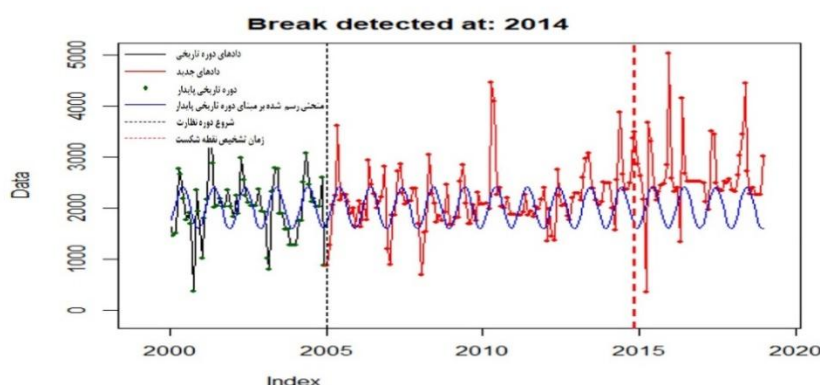
مشخص کند. با این حال، طبیعی است که نمی‌توان همه شکست‌ها را تغییر پوشش زمینی در نظر گرفت؛ زیرا برخی از این شکست‌ها ناشی از تغییرات اندک محیطی، برای مثال بر اثر خشکسالی یا خطای تصاویر و خطای مدل هستند. در نتیجه برای تعیین دقیق مناطق تخریب‌شده اراضی بلوط، باید این شکست‌ها به اندازه‌ای باشد که بتوان آن را تغییر پوشش زمین در نظر گرفت. بنابراین تنها شکست‌های پایین‌تر از حد آستانه، تغییر کامل شناخته می‌شوند.

شکل ۵ نمونه‌ای از اراضی جنگلی تخریب‌شده است که توسط الگوریتم BFASTSpatial و نرم‌افزار R شناسایی شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روی نمودار شکل ۵، دوره مرجع، آغاز دوره نظارت و نقطه شکست در منطقه تحت بررسی مشخص شده است. نمودار نشان‌دهنده نقطه شکست در سال ۱۳۹۳ (۲۰۱۴) است. در نقطه شکست، روند چندساله NDVI تغییر می‌کند و مقادیر NDVI تغییر ناگهانی را تجربه می‌کند، به این معنا که ارزش NDVI از روند تغییر قبل از نقطه شکست پیروی نمی‌کند و به صورت افت یا افزایش ناگهانی ظاهر می‌شود که در اینجا در سال ۱۳۹۳ نقطه شکست نشان‌دهنده افت ناگهانی است.

بر اساس نقشه کاربری اراضی تهیه‌شده، مساحت جنگل‌های منطقه در ابتدای دوره ۱۲۷۳۳ هکتار (۳۹ درصد) است. پس از ماسک طبقه جنگل، شاخص NDVI طبقه جنگل از دیگر طبقات سری زمانی ۲۰ ساله جدا شد و سری زمانی فشرده شاخص NDVI در نرم‌افزار R تشکیل و با الگوریتم BFASTSpatial تجزیه و تحلیل شد. خروجی‌های مدل BFAST به صورت نقشه و نمودار بوده و شامل اطلاعات مختلفی مانند شکست در سری زمانی، بزرگی شکست و تاریخ وقوع شکست است. شکل ۴ نقشه بزرگی یا مقدار تغییرات پوشش جنگلی منطقه برای هر پیکسل است که از سبز به قرمز (جنگل‌زدایی) تغییر می‌کند. تغییرات این مقادیر متأثر از مقدار تغییرات پیکسل‌ها است و می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. بزرگی تغییرات پیکسل‌ها در این تحقیق از ۰/۵۸- تا ۰/۹۸ است. این محدوده تغییرات در واقع به نوعی بیانگر همه تغییرات ممکن در منطقه است. شکست در سری زمانی هنگامی اتفاق می‌افتد که روند ثابت سری زمانی تغییر پیدا کند که به عنوان تغییر در نوع پوشش قلمداد می‌شود. مدل BFASTSpatial می‌تواند همه شکست‌ها را در یک سری زمانی



شکل ۴- نقشه بزرگی تغییرات جنگل‌های منطقه
Figure 4. Magnitude values of changes in the study area



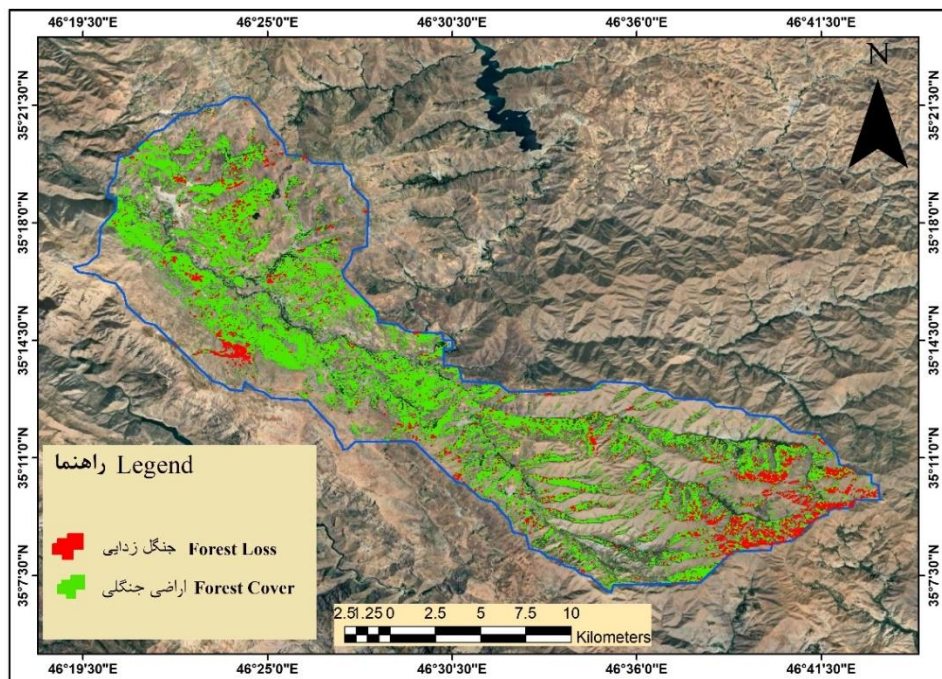
شکل ۵- نمودار نقطه شکست و نمونه‌ای از اراضی جنگلی تخریب‌شده در منطقه پژوهش
Figure 5. Breakpoint diagram and a sample of degraded forest lands in the study area

BFASTspatial چند نمونه از پیکسل‌های تغییر یافته (تخریب‌شده) با تصاویر گوگل ارث که تصاویر قبلی آنها نیز موجود بود در شکل ۷ آورده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست، جاده‌سازی و تبدیل اراضی جنگلی به اراضی کشاورزی از نمونه‌های بارز تخریب جنگل‌های منطقه‌اند. از دلایل دیگر کاهش اراضی جنگلی در سال‌های اخیر در منطقه می‌توان به قطع سرشاخه درختان به‌منظور تأمین خوراک دام به‌خصوص در

شکل ۶ نقشه اراضی جنگلی تخریب‌شده با حد آستانه ۰/۰۲۵- را نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه، وسعت جنگل‌های منطقه از ۱۲۷۳۳ هکتار به ۱۲۱۴۴ کاهش یافته است، یعنی حدود ۵۸۹ هکتار از اراضی جنگلی منطقه، طی دوره پژوهش به کاربری‌های دیگر تبدیل شده است که نمونه‌هایی از این تغییرات کاربری در شکل ۷ نشان داده شده است. برای ارزیابی بصری عملکرد الگوریتم

حد آستانه ۰/۰۲۵، مدل BFASTspatial نشان‌دهنده تغییر با صحت کاربر ۸۷/۱ درصد، صحت تولیدکننده ۸۵/۹ درصد و صحت کلی ۸۶ درصد است. نتایج نشان می‌دهد که مدل توانایی مناسبی در تعیین اراضی تخریب‌شده دارد.

زمستان، تبدیل جنگل به عرصه چرای دام، آتش‌سوزی‌های عمدی و غیرعمدی توسط روستاییان و لگدکوب شدن خاک جنگل توسط دام اشاره کرد. جدول ۲ صحت کاربر، صحت تولیدکننده و صحت کلی را نشان می‌دهد. برای نقشه تخریب تهیه‌شده با



شکل ۶- نقشه اراضی جنگلی تخریب‌شده

Figure 6. Map of degraded forest lands



شکل ۷- نمونه‌هایی از تخریب جنگل‌های منطقه

Figure 7. Examples of forest destruction in the study area

جدول ۲- ماتریس خطای محاسبه‌شده برای نقشه تخریب
Table 2. Calculated error matrix for the degraded forest land map

	داده‌های واقعی Real data				
	جنگل‌زدایی Deforestation	بدون تغییر No change	مجموع Total	صحت کاربر User's Accuracy	صحت کلی Overall Accuracy
نقشه تخریب Destruction map	جنگل‌زدایی (Deforestation)	183	27	210	87.1%
	بدون تغییر (No change)	30	169	299	56.5%
	مجموع (Total)	213	196	409	-
	صحت (Producer's Accuracy)	85.9%	86.2%	-	-
	تولیدکننده				86%

بحث

امروزه جنگل‌های زاگرس در معرض تخریب و تهدیدهای بسیاری قرار گرفته و بخش عظیمی از وسعت این جنگل‌های ارزشمند به دلایلی مثل آتش‌سوزی، چرای بیش از حد دام، برداشت چوب درختان، اجرای پروژه‌های عمرانی کارشناسی نشده، تغییر کاربری، توسعه زراعت زیرآشکوب، زغال‌گیری، زوال و خشکیدگی درختان بلوط، خشکسالی، ریزگردهای فزاینده و آفات از بین رفته است. از این‌رو ضروری است که این تغییرات و روند آنها تا حد ممکن به‌صورت کمی تعیین شود تا با استفاده از آنها و دیگر اطلاعات، تدابیری برای کاهش این اثرهای مخرب اندیشیده و در برنامه‌ها و طرح‌های حفاظتی و احیایی گنجانده شود. بنابراین در این تحقیق پویایی پوشش جنگلی در بخشی از جنگل‌های شهرستان سروآباد در استان کردستان به‌عنوان نمونه‌ای از جنگل‌های زاگرس، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ (۲۰ سال) تجزیه و تحلیل شد.

در این تحقیق تغییرات پوشش جنگلی منطقه با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست و شاخص NDVI و الگوریتم BFASTSpatial بررسی شد. پژوهش‌های متعددی قابلیت الگوریتم BFAST و سری‌های زمانی لندست را با استفاده از شاخص‌های طیفی مختلف پوشش گیاهی در تشخیص تغییرات و پایش جنگل‌زدایی اثبات کرده‌اند (Schmidt et al.,

2015; Gao et al., 2021; Smith et al., 2019; Bueno et al., 2020; Lu et al., 2016). استفاده از BFASTSpatial بررسی جامع‌تری از تغییرات پوشش گیاهی را ارائه می‌دهد و با مشخص کردن روند تغییرات، مقایسه زمانی (فصلی) تغییرات و تعیین نقاط شکست، به‌خوبی توانایی نشان دادن تغییرات پوشش گیاهی را دارد. در واقع الگوریتم BFAST تاریخ دقیق و حتی ماه دقیق وقوع تغییر را تعیین می‌کند و همچنین تغییرات تدریجی و ناگهانی را تشخیص می‌دهد؛ درحالی که دیگر الگوریتم‌ها فقط دو یا چند تصویر را مقایسه می‌کنند و همه تغییرات با هم دیده می‌شوند و تعیین زمان دقیق یا فصلی بودن تغییرات را نمی‌توانند تفکیک کنند و فقط مناطق کاهش یا افزایش یک کاربری را طبقه‌بندی می‌کنند. دو الگوریتم BFASTSpatial و BFASTMonitor به‌عنوان جایگزینی برای BFAST ایجاد شده‌اند و مزیت‌هایی دارند. اما این دو الگوریتم تفاوت‌هایی هم دارند. ورودی BFASTMonitor تک‌متغیره است و نمی‌تواند داده‌ها را در قالب رستر بپذیرد؛ یعنی روی یک پیکسل در زمان‌های مختلف انجام می‌گیرد؛ اما BFASTSpatial می‌تواند یک بلوک رستری را به‌عنوان ورودی بپذیرد؛ یعنی روی همه پیکسل‌های یک تصویر در زمان‌های مختلف انجام می‌گیرد. بنابراین در این تحقیق از الگوریتم BFASTSpatial استفاده شد. این مدل امکان نمایش تغییرات را به

توصیه شده است که طول دوره تاریخی پایدار دست‌کم دو سال باشد، به‌طوری که الگوریتم‌های BFAST توانایی برآزش صحیح شاخص‌های خود را داشته باشند (Verbesselt et al., 2012). در تحقیق حاضر نیز با آزمون و خطای فراوان، پنج سال ابتدایی دوره، به‌عنوان دوره مرجع در نظر گرفته شد.

نقشه بزرگی تغییرات جنگل‌های منطقه، هم تغییرات ناگهانی منفی و هم شکست‌های مثبت ناشی از افزایش ناگهانی در مقدار شاخص پوشش جنگلی را نشان می‌دهد. در این تحقیق، بزرگی تغییرات پیکسل‌ها که در واقع به‌نوعی بیانگر تمام تغییرات ممکن در منطقه است، از ۰/۵۸- تا ۰/۹۸+ است. این مقدار در پژوهش (Gholamnia et al., 2019) بین ۰/۱۴- و ۰/۱۲+ نشان داده شده است. نمودار حاصل از الگوریتم BFASTSpatial نشان‌دهنده یک نقطه شکست و افت ناگهانی در سال ۱۳۹۳ است. تغییرات عمده در روندها به‌عنوان نقاط شکست توسط آزمون‌های آماری شناسایی می‌شوند و تفاوت‌های بین NDVI مشاهده‌شده و مدل‌سازی‌شده با بزرگی نقاط شکست مطابقت دارد.

الگوریتم BFAST، الگوریتم مهمی برای تعیین شکست در تصاویر ماهواره‌ای سری زمانی است، اما اطلاعاتی درباره منبع اختلال نمی‌دهد. بنابراین تعیین اینکه شکستگی‌ها ناشی از جنگل‌زدایی است یا دیگر تغییرات انسانی یا فصلی، دشوار است (Verbesselt et al., 2012). بر این اساس، باید تحقیقات میدانی به‌منظور شناسایی علل تغییرات شناسایی‌شده و دستیابی به درکی صحیح در منطقه مدنظر انجام گیرد. حد آستانه، متغیری است که برای حذف اختلال‌های کاذب استفاده می‌شود (Gao et al., 2021)؛ بنابراین تعریف یک مقدار کارآمد برای آستانه ضروری است. حد آستانه در نظر گرفته‌شده در این تحقیق ۰/۲۵- است. در تحقیق Mashhadi & Alganci (2022) حد آستانه ۰/۰۵- در نظر گرفته

همراه تشخیص زمان تغییرات و مهم‌تر از آن، بزرگی آنها فراهم کرده است (Verbesselt et al., 2010). این ویژگی‌ها، BFASTSpatial را به روشی کارآمد برای تعیین ویژگی‌های ناگهانی تغییراتی مانند جنگل‌زدایی و تخریب جنگل تبدیل می‌کند.

شاخص NDVI که با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز (Lu et al., 2004) محاسبه می‌شود، مربوط به فعالیت فتوسنتزی پوشش گیاهی است و سبزی و بهره‌وری پوشش گیاهی را اندازه‌گیری می‌کند (Wu et al., 2020; Zhang & Wu, 2017). این شاخص از مزیت قوی بودن و قابلیت تفسیر آسان برخوردار است و در صورت استفاده در یک سری زمانی به تغییرات جنگل حساس است (DeVries et al., 2015; Chandra, 2011). تغییر در سیگنال‌های NDVI در سری زمانی ممکن است به‌دلیل تغییر در زیست‌توده، پوشش و ساختار پوشش گیاهی سبز باشد (Dutrieux et al., 2015; Gao et al., 2021). تغییرات ناگهانی منفی در روند NDVI شناسایی‌شده توسط BFAST برای نشان دادن تغییر رشد پوشش گیاهی پس از مختل شدن (شکست) استفاده می‌شود. سری زمانی NDVI می‌تواند برای تشخیص تغییرات در سلامت و رشد پوشش گیاهی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک (Measho et al., 2019; Liu et al., 2019; LeVine & Crews, 2019) و همچنین جنگل‌های پهن‌برگ (Mashhadi & Alganci, 2022) استفاده شود. بنابراین در این تحقیق نیز به‌دلیل شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، از شاخص NDVI استفاده شد که نتایج قابل اعتمادی را نشان داد.

مساحت جنگل‌های منطقه در ابتدای دوره (سال ۱۳۸۰) برابر ۱۲۷۳۳ هکتار (۳۹ درصد) است و نقشه اراضی جنگلی تخریب‌شده، نشان‌دهنده از بین رفتن ۵۸۹ هکتار (۴/۶ درصد) از اراضی جنگلی منطقه تا پایان دوره است. در تحقیق مسروری و همکاران (۱۳۹۴) در طول دوره بررسی که ۴۲ سال بود، حدود ۱۰ درصد از سطح جنگل‌های منطقه کاهش یافت.

شد. این مقدار در تحقیق (Gao et al. (2021) ۰/۲- بوده است.

به‌منظور ارزیابی کمی مدل BFASTSpatial تعیین مناطق تخریب‌شده، ۴۰۹ پیکسل با روش تصادفی انتخاب و برای هر پیکسل با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث سال‌های گذشته مشخص شد که آیا پیکسل تخریب‌شده درست تعیین شده است یا خیر. برای نقشه تخریب با حد آستانه ۰/۲۵- مدل BFASTSpatial نشان‌دهنده تغییر با صحت کاربر ۸۷/۱ درصد، صحت تولیدکننده ۸۵/۹ درصد و صحت کلی ۸۶ درصد است. در پژوهش (Wu et al. (2020) ۶۰۰ پیکسل برای ارزیابی صحت انتخاب شد. نتایج نشان داد که صحت کاربر ۸۴/۳ درصد، صحت تولیدکننده ۹۰/۷ درصد و صحت کلی ۸۷/۸ درصد است که نتایجی نزدیک به تحقیق حاضر داشته است. نتایج ارزیابی کمی نشان می‌دهد که مدل توانایی مناسبی در تعیین اراضی تخریب‌شده دارد؛ اما باید اذعان کرد که ارزیابی دقیق مناطق تخریب‌شده با استفاده از مدل BFASTSpatial بنابر دلایلی امکان‌پذیر نیست و محدودیت‌هایی را برای پژوهش ایجاد خواهد کرد. برای مثال برای همه ماه‌های سال، تصویر مدنظر در دسترس نیست و این سبب ایجاد گپ خواهد شد. همچنین مهم‌ترین منبع برای تأیید نتایج، استفاده از تصاویر با وضوح مکانی زیاد مانند تصاویر گوگل‌ارث است؛ اما تصاویر بسیار کمی از سال‌های تحت بررسی برای منطقه پژوهش در

دسترس بود. دلیل دیگر تراکم کمتر جنگل‌های بلوط غرب نسبت به جنگل‌های هیرکانی و در مواردی فاصله چند ده متری پایه‌های درختی از یکدیگر است. اگر یک یا دو درخت در یک پیکسل از بین برود، آیا آسیب به اندازه‌ای بزرگ خواهد بود که بر بازتاب طیفی پیکسل تأثیر چشمگیری بگذارد؟ با توجه به اینکه اندازه پیکسل تصاویر ماهواره لندست ۳۰ متری است. پاسخ به این پرسش آسان نخواهد بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم BFASTSpatial توانایی مناسبی در تعیین اراضی تخریب‌شده دارد و می‌توان آن را ابزاری برای نظارت بر محیط‌های جنگلی در نظر گرفت. هنگامی که نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ای با بررسی‌های میدانی دقیق و مجموعه داده‌های زمینی گسترده ارزیابی شوند، روش پیشنهادی ابزاری مفید و کاربردی برای مدیران به‌منظور نظارت بر وضعیت پوشش گیاهی و رفتار پوشش زمین، به‌ویژه در مناطقی با خطر خشکسالی و بیابان‌زایی خواهد بود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری دانشگاه گیلان می‌باشد. نویسندگان لازم می‌دانند مراتب قدردانی خود را از دانشگاه گیلان و مدیریت اداره منابع طبیعی شهرستان سروآباد اعلام کنند.

References

- Ajin, R.S., Loghin, A.M., Jacob, M.K., Vinod, P., & Krishnamurthy, R. (2016). The risk assessment study of potential forest fire in Idukki Wildlife Sanctuary using RS and GIS techniques. *International Journal of Advanced Earth Science and Engineering*, 5(1), 308-318. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijaese.201>
- Atzberger, C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949-981. <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Azizi, Gh., Miri, M., Mohammadi, H., & Pourhashemi, M. (2015). Analysis of relationship between forest decline and precipitation changes in Ilam Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23(3), 502-515. (In Persian). <https://doi.org/0.22092/IJFPR.2015.105655>

- Bueno, I.T., McDermid, G.J., Silveira, E.M.O., Hird, J.N., Domingos, B.I., & Acerbi Júnior, F.W. (2020). Spatial agreement among vegetation disturbance maps in tropical domains using Landsat time series. *Remote Sensing*, 12(18), 2948. <https://doi.org/10.3390/rs12182948>
- Chandra, J.P. (2011). Performance evaluation of vegetation indices using remotely sensed data. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1), 231–240.
- De Beurs, K.M., & Henebry, G.M. (2010). Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology. In: Hudson, I., Keatley, M. (eds) *Phenological Research*. (pp. 177-208). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2_9
- De Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M.E., & Dent, D.L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692-702. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>
- DeVries, B., Decuyper, M., Verbesselt, J., Zeileis, A., Herold, M., & Joseph, S. (2015). Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 169, 320–334. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.020>
- Dutrieux, L.P., Verbesselt, J., Kooistra, L., & Herold, M. (2015). Monitoring forest cover loss using multiple data streams, a case study of a tropical dry forest in Bolivia. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.015>
- Fensholt, R., Sandholt, I., & Rasmussen, M.S. (2004). Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4), 490–507. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.04.009>
- Gao, Y., Solórzano, J.V., Quevedo, A., & Loya-Carrillo, J.O. (2021). How BFAST trend and seasonal model components affect disturbance detection in tropical dry forest and temperate forest. *Remote Sensing*, 13(11), 2033. <https://doi.org/10.3390/rs13112033>
- Gholamnia, M., Khandan, R., Bonafoni, S., & Sadeghi, A. (2019). Spatiotemporal Analysis of MODIS NDVI in the Semi-Arid Region of Kurdistan (Iran). *Remote Sensing*, 11(14), 1723. <https://doi.org/10.3390/rs11141723>
- Harris, A., Carr, A.S., & Dash, J. (2014). Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28(1), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.014>
- Hashemi Dareh Badami, S., Nouraeisefat, I., Karimi, S., & Nazari, S. (2015). Development Trend Analysis of Urban Heat Island Regarding Land Use/Cover Changes Using Time Series of Landsat Images. *Journal of Rs and Gis for Natural Resources*, 6(3), 15-28. (In Persian).
- Hosseinzadeh, J., Namiranian, M., Mohajer, M.M., & Amiri, G.Z. (2004). Structure of less degraded oak forests in Illam Province (Southwest Iran). *Iranian Journal of Natural Resources*, 57(1), 75-90. (In Persian).
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of forestry research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Lambert, J., Denux, J.P., Verbesselt, J., Balent, G., & Cheret, V. (2015). Detecting clear-cuts and decreases in forest vitality using MODIS NDVI time series. *Remote Sensing*, 7(4), 3588–3612. <https://doi.org/10.3390/rs70403588>
- Lambert, J., Drenou, C., Denux, J.P., Balent, G., & Cheret, V. (2013). Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis. *GIScience & Remote Sensing*, 50(4), 437–457. <https://doi.org/10.1080/15481603.2013.820070>
- LeVine, D., & Crews, K. (2019). Time series harmonic regression analysis reveals seasonal vegetation productivity trends in semi-arid savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.007>

- Liu, S., Li, W., Qiao, W., Wang, Q., Hu, Y., & Wang, Z. (2019). Effect of natural conditions and mining activities on vegetation variations in arid and semiarid mining regions. *Ecological Indicators*, 103, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.034>
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- Lu, M., Pebesma, E., Sanchez, A., & Verbesselt, J. (2016). Spatio-temporal change detection from multidimensional arrays: Detecting deforestation from MODIS time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.007>
- Mashhadi, N., & Alganci, U. (2022). Evaluating BFASTMonitor Algorithm in Monitoring Deforestation Dynamics in Coniferous and Deciduous Forests with LANDSAT Time Series: A Case Study on Marmara Region, Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(11), 573. <https://doi.org/10.3390/ijgi11110573>
- Measho, S., Chen, B., Trisurat, Y., Pellikka, P., Guo, L., Arunyawat, S., Tuankruea, V., Ogbazghi, W., & Yemane, T. (2019). Spatio-Temporal Analysis of Vegetation Dynamics as a Response to Climate Variability and Drought Patterns in the Semiarid Region, Eritrea. *Remote Sensing*, 11(6), 724. <https://doi.org/10.3390/rs11060724>
- Mirahsani, M., Salman Mahiny, A., Soffianian, A., Moddares, R., Jafari, R., & Mohammadi, J. (2018). Evaluation of Vegetation Supply Water Index through Time-Series Images of MODIS Products in Drought Monitoring over Gavkhuni Basin. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 6(4), 31-47. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/ijae.6.4.31>
- Mirmosavei, S., & kareimeh, H. (2013). Effect of Drought on Vegetation Cover Using MODIS Sensing Images Case: Kurdistan Province. *Geography and Development*, 11(31), 57-76. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2013.794>
- Mohammadi Sarvaleh, F., Pir bavaghar, M., & Shabanian, N. (2013). Application of artificial neural network for forest fire risk mapping based on physiographic, human and climate factors in Sarvabad, Kurdistan province. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 11(2), 97-107. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2014.8431>
- Potter, C. (2019). Changes in vegetation cover of Yellowstone National Park estimated from MODIS greenness trends, 2000 to 2018. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2, 147–160. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00019-5>
- Pourhashemi, M., & Sadeghi, S.M.M. (2020). A Review on Ecological Causes of Oak Decline Phenomenon in Forests of Iran. *Ecology of Iranian Forest*, 8(16), 148-164. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/ifej.8.16.148>
- Rodriguez, P.S., Schwantes, A.M., Gonzalez, A., & Fortin, M.J. (2024). Monitoring changes in the enhanced vegetation index to inform the management of forests. *Remote Sensing*, 16(16), 2919. <https://doi.org/10.3390/rs16162919>
- Schmidt, M., Lucas, R., Bunting, P., Verbesselt, J., & Armston, J. (2015). Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 158, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.015>
- Shiravand, H., Khaledi, S., Behzadi, S., & sanjabi, H.A. (2020). Monitoring and Assessing the Changes in the Coverage and Decline of Oak Forests in Lorestan Province using Satellite Images and BFAST Model. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 20(57), 265-280. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jgs.20.57.265>
- Smith, V., Portillo-Quintero, C., Sanchez-Azofeifa, A., & Hernandez-Stefanoni, J.L. (2019). Assessing the accuracy of detected breaks in Landsat time series as predictors of small-scale deforestation in tropical dry forests of Mexico and Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 221, 707–721. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.020>

Vafaei, S., Darvishsefat, A.A., & Pir Bavaghar, M. (2013). Monitoring and predicting land use changes using LCM module (Case study: Marivan region). *Iranian Journal of Forest*, 5(3), 323-336. (In Persian).

Vasios, G.K., Alexoudaki, E., Kaloveloni, A., & Troumbis, A.Y. (2025). Landsat Time Series Analysis with BFAST for Detecting Degradation of Thyme Shrublands by Fire on Lemnos Island. *Fire*, 8(8), 335. <https://doi.org/10.3390/fire8080335>

Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014>

Verbesselt, J., Zeileis, A., & Herold, M. (2012). Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 123, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>

Vu, Q.M., Le, Q.B., Frossard, E., & Vlek, P.L.G. (2014). Socio-economic and biophysical determinants of land degradation in Vietnam: An integrated causal analysis at the national level. *Land Use Policy*, 36, 605-617. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.012>

Watts, L.M., & Laffan, S.W. (2014). Effectiveness of the BFAST algorithm for detecting vegetation response patterns in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 154, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.023>

Wu, L., Li, Zh., Liu, X., Zhu, L., Tang, Y., Zhang, B., Xu, B., Liu, M., Meng, Y., & Liu, B. (2020). Multi-type forest change detection using BFAST and monthly Landsat time series for monitoring spatiotemporal dynamics of forests in subtropical wetland. *Remote Sensing*, 12(2), 341. <https://doi.org/10.3390/rs12020341>

Zand, M., Miri, M., Razie, T., & Norouzi, A.A. (2021). Investigating the effects of meteorological drought on canopy level dieback of oak forests of Lorestan Province, western Iran. *Journal of Climate Research*, 12(46), 1-12. (In Persian).

Zhang, L., & Wu, C. (2017). Advance and future development of change detection for multi-temporal remote sensing imagery. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10), 1447–1459. (In Chinese). <https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170340>

Zhao, Q., & Qu, Y. (2024). The retrieval of ground ndvi (normalized difference vegetation index) data consistent with remote-sensing observations. *Remote Sensing*, 16(7), 1212. <https://doi.org/10.3390/rs16071212>



S. Rasooli^{1,2*}, A. Eslam Bonyad², and S. Vafaei³

¹Ph.D. candidate., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I. R. Iran

²Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, I.R. Iran

³Remote Sensing Specialist, Forestry and Utilization Office, Natural Resources and Watershed Management of Iran organization, Tehran, I. R. Iran

(Received: 29 September 2025; Accepted: 5 January 2026)

Abstract

Introduction: Zagros forests are among the most important forest ecosystems in the country in terms of ecology and economy, which unfortunately have always been affected by destructive factors and land use changes. One of the appropriate solutions to determine the extent and trend of these changes is to use satellite data time series and the BFSAST model, because this model can simultaneously separate the trend of long-term, seasonal, and sudden changes. The capabilities of this algorithm in studying the country's ecosystems, especially the Zagros forests, have rarely been used and reported. Therefore, the purpose of this research is to use the BFSAST algorithm to monitor and evaluate changes in a part of the Zagros oak forests in Sarvabad County.

Material and Methods: In this study, the dynamics of vegetation cover in a part of the forests of Sarvabad County in Kurdistan Province, as an example of the Zagros forests, was studied and analyzed from 2001 to 2020 (20 years). Using time series analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of Landsat 5, 7, and 8 images and the BFSAST algorithm, changes in the vegetation of the region were examined. First, using the maximum likelihood classification, the forest class was separated from other land uses in the region on the September 2001 image. Then, the historical period and the threshold was determined. After that, the NDVI index of the forest class was separated from other classes of the 20-year time series. Finally, the time series stack of the forest class NDVI index was used for subsequent analyses. A total of 174 Landsat satellite images from different sensors were processed. To evaluate the accuracy of the BFSASTspatial model in detecting disturbance and destruction of forest areas, 409 points were randomly selected.

Results: In this study, through trial and error, the first 5 years of the research period were considered as the historical period. The BFSASTspatial algorithm chart shows a breakpoint and sudden drop in 2014. The change detection also showed that 589 hectares (4.6 percentage) of the region's forest area was lost during the study period. For the degraded forest land map with the threshold of -0.025, the BFSASTspatial model shows the change with the user's accuracy of 87.1 percent, the producer's accuracy of 85.9 percent, and the overall accuracy of 86 percent.

Conclusion: The results show that the BFSASTspatial model, using time series analysis and determining the degraded pixels of oak forests in the study area with an accuracy of over 85 percentage, has a good ability to determine the geographical boundaries of degraded lands and can be considered as a tool in monitoring forest environments.

Keywords: Landsat, Threshold, Historical period, time series, Zagros.