مروری بر کاربرد حسگرهای مجاورتی برای تعیین ویژگی‌های محصولات کشاورزی در کشاورزی دقیق

حامد توکلی[1*]

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک

* ایمیل نویسنده مسئول:h-tavakoli@araku.ac.ir

چکیده:

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در حوزه کشاورزی دقیق به آن پرداخته می‌شود، مدیریت موضعی[1] اعمال نیتروژن در مزرعه با کمک اطلاعات جمع‌آوری شده از وضعیت نیتروژن و دیگر ویژگی‌های محصول می‌باشد. در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای توسعه و بکارگیری حسگرهای مناسب برای تشخیص وضعیت نیتروژن صورت گرفته است. در این مقاله به مرور این حسگرها و نتایج استفاده از برخی از آنها توسط نویسنده، پرداخته شد. مرور منابع نشان داد که حسگرهای طیفی-نوری مانند حسگر Yara N-Sensor به دلیل قابلیت و دقت بالا و دوربین‌ها به دلیل ارزان بودن و دقت قابل قبول، جزو پر کاربردترین انواع حسگرهای مجاورتی محصول توسط محققان بوده‌اند. از حسگرهایCrop-Circle و Isaria، ارتفاع محاسبه شده توسط یک پویشگر فاصله‌سنج لیزری، شاخص‌های بدست آمده از اندازه‌گیری‌های یک اسپکترورادیومتر و شاخص‌های مستخرج از تصاویر یک دوربین دیجیتال برای تخمین وضعیت نیتروژن و دیگر پارامترهای محصول گندم استفاده شد. نتایج نشان داد حسگر Isaria و شاخص‌هایی که از محدوده‌ی طیفی لبه قرمز استفاده می‌کنند، بهترین عملکرد را در تخمین ویژگی‌های محصول داشتند. همچنین نتایج قابل قبولی با استفاده از دوربین دیجیتال به عنوان یک حسگر ارزان قیمت، بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: دوربین دیجیتال، شاخص‌های پوشش گیاهی، کشاورزی دقیق، نیتروژن

مقدمه:

یکی از مهم‌ترین نهاده‌های کشاورزی که تأثیر زیادی در رشد گیاه، عملکرد و کیفیت محصول دارد، نیتروژن است. نیاز محصولات به نیتروژن در نقاط مختلف مزرعه به دلیل تفاوت در شرایط خاک، متغیر است. عدم تطابق بین نیتروژن داده شده به محصول و نیاز آن، می‌تواند باعث مختل شدن رشد گیاه، آسیب رسیدن به محیط زیست و زیان‌های اقتصادی گردد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در سال‌های اخیر در حوزه کشاورزی دقیق به آن پرداخته شده، مدیریت موضعی اعمال نیتروژن در مزرعه با کمک اطلاعات جمع‌آوری شده از وضعیت و نیاز نیتروژن محصول می‌باشد.

[1] Site-specific management

روش مستقیم و دقیق تعیین نیتروژن محصول، نمونه‌برداری به صورت دستی و اندازه‌گیری محتوای نیتروژن نمونه‌ها با تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی می‌باشد؛ که بخصوص برای مزارع وسیع، بسیار زمان‌بر، هزینه‌بر و پر زحمت است. از طرفی مدیریت اعمال نیتروژن در حین رشد محصول و در طول فصل زراعی نیاز به جمع‌آوری اطلاعات در زمان مناسب، با روش‌های غیر مخرب و کم هزینه دارد. بنابراین برای پاسخ‌گویی به این نیاز، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای توسعه و بکارگیری حسگرهای مقاوم، کم هزینه و ترجیحاً زمان واقعی[۱] در کشاورزی دقیق شده است. این مقاله شامل دو بخش می‌باشد: در بخش اول به مرور انواع حسگرهای مجاورتی محصول[۲] (که شامل حسگرهایی می‌شود که بطور غیر تماسی و در موقعیت‌ها یا سکوهای زمینی و نزدیک به محصول، اندازه‌گیری را انجام می‌دهند) پرداخته می‌شود و در بخش دوم نتایجی از کاربرد عملی برخی از این حسگرها توسط نویسنده، ارائه می‌گردد. این حسگرها را می‌توان بطور کلی به پنج گروه زیر طبقه‌بندی کرد:

الف) حسگرهای طیفی-نوری[۳]

ب) حسگرهای مکانیکی نظیر حسگر Crop-Meter (Ehlert and Dammer, 2006)

پ) حسگرهای فراصوتی

ت) حسگرهای فاصله‌سنج لیزری

ث) دوربین‌ها

حسگرهای دسته‌های الف، ب و پ به صورت تجاری برای مدیریت موضعی اعمال کود نیتروژن، در بازار موجود می‌باشند. ولی حسگرهای دسته‌های ت و ث تا به حال تنها در منابع علمی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

حسگرهای طیفی-نوری

در این نوع حسگرها بازتاب طیفی محصول در طول موج‌های مختلف اندازه‌گیری شده و بر اساس آن شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)[۴] محاسبه شده و بر اساس آن وضعیت نیتروژن محصول برآورد می‌شود. حسگرها و سامانه‌های سنجش متعددی در این زمینه توسعه یافته‌اند که برخی نیز به صورت تجاری به بازار عرضه شده است. این نوع حسگرها بر اساس منبع نور به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: حسگرهای فعال[۵] و حسگرهای غیرفعال[۶]. حسگرهای غیرفعال سهمی از نور خورشید تابیده شده به اشیاء را که توسط آنها منعکس می‌شود، اندازه می‌گیرند. به دلیل اینکه این حسگرها به تابش نور

---

[۱] Real-time

[۲] Proximal crop sensors

[۳] Spectral-optical sensors

[۴] Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

[۵] active sensors

[۶] passive sensors

خورشید وابسته هستند، اطلاعات تنها در زمان تابش خورشید به منطقه مورد نظر و حداقل پوشش ابر قابل جمع‌آوری است. در مقابل، حسگرهای فعال، منبع نور برای تابیدن به سطوح مورد نظر را خودشان تأمین می‌کنند. این حسگرها به شیء نور را تابانده و از فوتودیودهایی[۱] برای اندازه‌گیری بخشی از نور که منعکس شده استفاده می‌کنند. یکی از اصلی‌ترین مزایای حسگرهای فعال نسبت به حسگرهای غیرفعال توانایی آنها برای اندازه‌گیری در هر زمانی بدون توجه به موقع روز یا فصل و حذف اثرات زاویه خورشید و پوشش ابر می‌باشد. اکثر حسگرهای مجاورتی از نوع فعال هستند. در ادامه به معرفی چند نمونه از اینگونه حسگرها پرداخته می‌شود.

حسگر Yara N-Sensor

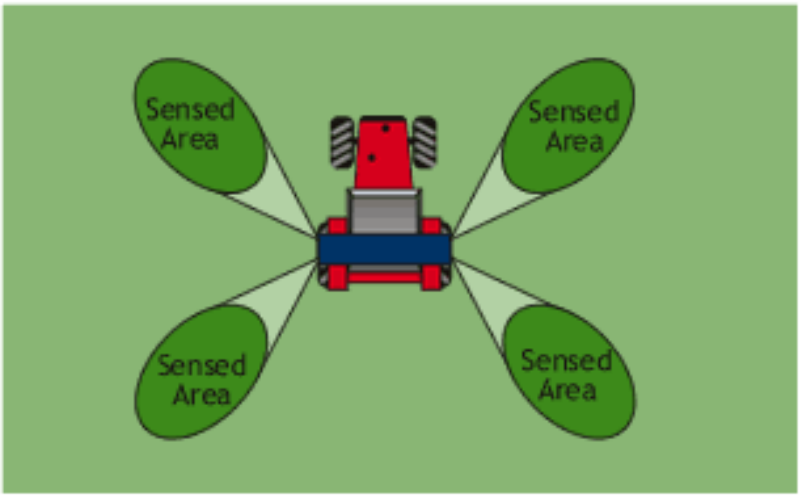
این سنجنده، یک حسگر غیرفعال است که روی کابین تراکتور نصب می‌شود و با پیشروی تراکتور، نیتروژن مورد نیاز محصول را تعیین می‌کند. حسگر Yara N-Sensor بازتاب نور خورشید از گیاه یا خاک را از چهار زاویه مختلف اندازه‌گیری می‌کند که در کل مساحتی در حدود ۵۰ متر مربع را پوشش می‌دهد (شکل۱). در واقع مجموعه سنجنده دارای چهار حسگر است که بازتاب گیاه یا خاک را اندازه می‌گیرند. حسگر پنجمی نیز در این مجموعه وجود دارد که به سمت آسمان نصب می‌شود. این حسگر پنجم شدت نور تابیده شده از خورشید را اندازه می‌گیرد و به مجموعه سنجنده اجازه جبران شرایط هوایی مختلف را می‌دهد (Anonymous, 2013d). Yara N-Sensor بازتاب گیاه یا خاک را در محدوده‌ی طیفی ۴۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر ثبت می‌کند. خروجی این سنجنده، نرخ نیتروژنی است که توسط دستگاه کوددهی باید اعمال شود، و در واقع یک شاخص زیست توده می‌باشد. همچنین از آن برای محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، WDVI و NDRE می‌توان استفاده کرد (Tremblay *et al.*, 2009).

اما نوع فعال این حسگر نیز با نام Yara N-Sensor ALS موجود می‌باشد که خود دارای منبع نور است. این حسگر، نوری در محدوده‌ی ۶۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر به گیاه یا خاک تابانده و بازتاب آن را توسط گیرنده‌ای متشکل از دو فتودیود و فیلتر با طول موج مرکزی ۱۰±۷۳۰ و ۱۰±۷۶۰ نانومتر، ثبت می‌کند. این حسگر از بازتاب گیاه یا خاک برای محاسبه شاخص NDRE و یا شاخصی بنام VI[۲] ($VI=R_{760} - R_{730}$) استفاده می‌کند (Portz *et al.*, 2012).

هر دو حسگر به صورت تجاری در بازار توسط شرکت Yara International آلمان عرضه می‌شوند. از حسگر Yara N-Sensor بطور موفقیت آمیزی برای تخمین وضعیت نیتروژن در سیب زمینی (Zebarth *et al.*, 2003)، گندم زمستانه (Berntsen *et al.*, 2006) و گندم بهاره (Tremblay *et al.*, 2009) و از حسگر Yara N-Sensor ALS برای تعیین نیتروژن مورد نیاز چغندرقند (Portz *et al.*, 2012) استفاده شده است.

[۱] photodiodes

[۲] Vegetation Index



شکل ۱- نحوه‌ی پوشش‌دهی مزرعه توسط حسگر Yara N-Sensor (Anonymous, 2013d)

حسگر Crop Circle

این حسگر از نوع فعال بوده و خود دارای منبع نور است (شکل۲). سنجنده Crop Circle توسط شرکت Holland Scientific آمریکا و به صورت انواع دستی[۱]، وسیله نقلیه مبنا[۲] و هوایی[۳] عرضه می‌شود. این حسگرها، نور در محدوده مرئی و NIR به اشیاء می‌تابانند. انواع دستی و وسیله نقلیه مبنا دارای سه کانال اندازه‌گیری نوری هستند و بازتاب گیاه یا خاک را در طول موج‌های ۶۷۰، ۷۳۰ و ۷۸۰ نانومتر اندازه می‌گیرند. نوع هوایی دارای دو کانال اندازه‌گیری نوری است و بازتاب گیاه یا خاک را در طول موج‌های ۶۶۰ و ۸۵۰ نانومتر ثبت می‌کند. از اندازه‌گیری‌های بازتاب توسط این حسگرها می‌توان برای محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، NDRE و SRI استفاده کرد (Anonymous, 2013a).

از این حسگر نیز در تحقیقات برای تعیین وضعیت نیتروژن محصولات استفاده شده است. به عنوان مثال، این سنجنده برای تخمین وضعیت نیتروژن در گندم (Erdle *et al.*, 2011)، ذرت (Sripada *et al.*, 2008, *Schmidt et al.*, 2011, Shaver *et al.*, 2011) و برنج (Cao *et al.*, 2013) بکار رفته است.

---

[۱] Handheld

[۲] Vehicle-based

[۳] Aerial

شکل۲- حسگر Crop Circle و نحوه‌ی عملکرد آن (Anonymous, 2013a)

حسگر GreenSeeker

این حسگر به دو صورت دستی و وسیله نقلیه مبنا توسط شرکت NTech Industries آمریکا عرضه شده است. این سنجنده نیز از نوع فعال بوده و دارای دیودهای منتشرکننده‌ی نوری قرمز و NIR می‌باشد. همچنین حسگر GreenSeeker به آشکارسازهای فتو دیودی و فیلترهایی در نواحی طیفی قرمز (۱۰±۶۵۰ نانومتر) و NIR (۱۵±۷۷۰ نانومتر) مجهز می‌باشد. شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و SR با استفاده از اندازه‌گیری‌های این حسگر، قابل محاسبه هستند (Inman *et al*., 2005).

سنجنده GreenSeeker نیز در تحقیقات برای سنجش وضعیت نیتروژن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است و از آن برای تخمین نیتروژن در گندم (Tremblay *et al*., 2009, Erdle *et al*., 2011, Walsh *et al*., 2013) و ذرت (Hong *et al*., 2007, Shaver *et al*., 2011) استفاده شده است.

سنجش فلورسانس کلروفیل، تحریک شده توسط نور لیزر[۱]

فلورسانس کلروفیل، واکنشی از دستگاه فتوسنتز گیاه است؛ بطوریکه انرژی اضافی‌ای که در واکنش‌های فتو شیمیایی مصرف نمی‌شود و یا تبدیل به گرما می‌شود، به صورت نور فلورسنت از گیاه ساطع می‌گردد. در این روش غیر مستقیم سنجش ویژگی‌های گیاهان، فلورسانس کلروفیل، تحریک شده توسط نور لیزر قرمز با طول موج ۶۳۰ نانومتر، در طول موج‌های ۶۹۰ و ۷۳۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود. نسبت اندازه‌گیری‌ها در این دو طول موج قویاً با محتویات نیتروژن گیاه همبستگی دارد و همچنین تحلیل آماری داده‌های اندازه‌گیری شده، اطلاعات درباره زیست توده محصول را فراهم می‌آورد. مزیت عمده این روش این است که سیگنال‌های اندازه‌گیری شده تنها از گیاه نشأت می‌گیرند و نیازی به حذف بازتاب خاک وجود ندارد؛ به دلیل اینکه خاک هیچ فلورسانسی متصاعد نمی‌کند (Thoren and Schmidhalter, 2009). اما ایرادی که به این روش وجود دارد، عدم تأثیر پذیری نسبت فلورسانس (نسبت فلورسانس

[۱] laser-induced chlorophyll fluorescence sensing systems

۶۹۰ نانومتر به ۷۳۰ نانومتر) از زیست توده محصول است. به این معنی که با افزایش زیست توده محصول در طول رشد آن، مقدار این نسبت افزایش چندانی نمی‌کند. بنابراین، این روش برای تخمین نیتروژن محصولات تنها در مراحل ابتدایی رشد آنها مناسب است (Heege *et al.*, 2008).

تحقیقاتی برای بکارگیری اصول اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل، تحریک شده توسط نور لیزر، برای تعیین وضعیت نیتروژن در گندم (Bredemeier and Schmidhalter, 2005, Schächtl *et al.*, 2005, Tartachnyk *et al.*, 2006) و کلزا (Thoren and Schmidhalter, 2009) انجام شده است.

اسپکترورادیومترها[۱]

اسپکترورادیومترها دستگاه‌هایی هستند که خصوصیات نور را در یک محدوده‌ی مشخصی از طیف الکترومغناطیسی اندازه می‌گیرند. از این دستگاه‌ها می‌توان برای اندازه‌گیری شدت نور خورشید و بازتاب آن از گیاهان در محدوده‌ی طیفی مشخصی استفاده کرد. از اندازه‌گیری‌های اسپکترورادیومتر می‌توان برای محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی و در نتیجه تعیین ویژگی‌های گیاهان استفاده کرد. اسپکترورادیومتر FieldSpec، جزء معروفترین اسپکترورادیومترهای موجود در بازار است و توسط شرکت ASD[۲] آمریکا عرضه شده است و محدوده طیفی مختلفی از ۳۲۵ تا ۲۵۰۰ نانومتر را پوشش می‌دهد (Anonymous, 2013b).

اسپکترورادیومترها در تحقیقاتی برای تعیین نیتروژن محصولاتی نظیر برنج (Nguyen and Lee, 2006)، ذرت (Hong *et al.*, 2007, Mistele and Schmidhalter, 2008)، گندم (Fitzgerald *et al.*, 2010) و پنبه (El-Shikha *et al.*, 2008) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

حسگرهای مکانیکی

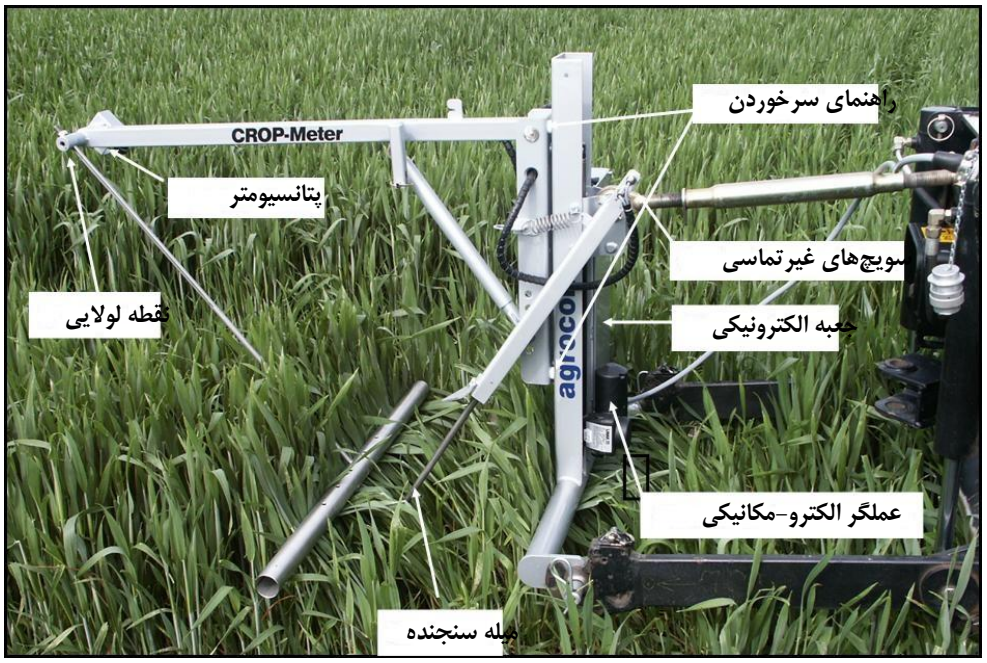
یک حسگر مکانیکی که برای اندازه‌گیری غیر مخرب و آنی ویژگی‌های محصول توسعه یافته است، حسگر Crop-Meter می‌باشد. سامانه حسگر Crop-Meter یک حسگر مکانیکی ساده و مقاوم است که بر پایه اصل آونگ کار می‌کند و تشکیل شده از یک مکانیزم اتصال سه نقطه که به جلوی تراکتور وصل می‌شود. این حسگر دارای یک میله به طول یک متر است که توسط کابلی به یک لولای ثابت بر روی شاسی سامانه متصل می‌شود و قابلیت چرخش حول لولا را دارد (شکل۳). میله روی محصول حرکت داده می‌شود و مقاومت محصول در مقابل حرکت آن باعث انحراف میله می‌شود. زاویه انحراف میله (آونگ) به ویژگی‌های محصول نسبت داده می‌شود (Ehlert and Dammer, 2006). این سامانه به صورت تجاری در آمده و توسط شرکت‌های CLAAS و Müller-Elektronik کشور آلمان به بازار عرضه می‌شود.

---

[۱] Spectroradiometers

[۲] Analytical Spectral Devices

این سامانه برای اندازه‌گیری زیست توده و شاخص سطح برگ در غلات، و همچنین برای اعمال نرخ متغیر کود نیتروژن، قارچ‌کش و تنظیم کننده رشد گیاهی[1] به صورت حسگر-مبنا برای برخی محصولات مورد استفاده قرار گرفته است (Ehlert and Dammer, 2006, Dammer *et al.*, 2008, Thoele and Ehlert, 2010).



شکل۳- اجزاء تشکیل دهنده حسگر Crop-Meter (Thoele and Ehlert, 2010)

حسگرهای فراصوتی

حسگر فراصوت مجموعه‌ای از پالس‌های مافوق صوت را به سمت شیء مورد نظر مخابره می‌کند. پژواک[2] پالس‌های مخابره شده، توسط حسگر اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف در زمان بین سیگنال فرستاده شده و دریافت شده با در نظر گرفتن فاصله بین حسگر و زمین، به ارتفاع و تاج پوشش گیاه نسبت داده می‌شود (Sui and Thomasson, 2006).

این حسگرها بیشتر برای اندازه‌گیری ارتفاع و تاج پوشش گیاهان زراعی و باغی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و بطور مستقیم برای سنجش وضعیت نیتروژن محصولات استفاده نشده‌اند. در تحقیقات از ترکیب اندازه‌گیری ارتفاع با استفاده از حسگرهای فراصوت، با اندازه‌گیری‌های طیفی با استفاده از حسگرهای نوری، برای سنجش نیتروژن و زیست توده گندم (Scotford and Miller, 2004a, b) و پنبه (Sui and Thomasson, 2006) استفاده شده است.

حسگرهای فاصله‌سنج لیزری

[1] Growth regulator

[2] Echo

از دهه ۱۹۷۰ فاصله‌سنجی با لیزر در بسیاری از عرصه‌ها بکار رفته است. اما اواخر دهه ۱۹۸۰، زمانی بود که فناوری لیزر برای تشخیص زیست توده در جنگل و در تولید محصولات کشاورزی بکار رفت (*Lee et al.*, 2010). برای فاصله‌سنج‌های لیزری دو اصل اندازه‌گیری وجود دارد: ۱) روش مثلث‌سازی[۱] ۲) روش زمان رفت و برگشت[۲] (Ehlert *et al.*, 2009).

حسگرهای نوع مثلث‌سازی، فاصله‌های کوتاه (حداکثر چند متر)، با دقت بالا را اندازه می‌گیرند؛ در حالی که حسگرهای نوع زمان رفت و برگشت برای هر دو فاصله کوتاه و بلند مناسب هستند. اساس اندازه‌گیری ویژگی‌های محصول با استفاده از فاصله‌سنج‌های لیزری بر پایه این فرضیه است که فواصل بازتاب اندازه‌گیری شده با افزایش درجه پوشش، زیست توده و ارتفاع محصول، کاهش می‌یابد (Ehlert *et al.*, 2008).

از این حسگرها برای تخمین زیست توده و شاخص سطح برگ گیاهانی نظیر کلزا، گندم زمستانه و چاودار زمستانه (Ehlert *et al.*, 2008, Gebbers *et al.*, 2011) استفاده شده است. لازم به ذکر است که زیست توده و شاخص سطح برگ، خود معیارهایی برای تعیین میزان نیتروژن گیاه هستند و برای مدیریت موضعی اعمال کود نیتروژن بکار می‌روند (Gebbers *et al.*, 2011).

دوربین‌ها

از آنجائیکه دوربین‌های دیجیتال بطور دقیقی ظاهر اشیاء را با روشی غیر مخرب و ارزان ثبت می‌کنند، می‌توانند به عنوان وسیله‌های سنجش مجاورتی برای تعیین ویژگی‌های محصولات در نظر گرفته شوند (Sakamoto *et al.*, 2012). تصاویر تهیه شده توسط دوربین‌ها مورد پردازش قرار گرفته و شاخص‌هایی مانند پوشش گیاه[۳] از آنها استخراج شده و با کمک این شاخص‌ها، ویژگی‌های محصول تخمین زده می‌شود (Li *et al.*, 2010).

تحقیقاتی برای بکارگیری دوربین‌های دیجیتال به منظور تعیین وضعیت نیتروژن محصولاتی نظیر جو (Pagola *et al.*, 2009)، برنج (Lee and Lee, 2013, Wang *et al.*, 2013)، گندم (Li *et al.*, 2010) و ذرت (Rorie *et al.*, 2011)، صورت گرفته است.

نتایج استفاده عملی از برخی از این حسگرها

در طول فصل زراعی ۲۰۱۲، در مزرعه تحقیقاتی مارکوات[۴] متعلق به اداره گونه‌های گیاهی دولت آلمان[۵] واقع در شهر پتسدام[۶] آلمان، یک طرح آزمایشی بلوک‌های خرد شده تصادفی با دو تکرار و شامل چهار نرخ کوددهی نیتروژن (۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن

---

[۱] Triangulation

[۲] Time-of-flight

[۳] Canopy Cover

[۴] Marquardt

[۵] German Plant Variety Office

[۶] Potsdam

بر هکتار) و دو نوع رژیم آب‌دهی (آبی و دیمی) طراحی شد. برخی ویژگی‌های محصول از قبیل زیست توده تازه[۱] و خشک[۲]، مقدار نیتروژن، ارتفاع، شاخص سطح برگ و عملکرد با استفاده از نمونه‌برداری مخرب از محصول (سه نوبت در طول فصل زراعی) و با حسگرهای مربوطه به عنوان متغیرهای مرجع، اندازه‌گیری شد. در مراحل مختلف رشد گیاه شامل مراحل توسعه ساقه[۳]، بوتینگ[۴]، ظهور خوشه[۵]، گلدهی[۶] و توسعه دانه[۷]، اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم با استفاده از حسگرهای Crop-Circle، Isaria (یک حسگر طیفی است که به تازگی توسط شرکت Fritzmeier آلمان عرضه شده است)، یک پویشگر فاصله‌سنج لیزری[۸] (ibeo-ALASCA XT)، یک اسپکترورادیومتر (ساخته شده از قطعات شرکت tec5 آلمان) و یک دوربین دیجیتال (Canon EOS 550D) به منظور تخمین وضعیت نیتروژن و دیگر پارامترهای محصول انجام شد. با پردازش تصاویر گرفته شده با دوربین دیجیتال و آنالیز داده‌های ثبت شده با اسپکترورادیومتر، شاخص‌های مختلفی محاسبه گردید. همچنین ارتفاع محصول با استفاده از اندازه‌گیری‌های پویشگر فاصله‌سنج لیزر محاسبه شد. شاخص EB[۹] از حاصلضرب ارتفاع در پوشش محصول (CC) که از پردازش تصاویر دیجیتال بدست آمده بود، محاسبه گردید.

بر اساس نتایج بدست آمده، بزرگترین ضریب تبیین (r^2) برای روابط بین اندازه‌گیری‌های غیر مستقیم با مقدار نیتروژن برای حسگر Isaria (r^2=۰/۹۲) (شکل۴)، با زیست توده تازه برای حسگر Isaria و شاخص EB (r^2=۰/۹۶)، و با زیست توده خشک برای حسگر Isaria و شاخص RDVI[۱۰] (r^2=۰/۹۵) بدست آمد. همه‌ی روش‌های غیر مخرب استفاده شده در این تحقیق، پتانسیل خوبی برای تخمین شاخص سطح برگ و عملکرد محصول، از خود نشان دادند. هر چند تنها حسگر Isaria بود که تمایل به اشباع در مقادیر بالای شاخص سطح برگ نداشت.

---

[۱] Fresh biomass

[۲] Dry biomass

[۳] stem elongation

[۴] booting stage

[۵] Inflorescence emergence

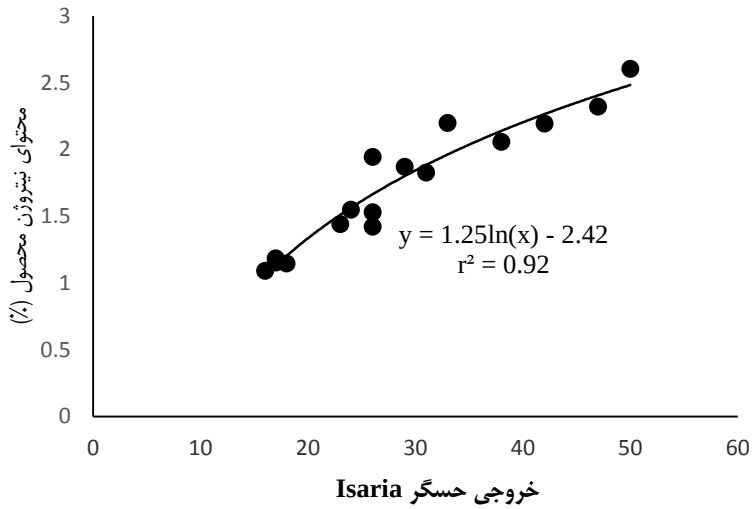
[۶] flowering

[۷] Development of fruit

[۸] Laser scanner

[۹] Estimated biomass

[۱۰] Ratio Difference Vegetation Index



شکل٤- نمونه‌ای از روابط بین اندازه‌گیری‌های حسگر Isaria و محتوای نیتروژن محصول که در یکی از نمونه‌برداری‌ها بدست آمد

اندازه‌گیری‌های حسگر Isaria، شاخص‌های پوشش گیاهی NDRE[۱] و REIP[۲]، و شاخص‌های مستخرج از تصاویر دیجیتال RMB[۳] و Hue کمتر تحت تأثیر وضعیت آب قرار گرفته بودند. نتایج نشان داد که شاخص‌های استخراج شده از پردازش تصاویر دیجیتال مخصوصاً شاخص CC، قابلیت رقابت با حسگرهای تجاری برای تشخیص ویژگی‌های محصول را دارند. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، ارتفاع محصول به تنهایی شاخص مناسبی برای برآورد ویژگی‌های محصول و وضعیت رشد گیاه نبود.

در تحقیقات گذشته نیز شاخص CC استخراج شده از پردازش تصاویر دیجیتال، به عنوان شاخصی مناسب برای تشخیص وضعیت نیتروژن در کلزا (Behrens and Diepenbrock, 2006)، گندم (Li *et al*., 2010) و برنج (Lee and Lee, 2013) معرفی شده است.

میستل و شمیدهالتر (۲۰۰۸) و اردل و همکاران (۲۰۱۱)، برای تشخیص وضعیت نیتروژن ذرت و گندم، شاخص‌های NDRE و REIP، را مناسب تر از شاخص NDVI گزارش کرده‌اند. بر اساس نتایج آنها شاخص NDVI با افزایش نرخ نیتروژن و در نتیجه افزایش زیست توده محصول، تمایل به اشباع دارد (Mistele and Schmidhalter, 2008, Erdle *et al*., 2011).

لیو و پاتی (۲۰۱۰) شاخص سطح برگ محصولات گندم، ذرت و سویا را به کمک عکسبرداری دیجیتال تخمین زدند. آنها نیز نتیجه‌گیری کردند که اندازه‌گیری‌های دوربین دیجیتال در مراحل بالایی رشد گیاه که در آن گیاه دارای شاخص سطح برگ بزرگتری است، اشباع می‌شود (Liu and Pattey, 2010).

[۱] Normalized Difference Red Edge

[۲] Red Edge Inflection Point

[۳] Red – Blue

نتیجه‌گیری

- مرور منابع نشان داد که بیشتر حسگرهایی که در تحقیقات برای تشخیص وضعیت نیتروژن و دیگر ویژگی‌های محصولات کشاورزی استفاده شده، از نوع حسگرهای طیفی–نوری هستند که دلیل آن، قابلیت و دقت بالای اینگونه حسگرهاست. همچنین دوربین‌ها به دلیل ارزان بودن و دقت قابل قبول، بطور وسیعی مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- اندازه‌گیری‌های حسگرهای مجاورتی ممکن است تحت تأثیر عوامل محیطی دیگری نظیر وضعیت آب موجود در خاک، بیماری‌ها و آلودگی‌ها، کمبود مواد مغذی دیگر و علف‌های هرز قرار گیرد. این امر در برخی از تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است.
- حسگرهای مجاورتی بحث شده در این مقاله برای استفاده در کشاورزی مدرن در کشورهای پیشرفته، توسعه یافته‌اند و اکثراً گران قیمت هستند. بنابراین کاربرد آنها در کشاورزی سنتی و نیمه مدرن ایران ممکن است مقرون به صرفه نباشد. از آنجائیکه دوربین‌ها در مقایسه با حسگرهای دیگر ارزان قیمت‌تر هستند و عملکرد قابل قبولی در تشخیص ویژگی‌های محصول دارند، می‌توانند برای کاربرد در کشاورزی ایران در نظر گرفته شوند.

منابع

Anonymous. 2013a. Crop Circle-Active Crop Canopy Sensor. Vol. 2013.

Anonymous. 2013b. FieldSpec. Vol. 2013.

Anonymous. 2013c. Isaria.

Anonymous. 2013d. Yara N-Sensor. Vol. 2013.

Behrens, T. and W. Diepenbrock. 2006. Using Digital Image Analysis to Describe Canopies of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) during Vegetative Developmental Stages. Journal of Agronomy and Crop Science, 192(4): 295–302.

Berntsen, J., A. Thomsen, K. Schelde, O. M. Hansen, L. Knudsen, N. Broge, H. Hougaard, and R. Hørfarter. 2006. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. Precision Agriculture, 7(2): 65–83.

Bredemeier, C. and U. Schmidhalter. 2005. Laser-induced chlorophyll fluorescence sensing to determine biomass and nitrogen uptake of winter wheat under controlled environment and field conditions. Pages 273-280. Wageningen Academic Publishers, Wageningen.

Cao, Q., Y. Miao, H. Wang, S. Huang, S. Cheng, R. Khosla, and R. Jiang. 2013 .Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. Field Crops Research, 154(0): 133–144.

Dammer, K.-H., J. Wollny, and A. Giebel. 2008. Estimation of the Leaf Area Index in cereal crops for variable rate fungicide spraying. European Journal of Agronomy, 28(3): 351–360.

Ehlert, D. and K. H. Dammer. 2006. Widescale testing of the Crop-meter for site-specific farming. Precision Agriculture, 7(2): 101–115.

El-Shikha, D. M., E. M. Barnes, T. R. Clarke, D. J. Hunsaker, J. A. Haberland, P. J. Pinter Jr, P. M. Waller, and T. L. Thompson. 2008. Remote Sensing of Cotton Nitrogen Status Using the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI). Transactions of the ASABE, 51(1): 73–82.

Erdle, K., B. Mistele, and U. Schmidhalter. 2011. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. Field Crops Research, 124(1): 74–84.

Fitzgerald, G., D. Rodriguez, and G. O'Leary. 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI). Field Crops Research, 116(3): 318–324.

Heege, H. J., S. Reusch, and E. Thiessen. 2008. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. Precision Agriculture, 9(3): 115–131.

Hong, S. D., J. S. Schepers, D. D. Francis, and M. R. Schlemmer. 2007. Comparison of Ground-Based Remote Sensors for Evaluation of Corn Biomass Affected by Nitrogen Stress. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 38(15-16): 2209–2226.

Inman, D., R. Khosla, and T. Mayfield. 2005. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. Sensor Review, 25(3): 209–214.

Lee, K.-J. and B.-W. Lee. 2013. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis. European Journal of Agronomy, 48(0): 57–65.

Li, Y,.D. Chen, C. N. Walker, and J. F. Angus. 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. Field Crops Research, 118(3): 221–227.

Liu, J. and E. Pattey. 2010. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. Agricultural and Forest Meteorology, 150(11): 1485–1490.

Mistele, B. and U. Schmidhalter. 2008. Spectral measurements of the total aerial N and biomass dry weight in maize using a quadrilateral-view optic. Field Crops Research, 106(1): 94–103.

Nguyen, H. T. and B.-W. Lee. 2006. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. European Journal of Agronomy, 24(4): 349–356.

Pagola, M., R. Ortiz, I. Irigoyen, H. Bustince, E. Barrenechea, P. Aparicio-Tejo, C. Lamsfus, and B. Lasa. 2009. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: Comparison with SPAD-502 .Computers and Electronics in Agriculture, 65(2): 213–218.

Portz, G., J. P. Molin, and J. Jasper. 2012. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. Precision Agriculture, 13(1): 33–44.

Rorie, R. L., L. C. Purcell, M. Mozaffari, D. E. Karcher, C .A. King, M. C. Marsh, and D. E. Longer. 2011. Association of "Greenness" in Corn with Yield and Leaf Nitrogen Concentration Agronomy Journal, 103(2): 529–535.

Sakamoto, T., A. A. Gitelson, A .L. Nguy-Robertson, T. J. Arkebauer, B. D. Wardlow, A. E. Suyker, S. B. Verma, and M. Shibayama. 2012. An alternative method using digital cameras for continuous monitoring of crop status. Agricultural and Forest Meteorology, 154–155(0): 113–126.

Schächtl, J., G. Huber, F. X. Maidl, E. Sticksel, J. Schulz, and P. Haschberger. 2005. Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence Measurements for Detecting the Nitrogen Status of Wheat (Triticum aestivum L.) Canopies. Precision Agriculture, 6(2): 143–156.

Schmidt, J., D. Beegle, Q. Zhu, and R. Sripada. 2011. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. Field Crops Research, 120(1): 94–101.

Scotford, I. M. and P. C. H. Miller. 2004a. Combination of Spectral Reflectance and Ultrasonic Sensing to monitor the Growth of Winter Wheat. Biosystems Engineering, 87(1):27−38.

Scotford, I. M. and P. C. H. Miller. 2004b. Estimating Tiller Density and Leaf Area Index of Winter Wheat using Spectral Reflectance and Ultrasonic Sensing Techniques. Biosystems Engineering, 89(4): 395−408.

Shaver, T. M., R. Khosla, and D. G. Westfall. 2011. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. Precision Agriculture, 12(6): 892–904.

Sripada, R. P., J. P. Schmidt, A. E. Dellinger, and D. B. Beegle. 2008. Evaluating Multiple Indices from a Canopy Reflectance Sensor to Estimate Corn N Requirements. Agronomy Journal, 100(6): 1553–1561.

Sui, R. and J. A. Thomasson. 2006. Ground-Based Sensing System for Cotton Nitrogen Status Determination. Transactions of the ASABE, 49(6): 1983−1991.

Tartachnyk, I., I. Rademacher, and W. Kühbauch. 2006. Distinguishing nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser-induced fluorescence. Precision Agriculture, 7(4): 281–293.

Thoele, H. and D. Ehlert. 2010. Biomass related nitrogen fertilization with a crop sensor. Applied Engineering in Agriculture, 26(5): 769–775.

Thoren, D. and U. Schmidhalter. 2009. Nitrogen status and biomass determination of oilseed rape by laser-induced chlorophyll fluorescence. European Journal of Agronomy, 30(3): 238–242.

Tremblay, N., Z. Wang, B.-L. Ma, C. Belec, and P. Vigneault. 2009. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. Precision Agriculture, 10(2): 145–161.

Walsh, O., A. R. Klatt, J. B. Solie, C. B. Godsey, and W. R. Raun. 2013. Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (Triticum aestivum L.). Precision Agriculture, 14(3): 343–356.

Zebarth, B. J., H. Rees, N. Tremblay, P. Fournier, and B. Leblon. 2003. Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the N Sensor. Acta Horticulturae, 627: 267–273.