[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

رابطه شاخص سطح برگ گونه بلوط (*Quercus persica*) و بنه (*Pistacia atlantica*) با انعکاس طیفی حاصل از طیف‌سنجی زمینی

نرگس پورقاسمی[۱] و مژگان عباسی[۱*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۱۲)

چکیده

شاخص سطح برگ متغیر کلیدی در تعیین تولید اولیه و چرخه کربن در اکوسیستم‌ها به‌عنوان یک پیش‌بینی کننده مهم برای توضیح فرایندهای اکولوژی جنگل، مدیریت جنگل و مطالعات سنجش از دوری استفاده می‌شود. پایه بیشتر ابزارها و روش‌هایی که در سنجش از دور برای برآورد LAI مورد استفاده قرار می‌گیرند با درنظر گرفتن بازتاب تاج، براساس ساختار هندسی و فضای سه بعدی تاج درختان است. هدف این مطالعه بررسی ارتباط رفتار طیفی دو گونه بلوط (*Quercus persica*) و بنه (*Pistacia atlantica*) با شاخص سطح برگ سه بعدی و دو بعدی است. برای برآورد LAI، جعبه‌ای به ابعاد m ۰/۵ در چهار جهت تاج درخت قرار داده شد و برگ‌های داخل جعبه برداشت شد. انعکاس طیفی برگ‌ها با دستگاه طیف‌سنج زمینی اندازه‌گیری شد. نتایج رگرسیون حداقل مربعات بخشی نشان داد انعکاس در طول موج‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک بیشترین ضریب رگرسیون را با LAI3D و LAI2D دارد. برای گونه بلوط میزان R^2 بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده LAI2D و LAI3D به‌ترتیب برابر ۰/۱۶ و ۰/۲۳ و برای گونه بنه به‌ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۴۲ بود. به‌طور کلی LAI3D نسبت به LAI2D توانست رابطه بهتری با انعکاس طیفی گیاه نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: طیف سنجی زمینی، شاخص سطح برگ، رگرسیون حداقل مربعات بخشی، سنجش از دور، جنگل‌های زاگرس

۱. گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mozhgan.abbasi@nres.sku.ac.ir

مقدمه

مدیریت منابع جنگلی نیاز به داشتن اطلاعات کمی و کیفی در مورد پارامترهایی مانند شاخص سطح برگ، نیتروژن، کلروفیل، رطوبت و غیره دارد (۱۹ و ۴۱). امروزه استفاده از شاخص‌های اکولوژیک برای شناخت وضعیت کمی و کیفی تاج درخت و پایش و ارزیابی تغییرات ایجاد شده در طی زمان امری ضروری است. از جمله شاخص‌های اکولوژیک که در آن ضعف اطلاعات به‌خوبی مشهود است، آگاهی از توان تولید زیست‌توده و شاخص سطح برگ (Leaf Area Index :LAI) است (۷). شاخص سطح برگ کاربرد مهمی در تعیین میزان تغییر فرآیندهای متنوع اکوسیستمی مانند میزان عبور نور و باران، تعرق، فتوسنتز، تنفس گیاه و تنفس هتروتروپیک خاک (از طریق لاشبرگ) دارد (۳۱). بررسی شاخص سطح برگ هم‌چنین در تعیین حاصلخیزی رویشگاه‌های جنگلی کاربرد دارد (۱، ۲، ۴، ۷ و ۱۳). در سال‌های اخیر تغییر شرایط اکولوژیک و پیامدهای ناشی از آن، در کنار سایر چالش‌های موجود اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس را تحت تاثیر قرار داده است. در همین ارتباط پدیده خشکیدگی جنگل‌های بلوط به سرعت گسترش یافته و منجربه آسیب دیدن بخش قابل توجهی از این جنگل‌ها شده است. همه این عوامل در جنگل‌های بلوط و بنه که چهره اصلی جنگل‌های زاگرس را نشان می‌دهند به ضرورت مطالعه متغیر کیفی تاج درختان نظیر شاخص سطح برگ این منطقه می‌افزاید.

هر چند مبنای تعریف شاخص سطح برگ را روش اندازه‌گیری آن تعیین می‌کند (۲۴)، اما به‌طور کلی طبق تعریف بسیار ساده، شاخص سطح برگ، نسبت مجموع مساحت یک طرف برگ گیاه بر سطح تاج پوشش است (۲۱ و ۲۸). روش‌های برآورد LAI به دو دسته عمده مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند که هرکدام از آنها مزیت‌ها و محدودیت‌هایی دارند. روش‌های مستقیم شامل نمونه‌برداری تخریبی (Destructive sampling)، تله جمع آوری لاشبرگ (Litter trap) و روابط آلومتریک هستند. این روش‌ها اگرچه دقیق هستند اما به‌دلیل پیچیدگی، طولانی بودن زمان برآورد، پر زحمت بودن، نیاز به نیروی انسانی بیشتر، هزینه‌های زیاد نمونه‌برداری تخریبی در صورت جمع‌آوری برگ قطع شده درختان (۷)، عدم تکرارپذیری به‌طور فصلی و سالیانه به مطالعات محدود به تک درخت و یا قطعات نمونه محدود می‌شوند و اجرای آنها در سطح وسیع غیرممکن است (۱۳، ۱۹ و ۲۱). از جمله روش‌های غیرمستقیم، ابزارهای اپتیکی هستند. منطق این روش‌ها که از تنوع زیادی نیز برخوردارند، به‌طور عمده بر پایه اندازه‌گیری میزان نور عبور یافته از میان تاج پوشش درختان با استفاده از ابزارهای پیشرفته‌ای مانند عکس‌برداری یا لنز چشم ماهی (۳۰ و ۳۹) ,LAI-2000 (۱۴، ۳۵ و ۴۰) است. تکنیک‌های سنجش از دوری شاخه‌ای از روش‌های اپتیکی محسوب می‌شوند که با به‌کار بردن طیف سنجی زمینی، هوابرد ابرطیفی، ماهواره‌ها و داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی از مقیاس محلی تا قاره‌ای مشکلات تخمین متغیرهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی را حل کرده‌اند (۱۹، ۲۹ و ۴۰). مزیت مهم این روش‌ها غیرمخرب، ساده، سریع و ارزان بودن آنها و از همه مهم‌تر تکرارپذیری به‌طور فصلی و سالیانه و هزینه کمتر است (۱۳ و ۳۶). به‌علاوه، طیف سنجی زمینی با افزایش تعداد باندهای طیفی امکان مطالعه پدیده‌ها در محدوده طول موج طیفی از مرئی تا مادون قرمز دور را فراهم کرده است (۶ و ۱۹). در مطالعات بسیاری از طیف‌سنجی برای تخمین متغیرهایی مانند شاخص سطح برگ (۱۶)، میزان فتوسنتز (۳۷)، رطوبت (۴۱ و ۴۳)، کلروفیل و نیتروژن (۲۶) استفاده شده است. اشنباخ و کاپن (۱۸) برای یک توده ۵۰ ساله با ساختار تاج همگن و افقی توسکا (*Alnus glutinosa*) در شمال آلمان، سه روش برآورد LAI را که شامل استفاده از ابزار LAI-2000، تله جمع آوری لاشبرگ و نمونه‌برداری از نمونه‌ها (جعبه‌های ۳۰×۵۰×۵۰cm) بوده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش جمع‌آوری لاشبرگ و نمونه‌برداری غیرمخرب در محل، بیشترین مقادیر LAI را برآورد کرده و روش LAI-2000 برآورد کمتری داشته است. لی و همکاران (۲۵)، مطالعه‌ای برای تخمین

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

LAI جنگل‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ Peninsula کره، انجام دادند. در این مطالعه رابطه LAI اندازه‌گیری شده در توده جنگلی با تاج بسته با انعکاس طیفی ناشی شده از طیف‌سنجی در دو محیط مختلف یکی اندازه‌گیری‌های طیفی زمینی روی چند لایه از نمونه برگ‌ها و دیگری انعکاس داده‌های سنجنده ETM^+ بررسی شد. درویش‌زاده و همکاران (۱۶)، به‌منظور تخمین شاخص سطح برگ، میزان کلروفیل برگ و میزان کلروفیل تاج انعکاس طیفی تاج چند گونه علفی مدیترانه‌ای با ساختار ناهمگن را با طیف‌سنج زمینی اندازه‌گیری کردند و برای بررسی رابطه این متغیرها با انعکاس طیفی از آزمون‌های تک‌متغیره شامل شاخص‌های باند باریک و انحنای لبه قرمز و رگرسیون خطی چند متغیره، رگرسیون خطی چندگانه گام به گام و حداقل مربعات بخشی استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام R^2 بیشتر و RMSE کمتری نسبت به شاخص‌های باند نزدیک و انحنای لبه قرمز داشته و روش حداقل مربعات بخشی تخمین مناسب‌تری ارائه داده است. نوی روبرسون و همکاران (۳۴) نیز با استفاده از داده‌های طیفی حاصل از طیف‌سنجی زمینی و محاسبه شاخص‌ها، دو شاخص کلروفیل و شاخص بهبود یافته NDVI تحت عنوان WDRVI، را در تخمین شاخص سطح برگ مناسب‌تر دیدند (۲۷). ماهیت داده‌های طیفی حاصل از طیف‌سنجی زمینی به‌گونه‌ای است که مستلزم به‌کارگیری روش‌های خاص برای بررسی تفاوت طیفی پدیده‌ها می‌باشد. یکی از کارآمدترین روش‌ها در این زمینه، رگرسیون چند متغیره حداقل مربعات بخشی (Partial Least Square Regression) می‌باشد که نتایج قابل قبولی را ارائه داده است.

از آنجا که پایه اکثر روش‌های اپتیکی و روش‌های سنجش از دوری در برآورد LAI، مبتنی بر انعکاس طیفی تاج و با درنظر گرفتن ساختار تاج درختان است و در حجم تاج، برگ به نسبت عناصر دیگر سهم بیشتری دارد، در مطالعات طیف‌سنجی، انعکاس طیفی برگ درنظر گرفته می‌شود (۴۰). در این مطالعه نیز رابطه انعکاس طیفی برگ به وسیله طیف سنج زمینی با میزان LAI از طریق روش معمول برآورد LAI یعنی در سطح تاج پوشش (LAI2D) یا در فضای دو بعدی و برآورد آن در فضای سه بعدی (LAI3D) برای دو گونه اصلی جنگل‌های زاگرس (*Quercus brantii* و *Pistacia atlantica*) بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

این مطالعه در دو منطقه از جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری که بخشی از جنگل‌های زاگرس مرکزی هستند انجام شد.

الف- ذخیره‌گاه جنگلی چهارطاق: این ذخیره‌گاه در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرکرد و ۴۰ کیلومتری شهرستان اردل با مساحتی معادل ۴۰۰ هکتار قرار گرفته است. این ذخیره‌گاه از سال ۱۳۶۲ تاکنون تحت قرق کامل بوده است. ارتفاع از سطح دریا در این رویشگاه از حداقل ۲۱۰۰ تا ۳۱۰۰ متر متغیر است. متوسط میزان بارندگی سالیانه ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و براساس روش دومارتن جزء اقلیم نیمه‌مرطوب محسوب می‌شود. در این جنگل گونه‌های درختی بلوط، بادام، بنه، زبان گنجشک و ارس را می‌توان مشاهده کرد. در ارتفاعات این منطقه درخت ارس یا سرو کوه (*Juniperus polycarpos*) به‌صورت گونه غالب ظاهر گشته و توده‌های کم و بیش تنک را به‌وجود می‌آورد. گونه مورد مطالعه در این منطقه بلوط (*Quercus brantii*) است (۳).

ب- منطقه جنگلی فلارد: این منطقه جنگلی در ۱۵۰ کیلومتری شهرستان شهرکرد و در بخش فلارد شهرستان لردگان واقع شده و دارای ۲۰ هزار هکتار جنگل خالص بنه به‌نام جنگل کوت سیاه است که در ۱۰ کیلومتری مال خلیفه قرار دارد. میانگین بارندگی در این منطقه ۵۶۰ میلی‌متر در سال است (۵). گونه مورد مطالعه در این منطقه بنه (*Pistacia atlantica*) است.

اندازه‌گیری زمینی

در این مطالعه تعداد ۴۰ درخت بلوط و ۳۵ درخت بنه به‌طور

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

انتخابی در دامنه‌های جنوبی و غربی مناطق مورد مطالعه (دامنه‌های غالب مناطق) انتخاب شد. موقعیت مکانی هر پایه توسط GPS ثبت شد. برای برآورد LAI در سطح سه بعدی تاج درخت (LAI3D) جعبه‌ای به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر مکعب در هر چهار جهت اصلی تاج درختان (شمال، شرق، غرب و جنوب) قرار داده شد (شکل ۱) و تمامی شاخه‌ها در این فضا قطع شد و برگ‌های آنها مورد شمارش قرار گرفت. در واقع در این مطالعه جعبه به‌عنوان یک پایه درختی درنظر گرفته شد. برای تعیین سطح برگ‌ها، از تک‌تک برگ‌ها با دوربین دیجیتال عکس‌برداری شد و سطح آنها با نرم افزار Image J محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ شاخص سطح برگ دو بعدی (LAI2D) و شاخص سطح برگ سه بعدی (LAI3D) برآورد شدند:

$$LAI2D = \frac{\bar{a} \times n_a}{A} \qquad [۱]$$

$$LAI3D = \frac{\bar{a} \times n_v}{V} \qquad [۲]$$

در این روابط $\bar{a}$: متوسط سطح برگ، n_a: تعداد برگ در واحد سطح، n_v : تعداد برگ در واحد حجم، A: سطح جعبه و V: حجم جعبه است.

اندازه‌گیری طیفی

به‌منظور انجام بهتر تحقیق و تهیه منحنی طیفی گونه‌های مورد نظر، درختانی که دارای تاج بهتر و شاداب‌تر و تنه‌هایی که فاقد بیماری هستند انتخاب و متغیرهای کمی از جمله، ارتفاع، قطر درخت و هم‌چنین شرایط رویشگاه از جمله شیب، جهت منطقه یادداشت شد. ساختار درختان بلوط در مطالعه اخیر شاخه‌زاد و درختان بنه دانه‌زاد است.

اندازه‌گیری طیفی با استفاده از طیف‌سنج‌زمینی به نام ASD Fieldspec®3 زیر نور خورشید در شرایط مناسب اتمسفری و آسمان صاف و آفتابی بین ساعت ۱۰ تا ۱۴ که تشعشع خورشیدی تقریباً ثابت بود، صورت گرفت (۶، ۱۶ و ۱۹). به‌منظور جلوگیری از تداخل بازتاب زمینه با بازتاب نمونه مورد نظر، توده برگی به ضخامت چند لایه برگ در دایره‌ای به قطر ۲۵ سانتی‌متر روی صفحه‌ای سیاه رنگ (پارچه) جمع‌آوری شد و اندازه‌گیری طیفی از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری و عمود بر سطح برگ‌ها صورت گرفت. سطح میدان دید براساس رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\tan \alpha/2 = r/h \qquad [۳]$$

$\alpha = 25^\circ$: زاویه دید سنجنده ، h: ارتفاع دید و r شعاع دایره مورد نظر که معادل ۱۵ سانتی‌مترمربع است (۴۲). به‌منظور کاهش اثر عوامل جوی مانند رطوبت، دما و باد در محیط طبیعی، از هر نمونه ۱۰۰ اسکن (منحنی طیفی) پیاپی در کمتر از یک دقیقه انجام شد که بلافاصله به‌طور خودکار توسط نرم‌افزار RS[3] موجود برروی رایانه میانگین‌گیری شده و به‌صورت یک منحنی طیفی برروی صفحه نمایش نوت بوک نشان داده می‌شود. با وجود شرایط ثابت جوی دستگاه با استفاده از صفحه سفید مخصوص بعد از اندازه‌گیری هر پنج نمونه، کالیبره شد (۶، ۱۶ و ۴۲). اندازه‌گیری‌ها در اواخر مرداد ماه سال ۱۳۹۰ انجام گردید.

رگرسیون حداقل مربعات بخشی (PLSR)

رگرسیون حداقل مربعات بخشی، از تعمیم و ترکیب ویژگی‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تحلیل رگرسیون چند متغیره ایجاد می‌شود (۸). این روش از اطلاعات هر دو متغیر پیش‌بینی و متغیر پاسخ تا حد ممکن استفاده می‌کند و زمانی که تعداد متغیرهای پیش‌بینی بیشتر از نمونه‌های اندازه‌گیری بوده و یا تعداد زیادی متغیر با اطلاعات مشترک باشد (طول موج طیفی پدیده‌ها از ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به‌کار می‌رود که سبب فشرده‌سازی اطلاعات در چند مؤلفه اصلی غیر همبسته می‌شود (۲۰). این مؤلفه‌ها تغییرپذیری با هم متغیر(های) مورد بررسی را به حداکثر می‌رسانند (۱۶) و بر مشکلات هم‌خطی(collinearity) و بیش‌برازش (overfitting) ناشی از نمونه‌های زیاد غلبه می‌کند (۳۳). PLS مجموعه‌ای از متغیرهای وابسته را از مجموعه بزرگی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌کند که روش‌های رگرسیون چندگانه معمول قادر به حل آن نمی‌باشند. مزیت این روش نسبت به تحلیل مؤلفه‌های اصلی

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]



شکل ۱. برداشت زمینی شاخص سطح برگ

این است که نه تنها در محور Yها بلکه در محور Xهـا نیـز بـه فشرده‌سازی اطلاعات می‌پردازد و از اطلاعات متغیر Y نیـز در طول فرایند تحلیل مؤلفه‌ها استفاده مـی‌شـود. بنـابراین یکـی از مزایای رگرسیون PLS تعیین مؤثرترین و یا حساس‌ترین طـول موج‌ها به‌عنوان متغیر X نسبت بـه تغییـرات متغیـر Y براسـاس تعیین مؤلفه‌های اصلی انتخاب شده از متغیر X می‌باشد (۶).

هدف از رگرسـیون PLS سـاخت مـدل پـیش‌بینـی خطـی براساس رابطه $Y=Xb+\alpha$ است که در آن Y متغیر پاسخ، X متغیر پیشگویی کننده، b ضریب رگرسیون و α خطای بـاقی‌مانـده‌هـا است. انتخاب تعداد بهینه از مؤلفه‌ها در PLS یک گام مهم برای به‌دست آوردن مدلی با قدرت پیش‌بینی است. به این منظـور از روش اعتبار متقابل با یک نمونه خارج شـده (Leave-one-out) استفاده می‌شود (۶ و ۱۶). در این روش اعتبارسنجی، یک نمونه از مجموعه نمونه‌ها خارج می‌شود و مدل PLS برای n-1 نمونه برازش می‌شود. این روش تا زمانی که تمام نمونه‌ها خارج شده و n مدل برازش شود، تکرار می‌شود. به‌عبـارت دیگـر از تمـام نمونه‌ها در اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شـود. سـپس مجمـوع مربعات خطای باقی‌مانده (PRESS) از رابطه ۳ و برای بـرآورد ریشه میانگین مربعـات خطـای اعتبـار متقابـل (RMSECV) از رابطه ۴ استفاده می‌شود. تعداد بهینه فاکتورها از نمودار PRESS در مقابل تعداد فاکتورهای PLS بررسی می‌شـود. تعـداد بهینـه فاکتورهـای PLS بـرای کمتـرین میـزان RMSECV مـی‌باشـد. به‌عبارت دیگر جایی که کمتـرین میـزان RMSECV باشـد اثـر بیش برازش حداقل و مدل PLS قوی‌تر است. انتخاب بهتـرین مدل برازش شده براساس آماره RMSECV یـا ریشـه میـانگین مربعات خطای اعتبار متقابل صورت می‌گیرد (۳۲).

$$PRESS = \sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - y_i)^2 \qquad [۴]$$

$$RMSECV = \frac{\sqrt{PRESS_k}}{N} \qquad [۵]$$

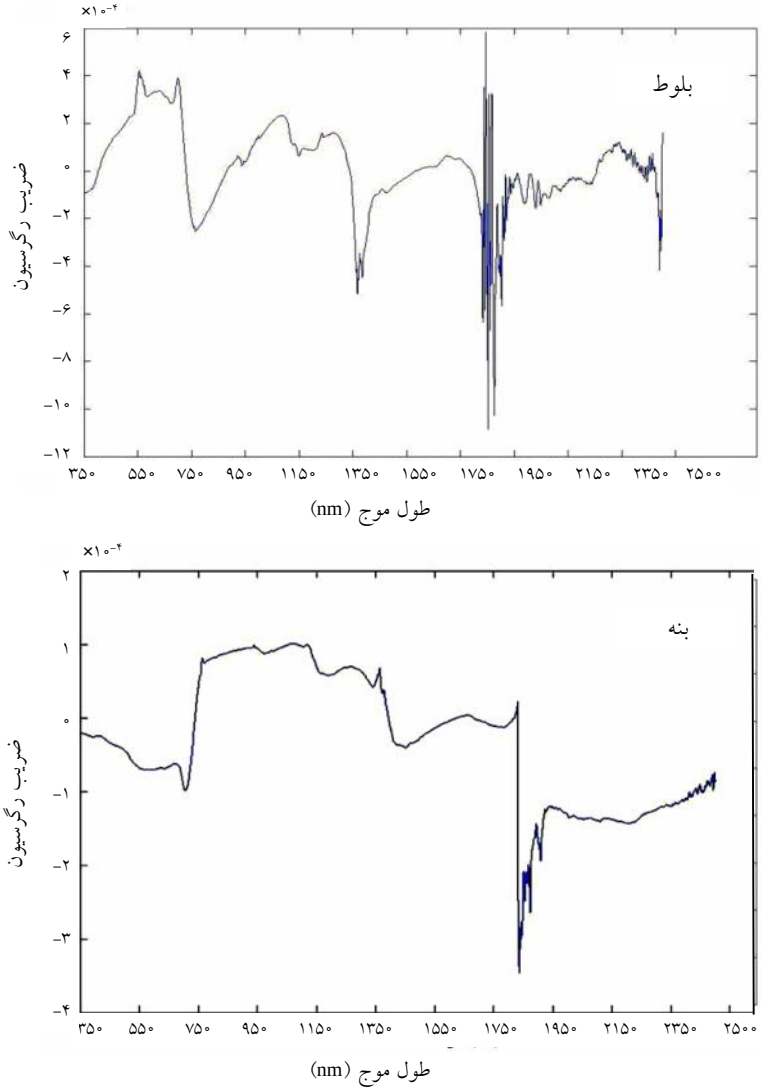
$\hat{y}_i$: مقدار پیش‌بینی شده برای متغیر i ام، y_i: مقدار نمونه i ام، N: تعداد مشاهدات و k تعداد مؤلفه‌های استفاده شده در مـدل PLS هستند.

نتایج

رابطه انعکاس طیفی و متغیر LAI3D با استفاده از مدل PLSR

برای رسیدن به این هدف که کـدام‌یـک از LAI2D یـا LAI3D رابطه قابل قبول‌تری با انعکاس طیفـی دارد، هـر یـک بـه‌طـور جداگانه وارد مدل PLS شدند. براساس نتـایج بـه‌دسـت آمـده برای برازش بهترین مـدل در بـرآورد LAI3D درگونـه بلـوط، فاکتور چهارم و برای بنه فاکتور دوم کمترین میـزان RMSECV را داشت. براساس نتایج به‌دست آمده (شکل ۲) از مدل PLSR، طول موج‌هـای ۵۵۵، ۶۹۹، ۷۶۴، ۱۰۷۴ تـا ۱۰۸۶، ۱۳۶۷ بـرای LAI3D در بلوط و طول موج‌های ۷۲۶ و ۷۵۲ تا ۱۰۰۰ نانومتر در بنه بیشترین ضـرایب و بنـابراین سـهم بیشـتری در بـرآورد LAI3D را داشـتند. ضـریب تبیـین حاصـل از نتـایج تجزیـه واریانس رگرسیون مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شـده

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]



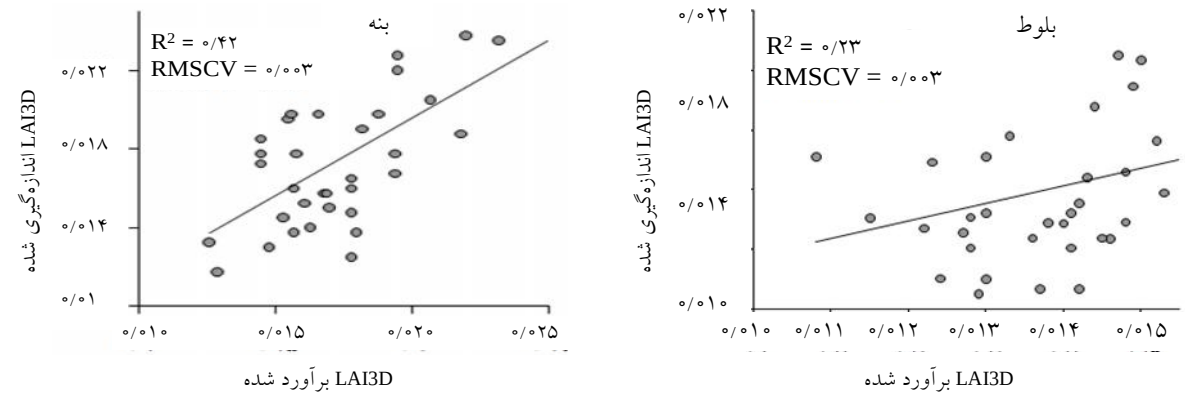
شکل ۲. نمودار ضرایب رگرسیون حاصل از مدل PLS در طول موج‌های مختلف برای LAI3D

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس رگرسیون مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده براساس LAI3D و انعکاس طیفی بلوط و بنه با استفاده از مدل PLS

گونه	رابطه رگرسیون	df باقی‌مانده	ضریب همبستگی	R^2	میانگین مربعات (باقی‌مانده)	t	F	معنی‌داری
بلوط	y=۰/۵۹x +۰/۰۰۶	۳۸	۰/۵	۰/۲۳	۰/۰۰۰	۲/۶۶	۷/۰۶	۰/۰۱
بنه	y=۰/۷۹x +۰/۰۰۴	۳۳	۰/۶۶	۰/۴۲	۰/۰۰۰	۵/۰۲	۲۵/۲۵	۰/۰۰۰

LAI3D با مدل PLS برای بلوط و بنه به‌ترتیب برابر بـا ۰/۲۳ و ۰/۴۲ بود (جدول۱). ابر نقاط مقادیر پیش‌بینـی شـده و بـرآورد شده و هم‌چنین RMSECV حاصل از مدل PLS برای LAI3D در هر دو گونه در شکل ۳ نشان داده شد.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]



شکل ۳. ابر نقاط و رگرسیون خطی برازش داده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده براساس LAI3D و انعکاس طیفی با استفاده از مدل PLS

رابطه انعکاس طیفی و متغیر LAI2D با استفاده از مدل PLS

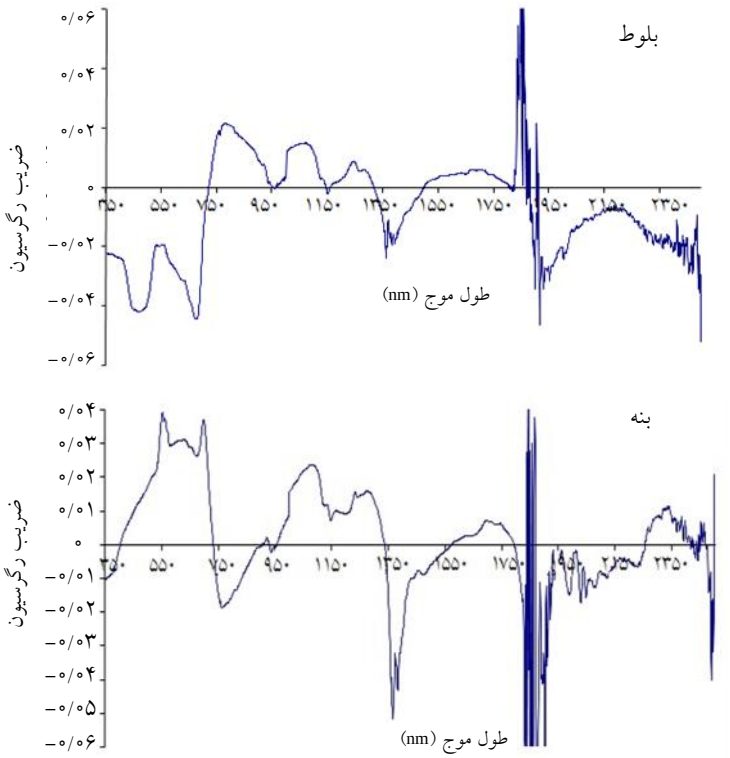
برای برازش بهترین مدل در برآورد LAI2D درگونه بلوط، فاکتور چهارم و برای بنه فاکتور سوم انتخاب شد. طول موج‌های ۵۵۵، ۶۹۹، ۷۶۴، ۱۰۷۴ تا ۱۰۸۶ و ۱۳۶۷ نانومتر برای بلوط و طول موج‌های ۴۶۷ تا ۴۷۲، ۶۷۹، ۷۷۵ تا ۷۸۳ و ۱۰۷۰ نانومتر برای بنه دارای بیشترین ضرایب رگرسیون و سهم بیشتری در برآورد LAI2D داشتند (شکل ۴). ضریب تبیین حاصل از نتایج تجزیه واریانس رگرسیون مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده LAI2D برای بلوط و بنه به‌ترتیب برابر با ۰/۱۶ و ۰/۱۵ بود (جدول ۲). ابر نقاط مقادیر پیش‌بینی شده و برآورد شده و هم‌چنین RMSECV حاصل از مدل PLS برای LAI2D در شکل ۵ نشان داده شد.

بحث

شرایط حاکم بر تنوع رویشگاه بلوط و بنه در جنگل‌های زاگرس از جمله حاصل‌خیزی هم‌چنین مراحل توسعه یا توالی جوامع جنگلی، تغییر فصل و اقدامات مدیریتی همگی دلایل مهم در پویایی متغیر شاخص سطح برگ است. اهمیت این شاخص در پایش وضعیت کیفی جوامع جنگلی در سطح تاج یا توده درختی با وجود تنوع روش‌های برآورد دوچندان می‌شود. لزوم مطالعه و بررسی روشی که در زمان کم با حداقل هزینه بتواند پایش وضعیت کلی توده جنگلی را از نظر کیفی در سطوح مختلف مکانی و زمانی امکان‌پذیر سازد ضرورت طرح فرضیه‌های این تحقیق را در بررسی شاخص سطح برگ در دو نگرش دو و سه بعدی مطرح ساخت.

بررسی ارتباط انعکاس طیفی گیاهان با خصوصیات بیوشیمیایی و ساختاری آنها نشان داده که این ویژگی‌ها مرتبط با خصوصیات نوری برگ و تاج بودند، اما قدرت این ارتباط در سراسر طیف الکترومغناطیسی (محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز دور) متفاوت بود (۹). طبق نتایج یانگ و همکاران (۴۳)، محدوده ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر (طیف قرمز) همبستگی قوی با LAI دارد. در مطالعه حاضر طول موج‌هایی که توانستند در محدوده مرئی رابطه خوبی با هردو LAI2D و LAI3D نشان دهند شامل ۵۵۵، ۶۹۹، ۴۶۷ تا ۴۷۲ و ۶۷۹ بود. برای گونه بنه طول موج‌های ۴۶۷ تا ۴۷۲ رابطه خوبی با LAI2D داشتند. طول موج ۵۵۵ نانومتر، اوج انعکاس در محدوده مرئی است و حساسیت بسیاری به کلروفیل و آنتوسیانین دارد (۳۸). از آنجا که کلروفیل و سایر رنگدانه‌ها ارتباط مستقیمی با شاخص سطح برگ دارند این طول موج هم توانسته حساسیت بیشتری را با LAI3D نشان دهد. در محدوده ۶۷۰ تا ۷۸۰ نانومتر انعکاس طیفی پوشش گیاهی شیب شدیدی بین انعکاس کم در محدوده قرمز

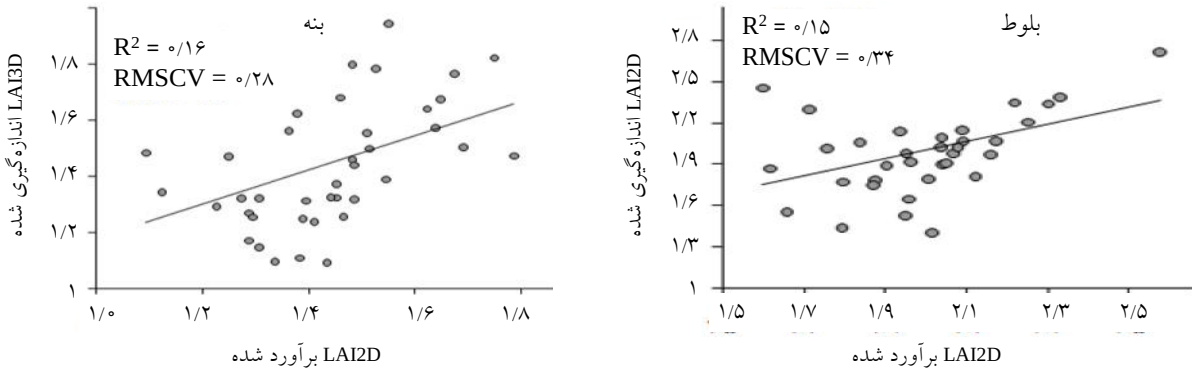
[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]



شکل ۴. نمودار ضرایب رگرسیون حاصل از مدل PLS در طول موج‌های مختلف برای LAI2D

جدول ۲. تجزیه واریانس رگرسیون مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده براساس LAI2D و انعکاس طیفی بلوط و بنه با استفاده از مدل PLS

گونه	رابطه رگرسیون	df باقی‌مانده	ضریب همبستگی	R2	میانگین مربعات (باقی‌مانده)	t	F	معنی‌داری
بلوط	y=۰/۶۱x+۰/۵۶	۳۸	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۰۴۳	۲/۹۳	۸/۵۹	۰/۰۰۶
بنه	y=۰/۶۲x +۰/۷۶	۳۳	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۰۸	۲/۶۵	۷/۰۱	۰/۰۱۲



شکل ۵. ابر نقاط و رگرسیون خطی برازش داده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده براساس LAI2D و انعکاس طیفی با استفاده از مدل PLS

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

(به‌دلیل جذب کلروفیل) و انعکاس زیاد در مادون قرمز نزدیک (به‌دلیل اثر نورپخش در ساختمان سلولی برگ) پیدا می‌کند (۱۶). تاکنون مطالعه‌های بسیاری بر محدوده لبه قرمز به‌منظور تعیین استرس کم آبی (۱۷)، وضعیت نیتروژن (۲۶)، شاخص سطح برگ (۱۳، ۱۵ و ۱۶) و کلروفیل (۱۲ و ۲۲) در سیستم‌های کشاورزی و جنگلداری انجام شده است. در این مطالعه طول موج‌های ۶۹۹ و۷۴۶ نانومتر برای LAI3D بلوط و بنه و ۷۷۵ نانومتر برای LAI2D بنه که در بخش پایانی محدوده لبه قرمز قرار دارند توانستند با LAI رابطه مناسب‌تری نشان دهند. ایمانیشی و همکاران (۲۳) نیز نشان دادند که بخش ابتدایی منطقه لبه قرمز یعنی طول موج ۶۷۶ نانومتر در مشتق دوم و طول موج‌های ۶۹۳/۷ تا ۶۸۷/۸ نانومتر در مشتق اول نشان‌دهنده بهتر شاخص سطح برگ بود. برای LAI3D بنه تنها طول موج‌های ۷۲۶ نانومتر و ۷۵۲ تا ۱۰۰۰ نانومتر که در محدوده مادون قرمز نزدیک قرار دارند با شاخص سطح برگ رابطه مناسب‌تری نشان دادند. از سایر طول موج‌های مناسب محدوده مادون قرمز نزدیک می‌توان طول موج‌های ۱۰۷۴ تا ۱۰۸۶ نانومتر برای بلوط و طول موج ۷۸۳ نانومتر و ۱۰۷۰ نانومتر را برای LAI2D بنه نام برد. محدوده مادون قرمز نزدیک (۷۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر) تحت تأثیر انعکاس ناشی از ساختار درونی برگ و مادون قرمز دور (۱۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) تحت تأثیر جذب رطوبت و مواد شیمیایی از جمله سلولز، لیگنین، پروتئین و نشاسته است (۹ و ۴۱). علاوه بر رنگدانه‌ها و مواد بیوشیمیایی، متغیرهای ساختاری دیگری مانند شاخص سطح برگ، سطح برگ، زاویه برگ، ضخامت برگ و وزن خشک نیز انعکاس طیفی گیاه را در این دو محدوده تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش شاخص سطح برگ انعکاس محدوده قرمز به‌دلیل جذب رنگدانه‌ها کاهش می‌یابد و در مادون قرمز نزدیک به‌دلیل لایه‌های برگ افزایش می‌یابد (۱۱). در مطالعات اسنر (۱۰)، لی و همکاران (۲۵) و درویش زاده و همکاران (۱۶) که به بررسی شاخص سطح برگ در طیف الکترومغناطیسی پرداخته‌اند، نشان داده شده است که تغییرات شاخص سطح برگ بیشتر تحت تأثیر محدوده مادون قرمز نزدیک و سپس مادون قرمز دور است. به‌طوری که تاج‌ها با شاخص سطح برگ بیشتر، انعکاس بیشتری نسبت به تاج‌ها با شاخص سطح برگ متوسط و کم دارند. از آنجا که رفتار طیفی گیاه در طول موج مشخص می‌تواند ناشی از همپوشانی عوامل مختلف نظیر رنگدانه‌ها، رطوبت، ساختار سلولی برگ در شرایط متفاوت و عواملی که ارتباط ضعیف‌تری با شاخص سطح برگ دارد باشد از اینرو انتظار دستیابی به ضریب همبستگی زیاد در صورتی فراهم است که با روش‌هایی از جمله تعیین و یا استفاده از انواع شاخص‌های طیفی (Vegetation index) اثر عوامل ناخواسته حذف یا کم شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی ضرایب رگرسیونی که از طول موج‌های محدوده مرئی با هر دو LAI2D و LAI3D به‌دست آمد قوی‌تر از سایر طول موج‌ها در محدوده‌های دیگر طیف الکترومغناطیسی بود. می‌توان استدلال کرد که شاخص سطح برگ بسیار تحت تأثیر رنگدانه‌های برگ گیاه از جمله کارتنوئید، کلروفیل، آنتوسیانین و غیره بوده که این رنگدانه‌ها توانسته‌اند رابطه شاخص سطح برگ را در محدوده مرئی تحت تأثیر قرار دهند. برای بررسی اینکه کدام‌یک از LAI2D یا LAI3D بر انعکاس مؤثرتر است، هر دو وارد مدل PLS شدند. اگرچه تفاوت R^2 برای بلوط ناچیز بود اما برای گونه بنه این تفاوت قابل توجه بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت LAI3D رابطه قابل قبول‌تری با انعکاس طیفی نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود ارتباط LAI با رفتار طیفی گونه‌ها، از طریق شاخص‌های طیفی نیز بررسی شود و در این شاخص‌ها از طول موج‌هایی استفاده شود که براساس نتایج این تحقیق رابطه قابل قبول‌تری با LAI2D و LAI3D نشان داده است.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

منابع مورد استفاده

۱. بابایی کفاکی، س.، ا. خادمی و ا. متاجی. ۱۳۸۸. بررسی شاخص سطح برگ آوری و ارتباط آن با شرایط فیزیوگرافی و خاک رویشگاه (مطالعه موردی: جنگل‌های منطقه اندبیل خلخال). *فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران* ۱۷(۲): ۲۸۰-۲۸۹.

۲. خادمی، ا.، ب. کرد و س. پورعباسی. ۱۳۹۰. برآورد شاخص سطح برگ اقاقیا و بررسی همبستگی آن با شرایط فیزیولوژیک و مشخصه‌های خاک و رویش (مطالعه موردی: جنگل‌کاری بام ملایر). *فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی* ۶(۱): ۵۲-۴۱.

۳. رئیسی، ف.، ا. اسدی و ج. محمدی. ۱۳۸۴. اثر چرای درازمدت بر پویایی کربن لاشبرگ در اکوسیستم‌های مرتعی سبزکوه استان چهارمحال و بختیاری. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک* ۹(۳): ۱۱-۱.

۴. زرگران، م. ۱۳۸۰. بررسی زیوزن برگ، شاخص سطح برگ و رابطه آن با برخی از ویژگی‌های توده و خاک در قطعه بررسی دائمی جنگل‌های میان‌بند خزر. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۹۷ ص.

۵. طالبی، م.، خ. ثاقب طالبی و ح. جهانبازی گوجانی. ۱۳۸۵. بررسی نیاز رویشگاهی و برخی خصوصیات کمی و کیفی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) در جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری. *فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران* ۱۴(۱): ۷۹-۶۷.

۶. عباسی، م. ۱۳۸۸. بررسی مشخصه‌های طیفی برگ گونه‌های راش، ممرز، توسکا، بلوط، انجیلی با استفاده از طیف سنجی زمینی، رساله دکترای جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۱۲ ص.

۷. عدل، ح. ۱۳۸۶. برآورد بیوماس برگ و شاخص سطح برگ دو گونه عمده جنگل‌های یاسوج، *فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران* ۱۵(۴): ۴۲۶-۴۱۷.

8. Abdi, H. 2003. Partial Least Squares (PLS) Regression. *Encyclopedia for research methods for the social science*s 792-795.
9. Adam, M., B. F. T. Rudorff, F. M. Breunig, F. J. Ponzoni, L. S. Galvão, M. A. Moreira, J. G. Freitas and V. Marino Rodrigues Sala. 2009. Effect of nitrogen and endophytic bacteria on biophysical and spectral parameters of wheat canopy. *Agronomy Journal* 102: 544-552.
10. Anser, G. P. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64: 134-153.
11. Atezberger, C., T. Jarmer and M. Schlerf. 2003. Spectroradiometric determination of wheat bio-physical variables. Comparison of different empirical-statistical approaches. Remote Sensing in Transition, Ghent, Belgium, 10p.
12. Black burn, G. A., 1999. Relationship between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves. *Remote Sensing of Environment* 70: 224-237.
13. Brantley, S., J. C. Zinnert and D. R. Young. 2011. Application of hyperspectral vegetation indices to detect variations in high leaf area index temperate shrub thicket canopies. *Remote Sensing of Environment* 115: 514-523
14. Cutini, A., G. Matteucci and G. S. Mugnozza. 1998. Estimation of leaf area index with Li-Cor LAI 2000 in deciduous forest. *Forest Ecology and Management* 105: 55-65.
15. Danson, F. M. and S. E. Plummer. 1995. Red edge response to forest leaf area index. *International Journal of Remote Sensing* 16: 183-188.
16. Darvishzadeh, R., A. Skidmore, M. Schlerf, C. Atzberger, F. Corsi and M. Cho. 2008. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63: 409-426.
17. Eitel, J. U. H., P. E. Gessler, A. M. S. Smith and R. Robberecht. 2006. Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in Populus spp. *Forest Ecology and Management* 229: 170-182.
18. Eschenbach, Ch. and L. Kappen. 1996. Leaf area index determination in an alder forest: a comparison of three methods. *Journal of Experimental Botany* 47: 1457-1462.
19. Fava, F., R. Colombo, S. Bocchi, M. Meroni, M. Sitzia, N. Fois and C. Zucca. 2009. Identification of hyperspectral vegetation indices for mediterranean pasture characterization. *International Journal of Applied Earth and*

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

Geoinformation 11: 233-243.
20. Hansen, P. M. and J. K. Schjoerring. 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.
21. Heiskanen, J. 2006. Remote sensing of mountain Birch Forest biomass and leaf area index using Aseter data. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1135-1158.
22. Horler, D. N. H., M. Dockray and J. Barber. 1983. The red edge of plant reflectance. *Remote Sensing Environment* 4: 273-288.
23. Imanishi, J., K. Sugimoto and Y. Morimoto. 2004. Detecting drought status and LAI of two *Quercus* species canopies using derivative spectra. *Computers and Electronics in Agriculture* 43: 109-129.
24. Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss and F. Baret. 2004. Reviw of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, Sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
25. Lee, K. S., I. Y. Park, S. H. Kim, J. H. Park, C. S. Woo and K. C. Jang. 2006. Remote sensing estimation of forest LAI in close canopy situation. *Korean Journal of Remote Sensing* 22(5): 305-311.
26. Lee, Y. J., C. M. Yang, K. W. Chang and Y. Shen. 2011. Effects of nitrogen status on leaf anatomy, chlorophyll content and canopy reflectance of paddy rice. *Botanical Studies* 52: 295-303.
27. Li, X., Y. Zhang, Y. Bao, J. Luo, X. Jin, X. Xu, X. Song and G. Yang. 2014. Exploring the best hyperspectral features for LAI estimation using partial least squares regression. *Remote Sensing* 6: 6221-6241.
28. Liu, R., J. M. Chen, J. Liu, F. Deng and R. Sun. 2007. Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research. *Journal of Environmental Management* 85: 649-658.
29. Ma, Z. G., X. Chen, Q. Wange, P. Li and G. Jiapaer. 2012. Retrieval of leaf biochemical properties by inversed PROSPECT model and hyperspectral indices: an application to Populus euphratica polymorphic leaves. *Journal of Arid Land* 4: 52-62.
30. Macfarlane, C., S. K. Arndt, S. J. Livesly, A. C. Edgar, D. A. White, M. A. Adams and D. Eamus. 2007. Estimation of leaf area index in Eucalypt Forest with vertical foliage, using cover and full frame fisheye photography. *Forest Ecology and Management* 242: 256-263.
31. Maire, G. L., C. Marsden, W. Verhoef, F. J. Ponzoni, D. L. Seen, A. Bégué, J. L. Stape and Y. Nouvellon. 2010. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment* 115(2): 58-599.
32. Mazarevica, G., J. Diewok, J. R. Baena, E. Rosenberg and B. Lendl. 2004, On-Line fermentation monitoring by mid-infrared spectroscopy. *Society for Applied Spectroscopy* 58: 804-810.
33. Nguyen, H. T., J. H. Kim, A. T. Nguyen, L. T. Nguyen, J. C. Shin and B. W. Lee. 2006. Using canopy reflectance and partial least squares regression to calculate within-field statistical variation in crop growth and nitrogen status of rice. *Precision Agriculture* 7: 249-264.
34. Nguy-Robertson, A. L., Y. Peng, A. A. Gilteson, T. J. Arkebauer, A. Pimstein, I. Herrmann, A. Karnieli, D. C. Rundquist and D. J. Bonfil. 2014. Estimating green LAI in four crops: Potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm. *Agricultural and Forest Meterology* 192-193: 140-148.
35. Ryu, Y., T. Nilson, H. Kobayashi and O. Sonnentag. 2010. On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects? *Agricultural and Forest Meteorology* 150(3): 463-472.
36. Schaepman, M. E., S. Sandmeier, K. I. Itten, P. Meyer and T. Kellenberger. Spectral signature analysis using a field goniometer mounted spectroradiometer. https://www.researchgate.net/profile/Tobias_Kellenberger/publication/234839993_Spectral_Signature_Analysis_Using_a_Field_Goniometer_Mounted_Spectroradiometer/links/0deec5278925a88c8d000000.pdf.
37. Serbin, S. P., D. N. Dillaway, E. L. Kruger and P. A. Townsend. 2011. Leaf optical properties reflect variation in photosynthetic metabolism and its sensitivity to temperature. *Journal of Experimental Botany* 6: 1-14.
38. Sims, D. A. and J. A. Gamon. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81: 337-354.
39. Van Gardinge, P. R., G. E. ackson, S. Hernandez-Daumas, G. Russell and L. Sharp. 1999. Laef area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 94: 243-257.
40. Vuolo, F., N. Neugebauer, S. F. Bolognesi, C. Atzberger, and G. D'Urso, 2013. Estimation of leaf area index using DEIMOS-1 data: Application and transferability of a semi-empirical relationship between two agricultural areas. *Remote Sensing* 5(3): 1274-1291.
41. Wang, J., R. Xu and S. Yang. 2009. Estimation of plant water content by spectral absorption features centered at

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]

1,450 nm and 1,940 nm regions. *Environment Monitoring and Assessment* 157(1-4): 459-469.
42. www.gep.uchile.cl/Biblioteca/radiometr%C3%ADa%20de%20campo/TechGuide.pdf. ASD field portable spectroradiometer guide.
43. Yang, Z. Z. Y., M. XinMing, L. GuoShun, J. FangFang, Q. HongBo, Z. YingWu, L. Shizhao, S. WenFeng. 2011. A study on hyperspectral estimating models of tobacco Leaf Area Index. *African Journal of Agricultural Research* 2: 289-295.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.24763128.1395.5.16.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.16.55]