

کرد. شاخص‌های PSRI و CVI برای برآورد محتوای کلروفیل a و کل، شاخص PSRI برای برآورد محتوای کلروفیل b، شاخص‌های CRI و TCI/OSAVI برای برآورد محتوای کاروتنوئید و شاخص‌های SIPI، GNDVI، EVI، CIgreen، TCARI و OSAVI برای برآورد نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a برگ گندم مؤثرترین شاخص‌ها در مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام بودند. در مطالعه ما برآورد محتوای کلروفیل a، کل، کاروتنوئید و نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a برگ بر اساس رگرسیون خطی چندگانه گام به گام نسبت به مدل رگرسیون خطی ساده نتایج بهتری را نشان دادند. برآورد محتوای کلروفیل b در هر دو روش یکسان بود.

نتیجه‌گیری: استفاده از شاخص‌های گیاهی حاصل از داده‌های لندست ۸ امکان برآورد محتوای رنگ‌دانه‌های برگ گندم را در منطقه مورد مطالعه با نتایج نسبتاً خوبی فراهم می‌کند. چنین اطلاعاتی برای کشاورزان به منظور پایش اولیه وضعیت کیفیت و کمیت تولید اهمیت داشته و منجر به یک برنامه‌ریزی کاربردی و کارآمد در روند کوددهی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، شاخص‌های گیاهی، کاروتنوئید، کلروفیل، گندم.

مقدمه

وضعیت نیتروژن گیاه وجود داشته باشد. از آنجا که نیتروژن عنصر مهم کلروفیل است و محتوای نیتروژن برگ اغلب با محتوای کلروفیل برگ رابطه مستقیم دارد (۴۸، ۵۲)، برآورد محتوای کلروفیل گیاه می‌تواند یک روش ساده، دقیق و غیرمخرب برای بررسی وضعیت نیتروژن محصولات زراعی باشد (۲۷، ۳۵). بنابراین، نظارت بر محتوای کلروفیل برای بهینه‌سازی زمانی و مکانی کوددهی و میزان کاربرد کود در راستای رسیدن به عملکرد بالا و به حداقل رساندن اتلاف نیتروژن به محیط زیست مفید خواهد بود (۱۲).

روش‌های رایج اندازه‌گیری رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، مخرب، وقت‌گیر و گران هستند و در مقیاس مکانی بزرگ دشوار هستند (۴۰). این روش‌ها شامل نمونه‌برداری میدانی برگ گیاهان و روش‌های آزمایشگاهی پیچیده استخراج از برگ با استفاده از مواد شیمیایی حلال و اندازه‌گیری از طریق اسپکتروفتومتری (Spectrophotometric) می‌باشند (۶۲). تکنیک‌های سنجش از دور قابلیت تخمین کلروفیل را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی دارد (۲۳، ۴۸). در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای بررسی رابطه بین داده‌های سنجش از دور نوری و

تغییرات مکانی-زمانی در میزان کلروفیل (chlorophyll) در یک مزرعه می‌تواند نشان‌دهنده توانایی فتوسنتزی، مرحله رشد، تنش، بهره‌وری و عملکرد گیاه در آن مزرعه باشد (۲۳، ۴۲، ۴۳، ۴۸). برآورد کلروفیل در مقیاس منطقه‌ای و جهانی در مطالعات اکولوژی و تغییرات اقلیم (۱۱)، مطالعه تنش‌های گیاهی (۱۶)، چرخه بیوژئوشیمیایی و عناصر غذایی (۴۰) و نظارت بر سلامت پوشش گیاهی و ارزیابی وضعیت فیزیولوژیکی گیاه (۲، ۱۲، ۵۳) حائز اهمیت است. کلروفیل برگ به‌عنوان شاخص مهم فعالیت فتوسنتزی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای پوشش گیاهی است که در کشاورزی دقیق مورد توجه قرار گرفته است و می‌تواند برای تخمین غیرمستقیم میزان نیتروژن خاک یا تعیین کوددهی بهینه مورد استفاده قرار گیرد (۷، ۱۲).

نیتروژن یک عنصر ضروری برای رشد گیاه و غالباً در بیش‌تر خاک‌های کشاورزی محدودکننده رشد است (۱۵) و کمبود آن مانع رشد گیاهان زراعی به دلیل کاهش میزان پروتئین و نهایتاً کاهش عملکرد سلول می‌شود (۵۴). بنابراین، برای کاربرد هدفمند کودهای از ته ضرورت دارد که نظارت مناسبی بر

(Index Vegetation Ratio) RVI، (Soil Adjusted Vegetation Index) SAVI و (Soil Adjusted Vegetation Index) قدرت پیش‌بینی‌کنندگی خود را برای ارزیابی محتوای کلروفیل و سایر رنگ‌دانه‌های برگ نشان داده‌اند (۲۹، ۳۰، ۵۱). علاوه بر این، برخی دیگر از شاخص‌های خاص گیاهی، یعنی شاخص نسبت جذب کلروفیلی (CARI)، شاخص نسبت جذب کلروفیلی تبدیل شده (TCARI)، شاخص نسبت جذب کلروفیلی اصلاح شده (MCARI)، شاخص گیاهی کلروفیل (CVI)، شاخص گیاهی تفاوت سبز (GDVI) و غیره عملکردی عالی در ارزیابی محتوای کلروفیل و سایر پارامترهای بیوفیزیکی از خود نشان داده‌اند (۱۴، ۱۵، ۲۳، ۲۷، ۵۳).

گندم زمستانه یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی و استراتژیک در ایران است و خودکفایی در این محصول به عنوان قوت غالب مردم از اهمیت بالایی برخوردار است. از آنجا که سلامتی، رشد و عملکرد مطلوب این محصول رابطه‌ی مستقیمی با میزان فتوسنتز و محتوای کلروفیل گیاه دارد و اندازه‌گیری میدانی رنگ‌دانه‌های برگ گندم نیروی انسانی و هزینه‌های بالایی را می‌طلبد این تحقیق با هدف امکان برآورد محتوای رنگ‌دانه‌های برگ (کلروفیل و کاروتنوئید) به کمک داده‌های سنسور از دور ماهواره لندست ۸ در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری در سال ۱۳۹۶ انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری در مزارع زیر کشت گندم آبی در محدوده عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). میانگین

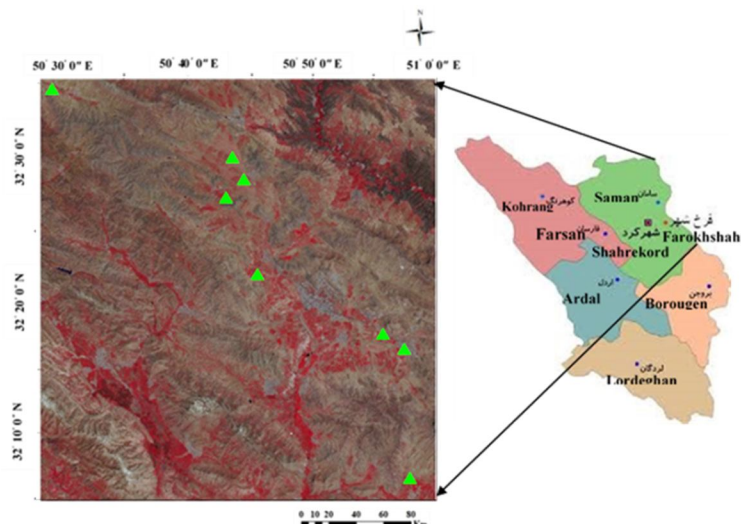
خصوصیات رنگ‌دانه فتوسنتزی و محتوای درون بافت‌های گیاهی انجام شده است (۳۴، ۵۳).

روش‌های سنسور از دور برای تخمین رنگ‌دانه، شامل مدل‌های رگرسیون آماری و مدل‌های فیزیکی می‌باشند. رایج‌ترین و ساده‌ترین رویکرد مورد استفاده برای به دست آوردن محتوای کلروفیل از داده‌های سنسور از دور، استفاده از شاخص‌های گیاهی (Vegetation Indices) است (۲۳، ۲۵، ۵۷). با استفاده از مدل‌های آماری رابطه‌ای بین محتوای کلروفیل برگ اندازه‌گیری شده و شاخص‌های طیفی حساس به کلروفیل تدوین می‌شوند و معمولاً با بازتاب در طول موج‌هایی که به ساختار برگ یا تاج پوشش حساس هستند، نرمال می‌شوند (۱۲). اگرچه این روابط آماری ساده و کارآمد است، اما دقت آن‌ها به داده‌های اندازه‌گیری شده و نوع پوشش گیاهی بستگی دارد و عمومیت آن‌ها ضعیف است (۱، ۶۳). روش‌های فیزیکی با توجه به متغیرهای ساختاری و بیوشیمیایی پوشش گیاهی که بر بازتاب اثر می‌گذارد، با استفاده از مدل‌های انتقال تابشی، بازتاب برگ یا تاج پوشش را شبیه‌سازی می‌کنند. از این روش، به منظور برآورد کلروفیل محصول زراعی استفاده شده است (۱۲، ۱۳). روش‌های ترکیبی، هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارند و روش‌های فیزیکی و تجربی-آماری را با هم ترکیب می‌کنند (۵۵).

با استفاده از باندهای سنسور ماهواره‌ای یا سنسورهای غیر تصویری (طیف‌سنج‌ها) به خصوص در محدوده‌های طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR) شاخص‌های گیاهی بی‌شماری برای مطالعات مرتبط با پارامترهای بیوشیمیایی و بیوفیزیکی پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند (۵۸). شاخص‌های گیاهی مانند (Normalized Difference Vegetation Index) NDVI، (Enhanced Vegetation Index) EVI،

متر از سطح دریا می‌باشد. خاک غالب منطقه در زیرگروه Typic Calcixerepts طبقه‌بندی شده است و سیمای اراضی منطقه دشت و دامنه است (۴۱).

بارندگی و دمای سالانه منطقه بر اساس ایستگاه سینوپتیک شهرکرد به ترتیب ۳۱۶ میلی‌متر و ۱۲/۱۲ درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع متوسط منطقه ۲۰۶۱



شکل ۱- مزارع مورد بررسی و مکان‌های نمونه‌برداری در تصویر ترکیب رنگی مجازی استاندارد شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری.

Figure 1- Fields and sampling sites in standard virtual color composite image of Shahrekord county, Chaharmahal and Bakhtiari province.

تعیین محتوای رنگ‌دانه‌ها: به منظور تعیین مقدار رنگ‌دانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید از روش‌های توصیه شده لیچتن تالر (۳۶) و لیچتن تالر و بوشمن (۳۷) استفاده شد. بر این اساس قطعات برگ (۱cm × ۱cm) از هر بوته تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در ۵ میلی‌لیتر استون (CH₃COCH₃) ۸۰ درصد در شرایط سرما و تاریکی قرار داده و سپس در هاون چینی ساییده شد. مخلوط به دست آمده به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد، با ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. عصاره شفاف حاصل جدا و مقدار جذب عصاره در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۷ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر در مقابل نمونه شاهد خوانده شد. محتوای کلروفیل (Chl.a) و کلروفیل (Chl.b) کل (Chl.T) و کل کاروتنوئیدها (Car.T) از رابطه‌های ۱ تا ۴ بر حسب میکروگرم در سانتی‌متر مربع سطح برگ محاسبه شد.

نمونه‌برداری: جمع‌آوری نمونه برای تعیین محتوای کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها در ۸ مزرعه زیر کشت گندم آبی زمستانه در اول خرداد ماه هم‌زمان با مرحله گلدهی انجام شد. ثبت موقعیت مکانی ۱۲۰ واحد نمونه‌برداری به صورت تصادفی در مزارع مورد مطالعه به کمک سامانه کنترل زمینی (Garmin etrex Vista, GPS) تعیین گردید. واحدهای نمونه‌برداری به صورت مربع‌های ۳۰×۳۰ متری مطابق با پیکسل‌های لندست ۸ در نظر گرفته شد. در هر یک از واحدهای نمونه‌برداری، ۴ پلات ۰/۲۵ مترمربعی در چهار گوشه و یکی در مرکز مربع قرار داده شد. نمونه‌های برگ‌ها در بسته‌های فویل آلومینیمی قرار داده شدند تا نور به آن‌ها نرسد و در ظرفی روی یخ‌نگهداری و به یخچال آزمایشگاه منتقل شد تا اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی انجام شود.

کم تری با رنگ دانه‌های پوشش گیاهی و حساسیت کم تری به خواص نوری خاک نشان داده‌اند، اما عملکرد قابل قبولی در پیش بینی LAI دارند. از این رو، نسبت‌های مربوط به شاخص‌های حساس به تغییرات کلروفیل و شاخص‌های گیاهی رایج برای به حداقل رساندن اثر LAI و پس زمینه خاک ارائه شده است (۱۵، ۲۵). به طور معمول، روابط تجربی بین محتوای کلروفیل اندازه گیری شده و بازتاب طیفی از ترکیبات مختلف باندها ایجاد می‌شود. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که تصاویر هوابرد یا ماهواره‌ای که شامل یک باند باریک لبه قرمز هستند، روابطی خطی و قوی با میزان کلروفیل اندازه‌گیری شده برگ‌ها دارند (۲۵). با این حال، مطالعات کمی در مورد استفاده از داده‌های لندست برای مدل‌سازی کلروفیل برگ، به دلیل باندهای عریض طیفی و عدم وجود باند طیفی لبه قرمز، موجود است. در این مطالعه ۱۱ شاخص گیاهی و ۱۶ شاخص کلروفیلی و ۳ شاخص ترکیبی یا نسبت به منظور ارزیابی مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تخمین محتوای رنگ دانه‌های برگ مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). کلیه پردازش‌های تصویری در محیط نرم‌افزار (© 52North GmbH) ILWIS 3.7 انجام شد.

رابطه ۱: $V/A \times Chl.a = (12.25 A_{663} - 2.79 A_{647})$

رابطه ۲: $V/A \times Chl.b = (21.50 A_{647} - 5.1 A_{663})$

رابطه ۳: $Chl.T = Chl.a + Chl.b$

رابطه ۴:

$$Car.T = (1000 A_{470} - 1.82 Chl.a - 85.02 Chl.b) / (198 \times V/A)$$

که A_λ جذب در طول موج λ (به نانومتر) است. V حجم استون مورد استفاده به میلی‌لیتر و A سطح برداشت شده از برگ به سانتی‌متر مربع است.

داده‌های ماهواره‌ای: تصاویر (Operational) OLI (Land Imager) لندست ۸ مسیر ۱۶۴ ردیف ۳۸ (دوره بازدید ماهواره: ۱۶ روز، اندازه پیکسل: 30×30 متر) از وب سایت (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) USGS گرفته شد. همه تصاویر از لحاظ هندسی توسط پایگاه زمینی ناسا اصلاح شده است. اعداد دیجیتال خام (DNs) تصویر اخذ شده در تاریخ ۱ خرداد (۲۲ می) سال ۱۳۹۶ (۲۰۱۷) با استفاده از پارامترهای موجود در فایل متادیتای همراه هر تصویر به بازتاب تبدیل شدند.

شاخص‌های گیاهی و کلروفیل: شاخص‌های گیاهی روشی سریع برای برآورد محتوای کلروفیل برگ برای طیف وسیعی از انواع مختلف پوشش گیاهی هستند (۱۳). برخی از شاخص‌های گیاهی رایج روابط

جدول ۱- شاخص‌های گیاهی و کلروفیل استفاده شده در این مطالعه و معادلات آنها

Table 1- Vegetation and Chlorophyll indices used in this study and corresponding equations

شاخص‌های گیاهی Vegetation Indices	معادله Equation	منبع Reference
شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	(51)
شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده سبز Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	$(NIR-GREEN)/(NIR+GREEN)$	(18)
شاخص گیاهی نسبت Ratio Vegetation Index (RVI)	NIR/RED	(44)
شاخص گیاهی تعدیل اثر خاک Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$[(NIR - RED)/(NIR + RED + 0.5)] \times 1.5$	(30)
شاخص گیاهی بهینه شده تعدیل اثر خاک Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$1.6*(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)$	(49)
شاخص گیاهی اصلاح شده تعدیل اثر خاک Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$(2*NIR+1-(((2*NIR)+1)^2 - 8(NIR-RED))^{0.5}))/2$	(47)
شاخص گیاهی تفاضل Difference Vegetation Index (DVI)	$NIR-RED$	(9)
شاخص گیاهی تفاضل دوباره نرمال شده Renormalized Difference Vegetation Index (RNDVI)	$(NIR-RED)/(NIR+RED)^{0.5}$	(50)
شاخص سبزیگی Greenness Index (GI)	$GREEN/RED$	(59)
شاخص گیاهی بارز شده Enhanced Vegetation Index (EVI)	$2.5*((NIR-RED)/(NIR+6*RED-7.5*BLUE+1))$	(31)
شاخص گیاهی مثلثی Triangular vegetation index (TVI)	$0.5[120(NIR-GREEN)-200(RED-GREEN)]$	(6)

* کلمات Red, Green, Blue, NIR, و SWIR به ترتیب به مفهوم باندهای قرمز، سبز، آبی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه هستند.

*The words Red, Green, Blue, NIR, and SWIR mean red, green, blue, near-infrared, and short-infrared bands, respectively.

ادامه جدول ۱- شاخص‌های گیاهی و کلروفیل استفاده شده در این مطالعه و معادلات آن‌ها

شاخص‌های کلروفیل Chlorophyll Indices	معادله Equation	منبع Reference
شاخص سبزیگی Green Chlorophyll Index (CIgreen)	(NIR/GREEN)-1	(20, 22)
شاخص گیاهی کلروفیل Chlorophyll Vegetation Index (CVI)	(NIR/GREEN)*(RED/GREEN)	(56)
شاخص کلروفیل مثلثی Triangular Chlorophyll Index (TCI)	$(1.2(NIR-GREEN)-1.5(RED-GREEN)*(NIR/RED)^{0.5})$	(27)
شاخص رنگ‌دانه سبز آبی Blue Green Pigment Index (BGI)	BLUE/GREEN	(60)
شاخص درخشندگی Brightness Index (BI)	$(NIR+RED+GREEN)/3^{0.5}$	(38)
شاخص رنگ‌دانه غیرحساس به ساختار Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	$(NIR-BLUE) / (NIR - RED)$	(45)
شاخص بازتاب کاروتنوئید Carotenoid Reflectance Index (CRI)	$1/GREEN - 1/NIR$	(24)
شاخص بازتاب پیری گیاه Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)	$(RED-BLUE) / NIR$	(39)
شاخص گیتلسون و مرزلیاک Gitelson and Merzlyak (GM1)	NIR/GREEN	(19)
شاخص نسبت جذب کلروفیل Chlorophyll Absorption Ratio Index (CARI)	$(NIR - RED) - 0.2 (NIR - GREEN)$	(32)
شاخص نسبت جذب کلروفیل تبدیل شده Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index (TCARI)	$3*((NIR - RED)-0.2*(NIR-GREEN)*(NIR/RED))$	(25)

* کلمات Red, Green, Blue, NIR, و SWIR به ترتیب به مفهوم باندهای قرمز، سبز، آبی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه هستند.

*The words Red, Green, Blue, NIR, and SWIR mean red, green, blue, near-infrared, and short-infrared bands, respectively.

ادامه جدول ۱- شاخص‌های گیاهی و کلروفیل استفاده شده در این مطالعه و معادلات آن‌ها

شاخص‌های کلروفیل Chlorophyll Indices	معادله Equation	منبع Reference
شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI)	$((NIR-RED) - 0.2 * (NIR - GREEN) *(NIR/RED))$	(15)
شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده ۱ Modified chlorophyll absorption 1 (MCARI1)	$1.5*(2.5*(NIR - RED) - 1.3 * (NIR - GREEN))$	(26)
شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده ۲ Modified chlorophyll absorption 2 (MCARI2)	$1.5*(2.5*(NIR - RED) - 1.3 * (NIR - GREEN))/((2NIR+1)^2-(6NIR-5*REED^{0.5})-0.5)^{0.5}$	(26)
شاخص رنگ‌دانه نسبت ساده Simple Ratio Pigment Index (SRPI)	BLUE/REED	(45)
شاخص نسبت رنگ‌دانه کلروفیل نرمال شده Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index (NPCI)	$(RED-BLUE)/(RED+BLUE)$	(46)
شاخص‌های ترکیبی Combined Indices		
نسبت شاخص نسبت جذب کلروفیل تبدیل شده به شاخص گیاهی بهینه شده تعدیل اثر خاک TCARI/OSAVI	$3*((NIR - RED)-0.2*(NIR-GREEN)*(NIR/RED))/ 1.6*(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)$	(25)
نسبت شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده به شاخص گیاهی بهینه شده تعدیل اثر خاک MCARI/OSAVI	$((NIR - RED) - 0.2 * (NIR - GREEN) *(NIR/RED))/ 1.6*(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)$	(15)
نسبت شاخص کلروفیل مثلثی به شاخص گیاهی بهینه شده تعدیل اثر خاک TCI/OSAVI	$(1.2(NIR-GREEN)-1.5(RED-GREEN)*(NIR/REED)^{0.5})/ 1.6*(NIR-RED)/(NIR+RED+0.16)$	(27)

* کلمات Red, Green, Blue, NIR, و SWIR به ترتیب به مفهومی باندهای قرمز، سبز، آبی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه هستند.

*The words Red, Green, Blue, NIR, and SWIR mean red, green, blue, near-infrared, and short-infrared bands, respectively.

(Mean Error, ME) و میانگین خطا (Error, RRMSE) انجام شد (روابط ۷-۹).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{رابطه ۷:}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad \text{رابطه ۸:}$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) \quad \text{رابطه ۹:}$$

در روابط فوق N ، Y_i و \hat{Y}_i به ترتیب تعداد کل مشاهدات، محتوای رنگ دانه اندازه گیری شده و برآورد شده در نقطه i و \bar{Y} میانگین محتوای رنگ دانه اندازه گیری شده می باشند.

نتایج و بحث

توصیف داده‌های میدانی: آماره‌های توصیفی رنگ دانه‌های برگ گندم در زمان نمونه برداری در جدول ۲ نشان داده شده است. محتوای کل کلروفیل برگ گندم دامنه زیادی (۱/۲ تا ۶۸ میکروگرم بر سانتی متر مربع) را نشان داد. دامنه تغییرات کل کاروتنوئیدها بین ۲/۲۰ تا ۱۶/۲۰ میکروگرم بر سانتی متر مربع بود. میانگین محتوای کلروفیل a ، b ، کل و کاروتنوئیدها به ترتیب ۲۹/۵۵، ۱۵/۸۲، ۴۵/۳۰ و ۱۰/۱۰ میکروگرم بر سانتی متر مربع بود. ضرایب تغییرات رنگ دانه‌های برگ نسبتاً زیاد (بالای ۳۱ درصد) بود. شرایط مختلف محیطی بین مزارع، مدیریت جداگانه مزارع و تنوع ویژگی‌های خاک‌های مزارع از جمله عواملی است که می تواند باعث این تغییرات شود.

مدل سازی برآورد محتوای رنگ دانه‌های برگ با استفاده از شاخص‌های گیاهی: آنالیز رگرسیون خطی ساده (Simple linear regression, SLR) و رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (Stepwise multiple linear regression, SMLR) برای به دست آوردن مدل‌های برآورد رنگ دانه‌های گیاه در نظر گرفته شد (روابط ۵ و ۶).

$$y = mx_1 + c \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$y = mx_1 + mx_2 + \dots + mx_n + c \quad \text{رابطه ۶:}$$

در روابط بالا y محتوای کلروفیل و یا کاروتنوئید گیاه، x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای مستقل یعنی شاخص‌های گیاهی؛ C ثابت (intercept) و m ضریب متغیر مستقل یا شیب خط رگرسیون هستند.

محاسبات آماری توسط نرم افزار (©2017 Systat IBM و SigmaPlot 14.0 Software Inc. SPSS Statistics Ver. 25 © IBM Corporation 1989.2017) انجام شدند.

اعتبارسنجی مدل‌ها: از ۷۰ درصد داده‌ها به منظور کالیبراسیون مدل‌های رگرسیونی و از ۳۰ درصد بقیه برای ارزیابی و صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. سپس با توجه به مقادیر مشاهده شده و برآورد شده، اعتبارسنجی مدل‌ها با محاسبه آماره‌هایی نظیر ضریب تبیین (R^2)، شاخص جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نسبی (Relative Root Mean Square)

جدول ۲- ویژگی‌های آماری رنگ دانه‌های برگ گندم واحدهای نمونه برداری در زمان نمونه برداری

Table 2- Statistical characteristics of wheat leaf pigments in sampling units at sampling time

متغیرهای وابسته Dependent Variables	کم‌ترین	بیش‌ترین	میانگین	انحراف معیار Std.	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of Variation (%)	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
	Min.	Max.	Mean				
کلروفیل a Chla	0.70	48.00	29.55	10.60	35.86	-0.71	0.21
کلروفیل b Chlb	0.50	24.00	15.82	4.96	31.32	-0.70	0.66
کلروفیل کل ChIT	1.20	68.00	45.30	14.36	31.71	-1.01	0.96
کل کاروتنوئیدها CarT	2.20	16.20	10.10	3.85	38.10	-0.14	-0.98

شاخص‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان دادند. نسبت Car/Chla با شاخص‌های BI، SIPI، PSRI، MCARI/OSAVI و TCARI/OSAVI، NPCI همبستگی مثبت و معنی‌دار و با سایر شاخص‌ها به جز شاخص‌های TCARI و MCARI همبستگی منفی و معنی‌داری نشان دادند.

جدول ۳ ضرایب همبستگی محتوای کلروفیل a، b، کل، کاروتنوئیدها و نسبت کاروتنوئیدها به کلروفیل a (Car/Chla) با شاخص‌های گیاهی را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول محتوای کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئیدها با شاخص‌های BI، SIPI، PSRI، TCARI، MCARI، NPCI، TCARI/OSAVI و MCARI/OSAVI همبستگی منفی و معنی‌دار و با سایر

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های گیاهی با رنگ‌دانه‌های برگ گندم

Table 3- The coefficients of correlation of vegetation indices studied with the wheat leaf pigments

	کلروفیل a Chla	کلروفیل b Chlb	کلروفیل کل ChlT	کل کاروتنوئیدها Car	نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a Car/Chla
کلروفیل a Chla	1				
کلروفیل b Chlb	0.662**	1			
کلروفیل کل ChlT	0.964**	0.834**	1		
کل کاروتنوئیدها Car	0.680**	0.628**	0.712**	1	
نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a Car/Chla	-0.544**	-0.480**	-0.570**	-0.170ns	1
NDVI	0.674**	0.693**	0.732**	0.621**	-0.561**
GNDVI	0.666**	0.690**	0.724**	0.619**	-0.566**
RVI	0.597**	0.614**	0.647**	0.630**	-0.320**
SAVI	0.658**	0.673**	0.712**	0.580**	-0.565**
OSAVI	0.667**	0.684**	0.725**	0.601**	-0.564**
MSAVI2	0.647**	0.661**	0.701**	0.578**	-0.526**
DVI	0.633**	0.645**	0.684**	0.528**	-0.558**
RDVI	0.660**	0.674**	0.714**	0.580**	-0.565**
Clgreen	0.621**	0.642**	0.674**	0.636**	-0.391**
GI	0.625**	0.633**	0.675**	0.629**	-0.359**
CVI	0.613**	0.650**	0.671**	0.602**	-0.508**
EVI	0.654**	0.663**	0.706**	0.593**	-0.512**
TVI	0.645**	0.657**	0.697**	0.539**	-0.579**
TCI	0.638**	0.649**	0.689**	0.558**	-0.513**
BGI	0.558**	0.569**	0.603**	0.667**	-0.248**
BI	-0.601**	-0.648**	-0.665**	-0.621**	0.640**
CRI	0.627**	0.664**	0.687**	0.704**	-0.414**
SIPI	-0.670**	-0.687**	-0.728**	-0.490**	0.850**
PSRI	-0.691**	-0.710**	-0.750**	-0.625**	0.648**
GM1	0.621**	0.642**	0.674**	0.636**	-0.391**
CARI	0.638**	0.650**	0.690**	0.533**	-0.567**
TCARI	-0.424**	-0.440**	-0.459**	-0.551**	0.021 ^{ns}
MCARI	-0.424**	-0.440**	-0.459**	-0.551**	0.021 ^{ns}
MCARI1	0.650**	0.662**	0.703**	0.544**	-0.590**
MCARI2	0.630**	0.640**	0.680**	0.493**	-0.608**
SRPI	0.611**	0.620**	0.660**	0.676**	-0.304**
NPCI	-0.636**	-0.644**	-0.686**	-0.669**	0.366**
TCARI/OSAVI	-0.590**	-0.611**	-0.641**	-0.634**	0.314**
MCARI/OSAVI	-0.590**	-0.611**	-0.641**	-0.634**	0.314**
TCl/OSAVI	0.507**	0.487**	0.537**	0.328**	-0.440**

ns, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: Not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

نظارت بر تغییرات در محتوای کلروفیل در مقیاس خرد (۳۰ متر در ۳۰ متر) در سطح مزرعه برای کاربردهای عملیاتی کشاورزی مهم است.

بر اساس جدول ۴ نتایج رگرسیون خطی ساده (SLR) نشان داد که شاخص‌های NDVI، PSRI، OSAVI، SIPI و GNDVI با R^2 بین ۰/۴۰۸ تا ۰/۳۶۱ و RMSE بین ۸/۳۸ تا ۸/۷۷ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع کلروفیل a را برآورد کرد. همچنین، این شاخص‌ها R^2 بین ۰/۴۰۰ تا ۰/۳۲۲ و RMSE بین ۳/۶۹ تا ۴/۲۱ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع برای کلروفیل b و R^2 بین ۰/۵۰۰ تا ۰/۴۳۳ و RMSE بین ۱۰/۸۲ تا ۱۳/۳۶ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع برای کلروفیل کل ایجاد کردند. در بین این شاخص‌ها، شاخص PSRI بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کم‌ترین RMSE را داشت لذا مناسب‌ترین شاخص برای برآورد محتوای کلروفیل a، b و کل است.

بر اساس جدول ۳ کلروفیل a، b و کلروفیل کل با شاخص‌های OSaVI، SIPI، NDVI، PSRI و GNDVI، کاروتنوئیدها با شاخص‌های CRI، SRPI، NPCI و BGI، نسبت Car/Chla با شاخص‌های SIPI، PSRI و BI بالاترین همبستگی را داشتند. سایر شاخص‌ها همبستگی متوسط تا ضعیفی داشتند هر چند که از نظر آماری در سطح معنی‌داری قرار داشتند ($p < 0/001$).

الف) برآورد محتوای رنگ‌دانه‌های برگ با استفاده از مدل رگرسیون خطی ساده (SLR): مدل‌های رگرسیون خطی ساده (SLR) برای تخمین محتوای کلروفیل a، b و کل، کاروتنوئیدها و نسبت کاروتنوئیدها به کلروفیل a (Car/Chla) با برخی از شاخص‌های گیاهی که مطابق جدول ۳ بالاترین همبستگی را داشتند ایجاد شد (جدول ۴). کارایی این شاخص‌ها برای مدل‌سازی محتوای رنگ‌دانه‌های برگ ارزیابی شد. قابلیت کاربرد این شاخص‌ها برای

جدول ۴- مدل‌های رگرسیون خطی ساده برای پیش‌بینی محتوای رنگ‌دانه‌های برگ گندم با استفاده از شاخص‌های گیاهی

Table 4- Simple linear regression models for prediction of wheat leaf pigments content using vegetation indices

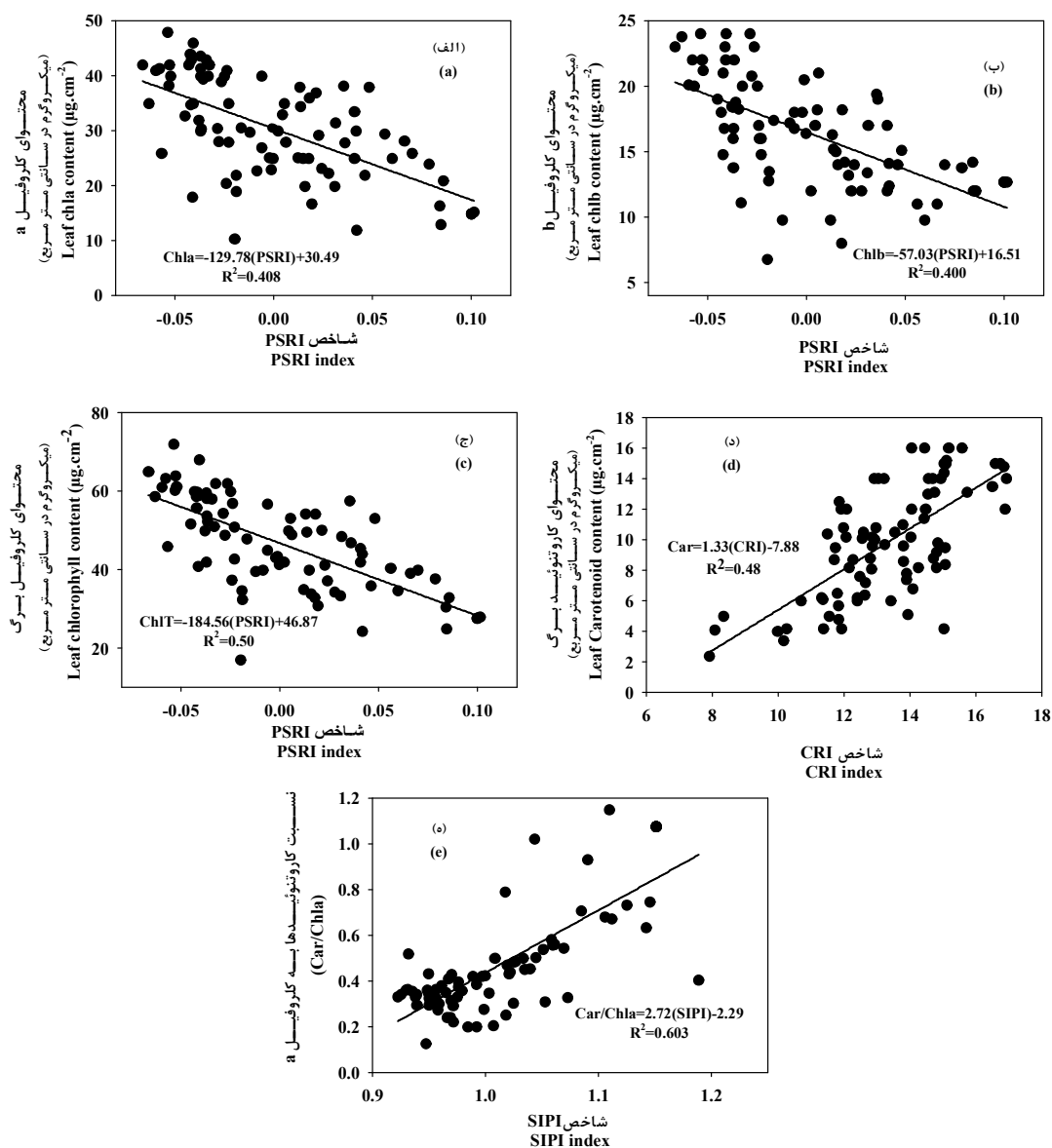
متغیرهای وابسته Dependent Variables	مدل model	ضریب تبیین R^2	خطای استاندارد تخمین SEE	مقادیر F F value	شاخص جذر میانگین مربعات خطا RMSE
کلروفیل a Chla	Chla=-129.78(PSRI)+30.49	0.408	7.18	54.74**	8.38
	Chla=43.78(NDVI)+4.18	0.380	7.30	50.19**	8.69
	Chla=-26.68(SIPI)+72.24	0.372	7.32	49.24**	8.67
	Chla=37.37(OSaVI)+3.89	0.370	7.36	48.12**	8.77
کلروفیل b Chlb	Chla=61.26(GNDVI)-4.78	0.361	7.41	46.42**	8.73
	Chlb=-57.03(PSRI)+16.51	0.400	3.18	52.50**	3.69
	Chlb=18.22(NDVI)+5.56	0.360	3.22	40.78**	3.81
	Chlb=25.81(GNDVI)+1.65	0.354	3.36	39.30**	4.21
کلروفیل کل ChlT	Chlb=15.52(OSaVI)+5.50	0.342	3.40	38.95**	3.85
	Chlb=-11.15(SIPI)+40.37	0.322	3.50	36.61**	4.12
	ChlT=-184.56(PSRI)+46.87	0.500	8.47	79.49**	10.82
	ChlT=61.27(NDVI)+10.05	0.462	8.80	67.66**	11.31
کاروتنوئید Car	ChlT=-49.31(SIPI)+100.57	0.454	8.87	65.06**	12.36
	ChlT=52.24(OSaVI)+9.79	0.440	8.90	64.27**	11.44
	ChlT=86.02(GNDVI)-2.64	0.433	8.95	62.69**	11.37
نسبت کاروتنوئیدها به کلروفیل a Car/Chla	Car=1.33(CRI)-7.88	0.480	2.67	75.69**	2.92
	Car=-25.87(NPCI)+9.46	0.430	2.81	60.94**	3.02
	Car=12.43(SRPI)-3.19	0.421	2.82	59.55**	3.01
	Car/Chla=2.72(SIPI)-2.29	0.603	0.154	124.56**	0.260

شاخص GNDVI نیز رابطه مثبتی با محتوای کلروفیل برگ گندم نشان داد (جدول ۴). بلکمر و همکاران (۱۹۹۴) دریافتند که باند سبز به محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی حساسیت زیادی دارد (۴). GNDVI، با استفاده از یک باند سبز به جای باند قرمز در NDVI، برای تخمین غلظت کلروفیل برگ پیشنهاد شده است (۱۹، ۲۱).

نتایج رگرسیون خطی ساده (SLR) برای محتوای کاروتنوئیدها نشان داد که شاخص CRI نتیجه بهتری (جدول ۴). $R^2 = ۰/۴۸۰$ و $RMSE = ۲/۹۲ \mu g.cm^{-2}$ با محتوای کاروتنوئید برگ در مقایسه با شاخص‌های دیگر داشت (جدول ۴). سپس شاخص‌های NPCI و SRPI به ترتیب با R^2 برابر $۰/۴۳۰$ و $۰/۴۲۱$ و RMSE برابر $۳/۰۲$ و $۳/۰۱$ قرار داشتند. شکل ۲ (د) نشان می‌دهد که با افزایش محتوای کاروتنوئید شاخص CRI نیز افزایش می‌یابد. تخمین محتوای کاروتنوئید برگ به کمک اندازه‌گیری بازتاب به دلیل غلظت کم‌تر کاروتنوئید نسبت به کلروفیل در اکثر برگ‌ها و همچنین هم‌پوشانی بین قله‌های جذب کلروفیل و کاروتنوئید، بسیار دشوارتر از تخمین کلروفیل می‌باشد (۳، ۸، ۳۹). بنابراین، برای ایجاد یک روش برای تخمین غیرمخرب Car برگ، گیتلسون و همکاران (۲۰۰۲) با یافتن باندهای طیفی که نسبت به محتوای Car به میزان زیادی حساس و نسبت به سایر رنگدانه‌ها، ساختار برگ و ضخامت کم‌تر حساس باشند و حذف سهم Chl بر بازتاب در باند طیفی انتخاب شده، شاخص بازتاب کاروتنوئید (CRI) را ایجاد کردند (۲۴). مدل ایجاد شده با استفاده از شاخص NPCI در برآورد محتوای کاروتنوئید برگ (جدول ۴) نشان می‌دهد که با افزایش محتوای کاروتنوئید از میزان این شاخص کاسته می‌شود.

شکل ۲ (الف، ب و ج) به ترتیب رابطه خطی بین محتوای کلروفیل a، b و کل برگ گندم و شاخص PSRI را نشان می‌دهد که بیان‌گر این است که با افزایش محتوای کلروفیل از میزان شاخص PSRI کاسته می‌شود. این شاخص به تغییرات بازتاب ناشی از پیری گیاه حساس است. مرزلیاک و همکاران (۱۹۹۹) نیز نشان دادند که تفاضل بین بازتاب در باند قرمز (۶۸۰-۶۷۰ نانومتر) و آبی (۵۰۰ نانومتر) به تغییرات رنگدانه‌ها در طی پیری برگ و رسیدن میوه حساس است و می‌توان از آن برای تخمین کمی نسبت Car/Chl استفاده کرد (۳۹). در طول موج ۵۰۰ نانومتر، بازتابش توسط جذب ترکیبی Chl a، Chl b و Car کنترل می‌شود، در حالی که در حدود ۶۸۰ نانومتر تنها توسط جذب Chl a کنترل می‌شود. در نتیجه، این تفاضل با کاهش محتوای کلروفیل و با افزایش نسبت Car/Chl افزایش می‌یابد (۳۹). لذا شاخص PSRI می‌تواند به عنوان تخمینی از راندمان استفاده از نور فتوسنتزی استفاده شود (۵۳).

مدل توسعه یافته با استفاده از شاخص SIPI نشان می‌دهد (جدول ۴) که همانند شاخص PSRI، با افزایش محتوای کلروفیل مقدار این شاخص نیز کاسته می‌شود. شاخص NDVI نیز در بررسی ما رابطه مثبتی با محتوای کلروفیل برگ داشت (جدول ۴). NDVI شاخص گیاهی شناخته شده و پرکاربردی است که از نسبت تفاضل بین باندهای مادون قرمز و قرمز استفاده می‌کند. جذب در باند قرمز به دلیل وجود رنگدانه‌های کلروفیل و بازتاب در مادون قرمز ناشی از ساختار سلولی برگ است (۵۱). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که شاخص‌های گیاهی (مانند RVI، NDVI) که بسیار پاسخ‌گو به باند طیفی قرمز هستند، رابطه خطی محکمی با رنگدانه‌های برگ دارند (۵، ۲۲).

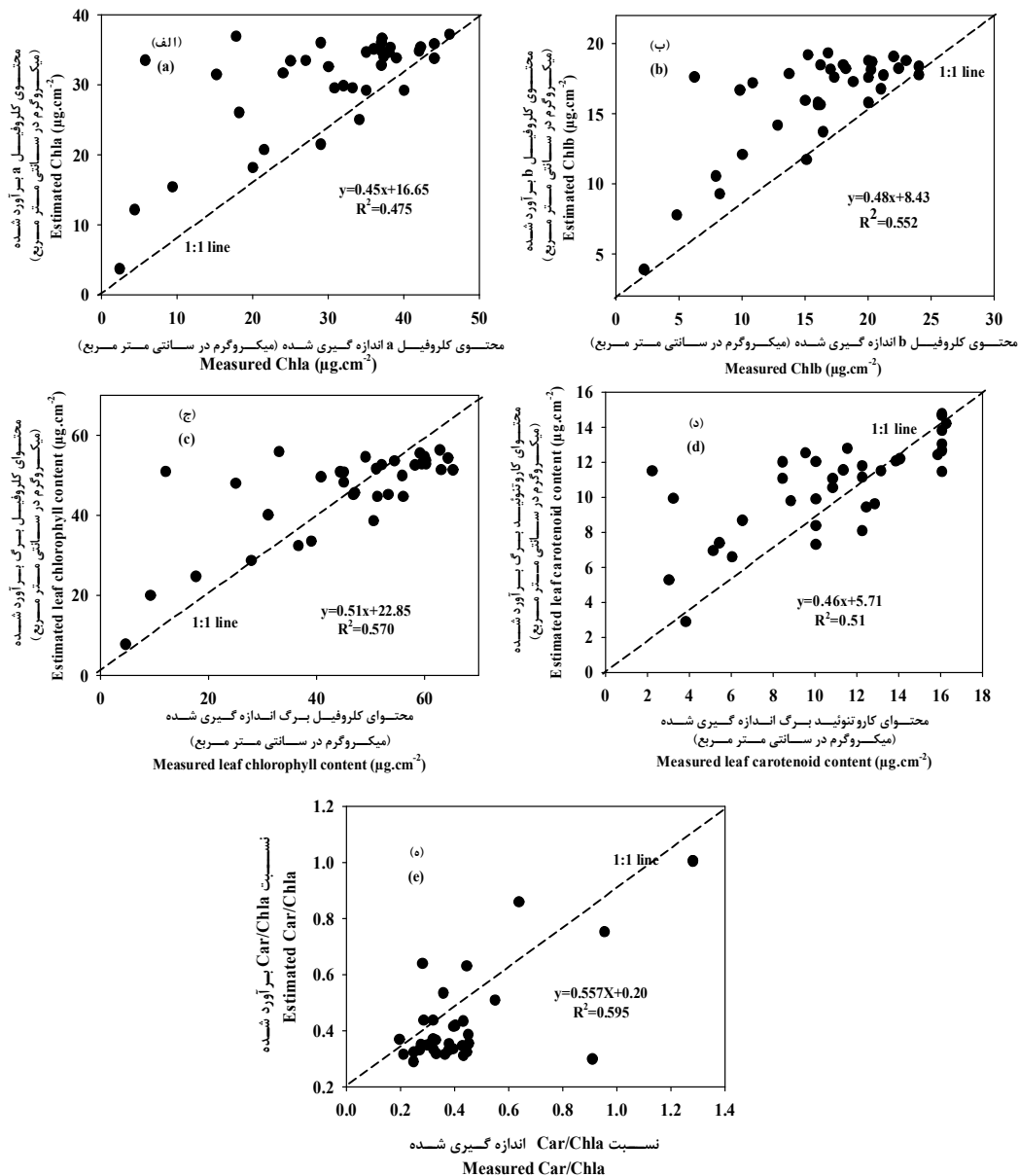


شکل ۲- رابطه بین الف) شاخص PSRI و کلروفیل a، ب) شاخص PSRI و کلروفیل b، ج) شاخص PSRI و کلروفیل کل (د) شاخص CRI و کاروتنوئید ها، ه) شاخص SIPI و نسبت Car/Chla در مدل رگرسیون خطی ساده

Figure 2- Relationship between a) PSRI and Chla b) PSRI and Chlb c) PSRI and ChlT d) CRI and Car e) SIPI and Car/Chla using simple linear regression models

کاروتنوئیدها در منطقه قرمز جذب شدیدی ندارند. بنابراین، شاخص NPCI نسبت کل رنگدانه‌های فتوستتزی به کلروفیل را ارزیابی می‌کند. این شاخص به نسبت کل رنگدانه‌های فتوستتزی و کلروفیل حساس است و نشان‌دهنده فنولوژی گیاه و وضعیت فیزیولوژیکی گیاه است (۴۶).

پنیولاس و همکاران (۱۹۹۴) در برگ‌های آفتابگردان با داده‌های طیف‌سنجی، نشان دادند که شاخص NPCI با محتوای کل رنگدانه و کلروفیل تغییر می‌کند (۴۶). رنگدانه‌های کاروتنوئید حداکثر جذب را در ناحیه ۵۰۰-۳۰۰ نانومتر دارند همان‌طور که کلروفیل در طول موج‌های مرئی کوتاه‌تر از سبز جذب دارد ولی بر خلاف کلروفیل،



شکل ۳- رابطه بین مقادیر محتوای (الف) کلروفیل a (ب) کلروفیل b (ج) کلروفیل کل (د) کاروتنوئید ه) نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a اندازه گیری شده و برآورد شده گندم با استفاده از مدل رگرسیون خطی ساده

Figure 3- Relationship between the measured and estimated a) Chla b) Chlb c) ChlT d) Car e) Car/Chla using simple linear regression models

جدول ۴ نشان می دهد که شاخص SRPI رابطه مثبتی با محتوای کاروتنوئید برگ گندم دارد. شاخص SRPI بر اساس نسبت کاروتنوئید و کلروفیل a توسط پنیولاس و همکاران (۱۹۹۵) ایجاد شد (۴۵). همچنین، نتایج رگرسیون خطی ساده (SLR) نشان داد که شاخص SIPI بالاترین ضریب تبیین

با نسبت Car/Chla ($R^2 = 0.603$) را در مقایسه با شاخص های دیگر داشت (جدول ۴). پنیولاس و همکاران (۱۹۹۵) شاخص رنگ دانه غیرحساس به ساختار (SIPI) را برای برآورد نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a پیشنهاد کردند. آن ها دریافتند که SIPI

داده‌های بازتابی محتوای کلروفیل برگ را برآورد کردند (۲۷). آن‌ها چندین شاخص ترکیبی را که نسبت به تغییرات محتوای کلروفیل حساس‌اند و همچنین نسبت به تغییرات LAI نسبتاً مقاوم‌اند، مقایسه کردند. R^2 شاخص‌های ترکیبی MCARI/OSAVI، TCARI/OSAVI و TCI/OSAVI برای ذرت به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۸۰ و ۰/۷۵ و برای گندم ۰/۴۴، ۰/۴۲ و ۰/۴۹ بود. بهترین برآورد کننده محتوای کلروفیل برگ برای ذرت نسبت TCARI/OSAVI و برای گندم نسبت TCI/OSAVI بود (۲۷).

بناری و همکاران (۲۰۰۷) شاخص‌های کلروفیل ابرطیفی محاسبه شده از داده‌های GER-3700 را برای برآورد محتوای کلروفیل گندم با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. از شاخص‌های مورد بررسی آن‌ها، شاخص NPCI با R^2 برابر ۰/۸۴ و RMSE برابر با ۱۱ بهترین نتایج را نشان داد. در مطالعه آن‌ها شاخص‌های دیگر مانند GNDVI، OSAVI، عملکرد ضعیفی داشتند و شاخص‌های SIPI، SRPI، NDPI و PRI با R^2 به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۵۷ و ۰/۵۴ و RMSE برابر با ۱۰/۲۷، ۱۰/۹۶، ۱۱/۰۶ و ۱۱/۳۲ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع به دست آمدند (۲).

نتایج کوئیسترا و کلورز (۲۰۱۶) با استفاده از شبیه‌سازی با مدل انتقال تابشی PROSAIL با تصاویر RapidEye و اندازه‌گیری‌های طیف سنجی میدانی نشان داد که استفاده از شاخص‌های گیاهی نسبت TCARI/OSAVI، TCI/OSAVI و CVI) برای تخمین میزان کلروفیل برگ در محصول سیب‌زمینی امکان‌پذیر است (۳۳). کلورز و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 نشان دادند که TCARI/OSAVI ($R^2=0.696$; $RMSE=0.062$) و شاخص CVI ($R^2=0.656$; $RMSE=0.066$) می‌تواند برای برآورد محتوای کلروفیل برگ

بهترین تخمین را برای طیف وسیعی از برگ‌های گونه‌ها و شرایط مختلف ارائه می‌دهد (۴۵).

شکل ۳ (الف، ب و ج) مقادیر محتوای کلروفیل a، b و کل برگ برآورد شده با معادله خطی به دست آمده از شاخص PSRI در جدول ۴ در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده (با استفاده از اندازه‌گیری آزمایشگاهی) را با استفاده از مدل رگرسیون خطی ساده نشان می‌دهد.

این شکل نشان می‌دهد که این مدل در مقادیر کم کلروفیل مقداری بیش‌برآورد محتوای کلروفیل برگ را نشان می‌دهد. شکل ۳ (د) محتوای کارتنوئید برگ اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از شاخص CRI و شکل ۳ (ه) نسبت Car/Chla اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از شاخص SIPI را نشان می‌دهد.

مطالعات اخیر نیز کارایی برخی از این شاخص‌ها را برای برآورد کلروفیل نشان داده‌اند. هان و همکاران (۲۰۰۲) نیز نشان دادند که NDVI به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای SPOT با محتوای کلروفیل اندازه‌گیری شده با کلروفیل‌متر SPAD، به میزان زیادی همبستگی داشت (۲۸). زاکرو-تجادا و همکاران (۲۰۰۱) و وو و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که بسیاری از شاخص‌های گیاهی مبتنی بر حس‌گرهای نوری و ابرطیفی (CARI، TCARI، GVI، SIPI، OSAVI، GNDVI) رابطه خطی قوی را با محتوای کلروفیل دارند (۵۷، ۶۱).

هابودان و همکاران (۲۰۰۲) نسبت TCARI/OSAVI را برای پیش‌بینی دقیق محتوای کلروفیل ذرت از تصاویر سنجنش از دور ابرطیفی پیشنهاد کردند (۲۵). در مطالعه هابودان و همکاران (۲۰۰۸) شاخص‌های TCI، TCARI، MCARI به ترتیب با R^2 برابر با ۰/۴۷، ۰/۵۵ و ۰/۴۷ در ذرت و برابر با ۰/۲۳، ۰/۳۴ و ۰/۲۶ در گندم با استفاده از

برای تخمین رشد شاخ و برگ در کانوپی‌ها استفاده شده است (۱۷).

شکل ۴ (الف) نشان داد که در مدل برآورد کلروفیل a اکثر نقاط حول خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند. شکل ۴ (ج) نشان می‌دهد که علیرغم ضریب تبیین متوسط مدل رگرسیون خطی گام به گام در مقادیر بالای کلروفیل کل کم برآوردی داشته است.

بر اساس جدول ۵ مدل SMLR محتوای کلروفیل b برگ را با $R^2 = ۰/۴۷۱$ و $RMSE = ۳/۶۹$ برآورد کرد و نشان داد که برآورد مشابهی با رگرسیون خطی ساده داشت. در این مدل تنها شاخص PSRI وارد شده است. شکل ۴ (ب) مقداری بیش‌برآورد برای برآورد کلروفیل b را نشان می‌دهد.

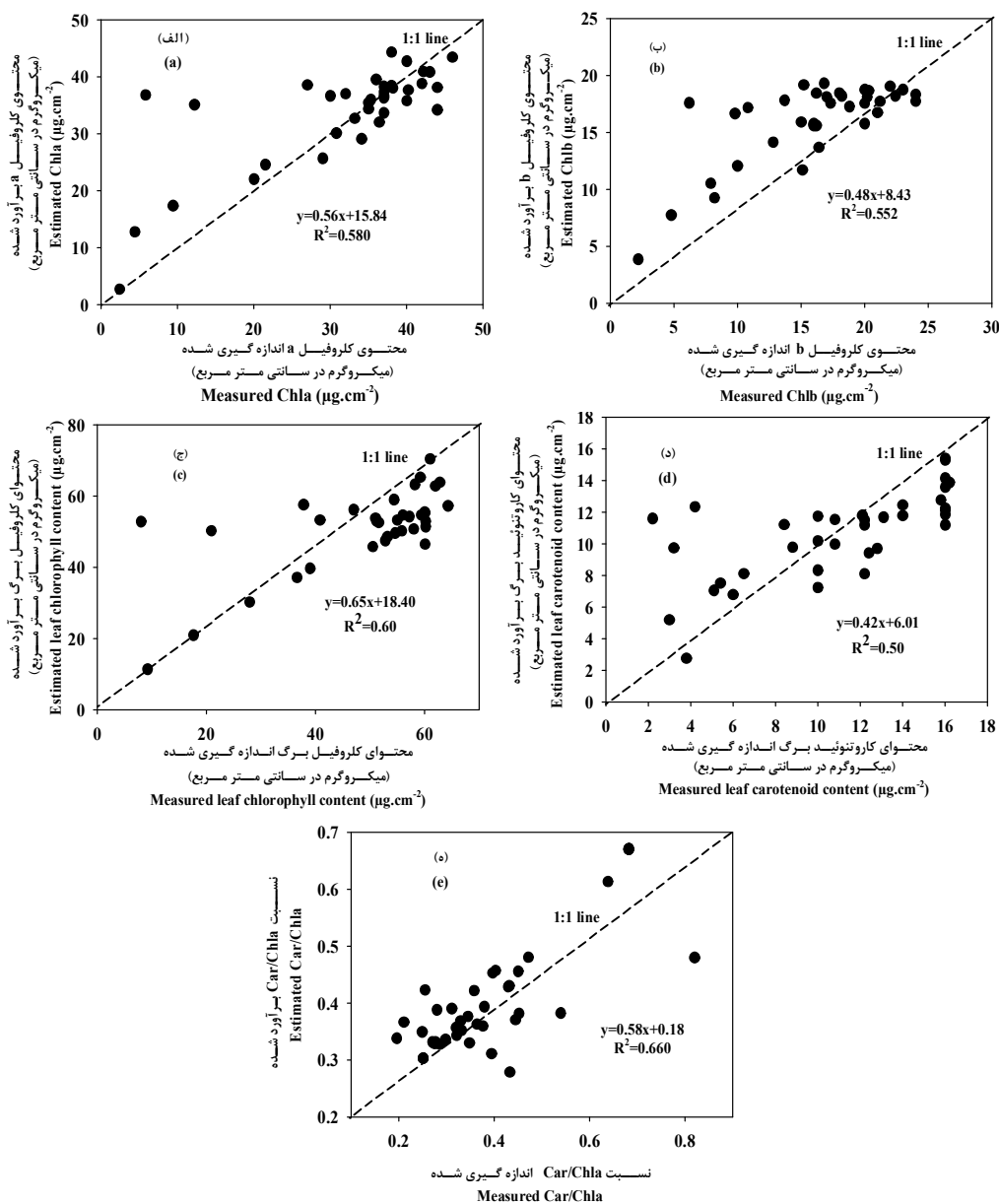
ضریب تبیین مدل رگرسیون چندگانه گام به گام (SMLR) برای برآورد محتوای کاروتنوئید برگ بیش از ضریب تبیین مدل رگرسیون خطی ساده بود. مدل SMLR محتوای کاروتنوئید برگ را با $R^2 = ۰/۵۰$ و $RMSE = ۲/۰۱$ برآورد کرد. شاخص CRI و نسبت TCI/OSAVI در مدل SMLR (جدول ۵) وارد شده است که نشان‌دهنده اهمیت این دو شاخص در برآورد محتوای کاروتنوئید برگ است. شاخص TCI نسخه اصلاح شده شاخص TVI است که به اثرات کلروفیل نسبت به تغییرات LAI حساس‌تر می‌باشد (۲۷). شاخص ترکیبی TCI/OSAVI را نیز هابودان و همکاران (۲۰۰۸) به منظور به حداقل رساندن سهم بازتاب پس‌زمینه ایجاد کردند (۲۷).

شکل ۴ (د) رابطه بین محتوای کاروتنوئید برگ اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از معادله رگرسیون خطی چندگانه (جدول ۵) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با وجود ضریب تبیین متوسط مدل در کاروتنوئید بالای ۱۳ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع کم برآوردی نشان می‌دهد.

در سیب‌زمینی به کار رود (۱۰). در مطالعه کرافت و همکاران (۲۰۱۹) بهترین شاخص‌ها برای برآورد محتوای کلروفیل برگ گندم SAVI، NPCI، CIgreen، SPRI، EVI و GNDVI به ترتیب با مقادیر R^2 برابر با ۰/۵۴، ۰/۴۹، ۰/۴۹، ۰/۴۹، ۰/۴۸ و ۰/۴۸ با استفاده از ماهواره لندست ۸ بودند (۱۲).

ب) برآورد محتوای رنگ‌دانه‌های برگ با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR): برای برآورد محتوای رنگ‌دانه‌های برگ گندم (به عنوان متغیرهای وابسته) با استفاده از شاخص‌های گیاهی (به عنوان متغیرهای مستقل) از مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام استفاده شد (جدول ۵). به منظور ارزیابی مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام در یک نمودار ۱:۱ مقادیر محتوای رنگ‌دانه‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و تخمین زده شده با استفاده از معادلات جدول ۵ مورد مقایسه قرار گرفتند (شکل ۴).

نتایج نشان می‌دهند که رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR) برآورد بهتری از محتوای کلروفیل a و کلروفیل کل برگ گندم داشته است. ضریب تبیین مدل (R^2) مقدار بالاتری نسبت به مدل رگرسیون خطی ساده داشت. مدل SMLR محتوای کلروفیل a برگ را با $R^2 = ۰/۵۵۷$ و $RMSE = ۷/۷۳$ و محتوای کلروفیل کل را با $R^2 = ۰/۶۱۱$ و $RMSE = ۱۰/۱۰$ برآورد کرد. شاخص‌های PSRI و CVI در مدل SMLR وارد شده است که نشان‌دهنده اهمیت این دو شاخص در برآورد محتوای کلروفیل a و کلروفیل کل برگ در این روش است. شاخص CVI با وارد کردن نسبت Red/Green به شاخص Green SR برای به حداقل رساندن حساسیت به تفاوت‌ها در LAI کانوپی قبل از بسته شدن کانوپی و افزایش حساسیت به محتوای کلروفیل برگ، به دست آمده است (۵۶). از نسبت Red/Green



شکل ۴- رابطه بین محتوای الف) کلروفیل a ب) کلروفیل b ج) کلروفیل کل د) کاروتنوئید ه) نسبت کاروتنوئید به

کلروفیل a اندازه‌گیری شده و برآورد شده گندم با استفاده از مدل رگرسیونی خطی چندگانه گام به گام

Figure 4- Relationship between the measured and estimated a) Chla b) Chlb c) ChlT d) Car e) Car/Chla using stepwise multiple linear regression models

همچنین، نتایج نشان داد که رگرسیون خطی چندگانه گام به گام برآورد بسیار خوبی از نسبت Car/Chla داشته است. ضریب تبیین (R^2) مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام مقدار بالاتری نسبت به مدل رگرسیون خطی ساده داشت. مدل SMLR نسبت Car/Chla را با $R^2=0.756$ و

RMSE=0.12 برآورد کرد. شاخص‌های SIPI، TCARI، CIgreen، EVI، GNDVI و OSAVI در مدل SMLR وارد شده است که نشان‌دهنده اهمیت این شاخص‌ها در برآورد نسبت Car/Chla در این روش است.

رانجان و پریدا (۲۰۲۰) از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و سنجنده‌های مجاورتی (Proximal Sensors) برای تخمین محتوای کلروفیل برنج در منطقه Sahibganj در ایالت Jharkhand (هند) استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نیز نشان داد که مدل رگرسیون چندگانه ($r = 0.72$ و $RMSE = 9/16 \mu g/cm^2$) نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی ساده (شامل مدل‌های RVI، NDVI و EVI) به ترتیب با r برابر با ۰/۶۹، ۰/۶۶ و ۰/۶۲ و $RMSE$ برابر با ۹/۲۴، ۹/۳۳ و ۹/۶۰ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع) برتری داشت (۴۸).

جدول ۵- مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام برای برآورد محتوای رنگ‌دانه‌های برگ گندم با استفاده از شاخص‌های گیاهی

Table 5- Stepwise multiple linear regression models for estimation of leaf pigments content of wheat using vegetation indices

متغیرهای وابسته Dependent variables	مدل Model	ضریب تیبین R^2	خطای استاندارد تخمین SEE	مقادیر F F value	شاخص جذر میانگین مربعات خطا RMSE
کلروفیل a Chla	Chla = -217.55(PSRI) - 16.42(CVI)+91.04	0.557	7.01	50.87**	7.73
کلروفیل b Chlb	Chlb=-57.03(PSRI)+16.51	0.400	3.18	52.50**	3.69
کلروفیل کل ChIT	ChIT = -285.40(PSRI) - 20.08(CVI)+120.14	0.611	8.61	63.68**	10.10
کاروتنوئید Car	Car = 1.55(CRI) - 37.37(TCI/OSAVI) + 15.58	0.500	2.66	38.94**	2.01
نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a Car/Chla	Car/Chla=5.48(SIPI)+46.92 (GNDVI)+3.58(EVI) - 3.36(CIgreen) - 3.87(TCARI) - 11.63(OSAVI) - 16.03	0.756	0.11	77.74**	0.12

متوسطی را نشان دادند ولی به نظر می‌رسد هنوز نمی‌توانیم از مدل‌های توسعه یافته برای اعمال مدیریت مزارع استفاده کنیم. دلایل مختلفی ممکن است در عدم قطعیت مدل‌های رگرسیونی مؤثر باشند که از جمله می‌توان به پایین بودن تفکیک طیفی و مکانی باندهای داده‌های ماهواره لندست ۸ اشاره کرد. از سوی دیگر باید مدل‌های غیرخطی نیز آزمون شوند و در صورت بالاتر بودن ضریب تبیین در مدل‌های غیرخطی از پتانسیل ماهواره لندست ۸ برای بررسی رنگ‌دانه‌ها و مدیریت مزرعه استفاده کرد.

نتایج این تحقیق نشان داد که در مدل رگرسیون خطی ساده، شاخص‌های PSRI، SIPI، NDVI، OSAVI و GNDVI برای برآورد محتوای کلروفیل a،

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، رابطه بین چندین شاخص گیاهی و شاخص کلروفیلی حاصل از تصاویر ماهواره لندست ۸ و محتوای رنگ‌دانه‌های (کلروفیل و کاروتنوئید) برگ گندم بررسی شد. مدل‌های برآورد محتوای رنگ‌دانه‌ها با استفاده از رگرسیون خطی ساده (SLR) و رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR) تهیه شدند. گرچه اکثر شاخص‌های گیاهی و کلروفیلی همبستگی معنی‌داری با کلروفیل و کاروتنوئید گیاه نشان دادند مدل‌های رگرسیون ساده و گام به گام همچنان که دیگر محققین گزارش کرده‌اند، ضرایب تبیین متوسطی را نشان دادند. شاخص‌هایی همچون PSRI در مدل رگرسیون خطی ضریب تبیین

کلروفیل b، شاخص‌های CRI و TCI/OSAVI برای برآورد محتوای کاروتنوئید و شاخص‌های SIPI، EVI، GNDVI، CIgreen، TCARI و OSAVI برای برآورد نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a برگ گندم مؤثرترین شاخص در مدل رگرسیون خطی چندگانه گام به گام بودند.

b و کل برگ و شاخص‌های CRI، NPCI و SRPI برای برآورد محتوای کاروتنوئید برگ و شاخص SIPI برای برآورد نسبت کاروتنوئید به کلروفیل a نسبت به شاخص‌های دیگر عملکرد بهتری داشتند. شاخص‌های PSRI و CVI برای برآورد محتوای کلروفیل a و کل، شاخص PSRI برای برآورد محتوای

chlorophyll content from multispectral remote sensing data. *Eur. J. Remote Sens.* 48: 1. 319-326.

8. Chappelle, E.W., Kim, M.S., and McMurtrey III, J.E. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sens. Environ.* 39: 3.239-247.
9. Clevers, J.G.P.W. 1986. The application of a vegetation index in correcting the infrared reflectance for soil background. *Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens.*, Balkema, Rotterdam, Boston. 26: 1. 221-226.
10. Clevers, J.G.P.W., Kooistra, L., and Brande M.M.M. 2017. Using sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sens.* 9: 5. 1-15. Doi:10.3390/rs9050405.
11. Cramer, W., and Field, C.B. 1999. The potsdam NPP model intercomparison. *Glob Change Biol.* 5 :1. 1-15.
12. Croft, H., Arabian, J., Chen, J.M., Shang, J., and Liu, J. 2019. Mapping within-field leaf chlorophyll content in agricultural crops for nitrogen management using Landsat-8 imagery. *Precis Agric.* 21: 4. 856-880. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09698-y>.
13. Croft, H., Chen, J.M., and Zhang, Y. 2014. The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures. *Ecol Complex.* 17: 119-130.

منابع

1. Abassi, M., 2009. Investigation of the spectral signature of forest species leaf: *Fagus orientalis*, *Quercus castaneifolia*, *Carpinus betulus*, *Alnus subcordata*, *Parotia persica* using field spectroradiometry. PhD thesis forestry and forest economic, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran. (In Persian)
2. Bannari, A., Khurshid, K.S., Staenz, K., and Schwarz, J.W. 2007. A Comparison of hyperspectral chlorophyll indices for wheat crop chlorophyll content estimation using laboratory reflectance measurements. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 45: 10. 3063-3074.
3. Blackburn, G.A. 1998. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sens. Environ.* 66: 3. 273-285.
4. Blackmer, T.M., Shepers, J.S., and Varvel, G.V. 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agron J.* 86: 6. 934-938.
5. Broge, N.H., and Mortensen, J.V. 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 81: 1. 45-57.
6. Broge, N.H. and Leblanc, E. 2000. Comparing predictive power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. Environ.* 76: 2. 156-172.
7. Carmona, F., Rivas, R., and Fonnegra, D.C. 2015. Vegetation Index to estimate

24. Gitelson, A.A., Zur, Y., Chivkunova, O.B., and Merzlyak, M.N. 2002. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochem. Photobiol.* 75: 3. 272-281.
25. Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., and Dextraze, L. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 81: (2-3). 416-426.
26. Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., and Strachan, I.B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* 90: 337-352.
27. Haboudane, D., Tremblay, N., Miller, J.R., and Vigneault, P. 2008. Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 46: 2. 423-437.
28. Han, S., Hendrickson, L.L., and Ni, B. 2002. Comparison of satellite and aerial imagery for detecting leaf chlorophyll content in corn. *Trans ASAE.* 45: 4. 1229-1239.
29. Hatfield, J.L., Gitelson, A.A., Schepers, J.S., and Walthall, C.L. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agron J.* 100: 117-131.
30. Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25: 3. 295-309.
31. Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., and Leeuwen, W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 59: 3. 440-451.
32. Kim, M.S. 1994. The use of narrow spectral bands for improving remote sensing estimation of fractionally absorbed photosynthetically active radiation (fAPAR). Masters Thesis. Department of Geography, University of Maryland, College Park, MD.
33. Kooistra, L., and Clevers, J.G.P.W. 2016. Estimating potato leaf chlorophyll
14. Dash, J., and Curran, P.J. 2004. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 25: 23. 5403-5413.
15. Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., Brown de Colstoun, E., and McMurtrey III, J.E. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.* 74: 229-239.
16. Flexas, J.L., Briantais, J.M., Cerovic, Z., Medrano, H., and Moya, I. 2000. Steady-state and maximum chlorophyll fluorescence responses to water stress in grapevine leaves. A new remote sensing system. *Remote Sens. Environ.* 73: 283-297.
17. Gamon, J.A., and Surfus, J.S. 1999. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytol.* 143: 1. 105-117.
18. Gitelson, A. 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *J. Plant Physiol.* 161: 165-173.
19. Gitelson, A.A. and Merzlyak, M.N. 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18: 2691-2697.
20. Gitelson, A.A., Gritz, Y., and Merzlyak, M.N. 2003a. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.* 160: 3. 271-282.
21. Gitelson, A.A., Kaufman, J.Y., and Merzlyak, M.N. 1996. Use of a Green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58: 3. 289-298.
22. Gitelson, A.A., Vina, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D.C., Keydan, G.P., and Leavitt, B. 2003b. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophys Res Lett.* 30: 5.1-4.
23. Gitelson, A.A., Vina, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., and Arkebauer, T.J. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys Res Lett.* 32: 8. 1-4.

- MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Comput. Electron. Agric.* 151: 10. 41-49.
43. Nguyen, H., Kim, J., Nguyen, A., Shin, J.C., and Lee, B. 2006. Using canopy reflectance and partial least squares regression to calculate within-field statistical variation in crop growth and nitrogen status of Rice. *Precis Agric.* 7: 4. 249-264.
 44. Pearson, R.L. and Miller, L.D. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. *Remote Sens. Environ.* 8: 1348-1355.
 45. Penuelas, J., Baret, F., and Filella, I. 1995. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica.* 31: 2. 221-230.
 46. Penuelas, J., Gamon, J.A., Freeden, A.L., Merino, J. and Field, C. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves. *Remote Sens. Environ.* 48: 2. 135-146.
 47. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., and Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 48: 2. 119-126.
 48. Ranjan, A.K. and Parida, B.R. 2020. Estimating biochemical parameters of paddy using satellite and near-proximal sensor data in Sahibganj Province, Jharkhand (India). *Remote Sens App Soc Environ.* 18: 1. 1-12.
 49. Rondeaux, G., Steven, M., and Baret, F. 1996. Optimization of soil- adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55: 2. 95-107.
 50. Roujean, J.L., and Breon, F.M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 51:3. 375-384.
 51. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Pp. 309-317. In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume 1:* content using ratio vegetation indices. *Remote Sens Lett.* 7: 611-620.
 34. Le Maire, G., Francois, C., and Dufrene, E. 2004. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 89: 1-28.
 35. Li, F., Miao, Y., Hennig, S.D., Gnyp, M.L., Chen, X., Jia, L., and Bareth, G. 2010. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. *Precis Agric.* 11: 4. 335-357.
 36. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophyll and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods. Enzymol.* 148: 350-387.
 37. Lichtenthaler, H.K., and Buschmann, C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry* (pp. F4.3.1-F4.3.8). New York: John Wiley and Sons.
 38. Liu, J. and Moore, J.M. 1990. Hue image RGB colour composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *Int. J. Remote Sens.* 11: 8. 1521-1530.
 39. Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova O.B., and Rakitin, V.Y. 1999. Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening. *Physiol Plant.* 106: 135-141.
 40. Miraglio, T., Adeline, K., Huesca, M., Ustin, S., and Briottet, X. 2020. Monitoring LAI, chlorophylls, and carotenoids content of a woodland savanna using hyperspectral imagery and 3d radiative transfer modeling. *Remote Sens.* 12: 1. 1-28.
 41. Mosleh Ghahfarokhi, Z. 2016. Soil digital mapping, land suitability and optimization cultivation model for major products plains of Shahrekord. PhD thesis pedology, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran. (In Persian)
 42. Nagy, A., Feher, J., and Tamas, J. 2018. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza River Catchment using

- remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *J. Sens.* 2017: 1.1-17.
59. Zarco, P., Rueda, C., and Ustin, L. 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sens. Environ.* 85: 1. 109-124.
60. Zarco-Tejada, P.J., Berjon, A., Lopez-Lozano, R., Miller, J.R., Martin, P., Cachorro, V., Gonzalez, M.R., and de Frutos, A. 2005. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: leaf and canopy reflectance simulation in a rowstructured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ.* 99: 3. 271-287.
61. Zarco-Tejada, P.J. Miller, J.R., Noland, T.L., Mohammed, G.H., and Sampson, P.H. 2001. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* 39: 7. 1491-1507.
62. Zhang, J., Han, W., Huang, L., Zhang, Z., Ma, Y., and Hu, Y. 2016. Leaf chlorophyll content estimation of winter wheat based on visible and near-infrared sensors. *J. Sens.* 16: 4.1-11. DOI:10.3390/s16040437.
63. Zhang, M., Su, W., Fu, Y., Zhu, D., Xue, J.H., Huang, J., Wang, W., Wu, J., and Yao, C. 2019. Super-resolution enhancement of Sentinel-2 image for retrieving LAI and chlorophyll content of summer corn. *Eur. J. Agron.* 111: 1.1-12.
- Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C.
52. Sage, R.F., Pearcy, R.W., and Seemann, J.R. 1987. The nitrogen use efficiency of C3 and C4 plants III. Leaf nitrogen effects on the activity of carboxylating enzymes in *Chenopodium album* (L.) and *Amaranthus retroflexus* (L.). *J. Plant Physiol.* 85: 2. 355-359.
53. Sims, D.A., and Gamon, J.A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens. Environ.* 81: 2-3.337-354.
54. Sinclair, T.R., and Rufty, T.W. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Glob Food Sec.* 1: 2. 94-98.
55. Verrelst, J., Camps-Valls, G., Munoz-Mari, J., Rivera, J.P., Veroustraete, F., Clevers, J.G., and Moreno, J. 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties, A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 108: 273-290.
56. Vincini, M., Frazzi, E., and D'Alessio, P. 2008. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precis Agric.* 9: 303-319.
57. Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., and Huang, W. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. *Agric. For. Meteorol.* 148: 8-9. 1230-1241.
58. Xue, J., and Su, B. 2017. Significant