

تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت و مخاطرات آن با استفاده از تصویربرداری چندطیفی هوایی به وسیله پهپاد

مهریار جابری اقدم

گروه زراعت و اگرواکولوژی، واحد ورامین پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
محمد رضا ممیزی*

گروه زراعت و اگرواکولوژی، واحد ورامین پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
نیکروز باقری

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
پیمان عزیزی

گروه زراعت و اگرواکولوژی، واحد ورامین پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
محمد نصری

گروه زراعت و اگرواکولوژی، واحد ورامین پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ ارسال ۱۳۹۹/۴/۱۸ - تاریخ پذیرش ۱۳۹۹/۶/۸)

چکیده

یکی از مخاطرات اصلی در بخش کشاورزی، استفاده بی‌رویه از کودهای نیتروژن دار است. مصرف بیش از حد این کودها علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، سبب آلودگی محیط زیست و افزایش خطر برای سلامت انسان می‌شود. بهبود کارایی مصرف نیتروژن در گاو پایش وضعیت نیتروژن گیاه در مراحل مختلف رشد و اعمال مقدار کافی کود در زمان و مکان مناسب است. با توجه به ضرورت کاهش مخاطرات مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژن دار، این پژوهش به منظور تشخیص تنش کود نیتروژن گیاه ذرت با استفاده از فناوری نوین، سریع و غیرمخرب سنجش از دور چندطیفی هوایی با پهپاد انجام گرفت. آزمایش در یک مزرعه ذرت به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار و چهار تیمار کود اوره در چهار سطح شامل کمبود (شاهد، صفر درصد)، محدوده بحرانی (۵۰ درصد)، حد کفایت (۱۰۰ درصد) و مقدار بیش از حد (سمی، ۱۵۰ درصد) اجرا شد. کود اوره همراه با آب آبیاری در دو مرحله رشد هشت‌برگی و ظهور گل‌آذین نر اعمال شد. در این مراحل از رشد گیاه، تصویربرداری چندطیفی هوایی در محدوده طیفی مرئی-مادون‌قرمز نزدیک انجام گرفت. برای نمونه‌برداری‌های زمینی، در هر دو مرحله رشد، از هر تیمار ۱۰ بوته ذرت به صورت تصادفی انتخاب شد. برای هر نمونه ابتدا مقدار کلروفیل آن مشخص و سپس مقدار نیتروژن از روش کج‌جلدال تعیین شد و تصاویر پس از برداشت پردازش شدند. شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، NRI، MTVI2، CI، GM که با سبزیگی گیاه، مقدار کلروفیل و نیتروژن آن مرتبط بودند، محاسبه شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از بررسی روابط متغیرهای شاخص‌های تنش غلظت نیتروژن با کلروفیل در برگ از طریق برازش مدل‌های رگرسیون انجام گرفت. نتایج نشان داد که شاخص‌ها با مقدار نیتروژن همبستگی داشتند و شاخص CI در مرحله رشد هشت‌برگی با $R^2 = 0.88$ و شاخص NRI در مرحله رشد ظهور گل‌آذین نر با $R^2 = 0.90$ مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تشخیص تنش نیتروژن بودند.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، تصویربرداری چندطیفی، سنجش از دور، کشاورزی دقیق، کود نیتروژن، مخاطرات.

مقدمه

امروزه امنیت غذایی از دغدغه‌های اصلی مردم و دولتمردان در هر جامعه است. امنیت غذایی به معنای اطمینان از دسترسی اقتصادی همه مردم به غذای کافی، سالم و مغذی در همه اوقات به منظور داشتن زندگی سالم و فعال است [۶]. افزایش روزافزون جمعیت از یک سو و محدود بودن منابع تولید از سوی دیگر و نیز ناآگاهی از دانش مخاطرات [۱، ۲۱]، امنیت غذایی را با مخاطرات جدی مواجه کرده است. در چنین شرایطی کاراترین روش برای کاهش مخاطرات مذکور، افزایش بهره‌وری در تولید است. افزایش بهره‌وری با افزایش عملکرد و کاهش هزینه‌های تولید امکان پذیر است و برای دستیابی به این هدف، افزایش کاربرد دانش و فناوری در تولید محصول‌های کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است [۳]. از جمله علوم و فناوری‌های نوین مدیریت مزرعه به منظور افزایش بهره‌وری، کشاورزی دقیق است [۴]. کشاورزی دقیق برپایه فناوری اطلاعات و در چارچوب اصول توسعه پایدار، با جمع‌آوری و ذخیره‌سازی اطلاعات مکانی و پردازش آنها به منظور مدیریت موضعی اراضی کشاورزی با هدف کاربرد نهاده‌های تولید به مقدار لازم و در محل و زمان مناسب در همه مراحل تولید از تهیه زمین تا برداشت محصول، قابل اجراست [۱۱]. این فناوری علاوه بر استفاده بهینه از نهاده‌ها، سبب افزایش بهره‌وری در تولید می‌شود. کاربرد کشاورزی دقیق دامنه گسترده‌ای از تجهیزات الکترونیکی (شامل انواع حسگر، اپتیکی (انواع طیف‌سنج، دوربین‌های دیجیتال و دوربین‌های چندطیفی، ابرطیفی، حرارتی)، رایانه‌ها و نرم‌افزارهای رایانه‌ای را در بر می‌گیرد. این فناوری نیازمند سامانه‌هایی از جمله سامانه اطلاعات جغرافیایی، سامانه موقعیت‌یاب جهانی، فناوری سنسجش از دور فضایی و هوایی و فناوری نرخ متغیر است [۱]. با توجه به چالش‌های عمده‌ای که جهان امروز در زمینه آب، غذا و آلودگی‌های زیست محیطی و منابع انرژی با آن روبه‌روست، کشاورزان نسل‌های آینده ناگزیر به این روش‌های مدیریتی جدید روی خواهند آورد [۵].

یکی از مخاطرات اصلی در بخش کشاورزی استفاده بی‌رویه از کودهای نیتروژن‌دار است. مصرف بیش از حد این کودها علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، سبب آلودگی محیط زیست، افزایش آسیب‌پذیری محصول و افزایش خطر برای سلامت انسان (از جمله شیوع سرطان) می‌شود [۲]. بهبود کارایی مصرف نیتروژن راهبردی مهم برای تولید کشاورزی پایدار است که به عملکرد بهینه در ازای مصرف حداقل نهاده‌ها، کاهش هدررفت نیتروژن و در نهایت افزایش بهره‌وری منجر می‌شود [۳]. بهبود کارایی مصرف نیتروژن در گرو پایش وضعیت نیتروژن محصول در مراحل مختلف رشد و اعمال مقدار کافی کود در زمان و مکان مناسب است [۳۳].

در حال حاضر دقیق ترین روش برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه و تجویز کود لازم، نمونه برداری دستی از گیاه یا خاک و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه هاست که این روش بسیار زمان بر، هزینه بر و پر زحمت است [۳۴]. همچنین استفاده از دستگاه کلروفیل سنج [SPAD]^۱ برای برآورد مقدار کود براساس عدد کلروفیل دستگاه یک روش رایج برآورد نیاز کودی است [۲۱]. با این حال، اندازه گیری ها در این روش نقطه ای است و عدد به دست آمده نمی تواند نشان دهنده مقدار کلروفیل برگ ها یا بوته های دیگر باشد [۱۹]. با توجه به پیامدهای نامطلوب ناشی از مصرف نامناسب کودهای نیتروژن دار و محدودیت های روش های فعلی برای تعیین مقدار کود نیتروژن مورد نیاز، به کارگیری فناوری های نوین، سریع، و غیرمخرب برای مصرف بهینه کودهای نیتروژن دار و افزایش کارایی آن، ضروری به نظر می رسد [۳۲]. در پژوهش های فراوانی امکان کاربرد فناوری سنجش از دور به عنوان یک روش مبتنی بر کشاورزی دقیق برای تعیین وضعیت نیتروژن گیاه ارزیابی شده است [۲۸،۳۱]. نتایج پژوهش ها نشان می دهد که فناوری سنجش از دور می تواند مقدار نیتروژن گیاه را تعیین کند [۱۴،۲۳]. در سال های اخیر، با توسعه پهپادها زیرساخت های جدیدی برای پایش محصول های کشاورزی ایجاد شده است. پهپادها نسبت به سکوها دیگر سنجش از دور مانند ماهواره ها و هواپیماها، از انعطاف پذیری بیشتری برای انجام عملیات برخوردارند [۱۰]. با استفاده از پهپاد می توان تصاویر را با فاصله زمانی کم، قدرت تفکیک مکانی بیشتر و هزینه کمتر تهیه کرد [۱۹]. لی و همکاران (۲۰۱۰) از سه نوع دوربین نصب شده روی پهپاد برای برآورد وضعیت نیتروژن در دو رقم گندم استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص پوشش محصول^۲ همبستگی خوبی با مقدار نیتروژن رقم های گندم دارد [۲۰]. روری و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقی را برای تشخیص سبزی و غلظت نیتروژن برگ ذرت با استفاده از یک دوربین دیجیتال انجام دادند. آنها همبستگی خوبی بین مقدار کلروفیل و نیتروژن با ضریب تبیین ۰/۶۷ به دست آوردند و رابطه نزدیکی بین سبزی برگ و غلظت نیتروژن گزارش کردند [۲۴]. در پژوهش زمان اله و همکاران (۲۰۱۵)، برای بررسی تحمل ذرت به تنش نیتروژن از تصویربرداری هوایی با پهپاد استفاده شد. نتایج نشان داد که با استفاده از تصاویر چندطیفی هوایی می توان مقدار نیتروژن خاک را تعیین کرد و تنش نیتروژن را با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی تشخیص داد. در این پژوهش، شاخص نرمال پوشش گیاهی^۳ همبستگی قوی با داده های زمینی داشت [۳۳]. کرینک و همکاران (۲۰۱۷) از

1. Soil-plant Analysis Development
 2. Crop Coverage
 3. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

تصویربرداری هوایی به وسیله پهپاد برای برآورد تغییرات نیتروژن پوشش گیاهی ذرت، استفاده کردند. نتایج نشان داد که پهپاد مجهز به حسگرهای فعال پوشش گیاهی ظرفیت خوبی برای دریافت داده‌های مربوط به تنش نیتروژن گیاه (نسبت به حسگرهای غیرفعال) دارد. در این پژوهش همبستگی بین مقادیر نیتروژن گیاه و مدل ارائه شده، ۰/۸۵ گزارش شده است [۱۹]. کرتی و همکاران (۲۰۱۹) نیز از یک دوربین ارزان قیمت نصب‌شده روی پهپاد برای بررسی وضعیت نیتروژن ذرت علوفه‌ای استفاده کردند. آنها دوربین‌های چندطیفی با قدرت تفکیک زمینی زیاد را برای برآورد نیتروژن با دقت زیاد پیشنهاد کردند [۱۵]. ونگ و همکاران (۲۰۱۹) پژوهشی را برای برآورد ازت در دو محصول زراعی با استفاده از پهپاد مجهز به دوربین چندطیفی انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، امکان برآورد شاخص NNI با استفاده از تحلیل تصاویر چندطیفی وجود دارد [۲۹].

با توجه به ضرورت کاهش مخاطرات ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژن دار، هدف این پژوهش تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت به‌عنوان راهکاری برای تعیین نیاز کودی گیاه با استفاده از فناوری‌های نوین، سریع و غیرمخرب سنجش از دور چندطیفی هوایی با پهپاد است.

مواد و روش‌ها

محل اجرای این پژوهش بخشی از یک مزرعه کشاورزی به مساحت تقریبی ۸۵۰ متر مربع در روستای جوادآباد شهرستان ورامین در جنوب استان تهران با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۸ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی بود. موقعیت جغرافیایی زمین زراعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google earth در شکل ۱ نشان داده شده است.



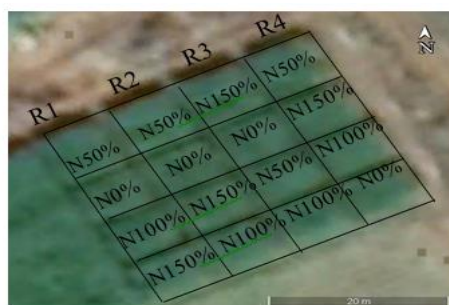
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی زمین زراعی اخذشده از تصاویر ماهواره‌ای Google earth

برای تعیین خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک، نمونه برداری به روش سلول شبکه از عمق ۳۰-۰ سانتی متری خاک قبل از کشت مطابق نقشه به طور تصادفی از نقاط مختلف داخل کرت‌ها جمع‌آوری و در یک نمونه مرکب با هم مخلوط شد. نمونه مرکب برای تجزیه به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد پیشوا-ورامین منتقل شد. مشخصات خاک مزرعه، روش و مقدار عناصر اندازه‌گیری شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک مزرعه پژوهشی

مشخصات	نیتروژن کل (%)	پتاسیم (mg.l ⁻¹)	فسفر (mg.l ⁻¹)	هدایت الکتریکی (dSm ⁻¹)	pH	بافت خاک
روش آزمایش	کجلدال	فلیم‌فتمتر	اولسن	کنداکتومتر	pH متر	هیدرومتری
مقدار کمی متغیرها	۱/۱	۴۱۰	۱۰/۴	۳/۶۵	۷/۶۹	لوم رسی

آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تیمار کود نیتروژن در چهار تکرار انجام گرفت. براساس نتایج آزمون خاک، در چهار سطح کود نیتروژن دار (کود اوره) شامل عدم مصرف (شاهد، صفر درصد)، ۵۰ درصد (محدوده بحرانی)، ۱۰۰ درصد (حد کفایت) و مقدار بیش از حد (سمی، ۱۵۰ درصد) اجرا شد [۸]. در اجرای طرح ابتدا مقدار و جهت شیب زمین مشخص شد و پس از آن تکرارها (بلوک‌ها) عمود بر جهت شیب در نظر گرفته شدند. اندازه و شکل کرت‌ها برحسب تعداد و طول ردیف‌های توصیه شده به ابعاد ۷×۲۵/۵ متر (۸ ردیف کاشت به طول ۷ متر) ایجاد شدند [۹]. هر کرت با دو ردیف نکاشت از کرت مجاور با فاصله ۱/۵ متر جدا شد. جای تکرارها به قید قرعه تعیین شد. نقشه اجرای طرح آزمایشی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نقشه اجرای طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تیمار کود در چهار تکرار (شامل بدون مصرف (%۰)، (%۵۰، (%۱۰۰ و (%۱۵۰)

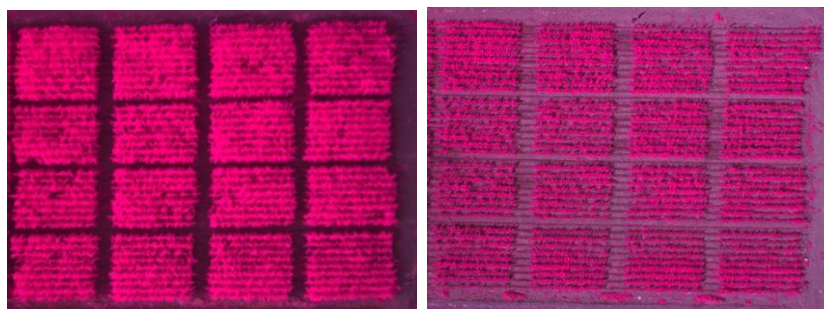
بذر ذرت هیبرید گروه زودرس ۴۵۰ (Gazda MTC) با دستگاه بذرکار در عمق ۵-۸ سانتی‌متری با فاصله ردیف ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها ۱۵ سانتی‌متر کاشته شد. مقدار بذر لازم ۲۸/۸ کیلوگرم با تراکم ۶۷۰۰۰ بوته در هکتار متناسب با سطح آزمایش در کرت‌ها کاشته شد. مزرعه به روش نواری و مطابق مراحل رشد فنولوژیک ذرت آبیاری شد. به منظور تعیین مقدار آب و یکنواختی آبیاری در تکرارها و تیمارها در هر مرحله مقادیر آب با استفاده از پارشال فلوم اندازه‌گیری شد. مقدار کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن) مورد نیاز ذرت برای اقلیم گرم براساس مدل توصیه‌ی کودی پس از برآورد پتانسیل تولید و درصد نیتروژن کل موجود در خاک تعیین و سپس همراه با آب آبیاری در دو مرحله شامل یک‌دوم تیمارها در مرحله هشت‌برگی و یک‌دوم دیگر تیمارها در مرحله ظهور گل‌آذین اعمال شد. نمونه‌برداری‌های زمینی و تصویربرداری چندطیفی هوایی در زمانی که زاویه تابش خورشید متمایل به حالت قائم بود، بین حدود ساعت ۱۱ تا ۱۳ (آسمان صاف و بدون سایه) در دو مرحله رشد شامل مرحله هشت‌برگی و مرحله ظهور گل‌آذین انجام گرفت [۱۷]. نمونه‌برداری‌ها و برداشت تصاویر هوایی با ثبت مراحل فنولوژیک و زمانی که ۵۰ درصد گیاهان در هر کرت علائم موردنظر (شامل زرد شدن نوک برگ‌های پایینی که در امتداد رگبرگ میانی پیش می‌رود، کاهش رشد، کوتاه شدن و زردی بافت‌های گیاهی) را نشان دادند بر مبنای سیستم جدید کدبندی بسط داده‌شده BBCH در مراحل هشت‌برگی [۷۸] و (پدیدار شدن نیمی از گل‌های تاجی) [۷۹] انجام گرفت. در هر مرحله ابتدا تصویربرداری هوایی و سپس نمونه‌برداری زمینی انجام گرفت.

تصویربرداری چندطیفی هوایی از مزرعه با پهپاد در دو مرحله رشد هشت‌برگی و ظهور گل‌آذین در روز آفتابی و بدون ابر از ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح زمین انجام گرفت (شکل ۳). از یک دوربین چندطیفی مدل ADC micro ساخت شرکت Tetracam, Inc. در محدوده طیفی باند سبز (۶۰۰-۵۲۰ نانومتر)، باند قرمز (۶۹۰-۶۳۰ نانومتر) و باند مادون قرمز نزدیک (۹۰۰-۷۶۰ نانومتر)، با حسگر CMOS ۳/۲ مگاپیکسل، تعداد پیکسل‌ها ۲۰۴۸×۱۵۳۶ و فاصله کانونی ۸/۳ میلی‌متر برای تصویربرداری چندطیفی استفاده شد [۹].

پهپاد استفاده‌شده دارای تجهیزاتی از جمله بدنه، موتورهای DC، کنترل‌گرهای سرعت و بازوها، باتری لیتیوم-پلیمری (3300mAh- 11.1 V, Shanghai Danlions International Co.), پایه قابل تنظیم دوربین، رادیوکنترل و سامانه خلبان خودکار (NAZA MV2) بود [۱۰]. نوع فایل برای ذخیره DCM در نظر گرفته شد و دوربین روی وضعیت خودکار با فاصله زمانی ۵ ثانیه در تصویربرداری تنظیم شد. نمونه‌ای از تصاویر چندطیفی هوایی برداشت‌شده در دو مرحله رشد در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویربرداری چندطیفی هوایی از مزرعه با پهپاد



ب

الف

شکل ۴. تصویربرداری چندطیفی هوایی از مزرعه ذرت با پهپاد در مراحل رشد الف: هشت‌برگی و ب: ظهور گل‌آذین نر

تصاویر چندطیفی هوایی بعد از برداشت و استخراج تصاویر از کارت حافظه دوربین، با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI 5.4 و PixelWrench2 پیش‌پردازش و پردازش شدند. تصحیح رادیومتری با استفاده از صفحه کالیبراسیون تفلون سفید انجام گرفت. عملیات پیش‌پردازش تصاویر شامل تغییر فرمت تصاویر از DCM به TIFF، ایجاد تصاویر رنگی کاذب مادون قرمز-قرمز-سبز از تصاویر خام سیاه-سفید، تصحیح رادیومتری تصاویر، برش تصاویر و جداسازی شیء از زمینه بود. شاخص‌های پوشش گیاهی متشکل از باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز و سبز مانند NDVI، NRI، MTVI2، CI، GM که با سبزیگی گیاه، مقدار کلروفیل و نیتروژن آن مرتبط بودند، محاسبه شدند. اطلاعات شاخص‌های محاسبه‌شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. شاخص‌های پوشش گیاهی بررسی شده برای تشخیص مقدار کلروفیل و نیتروژن

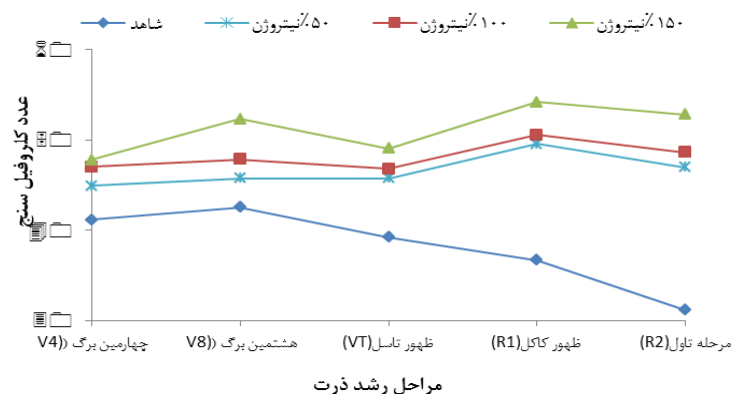
منبع	نام کامل شاخص	رابطه ریاضی	شاخص	ردیف
[۲۳]	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	NDVI	۱
[۱۵]	Nitrogen Reflectance Index	$\frac{G - R}{G + R}$	NRI	۲
[۲۴]	Modified Triangular Vegetation Index2	$\frac{1.5 \times [1.2(NIR - G) - 2.5(R - G)]}{\sqrt{-0.5 + (2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{R})}}$	MTVI2	۳
[۲۷]	Chlorophyll Index	$\left(\frac{NIR}{G}\right) - 1$	CI _{green}	۴
[۱۶]	Green Model	$(NIR - G) - 1$	GM	۵

برای نمونه برداری زمینی، ۱۰ بوته ذرت از هر کرت به صورت تصادفی انتخاب شده و بوته‌ها از نزدیک سطح زمین بریده شدند. ابتدا برگ‌ها از غبار پاک شدند و پس از کالیبراسیون دستگاه برای تمام برگ‌های هر بوته (غیر از برگ‌های ابتدایی و انتهایی بوته)، شاخص کلروفیل برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل سنج 502 (Minolta Corp., Osaka, Japan) از هر برگ از ناحیه وسط برگ در حد فاصل رگبرگ اصلی و حاشیه برگ اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور ثبت تغییرات سبزینگی گیاه ذرت در طول دوره رشد در تیمارهای مختلف کود نیتروژن، علاوه بر مرحله هشت‌برگی و ظهور گل‌آذین نر، در مراحل رشد چهاربرگی، ظهور کاکل و تاویل نیز کلروفیل برگ‌ها اندازه‌گیری شد.

برای تعیین مقدار نیتروژن نمونه‌ها از روش کج‌دال استفاده شد. ابتدا برگ‌ها از ساقه‌ها جدا و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. سپس نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم وزن و از الک با مش‌های ۱ میلی‌متر عبور داده شدند. نمونه‌های پودر شده در پلاستیک قرار داده شده و برای تعیین مقدار نیتروژن به آزمایشگاه تجزیه گیاه ارسال شدند [۱۳]. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از بررسی روابط متغیرهای شاخص‌های تنش غلظت نیتروژن با کلروفیل در برگ از طریق برازش مدل‌های رگرسیون انجام گرفت. همچنین مدل‌های برآورد مقدار نیتروژن و تنش کود براساس شاخص‌های پوشش گیاهی تحت مطالعه از طریق مدل‌های رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار SPSS24 استخراج شدند. با مقایسه ضریب تبیین (R^2) در شاخص‌های پوشش گیاهی تحت مطالعه، بهترین مدل برای تشخیص تنش نیتروژن در هر مرحله از رشد معرفی شد.

نتایج و بحث

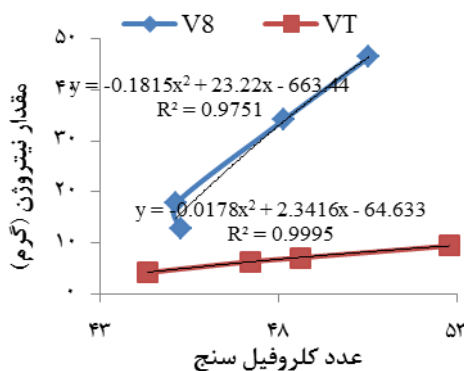
تغییرات سبزینگی گیاه ذرت در طول دوره رشد در تیمارهای مختلف کود نیتروژن میانگین تغییرات عددی کلروفیل سنج گیاه ذرت در هر یک از تیمارهای کود نیتروژن در مراحل مختلف رشد در شکل ۵ نشان داده شده است. از آنجا که براساس نیتروژن موجود در خاک (جدول ۱)، از ابتدای رشد ذرت تا مرحله هشت‌برگی، کود نیتروژن در مزرعه توزیع نشد، در همه تیمارها گیاه تا مرحله هشت‌برگی از مقدار نیتروژن موجود در خاک استفاده کرده است. بنابراین، مقدار کلروفیل تیمارها تقریباً مشابه تیمار شاهد بوده و مقادیر آنها بسیار به هم نزدیک است. در مرحله رشد هشت‌برگی، با اعمال اولین مرحله کوددهی، مقدار سبزینگی گیاه نسبت به مرحله قبلی افزایش یافت. همچنین تیمارهایی که مقدار ۱۵۰ درصد مورد نیاز کود دریافت کردند، نسبت به تیمارهایی که ۱۰۰ و ۵۰ درصد کود دریافت کردند، عدد کلروفیل بیشتری داشتند. در مرحله ظهور گل‌آذین نر با اینکه گیاه یک مرحله دیگر کود دریافت کرد، عدد کلروفیل کاهش یافت. با توجه به اینکه در این مرحله از رشد مقدار کود دریافتی به‌جای رشد رویشی و جذب در برگ‌ها صرف تشکیل ظهور گل‌آذین نر شد، سبزینگی برگ‌ها کاهش یافت و کلروفیل سنج عدد کمتری را نشان داد. در مرحله ظهور کاکل به غیر از تیمار شاهد اعداد کلروفیل سنج دوباره افزایش یافت. در نهایت با شروع مرحله زایشی و تشکیل بلال همراه با انتقال مواد از بخش‌های دیگر برای پر شدن دانه (انتقال از منبع به مخزن) و نیز پیر شدن برگ‌ها، سبزینگی برگ‌ها روند کاهشی داشت [۲۲]. این نتایج با یافته‌های شیور و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد [۲۶].



شکل ۵. تغییرات عدد کلروفیل سنج برگ ذرت در مراحل مختلف رشد (نگارندگان، ۱۳۹۹)

رابطه مقدار کلروفیل و نیتروژن گیاه در مراحل مختلف رشد

رابطه بین مقدار کلروفیل و نیتروژن برگ نمونه‌ها (۳۰ نمونه از هر کرت) در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس شکل، در مراحل رشد V8 و VT با افزایش مقدار کود نیتروژن توزیع شده، کلروفیل نمونه‌ها بیشتر شد، زیرا با افزایش کود دریافتی (تا حد بهینه)، سبزینگی گیاه و در نتیجه کلروفیل برگ‌ها افزایش یافت. همبستگی داده‌های کلروفیل و نیتروژن در مرحله V8 برابر با $R^2=0/97$ و در مرحله VT، $R^2=0/99$ به دست آمد.



شکل ۶. رابطه مقدار کلروفیل و نیتروژن گیاه ذرت

همبستگی شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار نیتروژن گیاه ذرت

انواع مدل‌های رگرسیون خطی، لگاریتمی، توانی، درجه دو و نمایی برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه براساس شاخص‌های پوشش گیاهی در دو مرحله رشد V8 و VT در جدول ۳ ارائه شده است. براساس جدول، در مرحله رشد هشت‌برگی، معادله رگرسیون درجه دو با ضریب تبیین $0/77$ ، $0/67$ ، $0/86$ و $0/88$ به ترتیب برای شاخص‌های NDVI، NRI، MTVI2 و CI دارای بیشترین همبستگی برای برآورد درصد نیتروژن در بین دیگر مدل‌های رگرسیونی بود. همچنین برای شاخص GM معادله توانی با ضریب تبیین $0/80$ بیشترین همبستگی را برای برآورد درصد نیتروژن داشت. در مرحله رشد VT برای شاخص‌های NDVI، CI، GM معادله رگرسیونی درجه دو با ضریب تبیین به ترتیب $0/84$ ، $0/75$ و $0/77$ دارای بیشترین همبستگی برای برآورد درصد نیتروژن بود. همچنین برای شاخص NRI و MTVI2 هر دو معادله توانی و لگاریتمی با ضریب تبیین $0/90$ و $0/75$ بیشترین همبستگی را برای برآورد درصد نیتروژن داشتند. باقری و

تشخیص تنش نیتروژن اضافی گیاه ذرت و مخاطرات آن با استفاده از تصویربرداری چندطیفی ... ۱۷۳

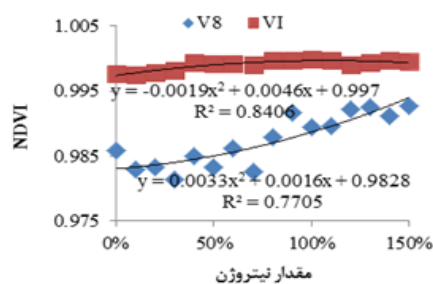
همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که MTVI2 شاخص مناسبی برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت است [۱۴].

جدول ۳. مدل‌های رگرسیونی برآورد مقدار نیتروژن گیاه براساس شاخص‌های پوشش گیاهی در دو مرحله رشد V8 و VT.

		VT		V8	
نوع	R ²	NDVI	R ²	NDVI	
خطی	0.61	$N = 0.0001(NDVI) + 0.9979$	0.74	$*N = 0.0007(NDVI) + 0.9812$	
لگاریتمی	0.75	$N = 0.0009\ln(NDVI) + 0.9974$	0.50	$N = 0.0036\ln(NDVI) + 0.9804$	
درجه دو	0.84	$N = -2E-05(NDVI)^2 + 0.0005(NDVI) + 0.997$	0.77	$N = 3E-05(NDVI)^2 + 0.0002(NDVI) + 0.9828$	
توانی	0.75	$N = 0.9974(NDVI)^{0.0009}$	0.50	$N = 0.9804(NDVI)^{0.0037}$	
نمایی	0.61	$N = 0.9979e^{0.0001(NDVI)}$	0.74	$N = 0.9812e^{0.0007(NDVI)}$	
نوع	R ²	NRI	R ²	NRI	
خطی	0.78	$N = 0.0001(NRI) + 0.9969$	0.65	$N = 0.0016(NRI) + 0.9612$	
لگاریتمی	0.90	$N = 0.0009\ln(NRI) + 0.9964$	0.48	$N = 0.008\ln(NRI) + 0.9591$	
درجه دو	0.86	$N = -1E-05(NRI)^2 + 0.0003(NRI) + 0.9964$	0.67	$N = 6E-05(NRI)^2 + 0.0005(NRI) + 0.9645$	
توانی	0.90	$N = 0.9964(NRI)^{0.0009}$	0.48	$N = 0.9592(NRI)^{0.0082}$	
نمایی	0.78	$N = 0.9969e^{0.0001(NRI)}$	0.65	$N = 0.9613e^{0.0016(NRI)}$	
نوع	R ²	MTVI2	R ²	MTVI2	
خطی	0.59	$N = 0.0005(MTVI2) + 1.3242$	0.81	$N = 0.0014(MTVI2) + 1.3178$	
لگاریتمی	0.75	$N = 0.0035\ln(MTVI2) + 1.3219$	0.80	$N = 0.0082\ln(MTVI2) + 1.3137$	
درجه دو	0.64	$N = -3E-05(MTVI2)^2 + 0.0011(MTVI2) + 1.3225$	0.86	$N = -8E-05(MTVI2)^2 + 0.0028(MTVI2) + 1.3135$	
توانی	0.75	$N = 1.3219(MTVI2)^{0.0026}$	0.80	$N = 1.3138(MTVI2)^{0.0062}$	
نمایی	0.59	$N = 1.3242e^{0.0004(MTVI2)}$	0.81	$N = 1.3178e^{0.001(MTVI2)}$	
نوع	R ²	CI	R ²	CI	
خطی	0.67	$N = 0.0068(CI) + 1.2189$	0.85	$N = 0.0035(CI) + 1.2193$	
لگاریتمی	0.72	$N = 0.0405\ln(CI) + 1.1981$	0.84	$N = 0.0209\ln(CI) + 1.2088$	
درجه دو	0.75	$N = -0.0006(CI)^2 + 0.0166(CI) + 1.1912$	0.88	$N = -0.0002(CI)^2 + 0.0062(CI) + 1.2112$	
توانی	0.73	$N = 1.1991(CI)^{0.0321}$	0.84	$N = 1.2091(CI)^{0.0168}$	
نمایی	0.67	$N = 1.2192e^{0.0054(CI)}$	0.84	$N = 1.2195e^{0.0028(CI)}$	
نوع	R ²	GM	R ²	GM	
خطی	0.75	$N = 0.708(GM) + 107.97$	0.63	$N = 0.3306(GM) + 80.862$	
لگاریتمی	0.69	$N = 4.1051\ln(GM) + 106.12$	0.79	$N = 2.2363\ln(GM) + 79.385$	
درجه دو	0.77	$N = -0.0269(GM)^2 + 1.1662(GM) + 106.59$	0.75	$N = -0.0348(GM)^2 + 0.922(GM) + 79.088$	
توانی	0.69	$N = 106.28(GM)^{0.0362}$	0.80	$N = 79.416(GM)^{0.0271}$	
نمایی	0.75	$N = 108.04e^{0.0062(GM)}$	0.63	$N = 80.859e^{0.004(GM)}$	

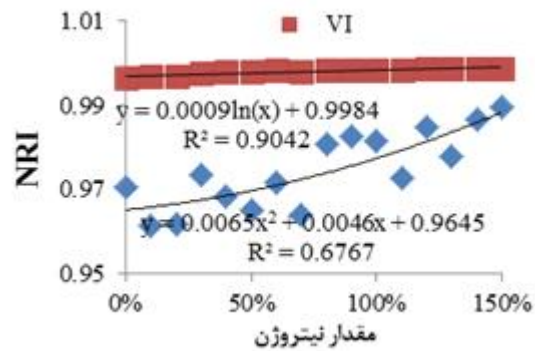
* رابطه ریاضی مدل رگرسیون برآورد مقدار نیتروژن براساس شاخص‌های پوشش گیاهی

در شکل‌های ۷ تا ۱۱، نمودار معادله‌های رگرسیونی با بیشترین ضریب تبیین برای هر یک از شاخص‌ها در هر دو مرحله رشد V8 و VT نشان داده شده است. براساس نتایج، در مرحله رشد V8، شاخص‌های CI، MTVI2، و GM با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۶، و ۰/۸۰ مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تشخیص تنش نیتروژن در گیاه ذرت بودند. شاخص‌های NDVI و NRI با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۶۷، در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. شاخص‌های CI، MTVI2، و GM همگی از باندهای مادون قرمز نزدیک و سبز برای تشخیص تنش استفاده می‌کنند که هر دو باند با سبزیگی گیاه و مقدار نیتروژن آن در ارتباط است. در پژوهش باقری و همکاران (۲۰۱۳) شاخص MTVI2 با ضریب همبستگی ۰/۸۷ به عنوان شاخص مناسب برای برآورد مقدار نیتروژن در گیاه ذرت معرفی شد. این شاخص نوع اصلاح‌شده شاخص مثلث گیاه^۱ است که براساس پژوهش‌های متعدد انجام‌گرفته با رنگ گیاه و کلروفیل آن همبستگی قوی نشان داده است. شاخص NDVI به علت اینکه متأثر از بازتابندگی خاک است، در مرحله رشد هشت‌برگی به علت ضعیف بودن پوشش گیاهی و تأثیر بازتاب خاک بر تصویر، همبستگی کمتری نسبت به شاخص‌های دیگر داشته است [۱۲]. در مرحله رشد VT، شاخص‌های NRI، NDVI و GM با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۹۰، ۰/۸۴، و ۰/۷۷ در رتبه‌های اول تا سوم قرار دارند. با توجه به اینکه در این مرحله از رشد، پوشش گیاهی به علت دریافت یک مرتبه کود بیشتر، افزایش رشد داشت و سطح مزرعه را فراگرفت و از طرفی سبزیگی آن افزایش و اثر خاک کاهش داشت، چنین نتیجه‌ای به دست آمد. شیور و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که شاخص NDVI با ضریب تبیین ۰/۸۹، قادر به برآورد مقدار نیتروژن محصول ذرت بود [۲۶]. به‌طور کلی براساس نتایج می‌توان گفت شاخص CI در مرحله رشد هشت‌برگی و شاخص NRI در مرحله رشد ظهور گل آذین نر مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تشخیص تنش نیتروژن به دست آمدند.

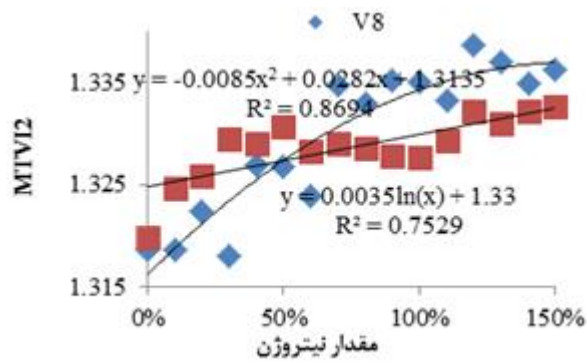


شکل ۷. برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مراحل رشد V8 و VT با شاخص NDVI

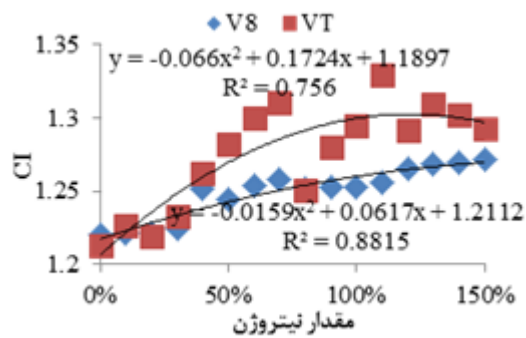
1. Triangular Vegetation Index



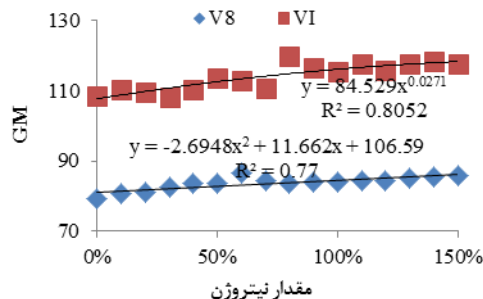
شکل ۸. برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مراحل رشد V8 و VT با شاخص NRI



شکل ۹. برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مراحل رشد V8 و VT با شاخص MTVI2



شکل ۱۰. برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مراحل رشد V8 و VT با شاخص CI



شکل ۱۱. برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مراحل رشد V8 و VT با شاخص GM

نتیجه‌گیری

با توجه به ضرورت کاهش مخاطرات ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژن‌دار و قابلیت فناوری سنجش از دور هوایی به‌عنوان روشی نوین، سریع، و غیرمخرب برای تشخیص تغییرپذیری‌ها، این پژوهش به‌منظور تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت به‌عنوان راهکاری برای تعیین نیاز کودی گیاه انجام گرفت. نتایج کلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- مقدار کلروفیل و نیتروژن گیاه با افزایش مقدار کود نیتروژن اعمال‌شده در هر دو مرحله رشد افزایش یافت. گیاهانی که تحت تنش نیتروژن قرار گرفتند، مقدار نیتروژن و کلروفیل کمتر نسبت به گیاهان غیر تنش‌دیده دارند.

- در مرحله رشد هشت‌برگی، معادله رگرسیون درجه دو با ضریب تبیین ۰/۷۷، ۰/۶۷، ۰/۸۶ و ۰/۸۸ به‌ترتیب برای شاخص‌های NDVI، NRI، MTVI2، CI و دارای بیشترین همبستگی برای برآورد درصد نیتروژن در بین دیگر مدل‌های رگرسیونی بود. همچنین برای شاخص GM معادله توانی بیشترین همبستگی را برای برآورد درصد نیتروژن داشت.

- در مرحله ظهور گل‌آذین نر برای شاخص‌های NDVI، CI و GM معادله رگرسیونی درجه دو با ضریب تبیین به‌ترتیب ۰/۸۴، ۰/۷۵ و ۰/۷۷ دارای بیشترین همبستگی برای برآورد درصد نیتروژن بود. همچنین برای شاخص NRI و MTVI2 هر دو معادله توانی و لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۹۰ و ۰/۷۵ بیشترین همبستگی را برای برآورد درصد نیتروژن نشان دادند.

- براساس نتایج، در مرحله رشد هشت‌برگی، شاخص‌های CI، MTVI2، و GM با ضریب همبستگی به‌ترتیب ۰/۸۸، ۰/۸۶، و ۰/۸۰ مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت بودند.

- با توجه به نتایج به دست آمده روش سنجش از دور چندطیفی هوایی قابلیت کافی را برای تشخیص تغییرپذیری و تنش در کود نیتروژن دار گیاه ذرت در منطقه و شرایط تحت بررسی دارد.

سپاسگزاری

این مقاله از رساله دکتری تخصصی مصوب دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا استخراج شده است. نویسندگان مقاله مراتب قدردانی را از آقای دکتر فرشاد قوشچی مدیر محترم گروه و همچنین استادان محترم گروه زراعت تحصیلات تکمیلی دارند. از مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی بابت تأمین تجهیزات تصویربرداری هوایی و راهنمایی‌های علمی و فنی تشکر می‌شود. همچنین از آقایان مهندس ذاکری (مسئول محترم آزمایشگاه دانشگاه، مهندس تاجیک و مهندس حمیدرضا ابراهیمی برای همکاری در این پژوهش و به ویژه از آقای مهندس محمد حاجیان برای تأمین زمین زراعی و ارائه تجارب ارزنده صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- [۱]. باقری، نیکروز؛ و کفاشان، جلال (۱۳۹۶). «گزارش علمی- فنی، کشاورزی دقیق (مزایا، چالش‌ها و فرصت‌ها)»، کرج: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
- [۲]. باقری، نیکروز (۱۳۹۰). «طراحی و توسعه سیستم پایش نرخ متغیر کود نیتروژن مایع با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای»، رساله دکتری گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- [۳]. حسینی، رقیه‌سادات؛ گاشی، سراله؛ سلطانی، افشین؛ کلاته، مهدی؛ و زاهد، محبوبه (۱۳۹۲). «اثر کود نیتروژن بر شاخص‌های کارایی مصرف نیتروژن در ارقام گندم»، نشریه پژوهش‌های زراعی/ایران، جلد ۱۱، ش ۲، ص ۳۰۶-۳۰۰.
- [۴]. طباطبایی کلور، سیدرضا (۱۳۹۵). کشاورزی دقیق، نوروزی.
- [۵]. کوچکی، علیرضا؛ زند، اسکندر؛ و مهدوی دامغانی، عبدالمجید (۱۳۹۲). تولید پایدار محصولات زراعی (زراعت عمومی)، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- [۶]. ملکوتی، محمدجعفر (۱۳۹۴). توصیه بهینه مصرف کود برای محصولات کشاورزی در ایران، چ سوم، مبلغان.
- [۷]. مقیمی، ابراهیم (۱۳۹۴). دانش مخاطرات، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [۸]. هاشمی‌مجد، کاظم (۱۳۹۳). مقدمه‌ای بر مدیریت عناصر غذایی، حاصلخیزی خاک و کودها، ویرایش هفتم، آبیژ.
- [۹]. یزدی صمدی، بهمن؛ رضائی، عبدالمجید؛ و ولی‌زاده؛ مصطفی (۱۳۷۷). طرح‌های آماری در پژوهش‌های کشاورزی، چ دوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [10]. Bagheri, N. (2016). "Development of a high-resolution aerial remote sensing system for precision agriculture", *International Journal of Remote Sensing*, 38(8), pp: 2053-2065.
- [11]. Bagheri, N.; & Bordbar. M. (2014). "Solutions for fast development of precision agriculture in Iran", *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 16(3), pp: 119-123.
- [12]. Bagheri, N.; Ahmadi, H.; Alavipanah, S.K.; & Omid, M. (2013). "Multispectral remote sensing for site-specific nitrogen fertilizer management", *Brazilian Journal of Agricultural Research*, 48(10), pp: 1394-1401.
- [13]. Bagheri, N.; Ahmadi, H.; Alavipanah, S.K.; & Omid, M. (2012). "Soil-line vegetation indices for maize nitrogen content prediction", *International Agrophysics*, 26(2), pp: 103-108.

- [14]. Bajwa, S.G. (2006). "Modeling rice plant nitrogen effect on canopy reflectance with partial least square regression (PLSR)", *The Information & Electrical Technologies Division of ASABE*.
- [15]. Corti, M.; Cavalli, D.; Cabassi, G.; Vigoni, A.; Degano, L.; & Gallina, P.M. (2019). "Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables", *Precision Agriculture*, 20(1), pp: 1-22.
- [16]. Devadas, R.; Lamb, D.W.; Simpfendorfer, S.; & Backhouse, D. (2009). "Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves", *Precision Agriculture*, 10, pp: 459-470.
- [17]. Gianquinto, G.; Orsini, F.; Fecondini, M.; Mezzetti, M.; Sambo, P.; & Bona, S. (2011). "A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield", *European Journal of Agronomy*, 35 (2011), pp: 135-143.
- [18]. Gitelson, A.A.; Merzlyak, M.N.; & Chivkunova, O.B. (2001). "Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves", *Photochemistry and Photobiology*, 74, pp: 38-45.
- [19]. Krienke, B.; Ferguson, R.B.; Schlemmer, M.; Holland, K.; Marx, D.; & Eskridge, K. (2017). "Using an unmanned aerial vehicle to evaluate nitrogen variability and height effect with an active crop canopy sensor", *Precision Agriculture*, 18(6), pp: 900-915.
- [20]. Li, Y.; Chen, D.; Walker, C.N.; & Angus, J. F. (2010). "Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera", *Field Crops Research*, 118(3), pp: 221-227.
- [21]. Lin, F. F.; Qiu, L.F.; Deng, J.S.; Shi, Y. Y.; Chen, L. S.; & Wang, K. (2010). "Investigation of SPAD Meter-Based Indices for Estimating Rice Nitrogen Status", *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, pp: 60-65.
- [22]. Noh, H.; & Zhang, Q. (2012). "Shadow effect on multi-spectral image for detection of nitrogen deficiency in maize", *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, pp: 52-57.
- [23]. Reum, D.; & Zhang, Q. (2007). "Wavelet based multi-spectral image analysis of maize leaf chlorophyll content", *Journal of Computers and Electronic in agriculture*, 56, pp: 60-71.
- [24]. Rorie, R.L.; Purcell, L. C.; Mozaffari, M.; Karcher, D. E.; King, C. A.; Marsh, M. C.; & Longer, D. E. (2011). "Association of "Greenness" in Maize with Yield and Leaf Nitrogen Concentration", *Agronomy Journal*, 103(2), pp: 529-535.
- [25]. Rouse, J.W.; Hass, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W.; & Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation*, Type III, Final Report; NASA/GSFC: Greenbelt, MD, USA.
- [26]. Shaver, T.M.; Khosla, R.; & Westfall, D.G. (2011). "Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize", *Precision Agriculture*, 12, pp: 892-904.

- [27]. Smith, A. M.; Bourgeois, G.; Teillet, P. M.; Freemantle, J.; & Nadeau, C. (2008). "A comparison of NDVI and NDVI2 for estimating LAI using CHRIS imagery: a case study in wheat", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(6), pp: 539-548.
- [28]. Stafford, J. V. (2000). "Implementing precision agriculture in the 21st century", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76, pp: 267-275.
- [29]. Wang, H.; Krogh Mortense, A.; Mao, P.; Boelt, B.; & Gislunm, R. (2019). "Estimating the nitrogen nutrition index in grass seed crops using a UAV-mounted multispectral camera", *International Journal Remote Sensing*. doi.org/10.1080/01431161.2019.1569783.
- [30]. Warren, G., Metternicht, G. (2005). Agricultural applications of high-resolution digital multispectral imagery: Evaluating within-field spatial variability of canola (*Brassica napus*) in Western Australia, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, pp: 595-602.
- [31]. Xie, Q.; Dash, J.; Huang, W.; Peng, D.; Qin, Q.; Mortimer, H.; Casa, R.; Pignatti, S.; Laneve, G.; Pascucci, S.; Dong, Y.; & Ye, H. (2018). "Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval", 11(5), pp: 1482-1493.
- [32]. Xue, L., Yang, L. (2008). "Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra", *Biosystems Engineering*, 100, pp: 524-534.
- [33]. Zaman Allah, M.; Vergara, O.; Araus, J.L.; Tarekegne, A.; Magorokosho, C.; Zarco, P.J.; Hornero, A.; Hernandez Alba, A.; & Cairns, J. (2015). "Unmanned aerial platform based multi spectral imaging for field phenotyping of maize", *Plant Methods*, pp: 11-35.
- [34]. Zhao, D.; Reddy, K. R.; Kakani, V. G.; Read, J. J.; & Carter, G. A. (2003). "Maize (*Zea mays* L.) growth, Leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply", *Plant Soil*, 257, pp: 205-217.