



دانشگاه گوار، دانشکده منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و هشتم، شماره سوم، ۱۴۰۰

۵۳-۶۹

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/JWFST.2021.19284.1934

مقاله کامل علمی - پژوهشی

شبیه‌سازی بازتاب طیفی و برآورد کلروفیل و رطوبت برگ بنه (*Pistacia mutica*) بر اساس مدل PROSPECT4

نرگس پورقاسمی^۱، مژگان عباسی^{۲*}، علی جعفری^۳ و حمیدرضا ریاحی بختیاری^۲

^۱ دانشجوی دکتری گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،

^۲ استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،

^۳ دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: جنگل‌های زاگرس به‌عنوان وسیع‌ترین بوم‌سازگان جنگلی ایران عمدتاً از گونه‌های بلوط و بنه تشکیل یافته است. گونه بنه (*Pistacia mutica*) اگرچه توانایی سازگاری با شرایط نامطلوب محیطی را دارد، اما در سال‌های اخیر متأسفانه، مخاطرات محیطی مختلف به‌تدریج بر رشد و کیفیت این گونه تأثیر گذاشته است؛ بنابراین پایش کیفیت و سلامت این گونه از طریق آگاهی از میزان پارامترهای بیوشیمیایی و بیوفیزیکی برگ و تاج‌پوشش درختان، ضروری است. کلروفیل و رطوبت گیاه، پارامترهای مهمی در تعیین وضعیت فیزیولوژیکی، شرایط سلامت و تعیین وضعیت استرس درختان هستند. برآورد این پارامترها با استفاده از داده‌های سنسج‌ازدور و نزدیک‌سنجی و اعمال مدل‌های انتقال تابشی که بر اساس قوانین فیزیک و نحوه تعامل امواج با درختان کار می‌کنند، امکان‌پذیر است. مدل PROSPECT برای برآورد مقدار کلروفیل، مقدار آب و ماده خشک برگ در واحد سطح بر اساس اندازه‌گیری‌های بازتاب طیفی ارائه شده است. ترکیب مدل‌های انتقال تابشی با رگرسیون‌های آماری نیز برای برآورد این پارامترها نتایج خوبی نشان داده است. از آنجاکه اولین نشانه‌های تنش در درختان، در برگ آن‌ها ظاهر می‌شود، از این‌رو در این پژوهش ضرورت بررسی وضعیت کمی و کیفی این گونه بر اساس پارامترهای بیوشیمیایی برگ آن از طریق روش‌های غیرمخرب نزدیک‌سنجی مطرح شد. بر اساس ضرورت و طرح مسأله موجود، هدف این پژوهش شبیه‌سازی انعکاس طیفی و برآورد پارامترهای بیوشیمیایی و بیوفیزیکی برگ گونه *Pistacia mutica* با استفاده از مدل انتقال تابشی PROSPECT4، مقایسه بازتاب اندازه‌گیری شده برگ گونه بنه با بازتاب طیفی شبیه‌سازی شده با مدل یاد شده از طریق شاخص‌های طیفی و نهایتاً ارزیابی مدل ترکیب شده با رگرسیون حداقل مربعات بخشی در برآورد کلروفیل و رطوبت برگ گونه بنه است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش ۲۰ درخت بنه به‌طور تصادفی در جنگل کودسیاه بخش فلارد استان چهارمحال و

* مسئول مکاتبه: mozhgan.abasi@gmail.com

بختیاری انتخاب شدند و از هر درخت دو نمونه برگ از جهت‌های شرق و غرب تاج آن برداشت شد (درمجموع ۴۰ نمونه). میزان کلروفیل برگ، مقدار آب معادل و مقدار ماده خشک برگ در آزمایشگاه محاسبه شد. بازتاب طیفی نمونه برگ‌ها به وسیله طیف‌سنج SVC HR-1024 اندازه‌گیری شد. اطلاعات حاصل از داده‌های طیف‌سنجی و مقادیر پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی برگ در جعبه‌ابزار ARTMO در محیط نرم‌افزار MATLAB وارد شد. سپس از مدل انتقال تابشی PROSPECT4 برای شبیه‌سازی بازتاب طیفی استفاده شد. از ترکیب مدل PROSPECT4 با رگرسیون حداقل مربعات بخشی برای برآورد رطوبت و کلروفیل برگ گونه *Pistacia mutica* استفاده شد. سپس با استفاده از اعتبارسنجی Leave-one-out، عملکرد مدل نیز در برآورد میزان کلروفیل و رطوبت برگ این گونه ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی مدل برای برآورد کلروفیل و رطوبت برگ، بنه، نشان داد که مدل PROSPECT4 در ترکیب با رگرسیون حداقل مربعات بخشی دقت مناسب و معنی‌داری ($\text{sig}=0/000$) در برآورد رطوبت ($\text{RMSE}=0/0028$) و ($R^2=0/73$) و کلروفیل برگ ($\text{RMSE}=2/61$ و $R^2=0/72$) دارد. نتایج آزمون t جفتی از شاخص‌های طیفی نشان داد که شاخص‌های ARI، ARI2، DWSI، NDWI و p550 تفاوت معنی‌داری بین طیف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نداشتند.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این پژوهش، ترکیب مدل‌های انتقال تابشی با روش‌های رگرسیونی مانند حداقل مربعات بخشی قدرت زیادی در پیش‌بینی پارامترهای گیاهی دارند. به‌کارگیری سایر مدل‌های انتقال تابشی با تعداد بیش‌تری از پارامترها، هم‌چنین تکنیک‌هایی مانند اطلاعات قبلی، راه‌حل‌های چندگانه و سایر روش‌های رگرسیونی در شبیه‌سازی بازتاب طیفی و برآورد پارامترهای معرف وضعیت کیفی جنگل‌های بنه قابلیت بررسی در این جنگل‌ها را داشته و می‌تواند در سطوح گسترده از طریق داده‌های ماهواره‌ای بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی برگ، جعبه‌ابزار ARTMO، جنگل‌های زاگرس، کلروفیل برگ، مدل‌های انتقال تابشی

مقدمه

ذخیره آب، نظارت و پایش آن‌ها ضرورت می‌یابد. تشخیص زود هنگام کاهش کیفیت و کمیت این جنگل‌ها می‌تواند تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان را در مدیریت بهینه این عرصه‌ها یاری کند؛ بنابراین شناسایی و ارزیابی عوامل زوال، قبل از این‌که باعث تغییرات ساختاری یا ترکیبی عمیقی شوند، می‌تواند نقطه عطفی در جلوگیری از تخریب و نابودی این جنگل‌ها شود (۴۳).

پایش کیفیت و سلامت این جنگل‌ها در منطقه زاگرس همواره به‌عنوان یک چالش اساسی مطرح بوده است (۲۶، ۳۲). استفاده از فناوری‌های نوین

تعامل بین تغییرات زیست‌محیطی جهانی و بوم‌سازگان جنگلی همواره یکی از موضوعات اصلی در مطالعه تغییرات جهانی بوده است. جنگل‌های زاگرس با مساحت حدود پنج میلیون هکتار وسیع‌ترین بوم‌سازگان جنگلی ایران را تشکیل می‌دهد. اگرچه سیمای این بوم‌سازگان به دلیل مواجهه شدن با مخاطرات محیطی مختلف از جمله تغییر اقلیم، خشکسالی، ریزگردها، دخالت‌ها و بهره‌برداری‌های بی‌رویه به‌کلی نشان‌دهنده وضعیت زوال آن‌ها است؛ اما به دلیل نقش این زیست‌بوم در ترسیب کربن، حفاظت از خاک و

کلروفیل و مقدار رطوبت گیاه با استفاده از روش‌های سنتی و در شرایط آزمایشگاهی با دقت مطلوبی اندازه‌گیری می‌شده است، این روش‌ها مخرب، زمان‌بر، پرهزینه، تکرارناپذیر، فصلی و سالیانه هستند؛ بنابراین اغلب استفاده از آن‌ها در سطح وسیع غیرممکن بوده و محدود به تک‌درخت و یا قطعات نمونه می‌شوند (۱۴) در حالی‌که، استفاده از روش‌های دورسنجی معایب روش‌های اندازه‌گیری سنتی و آزمایشگاهی را ندارد.

به‌طورکلی روش‌های مورد استفاده برای برآورد متغیرهای گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری می‌توانند به دو گروه آماری و فیزیکی تقسیم شوند (۳۴). در تکنیک‌های آماری از مدل‌های رگرسیونی مختلف مانند رگرسیون حداقل مربعات بخشی^۲ (PLS)، رگرسیون مؤلفه اصلی^۳ و مدل بی‌زی^۴ (۷، ۸، ۲۳، ۳۰) یا K-NN^۵ (۱۰) برای پیدا کردن رابطه بین صفات گیاهی اندازه‌گیری شده در محل با بازتاب طیفی یا شاخص‌های طیفی استفاده می‌شود (۳۷، ۴۲). اگرچه روش‌های آماری به‌راحتی قابل‌اجرا هستند اما این روش‌ها تحت‌تأثیر رویشگاه، نوع سنجنده و وضعیت و روش نمونه‌گیری هستند (۹، ۳۴). در سال‌های اخیر، روش مدل فیزیکی تحت عنوان مدل انتقال تابشی (RTM^۶) به‌عنوان روش جایگزین مطرح و مورد استفاده قرار گرفته است. مدل انتقال تابشی بر اساس قوانین فیزیکی، درصدد توصیف ریاضی نحوه تعامل امواج با محیط گیاهی (جذب انرژی و پراکنش آن) است که در مقایسه با روش‌های آماری بسیار قوی‌تر هستند (۲، ۲۷). این مدل‌ها مکانیسم توصیف رابطه بین بازتاب طیفی و پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی پوشش گیاهی را ارائه

سنجش‌ازنزدیک مانند طیف‌سنجی زمینی می‌تواند نویدبخش فصل نوینی در پایش وضعیت سلامت و کیفیت توده‌های جنگلی در منطقه زاگرس باشد. این تکنیک قادر است با به‌کارگیری داده‌ها از سنجنده‌های طیف‌سنج زمینی مقدار انرژی عبور یافته، منعکس شده و جذب شده توسط گیاهان را اندازه‌گیری و پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها، اطلاعات مفیدی از پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی آن‌ها ارائه دهد (۱۱). طیف‌سنجی زمینی به‌عنوان شاخه بنیادی در سنجش‌ازدور، امکان مطالعه پدیده‌ها و برآورد پارامترهای گیاهی را در محدوده وسیعی از طیف الکترومغناطیس از ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر با ارائه منحنی طیفی منحصربه‌فردی (مانند اثر انگشت^۱)، فراهم کرده است (۱، ۲، ۱۴). از آن‌جاکه همه فرآیندهای اکولوژیکی درخت مانند فتوسنتز، تعرق و تنفس در ارتباط نزدیک با پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی پوشش جنگلی است، بنابراین برآورد میزان رطوبت، رنگدانه‌های گیاه و سایر پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاه می‌تواند برآوردی از وضع فیزیولوژیکی، شرایط سلامت و وضعیت استرس درخت در اختیار قرار دهد (۳۳). مقدار کلروفیل می‌تواند شاخصی از پتانسیل فتوسنتزی و همچنین قابلیت تولید گیاه باشد (۱۷) که ارتباط مستقیمی با میزان رویش، زی‌توده و حجم سرپای درخت دارد؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل کمی میزان کلروفیل برگ، نه تنها برای درک روند تبادل مواد و انرژی بین درختان و محیط‌زیست، بلکه هم‌چنین برای نظارت بر رشد، حاصلخیزی رویشگاه و شرایط تنش دارای اهمیت است. رطوبت گیاه، پارامتر ارزشمندی در کنترل وضع فیزیولوژیکی گیاه، ارزیابی خشک‌سالی، بررسی وضعیت کیفی تاج درخت، تعیین میزان استرس ناشی از کم‌آبی و تعیین احتمال آتش‌سوزی جنگل است (۱۶، ۳۳). درگذشته میزان

2- Partial least square
3- Principal component regression
4- Bayesian model
5- K nearest neighbor
6- Radiative transfer model

1- Finger print

توسط فرت و همکاران ارائه شد که علاوه بر جدایی کلروفیل از کارتنوئید میزان رنگدانه آنتوسیانین را نیز در مدل وارد کرده است (۱۷). از زمان ارائه این مدل‌ها تاکنون، از مدل PROSPECT برای برآورد میزان کلروفیل (۱۹)، رطوبت (۴۱)، مقدار ماده خشک (۲۹)، سطح ویژه برگ^۲ (۲) و غیره استفاده شده است.

از جمله معیارهای انتخاب مدل مناسب، تعداد کم پارامترهای ورودی، قابلیت دسترسی و اجرای ساده مدل است (۱۳)، زیرا با ورود پارامترهای جدید بار محاسباتی بیش‌تری تحمیل خواهد شد و مدل پیچیده‌تر می‌شود؛ بنابراین با توجه به هدف مطالعه این پژوهش که شبیه‌سازی و برآورد میزان کلروفیل و رطوبت برگ بود، مدل PROSPECT4 به کار گرفته شد. در سال‌های اخیر، ترکیبی از دو روش آماری و فیزیکی نیز به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات مربوط به برآورد پارامترهایی مانند ترکیبات شیمیایی انواع برگ (۱۶)، میزان کلروفیل (۴۰)، شاخص سطح برگ (۳۵) و غیره رایج شده است. قسمت فیزیکی این مدل‌ها مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های بازتابندگی گیاه است. قسمت آماری نیز مربوط به روش‌های رگرسیونی ناپارامتریک (مانند: PLS، KRR^۳، GPR^۴ و غیره) برای مرتبط‌سازی پارامترهای پوشش گیاهی با داده‌های سنجش‌ازدوری است (۴۰).

اگرچه در خارج از کشور مطالعات بسیاری به‌منظور برآورد پارامترهای گیاهی و بررسی وضعیت کیفی گیاه با استفاده از مدل‌های انتقال تابشی در انواع گونه‌های زراعی، باغی و جنگلی صورت گرفته است، اما در کشور ما تنها مطالعه‌ای که بر روی پوشش گیاهی صورت گرفته، پژوهش دشتی آهنگر و همکاران (۱۳۹۰) است که مدل PROSAIL (ترکیب مدل PROSPECT در سطح برگ با مدل SAIL

می‌دهند که می‌توانند برای انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، بر اساس درک قوی از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند. شبیه‌سازی RTM امکان بررسی حساسیت پارامترها، طراحی شاخص‌های پوشش گیاهی و توسعه روش‌های معکوس به‌منظور بازیابی پارامترهای بیوفیزیکی را فراهم می‌کند. مدل‌های انتقال تابشی عمدتاً در دو سطح برگ و تاج گیاه اعمال می‌شوند. در میان مدل‌های متعددی که در دهه‌های اخیر ارائه شده‌اند، مدل SAIL در سطح تاج گیاه و مدل PROSPECT در مقیاس برگ، نتایج بهتری ارائه داده‌اند. مدل‌های انتقال تابشی برگ، بازتاب و عبور را با استفاده از پارامترهای ورودی ویژه‌ای که با اندازه‌گیری از برگ به دست می‌آیند شبیه‌سازی می‌کنند. مدل PROSPECT در سال ۱۹۹۰ توسط ژاکموند و بارت برای برآورد ترکیبات بیوشیمیایی برگ مانند مقدار کلروفیل، مقدار آب و مقدار ماده خشک برگ در واحد سطح بر اساس اندازه‌گیری‌های بازتابش طیفی برای انواع گونه‌های تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای از ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر ارائه شد (۲۴). این مدل از دو کلاس متغیر ورودی شامل پارامتر ساختاری برگ^۱ (N) که تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده برگ بوده و متوسطی از دیواره‌های سلولی و هوای بین‌سلولی مزوفیل برگ است و پارامترهای بیوشیمیایی برگ یا تراکم رنگدانه‌ها که مهم‌ترین آن‌ها کلروفیل برگ است، استفاده می‌کند (۲۵). این مدل‌ها از ابتدای ابداع تاکنون با تغییراتی در متغیرهای ورودی آن‌ها، اصلاح شده‌اند. فرت و همکاران در سال ۲۰۰۸ مدل PROSPECT را اصلاح و دو مدل PROSPECT4 و PROSPECT5 را منتشر کردند. در PROSPECT5 میزان کلروفیل کل و کارتنوئید از هم جدا شده است (۱۵). در سال ۲۰۱۷ مدل اصلاح‌شده دیگری به نام PROSPECT-D

2- Specific leaf area (SLA)

3- Kernel ridge regression

4- Gaussian process regression

1- Leaf structure parameter

PROSPECT4. مقایسه بازتاب اندازه‌گیری شده برگ گونه بنه با بازتاب طیفی شبیه‌سازی شده با مدل مذکور از طریق شاخص‌های طیفی و در نهایت ارزیابی مدل در ترکیب با رگرسیون PLS در برآورد کلروفیل و رطوبت برگ گونه بنه، تنظیم شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این مطالعه در بخشی از جنگل‌های بخش فلارد شهرستان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری (۱۵۰ کیلومتری شهرستان شهرکرد) انجام شد. این منطقه از شمال به خان میرزا، از غرب به لردگان، از شرق به سمیرم و از جنوب به کهگیلویه و بویراحمد محدود می‌شود (۳۶). گونه غالب این منطقه بلوط ایرانی (*Quercus persica*) است. این منطقه دارای ۲۰ هکتار جنگل خالص بنه (*Pistacia mutica*) به نام جنگل کودسیاه است که در ۱۰ کیلومتری مال‌خلیفه قرار دارد. درختان بنه در این محدوده همسال، تک‌پایه با تاج مترکم هستند. میانگین قطر برابر سینه درختان ۴۶ سانتی‌متر و میانگین ارتفاع ۷ متر است که درختان مورد مطالعه از میان آن‌ها انتخاب شدند.

اندازه‌گیری کلروفیل و رطوبت برگ: به منظور انجام این پژوهش و تهیه منحنی‌های طیفی صحیح، ۲۰ درخت بنه به‌طور تصادفی از میان درختانی که فاقد علائم بیماری، دارای تاج بهتر و شاداب‌تر بودند انتخاب شدند. از آن‌جا که ویژگی‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی برگ بستگی به شرایط نوری در تاج درخت دارند و شدت و مدت نور رسیده در دو جهت شرقی و غربی تاج درخت متفاوت است (در جهت شرق شدت و مدت کم‌تر و در جهت غرب شدت و مدت بیش‌تر)، بنابراین برای کم کردن اثر جهت بر میزان پارامترهای اندازه سطح برگ، وزن مرطوب، وزن خشک برگ و غیره، از هر ۲۰ پایه درختی، تعداد ۳۰

سطح تاج) را برای برآورد کلروفیل گیاه برنج به‌کار بردند (۱۳). با این حال، تاکنون کارایی و قابلیت این مدل‌ها در زیست‌بوم‌های جنگلی کشور به‌خصوص در جنگل‌های زاگرس که از جنبه حمایتی و حفاظتی بسیار دارای اهمیت هستند، مورد پژوهش و بررسی قرار نگرفته است. بنابراین ضرورت دارد تا از طریق انجام پژوهش‌های بنیادی قابلیت این مدل‌ها در شرایط جنگل‌های زاگرس مورد بررسی و آزمون قرار گیرد.

گونه بنه (*Pistacia mutica*) یکی از گونه‌های درختی اصلی جنگل‌های زاگرس است که دارای ارزش اکولوژیکی و اقتصادی است. اگرچه بنه توانایی سازگاری با شرایط نامطلوب محلی را دارد، اما این گونه نیز مانند سایر گونه‌ها برای استقرار و رویش بهینه، نیازمند به شرایط محیطی مناسب با نیاز اکولوژیکی خود است. متأسفانه در سال‌های اخیر، انواع مختلف مشکلات مانند استخراج رزین توسط انسان، آتش‌سوزی، دامداری، عدم تجدید حیات طبیعی، آفات و بیماری‌ها، تغییر آب‌وهوا و کم‌آبی و خشکسالی به تدریج بر رشد و کیفیت این گونه تأثیر گذاشته است. از آن‌جا که اولین نشانه‌های تنش در درختان، در تاج آن‌ها ظاهر می‌شود (۲۲) بنابراین برگ‌ها می‌توانند توصیفگر خوبی از وضعیت کمی و کیفی پوشش گیاهی باشند (۲۸). از این‌رو در این پژوهش ضرورت بررسی وضعیت کمی و کیفی این گونه بر اساس پارامترهای بیوشیمیایی برگ آن از طریق روش‌های غیرمخرب نزدیک‌سنجی مطرح شد. بر اساس مطالب ذکرشده در خصوص ضرورت و طرح مسأله موجود با ارزیابی قابلیت‌های مدل‌های انتقال تابشی در شبیه‌سازی بازتاب طیفی و برآورد پارامترهای بیوشیمیایی و بیوفیزیکی برگ گونه بنه (*Pistacia mutica*)، اهداف مطالعه حاضر بر اساس اولویت شامل: شبیه‌سازی بازتاب طیفی برگ گونه بنه (*Pistacia mutica*) با استفاده از مدل انتقال تابشی

نگهداری شدند. ۰/۲ گرم از برگ نمونه‌ها با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ کاملاً حل شد. سپس درون لوله‌های سانتریفیوژ به مدت ۳ دقیقه با چرخش ۶۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. سپس، محلول روی لوله‌ها جدا و با دستگاه اسپکتوفتومتر میزان جذب عصاره‌ها در طول موج ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ اندازه‌گیری شد. میزان کلروفیل a و b با استفاده از فرمول‌های آرنون (۱۹۴۹) اندازه‌گیری شد (۵).

$$a \text{ کلروفیل} = (12.7 * A_{663} - 2.69 * A_{645})V / 1000W \quad (۵)$$

$$b \text{ کلروفیل} = (22.9 * A_{645} - 4.68 * A_{663})V / 1000W \quad (۶)$$

که در آن‌ها، V حجم عصاره مصرف‌شده، W وزن تر نمونه بر حسب گرم است. به این ترتیب غلظت کلروفیل a، b بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر است. A_{663} : میزان جذب نور در طول موج ۶۶۳ نانومتر و A_{645} : میزان جذب نور در طول موج ۶۴۵ نانومتر است.

اندازه‌گیری طیفی: برای اندازه‌گیری طیفی نمونه برگ‌ها، ابتدا از هر پایه درختی سه شاخه از بالای تاج درخت قطع شد. سپس، برگ‌های بالغ جدا و در کیسه‌های زیپ‌دار و در محیط سرد و تاریک به آزمایشگاه منتقل شدند. ویژگی‌های نوری اجزای برگ توسط دستگاه طیف‌سنج SVC HR-1024 با دامنه طول موج طیفی کامل ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر در اتاق سرد و تاریک آزمایشگاه (برای حداقل کردن اثر پخش و حداکثر کردن اثر جذب) اندازه‌گیری شد. قدرت تفکیک طیفی این دستگاه، ۱/۵ نانومتر برای محدوده طیفی ۳۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، ۳/۵ نانومتر برای محدوده طیفی ۱۰۰۰ تا ۱۹۰۰ نانومتر و ۲/۴ نانومتر برای محدوده طیفی ۱۹۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است.

برگ بالغ در معرض آفتاب به‌طور مجزا در دو جهت شرقی و غربی تاج درختان، جدا شده و وزن آن‌ها با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و با آون در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. برای تعیین سطح برگ‌ها با دوربین دیجیتالی از برگ‌ها عکس‌برداری و سطح آن‌ها با نرم‌افزار Image J محاسبه شد (۲). سپس با استفاده از رابطه‌های زیر مقدار ماده خشک^۱ (LDM) (رابطه ۱) و ضخامت آب معادل برگ^۲ (EWT) (رابطه ۲) برآورد شد:

$$(۱) \quad \text{وزن خشک برگ} / \text{سطح برگ} = \left(\frac{g}{cm^2} \right) = \text{مقدار ماده خشک برگ}$$

$$(۲) \quad \left(\frac{g}{cm^2} \right) = \frac{\text{وزن خشک برگ} - \text{وزن تر برگ}}{\text{سطح برگ}} = \text{ضخامت آب معادل}$$

به‌منظور برآورد N، ژاکموند و بارت (۱۹۹۰) رابطه‌ای بین سطح ویژه برگ (SLA) و N پیشنهاد دادند (۲۵). برای این منظور ابتدا SLA از رابطه ۳ برآورد و سپس N از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$(۳) \quad \left(\frac{cm^2}{g} \right) = \frac{\text{سطح برگ}}{\text{وزن خشک برگ}} = \text{سطح ویژه برگ}$$

$$(۴) \quad \text{پارامتر ساختاری برگ} = \frac{0.025 + \text{سطح ویژه برگ} * 0.9}{\text{سطح ویژه برگ} - 0.1}$$

برای اندازه‌گیری کلروفیل و جلوگیری از بین رفتن رنگدانه‌ها در طول نمونه‌گیری و آزمایش عصاره‌گیری و رقیق‌سازی، نمونه‌ها با یخ خشک و در محیط تاریک

1- Leaf dry mass

2- Equivalent water thickness

پیش‌بینی بیش‌تر درمقابل نمونه‌های اندازه‌گیری شده است (مانند داده‌های طیفی از ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر)؛ که می‌تواند طول موج‌های بهینه را معرفی کند و همبستگی بین متغیر وابسته و مستقل را محاسبه کند. این روش نه‌تنها در محور Y ها بلکه در محور X ها نیز به فشرده‌سازی اطلاعات می‌پردازد و از اطلاعات هر دو متغیر مستقل و وابسته در فرآیند تحلیل استفاده می‌کند (۱). به‌منظور اعتبارسنجی از روش Leave one out استفاده و مقادیر R^2 و RMSE بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده محاسبه شد.

مقایسه طیف‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بر اساس شاخص‌های طیفی: در این مطالعه برای مقایسه طیف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل PROSPECT4، از ۱۰ شاخص طیفی استفاده شد (جدول ۱). به دلیل این‌که هدف، مقایسه شاخص‌های طیفی در سراسر طول موج‌های طیف الکترومغناطیسی بود، علاوه بر شاخص‌های طیفی حساس به کلروفیل و رطوبت برگ، شاخص‌های حساس به سایر پارامترها مانند شاخص سطح برگ، آنتوسیانین و غیره نیز به‌کار برده شدند. شاخص‌ها از مطالعات میرزایی و همکاران (۱۳۹۷) و گیتلسون و همکاران (۲۰۰۱) انتخاب شدند (۲۰، ۳۱). پس از محاسبه این شاخص‌ها برای یکایک نمونه طیف‌های اندازه‌گیری شده و طیف‌های شبیه‌سازی شده، تفاوت آماری طیف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بررسی شد. در این بررسی از آزمون t جفتی در سطح ۹۵ درصد استفاده شد.

شبیه‌سازی بازتاب طیفی با مدل PROSPECT4 برآورد کلروفیل و رطوبت برگ با روش ترکیب با رگرسیون PLS: در این مطالعه، برای شبیه‌سازی بازتاب طیفی برگ گونه *Pistacia mutica* از مدل PROSPECT-4 استفاده شد. به‌این‌منظور، پارامترهای N، LDM، EWT و مقدار کلروفیل کل برگ^۱ (Ch_{ab}) وارد مدل شد. به‌منظور اجرای مدل‌های انتقال تابشی از جعبه‌ابزار ARTMO^۲ که در محیط نرم‌افزار MATLAB اجرا می‌شود، استفاده شد. ARTMO یک بسته نرم‌افزاری است که با داشتن الگوریتم‌هایی، اجرای مجموعه‌ای از مدل‌های انتقال تابشی گیاه، در سطح برگ و در سطح تاج فراهم شده است. در واقع ARTMO به کاربر این اجازه را می‌دهد که مدل‌های انتقال تابشی برگ و تاج را پیکره‌بندی کند و از این طریق ذخیره و طرح‌ریزی خروجی برای هر نوع سنجنده که در محدوده مرئی، مادون‌قرمز و مادون‌قرمز کوتاه (۴۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) کار می‌کند را ساده می‌کند (۳۸).

برای برآورد پارامترها با روش ترکیبی یعنی ترکیب مدل PROSPECT4 همراه با روش رگرسیون PLS، طیف‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل همراه با مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترها، وارد جعبه‌ابزار MLRA^۳ در محیط ARTMO شد. جعبه‌ابزار MLRA مجموعه‌ای از رگرسیون‌های ناپارامتری (مانند PLS، K-NN و غیره) است که به محیط ARTMO اضافه می‌شود و متغیرهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی را بر اساس داده‌های اندازه‌گیری زمینی یا شبیه‌سازی شده برآورد می‌کند.

از این جعبه‌ابزار، رگرسیون PLS برای برآورد پارامترها انتخاب شد. رگرسیون PLS یک تکنیک کاهش ابعاد در پردازش داده‌ها با تعداد متغیرهای

1- Chlorophyll ab

2- Automated radioactive transfer models operator

3- Machine learning regression algorithms

جدول ۱- ویژگی شاخص‌های طیفی مورد استفاده.

Table 1. Characteristic of spectral indices used.

شاخص Index	فرمول Formulae	حساسیت شاخص Index sensitivity
شاخص دت DATT	$(p_{850}-p_{710})/(p_{850}-p_{680})$	کلروفیل و رطوبت برگ Leaf Chlorophyll and water
شاخص اختلاف نرمال شده رطوبت Normalized difference water index (NDWI)	$(p_{857}-p_{2130}) / (p_{857}+p_{2130})$	رطوبت Water
شاخص رطوبت در تنش بیماری Disease Water Stress Index (DWSI)	$(p_{802} + p_{547}) / (p_{1657} + p_{682})$	رطوبت Water
شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(p_{831} - p_{667}) / (p_{831} + p_{667})$	کلروفیل، رطوبت و LAI Chlorophyll, water and LAI
شاخص نسبت ساده Simple Ratio (SR)	p_{774}/p_{677}	کلروفیل، رطوبت و استرس Chlorophyll, water and stress
انعکاس در طول موج ۵۵۰ نانومتر Reflectance at 550 nm (p550)	P_{550}	کلروفیل Chlorophyll
شاخص کلروفیل سیمز و گامون A Chlorophyll Index (SGA)	$(P_{750} + p_{705}) / (p_{750} + p_{705} - 2 \times p_{445})$	کلروفیل Chlorophyll
شاخص کلروفیل سیمز و گامون B Chlorophyll Index (SGB)	$(p_{750} - p_{445}) / (p_{705} - p_{445})$	کلروفیل Chlorophyll
شاخص انعکاس آنتوسیانین Anthocyanin Reflectance Index (ARI)	$(1/p_{550}) - (1/p_{700})$	آنتوسیانین، کلروفیل Anthocyanin
شاخص انعکاس آنتوسیانین ۲ Anthocyanin Reflectance Index ₂ (ARI ₂)	$p_{800}(1/p_{550}) - (1/p_{700})$	آنتوسیانین، کلروفیل Anthocyanin

P: بازتاب مربوط به طول موج مورد نظر

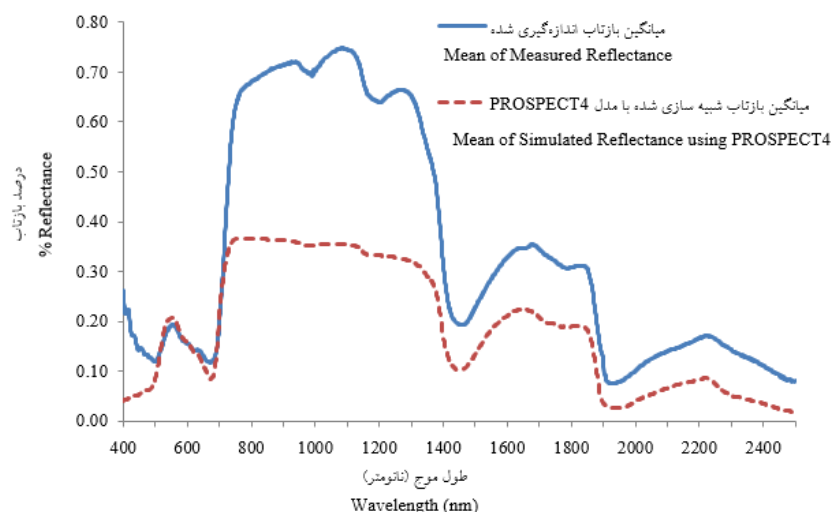
نتایج و بحث

مقایسه بازتاب طیفی اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی شده از مدل‌های PROSPECT4 بر اساس شاخص‌های طیفی: منحنی بازتاب طیفی گیاهان سالم و بدون استرس الگوی مشخصی دارد. آنچه مسلم است به دلیل تغییر میزان انرژی منبع نور و شرایط خاص اندازه‌گیری میزان بازتاب طیفی می‌تواند متفاوت باشد؛ اما به دلیل ماهیت برگ از نظر ویژگی‌های ساختار سلولی و همچنین تراکم رنگدانه‌ها این الگو همواره یکسان است. نتایج حاصل از مقایسه میانگین بازتاب شبیه‌سازی با مدل PROSPECT4 با میانگین بازتاب اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در

شکل ۱ ارائه شده است. مقایسه چشمی منحنی‌های طیفی در نواحی مرئی، مادون قرمز نزدیک و دور امکان‌پذیر است (شکل ۱). چنان‌که مشاهده می‌شود اختلافی بین میانگین بازتاب حاصل از مدل با بازتاب اندازه‌گیری شده وجود دارد. دلیل تفاوت در میزان بازتاب مربوط به اسکن برگ در شرایط آزمایشگاه است که با وجود منبع نور مصنوعی اندازه‌گیری از بازتاب برگ‌ها را گزارش کرده است. این نتایج در مقایسه با اندازه‌گیری‌های طیفی بر روی برگ همین‌گونه در شرایط نور طبیعی در مطالعه قبل (۶) حاصل شد. هم‌چنین نوع طیف‌سنج از نظر اندازه قدرت تفکیک طیفی می‌تواند تأثیرگذار باشد.

موج‌های مرئی در محدوده ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر مناسب‌تر بوده و تنها در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر یک روند معکوس بین طیف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد (شکل ۱). بیش‌ترین اختلاف در محدوده مادون‌قرمز نزدیک و دور دیده می‌شود؛ بنابراین به جای برآورد RMSE برای مقایسه طیف‌ها از ضریب همبستگی پیرسون (r) در نرم‌افزار SPSS، بین بازتاب‌های شبیه‌سازی شده و طیف اندازه‌گیری شده برگ استفاده شد تا الگو و روند امضاهای طیفی مقایسه شود. نتایج این مقایسه میزان همبستگی $r=0.96$ را نشان داد.

به‌نحوی که هرچه طیف سنج مورد استفاده اندازه قدرت تفکیک طیفی بیش‌تری داشته باشد منحنی حاصل با نمونه شبیه‌سازی شده حاصل از مدل، شباهت بیش‌تری دارد. تراکم برگ‌های چیده شده در زیر سنسور طیف سنج نیز اثرگذار است. به‌طوری‌که هرچه توده برگ‌ها متراکم‌تر باشد، شباهت منحنی شبیه‌سازی با اندازه‌گیری شده بیش‌تر است. این نتیجه نیز در شبیه‌سازی بازتاب تاج درختان توسط مدل‌های انتقال تابشی زمانی که تاج پوشش گیاه به حداکثر رشد رسیده باشد و شبیه‌سازی طیفی بهتر صورت گرفته، به‌دست آمده است (۱۳). نتایج شبیه‌سازی برای طول



شکل ۱- مقایسه میانگین بازتاب طیفی اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی شده حاصل از مدل‌های PROSPECT.

Figure 1. Comparison of the mean of measured reflectance and simulated reflectance using PROSPECT4.

طریق آزمون t جفتی در سطح ۹۵ درصد ارزیابی شد. مطابق جدول ۲، شاخص‌های ARI، DWSI، NDWI و p550 تفاوت معنی‌داری را بین دو طیف شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان نداده است. یا به عبارتی رفتار طیفی منحنی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بر اساس شاخص‌های حساس به کلروفیل و رطوبت، شبیه به هم است. در برخی مطالعات اشاره شده است که شاخص‌های مرتبط با

از آن‌جا که امکان مقایسه منحنی بازتاب‌های طیفی با توجیه دلیل اختلاف، همواره بهتر می‌تواند محقق را به نتایج دقیق‌تری هدایت کند، از شاخص‌های طیفی برای این مقایسه استفاده شد. برای این منظور ۱۰ شاخص طیفی متأثر از پارامترهای مختلف گیاهی در طول طیف الکترومغناطیسی انتخاب شد و تفاوت شاخص‌های حاصل از طیف اندازه‌گیری شده با شاخص‌های حاصل از طیف‌های شبیه‌سازی شده از

رابطه قوی با کلروفیل کل و کارتنوئید نشان دادند (۱۸). ارفا و همکاران (۲۰۱۷) نیز اشاره کرده‌اند که دو شاخص ARI2 و DWSI از جمله کارآمدترین شاخص‌ها در تجزیه و تحلیل وضعیت پوشش گیاهی از نظر رنگدانه‌ها و تنش آبی در سطح جهانی هستند (۴). آپان و همکاران (۲۰۰۳) اشاره کرده‌اند که ترکیب باندها ۱۶۰۰ نانومتر با باندها ۸۰۰ و ۵۵۰ نانومتر (شاخص DWSI) می‌تواند بهترین شاخص‌های طیفی را با بیشترین همبستگی و دقت طبقه‌بندی تولید کنند (۳). علاوه بر این که بازتاب طیفی برگ تحت تأثیر پارامترهای بیوشیمیایی و بیوفیزیکی برگ قرار دارد، عوامل دیگری مانند زاویه دید سنجنده، زاویه نور رسیده به پدیده و منعکس شده از آن، مدت اسکن دستگاه و غیره نیز اثرگذار هستند (۱). از آنجا که اندازه‌گیری‌ها در شرایط آزمایشگاه و اتاق تاریک انجام شد، بنابراین پنج شاخصی که تفاوت معنی‌داری نشان ندادند، کم‌تر تحت تأثیر عواملی (مانند خطاهای اندازه‌گیری) که سبب تفاوت در طیف‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده‌اند، قرار می‌گیرند.

کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی، شاخص‌های مؤثری در تفکیک بازتاب طیفی گونه‌های گیاهی هستند که در مطالعه ما نیز همه شاخص‌های حساس به میزان کلروفیل تفاوت معنی‌داری بین طیف واقعی و شبیه‌سازی شده با مدل PROSPECT نشان دادند (۳۱)؛ بنابراین بسته به هدف مورد مطالعه که تفکیک گونه‌ها یا برآورد پارامترها باشد، شاخص‌های طیفی می‌توانند رفتارهای متفاوتی را نشان دهند. پنج شاخصی که رابطه معنی‌داری نشان ندادند می‌توانند در برآورد پارامترها از هر دو طیف واقعی و شبیه‌سازی شده بهتر عمل کنند. اگرچه دو شاخص ARI، ARI2 و طول موج ۵۵۰ نانومتر از جمله شاخص‌های حساس به آنتوسیانین و کلروفیل و شاخص‌های NDWI و DWSI از جمله شاخص‌های حساس به میزان رطوبت گیاه هستند، اما در برخی مطالعات توانسته‌اند ارتباط قوی با سایر پارامترها نیز نشان دهند. فرناندس (۲۰۱۹) بیان کرده است که شاخص‌هایی که برای ارتباط با کلروفیل گونه *Passiflora edulis* طراحی شده بودند نتوانستند هیچ رابطه معنی‌داری با کلروفیل نشان دهند در عوض دو شاخص ARI و ARI2

جدول ۲- t جفتی بین شاخص‌های طیفی از طیف اندازه‌گیری شده و طیف شبیه‌سازی شده.

Table 2. Paired- samples T Test results of measured reflectance and simulated reflectance by PROSPECT4.

معنی‌داری Sig	T	df	میانگین طیف اندازه‌گیری شده Mean of measured reflectance	میانگین طیف شبیه‌سازی شده Mean of simulated reflectance	شاخص Index
0.771 ^{ns}	0.295	19	0.187	0.169	ARI
0.118 ^{ns}	1.64	19	0.12	0.062	ARI2
0.000*	48.21	19	0.7	0.31	DATT
0.248 ^{ns}	1.19	19	1.86	1.83	DWSI
0.000*	-19.28	19	0.24	0.64	NDVI
0.2 ^{ns}	-1.32	19	0.66	0.67	NDWI
0.000*	23.87	19	1.5	1.2	SGA
0.000*	24.6	19	4.93	1.61	SGB
0.000*	2.99	19	5.6	4.87	SR
0.217 ^{ns}	-1.28	19	0.19	0.2	P550

^{ns} عدم معنی‌داری، * معنی‌دار

شده بین بازتاب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، مقادیر یک یا چند پارامتر بیوفیزیکی را برآورد می‌کند (۳۹). در روش ترکیبی، ابتدا مدل PROSPECT4 از طریق وارد کردن مقادیر پارامترهای ورودی برای تولید یک پایگاه داده از طیف‌های شبیه‌سازی شده استفاده شد. سپس مدل رگرسیونی ناپارامتریک PLS برای برآورد کلروفیل و رطوبت برگ بنه انتخاب شد. خلاصه آماری پارامترهای ۴۰ نمونه برگ اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نیز برای ورودی مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

بازیابی کلروفیل و رطوبت برگ با روش ترکیب مدل PROSPECT4 با رگرسیون PLS: رگرسیون PLS، زمانی که تعداد متغیرهای پیش‌بینی بیش‌تر از نمونه‌های اندازه‌گیری باشد و یا با تعداد زیادی از متغیرها که اطلاعات مشترک دارند (مانند داده‌های بازتاب طیفی از ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) سروکار داریم، با فشرده‌سازی این اطلاعات در چند مؤلفه غیرهمبسته، متغیرهای وابسته را از این مجموعه بزرگ متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌کند (۲۱). این رگرسیون از اطلاعات هر دو متغیر وابسته و مستقل تا حد ممکن استفاده می‌کند و با به حداقل رساندن اختلافات جمع

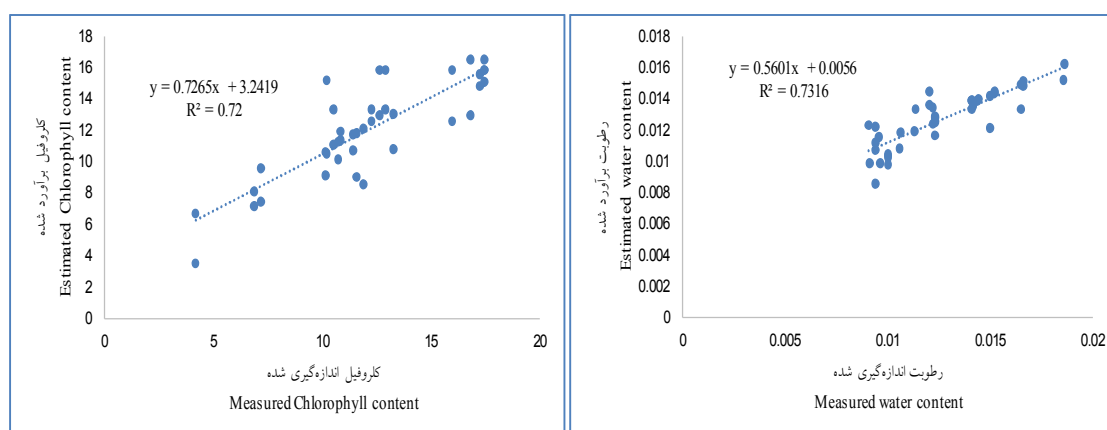
جدول ۳- خلاصه آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده.

Table 3. Summary statistics of the variables.

انحراف معیار St. Dev.	میانگین Mean	ماکزیمم Max	مینیمم Min	پارامترهای اندازه‌گیری شده Measured variables
0.088	1.186	1.377	1.078	مقدار پارامتر ساختاری برگ (N) Leaf structure parameter
3.64	12.1	17.48	4.19	مقدار کلروفیل (Ch _{ab}) Chlorophyll ab content
0.0028	0.013	0.019	0.009	مقدار آب معادل (ETW) Equivalent water thickness
0.0035	0.0154	0.023	0.011	مقدار ماده خشک برگ (LDM) Leaf dry mass

با دقت بیش‌تری پارامترهایی مانند LAI، کلروفیل برگ و تاج و غیره را برآورد کند (۱۶، ۳۵، ۴۰). یکی از عوامل تأثیرگذار بر دقت برآورد پارامترها تعداد گونه‌ها با مقادیر مختلف متغیرها است. هر چه دامنه ارزش متغیرها بیش‌تر باشد، دقت برآورد بیش‌تر بوده است؛ به عبارت دیگر، برآورد پارامترها در پوشش‌های جنگلی آمیخته یا چندین گونه گیاهی به دلیل دامنه وسیع‌تر پارامترها موفقیت‌آمیزتر بوده است (۱۲، ۳۳).

به منظور ارزیابی مدل در برآورد میزان کلروفیل و رطوبت برگ از شاخص‌های R^2 و RMSE بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده استفاده شد. میزان R^2 و RMSE برای پارامتر کلروفیل به ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۲/۶۱ و برای رطوبت ۰/۷۳ و ۰/۰۲۸ بود. به طور کلی روش ترکیبی دقت قابل قبولی (معنی‌داری ۰/۰۰۰ $\text{sig} =$ برای پیش‌بینی کلروفیل و رطوبت برگ داشت (شکل ۲). در مطالعات دیگری نیز نشان داده شده است که روش ترکیبی نسبت به سایر روش‌ها می‌تواند



شکل ۲- نتایج مدل رگرسیون PLS و مدل PROSPECT-4 مقادیر R^2 و RMSE برای مقدار کلروفیل و رطوبت برگ.

Figure 2. The results of PLS regression and PROSPECT-4 model and R^2 and RMSE values for leaf chlorophyll and water content.

با طیف‌های حاصل از طیف‌سنجی زمینی مورد محاسبه قرار گرفت. میزان این همبستگی $r=0/96$ بود. برای مقایسه طیف‌های اندازه‌گیری شده برگ گونه *Pistacia mutica* با بازتاب طیفی شبیه‌سازی شده با مدل PROSPECT4، ۱۰ شاخص طیفی از هر دو مجموعه طیف‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده محاسبه شد و با آزمون t جفتی، مقایسه صورت گرفت. پنج شاخص $ARI2$ ، ARI ، $DWSI$ ، $NDWI$ و $p550$ حساس به رطوبت و کلروفیل، تفاوت معنی‌داری را بین طیف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان ندادند. این نتیجه شباهت رفتار منحنی‌های طیفی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را به جهت پارامترهای کلروفیل و رطوبت نشان داده است. به‌علاوه نتایج بازیابی کلروفیل و رطوبت برگ از طریق روش ترکیب مدل PROSPECT4 با PLS نشان داد که میزان R^2 و RMSE برای پارامتر کلروفیل به ترتیب برابر $0/72$ و $2/61$ و برای رطوبت $0/73$ و $0/028$ بود. مقایسه توأم نتایج حاصل از دو روش، مقایسه شاخص‌ها و ترکیب مدل PROSPECT4 با PLS، توانایی خوب مدل PROSPECT4 را در برآورد کلروفیل و رطوبت برگ نشان داد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از سایر مدل‌های پرکاربرد و دامنه

نتیجه‌گیری

تشخیص و ارزیابی زود هنگام اثر مخاطرات محیطی، در کاهش کیفیت و کمیت گونه بنه با روش‌هایی که بتواند در کم‌ترین زمان و هزینه، قبل از این‌که عوامل مخرب باعث تغییرات ساختاری یا ترکیبی عمیق‌تری شوند، بسیار مهم است. کلروفیل و رطوبت از جمله شاخص‌های مهم از وضعیت سلامت گیاهان هستند که هر یک، اثر ویژه‌ای بر محدوده‌های مختلف بازتاب طیفی گیاه دارند؛ به‌طوری‌که قدرت این ارتباط در سراسر طیف الکترومغناطیسی متفاوت است؛ بنابراین بازتاب طیفی گیاه می‌تواند در برآورد این پارامترها مورد استفاده قرارگیرد. یکی از روش‌های دستیابی به بازتاب طیفی برگ گونه‌ها و متعاقباً برآورد پارامترها، استفاده از مدل‌های انتقال تابشی PROSPECT است که به‌وسیله پارامتر ساختاری برگ و غلظت پارامترهای بیوشیمیایی برگ، بازتاب طیفی را از طول موج ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر شبیه‌سازی می‌کند. در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی بازتاب طیفی برگ گونه بنه (*Pistacia mutica*)، مدل PROSPECT-4 در محیط جعبه‌ابزار ARTMO اجرا شد و شبیه‌سازی‌ها در پایگاه داده ARTMO ذخیره شد. سپس میزان همبستگی طیف‌های شبیه‌سازی شده

برآورد پارامترها در مقیاس‌های وسیع با استفاده از داده‌های دور سنجی، استفاده شود.

وسیع‌تری از پارامترها، همچنین استفاده از تکنیک‌هایی مانند اطلاعات قبلی، راه‌حل‌های چندگانه و سایر روش‌های رگرسیونی در شبیه‌سازی بازتاب طیفی و

منابع

1. Abbasi, M. 2009. Investigation of the spectral signature of forest species leaf: *Fagus orientalis*, *Quercuse castaneifolia*, *Carpinus betulus*, *Alnus subcordata*, *Parotia persica* using field spectroradiometry, PhD thesis, Tehran Univ. 135p. (In Persian)
2. Ali, A.M., Darvishzadeh, R., Skimore, A.K., Duren, I.V., Heiden, U., and Heurich, M. 2016. Estimating leaf functional traits by inversion of PROSPECT: Assessing leaf dry matter content and specific leaf area in mixed mountainous forest. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 45: 66-76.
3. Apan, A., Held, A., Phinn, S., and Markley, J. 2003. Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 Hyperion imagery for discriminating sugarcane disease, in: *Proc. of the Spatial Sciences Conference*, Canberra. 13p.
4. Arfa, J., Ben Katlane, R., Berges, J.C., Lavie, E., Beltrando, G., Fassetta, G.A., and Zargouni, F. 2017. Vegetation changes detection in Gabes Oases using EO1/Hyperion data. *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration*. pp. 1779-1781.
5. Arnon, D.T. 1949. Copper enzymes in isolated Chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 24: 1-15.
6. Aslani Afousi, Z. 2011. Spectral characterization of dominant tree species leaves in Zagros forests using terrestrial spectroscopy. Master thesis, Shahrekord Univ. 93p. (In Persian)
7. Asner, G.P., and Martin, R.E. 2008. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels. *Remote Sensing of Environment*. 112: 3958-3970.
8. Atzberger, C. 2010. Inverting the PROSAIL canopy reflectance model using neuralnets trained on streamlined databases. *J. Spectral Imagin*. 1: 1-13.
9. Atzberger, C., Darvishzadeh, R., Immitzer, M., Schlerf, M., Skidmore, A., and Maire, G.L. 2015. Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 43: 19-31.
10. Corona, P., Fattorini, L., Franceschi, S., Chirici, G., Maselli, F., and Secondi, L. 2014. Mapping by spatial predictors exploiting remotely sensed and ground data: a comparative design-based perspective. *Remote Sensing of Environment*. 152: 29-37.
11. Danner, M., Berger, K., Wocher, M., Mauser, W., and Hank, T. 2019. Fitted PROSAIL parameterization of leaf inclinations, water content and brown pigment content for winter wheat and maize canopies. *Remote Sensing*. 11: 10. 1150.
12. Danson, F.M., and Bowyer, P. 2004. Estimation live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 92: 309-321.
13. Dashti Ahangar, A., Darvishzadeh, R., Matkan, A.A., and Hajeb, M. 2011. Extraction of rice canopy chlorophyll content using an inversion of canopy radiative transfer model and ALOS images. *Iranian Remote Sensing and GIS*. 2: 71-86. (In Persian)
14. Fava, F., Colombo, R., Bocchi, S., Meroni, M., Sitzia, M., Fois, N., and Zucca, C. 2009. Identification of hyperspectral vegetation indices for mediterranean pasture characterization. *International J. of Applied Earth and Geoinformation*. 11: 233-243.

15. Feret, J.B., François, Ch., Asner, G.P., Gitelson, A.A., Martin, R.E., Bidell, L.P.R., Ustin, S.L., Maire, G.L., and Jacquemoud, S. 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*. 112: 3030-3043.
16. Feret, J-B., Francois, Ch., Gitelson, A., Asner, G.P., Barry, K.M., Panigada, C., Richardson, A.D., and Jacquemoud, S. 2011. Optimizing spectral indices and chemometric analysis of leaf chemical properties using radiative transfer modeling. *Remote Sensing of Environment*. 115: 2742-2750.
17. Feret, J.B., Gitelson, A.A., Noble, S.D., and Jacquemoud, S. 2017. PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. *Remote Sensing of Environment*. 193: 204-215.
18. Fernandes, A.M. 2019. De novo shoot organogenesis and leaf development in *Passiflora edulis* Sims: a morpho-physiological and molecular approach. Master thesis, Federal de Viçosa Univ. 137p.
19. Gara, T.W., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Wang, T., and Heurich, M. 2019. Evaluating the performance of PROSPECT in the retrieval of leaf traits across canopy throughout the growing season. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 83: 1-15.
20. Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., and Chivkunova, O.B. 2001. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and photobiology*. 74: 38-45.
21. Hansen, P.M., and Schjoerring, J.K. 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*. 86: 542-553.
22. Hosseinzadeh, J., and Pourhashemi, M. 2015. An investigation on the relationship between crown indices and the severity of oak forests decline in Ilam. *Iranian J. of Forestry*. 1: 57-66. (In Persian)
23. Hu, B., Miller, J.R., Chen, J.M., and Hollinger, A. 2004. Retrieval of the canopy leaf area index in the BOREAS flux tower sites using linear spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*. 89: 176-188.
24. Jacquemoud, S., and Baret, F. 1990. Prospect-a model of leaf optical-properties spectra. *Remote Sensing of Environment*. 34: 75-91.
25. Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P., Asner, G.P., François, Ch., and Ustin, S.L. 2009. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*. 113: 56-66.
26. Jafari, M. 2012. Climate and environmental impacts on beech and oak wood production in the Hyrcanian forests. *Iranian J. of Wood and Paper Science Research*. 27: 386-408. (In Persian)
27. Jay, S., Bendoula, R., Hadoux, X., Feret, J.B., and Gorrette, N. 2016. A physically-based model for retrieving foliar biochemistry and leaf orientation using close-range imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*. 177: 220-236.
28. Kalacska, M., Calvo-Alvarado, J.C., and Sanchez-Azofelfa, G.A. 2005. Calibration and assessment of seasonal changes in leaf area index of a tropical dry forest in different stages of succession. *Tree Physiology*. 25: 733-744.
29. Malenovsky, Z., Albrechtova, J., Lhotakova, Z., Zurita-milla, R., Clevers, J.G.P.W., Schaepman, M.E., and Cudlin, P. 2006. Applicability of the PROSPECT model for Norway spruce needles. *International J. of Remote Sensing*. 27: 5315-5340.
30. Mirzaie, M., Darvishzadeh, R., Shakiba, A., Matkan, A.A., Atzberger, C., and Skidmore, A. 2014. Comparative analysis of different uni- and multi-variate methods for estimation of vegetation water content using hyper-

- spectral measurements. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 26: 1-11.
31. Mirzaei, M., Abbasi, M., Marofi, P., Solgi, A. and Karimi, R. 2018. Spectral discrimination of important orchard species using hyperspectral indices and artificial intelligence approaches. *RS & GIS Natural Resources*. 9: 76-92. (In Persian)
 32. Naseri Karimvand, S., Poursartip, L., Moradi, M., and Susani, J. 2017. Comparing the impact of climate variables on healthy and declined stands of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) in the "Khorram Abad". *Iranian J. of Wood and Paper Industries*. 7: 591-600. (In Persian)
 33. Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., and Filella, I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International J. of Remote Sensing*. 18: 2869-2875.
 34. Rivera, J.P., Verrelst, J., Delegido, J., Veroustraete, F., and Moreno, J. 2014. On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization. *Remote Sensing*. 6: 4927-4951.
 35. Sinha, S.K., Padalia, H., Dasgupta, A., Verrelst, J., and Rivera, J.P. 2020. Estimation of leaf area index using PROSAIL based LUT inversion, MLRAGPR and empirical models: Case study of tropical deciduous forest plantation, North India. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 86: 102027.
 36. Talebi, M., Saqeb Talebi, Kh., and Jahanbazi Gojani, H. 2006. Site demands and some quantitative and qualitative characteristics of Persian Oak (*Quercus brantii* Lindl.) in Chaharmahal & Bakhtiari province (western Iran). *Iranian J. of Forest and Poplar Research*. 14: 67-79. (In Persian)
 37. Thenkabail, P.S., Smith, R.B., and De Pauw, E. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*. 71: 158-182.
 38. Verrelst, J., Romijn, E., and Kooistra, L. 2012. Mapping vegetation Density in a heterogeneous river floodplain ecosystem using pointable CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing*. 4: 2866-2889.
 39. Verrelst, J., Camps-Valls, G., Muñoz-Mari, J., Rivera, J.P., Veroustraete, F., Clevers, J.G., Moreno, J. 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties—A review. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 108: 273-290.
 40. Verrelst, J., Dethier, S., Rivera, J.P., Muñoz-Mari, J., Camps-Valls, G., and Moreno, J. 2016. Active learning methods for efficient hybrid biophysical variable retrieval. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 13: 1012-1016.
 41. Wang, Q., and Li, P. 2011. Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water content using PROSPECT simulated dataset and field reflectance measurements. *Hydrological Processes*. 26: 1230-1241.
 42. Yu, K., Li, F., Gnyp, M.L., Miao, Y., Bareth, G., and Chen, X. 2013. Remotely detecting canopy nitrogen concentration and uptake of paddy rice in the Northeast China Plain. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 78: 102-115.
 43. Zarco-Tejada, P.J., Hornero, A., Beck, P.S.A., Kattenborn, T., Kempeneers, P., and Hernández-Clemente, R. 2019. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline. *Remote Sensing of Environment*. 223: 320-335.



Full Length Research Paper

Spectral reflectance simulation and estimation of chlorophyll and water content of *Pistacia mutica* leaf based on PROSPECT4 model

N. Poorghasemi¹, M. Abbasi^{*2}, A. Jafari³ and H.R. Riyahi Bakhtyari²

¹Ph.D. Student, Dept. of Forest Sciences, Faculty of Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

²Assistant Prof., Dept. of Forest Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

³Associate Prof., Dept. of Forest Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 07.08.2021; Accepted: 08.19.2021

Abstract

Background and Objectives: As the largest forest ecosystem in Iran, Zagros forests are mainly composed of oak and pistachio species. Although *Pistacia mutica* has the ability to adapt to adverse environmental conditions, for optimal establishment and growth, like other tree species, it needs environmental conditions appropriate for its ecological needs. Unfortunately, in recent years, various environmental problems gradually have affected the growth and quality of this species. So, monitoring the quality and health of this species by knowing the biochemical and biophysical properties of the leaves and canopy of these trees could be an appropriate solution. Plant chlorophyll and moisture are important parameters in determining the physiological status, health condition, and stress status of trees. It is possible to estimate these parameters from remote sensing and proximity data, using radiation transfer models that work according to the physics laws and how electromagnetic radiation interacts with trees. The PROSPECT4 model is one of the newest models proposed to estimate the amount of chlorophyll, water content, and leaf dry matter per unit area based on spectral reflectance measurements. The combination of the radiation transfer model with statistical regression has also shown good results for estimating these parameters. Since the first signs of stress in trees appear in their leaves, in this study, the quantitative and qualitative status of this species based on the biochemical parameters of the leaves through non-destructive methods of proximity was investigated. The aim of this study was to simulate spectral reflection and estimated leaf water content and leaf chlorophyll of *Pistacia mutica* using PROSPECT4 radiation transfer model, comparison the measured reflectance and simulated reflectance using PROSPECT4 through spectral indices, and finally evaluation of the PROSPECT4 model in combination with the partial least square regression in estimating leaf chlorophyll and leaf water content.

Materials and Methods: 20 *Pistacia* trees were randomly selected in the Kood Siyah forest of the Felard section of Chaharmahal va Bakhtiyari province. Two leaf samples were taken from each tree from the east and west directions of its crown (a total of 40 samples). The amount of chlorophyll content, equivalent water thickness and leaf dry matter were calculated in the laboratory. Spectral reflectance of leaf samples was measured by SVC HR-1024 spectrometer. Spectral data and values of leaf biophysical and biochemical parameters were entered in the ARTMO toolbox in MATLAB software. Then, PROSPECT4 radiation transfer model was used to simulate spectral reflection and estimate water and leaf chlorophyll of *Pistacia mutica*. Then, using Leave-one-out validation, the performance of the PROSPECT4 in estimating chlorophyll content and leaf water of this species was evaluated.

*Corresponding author: mozhgan.abasi@gmail.com

Results: The results of evaluation by the PROSPECT4 model in estimating chlorophyll content and leaf water content showed that the model in combination with the PLS model has good accuracy in estimating leaf water content ($R^2 = 0.73$, RMSE = 0.0028) and leaf chlorophyll ($R^2 = 0.72$, RMSE = 2.61). The results of paired T-test of spectral indices showed that ARI, ARI2, DWSI, NDWI, and p550 indices were not significantly different between the measured and simulated reflectance.

Conclusion: Based on the results of this study, the combination of the radiation transfer model with regression methods such as PLS has great power in predicting tree parameters. Estimation of forest quality parameters in a vast area of pistachio forests using satellite data along with other radiation transfer models using several tree species and a range of parameters, as well as techniques such as ancillary information, multiple solutions, and other regression methods of simulating spectral reflectance can be recommended.

Keywords: ARTMO toolbox, Leaf chlorophyll, Leaf spectral reflectance, Radioactive transfer models, Zagros forests

