



ماهواره‌های ابرطیفی؛ راهکاری برای بهبود پایش خشکیدگی جنگل‌های زاگرس

فردین مرادی^{۱*}، حبیب کریمی پور^۲، علی سروآزاد^۳

- ۱- محقق، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران. رایانامه: fardin.moradi@areo.ac.ir | کد ارکید: 0000-0003-0036-0033
- ۲- محقق، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سمنان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران
- ۳- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸

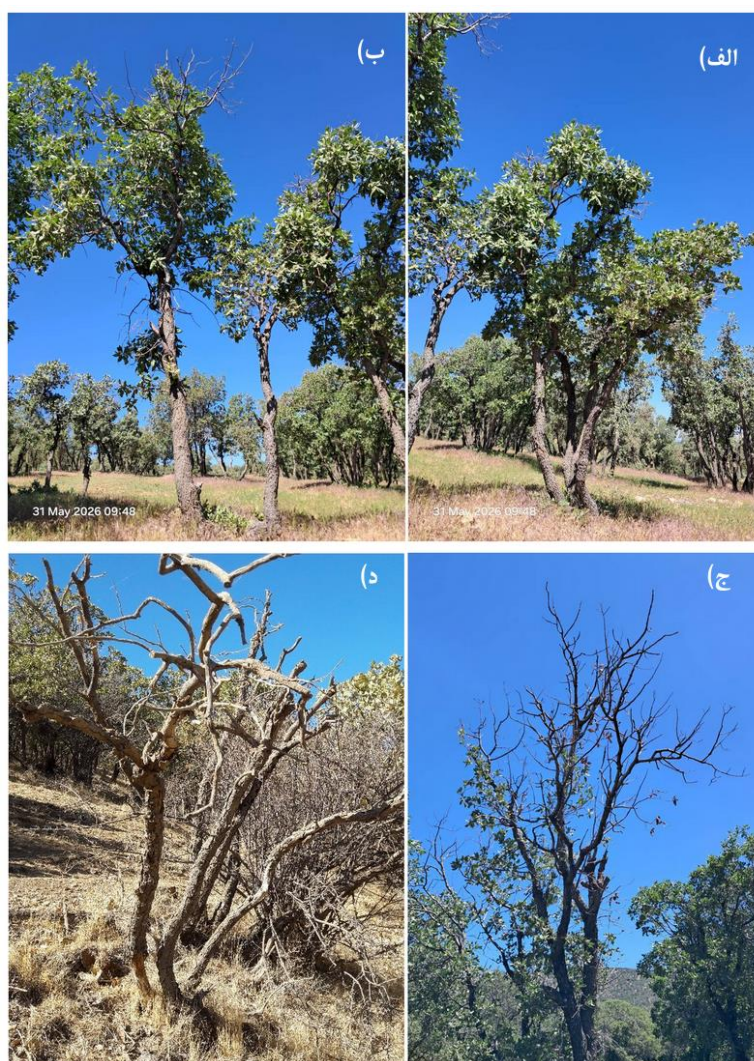
چکیده

پدیده خشکیدگی در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های منابع طبیعی کشور، به‌ویژه اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس تبدیل شده است. تشدید خشکسالی، تغییرات اقلیمی و نبود پایش مستمر موجب شده است که خسارت‌های واردشده به درختان، زمانی شناسایی شوند که روند زوال آن‌ها به مراحل پیشرفته رسیده است. در بسیاری از موارد، روش‌های متداول پایش زمینی و تصاویر ماهواره‌ای رایج توانایی کافی برای تشخیص تنش‌های اولیه درختان را ندارند. در این بررسی، عملکرد داده‌های ابرطیفی به‌عنوان یک ابزار نوین برای پایش سلامت جنگل در مقایسه با داده‌های چندطیفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص‌های استخراج‌شده از داده‌های ابرطیفی ماهواره‌ای، به‌ویژه شاخص بازتاب فتوشیمیایی (PRI) و شاخص‌های مرتبط با ناحیه Red Edge، نسبت به داده‌های چندطیفی، حساسیت بیشتری به تغییرات محتوای آب برگ، میزان کلروفیل و فعالیت فتوسنتز درختان دارند. با این حال، کاربرد داده‌های ماهواره‌ای ابرطیفی در جنگل‌های زاگرس با محدودیت‌هایی همراه است؛ زیرا توان تفکیک مکانی نسبتاً پایین این داده‌ها، در جنگل‌های با تاج‌پوشش پراکنده، می‌تواند موجب آمیختگی طیفی و در نتیجه کاهش دقت پایش شود. بنابراین، تعمیم نتایج مطالعات انجام‌شده در جنگل‌های متراکم به اکوسیستم زاگرس، مستلزم اعتبارسنجی محلی و به‌کارگیری روش‌های ارتقای توان تفکیک مکانی داده‌های ابرطیفی است. با توجه به دسترسی رایگان به داده‌های PRISMA و EnMAP، توسعه مطالعات اعتبارسنجی متناسب با شرایط زاگرس می‌تواند زمینه را برای پایش دقیق‌تر سلامت این جنگل‌ها فراهم کند. بر این اساس، ایجاد سامانه پایش مستمر سلامت جنگل‌های زاگرس مبتنی بر داده‌های ابرطیفی، بومی‌سازی روش‌های تحلیل طیفی متناسب با شرایط زاگرس و ایجاد بانک اطلاعاتی یکپارچه، از مهم‌ترین اقدامات پیشنهادی هستند.

واژه‌های کلیدی: تنش گیاهی، سلامت جنگل، شاخص بازتاب فتوشیمیایی، زوال بلوط.

بیان مسئله

جنگل‌های زاگرس با وسعتی بیش از شش میلیون هکتار حدود ۴۴ درصد از جنگل‌های ایران را شامل می‌شوند (Sagheb Talebi *et al.*, 2014). این جنگل‌ها با دریافت حدود ۳۳ درصد بارندگی سالیانه کشور، نقش مهمی در تأمین منابع آب، حفاظت خاک، حفظ تنوع زیستی و پایداری زیست‌محیطی کشور دارند و سرچشمه بخش قابل‌توجهی از رودخانه‌های ایران به‌شمار می‌روند (جزیره‌ای و ابراهیمی رستاقی، ۱۳۸۲). با این حال، در دهه‌های اخیر پدیده زوال و خشکیدگی جنگل به یکی از مهم‌ترین تهدیدهای این اکوسیستم ارزشمند تبدیل شده است. افزایش دما، تداوم خشکسالی و تغییرات اقلیمی موجب شده است که روند زوال جنگل‌ها در بسیاری از مناطق جهان، از جمله جنگل‌های زاگرس شدت بیشتری پیدا کند (Allen *et al.*, 2010). خشکیدگی یا زوال که با کاهش تاج‌پوشش و افت سلامت درختان همراه است، پیامدهای بلندمدتی برای ساختار و عملکرد این اکوسیستم‌ها به‌دنبال دارد (شکل ۱).



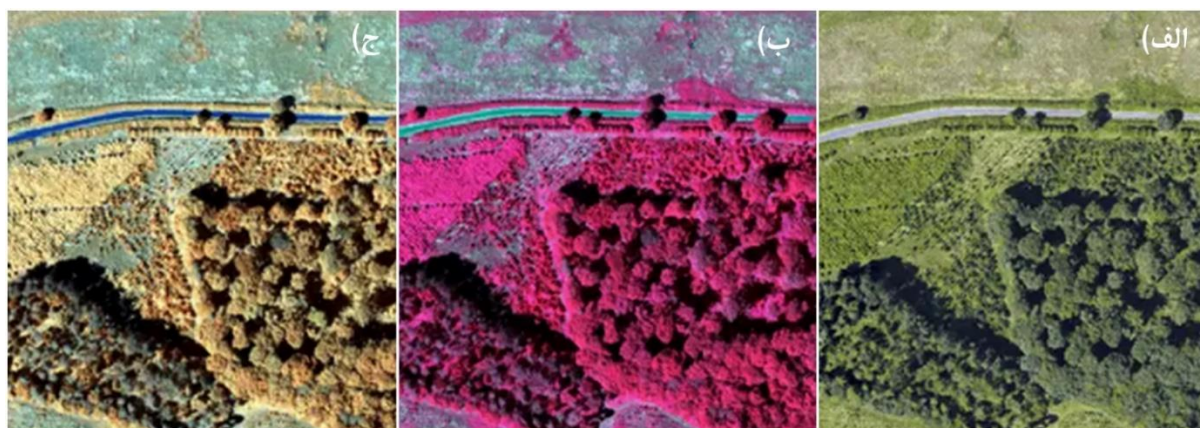
شکل ۱- مراحل خشکیدگی درختان: الف) بدون خشکیدگی، ب) خشکیدگی کم، ج) خشکیدگی زیاد و د) خشکیدگی کامل (عکس از فردین مرادی)

پایداری جنگل‌های زاگرس به شدت در معرض تهدید قرار دارد و پدیده خشکیدگی خسارت‌های گسترده‌ای به این جنگل‌ها وارد کرده است (پورهاشمی و صادقی، ۱۳۹۹). این فرایند تدریجی است و با تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی درختان آغاز می‌شود. کاهش محتوای آب برگ، تخریب کلروفیل، اختلال در فرایند فتوسنتز و تغییر ترکیب‌های شیمیایی گیاه، از نخستین نشانه‌های تنش در درختان به‌شمار می‌روند. با این حال، این تغییرات در مراحل اولیه معمولاً با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیستند و اغلب زمانی آشکار می‌شوند که بخشی از تاج‌پوشش دچار زردشدگی، کاهش تراکم یا خشکیدگی شده است. در نتیجه، فرصت مداخله مدیریتی کاهش می‌یابد و احتمال گسترش خسارت در توده‌های جنگلی افزایش پیدا می‌کند.

در سال‌های گذشته، کمبود اطلاعات دقیق و به‌روز یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس بوده است. بخش قابل‌توجهی از اطلاعات موجود، به‌دلیل گسستگی داده‌ها، تغییرات سریع کاربری اراضی و تشدید فرایند تخریب، از دقت و انسجام کافی برخوردار نیست و همین موضوع، تصمیم‌گیری مدیریتی را با دشواری مواجه کرده است (هناره خلیانی و همکاران، ۱۴۰۱). در چنین شرایطی، استفاده از فناوری‌های نوین پایش می‌تواند نقش مهمی در بهبود مدیریت و حفاظت از جنگل‌ها ایفا کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که سنجش از دور یکی از کارآمدترین ابزارها برای پایش و آماربرداری جنگل است (Mngadi *et al.*, 2024). این فناوری، در مقایسه با روش‌های متداول پایش زمینی، امکان پایش مناطق وسیع، پایش مستمر، کاهش هزینه‌ها و تولید اطلاعات دقیق و قابل‌اعتماد را فراهم می‌کند. با این حال، بیشتر مطالعات جنگل‌شناسی تاکنون بر داده‌های چندطیفی متکی بوده‌اند. سنجنده‌های چندطیفی، به‌دلیل تعداد محدود باندها و پهنای نسبتاً زیاد هر باند، توانایی محدودی در شناسایی تغییرات ظریف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پوشش گیاهی دارند. در فرایند خشکیدگی، تغییرات محتوای آب برگ، رنگدانه‌ها و ساختار داخلی برگ، موجب تغییر پاسخ طیفی گیاه در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی می‌شود؛ اما بسیاری از این تغییرات در داده‌های چندطیفی به‌خوبی قابل تفکیک نیستند. از این‌رو، استفاده از داده‌های ابرطیفی، به‌عنوان نسل پیشرفته داده‌های سنجش از دور، در سال‌های اخیر توجه گسترده پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی را به خود جلب کرده است.

دستاوردها

به‌منظور بررسی ظرفیت داده‌های ابرطیفی ماهواره‌ای در پایش سلامت جنگل، جستجوی هدفمندی در پایگاه‌های اطلاعاتی اسکوپوس (Scopus)، وب آو ساینس (Web of Science) و همچنین موتور جستجوی گوگل اسکالر (Google Scholar) انجام شد. در این جستجو از کلیدواژه‌هایی مانند جنگل (Forest)، خشکیدگی (Decline)، سلامت جنگل (Forest Health) و ابرطیفی (Hyperspectral) و عبارات مشابه آن‌ها استفاده شد. پس از حذف مقالات تکراری و غیرمرتبط، ۱۴ مقاله پژوهشی مرتبط انتخاب شد که بیشتر آن‌ها در خارج از کشور انجام شده بودند. همچنین، مطالعات مبتنی بر داده‌های هوابرد (پهپاد و هواپیما)، به‌دلیل تفاوت در مقیاس و محدودیت در تعمیم نتایج به کاربردهای عملیاتی، از این بررسی کنار گذاشته شدند. مطالعات مرور شده نشان داد که داده‌های ابرطیفی، در مقایسه با داده‌های چندطیفی، از توانایی بیشتری در ارزیابی وضعیت فیزیولوژیکی درختان برخوردارند. این برتری، در درجه نخست، ناشی از وجود باندهای طیفی پیوسته و باریک است که امکان آشکارسازی دقیق‌تر تغییرات بیوشیمیایی گیاه را فراهم می‌کنند. شکل ۲ تفاوت ویژگی‌های تصویربرداری در سه حالت طیف مرئی (آبی، سبز و قرمز)، چندطیفی و ابرطیفی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تفاوت تصویربرداری در حالت‌های مختلف؛ (الف) تصویربرداری RGB، (ب) تصویربرداری چندطیفی، (ج)

تصویربرداری ابرطیفی (2ExcelGeo: <https://www.2excelgeo.com>)

Asner و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از سنجنده Hyperion نشان دادند که شاخص‌های به‌دست آمده از داده‌های ابرطیفی نظیر PRI و SWAM حساسیت بالایی به تغییرات فیزیولوژیک ناشی از تنش خشکی، از جمله تغییرات کارایی استفاده از نور و محتوای آب تاج‌پوشش نشان دادند؛ در حالی که شاخص‌های چندطیفی متداول مانند NDVI و SR قادر به آشکارسازی مناسب این تغییرات نبودند. Peña و Altmann (۲۰۰۹) در بررسی جنگل *Austrocedrus chilensis* در شیلی ثابت کردند که دو شاخص بازتاب آنتوسیانین (ARI) و شاخص بازتاب فتوشیمیایی (PRI) استخراج از تصویر Hyperion قوی‌ترین همبستگی را با درصد کلروز و نکروز تاج‌پوشش داشتند، در حالی که شاخص‌های داده‌های چندطیفی همبستگی ضعیفی نشان دادند. این یافته با نتایج Kureel و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد که در ارزیابی سلامت جنگل لونار (هند) نشان دادند هر شاخص پوشش گیاهی بسته به شرایط محیطی، ترکیب گونه‌ای و نوع برگ، عملکرد متفاوتی دارد و کارایی آن‌ها در داده‌های ابرطیفی به‌مراتب بهتر است. بر اساس نتایج مطالعه Marques و همکاران (۲۰۲۴) نیز شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از داده‌های ابرطیفی نسبت به داده‌های چندطیفی توان بالاتری در آشکارسازی پاسخ‌های فیزیولوژیک اولیه جنگل به اختلالات نشان دادند. در این پژوهش، شاخص PSRI حاصل از Hyperion حساس‌ترین متغیر به تغییرات ناشی از آتش‌سوزی و تنش‌های اکوسیستمی بود و افزایش قابل‌توجهی در جنگل‌های دچار اختلال نسبت به شاهد نشان داد، که بیانگر توان بالای ابرطیفی در ثبت تغییرات ظریف مرتبط با پیری برگ و تغییرات رنگدانه‌ای است. اگرچه شاخص‌های مبتنی بر لندست مانند GRND نیز قادر به شناسایی اثرات اختلال بودند، اما به دلیل محدودیت‌های ذاتی داده‌های چندطیفی از جمله تعداد محدود باندها، پهنای طیفی وسیع‌تر و عدم پوشش پیوسته نواحی کلیدی مانند Red-Edge و بخش‌های حساس در محدوده مرئی و مادون‌قرمز نزدیک، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات فیزیولوژیک اولیه نشان دادند. مجموع این شواهد نشان می‌دهد که پهنای باند محدود و تعداد کم باندهای سنجنده‌های چندطیفی، توانایی آن‌ها را برای تمایز بین تغییرات ظریف فیزیولوژیک پوشش گیاهی محدود می‌سازد، در حالی که طیف‌نگاری پیوسته ابرطیفی امکان محاسبه شاخص‌های اختصاصی برای هر رنگیزه، آب برگ و فعالیت فتوسنتزی را به‌صورت جداگانه فراهم می‌کند.

با وجود تایید توانمندی داده‌های ابرطیفی، یکی از پرسش‌های کلیدی در پایش سلامت جنگل آن است که آیا این داده‌ها قادر به شناسایی تنش‌های گیاهی در مراحل اولیه، پیش از بروز نشانه‌های قابل مشاهده مانند زردی برگ‌ها و کاهش تراکم تاج‌پوشش هستند یا خیر. Dotzler و همکاران (۲۰۱۵) که مدعی شناسایی زود هنگام تنش‌ها در پژوهش خود شده بودند نشان دادند که داده‌های EnMAP توانایی نمایش الگوهای تنش فتوشیمیایی اولیه را دارند اما به دلیل تفکیک مکانی ۳۰ متری و اثر اختلاط

تاج، قدرت تفکیک و حساسیت آن نسبت به داده‌های ابرطیفی هواپرد کاهش یافته و آشکارسازی زودهنگام در مقیاس ریز به‌صورت کامل و دقیق قابل تضمین نیست. این چالش در جنگل‌های زاگرس که دارای شرایط خاص خود هستند به‌مراتب شدیدتر خواهد بود.

جنگل‌های زاگرس از نظر ساختاری تفاوت بنیادی با جنگل‌هایی دارند که بیشتر مطالعات مرور شده در آن‌ها انجام شده است. برخلاف جنگل‌های انبوه اروپایی (مانند جنگل‌های راش و بلوط آلمان در مطالعه Dotzler و همکاران (۲۰۱۵) یا جنگل‌های استوایی آمازون در مطالعه Anser و همکاران (۲۰۰۴)، جنگل‌های بلوط زاگرس دارای تاج‌پوشش باز و پراکنده هستند که در آن فاصله میان درختان و سطح خاک لخت یا پوشش علفی زیراشکوب سهم قابل‌توجهی از بازتاب طیفی هر پیکسل را تشکیل می‌دهند. در این شرایط، پیکسل‌های ۳۰ متری ماهواره‌هایی مانند EnMAP و PRISMA ترکیبی از طیف تاج درخت، خاک لخت و پوشش کف زمین را در خود جای می‌دهند که پدیده آمیختگی طیفی را به یک چالش اساسی تبدیل می‌کند. Bascietto و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه کاربرد PRISMA در جنگل کاج شهری رم که ساختاری نسبتاً باز داشت، بیان داشتند که اندازه بزرگ پیکسل‌های تصاویر PRISMA منجر به اثر لبه (Edge Effect) شده و ناچار شدند مناطق حاشیه‌ای پوشش جنگلی را از تحلیل حذف کنند. Xie و همکاران (۲۰۲۵) نیز در پایش ترکیبات فنولیک جنگل‌های آمیخته معتدل اروپا نشان دادند که گذار از مقیاس تاج‌پوشش به مقیاس منظره در داده‌های PRISMA منجر به کاهش دقت مدل‌سازی می‌شود، که این به اثر آمیختگی طیفی ناشی از ناهمگنی مکانی زیاد مرتبط است. این چالش در زاگرس به مراتب حادتر است؛ زیرا علاوه بر پراکندگی ذاتی تاج‌پوشش، ناهموازی‌های توپوگرافیک شدید موجب تغییرات زیادی در بازتاب ناشی از سایه تپه‌ها و دامنه‌های مختلف می‌شود که تصحیح اتمسفری و توپوگرافیک را در این مناطق کوهستانی پیچیده‌تر می‌سازد. همچنین تفسیر تغییرات PRI در پیکسل‌های آمیخته‌ای که بخشی از آن‌ها خاک لخت یا علف است ممکن است سیگنال تنش درختان را تضعیف کند و دقت تشخیص تنش‌های اولیه را کاهش دهد. بنابراین، انتقال مستقیم نتایج مطالعات جنگل‌های انبوه به اکوسیستم زاگرس بدون اعتبارسنجی میدانی، از نظر علمی قابل دفاع نیست.

برای افزایش توان تفکیک مکانی داده‌های ابرطیفی، یکی از رویکردهای کارآمد، ادغام این داده‌ها با سنجنده‌هایی است که از تفکیک مکانی بالاتری برخوردارند (Garzelli et al., 2023; Alparone et al., 2023). در این روش باندهای ماهواره‌های ابرطیفی (مانند PRISMA) با باند پانکروماتیک خود ماهواره یا داده‌های Sentinel-2 با اندازه تفکیک مکانی ۱۰ متری تلفیق می‌شوند. این روش می‌تواند رزولوشن مکانی داده‌های ابرطیفی را تا حد قابل توجهی بهبود دهد، هرچند کارایی آن در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک با تاج‌پوشش پراکنده نیازمند اعتبارسنجی مستقل است. در کنار تلفیق سنجنده‌ها، استفاده از الگوریتم‌های جداسازی رویکرد دیگری است که برای اکوسیستم‌های پراکنده توصیه می‌شود.

کاربردهای مدیریتی داده‌های ابرطیفی در جنگل‌های زاگرس

با توجه به نتایج حاصل از بررسی مطالعات موجود، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های داده‌های ماهواره‌ای به ویژه داده‌های ابرطیفی، قابلیت تبدیل اطلاعات طیفی به خروجی‌های عملیاتی برای مدیریت جنگل است. در جنگل‌های زاگرس که با محدودیت دسترسی زمینی، پراکندگی رویشگاه‌ها و گستردگی مناطق صعب‌العبور مواجه هستند، این قابلیت می‌تواند نقش مهمی در بهبود فرآیند تصمیم‌گیری ایفا کند. در سطح اجرایی، مهم‌ترین کاربرد این فناوری، شناسایی و تفکیک مناطق در معرض تنش است. این موضوع امکان تمرکز اقدامات حفاظتی و میدانی را بر روی لکه‌های خشکیدگی فراهم می‌کند و از گسترش خسارت به سایر بخش‌های جنگل جلوگیری می‌نماید. در نتیجه، مدیریت منابع محدود انسانی و مالی به‌صورت هدفمندتر انجام خواهد شد. از سوی دیگر، خروجی‌های حاصل از تحلیل داده‌های ابرطیفی می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی باشد. به این معنا

که به‌جای پایش یکنواخت کل عرصه، مناطق با احتمال بالاتر آسیب‌دیدگی در اولویت پایش زمینی و اقدامات احیایی قرار می‌گیرند. این رویکرد به‌ویژه در پهنه‌های وسیع زاگرس که پایش کامل میدانی آن‌ها عملاً دشوار است، اهمیت بسیار حائز اهمیت است. همچنین ترکیب داده‌های ابرطیفی با داده‌های پهپاد، چندطیفی و مدل‌های تحلیلی مبتنی بر یادگیری ماشین، امکان تولید نقشه‌های عملیاتی از شدت و پراکنش خشکیدگی را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که هزینه بالای برخی داده‌های تجاری، نیاز به پردازش‌های تخصصی و محدودیت دسترسی به برخی خدمات پردازشی، توسعه این فناوری را در مطالعات جنگلی کشور با چالش مواجه کرده است. با این حال، دسترسی به داده‌های رایگان ماهواره‌های ابرطیفی مانند PRISMA و EnMAP فرصت ارزشمندی را برای توسعه پژوهش‌های کاربردی و حرکت به‌سوی پایش عملیاتی سلامت جنگل‌های زاگرس فراهم کرده است.

جمع‌بندی و توصیه‌های ترویجی

با وجود مشکلاتی مانند پیچیدگی پردازش داده‌ها، قدرت تفکیک مکانی محدود داده‌های ابرطیفی رایگان، به‌ویژه در مناطق با ساختار ناهمگن و همچنین نیاز به نیروی انسانی متخصص، توسعه زیرساخت‌های فنی و تقویت همکاری میان مراکز پژوهشی و اجرایی می‌تواند زمینه بهره‌گیری مؤثر از فناوری ابرطیفی را فراهم سازد. استفاده از این داده‌ها ظرفیت قابل توجهی برای بهبود پایش، حفاظت، احیا و مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس دارد. بر این اساس، مهم‌ترین توصیه‌های ترویجی این بررسی مروری عبارت‌اند از:

توصیه‌های کوتاه‌مدت

- استفاده از داده‌های رایگان ماهواره‌های ابرطیفی مانند PRISMA و EnMAP در پایش سلامت جنگل‌های زاگرس.
- تقویت شبکه قطعات نمونه و پایش زمینی به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای.
- برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های تخصصی برای کارشناسان در زمینه پردازش و تفسیر داده‌های ابرطیفی.
- استفاده تلفیقی از داده‌های ابرطیفی، تصاویر پهپاد و چندطیفی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر.
- به‌کارگیری روش‌های تلفیق تصاویر و الگوریتم‌های جداسازی طیفی برای کاهش اثر آمیختگی طیفی در مناطق با تاج‌پوشش پراکنده.

توصیه‌های میان‌مدت

- ایجاد سامانه یکپارچه پایش سلامت جنگل‌های زاگرس مبتنی بر داده‌های زمینی و سنجش از دور.
- توسعه مدل‌ها و شاخص‌های بومی آشکارسازی تنش و خشکیدگی متناسب با شرایط اکولوژیک جنگل‌های زاگرس.
- ایجاد بانک اطلاعاتی ملی سلامت جنگل‌های زاگرس به‌عنوان مرجع تصمیم‌گیری مدیریتی و پژوهشی.
- توسعه سامانه‌های هشدار خشکیدگی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات اقلیمی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی.

فهرست منابع

- پورهایمی، م. و صادقی، س.م.م.، ۱۳۹۹. مروری بر علل بوم شناختی پدیده زوال بلوط در جنگل‌های ایران. بوم‌شناسی جنگل‌های ایران: ۸(۱۶): ۱۴۸-۱۶۴.
- جزیره‌ای، م.ج. و ابراهیمی رستاقی، م.، ۱۳۸۲. جنگل‌شناسی زاگرس. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۵۶۰ صفحه.
- هناره خلیانی، ج.، احمدی ثانی، ن. و رشیدی، ف.، ۱۴۰۱. تهیه نقشه سطح و تراکم تاج پوشش جنگل‌های زاگرس شمالی با کاربرد تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در استان آذربایجان غربی، ایران. مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدیدشونده: ۳(۱۱): ۵۱-۶۵.

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., ...and Gonzalez., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4): 660-684.
- Alparone, L., Arienzo, A. and Garzelli, A., 2024. Spatial resolution enhancement of satellite hyperspectral data via nested hypersharpening with Sentinel-2 multispectral data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17(17): 10956-10966.
- Asner, G.P., Nepstad, D., Cardinot, G. and Ray, D., 2004. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(16): 6039-6044.
- Bascietto, M., Chirici, G., Mastrogregori, E., Oreti, L., Palma, A., ...and Bertin, S., 2025. Detecting Symptoms and Dispersal of Pine Tortoise Scale Pest in an Urban Forest by Remote Sensing. *Land*, 14(3): 630.
- Dotzler, S., Hill, J., Buddenbaum, H. and Stoffels, J., 2015. The potential of EnMAP and Sentinel-2 data for detecting drought stress phenomena in deciduous forest communities. *Remote Sensing*, 7(10): 14227-14258.
- Garzelli, A., Zoppetti, C., Arienzo, A., and Alparone, L., 2023, July. Spatial resolution enhancement of PRISMA hyperspectral data via nested hypersharpening with Sentinel-2 multispectral data. In *IGARSS 2023-2023 IEEE international geoscience and remote sensing symposium (5997-6000)*. IEEE.
- Kureel, N., Sarup, J., Matin, S., Goswami, S., and Kureel, K., 2022. Modelling vegetation health and stress using hypersepctral remote sensing data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1): 733-748.
- Marques, E.Q., Silvério, D.V., Galvão, L.S., Aragão, L.E., Uribe, M.R., ... and Brando, P.M., 2024. Assessing the effectiveness of vegetation indices in detecting forest disturbances in the southeast Amazon. *Scientific Reports*, 14(1): 27287.
- Mngadi, M., Germishuizen, I., Mutanga, O., Naicker, R., Maes, ... and Schroder, M., 2024. A systematic review of the application of remote sensing technologies in mapping forest insect pests and diseases at a tree-level. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, (1)36:101341.
- Pena, M.A., and Altmann, S.H., 2009. Use of satellite-derived hyperspectral indices to identify stress symptoms in an *Austrocedrus chilensis* forest infested by the aphid *Cinara cupressi*. *International Journal of Pest Management*, 55(3):197-206.
- Sagheb Talebi, K., Sajedi, T., and Pourhashemi, M., 2014. Forests of Iran. A treasure from the past, a hope for the future, 10p.
- Xie, R., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., van der Meer, F., ... and Heurich, M., 2025. Mapping canopy phenolics in European mixed temperate forests using air-and space-borne imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 331: 115020.



Hyperspectral satellites: An approach improving monitoring of Iran's Zagros forest dieback

Fardin Moradi^{1*}, Habib Karimipour², Ali Sarvazad³

1* - Department of Forest and Rangeland Research, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. ORCID ID: Email: fardin.moradi.tat@gmail.com | ORCID ID: 0000-0003-0036-0033

2- Department of Watershed Management, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Semnan, Iran

3- Department of Forest and Rangeland Research, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran

Received: 6/May/2026 Revised: 2/June/2026 Accepted: 4/June/2026

Abstract

Forest decline has emerged in recent years as one of the most critical challenges facing Iran's natural resources, particularly the Zagros forest ecosystems. Intensifying drought, climate change, and the lack of continuous monitoring have resulted in tree damage often being detected only after the decline process has reached advanced stages. In many cases, conventional field-based monitoring methods and commonly used multispectral satellite imagery are insufficient for detecting early signs of tree stress. This review evaluated the performance of hyperspectral data as an emerging tool for forest health monitoring in comparison with multispectral data. The findings indicated that indices derived from satellite-based hyperspectral data, particularly the Photochemical Reflectance Index (PRI) and Red Edge-related indices, are more sensitive than multispectral data to variations in leaf water content, chlorophyll concentration, and photosynthetic activity. Nevertheless, the application of satellite hyperspectral data in the Zagros forests is associated with certain limitations, as their relatively coarse spatial resolution may lead to spectral mixing in open-canopy forests, thereby reducing monitoring accuracy. Consequently, transferring findings from studies conducted in dense forests to the Zagros ecosystem requires local validation and the implementation of spatial resolution enhancement techniques for hyperspectral data. Given the free availability of PRISMA and EnMAP datasets, developing validation studies tailored to the ecological conditions of the Zagros forests can provide a foundation for more accurate forest health monitoring. Accordingly, establishing a continuous hyperspectral-based forest health monitoring system for the Zagros forests, adapting spectral analysis approaches to the specific characteristics of the region, and developing an integrated forest health database are among the principal recommendations of this review.

Keywords: Forest health, oak decline, photochemical reflectance index (PRI), plant stress.