



نسخه آردور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.14, No. 4, Winter 2023

۱۱۹-۱۳۴

مقاله پژوهشی

ارزیابی قابلیت طیف‌سنجی بازتابی در برآورد میزان کلروفیل و نیتروژن گندم

علی صادقی^{۱*}، سهام میرزایی^۲، ساغر چاخارلو^۳، مهدی غلام‌نیا^۴، حسینعلی بهرامی^۵

۱. استادیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان

۲. دکتری سنجش از دور، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

۳. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز

۴. استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج

۵. استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

چکیده

کلروفیل و نیتروژن برگ، به دلیل نقش مهمی که در فتوسنتز دارند، از شاخص‌های بیولوژیک مهم وضعیت فیزیولوژیک گیاهان به‌شمار می‌روند. توانایی در کمی‌سازی میزان کلروفیل و نیتروژن می‌تواند اطلاعات مهمی در زمینه فعالیت‌های کشاورزی دقیق، برنامه‌ریزی مدیریت منابع گیاهی و کشاورزی، و مدل‌سازی خدمات و قابلیت‌های تولید اکوسیستم تهیه کند. هدف از این مطالعه ارزیابی قابلیت شاخص‌ها، به‌منظور تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن گندم، با استفاده از داده‌های طیف‌سنجی در سطح تاج‌پوشش و همچنین تعیین مناسب‌ترین نواحی طیفی و پدیده‌های جذبی است. این پژوهش در محیط گلخانه انجام شد و اندازه‌گیری طیفی با دستگاه طیف‌سنج Fieldspec-3-ASD صورت گرفت. چهار شاخص باریک باند گیاهی، در قالب دو دسته شاخص‌های نسبتی (NDVI، RVI و DVI) و شاخص تعدیل‌کننده تأثیر خاک (SAVI₂) برای بازتاب طیفی و مشتق اول طیف برای کل نمونه‌ها، محاسبه و نتایج آنها مقایسه شد. پارامترهای عمق باند ماکزیمم، طول موج عمق باند ماکزیمم، مساحت، چولگی و پهنای کامل در نصف مقدار بیشینه، درمورد هفت پدیده جذبی محاسبه و همبستگی این شاخص‌ها با غلظت کلروفیل و نیتروژن گندم بررسی شد. نتایج نشان دادند، در صورتی که از طیف بازتابندگی استفاده شود، شاخص SAVI₂ ارتباطی قوی‌تر ($R^2=0.85$ ، $RMSE=0.12$) از دیگر شاخص‌ها با میزان کلروفیل نشان می‌دهد و درمورد شاخص NDVI نیز، این ارتباط قوی‌تر ($R^2=0.69$ ، $RMSE=0.30$) از شاخص‌های دیگر با میزان نیتروژن خواهد بود؛ درحالی که با استفاده از مشتق اول بازتاب طیفی شاخص NDVI نتایج بهتری ارائه می‌دهند. مساحت و عمق محدوده جذبی ۴۳۰-۷۶۰ نانومتر برای مطالعه میزان کلروفیل و نیتروژن گندم بهترین شاخص‌ها محسوب می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: کلروفیل، نیتروژن، گندم، طیف‌سنج، شاخص باریک باند، حذف پیوستار.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: اصفهان، میدان آزادی، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، کدپستی: ۸۱۷۴۶۷۳۴۴۱. تلفن: ۰۹۱۳۱۸۳۲۰۰۸

۱- مقدمه

برای پایش غیرمخرب و هم‌زمان وضعیت کلروفیل و نیتروژن غلات، مطرح شده است (Zhu et al., 2008). داده‌های ابرطیفی^۱، به‌دلیل پیوستگی و پهنای کم باندهای طیفی، قابلیت بالایی در پایش رشد گیاهان و تخمین ویژگی‌های بیوفیزیکی (Darvishzadeh et al., 2016; Bahrami et al., 2008) دارند. همچنین طیف‌سنجی دارای دقت بالایی در تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن گیاهان در سطح برگ است (Yoder & Pettigrew-Crosby, 1995); (Wang et al., 2012). در مدیریت وضعیت کلروفیل و نیتروژن برای تولید غلات، طیف‌سنجی در سطح تاج‌پوشش اهمیت بیشتری از طیف‌سنجی در سطح برگ دارد زیرا اطلاعات را در مورد کل گیاه ارائه می‌دهد (Yao et al., 2010) اما به‌کارگیری طیف‌سنجی در سطح تاج‌پوشش، برای بررسی وضعیت کلروفیل و نیتروژن، چالش برانگیز است به این دلیل که عواملی همچون ویژگی‌های بیوفیزیکی، ساختار تاج‌پوشش گیاهان، خاک زمینه و تأثیرات اتمسفر در آن دخالت دارند (Asner & Martin, 2008; Dorigo et al., 2007).

به‌طور کلی ویژگی‌های طیفی گیاهان در طول موج‌های متفاوت، تحت تأثیر ساختارهای درون و برون سلولی برگ، غلظت مواد بیوشیمیایی از جمله کلروفیل، کارتنوئید، نیتروژن و میزان آب‌برگ قرار دارد (Abbasi et al., 2009). کلروفیل‌ها پیک‌های بازتابندگی بسیار قوی در محدوده طیفی آبی و قرمز دارند اما پیک آبی، به‌دلیل هم‌پوشانی با پیک جذبی کارتنوئیدها، در تعیین میزان کلروفیل به‌کار نمی‌رود و بیشترین جذب نیز در محدوده قرمز، بین ۶۶۰ تا ۶۸۰ نانومتر، اتفاق می‌افتد (Sims & Gamon, 2002). مدل‌های تجربی تخمین میزان کلروفیل اغلب براساس بازتابندگی حدود ۵۵۰ یا ۷۰۰ نانومتر است؛ در این محدوده‌های طیفی، میزان جذب در میزان کلروفیل بالا به اشباع می‌رسد و شاخص‌های مورد نظر، در تخمین

با توجه به توسعه سامانه‌های هوشمند، کمی‌سازی میزان کلروفیل و نیتروژن می‌تواند اطلاعات مهم و دقیقی در زمینه مدیریت منابع گیاهی و کشاورزی فراهم آورد (Main et al., 2011). میزان غلظت کلروفیل و نیتروژن در ماده خشک برگ نشان‌دهنده میزان نیازمندی غلات است و از مهم‌ترین شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه به‌شمار می‌روند که در فتوسنتز، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند (Carter, 1994; Lichtenthaler, 1998; Hansen & Schjoerring, 2003). اندازه‌گیری میزان کلروفیل برگ نیز، خود به‌تنهایی، می‌تواند در مطالعه و آشکارسازی وضعیت مواد غذایی گیاه و تنش به‌کار رود (Zarco-Tejada et al., 2013). مقدار کلروفیل، در واحد سطح برگ، شاخصی مهم از شرایط کلی گیاه است و انتظار می‌رود برگ‌های گیاهان سالمی که قابلیت رشد بیشتری دارند میزان کلروفیل بیشتری داشته باشند. به‌عبارت دیگر، کلروفیل مهم‌ترین رنگ‌دانه برای فتوسنتز است (Yoder & Pettigrew-Crosby, 1995; Niinemets & Tenhunen, 1997). نیتروژن نیز عنصری ضروری برای رشد گیاهان محسوب می‌شود اما به‌کارگیری بیش‌از‌حد آن در مزارع، به‌دلیل اینکه گیاهان نیتروژن را بیشتر از نیازشان جذب نمی‌کنند، باعث هدررفت منابع می‌شود و حتی برای محیط‌زیست مضر است (Ju et al., 2009). مقدار نیتروژن مورد نیاز گیاه نیز با توجه به گونه گیاه، مرحله رشد و اندام مورد نظر، بین ۲ تا ۵٪ وزن خشک است و با کاهش آن، رشد گیاه کاهش می‌یابد. مدیریت دقیق وضعیت نیتروژن بسیار اهمیت دارد؛ به‌طوری‌که ارزیابی هم‌زمان و دقیق وضعیت نیتروژن غلات در مزرعه شیوه‌ای مؤثر در بهبود کارایی و استفاده از ازت و نیز میزان و کیفیت محصول دهی غلات است (Raun et al., 2002). روش‌های معمول و رایج ارزیابی هم‌زمان و دقیق وضعیت کلروفیل و نیتروژن غلات معایبی دارند؛ همچون آسیب‌دیدگی ناشی از نمونه‌برداری، نیازمند به کار میدانی زیاد و ارائه نتایج با تأخیر زمانی. امروزه تکنیک سنجش از دور، به‌منزله روش جایگزین

1. Hyperspectral

اشاره کرد. با تغییر در ترکیب شیمیایی مواد، تغییراتی در مکان و شکل، مساحت و تقارن پدیده‌های جذبی ایجاد می‌شود (Clark, 1999). هر پدیده جذبی دارای دامنه طول موج است اما دامنه مورد نظر معمولاً با طول موج وسط معرفی می‌شود. دامنه طول موج این پدیده‌های جذب ممکن است هم‌پوشانی نیز داشته باشند. بسیاری از روش‌های تجزیه و تحلیل طیفی در محدوده پدیده‌های جذبی شناخته شده انجام می‌شوند؛ از این رو به منظور مطالعه دقیق پدیده‌های جذب و مقایسه آنها، نرمال و بازسازی منحنی در محدوده‌های مورد نظر ضرورت دارد (Mutanga et al., 2003). روش‌های تجزیه و تحلیل حذف پیوستار^۳ به منظور جداسازی و تحلیل عارضه‌ها جذبی ارتقا و گسترش یافته است (Clark, 1999) که امکان مقایسه پدیده‌های جذبی معین را بهتر فراهم می‌سازد. حذف پیوستار تأثیرات نامطلوب خاک زمینه و جذب‌های اتمسفری را در آنالیز طیفی نیز به حداقل می‌رساند (Kokaly & Clark, 1999). در جدیدترین تحقیقات، مدلی اپتیکی ارائه شده است که با استفاده از تصویربرداری، مقدار کلروفیل را در سطح برگ ارائه می‌دهد (Pérez-Patricio et al., 2018).

از آن جاکه در کشور ایران گندم مهم‌ترین گیاه زراعی به‌شمار می‌رود (Zahedifar et al., 2011) و در مقایسه با سایر محصولات و غلات، بیشترین سطح زیرکشت را به خود اختصاص می‌دهد (Abdolzadeh & Safari, 2002; Greenway & Munns, 1980). برآورد میزان کمی کلروفیل و نیتروژن گندم با استفاده از تکنیک‌های جدید و غیرمخرب اهمیت بسیاری دارد. به‌طور کلی اغلب مطالعات و بررسی‌های سنجش از دوری صورت گرفته، در برآورد میزان کلروفیل و نیتروژن گندم، در مقیاس بزرگ انجام شده‌اند و مطالعات چندانی در مورد قابلیت روش‌های شاخص‌های طیفی و حذف پیوستار در دسترس نیست؛ بنابراین

میزان کلروفیل، صحت بالایی دارند. روش‌های تجربی یا آماری و روش فیزیکی دو روش معمول در تخمین پارامترهای پوشش گیاهی، با استفاده از داده‌های سنجش از دوری محسوب می‌شوند. در روش تجربی یا آماری، معمولاً از همبستگی بین متغیر هدف و بازتاب طیفی آنها یا تعدادی شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده می‌شود. روابط آماری به‌دست آمده متعلق به آن سنجنده خاص است و متناسب با موقعیت‌های مکانی و زمانی و شرایط نمونه، دچار تغییر خواهد شد (Colombo et al., 2003; Meroni et al., 2004). به‌طور کلی شاخص‌های گیاهی، به‌منزله روشی آماری، در زمینه کمی‌سازی پارامترهای پوشش گیاهی کاربرد بسیار گسترده‌ای دارند (Thenkabail et al., 2000). تا به امروز، بیشتر شاخص‌های پوشش گیاهی^۱ به‌منظور استفاده در داده‌های چندطیفی و یا دیگر داده‌های بازتابندگی با پهنای باند زیاد، توسعه یافته‌اند. داده‌های سنجش از دور مبتنی بر باندهای پهن، به‌دلیل استفاده از میانگین اطلاعات طیفی در سراسر باند که منجر به ازدست‌رفتن اطلاعات طیفی مهم در باندهای طیفی باریک می‌شود، برای تخمین ویژگی‌های طیفی با محدودیت مواجه است (Hansen & Schjoerring, 2003). به‌تازگی روش ماتریس همبستگی برای انتخاب بهترین عملکرد شاخص‌ها در مورد گندم (Hansen & Liu et al., 2010; Schjoerring, 2003)، برنج، ذرت، سویا، پنبه و گوجه (Thenkabail et al., 2000) و علفزار (Darvishzadeh et al., 2008)، نهال درخت بلوط (Darvishi Bolorani et al., 2020) استفاده شده است. براین‌اساس شاخص‌های جدید پوشش گیاهی را با ترکیب تصادفی دو یا چند باند، از بین تمامی باندهای موجود، شناسایی و میزان همبستگی آنها را با میزان متغیر مورد نظر، ارزیابی می‌کند.

همواره در برخی طول موج‌های یک منحنی بازتاب طیفی، پدیده جذبی^۲ دیده می‌شود. از جمله پدیده‌های جذب مهم، می‌توان به جذب آب، کلروفیل و نیتروژن

1. Narrow Band Vegetation Indices
2. Absorption Feature
3. Continuum Removal

هدف از این مطالعه تعیین قابلیت روش‌های شاخص‌های باریک باند گیاهی و روش حذف پیوستار در تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن گندم و تعیین طول موج‌ها و محدوده‌ها و پدیده‌های طیفی مهم مرتبط با میزان نیتروژن و کلروفیل در گندم است. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های طیف‌سنجی گندم در سطح تاج‌پوشش، مقدار کمی کلروفیل و نیتروژن گندم تخمین زده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۱ تا خرداد ۱۳۹۲، در محیط گلخانه انجام شد. طی آن، در اولین مرحله، بذرهاي گندم (*Triticum aestivum* L) از مؤسسه تحقیقات اصلاح بذر و نهال تهیه شد. در مرحله بعد، این بذرها در گلدان‌های پلاستیکی، به قطر دهانه ۱۸ و ارتفاع ۱۴، کاشته شد و دما و رطوبت و سایر شرایط گلخانه، با توجه به مرحله رشد به‌طور متناسب تنظیم گردید.

• اندازه‌گیری طیفی

اندازه‌گیری‌های طیفی از نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج 3 Fieldspec، در اتاق تاریک انجام شد تا از ورود هرگونه نور اضافی جلوگیری شود و تأثیر تابش‌های پراکنده به کمترین میزان برسد. دستگاه طیف‌سنج نام‌برده اندازه‌گیری طیفی را در محدوده ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر، با نمونه‌گیری طیفی با فاصله ۱/۴ نانومتر در محدوده ۱۰۰۰-۳۵۰ و ۲ نانومتر در محدوده ۲۵۰۰-۱۰۰۰ نانومتر، انجام می‌دهد. به‌منظور اندازه‌گیری‌های طیفی، ابتدا حسگر فیبر نوری با میدان دید ۸ درجه در پیستول جای‌گذاری شد و به‌صورت عمودی روی سه‌پایه‌ای در ارتفاع ۹۰ سانتی‌متری از سطح گلدان قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که برای طیف‌سنج میدان مشاهداتی دایره‌ای شکل، به قطر ۱۳ سانتی‌متر، در سطح گلدان مهیا شد. از لامپ هالوژن ۲۵۰ وات با زاویه ۷۵ درجه و ارتفاع ۹۵ سانتی‌متر، به‌منزله منبع

نور مصنوعی استفاده شد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌های اولیه با استفاده از طیف‌سنج، تحت تأثیر منبع نور قرار دارد، نقطه مرکز گلدان با مرکز نور و مرکز میدان دید سنجنده^۱ تنظیم شد. بدین ترتیب اطمینان حاصل شد که FOV سنجنده به‌طور کامل با گلدان پوشش داده می‌شود. در این روش، شرایط نوری ثابت است و میزان بازتابندگی متفاوت، با توجه به سطح برگ و شکل برگ گونه‌ها، تغییر می‌کند. به‌منظور دستیابی به میانگینی از اختلاف‌ها در جهت تاج‌پوشش، پس از هر بار اندازه‌گیری، گلدان ۴۵ درجه چرخانده شد و بار دیگر اندازه‌گیری انجام گرفت.

• اندازه‌گیری نیتروژن و کلروفیل گندم

به‌منظور اندازه‌گیری غلظت کلروفیل، از دستگاه کلروفیل سنج (SPAD-502) استفاده شد. این دستگاه میزان کلروفیل را با روش ساده و غیرمخرب، با اندازه‌گیری میزان عبور در طول موج‌های ۶۵۰ (قرمز) و ۹۲۰ نانومتر، تخمین می‌زند. دستگاه یادشده مقداری بدون واحد در اختیار می‌گذارد که همبستگی بالایی با میزان کلروفیل گیاه دارد و برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل گونه‌های گیاهی به‌کار می‌رود (Bonneville & Fyles, 2006). به همین منظور، از هر نمونه، ده برگ انتخاب شد که معرف وضعیت نمونه بود. اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه SPAD صورت گرفت و از این ده مقدار، میانگین‌گیری شد. سپس این مقادیر میانگین، با استفاده از تابع کالیبراسیون که مارکول^۲ و همکاران (۱۹۹۵) آن را توسعه داده‌اند، به ارزش واقعی کلروفیل ($\mu\text{g cm}^{-2}$) تبدیل شد. ۶۵ نمونه به‌منظور اندازه‌گیری میزان نیتروژن گندم انتخاب شد و به‌مدت ۷۲ ساعت در آن، با دمای ۷۵ درجه، قرار گرفت. پس از خشک‌شدن کامل، با روش رنگ‌سنجی، میزان نیتروژن کل گیاه اندازه‌گیری شد.

1. Field of View (FOV)

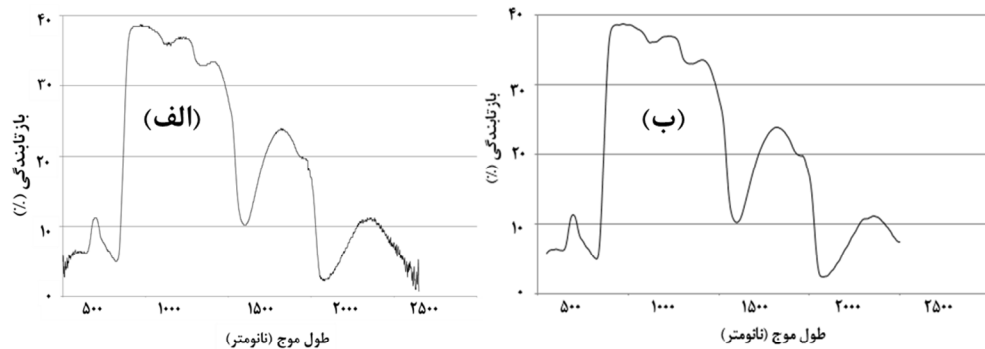
2. Markwell

• پیش‌پردازش داده‌های طیفی

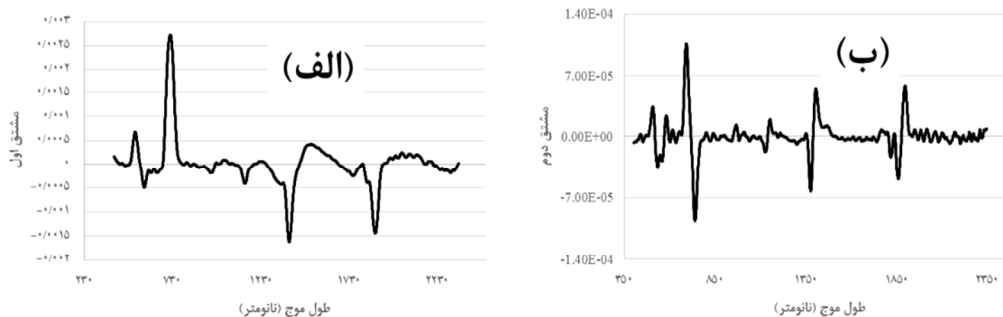
تمامی ۸۱۶ طیف حاصل، پس از تبدیل فرمت، وارد محیط نرم‌افزار MATLAB شد و طول موج‌های بین ۴۰۰-۳۵۰ نانومتر و ۲۵۰۰-۲۴۰۰ نانومتر، به دلیل داشتن نویز بسیار ($\bar{\pm}3$ انحراف معیار از میانگین برای هر نمونه) از داده‌ها حذف شدند؛ بنابراین بازتاب طیفی محدوده ۴۰۰-۲۴۰۰ نانومتر برای اعمال پردازش‌های بعدی استفاده شد. به منظور حذف نویزهای طیف‌های میانگین، فیلتر Savitzky-Golay (۱۹۶۴) با اندازه فریم ۱۵ به کار رفت. شایان توجه است که برای انتخاب اندازه فریم این فیلتر، ابتدا تعداد فریم اندک در نظر گرفته شد و به صورت تجربی، فرم با ابعاد ۱۵ و با ارائه بهترین نتایج، انتخاب شد. پس از اعمال فیلتر نرم‌کننده از هشت طیف اندازه‌گیری شده برای هر نمونه میانگین‌گیری شد؛ در نهایت، ۱۰۲ طیف مربوط گندم به دست آمد. برای نمونه، منحنی بازتابندگی طیفی بدون و با پیش‌پردازش در شکل ۱ و مشتق اول و دوم طیف پیش‌پردازش شده در شکل ۲ نمایش داده شده است.

• شاخص‌های گیاهی باریک باند

چهار شاخص گیاهی برای تمامی ترکیبات طول موجی دوباندی ممکن، بین ۴۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر، محاسبه شد. شاخص‌های باریک باند استفاده شده در این مطالعه شامل شاخص‌های نسبتی و شاخص‌های تعدیل‌کننده اثر خاک می‌شود. شاخص‌های نسبتی به کاررفته در این پژوهش شاخص‌های NDVI و RVI و DVI شاخص تعدیل‌کننده اثر خاک SAVI₂ را دربر می‌گیرد (جدول ۱). به طور کلی شاخص‌های نسبتی بر شاخص‌های تعدیل‌کننده تأثیر خاک ترجیح داده می‌شوند زیرا دسترسی به ویژگی‌های طیفی خاک مشکل است و در صورت وجود دسترسی، ممکن است دستخوش تأثیرات ناشی از تغییرات خاک شوند (Darvishi Boloorani et al., 2020). برای هر یک از این شاخص‌ها، بیشترین مقدار همبستگی و دو طول موج مربوط به آن و نیز محدوده‌های دارای همبستگی بالا به دست آمد.



شکل ۱. منحنی بازتابندگی طیفی: ثبت شده با دستگاه طیف‌سنج (الف)؛ پس از پیش‌پردازش (ب)



شکل ۲. مشتق اول (الف) و مشتق دوم طیف پیش‌پردازش شده (ب)

جدول ۱. فرمول شاخص‌های باریک باند محاسبه‌شده در این مطالعه

نام	شاخص گیاهی	فرمول محاسبه‌شده
NDVI	شاخص اختلاف تفاضلی نرمال‌شده	$\frac{\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}}{\rho_{\lambda_1} + \rho_{\lambda_2}}$
RVI	شاخص نسبتی ساده	$\frac{\rho_{\lambda_1}}{\rho_{\lambda_2}}$
DVI	شاخص اختلاف تفاضلی	$\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}$
SAVI ₂	شاخص تعدیل‌کننده تأثیر خاک	$\frac{\rho_{\lambda_1}}{\rho_{\lambda_2} + (b/a)}$

ρ - نشان‌دهنده بازتابندگی، λ_1 و λ_2 طول موج و a و b ضرایب خط خاک در λ_1 و λ_2 است

• حذف پیوستار منحنی طیفی

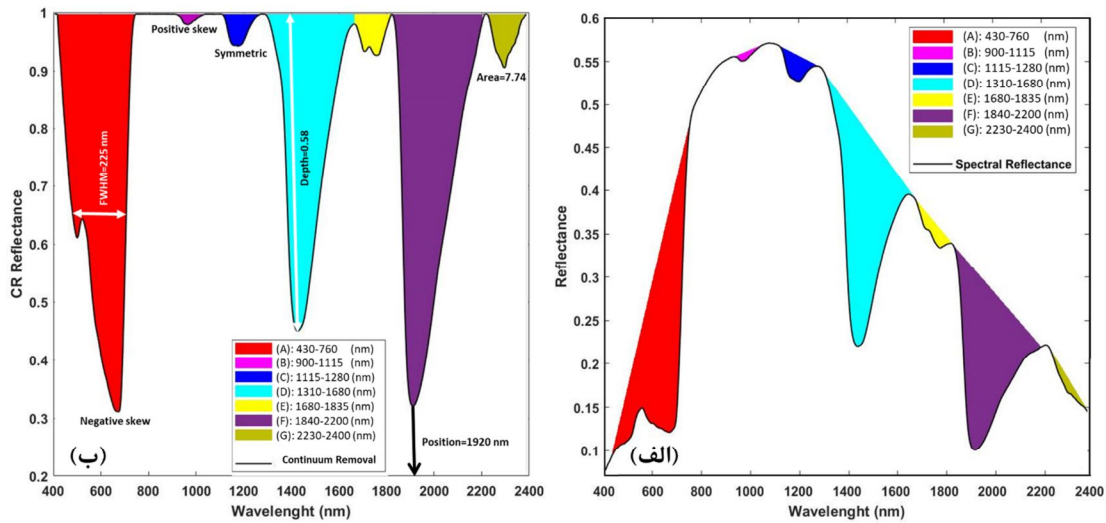
عمق، سطح، عرض و تقارن دارای اهمیت است. شکل ۳ شاخص‌های هندسی مهم هفت پدیده جذبی در یک طیف حذف پیوستار گیاه را نشان داده می‌دهد. پارامترهای مورد توجه در آنالیز پدیده‌های جذبی عمق باند ماکزیمم (BD_{max})، طول موج عمق باند ماکزیمم (λ_{BDmax})، مساحت زیر منحنی (AUC)، چولگی یا عدم تقارن (Asymmetry)، و پهنای کامل در نصف مقدار بیشینه (FWHM) است (Darvishi Boloorani et al., 2019).

• اعتبارسنجی تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن با روش ارزیابی متقاطع

برای ارزیابی صحت برآورد میزان غلظت نیتروژن و کلروفیل با روش‌های شاخص‌های باریک باند و حذف پیوستار، از روش اعتبار متقاطع^۲ استفاده شد که صحت کلی روش‌های گوناگون را نشان می‌دهد. در این روش، کل نمونه‌ها به بخش‌هایی تقسیم می‌شوند و یکی از این بخش‌ها با استفاده از دیگر بخش‌ها تخمین زده می‌شود. در این مطالعه، تعداد بخش‌ها برابر با تعداد نمونه‌ها (بیشترین حالت ممکن) در نظر گرفته می‌شود. براین اساس در مورد ۱۰۲ نمونه موجود، در هر مرحله مدل رگرسیونی برای ۱۰۱ مشاهده اجرا می‌شود؛ مقدار نمونه‌ای که در رگرسیون وجود ندارد تخمین زده

به منظور محاسبه حذف پیوستار منحنی طیفی، نخست نقاط طول موج ابتدا و انتهای (λ_1 , λ_2) پدیده جذبی (نقاط ماکزیمم دو طرف پدیده جذبی) مشخص می‌شود؛ سپس خط پیوستار، با اتصال این دو نقطه به یکدیگر و در بالای منحنی طیفی مورد نظر، تشکیل می‌شود. این خط معمولاً روی بالاترین نقاط در هر دو طرف عارضه جذبی مورد نظر ترسیم می‌شود. در مورد پدیده‌های نشری، این خط اغلب روی پایین‌ترین نقاط هر دو سمت پیک یا قله مورد نظر رسم می‌شود. سپس مقادیر پیوستار در هر یک از طول موج‌های خط پیوستار به دست می‌آید (Kokaly, 2011). در ادامه، با تقسیم مقادیر منحنی طیفی در طول موج‌های محدوده مورد نظر بر مقادیر متناظر در این خط، بازتاب نسبی به دست می‌آید؛ بنابراین مقادیر محاسبه‌شده برای طول موج‌های ابتدا و انتهای پدیده جذبی برابر با ۱ خواهد بود. منحنی حاصل از مقادیر جدید «منحنی بدون پیوستار»^۱ خوانده می‌شود و دارای ارزش صفر تا یک خواهد بود. در صورت انجام شدن مراحل بالا در سراسر طیف، یک منحنی محدب خواهیم داشت (شکل ۳). با اعمال حذف پیوستار مقادیر جذب‌های ناخواسته، عوامل نامشخص در منحنی طیفی حذف می‌شود و یا به حداقل می‌رسد؛ بنابراین منحنی‌های وارپانس مطلق حذف و حداکثرهای جذب بارزتر می‌شوند. در واقع، تجزیه و تحلیل حذف پیوستار نوعی نرمال‌سازی منحنی طیفی در دامنه طول موج مورد نظر است. در مطالعه پدیده‌های جذبی، پارامترهای موقعیت عارضه جذبی،

1. Continuum Removed Spectrum
1. Cross-Validation Procedure



شکل ۳. منحنی حذف پیوستار و شاخص‌های هندسی استخراج شده از آنها (شامل عمق باند ماکزیمم، طول موج عمق باند ماکزیمم، مساحت، چولگی و پهنا)

جدول ۲. میزان کلروفیل و نیتروژن برای رقم‌های گوناگون گندم

رقم‌های گندم	تعداد نمونه	میانگین (mg/g)	دامنه تغییرات	انحراف معیار
کلروفیل	۱۰۲	۳٫۱۹	۲٫۳۸	۰٫۶۸
نیتروژن	۶۵	۲٫۱۵	۳٫۴۲	۰٫۶۴

• شاخص‌های باریک باند گیاهی

چهار شاخص باریک باند و ارتباط آنها با میزان کلروفیل و نیتروژن، در حالت‌های بازتابندگی طیف و مشتق اول طیفی، محاسبه شدند. به‌منظور بررسی رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و میزان غلظت کلروفیل و نیتروژن، نخست، این شاخص‌ها برای کل ترکیب‌های جفت باندهای ممکن بین ۴۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر محاسبه شد. سپس R^2 بین شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه شده و میزان کلروفیل و نیتروژن به‌دست آمد. میزان همبستگی در مورد ۱۰۲ نمونه کلروفیل، در حالت بازتاب طیفی (شکل ۵) و مشتق اول (شکل ۷) و برای ۶۵ نمونه نیتروژن، در حالت بازتاب طیفی (شکل ۶) و مشتق اول طیفی (شکل ۸) نشان داده شده است.

می‌شود و ضمن مقایسه با مقدار واقعی، میزان اختلاف مقدار واقعی با مقدار تخمینی به‌دست می‌آید. به‌منظور محاسبه اختلاف مقدار تخمینی با مقدار واقعی آن، از روش ریشه میانگین مربعات خطای نسبی^۱ استفاده شد (رابطه (۱)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

Y_i مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، \bar{Y} مقدار تخمین زده شده از طریق مدل ساخته شده و N تعداد نمونه‌هاست.

۳- نتایج

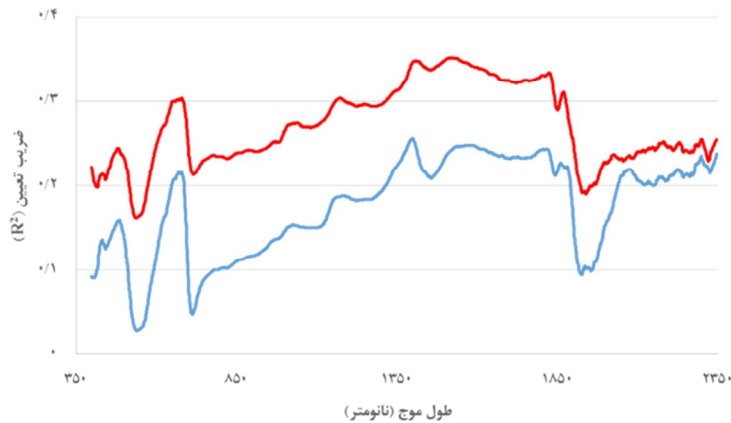
نتایج اندازه‌گیری غلظت کلروفیل و نیتروژن نمونه‌های گندم در جدول ۲ نشان داده شده است. پیش از محاسبه بهترین ترکیبات طیفی دوتایی در مورد هریک از شاخص‌های تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن، میزان همبستگی در ۲۰۰۰ باند باریک طیفی و با مقدار کلروفیل و نیتروژن (شکل ۴) به‌صورت جداگانه بررسی شد.

1. Root Mean Square Error (RMSE)

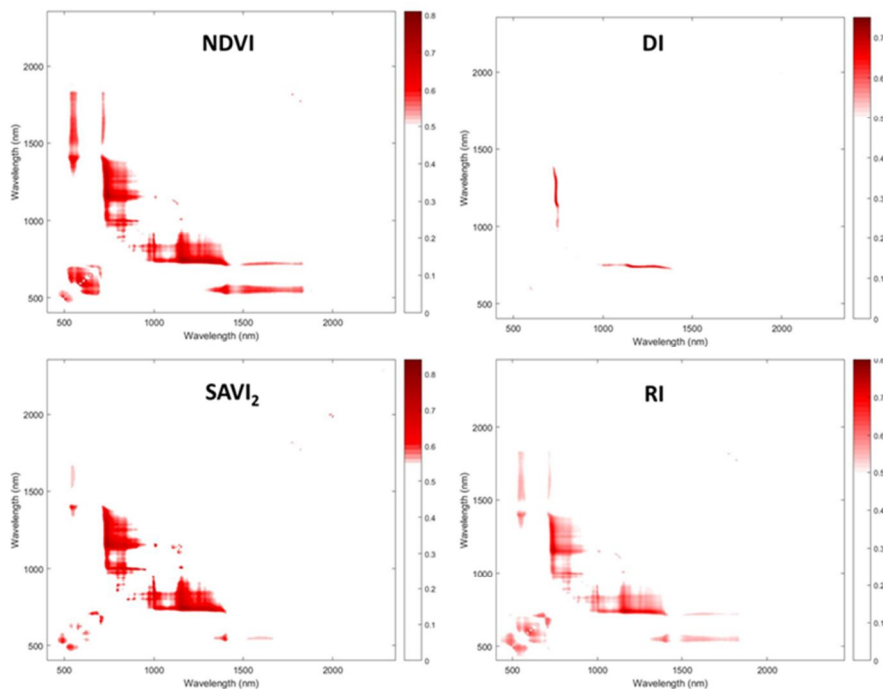
تعیین باندهای طیفی که دارای همبستگی بالا با میزان غلظت متغیر مورد نظرند، می‌توان محدوده‌های طیفی دارای همبستگی بالا را نیز، برای هریک از شاخص‌ها، شناسایی کرد. محدوده‌های با همبستگی بالا را می‌توان، در مورد تصاویر به‌دست‌آمده از سنجنده‌های چندطیفی که دارای پهنای باند بیشتر از داده‌های ابرطیفی‌اند، استفاده کرد و حتی می‌توان آنها را برای طراحی باندهای سنجنده‌ها، به‌منظور تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن نیز، به‌کار برد.

نقاط تقاطع هر جفت طول موج‌ها در پلات دوبعیدی میزان R^2 بین میزان پارامتر مورد نظر و شاخص پوشش گیاهی محاسبه‌شده از بازتابندگی طیفی در آن دو طول موج قرار دارد.

در این شکل‌ها، نواحی طیفی دارای همبستگی پایین (کمتر از ۰/۴) به رنگ سفید و نواحی دارای همبستگی بالا، با میزان غلظت متغیر مورد نظر، با رنگ تیره‌تر نشان داده شده است. بدین ترتیب علاوه‌بر

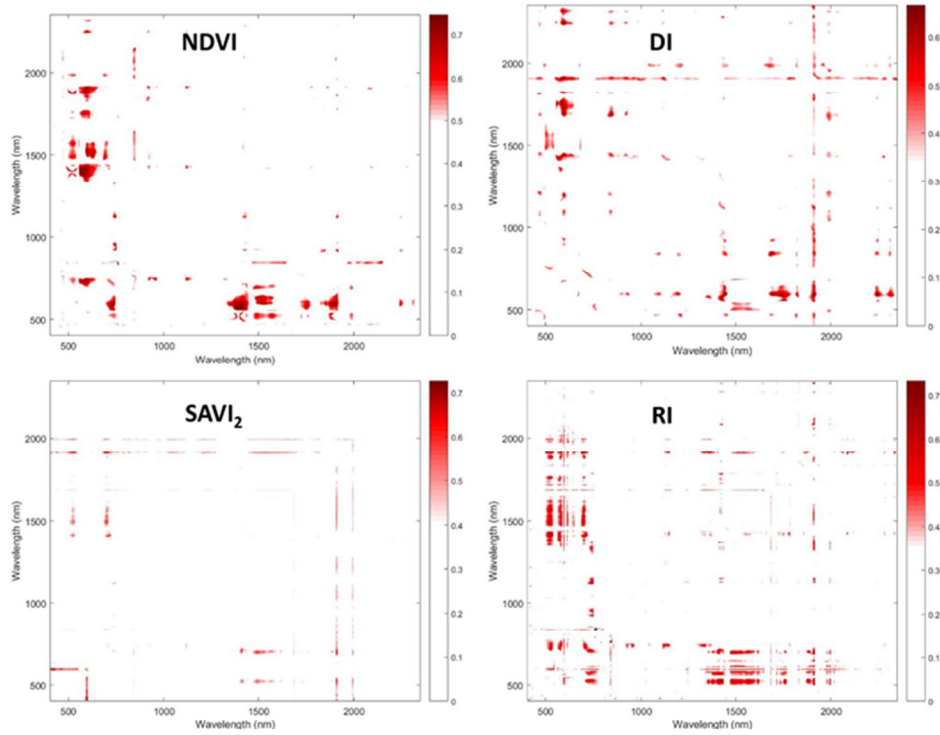


شکل ۴. همبستگی به‌دست‌آمده میان تک‌باندهای طیفی و میزان کلروفیل و نیتروژن گندم

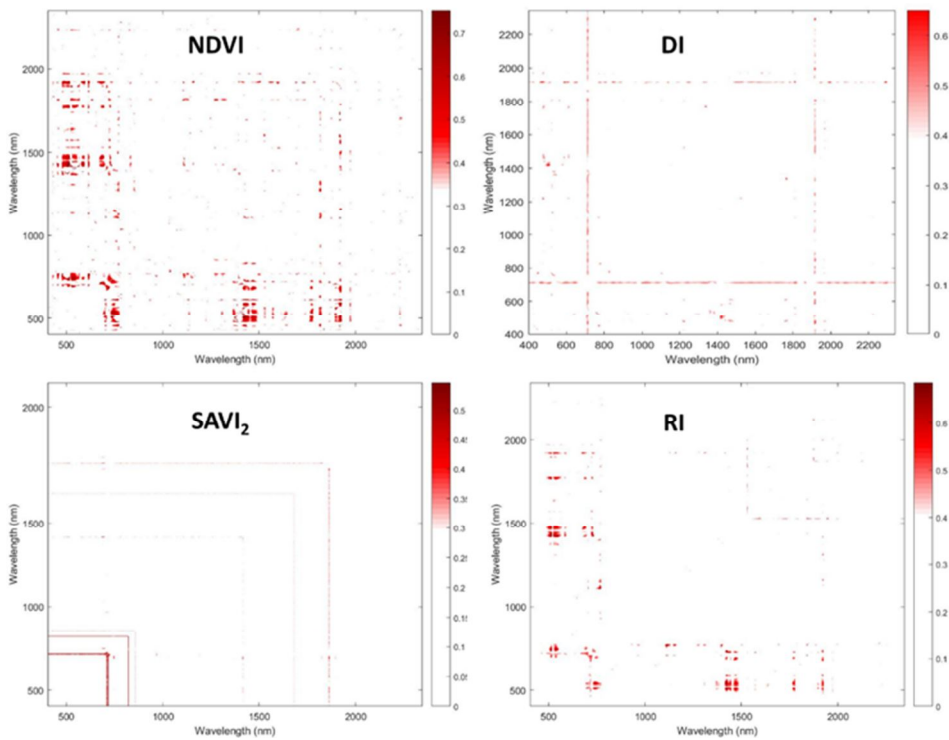


شکل ۵. نمایش دوبعیدی میزان همبستگی (R^2) برای تخمین میزان کلروفیل، با استفاده از شاخص‌های باریک باند و بازتاب طیفی

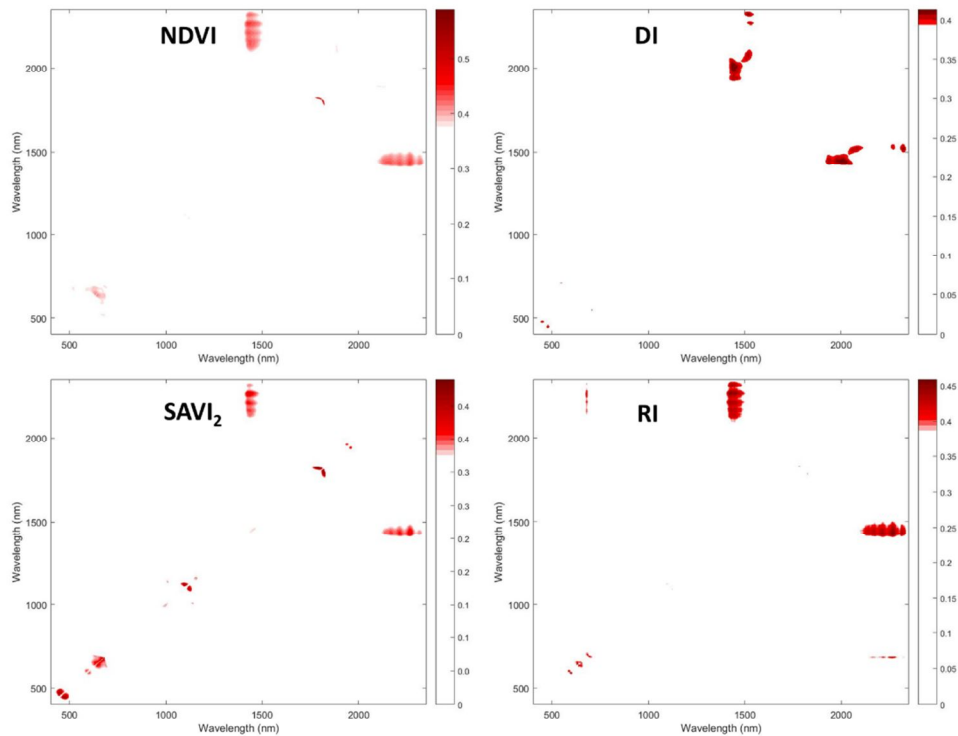
ارزیابی قابلیت طیف‌سنجی بازتابی در برآورد میزان کلروفیل و نیتروژن گندم ...



شکل ۶. نمایش دوبعدی میزان همبستگی (R^2) برای تخمین میزان نیتروژن، با استفاده از شاخص‌های باریک باند و بازتاب طیفی



شکل ۷. نمایش دوبعدی میزان همبستگی (R^2) برای تخمین میزان کلروفیل، با استفاده از شاخص‌های باریک باند و مشتق اول طیف



شکل ۸. نمایش دوبعدی میزان همبستگی (R^2) برای تخمین میزان نیتروژن، با استفاده از شاخص‌های باریک باند و مشتق اول طیف

اول برای کل چهار شاخص، به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴، نشان داده شده است. برای بررسی صحت ارزیابی، از دو پارامتر R_{CV}^2 و $RMSE_{CV}$ استفاده شد. شکل ۹ رابطه بین میزان کلروفیل و نیتروژن اندازه‌گیری شده و برآورد شده را به ترتیب با استفاده از شاخص‌های باریک باند $SAVI_2$ و $NDVI$ و نیز مشتق اول طیف که بهترین شاخص توسعه‌یافته برای آنهاست، نشان می‌دهد.

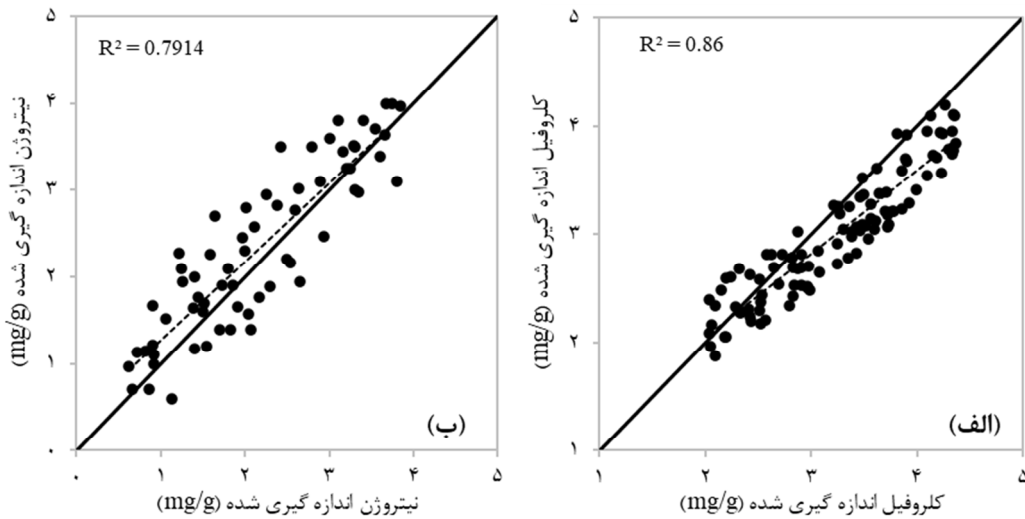
صحت تخمین میزان غلظت کلروفیل و نیتروژن با روش شاخص‌های باریک باند، به شیوه اعتبار مقاطع ارزیابی شد. براساس ارزش R^2 در نمودارهای دوبعدی ترکیب‌های باندی، بهترین شاخص برای تخمین کلروفیل و نیتروژن و همچنین نتایج ارزیابی صحت درمورد هر سه گروه با استفاده از بازتاب طیفی و مشتق

جدول ۳. موقعیت‌های بهترین طول موج‌ها و ارزش R^2 برای تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن با استفاده از بازتاب طیفی

شاخص	غلظت کلروفیل					غلظت نیتروژن				
	R^2	λ_1	λ_2	R_{CV}^2	$RMSE_{CV}$	R^2	λ_1	λ_2	R_{CV}^2	$RMSE_{CV}$
NDVI	۰/۸۱	۷۳۹	۱۱۵۹	۰/۸۰	۰/۱۹۸۲	۰/۶۹	۱۷۸۹	۱۸۱۹	۰/۴۸	۰/۳۰۱۶
RVI	۰/۸۰	۷۳۹	۱۱۵۶	۰/۸۰	۰/۲۰۴۱	۰/۶۹	۱۷۸۹	۱۸۱۹	۰/۴۸	۰/۳۰۱۹
DVI	۰/۷۵	۷۳۹	۱۱۵۶	۰/۷۵	۰/۲۶۱۳	۰/۵۱	۱۴۴۱	۲۰۱۱	۰/۴۲	۰/۳۲۵۲
$SAVI_2$	۰/۸۴	۷۳۹	۱۱۵۹	۰/۸۳	۰/۱۷۲۹	۰/۵۹	۱۷۹۲	۱۸۱۹	۰/۴۷	۰/۳۰۰۵

جدول ۴. موقعیت‌های بهترین طول موج‌ها و ارزش R^2 برای تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن با استفاده از مشتق اول طیف

شاخص	غلظت کلروفیل					غلظت نیتروژن				
	R^2	λ_1	λ_2	R_{CV}^2	RMSE _{CV}	R^2	λ_1	λ_2	R_{CV}^2	RMSE _{CV}
NDVI	۰/۸۵	۱۱۶۲	۱۳۹۰	۰/۸۰	۰/۱۹۳۸	۰/۷۹	۷۶۳	۱۷۱۴	۰/۷۱	۰/۳۰۸
RVI	۰/۸۳	۷۶۰	۸۴۱	۰/۷۹	۰/۲۰۳۴	۰/۷۸	۱۹۱۸	۲۲۲۴	۰/۷۴	۰/۲۵۱۰
DVI	۰/۷۷	۵۹۲	۲۲۴۲	۰/۷۱	۰/۳۸۷۰	۰/۵۹	۱۱۰۵	۲۳۱۱	۰/۵۱	۰/۴۰۱۲
SAVI ₂	۰/۸۶	۴۱۵	۵۹۵	۰/۸۲	۰/۱۷۲۹	۰/۵۹	۱۴۰۸	۱۸۰۷	۰/۴۸	۰/۳۹۵۲



شکل ۹. رابطه بین میزان کلروفیل (الف) و نیتروژن اندازه‌گیری شده و برآورد شده (ب)، به ترتیب، با استفاده از شاخص‌های باریک باند NDVI و SAVI₂ و مشتق اول طیف. تعداد نمونه‌های کلروفیل ۱۰۲ و تعداد نیتروژن ۶۵ است

• حذف پیوستار

شاخص‌های دارای ارتباط معنی‌دار، در سطح ۵٪، با زمینۀ خاکستری روشن و در سطح ۱٪، با خاکستری تیره نشان داده شده است. شاخص‌های حذف پیوستار، در واقع، ویژگی‌های هندسی پدیده‌های جذبی شامل AUC ، $FWHM$ ، BD_{max} و تقارن‌اند که در این پژوهش، ارتباط بین این شاخص‌ها و غلظت کلروفیل و نیتروژن برگ گندم بررسی شد.

نتایج بررسی همبستگی بین شاخص‌های هندسی استخراج شده از منحنی حذف پیوستار درمورد هفت پدیده جذبی در نواحی طیفی ۶۶۰-۴۳۰ (A)، ۹۰۰-۱۱۱۵ (B)، ۱۲۸۰-۱۱۱۵ (C)، ۱۶۸۰-۱۳۱۰ (D)، ۱۸۳۵-۱۶۸۰ (E)، ۲۲۰۰-۱۸۴۰ (F) و ۲۲۳۰-۲۴۰۰ (G) نانومتر (شکل ۳) با کلروفیل و نیتروژن گندم، به ترتیب، در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

علی صادقی و همکاران

جدول ۵. همبستگی بین شاخص‌های هندسی هفت پدیده جذبی و کلروفیل گندم

پدیده جذبی شاخص	A		B		C		D		E		F		G	
	R	sig	R	sig	R	sig	R	sig	R	sig	R	sig	R	Sig
AUC	۰٫۸۵**	۰٫۰۰	۰٫۲۳	۰٫۱۹	-۰٫۴۵*	۰٫۰۴	۰٫۷۰**	۰٫۰۱	۰٫۱۵	۰٫۳۱	۰٫۵۵*	۰٫۰۳	-۰٫۱۹	۰٫۲۶
Asymmetry	۰٫۵۴*	۰٫۰۲	۰٫۳۴	۰٫۰۹	۰٫۴۴*	۰٫۰۴	۰٫۳۷*	۰٫۰۴	۰٫۳۱	۰٫۰۷	۰٫۴۱*	۰٫۰۴	-۰٫۲۲	۰٫۲۱
BD _{max}	۰٫۸۵**	۰٫۰۰	۰٫۲۵	۰٫۰۸	-۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۶۸**	۰٫۰۱	۰٫۳۰	۰٫۱۱	۰٫۲۳	۰٫۰۸	-۰٫۳۱	۰٫۰۶
FWHM	۰٫۵۵**	۰٫۰۲	۰٫۲۵	۰٫۰۰	-۰٫۱۶	۰٫۲۳	۰٫۶۳**	۰٫۰۱	۰٫۲۰	۰٫۱۷	۰٫۲۴	۰٫۱۰	-۰٫۲۹	۰٫۱۲
λ _{BDmax}	۰٫۷۴**	۰٫۰۰	۰٫۴۴*	۰٫۰۴	۰٫۱۴	۰٫۲۹	۰٫۳۴	۰٫۰۸	۰٫۳۳	۰٫۰۸	۰٫۲۷	۰٫۱۳	۰٫۳۸	۰٫۰۷

* نشان‌دهنده معنی‌داری رابطه در سطح اطمینان ۹۵٪ است (خاکستری روشن)

** نشان‌دهنده معنی‌داری رابطه در سطح اطمینان ۹۹٪ است (خاکستری تیره)

جدول ۶. همبستگی بین شاخص‌های هندسی هفت پدیده جذبی و نیتروژن گندم

پدیده جذبی شاخص	A		B		C		D		E		F		G	
	R	sig	R	sig	R	sig	R	sig	R	sig	R	sig	R	Sig
AUC	۰٫۷۳**	۰٫۰۰	۰٫۳۵	۰٫۰۹	-۰٫۳۱	۰٫۱۰	۰٫۵۲*	۰٫۰۳	۰٫۲۴	۰٫۱۴	-۰٫۴۱*	۰٫۰۴	-۰٫۲۲	۰٫۱۱
Asymmetry	۰٫۴۹*	۰٫۰۳	۰٫۲۴	۰٫۱۴	۰٫۳۴	۰٫۰۸	۰٫۳۱	۰٫۰۸	۰٫۳۱	۰٫۱۰	۰٫۳۰	۰٫۰۹	۰٫۱۹	۰٫۱۳
BD _{max}	۰٫۷۱**	۰٫۰۰	۰٫۳۳	۰٫۰۹	-۰٫۱۳	۰٫۴۲	۰٫۴۵*	۰٫۰۴	۰٫۴۰*	۰٫۰۴	-۰٫۵۲*	۰٫۰۳	-۰٫۱۲	۰٫۱۸
FWHM	۰٫۵۱**	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۰٫۴۲	-۰٫۱۱	۰٫۴۵	۰٫۳۳	۰٫۰۹	۰٫۱۶	۰٫۲۶	-۰٫۳۲	۰٫۰۸	-۰٫۰۹	۰٫۲۸
λ _{BDmax}	۰٫۶۷**	۰٫۰۱	۰٫۱۴	۰٫۳۴	۰٫۲۴	۰٫۲۰	۰٫۳۲	۰٫۰۹	۰٫۱۹	۰٫۲۱	-۰٫۱۸	۰٫۱۴	۰٫۲۴	۰٫۱۰

* نشان‌دهنده معنی‌داری رابطه در سطح اطمینان ۹۵٪ است (خاکستری روشن)

** نشان‌دهنده معنی‌داری رابطه در سطح اطمینان ۹۹٪ است (خاکستری تیره)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

آب که مرکز آن در ۱۹۰۰ نانومتر است نیز میزان همبستگی تک‌باندی کمتری با مقدار کلروفیل و نیتروژن دارد.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در حالت استفاده از طیف انعکاسی به‌منزله ورودی برای محاسبه سه شاخص RVI، NDVI، و SAVI₂ محدوده‌های سبز (۵۵۰ نانومتر) و نیز محدوده‌های لبه قرمز (۷۳۵ نانومتر) و طول موج‌های واقع در محدوده فرورسرخ نزدیک بیشتر از طول موج‌های واقع در سایر نواحی طیفی در تخمین میزان کلروفیل مؤثرند؛ درحالی‌که در شاخص DVI فقط محدوده لبه قرمز (۷۳۵ نانومتر) است که ارتباط پررنگ‌تری با میزان کلروفیل نشان می‌دهد. در تمامی شاخص‌های باریک باند محاسبه‌شده

نتایج همبستگی بین میزان کلروفیل و نیتروژن و تک‌باندهای طیفی (شکل ۴) نشان می‌دهد نیتروژن، با بازتاب طیفی در تمامی طول موج‌ها، همبستگی منفی و کلروفیل همبستگی مثبت دارد. در تمامی طول موج‌ها، میزان همبستگی برای کلروفیل بیشتر از نیتروژن است. منحنی ضریب تعیین در مورد هر دو پارامتر بسیار مشابه است و در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک، پیچیدگی و تغییرات بسیار زیادی دارد. دلیل این تغییرات را می‌توان وجود پدیده جذبی مربوط به رنگ‌دانه‌های برگ و لبه قرمز^۱، در محدوده ۴۶۰ و ۶۸۰ نانومتر دانست. در هر دو پارامتر، در محدوده لبه قرمز، میزان همبستگی تک‌باندی کاهش می‌یابد و پس‌از آن در محدوده‌های فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ طول موج کوتاه، همبستگی افزایش پیدا می‌کند. محدوده جذب

1. Red Edge

حدود ۵۹۵ نانومتر ایجاد شد. در DVI و SAVI₂ محدوده‌ای در محدوده ۴۴۰-۴۶۰ نانومتر قرار گرفته است. علاوه بر این در شاخص DVI، محدوده‌ای در ۲۰۷۰-۱۹۳۰ نانومتر (بیشترین R²) و محدوده‌ای در ۲۳۱۰-۲۳۳۰، ۲۲۶۰-۲۲۸۰ نانومتر ایجاد شده است. شاخص‌های NDVI و RVI با ۰/۶۹، بیشترین و DVI با ۰/۵۱، کمترین میزان همبستگی را با میزان نیتروژن، در حالت ورودی بازتاب طیفی، نشان می‌دهد.

نتایج بهتر شاخص‌های تعدیل‌کننده تأثیر خاک را می‌توان به قرار داشتن مقدار فراوان خاک در زمینه میدان مشاهداتی دستگاه طیف‌سنج مرتبط دانست. همان‌طور که از پلات‌های شاخص‌ها مشخص است، با تغییر ورودی شاخص‌ها از بازتاب طیفی به مشتق اول، محدوده‌های مهم تغییر شکل می‌دهند و به صورت خطی ظاهر می‌شوند. این تغییر را می‌توان ناشی از ماهیت مشتق اول دانست که اکستریم‌های نسبی را نشان می‌دهد. بررسی جدول‌های ۳ و ۴ مشخص می‌کند، با تغییر ورودی شاخص از بازتاب طیفی به مشتق اول، میزان همبستگی حاصل از تمامی شاخص‌ها افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، در برآورد مقادیر بالای کلروفیل، شاخص توسعه‌یافته کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد.

در کل، می‌توان نتیجه گرفت محاسبه شاخص، با ورودی مشتق اول، نتایج بهتری برای تخمین میزان نیتروژن و کلروفیل در پی دارد. طی مطالعه‌ای در یاران، میزان کلروفیل و نیتروژن برگ انگور با روش ماشین بردار پشتیبان، به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۹۱ و ۰/۷۲ برآورد شده است که دقت بهتر در مدل‌سازی کلروفیل و دقت کمتر در مدل‌سازی نیتروژن را، در مقایسه با این مطالعه، نشان می‌دهد (Mirzaei et al., 2021).

مطابق جدول ۵، نتایج بررسی شاخص‌های گوناگون روی منحنی حذف پیوستار در هفت پدیده جذبی مهم، برای تخمین میزان کلروفیل، نشان می‌دهد شاخص‌های BD_{max} و AUC بیشترین میزان همبستگی با غلظت کلروفیل را در پدیده جذبی مرئی نشان می‌دهند.

برای بازتاب طیفی محدوده فرسرخ طول موج کوتاه به‌عنوان محدوده دارای همبستگی بالا تشخیص داده نشده است (شکل ۵). در هر چهار شاخص، جفت طول موج معرفی شده به‌منزله بهترین طول موج (جدول ۳) مشابه‌اند؛ به طوری که در دو شاخص NDVI و SAVI₂ جفت طول موج ۷۳۹ و ۱۱۵۹ بهترین طول موج‌های بهینه و در شاخص‌های RVI و DVI جفت طول موج‌های ۷۳۹ و ۱۱۵۶ طول موج‌های بهینه برای شاخص انتخاب شدند. شاخص SAVI₂ با ۰/۸۴، بیشترین و DVI با ۰/۷۵، کمترین همبستگی را با میزان کلروفیل، در بهترین حالت ممکن داشتند.

در حالت استفاده از مشتق اول طیف برای محاسبه شاخص، محدوده‌های معرفی شده به‌منزله محدوده‌های حساس نسبتاً متفاوت‌تر از حالت طیف بازتابندگی است. محدوده‌های مشخص شده برای شاخص‌های NDVI و RVI و DVI بسیار مشابه‌اند و در محدوده‌های ۶۱۰-۵۹۰ نانومتر، جذب آب (۱۴۱۴، ۱۵۱۹ نانومتر) و ۱۷۵۰ و ۱۹۵۰ نانومتر قرار دارند (شکل ۷). در مورد شاخص DVI، محدوده ۱۹۱۵ نانومتر ارتباطی قوی با تمامی طول موج‌ها نشان می‌دهد. در شاخص SAVI₂، ۱۶۸۰ و ۱۹۹۰ و ۷۰۹-۶۹۰ نانومتر محدوده دارای همبستگی بالا شناخته شدند. مانند حالت بازتاب طیفی، در حالت مشتق اول SAVI₂ با ۰/۸۶، بیشترین و DVI با ۰/۷۷، کمترین همبستگی را با کلروفیل از خود نشان داده‌اند. بهترین جفت طول موج‌های معرفی شده برای شاخص‌های متفاوت در این حالت، بسیار متنوع است.

شکل ۶ نشان می‌دهد محدوده‌های دارای همبستگی بالا در مورد همه شاخص‌ها، برای تخمین میزان نیتروژن، در حالت ورودی بازتاب طیفی، شباهت‌های بسیاری دارند و محدوده ۱۴۶۵-۱۴۲۵ نانومتر در همه شاخص‌ها انتخاب شده است. در شاخص‌های NDVI و RVI و SAVI₂، محدوده ۱۸۲۰-۱۷۸۰ به‌منزله یکی از محدوده‌های طیفی مهم انتخاب شد و جفت طول موج با بیشترین میزان همبستگی (جدول ۳) هم در این محدوده انتخاب شده است. محدوده کوچکی نیز، در

۵- منابع

- Abbasi, M., Darvishsefat, A.A., Schaepman, M.E., Marvie Mohadjer, M.R. & Sobhany, H., 2009, **Investigation on Leaf Spectral Reflectance of Most Important Species of Caspian Forests Using Field Spectroradiometry**, Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 17(4), PP. 568-580.
- Abdolzadeh, A. & Safari, N., 2002, **Comparison of Salt Tolerance in Eleven Varieties of Wheat with Emphasize on Ions Accumulation**, Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 9(2), PP. 95-103.
- Asner, G.P. & Martin, R.E., 2008, **Spectral and Chemical Analysis of Tropical Forests: Scaling from Leaf to Canopy Levels**, Remote Sensing of Environment, 112, PP. 3958-3970.
- Bahrami, H.A., Mirzaei, S., Darvishi Bolorani, A., Darvishzadeh, R. & Alavipanah, S.K., 2016, **Analysis of Dust Storm Effects on Reflectance Spectra of Wheat Canopy**, Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 7(4), PP. 13-26.
- Bonneville, M.C. & Fyles, J.W., 2006, **Assessing Variations in SPAD-502 Chlorophyll Meter Measurements and Their Relationships with Nutrient Content of Trembling Aspen Foliage**, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 37, PP. 525-539.
- Broge, N.H. & Mortensen, J.V., 2002, **Deriving Green Crop Area Index and Canopy Chlorophyll Density of Winter Wheat from Spectral Reflectance Data**, Remote Sensing of Environment, 81, PP. 45-57.
- Carter, G.A., 1994, **Ratios of Leaf Reflectances in Narrow Wavebands as Indicators of Plant Stress**, International Journal of Remote Sensing, 15(3), PP. 697-703.
- Clark, R.N., 1999, **Chapter 1 Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy**, in Manual of Remote Sensing, Vol. 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, Ed.) John Wiley and Sons, New York, PP. 3-58.
- همچنین در پدیده جذبی واقع شده در ۴۳۰-۷۶۰ نانومتر، بیشترین همبستگی با میزان کلروفیل را پارامتر چولگی دارد. دلیل آن را می توان ارتباط میان تغییر شیب مرز قرمز گیاه با تغییر میزان کلروفیل آن دانست. برای بررسی میزان کلروفیل برگ، پدیده جذبی واقع در ۴۳۰-۷۶۰ نانومتر بهترین پدیده جذبی و BD_{max} بهترین شاخص محسوب می شود. می توان نتیجه گیری کرد که شاخص های BD_{max} و AUC برای تخمین میزان نیتروژن، در تمامی پدیده های جذبی، بهترین شاخص است. همچنین پدیده های جذبی ۴۳۰-۷۶۰ نانومتر بهترین پدیده های جذبی برای مطالعه نیتروژن گیاه است. در تخمین میزان نیتروژن، عارضه جذبی آبی بیشترین میزان همبستگی را در تمامی پارامترها نشان می دهد و در همه پدیده های جذبی نیز، پارامترهای DB_{max} و AUC بیشترین نقش را دارند. در مجموع، می توان به این نتیجه رسید که روش شاخص های باریک باند قابلیت بالایی در تخمین میزان کلروفیل و نیتروژن دارند. نتایج نشان داد که شاخص $SAVI_2$ نتایجی مناسب تر از شاخص های نسبتی دربر دارد. به این دلیل که نیتروژن دارای پدیده جذبی مشخصی نیست و اثرگذاری آن در بازتابندگی طیفی تقریباً در بیشتر محدوده های طیفی است و کلروفیل پدیده های جذبی مشخصی در محدوده های اندازه گیری شده دارای، شاخص های هندسی پدیده های جذبی گندم برای مطالعه کلروفیل اطمینان بیشتری دارند. پدیده جذبی واقع در ۴۳۰-۷۶۰ نانومتر و شاخص های BD_{max} و AUC برای مطالعه میزان کلروفیل و نیتروژن، به ترتیب، بهترین پدیده و شاخص ها شمرده می شوند.

۴- سیاستگزاری

نگارندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از گروه خاک شناسی دانشگاه تربیت مدرس، به دلیل در اختیار قرار دادن گلخانه، آزمایشگاه و دستگاه طیف سنج برای انجام دادن این پژوهش، ابراز می دارند.

- Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D. & Marino, C.M., 2003, **Retrieval of Leaf Area Index in Different Vegetation Types Using High Resolution Satellite Data**, Remote Sensing of Environment, 86(1), PP. 120-131.
- Darvishi Boloorani, A., Ranjbar, S., Mirzaei, S., Bahrami, H.A., Mirzapour, F. & Abbaszadeh Tehrani, N., 2019, **Analysis of Persian Oak (Quercus Brantii Lindl)'s Spectral-Temporal Behavior under the Stresses of Water Deficiency and Dust Particles**, Dushanbe, Tajikistan, 8-12 April, E3S Web of Conferences, 99, 04011.
- Darvishi Boloorani, A., Ranjbar, S., Mirzaei, S., Bahrami, H.A., Mirzapour, F. & Abbaszadeh Tehrani, N., 2020, **Spectral Behavior of Persian Oak under Compound Stress of Water Deficit and Dust Storm**, International Journal of Applied Earth Observation, 88, P. 102082.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsia, F. & Choa, M., 2008, **LAI and Chlorophyll Estimation for a Heterogeneous Grassland Using Hyperspectral Measurements**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 63, PP. 409-426.
- Dorigo, W.A., Zurita-Milla, R., de Wit, A.J.W., Brazile, J., Singh, R. & Schaepman, M.E., 2007, **A Review on Reflective Remote Sensing and Data Assimilation Techniques for Enhanced Agroecosystem Modeling**, International Journal of Applied Earth Observation, 9, PP. 165-193.
- Greenway, H. & Munns, R., 1980, **Mechanisms of salt tolerance in no halophytes**, Annual Review of Plant Physiology, 31, PP. 149-190.
- Hansen, P.M. & 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, PP. 542-553.
- Ju, X.T., Xing, G.X., Chen, X.P., Zhang, S.L., Zhang, L.J., Liu, X.J., Cui, Z.L., Yin, B., Christie, P., Zhu, Z.L. & Zhang, F.S., 2009, **Reducing Environmental Risk by Improving N Management in Intensive Chinese Agricultural Systems**, Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A., 106, PP. 3041-3046.
- Kokaly, R.F., 2011, **PRISM: Processing Routines in IDL for Spectroscopic Measurements (Installation Manual and User's Guide, Version 1.0)**, U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1155.
- Kokaly, R.F. & Clark, R.N., 1999, **Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression**, Remote Sensing of Environment, 67, PP. 267-287.
- Lichtenthaler, H.K., 1998, **The Stress Concept in Plants: An Introduction**, Annals of the New York Academy of Science, 851, PP. 187-198.
- Liu, M., Liu, X., Li, M., Fang, M. & Chi, W., 2010, **Neural-Network Model for Estimating Leaf Chlorophyll Concentration in Rice under Stress from Heavy Metals Using Four Spectral Indices**, Biosystems Engineering, 106, PP. 223-233.
- Main, R., Azong Cho, M., Mathieu, R., O'Kennedy, M.M., Ramoelo, A. & Koch, S., 2011, **An investigation into Robust Spectral Indices for Leaf Chlorophyll Estimation**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(6), PP. 751-761.
- Markwell, J., Osterman, J.C. & Mitchell, J.L., 1995, **Calibration of the Minolta SPAD-502 Leaf Chlorophyll Meter**, Photosynthesis Research, 46(3), PP. 467-72.
- Meroni, M., Colombo, R. & Panigada, C., 2004, **Inversion of a Radiative Transfer Model with Hyperspectral Observations for LAI Mapping in Poplar Plantations**, Remote Sensing of Environment, 92(2), PP. 195-206.
- Mirzaei, M., Marofi, S., Solgi, E., Abasi, M. & Karimi, R., 2021, **Nondestructive Estimation of Leaf Nitrogen and Chlorophyll Contents in Grapes Using Field Hyper Spectral Data**

- and Support Vector Machines Approach**, Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 34(1), PP. 152-167.
- Mutanga, O., Skidmore, A.K. & Van Wieren, S., 2003, **Discriminating Tropical Grass (Cenchrus Ciliaris) Canopies Grown under Different Nitrogen Treatments Using Spectroradiometry**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 57(3), PP. 263-272.
- Niinemets, U. & Tenhunen, J.D., 1997, **A Model Separating Leaf Structural and Physiological Effects on Carbon Gain along Light Gradients for the Shade-Tolerant Species Acer Saccharum**, Plant, Cell and Environment, 20, PP. 845- 866.
- Pérez-Patricio, M., Camas-Anzueto, J.L., Sanchez-Alegria, A., Aguilar-González, A., Gutiérrez-Miceli, F., Escobar-Gómez, E., Voisin, Y., Rios-Rojas, C. & Grajales-Coutiño, R., 2018, **Optical Method for Estimating the Chlorophyll Contents in Plant Leaves**, Sensors, 18(650), PP. 1-12.
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Mullen, R.W., Freeman, K.W., Thomason, W.E. & Lukina, E.V., 2002, **Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Grain Production with Optical Sensing and Variable Rate Application**, Agronomy, 94, PP. 815-820.
- Savitzky, A. & Golay, M.J.E., 1964, **Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Square Procedure**, Analytical Chemistry, 36(8), PP. 1627-1638.
- Schaepman-Strub, G., Limpens, J., Menken, M., Bartholomeus, H.M. & Schaepman, M.E., 2008, **Towards Spatial Assessment of Carbon Sequestration in Peatlands: Spectroscopy Based Estimation of Fractional Cover of Three Plant Functional Types**, Biogeosciences Discussions, 5, PP. 1293-1317.
- Sims, D.A. & Gamon, J.A., 2002, **Relationships between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages**, Remote Sensing of Environment, 81, PP. 337-354.
- Thenkabail, P., Smith, R. & De Pauw, E., 2000, **Hyperspectral Vegetation and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics**, Remote Sensing of Environment, 71(2), PP. 158-182.
- Wang, W., Yao, X., Yao, X., Tian, Y.C., Liu, X.J., Ni, J., Cao, W.X. & Zhu, Y., 2012, **Estimating Leaf Nitrogen Concentration with Three-Band Vegetation Indices in Rice and Wheat**, Field Crops Research, 129, PP. 90-98.
- Yao, X., Zhu, Y., Tian, Y.C., Feng, W. & Cao, W.X., 2010, **Exploring Hyperspectral Bands and Estimation Indices for Leaf Nitrogen Accumulation in Wheat**, International Journal of Applied Earth Observation, 12, PP. 89-100.
- Yoder, B.J. & Pettigrew-Crosby, R.E., 1995, **Predicting Nitrogen and Chlorophyll Content and Concentrations from Reflectance Spectra (400– 2500 nm) at Leaf and Canopy Scales**, Remote Sensing of Environment, 53(3), PP. 199- 211.
- Zahedifar, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J. & Emam, Y., 2011, **Phosphorus and Zinc Distribution in Different Parts and Various Growth Stages of Wheat under Field Conditions**, Journal of Water and Soil, 25(3), PP. 436-445.
- Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Williams, L.E., Suárez, L., Berni, J.A.J., Goldhamer, D. & Fereres, E., 2013, **A PRI-Based Water Stress Index Combining Structural and Chlorophyll Effects: Assessment Using Diurnal Narrow-Band Airborne Imagery and the CWSI Thermal Index**, Remote Sensing of Environment, 138, PP. 38-50.
- Zhu, Y., Yao, X., Tian, Y.C., Liu, X.J. & Cao, W.X., 2008, **Analysis of Common Canopy Vegetation Indices for Indicating Leaf Nitrogen Accumulations in Wheat and Rice**, International Journal of Applied Earth Observation, 10, PP. 1-10.



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱
Vol.14, No. 4, Winter 2023 Iranian Remote Sensing & GIS

119-134

Evaluating Capability of Reflectance Spectrometry for Estimating the Wheat Chlorophyll and Nitrogen

Sadeghi A.^{1*}, Mirzaei S.², Chakherlou S.³, Gholamnia M.⁴, Bahrami H.A.⁵

1. Assistant prof., Dep. of Geography and Urban Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan
2. Ph.D. of Remote Sensing, Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran
3. Dep. of Soil and Water Research, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Tabriz
4. Assistant Prof., Dep. of Civil Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University
5. Prof. of Dep. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

Abstract

Leaf chlorophyll and nitrogen, due to their important role in photosynthesis are among the major biological parameters of plant physiological status. The ability to quantify chlorophyll and nitrogen can provide important information for precision agricultural activities, plant and agricultural resource management planning, and modeling ecosystem services and production capabilities. This study aimed to assess the capability of indices for estimating the amount of chlorophyll and nitrogen in wheat using spectral data at the canopy level and also determine the most suitable spectral regions and absorption features for this purpose. This research was carried out in a greenhouse environment and the spectroscopic measurements were performed using ASD Fieldspec-3 full-range spectral spectroradiometer. Four plant band indices were classified into two groups of ratio- (NDVI, RVI, and DVI) and soil-based indices (SAVI₂) for the raw spectrum and the first derivative of the spectrum for the total samples, and the results were compared. The parameters of position, depth, area, asymmetry and width were calculated for seven absorption features extracted from continuum-removed spectra, and the correlation of these indices with chlorophyll and nitrogen content of wheat was examined. The results showed that SAVI₂ had a stronger correlation (RMSE = 0.12, R² = 0.85) with the chlorophyll content NDVI (RMSE=0.30, R²=0.69) had a higher correlation with the nitrogen content, while using the first derivative with NDVI provided better results. Moreover, area and depth parameters of 430-760 nm absorption spectrum were the best indicators for estimating the amount of chlorophyll and nitrogen in wheat, respectively.

Keywords: Chlorophyll, Nitrogen, Wheat, Narrow band index, Continuum removal.

* Correspondence Address: Dep. of Geography and Urban Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Postal Code: 8174673441. Tel: 09131832008
Email: alisadeghi@geo.ui.ac.ir