

تخمین میزان نیتروژن در گندم زمستانه با استفاده از حسگرهای مجاورتی

حامد توکلی، سید سعید محتسبی* و رضا علیمردانی**

* نگارنده مسئول: دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. ص. پ: ۴۱۱۱، تلفن: ۰۲۶)۳۲۸۰۸۱۳۸، پیام‌نگار: mohtaseb@ut.ac.ir

** به ترتیب: استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک؛ و استادان گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۱۶

چکیده

یکی از مهمترین نهادهای کشاورزی که تأثیر زیادی در رشد گیاه، عملکرد و کیفیت محصول دارد، نیتروژن است. حسگرهای مختلفی توسعه یافته‌اند برای آنکه وضعیت نیتروژن محصولات به شکلی غیرمخرب تشخیص داده شود. در این تحقیق به مقایسه عملکرد حسگرهای Crop-Circle و ISARIA برای تشخیص وضعیت نیتروژن گندم زمستانه در طول دوره رشد، پرداخته شد. حساسیت اندازه‌گیری حسگرها نسبت به وضعیت آب محصول نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، در طول فصل زراعی ۲۰۱۲، در مزرعه‌ای تحقیقاتی، طرح آزمایشی بلوک‌های خرد شده تصادفی با دو تکرار اجرا شد. تیمارها شامل چهار میزان کوددهی نیتروژن (+، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار) و دو نوع رژیم آب‌دهی (با آبیاری تکمیلی و بدون آبیاری) بود. بر اساس نتایج به دست آمده، حسگرهای Crop-Circle و ISARIA عملکرد بسیار خوبی برای تشخیص وضعیت نیتروژن گندم زمستانه از خود نشان دادند. اندازه‌گیری‌های حسگر Crop-Circle تحت تأثیر وضعیت آب محصول قرار گرفت، در حالی که حسگر ISARIA حساسیت کمی نسبت به وضعیت آب محصول نشان داد.

واژه‌های کلیدی

حسگرهای مجاورتی محصول، کشاورزی دقیق، گندم، نیتروژن

مقدمه

از نیتروژن کاهش می‌یابد و زیان‌های اقتصادی نیز به همراه دارد (Tremblay et al., 2009).

نیتروژن محصول به صورت دستی و با تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شود که با وجود اینکه دقت آن بالاست، بسیار زمان‌بر، هزینه‌بر و پر زحمت نیز هست. درحالی که مدیریت موضعی اعمال نیتروژن در حین رشد و در طول فصل زراعی نیاز به جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت نیتروژن محصول در زمان مناسب، با روش‌های غیرمخرب و کم هزینه دارد. بنابراین، توسعه و به‌کارگیری سامانه حسگرهای مقاوم، کم هزینه و ترجیحاً

در تولید محصولات کشاورزی، نیتروژن یکی از مهمترین نهاده‌ها به شمار می‌رود که تأثیر زیادی در رشد گیاه، عملکرد محصول^۱ و کیفیت محصول دارد. نیاز محصولات به نیتروژن در نقاط مختلف مزرعه، به دلیل تفاوت در شرایط خاک، متغیر است (LaRuffa et al., 2001). ناهماهنگی بین مقدار نیتروژن داده شده به محصول و آن مقدار نیتروژن که محصول نیاز دارد، می‌تواند باعث مختل شدن رشد گیاه و آسیب رساندن به محیط زیست گردد که در نتیجه بازده استفاده

Erdle *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013) و ذرت (Hong *et al.*, 2007; Shaver *et al.*, 2011) استفاده شده است.

- حسگر ISARIA که شرکت Fritzmeier آلمان به تازگی آن را به صورت تجاری عرضه کرده است؛ در خصوص این حسگر تحقیقی در مرور منابع یافت نشد.

ب) حسگرهای مکانیکی نظیر حسگر Crop-Meter که بر اساس مقاومت محصول به خم شدن، زیست توده^۶ محصول را تخمین می‌زنند (Ehler & Dammer, 2006).
پ) حسگرهای فراصوتی که انعکاس فراصوت محصول را برای اندازه‌گیری ارتفاع آن، تجزیه و تحلیل می‌کند (Sui & Thomasson, 2006; Jones *et al.*, 2007)

ت) حسگرهای فاصله‌سنج لیزری که دارای دو اصل اندازه‌گیری هستند: روش مثلث‌سازی^۷ و روش زمان رفت و برگشت^۸ (Ehlert *et al.*, 2009). 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. یادآوری می‌شود که زیست توده و شاخص سطح برگ خود معیارهایی برای تعیین میزان نیتروژن گیاه هستند و برای مدیریت موضعی اعمال کود نیتروژن‌دار به‌کار می‌روند (Ehlert *et al.*, 2010; Gebbers *et al.*, 2011).

ث) دوربین‌هایی که از باندهای طیفی وسیع از محدوده مرئی (آبی، سبز و قرمز) تا محدوده مادون قرمز نزدیک^۹ استفاده می‌کنند. از این دوربین‌ها برای محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف، و تخمین نیتروژن محصول به کمک آنها، استفاده شده است (Pagola *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010; Lee & Lee, 2013).

زمان واقعی^۱ برای این منظور بسیار ضروری است (Zhang *et al.*, 2002).

برای توسعه حسگرهایی که اطلاعات فوری را در خصوص وضعیت نیتروژن محصولات ارائه می‌دهند، تلاش‌های قابل توجهی شده است. به این منظور حسگرهای مجاورتی محصول^۲ به طور موفقیت‌آمیز در کشاورزی دقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در سال‌های اخیر تعدادی از آنها به صورت تجاری نیز در آمده‌اند (Thoele & Ehlert, 2010). این حسگرها تخمین وضعیت نیتروژن و اعمال موضعی در زمان واقعی این نهاد را با قابلیت بالا فراهم می‌آورند و به طور کلی به پنج گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

الف) حسگرهای طیفی-نوری^۳: در این نوع حسگرها حداقل از دو باند طیفی باریک^۴ برای محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده^۵ استفاده می‌شود. از جمله این حسگرها می‌توان موارد زیر را نام برد:

- حسگر Yara N-Sensor که برای تخمین وضعیت نیتروژن در سیب زمینی (Zebarth *et al.*, 2003)، گندم زمستانه (Berntsen *et al.*, 2006)، گندم بهاره (Tremblay *et al.*, 2009) و چغندر قند (Portz *et al.*, 2012) استفاده شده است.

- حسگر Crop-Circle که در بعضی تحقیقات مرتبط با تعیین وضعیت نیتروژن در گندم (Erdle *et al.*, 2011)، ذرت (Sripada *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2011, 2011) و برنج (Shaver *et al.*, 2011) و برنج (Cao *et al.*, 2013) به کار رفته است.

- حسگر GreenSeeker نیز در تحقیقات برای سنجش وضعیت نیتروژن محصولات کشاورزی به کار رفته و از آن برای تخمین نیتروژن در گندم (Tremblay *et al.*, 2009;

1- Real-Time

3- Spectral-Optical Sensors

5- Normalized Difference Vegetation Index (Ndvi)

7- Triangulation

9- Near-Infrared (NIR)

2- Proximal Crop Sensors

4- Narrow Wave-Band

6- Biomass

8- Time-of-Flight

وضعیت نیتروژن محصولات و همچنین مقایسه و ارزیابی حساسیت خروجی آنها نسبت به وضعیت آب محصول، برای انتخاب حسگرهای مناسب تر و با صرفه تر ضروری و مفید خواهد بود. هدف از این تحقیق مقایسه و ارزیابی دو حسگر مجاورتی محصول: حسگرهای تجاری Crop-Circle و ISARIA برای تخمین وضعیت نیتروژن و بررسی حساسیت خروجی حسگرها نسبت به تنش آبی است (حسگرهایی که بیشتر برای اعمال میزان متغیر کود نیتروژن دار استفاده می شوند).

مواد و روش ها

در طول فصل زراعی سال ۲۰۱۲ میلادی، آزمون های مزرعه ای در مزرعه تحقیقاتی مارکوات^۱ اجرا شد. این مزرعه متعلق به اداره گونه های گیاهی دولت آلمان^۲ و در روستای مارکوات در حدود پنج کیلومتری شمال غرب شهر پتسدام^۳ واقع است. خاک مزرعه تحقیقاتی از نوع شنی کامبیسول^۴ بود. گندم زمستانه (رقم کوبوس^۵) با تراکم ۳۸۰ دانه در هر متر مربع با فاصله ردیف ۱۴ سانتی متر کاشته شد. طرح آزمایشی بلوک های خرد شده تصادفی با دو تکرار در نظر گرفته شد. تیمارها شامل چهار میزان کوددهی نیتروژن (۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار) و دو نوع رژیم آب دهی (با آبیاری تکمیلی و دیمی) در مجموع ۱۶ کرت به ابعاد ۴/۵×۹ متر بود. هر یک از ۱۶ کرت شامل ۱۸ زیر کرت^۶ به ابعاد ۱/۲۵×۱/۵ متر بود. از زمان کاشت تا برداشت محصول، کرت هایی که به صورت دیم کشت شده بودند ۲۷۲ میلی متر بارندگی دریافت کردند، در حالی که کرت هایی که با آبیاری تکمیلی کشت شده بودند، علاوه بر این میزان بارندگی، ۲۰ میلی متر آب از طریق آبیاری در دو تاریخ ۱۸ آوریل و ۲۹ می ۲۰۱۲ دریافت کردند. همه آزمون ها در این فصل زراعی و در مراحل مختلف رشد گیاه اجرا شد:

حسگرهای دسته های الف، ب و پ به صورت تجاری برای مدیریت موضعی اعمال کود نیتروژن دار، در دسترس هستند. ولی حسگرهای دسته های ت و ث تا به حال تنها در منابع علمی مورد مطالعه قرار گرفته اند.

فرض اصلی در استفاده از این نوع حسگرها این است که وضعیت نیتروژن محصول بیشترین تأثیر را روی خصوصیات محصول دارد که توسط حسگر مربوطه سنجیده می شود. اما شواهدی موجود است که نشان می دهند این خصوصیات تحت تأثیر عوامل محیطی دیگری نیز قرار می گیرند. از جمله این عوامل می توان وضعیت آب موجود در خاک (Clay *et al.*, 2006)، بیماری ها و آلودگی ها (Tartachnyk *et al.*, 2006) و کمبود مواد مغذی دیگر (Osborne *et al.*, 2002) را نام برد.

در فناوری حسگرهای موجود، قابلیت تفکیک واضح نشانه های تنش در محصول وجود ندارد، از این رو استفاده از این فناوری، بدون در نظر گرفتن تنش آبی، ممکن است منجر به کاربرد بیش از اندازه نیتروژن در مناطقی از مزرعه شود که با تنش آبی روبروست. به علاوه، پاسخ محصول به اضافه کردن کود به شدت متکی به میزان آب در دسترس گیاه است (Kirkham, 2004). بنابراین، تطبیق مقدار نیتروژن اضافه شده با آب موجود در داخل مزرعه، هم به طور مکانی هم به طور زمانی، برای دستیابی به پاسخ مطلوب محصول دارای اهمیت است (Tilling *et al.*, 2007). به دلیل گرم شدن کره زمین و افزایش پتانسیل تنش آبی در محصولات، در نظر گرفتن این موضوع مهم تر شده است. بنابراین، مدیریت صحیح و دقیق فرایند تولید محصولات کشاورزی نیاز به تخمین دقیق وضعیت نیتروژن و آب محصولات و تفکیک قائل شدن بین آنها با استفاده از روش های کارآمد دارد. در این راستا، مقایسه نتایج به دست آمده از حسگرهای محصول موجود در تخمین

1- Marquardt
3- Potsdam
5- Cubus

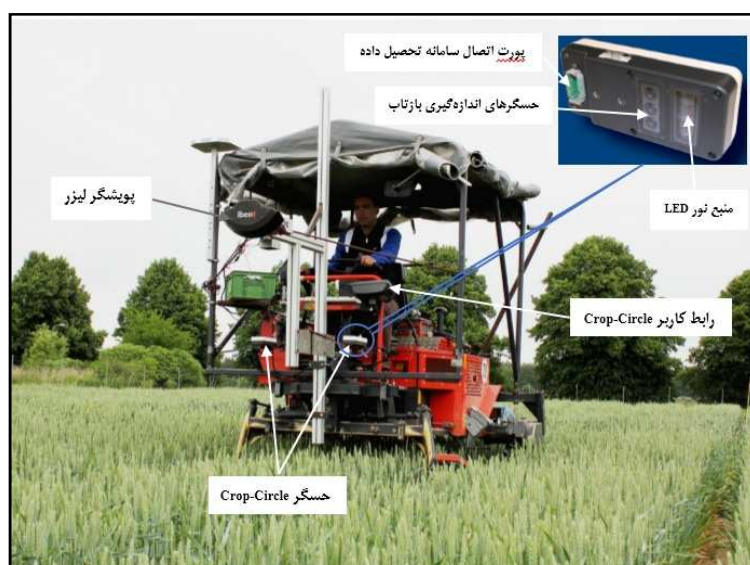
2- German Plant Variety Office
4- Sandy Cambisol
6- Sub-Plot

خاک ECH_2O اندازه‌گیری شد؛ این حسگرها در عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک در زمین آبیاری شده و آبیاری نشده قرار داده شدند.

حسگر Crop-Circle مورد استفاده در این تحقیق از نوع وسیله نقلیه مینا بود که روی یک دستگاه حمل‌کننده ۹مخصوص در ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متری زمین نصب شد (شکل ۱). برای پوشش سطح بیشتری از محصول دو حسگر استفاده شد که به فاصله ۶۰ سانتی‌متر از هم نصب شدند. مشخصه‌های این سامانه سنچس در جدول ۱ آورده شده است. حسگرهای بازتاب، انعکاس نور از گیاه یا خاک را در طول موج‌های ۶۷۰، ۷۳۰ و ۷۸۰ نانومتر اندازه گرفتند. شاخص پوشش گیاهی (NDRE)^{۱۰} با اندازه‌گیری بازتاب، در داخل سامانه تحصیل داده‌ها، محاسبه گردید. در طول فصل زراعی و در مراحل مختلف رشد گیاه، اندازه‌گیری‌ها با توقف دستگاه حمل‌کننده روی هر زیر کرت انجام شد به طوری که دو حسگر در وسط زیر پلات قرار می‌گرفتند.

مرحله توسعه ساقه^۱ (هفته‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹)، مرحله بوتینگ^۲ (هفته ۲۰)، مرحله ظهور خوشه^۳ (هفته ۲۱)، مرحله گلدهی^۴ (هفته ۲۲) و مرحله توسعه دانه^۵ (هفته‌های ۲۳ و ۲۴).

در فصل زراعی، از زیست توده محصول به منظور اندازه‌گیری زیست توده تازه^۶ و خشک^۷ و همچنین تعیین مقدار نیتروژن، سه مرتبه نمونه‌برداری شد. برای هر نمونه‌برداری، محصول یک متر مربع از هر یک از ۱۶ کرت به صورت دستی برداشت شد. محصول تازه برداشت شده وزن شد و پس از آن در یک آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس، زیست توده تازه و خشک محصول بر حسب گرم بر مترمربع محاسبه گردید. مقدار نیتروژن محصول بر مبنای درصد وزن خشک، با خرد کردن نمونه‌ها و با استفاده از روش استاندارد کیلدال^۸ در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. مقدار رطوبت خاک با استفاده از حسگرهای رطوبت



شکل ۱- حسگرهای Crop-Circle نصب شده روی یک دستگاه حمل‌کننده

- 1- Stem Elongation
- 3- Inflorescence Emergence
- 5- Development of Fruit
- 7- Dry Biomass
- 9- Carrier

- 2- Booting Stage
- 4- Flowering
- 6- Fresh Biomass
- 8- The Standard Kjeldahl Method
- 10- Normalized Difference Red Edge (NDRE)

تخمین میزان نیتروژن در گندم زمستانه با استفاده...

به توصیه شرکت سازنده، فاصله مناسب بین حسگر و محصول باید بین ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متر باشد. حسگر ISARIA در این محدوده فاصله از محصول نگه داشته می‌شود و با پایش کل محصول هر زیر کرت، داده‌ها در گوشی تلفن همراه ثبت می‌شود. این کار در طول فصل زراعی و در مراحل مختلف رشد گیاه تکرار شد.

حسگر ISARIA مورد استفاده در این تحقیق از نوع دستی بود که از شرکت Fritzmeier آلمان تهیه شد (شکل ۲). این حسگر دارای پنج منبع نور LED با طول موج‌های ۵۶۵، ۶۷۰، ۷۰۰، ۷۴۰ و ۷۸۰ نانومتر بود و بازتاب طیفی گیاه و خاک را با یک آشکارگر فتو دیودی^۱ اندازه می‌گرفت. خروجی این حسگر در یک گوشی تلفن همراه متصل به آن نمایش داده می‌شد.

جدول ۱- مشخصه‌های حسگر Crop-Circle

عنوان مشخصه	مقادیر و اطلاعات مربوطه
فاصله مناسب حسگر از هدف	بین ۲۵ تا ۱۸۳ سانتی‌متر
میدان دید	بین ۱۴ تا ۳۰ درجه
منبع نور فعال	دیویدهای ساطع‌کننده نور (LED) چند رنگ
آشکارگرهای نور (Detectors)	فتو دیویدهای سیلیکونی در محدوده طیفی ۳۲۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر
باند‌های اندازه‌گیری نور	۶۷۰، ۷۳۰ و ۷۸۰ نانومتر
دمای کاری	۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس
کابل‌های اتصال	RS-485 و RS-232
ابعاد	۴/۸×۲۰/۱×۸/۹ سانتی‌متر
وزن	۴۳۰ گرم
باتری	۹ تا ۱۷ ولت (حدود ۳۵۰ میلی آمپر)



شکل ۲- اندازه‌گیری‌های غیرمخرب با استفاده از حسگر ISARIA

آبیاری نشده مزرعه مشاهده شد. اگرچه آبیاری فقط در دو نوبت انجام شد، تأثیر آن با مقدار رطوبت بالاتر اندازه‌گیری شده برای خاک قسمت آبیاری شده، نمایان شد. بنابراین، به رغم داشتن فصل زراعی نسبتاً مرطوب و پر باران در سال ۲۰۱۲ در شهر پتسدام آلمان (محل مزرعه تحقیقاتی)، تنش آبی ملایمی مخصوصاً در هفته‌های بیست و دوم و بیست و سوم مشاهده شد.

خروجی حسگر Crop-Circle، شاخص NDRE بود. در زمان داده برداری، حسگر Crop-Circle از هفته ۱۸ به بعد در دسترس بود و از این رو نتایج ارائه شده مربوط به این هفته‌ها است. نتایج آنالیز واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده با این حسگر نشان داد که اثر نیتروژن روی اندازه‌گیری‌ها برای همه هفته‌های مورد بررسی (یا مراحل مختلف رشد گیاه) در سطح ۱ درصد اما برای هفته‌های بیست و دوم، بیست و سوم، و بیست و چهارم در سطح ۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۱).

به منظور بررسی معنی‌داری آثار تیمارهای نیتروژن و آب روی داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها، از آنالیز واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار آماری SAS Ver. 9.3 (SAS Institute, Inc., Cary, N.C., USA) استفاده شد. همچنین، میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی^۱ در این نرم‌افزار در سطح ۵ درصد مقایسه شدند. مدل‌های رگرسیونی^۲ با کمک نرم‌افزار MATLAB Ver. 7.13 (R2011b, Mathworks Company) به دست آمد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک با حسگرهای ECH₂O نشان داد که مقدار رطوبت حجمی خاک در قسمت آبیاری نشده مزرعه، بین هفته‌های بیست و دوم و بیست و سوم (۲۳۵ و ۲۴۵ روز بعد از کاشت) در نزدیکی نقطه پژمردگی دائم^۳ (۳ درصد) است. همچنین طی این مدت، پدیده لوله‌ای شدن برگ^۴ در بخش‌های

جدول ۱- آنالیز واریانس اندازه‌گیری‌ها با حسگرهای Crop-Circle و ISARIA

میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییرات	هفته
ISARIA	Crop-Circle			
۳۸/۵۵ [*]	-	۸	مدل	۱۷
۰/۷۹ ^{ns}	-	۱	بلوک	
۹۹/۷۴ ^{**}	-	۳	مقدار نیتروژن	
۷/۸۷ ^{ns}	-	۱	آب	
۰/۱۹ ^{ns}	-	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۱/۶۶	-	۷	خطا	
۸۱/۲۲ ^{**}	۱۲۳۰۵/۵۱ ^{**}	۸	مدل	
۱/۹۳ ^{ns}	۲۷۷/۷۷ ^{ns}	۱	بلوک	
۲۱۴/۹۱ ^{**}	۳۲۴۸۸/۱۰ ^{**}	۳	مقدار نیتروژن	
۱/۳۶ ^{ns}	۴۰۰/۰ ^{ns}	۱	آب	
۰/۵۷ ^{ns}	۱۰۰/۶۶ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۰/۹۳	۱۲۲/۷۱	۷	خطا	

:- اطلاعات موجود نمی‌باشد.

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و

ns: نبود اختلاف معنی‌دار

1- Tukey
3- Permanent Wilting Point (PWP)

2- Regression
4- Leaf Rolling

تخمین میزان نیتروژن در گندم زمستانه با استفاده...

ادامه جدول ۲- آنالیز واریانس اندازه‌گیری‌ها با حسگرهای Crop-Circle و ISARIA

میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییرات	هفته
ISARIA	Crop-Circle			
۱۵۳/۵۳**	۱۳۱۴۹/۱۵**	۸	مدل	۱۹
۶/۱۸ns	۱۷/۳۶ ^{ns}	۱	بلوک	
۴۰۶/۵۶**	۳۴۹۰۵/۲۷**	۳	مقدار نیتروژن	
۰/۴۷ ^{ns}	۲۴۵/۴۴ ^{ns}	۱	آب	
۰/۶۵ ^{ns}	۷۱/۵۴ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۴/۱۶	۱۰۸/۸۴	۷	خطا	
۲۵۸/۴۹**	۱۴۷۰۶/۵۵**	۸	مدل	۲۰
۱/۴۵ ^{ns}	۱۱/۶۷ns	۱	بلوک	
۶۸۸/۵۰**	۳۹۰۸۱/۵۶**	۳	مقدار نیتروژن	
۰/۰۰۱ ^{ns}	۹۱/۸۴ ^{ns}	۱	آب	
۰/۳۳ ^{ns}	۱۰۱/۳۹ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۴/۴۰	۱۱۵/۷۵	۷	خطا	
۴۶۵/۹۶**	۱۴۱۴۶/۷۲**	۸	مدل	۲۱
۷/۱۶ ^{ns}	۴۶/۶۹ ^{ns}	۱	بلوک	
۱۲۲۶/۴۵**	۳۷۴۵۷/۴۶**	۳	مقدار نیتروژن	
۱۹/۷۲ ^{ns}	۳۴۲/۲۵ ^{ns}	۱	آب	
۷/۱۴ ^{ns}	۱۳۷/۴۹ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۶/۹۷	۱۰۹/۵۲	۷	خطا	
۳۲۳/۷۱**	۷۲۹۰/۰۷**	۸	مدل	۲۲
۲/۴۴ ^{ns}	۳۹/۰۶ ^{ns}	۱	بلوک	
۸۴۴/۴۰**	۱۸۹۸۹/۷۶**	۳	مقدار نیتروژن	
۶/۰۹ ^{ns}	۱۱۷۳/۰۶*	۱	آب	
۱۵/۹۸*	۴۶/۳۸ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۳/۰۴	۱۳۲/۵۴	۷	خطا	
۲۹۰/۲۷**	۷۰۳۶/۴۷**	۸	مدل	۲۳
۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۱	بلوک	
۷۷۰/۹۳**	۱۸۴۰۹/۷۶**	۳	مقدار نیتروژن	
۳/۳۴ ^{ns}	۸۳۱/۳۶*	۱	آب	
۲/۰۱ ^{ns}	۷۷/۰۴ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۱/۴۰	۱۱۳/۴۹	۷	خطا	
۲۳۶/۲۲**	۹۲۳۶/۵۵**	۸	مدل	۲۴
۰/۰۴ ^{ns}	۲۲/۵۶ ^{ns}	۱	بلوک	
۶۰۴/۶۳**	۲۴۱۴۷/۷۵**	۳	مقدار نیتروژن	
۳۴/۸۱*	۹۹۷/۵۰*	۱	آب	
۱۳/۶۸ ^{ns}	۱۴۳/۰۲ ^{ns}	۳	مقدار نیتروژن×آب	
۳/۶۳	۹۱/۳۹	۷	خطا	

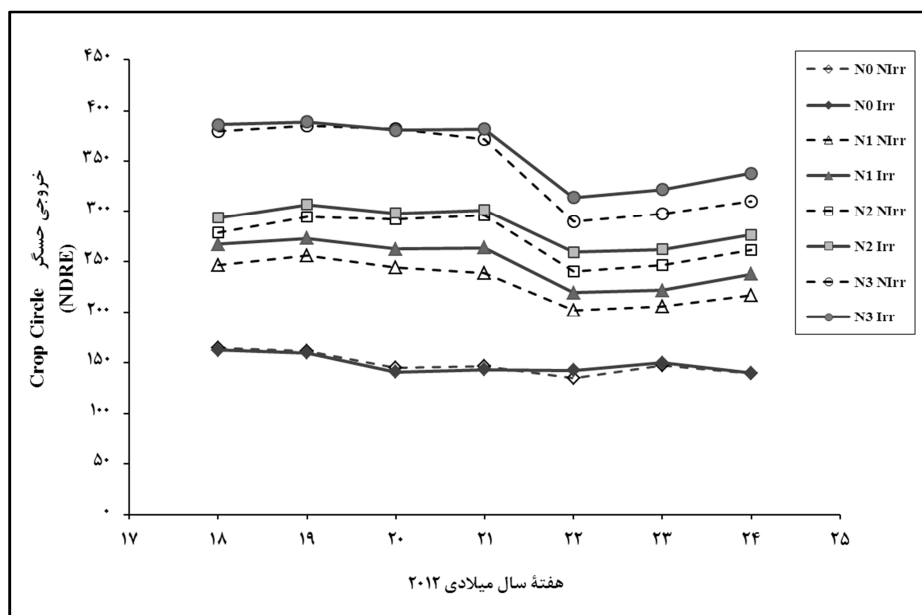
:- اطلاعات موجود نمی‌باشد.

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و

ns: نبود اختلاف معنی‌دار

محصول آبیاری شده و محصول آبیاری نشده در مقدار شاخص NDRE در هیچ یک از هفته‌های مورد بررسی مشاهده نمی‌شود. ولی در مقادیر بالاتر نیتروژن و مخصوصاً از هفته بیست و دوم به بعد، بین محصول آبیاری شده و محصول آبیاری نشده در مقدار این شاخص تفاوت وجود دارد بدین معنا که محصول آبیاری شده مقادیر بیشتری را داراست (شکل ۳).

شکل ۳ تغییرات میانگین شاخص NDRE اندازه‌گیری شده با حسگر Crop-Circle را در مقادیر مختلف نیتروژن و دو رژیم آبیاری در طول فصل زراعی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در همه هفته‌ها مقدار این شاخص برای مقادیر بالاتر نیتروژن بیشتر بوده است. در حالتی که میزان نیتروژن صفر کیلوگرم بر هکتار است، یعنی کود نیتروژن دار اضافه نشده است، تفاوتی بین



شکل ۳- اندازه‌گیری‌های حسگر Crop-Circle در طول فصل زراعی (N0، N1، N2، N3 به ترتیب میزان نیتروژن ۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار؛ Irr و NIrr به ترتیب آبی و دیمی)

به صورت لگاریتمی با ضریب تبیین (R^2) در محدوده ۰/۸۷ تا ۰/۹۵ است.

از شاخص NDRE حسگر Crop-Circle برای تخمین میزان نیتروژن نیز استفاده شد. در همه هفته‌های مورد بررسی، معادله چند جمله‌ای درجه دوم بهترین معادله برای توصیف رابطه بین این شاخص و میزان نیتروژن بوده است. این روابط رگرسیونی در جدول ۴ برای هر یک از هفته‌ها یا مراحل رشد گیاه به طور جداگانه ارائه شده

روابط رگرسیونی به دست آمده با استفاده از اندازه‌گیری‌های این حسگر نشان می‌دهد که این حسگر با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده محصول است (جدول ۳). همانگونه که در جدول ۳ آورده شده است، شاخص NDRE این حسگر به صورت نمایی، مقدار نیتروژن گندم زمستانه را تخمین زده است. همچنین، رابطه بین این شاخص با زیست توده تازه و زیست توده خشک محصول در همه زمان‌های نمونه‌برداری

واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده با این حسگر، اثر نیتروژن روی اندازه‌گیری‌ها برای همه هفته‌هایی که تحقیق ادامه داشت (یا مراحل مختلف رشد گیاه) در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر رژیم آبیاری تنها در هفته بیست و چهارم در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بنابراین، این حسگر حساسیت کمی نسبت به وضعیت آب محصول از خود نشان داد که بدان معناست در حالت کمبود آب در محصول، این کمبود روی خروجی این حسگر تأثیر کمی خواهد داشت و با کمبود نیتروژن اشتباه گرفته نمی‌شود.

شکل ۴ تغییرات میانگین اندازه‌گیری‌های حسگر ISARIA را در مقادیر مختلف نیتروژن و دو رژیم آبیاری در طول فصل زراعی نشان می‌دهد. وقتی میزان نیتروژن ۰، ۶۰ و ۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار باشد، بین محصول آبیاری شده و آبیاری نشده در مقدار اندازه‌گیری‌ها در هیچ یک از هفته‌های مورد بررسی، تفاوتی مشاهده نمی‌شود. ولی در میزان نیتروژن ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار، از هفته بیست و یکم به بعد، بین محصول آبیاری شده و آبیاری نشده در مقادیر اندازه‌گیری شده، تفاوت وجود دارد که محصول آبیاری شده مقادیر بیشتری را داراست. همچنین، اختلاف بین اندازه‌گیری‌های این حسگر در مقادیر مختلف نیتروژن با گذشت زمان بیشتر می‌شود (شکل ۴).

است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در همه مراحل اندازه‌گیری، ضریب تبیین به دست آمده بیشتر از ۰/۹۰ است. در هفته‌های نوزدهم و بیستم، بهترین روابط (با ضریب تبیین ۰/۹۸) برای تخمین میزان نیتروژن با استفاده از حسگر Crop-Circle به دست آمد.

محققان دیگر نیز از حسگر Crop-Circle برای تشخیص وضعیت نیتروژن در گندم، ذرت و برنج به طور موفقیت آمیز استفاده کرده‌اند (Sripada *et al.*, 2008; Erdle *et al.*, 2011; Schmidt *et al.*, 2011; Shaver *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2013).

در تحقیقات گذشته، شاخص‌های مختلفی برای حسگر Crop-Circle محاسبه شده است. اردل و همکاران (Erdle *et al.*, 2011) یک شاخص NDVI $(SR)^1$ $(R_{760}-R_{670}/R_{760}+R_{670})$ و سه شاخص (R_{730}/R_{670}) با استفاده از اندازه‌گیری‌های حسگر Crop-Circle برای تشخیص وضعیت نیتروژن در گندم محاسبه کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که در مراحل مختلف نمونه‌برداری، NDVI و شاخص R_{760}/R_{730} بهترین رابطه را با پارامترهای زیست توده و نیتروژن محصول دارند (Erdle *et al.*, 2011).

حسگر ISARIA در زمان داده‌برداری، از هفته هفدهم به بعد در دسترس قرار گرفت؛ بنابراین نتایج ارائه شده مربوط به آن تاریخ به بعد است. بر اساس نتایج آنالیز

جدول ۳- روابط رگرسیونی بین اندازه‌گیری‌های مستقیم ویژگی‌های گندم زمستانه و اندازه‌گیری‌های حسگرهای Crop-Circle و ISARIA

08.06.2012			25.05.2012			10.05.2012			متغیر
DB	FB	N	DB	FB	N	DB	FB	N	
$y=694.54\ln(x)$ - 2644.4 ۰/۹۰	$y=2140.8\ln(x)$ - 8498.3 ۰/۹۰	-	$y=487.83\ln(x)$ - 1874.8 ۰/۹۴	$y=1492.5\ln(x)$ - 5620.9 ۰/۹۵	$y=0.72e^{0.002x}$ ۰/۵۹	$y=278.42\ln(x)$ - 1151.4 ۰/۸۷	$y=1598.6\ln(x)$ - 7077.9 ۰/۸۷	$y=0.77e^{0.003x}$ ۰/۹۱	Eq. R^2 $RMSE$
۸۱/۵۸	۲۵۶/۲	-	۵۱/۰۹	۱۴۵/۹	۰/۲۰	۴۲/۷۲	۲۴۶/۴	۰/۱۵	
$y=447.98\ln(x)$ - 441.2 ۰/۹۵	$y=1378.1\ln(x)$ - 1698.1 ۰/۹۴	-	$y=361.95\ln(x)$ - 440.71 ۰/۹۵	$y=1104.9\ln(x)$ - 1224.7 ۰/۹۶	$y=0.37\ln(x)$ - 0.02 ۰/۵۱	$y=288.94\ln(x)$ - 571.09 ۰/۸۱	$y=1739.5\ln(x)$ - 4011.8 ۰/۸۹	$y=1.25\ln(x)$ - 2.42 ۰/۹۲	Eq. R^2 $RMSE$
۵۷/۶۷	۱۹۰/۹	-	۴۴/۸۲	۱۳۲/۴	۰/۲۱	۵۱/۵۴	۲۲۲/۶	۰/۱۴	

:- اطلاعات موجود نیست. N: مقدار نیتروژن؛ FB: زیست توده تازه؛ DB: زیست توده خشک؛ y: ویژگی محصول (مقدار نیتروژن، زیست توده تازه و زیست توده خشک)؛ x: اندازه‌گیری حسگرهای Crop-Circle و ISARIA؛ Eq. رابطه رگرسیونی؛ R^2 : ضریب تبیین؛ $RMSE$: خطای جذر میانگین مربعات

جدول ۴- روابط رگرسیونی بین میزان نیتروژن و اندازه‌گیری‌های حسگرهای Crop-Circle و ISARIA

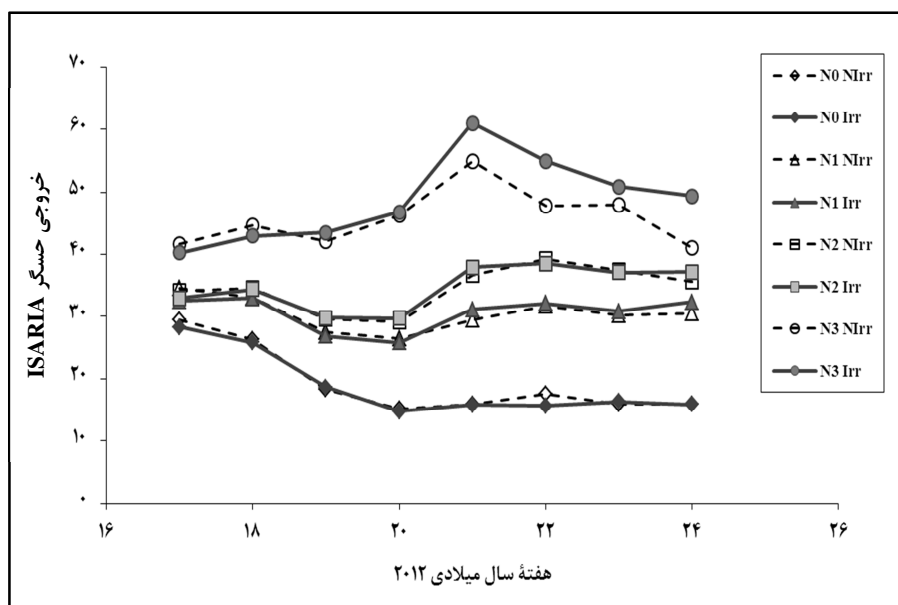
هفته سال ۲۰۱۲								متغیر
۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	
$y=0.004x^2 - 0.75x + 23.19$ ۰/۹۰	$y=0.004x^2 - 0.32x - 33.45$ ۰/۹۲	$y=0.004x^2 - 0.36x - 24.7$ ۰/۹۰	$y=0.003x^2 - 0.75x + 38.09$ ۰/۹۷	$y=0.003x^2 - 0.62x + 25.64$ ۰/۹۸	$y=0.003x^2 - 0.69x + 28.48$ ۰/۹۸	$y=0.0024x^2 - 0.21x - 29.01$ ۰/۹۶	-	Eq. R^2 $RMSE$
۲۸/۰۱	۲۶/۱۴	۲۸/۳۷	۱۴/۲۰	۱۳/۰۶	۱۳/۶۵	۱۷/۶۹	-	
$y=0.104x^2 + 0.72x - 41.41$ ۰/۸۳	$y=0.105x^2 + 0.08x - 30.39$ ۰/۹۵	$y=0.08x^2 + 1.03x - 41.97$ ۰/۹۳	$y=5.57x - 91.98$ ۰/۹۵	$y=7.59x - 117.09$ ۰/۹۶	$y=9.64x - 179.92$ ۰/۹۴	$y=13.29x - 351.54$ ۰/۹۳	$y=17.76x - 502.78$ ۰/۸۴	Eq. R^2 $RMSE$
۳۷/۸۷	۲۰/۵۴	۲۴/۰۱	۲۰/۷۲	۱۸/۰۶	۲۲/۴۵	۲۳/۰۵	۳۶/۲۱	

:- اطلاعات موجود نیست. y: مقدار نیتروژن اعمالی به محصول (کیلوگرم بر هکتار)؛ x: اندازه‌گیری حسگرهای Crop-Circle و ISARIA؛ Eq. رابطه رگرسیونی؛ R^2 : ضریب تبیین؛ $RMSE$: خطای جذر میانگین مربعات

تخمین میزان نیتروژن در گندم زمستانه با استفاده...

نیتروژن نیز استفاده شد. برای هفته‌های هفدهم تا بیست و یکم، معادله خطی و برای هفته‌های بیست و دوم تا بیست و چهارم، معادله چند جمله‌ای درجه دوم بهترین معادله‌ها بودند که رابطه بین خروجی این حسگر و میزان نیتروژن را توصیف کرده‌اند. این روابط رگرسیونی در جدول ۴ برای هر یک از هفته‌ها یا مراحل رشد گیاه به طور جداگانه ارائه شده است. ضریب تبیین برای این روابط بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۶ به دست آمد. بنابراین، عملکرد این حسگر برای تخمین مقدار نیتروژن، در مراحل مختلف رشد گیاه، بسیار نزدیک بوده است که نشان می‌دهد این حسگر می‌تواند مقدار نیتروژن را با دقت بالا و مستقل از مرحله رشد گیاه تخمین بزند.

بر اساس روابط رگرسیونی به دست آمده بین اندازه‌گیری‌های این حسگر و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده مستقیم محصول، این حسگر با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی این ویژگی‌هاست (جدول ۳). همانگونه که در جدول ۳ آورده شده است در هر نوبت نمونه‌برداری، معادله لگاریتمی بهترین معادله برای بیان رابطه بین خروجی ISARIA و مقدار نیتروژن، زیست توده تازه و خشک محصول است. ضریب تبیین (R^2) این روابط برای مقدار نیتروژن، زیست توده تازه و خشک به ترتیب در محدوده ۰/۵۱ تا ۰/۹۲، ۰/۸۹ تا ۰/۹۶ و ۰/۸۱ تا ۰/۹۵ قرار دارد. از اندازه‌گیری‌های حسگر ISARIA برای تخمین مقدار



شکل ۴- اندازه‌گیری‌های حسگر ISARIA در طول فصل زراعی (N0، N1، N2 و N3 به ترتیب مقدار نیتروژن ۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار؛ Irr و Nirr به ترتیب آبیاری و بدون آبیاری تکمیلی)

نتیجه گیری

(مانند اکثر مناطق ایران)، باید این قضیه در نظر گرفته شود. - حسگر ISARIA نیز روابط مناسبی برای تشخیص وضعیت نیتروژن محصول ارائه می‌دهد. این حسگر حساسیت کمی نسبت به وضعیت آب محصول نشان می‌دهد. دقت تشخیص وضعیت نیتروژن با این حسگر نیز برای مراحل مختلف رشد گیاه، بسیار نزدیک است که این نشان دهنده مستقل بودن نتایج این حسگر نسبت به مرحله رشد گیاه است.

- با توجه به امکان شبیه‌سازی شاخص‌های مورد استفاده در حسگرهای Crop-Circle و ISARIA با استفاده از اسپکترومتر، و وجود حسگرهایی برای اندازه‌گیری ارتفاع محصول در ایران، پیشنهاد می‌شود تحقیق مشابهی در ایران انجام و نتایج آن با نتایج این تحقیق مقایسه شود.

نتیجه‌گیری‌های زیر را می‌توان از این پژوهش بیان کرد: - حسگر Crop-Circle عملکرد خوبی در تخمین وضعیت نیتروژن محصول دارد. اندازه‌گیری این حسگر تحت تأثیر وضعیت آب محصول قرار می‌گیرد. با افزایش مقدار نیتروژن اضافه شده به محصول، اثر اشباع در اندازه‌گیری‌های این حسگر مشاهده نمی‌شود. دقت تشخیص وضعیت نیتروژن با این حسگر در مراحل مختلف رشد گیاه، بسیار نزدیک است که نشان دهنده مستقل بودن نتایج این حسگر نسبت به مرحله رشد گیاه است. بنابراین، از این حسگر می‌توان در مراحل مختلف رشد گیاه با دقت مناسب برای تشخیص وضعیت نیتروژن استفاده کرد. اما در صورت استفاده از این حسگر در مناطقی که امکان وجود تنش آبی هست

مراجع

- Berntsen, J., Thomsen, A., Schelde, K., Hansen, O. M., Knudsen, L., Broge, N., Hougaard, H. and Hørfarter, R. 2006. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. *Precis. Agric.* 7, 65-83.
- Cao, Q., Miao, Y., Wang, H., Huang, S., Cheng, S., Khosla, R. and Jiang, R. 2013. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Res.* 154, 133-144.
- Clay, D. E., Kim, K.-I., Chang, J., Clay, S. A. and Dalsted, K. 2006. Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. *Agron. J.* 98, 579-587.
- Ehlert, D. and Dammer, K. H. 2006. Widescale testing of the Crop-meter for site-specific farming. *Precis. Agric.* 7, 101-115.
- Ehlert, D., Horn, H.-J. and Adamek, R. 2008. Measuring crop biomass density by laser triangulation. *Comput. Electron. Agric.* 61(2):117-125.
- Ehlert, D., Adamek, R. and Horn, H.-J. 2009. Vehicle based laser range finding in crops. *Sensors* 9, 3679-3694.
- Ehlert, D., Heisig, M. and Adamek, R. 2010. Suitability of a laser rangefinder to characterize winter wheat. *Precis. Agric.* 11, 650-663.
- Erdle, K., Mistele, B. and Schmidhalter, U. 2011. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Res.* 124, 74-84.
- Gebbers, R., Ehlert, D. and Adamek, R. 2011. Rapid mapping of the leaf area index in agricultural crops. *Agron. J.* 103(5): 1532-1541.
- Hong, S. D., Schepers, J. S., Francis, D. D. and Schlemmer, M. R. 2007. Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38, 2209-2226.

- Jones, C. L., Maness, N. O., Stone, M. L. and Jayasekara, R. 2007. Chlorophyll estimation using multispectral reflectance and height sensing. *Trans. ASABE*. 50, 1867-1872.
- Kirkham, B. 2004. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier Science.
- LaRuffa, J. M., Raun, W. R., Phillips, S. B., Solie, J. B., Stone, M. L. and Johnson, G. V. 2001. Optimum field element size for maximum yields in winter wheat, using variable nitrogen rates. *J. Plant Nutr.* 24, 313-325.
- Lee, K.-J. and Lee, B.-W. 2013. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis. *European J. Agron.* 48, 57-65.
- Li, Y., Chen, D., Walker, C. N. and Angus, J. F. 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Res.* 118, 221-227.
- Osborne, S. L., Schepers, J. S., Francis, D. D. and Schlemmer, M. R. 2002. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agron. J.* 94, 1215-1221.
- Pagola, M., Ortiz, R., Irigoyen, I., Bustince, H., Barrenechea, E., Aparicio-Tejo, P., Lamsfus, C. and Lasa, B. 2009. New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: Comparison with SPAD-502. *Comput. Electron. Agric.* 65, 213-218.
- Portz, G., Molin, J. P. and Jasper, J. 2012. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precis. Agric.* 13, 33-44.
- Schmidt, J., Beegle, D., Zhu, Q. and Sripada, R. 2011. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. *Field Crops Res.* 120, 94-101.
- Shaver, T. M., Khosla, R. and Westfall, D. G. 2011. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. *Precis. Agric.* 12, 892-904.
- Sripada, R. P., Schmidt, J. P., Dellinger, A. E. and Beegle, D. B. 2008. Evaluating Multiple Indices from a Canopy Reflectance Sensor to Estimate Corn N Requirements. *Agron. J.* 100, 1553-1561.
- Sui, R. and Thomasson, J. A. 2006. Ground-Based sensing system for cotton nitrogen status determination. *Trans. ASABE*. 49, 1983-1991.
- Tartachnyk, I., Rademacher, I. and Kühbauch, W. 2006. Distinguishing nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser-induced fluorescence. *Precis. Agric.* 7, 281-293.
- Thoele, H. and Ehlert, D. 2010. Biomass related nitrogen fertilization with a crop sensor. *Appl. Eng. Agric.* 26, 769-775.
- Tilling, A. K., O'Leary, G. J., Ferwerda, J. G., Jones, S. D., Fitzgerald, G. J., Rodriguez, D. and Belford, R. 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Res.* 104, 77-85.
- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B.-L., Belec, C. and Vigneault, P. 2009. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precis. Agric.* 10, 145-161.
- Wang, Y., Wang, D., Zhang, G. and Wang, J. 2013. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method. *Field Crops Res.* 149, 33-39.
- Zebarth, B. J., Rees, H., Tremblay, N., Fournier, P. and Leblon, B. 2003. Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the N Sensor. *Acta Hort.* 627, 267-273.
- Zhang, N., Wang, M. and Wang, N. 2002. Precision agriculture-a worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* 36, 113-132.

Estimation of Nitrogen Content in Winter Wheat Using Proximal Crop Sensors

H. Tavakoli, S. S. Mohtasebi* and R. Alimardani

* Corresponding author: Professor, Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, University of Tehran, P. O. Box: 4111, Karaj, Iran. Email: mohtaseb@ut.ac.ir

Received: 27 September 2014, Accepted: 6 June 2015

Nitrogen (N) is an important agricultural input that affects plant growth, yield and quality. Different crop sensors have been developed to detect the nitrogen status non-destructively content crops. The present study compared the performance of the Crop-Circle and Isaria crop sensors to estimate the nitrogen content of winter wheat during the growing season. The sensitivity of sensor measurements to the water content of the crop was also investigated. Field testing was conducted during the 2012 growing season at Marquardt experimental station northwest of Potsdam, Germany. The experiment was designed as a randomized split block design with two replications. Treatments consisted of four N fertilization rates (0, 60, 120 and 240 kg N ha⁻¹) and two water regimes (irrigated and non-irrigated). The results indicated that both Crop-Circle and Isaria crop sensors showed very high performance for detection of the nitrogen content of winter wheat. It was noted that the measurements by Crop-Circle were affected by the water content of the crop, but that Isaria showed low sensitivity to water content.

Keywords: Nitrogen, Proximal Crop Sensors, Precision Agriculture, Wheat