

بهره‌گیری از حسگر GreenSeeker در سنجش شاخص سطح کانوپی گیاه ذرت

حسین باقرپور^{۱*} و حسنا محمدی منور^۲

چکیده

اخیراً استفاده از حسگر GreenSeeker به دلیل دقت و سرعت مناسب در تشخیص شاخص سبزیگی مورد توجه بسیاری از کشاورزان قرار گرفته‌است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی قابلیت این حسگر در اندازه‌گیری شاخص سبزیگی و امکان جایگزینی آن نسبت به روش‌های متداول است. در این پژوهش، مقدار سطح کل برگ‌های کانوپی‌ها به روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شد و بهترین تابع جداسازی کانوپی گیاهی از خاک، G-R به دست آمد. با تحلیل نتایج، همبستگی مناسبی بین شاخص سبزیگی و سطح بالایی کانوپی‌ها به دست آمد ($R^2=0/84$). نتایج نشان داد که بین این دو شاخص به دست آمده از این حسگر و دستگاه کلروفیل‌سنج مدل SPAD-502 همبستگی مناسبی ($R^2=0/82$) وجود دارد و این حسگر قابلیت مناسبی در اندازه‌گیری مقدار سبزیگی گیاه دارد. در بررسی اثر مواد آلی سطحی، ریشه میانگین مربعات خطای حاصل از مواد سطحی بر خروجی حسگر ۰/۰۴۸ به دست آمد که نشان می‌دهد این مواد تأثیر قابل توجهی بر خروجی حسگر ندارند. از آنجایی که هر کدام از محصولات دارای بازتاب ویژه‌ای در محدوده باند طیفی قرمز و مادون قرمز هستند بنابراین مدل به دست آمده در این پژوهش تنها مختص ذرت بوده و برای سایر محصولات لازم است به طور جداگانه مدل مربوطه استخراج گردد. در انتها می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که حسگر GreenSeeker اگر در دوره سبزیگی گیاه مورد استفاده قرار گیرد، قابلیت مناسبی در سنجش سطح کل برگ و سبزیگی گیاه خواهد داشت و به وسیله آن می‌توان مقایسه مناسبی بین سطح پوششی گیاهان در مزارع مختلف انجام داد.

واژه‌های کلیدی: حسگر GreenSeeker، ذرت، شاخص سطح کانوپی، شاخص NDVI.

ارجاع: باقرپور ح. و محمدی منور ح. ۱۳۹۶. بهره‌گیری از حسگر GreenSeeker در سنجش شاخص سطح کانوپی گیاه ذرت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۶(۲): ۴۸-۴۱.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.

* نویسنده مسئول: h.bagherpour@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷

مقدمه

بهینه‌سازی مقدار مصرف نیتروژن (N)، یکی از روش‌های مهم در افزایش عملکرد محصول و بهبود فرایند فتوسنتز گیاهان زراعی است. برای افزایش عملکرد محصول، کشاورزان ممکن است کود بیشتر از حد مجاز و یا مورد نیاز گیاه مصرف کنند. مصرف بیشتر و یکنواخت کود با اینکه می‌تواند درآمد بیشتری را نصیب کشاورز کند؛ ولی چون به صورت بهینه مصرف نشده‌است باعث افزایش هزینه مصرف نهاده‌ها می‌شود و از طرف دیگر، می‌تواند خسارت‌های زیست‌محیطی زیانباری را در بر داشته باشد. بنابراین، مدیریت بهینه کود نیتروژن علاوه بر افزایش عملکرد کمی و کیفی محصول، اثرات مخرب زیست‌محیطی را به حداقل خواهد رساند. مصرف دقیق نیتروژن بر اساس نیاز گیاه در زمان و مکان مورد نظر از راه‌حل‌های مورد نظر برای مدیریت مصرف آن است (Miao et al., 2007). استفاده از روش‌های مخرب تشخیص میزان نیتروژن مورد نیاز گیاه یا خاک (روش کج‌لدال) به دلیل داشتن زحمت و هزینه زیاد، برای مدیریت مزارع در فصول مختلف رشد گیاه مقرون‌به‌صرفه نیست و نمی‌توان از این روش برای مدیریت مکانی و لحظه‌ای کود و برای بخش‌های گسترده از مزارع بهره برد. دستگاه کلروفیل‌سنج، از جمله دستگاه‌هایی است که می‌توان به وسیله آن مقدار نیتروژن را به صورت غیرمخرب و منطقه‌ای مدیریت کرد. با این حال، استفاده از آن به دلیل اینکه لازم است نقطه به نقطه مقدار کلروفیل روی برگ‌ها را اندازه‌گیری کرد، پرهزینه است و برای مزارع بزرگ نیز قابل استفاده نیست (Yao et al., 2012).

شاخص پوشش سبزیگی نرمال^۳ (NDVI)، به‌عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی سلامت گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش‌های نوری که از راه دور شاخص پوشش گیاهی سنجیده می‌شود، با اندازه‌گیری دو طیف قرمز و فروسرخ نزدیک در طول موج‌های خاص مقدار NDVI محاسبه می‌شود. از مهم‌ترین دستگاه‌هایی که به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به GreenSeeker و Crop Circle اشاره کرد که در هر دو از یک روش ولی با اختلاف خیلی مختصر در طول موج‌های اندازه‌گیری شده، مقدار NDVI محاسبه می‌گردد. البته با توسعه‌ای که اخیراً در دستگاه Crop Circle مدل ACS-

470 انجام شده‌است، در این دستگاه به جای دو باند معروف قرمز و فروسرخ نزدیک، امکان بهره‌گیری از ۶ باند طیفی آبی (۴۵۰ nm)، سبز (۵۵۰ nm)، قرمز (۶۵۰ nm) و ۶۷۰ nm، لبه قرمز^۴ (۷۳۰ nm) و فروسرخ نزدیک (۷۶۰ nm) وجود دارد و به طور هم‌زمان می‌توان از سه باند طیفی استفاده کرد. استفاده از باند لبه قرمز به دلیل حساسیت بیشتر به تغییرات سطح کلروفیل و رنگدانه‌ها، بیشتر برای تشخیص وضعیت نیتروژن استفاده می‌شود (Li et al., 2012). در حسگر نوری GreenSeeker نیز مقدار شاخص پوشش سبزیگی نرمال با استفاده از باندهای قرمز و فروسرخ نزدیک اندازه‌گیری می‌شود. در پژوهش‌های اولیه که با استفاده از دستگاه GreenSeeker انجام شد، مقدار ضریب تعیین بین شاخص NDVI و محتوای کلروفیل در محصول گندم، ۰/۹۱ گزارش گردید. همچنین، ارتباط نزدیکی بین شاخص NDVI با شاخص سطح کل کانوپی گزارش شده‌است (Lan, 2009).

استفاده از حسگر GreenSeeker در تخمین مقدار نیتروژن محصول گندم و برنج مورد ارزیابی قرار گرفته‌است و بررسی‌ها نشان داد که راندمان مصرف انرژی در گندم با بهره‌گیری از حسگرهای نوری تا ۱۵٪ بهبود پیدا کرده‌است. همچنین، در مورد برنج، ضریب تعیین بین شاخص بازتابی کلروفیل و سطح کانوپی ۰/۷۹ به دست آمد (Cao et al., 2013). علاوه بر مطالعات انجام‌گرفته در محدوده لبه قرمز، چندین پژوهش هم در محدوده باند سبز برای شاخص سبزیگی انجام شده‌است (Raun et al., 2001; Yao et al., 2012).

علاوه بر تشخیص مقدار سبزیگی امکان تشخیص سلامت گیاه نیز با استفاده از این دستگاه امکان‌پذیر است. هر چه مقدار سبزیگی بیشتر باشد، با افزایش درصد بازتاب در محدوده فروسرخ نزدیک و کاهش بازتاب باند قرمز، مقدار شاخص سبزیگی نرمال بیشتر خواهد شد. از آنجایی که مقدار سبزیگی با مقدار کود نیتروژن موجود کانوپی گیاهی رابطه مستقیمی دارد؛ بنابراین، با اندازه‌گیری این شاخص، وضعیت محصول در آن منطقه به راحتی قابل شناسایی است (Walsh, 2015; Heege, 2015).

شاخص سطح برگ، یک شاخص مهم از شرایط اکوسیستم است و به دلیل ارتباط زیاد آن با فتوسنتز، تعرق، چرخه تعامل کربن و مواد مغذی، متغیر اصلی در مدل‌های

بالای مزرعه انتخاب و به عنوان محل‌های مرجع در نظر گرفته شد. محل‌های مرجع، مناطقی هستند که کود مورد نیاز گیاه در این منطقه در مرحله اولیه رشد به اندازه کافی و مورد نیاز در اختیار گیاه قرار داده می‌شود تا بتوان سایر نقاط را با این محل‌ها مقایسه کرد. برای پی‌بردن به قابلیت دستگاه در اندازه‌گیری شاخص NDVI، انتخاب محل‌های اندازه‌گیری به نحوی انجام شد که بیشترین تغییرات در داده‌های خوانده شده حاصل از حسگر وجود داشته باشد. بنابراین، تمامی مناطق مزرعه به صورت دیدبانی مورد ارزیابی قرار گرفتند و محل‌های کم‌حاصل، متوسط و مناسب دسته‌بندی شدند و حدود ۲۰ اندازه‌گیری از مناطق مختلف انجام گرفت. هم‌زمان با اندازه‌گیری مقادیر NDVI توسط حسگر GreenSeeker، با بهره‌گیری از دوربین دیجیتال (Canon PowerShot A460 -5MP) تصاویر مربوط نیز گرفته شد. با توجه به هدف پژوهش و امکان مقایسه شاخص NDVI با شاخص سطح کل کانوپی، لازم بود که اندازه محل‌های مورد سنجش با اندازه تصویر گرفته‌شده یکسان باشد. بنابراین، بعد از گرفتن تصویر بوته‌ها، مقدار متوسط شاخص NDVI با نگره‌داشتن کلید اندازه‌گیری به مدت ۱۰ ثانیه و حرکت‌دادن آن بر روی محصول اندازه‌گیری شد. این دستگاه طوری عمل می‌کند که با اندازه‌گیری چندین نمونه در ثانیه و متوسط‌گیری از آن‌ها، مقدار NDVI میانگین را نشان می‌دهد و در نتیجه، خطای اندازه‌گیری به حداقل می‌رسد.



شکل ۱- حسگر GreenSeeker و نحوه به کارگیری آن در مزرعه

زیست‌محیطی محسوب می‌شود (Deng et al., 2006). شاخص سطح برگ، به طور معمول برای کنترل فرایند رشد گیاه به کار می‌رود و به طور عمده، از سطح برگ و به طور اندک، از شاخه و ساقه تشکیل شده‌است. به جای استفاده از روش‌های متداول و مستقیم که در آن سطح برگ به روش مستقیم و زمان‌بر اندازه‌گیری می‌شود، اخیراً شاخص سطح برگ به کمک دستگاه‌های الکترونیکی مانند SunScan (Delta-T Devices Ltd., UK) و یا دستگاه‌های مشابه دیگر قابل اندازه‌گیری است. معمولاً در اندازه‌گیری شاخص سطح برگ، سطح تمامی برگ گیاهان واقع در یک متر مربع اندازه‌گیری می‌شود؛ ولی اندازه‌گیری شاخص سطح به روش دستی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است و از طرفی، به دلیل گران‌بودن دستگاه اندازه‌گیری شاخص سطح برگ، تهیه آن به سادگی امکان‌پذیر نیست و به دلیل استفاده از ضرایب ویژه، روش دقیقی محسوب نمی‌شود. از طرف دیگر، یکی از شاخص‌های مهم در محصولات زراعی که می‌توان آن را جایگزین شاخص سطح برگ کرد، شاخص پوشش سبزیگی نرمال است که در آن مقدار شاخص با اندازه‌گیری مقدار سبزیگی به دست می‌آید. با توجه به اینکه دستگاه GreenSeeker با استفاده از بازتاب در محدوده قرمز و فرورسرخ نزدیک، شاخص را با میانگین‌گیری از بازتاب‌های برگشتی محاسبه می‌کند؛ بنابراین، مقدار شاخص حاصل از حسگر GreenSeeker در یک واحد سطح زمین، علاوه بر سبزیگی می‌تواند با مقدار سطح کانوپی (توده گیاهی) نیز رابطه مستقیم داشته باشد. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، یافتن رابطه‌ای بین شاخص سطح کلی برگ‌های حاصل از دوربین و خروجی GreenSeeker است و هدف دیگر نیز، بررسی قابلیت این حسگر در اندازه‌گیری کلروفیل برگ کانوپی و امکان جایگزین کردن آن به جای دستگاه کلروفیل سنج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر بر روی گیاه ذرت در مزرعه واقع در دانشگاه بوعلی‌سینا انجام گرفت. با توجه به اهداف پژوهش و مقایسه داده‌های به دست آمده از دستگاه، در بخش‌های مختلف لازم بود که چندین محل به‌عنوان مرجع انتخاب و مقایسه سایر نقاط با این محل انجام گیرد. به همین دلیل چهار ردیف از محصول به طول ۱۰ متر در پایین، وسط و

از خاک به وجود آمد. از طرفی در نقاطی از سطح برگ به دلیل انعکاس نور خورشید، نقاط سفید رنگی وجود داشتند که بعد از آستانه‌گیری، خطاهایی را در تخمین واقعی سطح برگ به وجود آوردند. برای رفع این مشکل با بهره‌گیری از فیلتر میانگین، این نقاط نیز جز سطح برگ در نظر گرفته شدند. تصویر نهایی، به یک تصویر باینری تبدیل گردید؛ به این ترتیب که برای سطح خاک، ارزش صفر و برای سطح برگ، ارزش یک اختصاص داده شد. با جمع مقادیر عددی سطح برگ‌ها و تقسیم آن‌ها بر سطح کل تصویر، شاخصی به دست آمد که به‌عنوان شاخص سطح رویی برگ‌های کانوپی در نظر گرفته شد. در ارزیابی ارتباط بین شاخص‌ها، علاوه بر استفاده از ضریب همبستگی، مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز محاسبه گردید. از آنجا که واحد اندازه‌گیری‌ها متفاوت بودند؛ بنابراین، برای محاسبه RMSE ابتدا داده‌ها نرمال شدند و سپس، ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در ارزیابی خطا هر چه داده‌های نرمال به خط $y=x$ نزدیک باشند و یا روی آن قرار گیرند، نشانگر مناسب بودن مدل است.

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & f(x, y) < T \\ 1 & f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $g(x, y)$ مقدار باینری هر پیکسل در سطح تصویر جدید؛ $f(x, y)$ تابع مورد نظر در جداسازی سطح خاک از سطح برگ؛ و T ، نیز مقدار آستانه جداسازی هستند.

یکی دیگر از موارد تأثیرگذار بر خروجی حسگر GreenSeeker، حضور بقایای گیاهی در سطح خاک می‌باشد؛ از آنجایی که این مواد ممکن است بر میزان عدد خوانده‌شده تأثیرگذار باشند. بنابراین، با انتخاب تابع و مقدار آستانه مناسب برای حذف زمینه خاک از گیاه، همانند تصویر B از شکل (۳)، سعی شد اثر بقایای گیاهی خاک نیز در نظر گرفته شود.

نتایج و بحث

هم‌چنان که قبلاً اشاره شد، دو محل به‌عنوان نوار مرجع در داخل مزرعه به‌عنوان نقاط کنترل تعیین گردید و بررسی سایر نقاط و مقایسه آن‌ها با وضعیت مطلوب با بهره‌گیری از این نوار مرجع انجام گرفت. شاخص NDVI نقطه مرجع (A) و سایر نقاط (B تا F) داخل مزرعه در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

حسگر نوری GreenSeeker (Trimble, California, USA, Handheld-500) که به صورت دستی قابل حمل و نقل است (شکل ۱)، با فرستادن امواج مادون قرمز (۷۷۴ nm) و قرمز (۶۵۶ nm) و دریافت بازتاب آن‌ها توسط حسگرهای ویژه، مقدار شاخص NDVI را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌کند (Heege, 2015). مقدار ارتفاع این دستگاه از سطح گیاه بین ۶۰-۱۲۰ cm است که در این پژوهش تمامی داده‌ها از ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شدند.

$$NDVI = \frac{NIR_{774} - RED_{656}}{NIR_{774} + RED_{656}} \quad (1)$$

برای بررسی قابلیت حسگر GreenSeeker در اندازه‌گیری میزان شاخص سبزی‌نگی و مقایسه آن با مرجع مطمئن، از دستگاه کلروفیل سنج (Japan, Konica Minolta, SPAD-) نیز استفاده گردید. این دستگاه غلظت نسبی کلروفیل برگ را بر اساس مقدار نور عبور کرده از برگ در دو طول موج قرمز ۶۵۰ nm و فروسرخ ۹۴۰ nm که جذب کلروفیل در آن‌ها تفاوت دارد، اندازه‌گیری می‌کند. بیشترین جذب کلروفیل در دو طول موج قرمز و آبی و کمترین جذب در طول موج سبز است و در طول موج مادون قرمز کلروفیل هیچ جذبی وجود ندارد (Coste et al., 2010). برای اندازه‌گیری شاخص کلروفیل، بعد از اندازه‌گیری شاخص NDVI، مقدار شاخص کلروفیل تمامی برگ‌های بالایی و قابل رویت بوته‌ها اندازه‌گیری گردید.

بررسی شاخص سطح کانوپی (پوششی توده گیاهی) با استفاده از دوربین دیجیتال انجام گرفت. برای حذف اثر اندازه سطح عکس‌برداری‌ها، همه عکس‌ها از یک ارتفاع یکسان گرفته شدند. بنابراین، همه عکس‌ها دارای سطح یکسان می‌باشند. بعد از گرفتن عکس از بخش مورد نظر، مقدار متوسط شاخص NDVI بوته‌های مورد نظر به کمک دستگاه GreenSeeker و از همان ارتفاع عکس‌برداری به دست آمد و پردازش عکس‌های گرفته‌شده به کمک نرم‌افزار متلب (Matlab V.10) انجام گرفت. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری سطح برگ، ابتدا با بررسی مقدار باندهای سبز (G)، قرمز (R) و آبی (B) بر روی سطوح گیاه و سطح خاک، آستانه مورد نظر پیدا شد. با توجه به اینکه بر روی سطح خاک اختلاف کمی در باندهای قرمز و سبز وجود دارد و از طرفی، بر روی سطح برگ این اختلاف زیاد است؛ در نتیجه، با پیدا کردن آستانه ویژه‌ای (رابطه (۲)) برای تابع G-R امکان جدا کردن تمامی سطوح برگ

به دلیل پوشش بخش اعظمی از سطح توسط سطوح سبز، میزان متوسط امواج برگشتی فرسرخ نزدیک نیز بیشتر شده و در نتیجه، شاخص NDVI نیز بیشتر خواهد شد.

همان طوری که در شکل ۲ نشان داده شده‌است، مقدار NDVI با میزان سطح کانوپی (توده زیستی) رابطه مستقیم دارد و می‌تواند مقیاسی از سطح کانوپی باشد؛ به طوری که با افزایش سطح برگ و در نتیجه سطح کانوپی،



B

NDVI=0.66



A

NDVI=0.73



D

NDVI=0.55



C

NDVI=0.5



F

NDVI=0.29



E

NDVI=0.18

شکل ۲- مقادیر شاخص NDVI نقطه مرجع (A) و سایر نقاط موجود در مزرعه (B تا F)

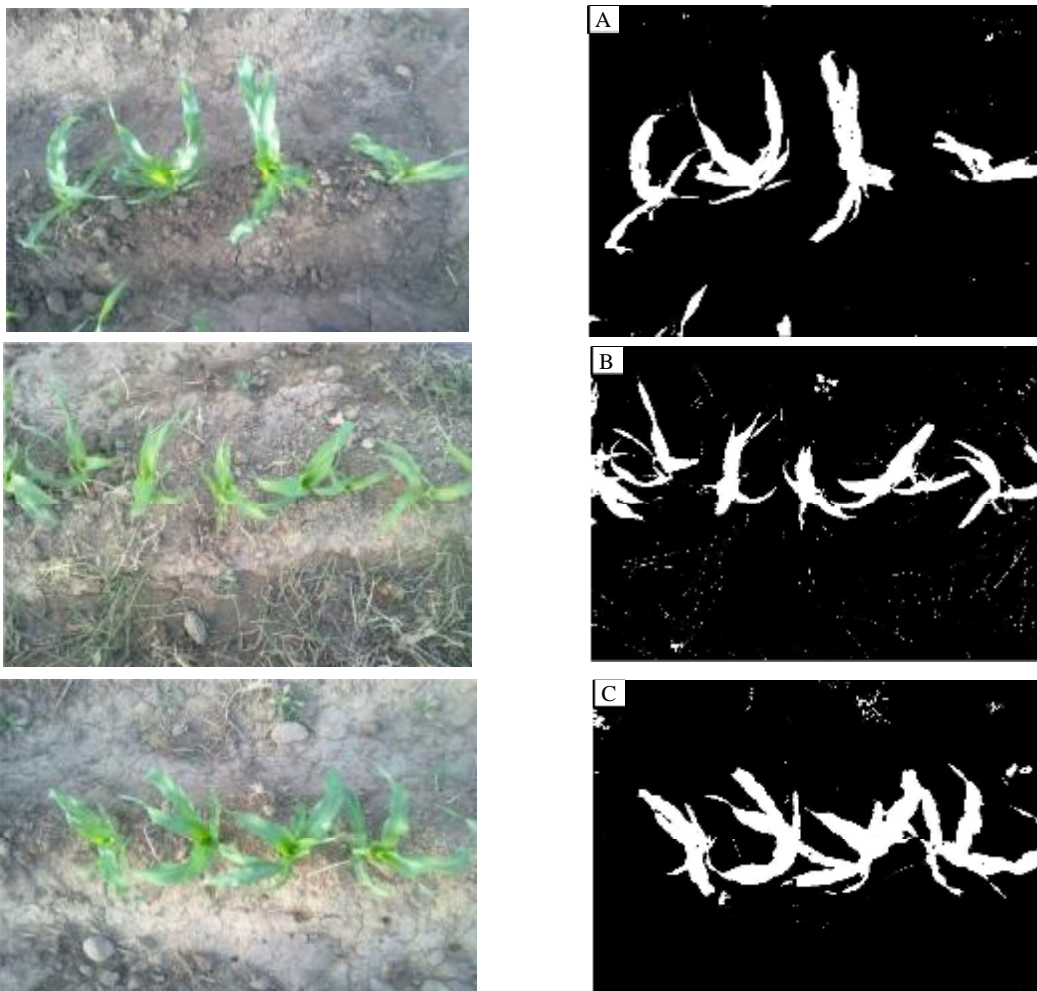
به دلیل انعکاس نور از سطح برگ‌ها و به دلیل نزدیکی باندهای قرمز، آبی و سبز، تابع‌های مربوط به جداسازی سطح خاک از بوته، به‌خوبی کار نکردند و در تخمین سطح برگ، خطاهای بیشتری حاصل گردید؛ ولی با استفاده از فیلتر مناسب میانگین، این مشکل به‌خوبی حل گردید و تصاویر موجود در شکل ۳، نشانگر آن است که فیلتر میانگین طراحی‌شده توانایی خوبی را در جداسازی سطح برگ از خاک دارد.

پردازش تصویر

از آنجایی که تمامی تصاویر از ارتفاع یکسانی گرفته شدند؛ بنابراین، اندازه سطح برگ‌های تصاویر، مقیاس دقیقی از شاخص سطح رویی کانوپی است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، روش به‌کارگرفته شده در این پژوهش توانست سطح کل برگ‌های قابل رؤیت را با تخمین خوب محاسبه کند. همچنین، با نگاهی به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در بعضی از تصاویر، مانند تصویر C،

البته با توجه به مقادیر پیکسل‌ها تنها تعداد محدودی از تابع‌ها توانستند سطح برگ را از خاک جدا کنند که از بین آن‌ها می‌توان به G-B و 2G-R اشاره کرد که در آن‌ها مقدار ضریب تعیین به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۵۲ به دست آمد. در پژوهشی که به بررسی وضعیت نیتروژن برگ چغندر قند با استفاده از پردازش تصاویر رنگی انجام گرفت (Ahmadi Moghadam *et al.*, 2009)، بین مدل سطح خاکستری و مقدار کلروفیل برگ‌ها رابطه مناسبی پیدا شد.

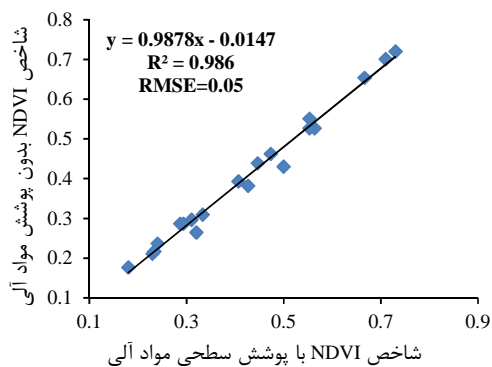
البته با توجه به مقادیر پیکسل‌ها تنها تعداد محدودی از تابع‌ها توانستند سطح برگ را از خاک جدا کنند که از بین آن‌ها می‌توان به G-B و 2G-R اشاره کرد که در آن‌ها مقدار ضریب تعیین به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۵۲ به دست آمد. در پژوهشی که به بررسی وضعیت نیتروژن برگ چغندر قند با استفاده از پردازش تصاویر رنگی انجام گرفت (Ahmadi Moghadam *et al.*, 2009)، بین مدل سطح خاکستری و مقدار کلروفیل برگ‌ها رابطه مناسبی پیدا شد.



شکل ۳- اندازه‌گیری سطح برگ تصاویر با استفاده از پردازش تصویر

برای بررسی ارتباط بین شاخص NDVI با شاخص سطح رویی کانوپی، در نقاط مختلف مزرعه شاخص سطح کل برای بوته‌هایی که در تصویر دوربین وجود داشتند، اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان داد که بین شاخص سطح رویی کانوپی تصویر و مقدار متوسط شاخص NDVI همبستگی مناسبی با مقدار ضریب تعیین $R^2=0/84$ وجود دارد (شکل ۴). از بین تابع‌های مختلف، تابع G-R به دلیل اختلاف زیاد در مقادیر سبز و قرمز منطقه عاری از بوته‌ها، نتیجه مناسبی نشان داد. در شکل ۴، ارتباط بین شاخص سبزی‌نگی نرمال و شاخص سطوح رویی کانوپی با بهره‌گیری از تابع G-R نشان داده شده‌است. همان‌گونه که نشان داده شده‌است، ارتباط

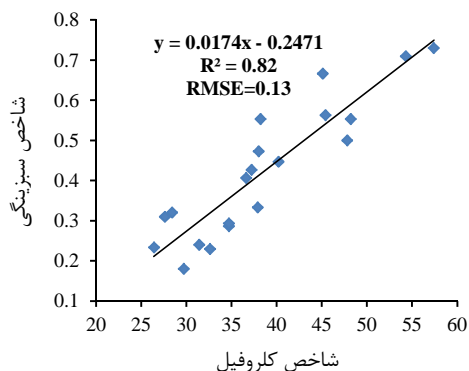
برای بررسی ارتباط بین شاخص NDVI با شاخص سطح رویی کانوپی، در نقاط مختلف مزرعه شاخص سطح کل برای بوته‌هایی که در تصویر دوربین وجود داشتند، اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان داد که بین شاخص سطح رویی کانوپی تصویر و مقدار متوسط شاخص NDVI همبستگی مناسبی با مقدار ضریب تعیین $R^2=0/84$ وجود دارد (شکل ۴). از بین تابع‌های مختلف، تابع G-R به دلیل اختلاف زیاد در مقادیر سبز و قرمز منطقه عاری از بوته‌ها، نتیجه مناسبی نشان داد. در شکل ۴، ارتباط بین شاخص سبزی‌نگی نرمال و شاخص سطوح رویی کانوپی با بهره‌گیری از تابع G-R نشان داده شده‌است. همان‌گونه که نشان داده شده‌است، ارتباط



شکل ۵- ارتباط بین داده‌های حاصل از حسگر GreenSeeker در دو سطح با پوشش و بدون پوشش بقایای گیاهی سطحی

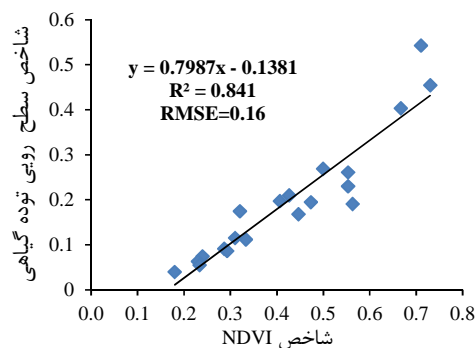
مقایسه شاخص کلروفیل با شاخص NDVI

در بررسی قابلیت حسگر GreenSeeker در اندازه‌گیری شاخص سبزیگی و مقایسه آن با کلروفیل‌سنج SPAD، (در شکل ۶ نشان داده شده است) بین شاخص NDVI حاصل از حسگر و دستگاه کلروفیل‌سنج همبستگی مناسبی با مقدار ضریب تعیین 0.82 به دست آمد که این امر، نشانگر قابلیت خوب حسگر GreenSeeker در تخمین مقدار سبزیگی گیاه است. در پژوهش مشابه‌ای که به بررسی شاخص SPAD و NDVI بر روی برگ‌های گل شمعدانی انجام گرفت، مقدار ضریب تعیین 0.97 گزارش گردید که علت زیادبودن ضریب تعیین گزارش شده آن‌ها را می‌توان به محیط و شرایط کنترل شده آزمایشگاه مربوط دانست که این امر در مزرعه و شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست (Wang et al., 2012).



شکل ۶- مقایسه شاخص NDVI حاصل از حسگر GreenSeeker با مقدار شاخص کلروفیل حاصل از دستگاه SPAD

مناسبتی بین شاخص‌های NDVI و سطح کل کانوبی وجود دارد.



شکل ۴- ارتباط بین شاخص سبزیگی نرمال و شاخص سطح کل کانوبی

تأثیر بقایای گیاهی سطح خاک بر شاخص سطح کل کانوبی

سطح خاک دارای مقدار کمی علف هرز یا بوته‌های خشک شده سال پیش است که می‌تواند بر مقدار شاخص NDVI اندازه‌گیری شده تأثیر بگذارند. در نتیجه، برای بررسی اثر این عامل بر نتایج به دست آمده، مقدار شاخص سبزیگی نرمال در هر دو شرایط، یعنی حاوی بقایای گیاهی سطحی و بدون بقایای گیاهی اندازه‌گیری شد. در بررسی اثر سطوح دارای بقایای گیاهی، نتایج نشان داد که خطای حاصل از بقایای گیاهی خاک بر خروجی حسگر، کمتر از 0.05 NDVI است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، بقایای گیاهی سطحی تأثیر چندانی بر مقدار اندازه‌گیری شده شاخص NDVI نداشته است و ریشه میانگین مربعات خطا حاصل از مواد اضافی سطحی بسیار پایین است. بنابراین، بدون توجه به نوع بقایای گیاهی حاصل از کشت سال‌های قبلی، می‌توان اندازه‌گیری‌ها را با اطمینان انجام داد. البته لازم است علاوه بر بقایای گیاهی سطحی، اثر نوع خاک نیز مورد توجه قرار گیرد؛ به این صورت که اگر مقدار اندازه‌گیری شده شاخص در دو مزرعه یکسان باشد، توصیه‌های کودی متناسب با شاخص سبزیگی NDVI را نمی‌توان برای دو مزرعه به صورت یکسان در نظر گرفت و لازم است اثر انعکاس خاک مزرعه‌ها نیز در نظر گرفته شود.

- nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Journal of Field Crops Research*, 154: 133-144.
3. Coste, S. Baraloto, C. Leroy, C. Marcon, E. Renaud, A. Richardson, A. D. and Hérault, B. 2010. Assessing foliar chlorophyll contents with the SPAD-502 chlorophyll meter: a calibration test with thirteen tree species of tropical rainforest in French Guiana. *Annals of Forest Science*, 67(6): 1-5.
 4. Deng, F. Chen, J. M. Plummer, S. Chen, M. and Pisek, J. 2006. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2219-2229.
 5. Heege, H. J. 2015. Precision in crop farming. Springer. University of Kiel Germany. 364 p
 6. Lan, Y. 2009. Development of an integration sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
 7. Li, F. Mistele, B. Hu, Y. Yue, X. Yue, S. Miao, Y. Chen, X. Cui, Z. Meng, Q. and Schmid-halter, U. 2012. Remotely estimating aerial N status of phenologically differing winter wheat cultivars grown in contrasting climatic and geographic zones in China and Germany. *Journal of Field Crops Research*, 13(6): 21-32.
 8. Miao, Y. Mulla, D. J. Hernandez, J. A. Wiebers, M. and Robert, P. C. 2007. Potential impact of precision nitrogen management on corn yield protein content and test weight. *Soil Science Society of America Journal*, 71(5): 1490-1499.
 9. Raun, W. R. Solie, J. B. Johnson, G. V. Stone, M. L. Lukina, E. V. Thomason W. E. and Schepers, J. S. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1): 131-138.
 10. Walsh, O. S. 2015. Nitrogen management in field crops with reference strips and crop sensors. *Bulletin*. 896 p.
 11. Wang, Y. W. Dunn, B. L. Arnall, D. B. and Mao, P. S. 2012. Use of an active canopy sensor and SPAD chlorophyll meter to quantify geranium nitrogen status. *HortScience*, 47(1): 45-50.
 12. Yao, Y. Miao, Y. Huang, S. Gao, L. Ma, X. Zhao, G. and Gnyp, M. L. 2012. Active canopy sensor-based precision N management strategy for rice. *Agronomy for sustainable development*, 32(4): 925-933.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان به کارگیری حسگر GreenSeeker برای اندازه‌گیری شاخص سطح کانوپی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تصاویر گرفته‌شده از سطح رویی کانوپی، نتایج نشان داد که بهترین تابع جداسازی سطح برگ از خاک، تابع G-R است که با بهره‌گیری از این تابع، بین شاخص NDVI و سطح رویی کل کانوپی همبستگی مناسبی ($R^2 = 0.84$) به دست آمد. همچنین، نتایج حاصل از خروجی حسگر در دو سطح پوشیده با بقایای گیاهی و بدون آن، نشان داد که بقایای گیاهی سطحی اثر چندانی بر شاخص اندازه‌گیری‌شده NDVI ندارد و مقدار خطای حاصل از مواد آلی سطح خاک کمتر از 0.05 به دست آمد. از طرفی، با بهره‌گیری از دستگاه کلروفیل‌سنج SPAD، به‌عنوان وسیله مطمئن و متداول در اندازه‌گیری میزان کلروفیل و شاخص سبزی‌نگی گیاه و مقایسه آن با حسگر مجاورتی GreenSeeker، نتایج نشان داد که بین این دو شاخص همبستگی مناسبی با ضریب تعیین $R^2 = 0.82$ وجود دارد و با توجه به توانایی این حسگر در اندازه‌گیری سریع شاخص سبزی‌نگی، این وسیله می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنجش این شاخص نیز باشد. نتایج کل نشان می‌دهد که با اندازه‌گیری شاخص NDVI، امکان اندازه‌گیری شاخص سطح کانوپی وجود داشته و به وسیله آن می‌توان مقایسه مناسبی بین سطح رویی کانوپی گیاهان در شرایط و مزارع مختلف انجام داد. با اندازه‌گیری شاخص کانوپی گیاهان مختلف و بررسی نتایج حاصل از آن‌ها می‌توان این روش را جایگزین قابل قبولی برای روش‌های مرسوم در سنجش شاخص سطح برگ گیاهان قرار داد و از طرفی، به دلیل ارزان بودن این دستگاه نسبت به کلروفیل‌سنج، این حسگر می‌تواند در اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی به جای کلروفیل‌سنج مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1. Ahmadi Moghaddam, P. Haddad Derafshi, M. A. and Shayeste, M. 2009. Laboratory Estimation of Sugar Beet Leaf Nitrogen Status by Color Image Processing. *Journal of Sustainable Agriculture and Production Science*, 19(1): 189-198. (In Farsi).
2. Cao, Q. Miao, Y. Wang, H. Huang, S. Cheng, S. Khosla, R. and Jiang, R. 2013. Non-destructive estimation of rice plant