



Estimating maize canopy nitrogen content using aerial multispectral remote sensing by unmanned aerial vehicle

Nikrooz Bagheri¹ | Maryam Rahimi Jahangirlou² | Mehryar Jaber Aghdam³

1. Corresponding Author, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: n.bagheri@areeo.ac.ir
2. Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University of Tehran, Pakdasht, Iran. E-mail: m.rahimi@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Agroecology, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Pishva, Iran. E-mail: mahyarjaber@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 19 April 2022

Received in revised form

19 October 2022

Accepted 7 November 2022

Published online

20 September 2023

Keywords:

Multispectral imaging

Nitrogen fertilizer

Precision agriculture

Remote sensing

Unmanned aerial vehicle

ABSTRACT

Objective: In order to present a new, non-destructive, accurate, and fast method for estimating the nitrogen content of corn, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) multispectral sensing technology was used.

Methods: The experiments were performed based on a randomized complete block design in four levels of nitrogen fertilizer (zero, 50, 100, and 150%) in Varamin in 2018. Sampling was carried out in two stages of fertilization (8-leaf Stage and Tasseling Stage). Multispectral aerial imaging and ground sampling was performed one week after each fertilizer application. After processing aerial imagery, vegetation indices were calculated and their correlation with the results of ground sampling was determined.

Results: Based on the results obtained from the correlation coefficients (r) and best subsets regression, among the spectral vegetation indices, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Nitrogen Reflectance Index (NIR), and Modified Triangular Vegetation Index2 (MTVI2) indices in both eight leaf collar (V8) and tasseling (VT) of maize growth stage was identified as the best indicator to estimate the nitrogen content of forage maize. At VT, a positive and significant relationship was obtained between NDVI ($R^2= 0.86$, $P\leq 0.001$), NRI ($R^2= 0.70$, $P\leq 0.001$) and MTVI2 ($R^2= 0.46$, $P\leq 0.01$) indices with maize nitrogen content.

Conclusion: It can be concluded that UAV multispectral imaging provides acceptable accuracy in determining the nitrogen content of maize. This technology can help farmers to determine the appropriate time of fertilization.

Cite this article: Bagheri, N., Rahimi Jahangirlou, M., & Jaber Aghdam, M. (2023). Estimating maize canopy nitrogen content using aerial multispectral remote sensing by unmanned aerial vehicle. *Journal of Crops Improvement*, 25 (3), 587-602. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.341850.2700>



بر آورد مقدار نیتروژن پوشش گیاهی ذرت علوفه‌ای با استفاده از فناوری سنجش از دور چندطیفی هوایی با پهپاد

نیکروز باقری^۱ | مریم رحیمی جهانگیرلو^۲ | مهریار جابری اقدم^۳

۱. نویسنده مسئول، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: n.bagheri@areeo.ac.ir
۲. دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران. رایانامه: m.rahimi@ut.ac.ir
۳. گروه زراعت و اکولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین - پیشوا، پیشوا، ایران. رایانامه: mrehyarjaberi@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: به منظور ارائه یک روش نوین، غیرمخرب، دقیق و سریع برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت از فناوری سنجش از دور چندطیفی هوایی با پهپاد استفاده شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰	روش پژوهش: آزمایش‌ها به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار سطح کود نیتروژن (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درصد مقدار کود بهینه) در شهرستان ورامین در سال زراعی ۱۳۹۷ اجرا شد. نمونه‌برداری در دو مرحله کوددهی (هشت‌برگی و ظهور گل‌تاجی) انجام شد. تصویربرداری چندطیفی با پهپاد و نمونه‌برداری زمینی، یک هفته پس از هر بار کوددهی انجام شد. پس از پردازش تصاویر، شاخص‌های پوشش گیاهی شامل PSRI، TCARI، MTVI2، MCARI2، NRI، GI، SR، NDVI و REIP محاسبه شدند و همبستگی آن‌ها با نتایج نمونه‌برداری زمینی به دست آمد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷	یافته‌ها: براساس نتایج به دست آمده از بررسی ضرایب همبستگی (r) و رگرسیون (مدل بهترین زیرمجموعه)، بهترین شاخص‌ها برای برآورد مقدار نیتروژن ذرت علوفه‌ای، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، شاخص بازتاب نیتروژن (NIR) و شاخص پوشش گیاهی مثلثی اصلاح شده (MTVI2) در هر دو مرحله رشد هشت‌برگی (V8) و ظهور گل‌تاجی (VT) بودند. در مرحله ظهور گل‌تاجی، رابطه مثبت و معنی‌داری بین شاخص‌های NDVI ($R^2=0/86$ ، $P\leq 0/001$)، NIR ($P\leq 0/001$)، MTVI2 ($R^2=0/70$) و ($P\leq 0/001$) با مقدار نیتروژن ذرت به دست آمد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶	نتیجه‌گیری: براساس یافته‌های به دست آمده، تصویربرداری چندطیفی هوایی با پهپاد دقت قابل قبولی برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت ارائه می‌دهد. این فناوری می‌تواند به کشاورزان برای تعیین زمان مناسب کوددهی کمک کند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹	
کلیدواژه‌ها: پرنده هدایت‌پذیر از دور تصویربرداری چندطیفی سنجش از دور کشاورزی دقیق کود نیتروژن	

استناد: باقری، نیکروز؛ رحیمی جهانگیرلو، مریم؛ و جابری اقدم، مهریار (۱۴۰۲). برآورد مقدار نیتروژن پوشش گیاهی ذرت علوفه‌ای با استفاده از فناوری سنجش از دور چندطیفی هوایی با پهپاد. *به‌زرعی کشاورزی*، ۲۵ (۳)، ۵۸۷-۶۰۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.341850.2700>



۱. مقدمه

امروزه ضرورت امنیت غذایی، بهبود بهره‌وری منابع تولید و حفظ محیط زیست، توسعه کشاورزی دقیق را به یک ضرورت تبدیل کرده است. با به کارگیری این فناوری می‌توان ضمن مصرف بهینه نهاده‌ها، عملکرد محصولات کشاورزی را افزایش داده و توسعه پایدار کشاورزی را رونق بخشید (Bagheri & Bordbar, 2014). یکی از مهم‌ترین نهاده‌های کشاورزی کودهای نیتروژنه هستند. نیتروژن یک ماده مغذی ضروری برای ساخت کلروفیل در فرایند فتوسنتز گیاه و بهبود عملکرد کمی و کیفی است (Wen *et al.*, 2020). کاربرد بهینه نیتروژن کلید اصلی رشد محصول بوده و کمبود آن افزون بر محدود کردن رشد محصول، باعث کاهش عملکرد می‌شود (Guo *et al.*, 2021).

نظارت مداوم بر وضعیت نیتروژن برای ارزیابی سلامت گیاه ضروری است و امکان مدیریت بهینه توزیع نهاده‌ها را در طول فصل رشد فراهم می‌کند (Wen *et al.*, 2020). در فرایند رشد گیاه به علت کمبود نیتروژن خاک، معمولاً از کودهای شیمیایی برای دستیابی به نیتروژن لازم استفاده می‌شود. با وجود تفاوت مقدار نیتروژن مورد نیاز گیاهان در موقعیت‌های مکانی مختلف (Laruffa *et al.*, 2001)، روش مرسوم کوددهی شامل پاشش یکسان کود در سطح مزرعه است که این روش معمولاً منجر به کم‌پاشی یا بیش‌پاشی کود می‌شود. براساس مطالعات انجام شده در کشورهای پیشرفته، ۳۰ درصد از هزینه‌های تولید ذرت مربوط به کود نیتروژن است (Maresma *et al.*, 2016). کم‌پاشی کود نیتروژن موجب کاهش کیفیت و عملکرد محصول شده، و بیش‌پاشی آن، آلودگی آب‌های زیرزمینی و محیط زیست، افزایش آسیب‌پذیری محصول، افزایش خطر سلامتی انسان (Bagheri *et al.*, 2013)، هدر رفتن کود و افزایش هزینه تولید (Maresma *et al.*, 2016) را به همراه دارد.

امروزه دقیق‌ترین روش تعیین مقدار نیتروژن گیاه، روش نمونه برداری دستی از گیاه و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه‌ها است که این روش مخرب، زمان‌بر، هزینه‌بر و پرزحمت است (Zillmann *et al.*, 2006) و استفاده از آن اجرای کشاورزی هوشمند متکی بر پایش برخط را غیرممکن می‌کند (Liang *et al.*, 2018). استفاده از دستگاه کلروفیل سنج نیز یک روش رایج برای تعیین نیاز کود نیتروژن است (Lin *et al.*, 2010). با این حال، اندازه‌گیری‌ها در این روش نقطه‌ای است و عدد به دست آمده نمی‌تواند نشان‌دهنده مقدار کلروفیل سایر برگ‌ها یا بوته‌ها باشد. همچنین، براساس پژوهش‌های پیشین از جمله پژوهش Hawkins *et al.* (2007)، همبستگی بین مقدار داده‌های کلروفیل متر با مقدار نیتروژن گیاه ذرت برابر با ۰/۷۶ است. از جمله فناوری‌های غیرمخرب توانمند برای پایش برخط و برآورد مقدار نیتروژن در هر نقطه از مزرعه، فناوری سنجش از دور است (Liu *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019; Wen *et al.*, 2020; Habibullah *et al.*, 2020). توسعه پهپادها در سال‌های اخیر موقعیت جدیدی را برای پایش محصول‌های کشاورزی فراهم کرده است. پهپادها نسبت به سکوها دیگر سنجش از دور مانند ماهواره‌ها و هواپیماها، از انعطاف‌پذیری بیشتری برای اجرای عملیات برخوردارند (Padua *et al.*, 2017). همچنین، تصاویر برداشت شده با پهپاد قدرت تفکیک مکانی و زمانی بیشتری و هزینه کمتری دارد (Gilliot *et al.*, 2020).

۲. پیشینه پژوهش

در چندسال اخیر، پژوهش‌های گوناگونی در زمینه پایش وضعیت نیتروژن گیاه با استفاده از فناوری سنجش از دور هوایی با پهپاد اجرا شده است. Lebourgeois *et al.* (2012) از تصویربرداری هوایی برای پایش وضعیت نیتروژن محصول نیشکر استفاده کردند. از دو دوربین دیجیتالی مرئی و مادون قرمز نزدیک برای برداشت تصویر استفاده شد. شاخص SRPI با $R^2=0/7$ بیش‌ترین همبستگی را با مقدار نیتروژن نشان داد. Li *et al.* (2015) شاخص تعادل نیتروژن (NBI) برنج را با

استفاده از تصاویر مرئی برداشت‌شده با پهپاد اندازه‌گیری کردند. مدل‌های ساخته‌شده براساس دو شاخص DGCI و NBI با ضریب به‌ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۷۱ بیش‌ترین همبستگی را با مقدار نیتروژن گیاه داشتند. Maresma *et al.* (2016) از تصاویر هوایی برداشت‌شده با پهپاد برای پایش وضعیت نیتروژن و پیش‌بینی عملکرد آن استفاده کردند. آن‌ها شاخص WDRVI را به‌عنوان شاخص مناسب برای برآورد عملکرد با دقت ۰/۹۴ معرفی کردند. Krinke *et al.* (2017) از تصاویر برداری هوایی پهپاد برای برآورد تغییرات نیتروژن پوشش گیاهی ذرت، استفاده کردند. آن‌ها همبستگی بین مقادیر واقعی و برآوردشده نیتروژن گیاه را با استفاده از این مدل ۰/۸۵ گزارش کردند. Ballester *et al.* (2017) وضعیت نیتروژن محصول پنبه و پیش‌بینی عملکرد آن را با تصاویر چندطیفی برداشت‌شده با پهپاد ارزیابی کردند. آن‌ها چندین شاخص پوشش گیاهی را در مراحل مختلف رشد محصول ارزیابی کردند. نتایج نشان داد شاخص SCCCI با ضریب همبستگی ۰/۸ مناسب‌ترین شاخص برای پایش نیتروژن است. Liu *et al.* (2018) وضعیت نیتروژن کلزا را با استفاده از تصاویر فراطیفی و چندطیفی هوایی با پهپاد ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تصاویر چندطیفی هوایی پتانسیل خوبی برای برآورد مقدار نیتروژن کلزا دارد. شاخص PRI با دقت ۰/۷۳ شاخص مناسب برای پیش‌بینی نیتروژن به‌دست آمد. Yang *et al.* (2019) مقدار نیتروژن پوشش گیاهی گندم را با استفاده از تصاویر مرئی برداشت‌شده با پهپاد برآورد کردند. دقت مدل‌های به‌دست‌آمده ۹۰ درصد به‌دست آمد. Wen *et al.* (2020) مقدار نیتروژن ذرت را با استفاده از تصاویر فراطیفی برآورد کردند. آن‌ها شاخص جدید OREA را با ضریب همبستگی ۰/۸۱ برای پیش‌بینی غلظت نیتروژن پیشنهاد کردند. GUO *et al.* (2021) به پایش غیرمخرب غلظت نیتروژن گندم زمستانه با استفاده از تصاویر برداری فراطیفی پرداختند و رابطه بین غلظت نیتروژن و پارامترهای طیفی را تحلیل کردند. آن‌ها از مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای مدل‌سازی نیتروژن استفاده کردند. نتایج نشان داد روش ماشین‌بردار پشتیبان با ضریب همبستگی ۰/۸۹، دقت خوبی برای پایش و برآورد غلظت نیتروژن دارد.

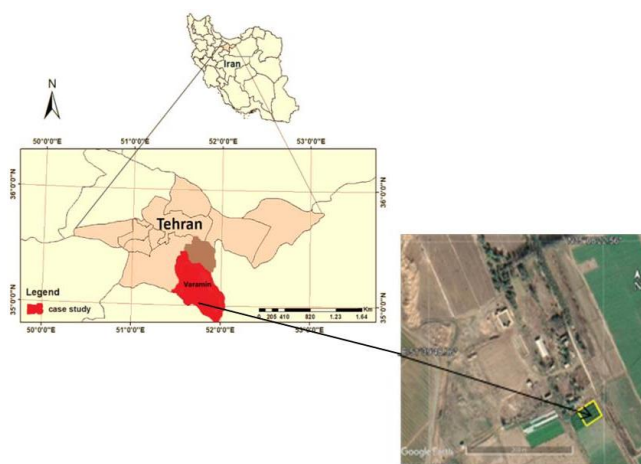
حسینی و همکاران (۱۳۹۸) مقدار نیتروژن و کلروفیل گیاه نیشکر را با استفاده از تصاویر برداری هوایی با پهپاد برآورد کردند. آن‌ها تصاویر برداری را با استفاده از دوربین مرئی در دو ارتفاع پرواز پنج و ۱۰ متری انجام دادند. دقت مدل‌های ارائه‌شده برای برآورد نیتروژن در ارتفاع‌های پرواز پنج و ۱۰ متری به‌ترتیب برابر با ۷۴/۳ و ۷۷/۰ درصد و دقت مدل‌های ارائه‌شده برای برآورد کلروفیل در ارتفاع‌های پرواز پنج و ۱۰ متری به‌ترتیب برابر با ۶۲/۰ و ۶۹/۰ درصد به‌دست آمد. جابری‌اقدم و همکاران (۱۳۹۹) به تشخیص تنش گیاه ذرت با استفاده از تصاویر برداری چندطیفی هوایی با پهپاد پرداختند. آن‌ها چندین شاخص پوشش گیاهی را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که شاخص CI در مرحله رشد هشت‌برگی با $R^2=0/88$ و NRI در مرحله رشد ظهور گل‌تاجی با $R^2=0/90$ مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تشخیص تنش بودند. مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد برآورد خصوصیات شیمیایی محصولات کشاورزی با استفاده از تصاویر برداری هوایی با پهپاد در حال گسترش است. با این‌حال، نیاز به پیشبرد این فناوری و توسعه‌های مدل‌های پایش و برآورد مقدار نیتروژن گیاه برای شرایط کشاورزی بومی کشور وجود دارد. با توجه به اهمیت پایش نیتروژن گیاه و برآورد مقدار آن (برای تعیین نیاز کودی گیاه و مدیریت توزیع کود) و همچنین، قابلیت سنجش از دور به‌عنوان روشی سریع، دقیق و غیرمخرب برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی گیاه، هدف از این پژوهش عبارت‌است از تحلیل رابطه بین مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای با شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی مستخرج از تصاویر چندطیفی هوایی برداشت‌شده با پهپاد، ارزیابی چندشاخص پوشش گیاهی مرتبط با مقدار نیتروژن گیاه برای برآورد مقدار نیتروژن، ارائه مدل‌های ریاضی برای برآورد مقدار نیتروژن براساس شاخص‌ها و پیشنهاد یک مدل دقیق برآورد نیتروژن.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. منطقه مورد مطالعه و روش اجرای طرح

منطقه مورد مطالعه، یک مزرعه ذرت علوفه‌ای پژوهشی در شهرستان ورامین استان تهران با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۸ دقیقه بود (شکل ۱). پیش از کاشت، نمونه‌برداری از خاک انجام شد. پنج نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت و برای تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه منتقل شد. براساس نتایج نمونه‌برداری خاک، خاک مزرعه از نوع لومی- شنی با درجه قلیایی ۷/۷ و دارای ۱/۱ درصد نیتروژن، ۱۰/۴ پی‌پی‌ام فسفر، ۴۱۰ پی‌پی‌ام پتاس بود.

آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تیمار کود نیتروژن و چهار تکرار اجرا شد که در آن فاکتور آزمایشی، کود نیتروژن با چهار سطح صفر درصد (شاهد بدون دریافت کود)، ۵۰ درصد، ۱۰۰ درصد (مقدار کود بهینه برای دستیابی به عملکرد مطلوب گیاه معادل ۱۵۵ کیلوگرم کود اوره در هکتار) و ۱۵۰ درصد تعریف شد. توصیه کودی با توجه به نتایج آزمون خاک و توصیه‌های کارشناسان منطقه صورت گرفت. مختصات گوشه‌های مزرعه و بلوک‌ها با استفاده از دستگاه GPS^۱ برداشت شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه

برای پیاده‌سازی طرح، ابتدا شیب و جهت زمین تعیین و پس از آن چهار بلوک به مساحت یکسان عمود بر جهت شیب ایجاد شد. برای جلوگیری از تداخل رواناب بلوک‌ها با یکدیگر، فاصله هر بلوک از بلوک بعدی ۲/۲۵ متر در نظر گرفته شد. ابعاد زمین ۳۳ متر در ۲۵/۷۵ متر و ابعاد کرت‌ها شش متر در ۳/۷۵ متر بود. عملیات تهیه زمین، شامل تسطیح زمین با لولر^۲، شخم با گاوآهن برگردان‌دار یک‌طرفه و دیسک انجام شد. در نیمه شهریورماه ذرت رقم Gazda MTC 450 با استفاده از بذکار در عمق ۵-۸ سانتی‌متری با فاصله ۷۵ سانتی‌متر بین ردیف و ۱۵ سانتی‌متر روی ردیف کشت شد. این رقم از نوع دندان اسبی، با ۱۶ تا ۱۷ ردیف دانه روی بلال از گروه زودرس، با قدرت جوانه‌زنی اولیه زیاد، عملکرد زیاد، ارتفاع بلند و تراکم ۶۰-۷۰ هزار بوته در هکتار است. مقدار بذر کاشته شده ۲۸/۸ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. مزرعه به روش نواری آبیاری شد. آبیاری مزرعه مطابق مراحل رشد فنولوژیک ذرت انجام شد و در هر مرحله

1. Global Position System
2. Leveler

مقادیر آب با استفاده از پارشال فلوم اندازه‌گیری شد. علف‌های هرز با وجین‌دستی حذف شدند. کود اوره حاوی ۴۶ درصد نیتروژن در دو مرحله شامل یک دوم در مرحله ۸ برگی (V8)^۱ و یک‌دوم در مرحله ظهور گل‌تاجی (VT)^۲ پاشیده شد. تقسیط کود براساس نتیجه‌آزمون‌های خاک تعیین شد.

۲.۳. نمونه‌برداری زمینی

برای نمونه‌برداری زمینی از مناطق خارج از خطوط حاشیة هر تیمار، پنج بوته به‌صورت تصادفی از هر تکرار انتخاب شدند. اندازه‌گیری‌ها در دو مرحله رشد V8 (در تاریخ ۱۰ مهرماه) و VT (در تاریخ ۲۷ آبان‌ماه) صورت گرفت. تمام بوته از بالای سطح زمین بریده شد. مقدار نیتروژن تمام برگ‌های هر بوته از روش هضم تر با استفاده از کج‌لدال^۳ تعیین شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش، ابتدا برگ‌ها از ساقه‌ها جدا و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. سپس نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم وزن و از الک با مش‌های یک میلی‌متر عبور داده شدند. سپس، نمونه‌های پودر شده در پلاستیک قرار گرفت و برای تعیین مقدار نیتروژن به آزمایشگاه ارسال شدند (Bagheri et al., 2013).

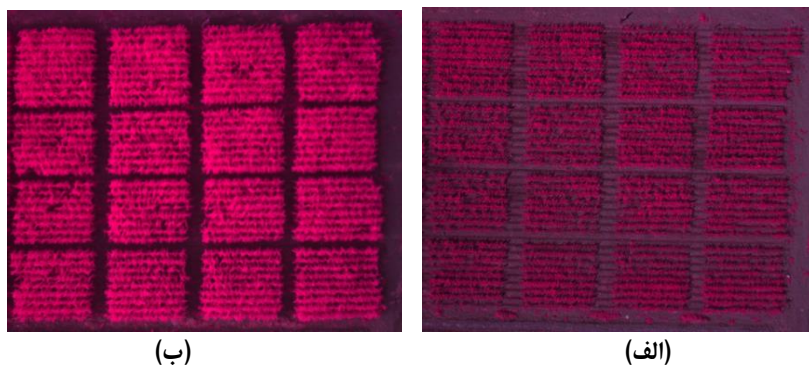
۳.۳. تصویربرداری چندطیفی هوایی

تصویربرداری چندطیفی هوایی از مزرعه با پهپاد در مراحل رشد V8 و VT در روز نمونه‌برداری (و پیش از نمونه‌برداری) بین ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۲:۰۰ در روز آفتابی و بدون ابر از ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح زمین انجام شد. پهپاد مورد استفاده دارای تجهیزاتی از جمله بدنه، موتورهای DC، کنترل‌گرهای سرعت و بازوها، باتری لیتیوم-پلیمری ۳۳۰۰ میلی‌آمپر و ۱۱/۱ ولت، مانت دوربین، رادیوکنترل و سامانه خلبان خودکار NAZA (مدل MV2، ساخت کشور چین) توسعه‌یافته توسط Bagheri (2016) بود. از یک دوربین چندطیفی Tetracam (مدل ADC micro، ساخت شرکت آمریکا) در محدوده طیفی ۵۲۰-۶۰۰، ۶۳۰-۶۹۰ و ۷۶۰-۹۰۰ نانومتر، برای تصویربرداری چندطیفی استفاده شد. برای تصحیح رادیومتری تصاویر، از صفحه کالیبراسیون تفلون سفید مخصوص دوربین تصویربرداری شد. قدرت تفکیک مکانی تصاویر با توجه به مشخصات دوربین و ارتفاع پرواز، ۳۸ میلی‌متر/پیکسل به‌دست آمد.

۴.۳. تجزیه و تحلیل تصاویر چندطیفی هوایی و داده‌های زمینی

تصاویر چندطیفی هوایی بعد از برداشت، با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI (نسخه ۵/۴) و PixelWrench (نسخه ۲) پردازش شدند. پس از تصویربرداری و استخراج تصاویر از کارت حافظه دوربین، فرمت تصاویر از DCM به TIFF تغییر داده شد. سپس تصاویر رنگی کاذب مادون‌قرمز-قرمز-سبز از تصاویر خام سیاه-سفید، تهیه شد. بعد از بزرگنمایی تصاویر و بسط هیستوگرام، داده‌های طیفی استخراج شد. سپس شاخص‌های پوشش گیاهی (جدول ۲) محاسبه شدند. تصاویر چندطیفی هوایی در دو مرحله رشد V8 و VT در شکل (۲) نشان داده شده است. برخی از شاخص‌های پوشش گیاهی متشکل از باندهای مادون‌قرمز نزدیک، قرمز و سبز مرتبط با مقدار نیتروژن گیاه ذرت محاسبه شدند (جدول ۱).

1. 8-leaf Stage
2. Tasseling Stage
3. The standard Kjeldahl method



شکل ۲. تصویر هوایی رنگی کاذب از مزرعه ذرت مورد مطالعه در مراحل رشد V8 (الف) و VT (ب)

۳.۵. تجزیه و تحلیل‌های آماری

برای بررسی اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر مقدار نیتروژن در بافت ذرت و نیز شاخص‌های پوشش گیاهی، تجزیه واریانس صورت گرفت و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. سپس، برای تعیین رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و مقدار نیتروژن گیاه و همچنین تعیین بهترین مجموعه از شاخص‌ها برای پیش‌بینی مقدار نیتروژن گیاه، به ترتیب از ضریب همبستگی پیرسون^۱ (r) و رگرسیون (مدل بهترین زیرمجموعه)^۲ استفاده شد. از رگرسیون مدل بهترین زیرمجموعه، برای مقایسه مدل‌های رگرسیونی متفاوت (که شامل زیرمجموعه‌های پیش‌بینی‌کننده هستند) استفاده شد. بهترین مدل‌های برازش داده شده دارای مقادیر کم خطای استاندارد رگرسیون (S) و آماره Mallows' Cp و مقادیر زیاد ضریب تعیین (R^2) هستند. از این روش زمانی استفاده می‌شود که یک متغیر پاسخ پیوسته و بیش از یک متغیر پیش‌بینی‌کننده پیوسته وجود داشته باشد. در این روش لازم است پیش از انتخاب زیرمجموعه نهایی، مفروضات رگرسیون با استفاده از نمودارهای باقی مانده و سایر اقدامات تشخیصی بررسی شود (Rahimi Jahangirlou et al., 2021). در گام آخر، برای هر یک از شاخص‌های دارای بیش‌ترین همبستگی با مقدار نیتروژن و معرفی شده در بهترین زیرمجموعه، مدل‌های رگرسیونی برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه محاسبه شد. برای اعتبارسنجی مدل‌های به دست آمده، از عدد R^2 و عدد معنی‌داری P استفاده شد (Rahimi Jahangirlou et al., 2022) و بر این اساس بهترین مدل یا مدل‌ها برای برآورد مقدار نیتروژن در هر یک از مراحل رشد V8 و VT با استفاده از نرم‌افزار Excel برازش داده شده و معرفی شدند. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲) و Minitab (نسخه ۱۷) انجام شد.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر متغیرهای بررسی شده

نتایج مقایسه میانگین مقدار نیتروژن در بافت برگ ذرت و نیز مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی در پاسخ به توزیع سطوح کود نیتروژن در جدول (۲) ارائه شده است. مطابق جدول، بین سطوح مختلف کود نیتروژن از نظر متغیر مقدار نیتروژن بافت گیاهی تفاوت معنی‌دار وجود داشت، به طوری که مصرف زیاد نیتروژن (N150%) مقدار نیتروژن بافت گیاهی را در هر دو مرحله V8 (۱/۱۲ درصد ماده خشک) و VT (۱/۱۸ درصد ماده خشک) به بیش‌ترین مقدار افزایش داد ($P < 0.001$).

1. Pearson correlation coefficient
2. Best subset regression
3. Standard error of the regression

اثر معنی‌دار کود نیتروژن بر مقدار نیتروژن بافت گیاهی در پژوهش‌های مختلف گزارش شده‌است (Cao et al., 2019; Rahimi Jahangirlou et al., 2021).

جدول ۱. شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی مورد مطالعه

منبع	رابطه ریاضی	نام شاخص
(Bagheri et al., 2013)	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	NDVI ^۱
(Chen et al., 2007)	$\frac{R}{G}$	SR ^۲
(Zarco-tejada et al., 2005)	$\frac{R}{G - R}$	GI ^۳
(Devadas et al., 2009)	$\frac{G + R}{G - R}$	NRI ^۴
(Bagheri et al., 2013)	$\frac{1.5 \times [2.5(NIR - R) - 1.3(NIR - G)]}{\sqrt{-0.5 + (2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{R})}}$	MCAR12 ^۵
(Ballester et al., 2017)	$\frac{1.5 \times [1.2(NIR - G) - 2.5(R - G)]}{\sqrt{-0.5 + (2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{R})}}$	MTV12
(Elvanidi et al., 2018)	$3 \left[(NIR - R) - 0.2(NIR - G) \times \left(\frac{NIR}{R} \right) \right]$	TCARI ^۶
(Devadas et al., 2009)	$\frac{R - G}{\frac{NIR}{R + NIR}}$	PSRI ^۷
(Mistele & Schmidhalter, 2008)	$700 + 40 \left(\frac{\left(\frac{R + NIR}{2} \right) - (R)}{(NIR - R)} \right)$	REIP ^۸

NIR: باند مادون قرمز نزدیک؛ R: باند قرمز و G: باند سبز است.

جدول ۲. مقایسه میانگین مقدار نیتروژن در بافت گیاهی (درصد) و مقدار شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی در پاسخ به توزیع سطوح مختلف کود نیتروژن بر اساس آزمون خاک در دو مرحله رشد V8 (a) و VT (b) ذرت علوفه‌ای

SRb	SRa	MTV12b	MTV12a	NRIb	NRIa	NDVIb	NDVIa	Nb	Na	سطوح مختلف N (درصد)
۱۳۴/۸۱a	۶۵/۴۹a	۱/۳۲۴۹b	۱/۳۱۹۴c	۰/۹۶۶۷c	۰/۹۶۶۶b	۰/۹۹۸۸c	۰/۹۸۳۳b	۰/۳۹d	۰/۴۲b	N0%
۱۳۲/۴۲a	۷۰/۱۰a	۱/۳۳۹۲ab	۱/۳۲۸۰b	۰/۹۹۸۱b	۰/۹۶۷۲b	۰/۹۹۹۱b	۰/۹۸۴۲b	۰/۶۳c	۰/۵۴b	N50%
۱۳۱/۳۴a	۷۱/۷۲a	۱/۳۳۸۳ab	۱/۳۳۴۰a	۰/۹۹۸۲b	۰/۹۷۹۲a	۰/۹۹۹۷a	۰/۹۸۹۶a	۰/۸۸b	۰/۶۴b	N100%
۱۴۵/۷۲a	۶۶/۳۳a	۱/۳۳۱۹a	۱/۳۳۶۶a	۰/۹۹۸۷a	۰/۹۸۴۶a	۰/۹۹۹۴ab	۰/۹۹۲۱a	۱/۱۲a	۱/۱۸a	N150%
۰/۵۳۰	۰/۴۲۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۰	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	p-value
۳/۶۶	۱/۴۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۷	۰/۰۸	SEM
۱۰/۴۷	۸/۳۷	۰/۲۴	۰/۵۵	۰/۰۸	۰/۹۰	۰/۰۸	۰/۴۱	۱۹/۰۰	۱۶/۵۳	CV(%)
REIPb	REIPa	PSRIb	PSRIa	TCARIb	TCARIa	MCAR12b	MCAR12a	GIb	GIa	سطوح مختلف N (درصد)
۷۲۰/۰۲a	۷۲۰/۳۵a	۰/۴۳۴۶a	۰/۴۴۴۷a	۰/۴۴۴۷a	۰/۴۳۳۳a	۱/۳۳۶۳a	۳۱۶/۷۳a	۶۲/۷۹a	۳۰/۴۳a	N0%
۷۲۰/۰۱a	۷۲۰/۳۲a	۰/۴۳۸۹a	۰/۴۳۵۴a	۰/۴۳۹۱a	۰/۴۳۹۹a	۱/۳۳۹۲a	۳۳۳/۳۳a	۶۲/۵۹a	۳۲/۱۴a	N50%
۷۲۰/۰۲a	۷۲۰/۲۱a	۰/۴۳۵۵a	۰/۴۴۶۶a	۰/۴۳۲۹a	۰/۴۳۵۳a	۱/۳۳۵۵a	۳۱۹/۸۷a	۶۰/۱۴a	۳۳/۶۳a	N100%
۷۲۰/۰۱a	۷۲۰/۳۷a	۰/۴۴۱۶a	۰/۴۴۴۸a	۰/۴۳۱۸a	۰/۴۳۵۴a	۱/۳۳۱۹a	۳۲۲/۹۸a	۶۸/۶۵a	۳۰/۹۲a	N150%
۰/۳۰۷	۰/۳۵۹	۰/۸۶۲	۰/۳۰۱	۰/۵۹۷	۰/۴۰۵	۰/۷۳۹	۰/۵۹۷	۰/۲۸۷	۰/۴۶۸	p-value
۰/۰۰۴	۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۴۴۴	۷۱/۴	۰/۰۰۳	۱/۸۴	۳/۶۶	۰/۷۴	SEM
<۰/۰۰۱	۰/۰۲	۲/۴۶	۲/۰۲	۲۱/۶۷	۱۰/۲۰	۰/۹۸	۲/۳۰	۱۰/۴۷	۹/۳۵	CV(%)

میانگین‌ها با حروف یکسان، بر اساس آزمون توکی، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند. اختصارات: N: نیتروژن، NDVI: شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده، NRI: شاخص بازتاب نیتروژن، MTV12: شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده، SR: شاخص نسبت ساده، GI: شاخص سبزیگی، MCAR12: شاخص نسبت جذب کلروفیل تعدیل شده، TCARI: شاخص جذب و بازتاب کلروفیل تعدیل شده، PSRI: شاخص بازتاب پیری گیاه، REIP: شاخص نقطه عطف لبه قرمز.

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Simple Ration Index
3. Greenness Index
4. Nitrogen Reflectance Index
5. Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index2
6. Transformed Chlorophyll Absorption and Reflectance Index
7. Plant Senescence Reflectance Index
8. Red-Edge Inflection Point

همچنین، مطابق جدول (۲) بین سطوح مختلف کود نیتروژن و مقدار شاخص‌های NDVI، NRI و MTVI2 در هر دو مرحله رشد V8 و VT تفاوت معنی‌دار وجود داشت، درحالی‌که تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف کود نیتروژن و شاخص‌های GI، SR، MCARI1، TCARIA، PSRI و REIP وجود نداشت. به عبارت دیگر، مقادیر عددی به دست آمده با این شاخص‌ها قادر به نشان دادن تفاوت معنی‌دار بین سطوح مختلف کود نیتروژن در آزمایش حاضر نبود. نتایج نشان داد در مقایسه با واحدهای آزمایشی تحت تنش نیتروژن (N0% و N50%)، NDVI در هر دو مرحله رشد V8 (۰/۹۹۲۱ و ۰/۹۸۹۶) و VT (۰/۹۹۹۴ و ۰/۹۹۹۷) به ترتیب در N150% و N100% به صورت معنی‌داری بیش‌تر بود. در مرحله رشد V8، هر دو شاخص MTVI2 (۱/۳۳۶۶ و ۱/۳۳۴۰) و NIR (۰/۹۸۴۶ و ۰/۹۷۹۲) به ترتیب در N150% و N100% بیش‌تر بودند. در مرحله VT، شاخص MTVI2 به طور معنی‌داری در واحدهای آزمایشی دارای نیتروژن (N50%، N100%)، بدون تفاوت معنی‌دار، بیش‌تر بود. همچنین، در مرحله رشد VT بیش‌ترین مقدار NRI (۰/۹۹۸) در بیش‌ترین مقدار مصرف کود (N150%) مشاهده شد. نتایج به دست آمده از این بخش، یافته‌های پژوهش‌های پیشین را مبنی بر حساس بودن برخی از شاخص‌های پوشش گیاهی به مقادیر متفاوت کود نیتروژن، و توانایی این شاخص‌ها را در برآورد مقدار نیتروژن تأیید می‌کند (Caturegli *et al.*, 2016). همچنین، نتایج مشابهی توسط سایر پژوهش‌گران با به کارگیری تصاویر چندطیفی هوایی برداشت شده با پهپاد برای پیش‌بینی مقدار نیتروژن برگ در گندم (Yang *et al.*, 2019)، نیشکر (Shendryk *et al.*, 2020) و ذرت (Xu *et al.*, 2021) گزارش شده است.

۲.۴. رابطه بین مقدار نیتروژن گیاه و شاخص‌های پوشش گیاهی

جدول (۳) ضرایب همبستگی و عدد معنی‌داری مقدار نیتروژن ذرت علوفه‌ای و شاخص‌های پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مطابق جدول، نتایج نشان داد از بین تمام شاخص‌های پوشش گیاهی بررسی شده، همبستگی بین شاخص‌های NDVI ($r=0.77, P\leq 0.01$)، NRI ($r=0.70, P\leq 0.01$) و MTVI2 ($r=0.67, P\leq 0.01$) با نیتروژن گیاه در مرحله رشد V8 معنی‌دار بود.

به طور مشابه، هر سه شاخص NDVI ($r=0.77, P\leq 0.01$)، NRI ($r=0.70, P\leq 0.01$) و MTVI2 ($r=0.66, P\leq 0.01$) در مرحله ظهور گل تاجی همبستگی بیش‌تری را با مقدار نیتروژن گیاه نشان دادند. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک به مقدار نیتروژن برگ گیاه حساس هستند (Yao *et al.*, 2007). بنابراین، شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی در محدوده نور مرئی و مادون قرمز نزدیک باندها را می‌توان برای برآورد نیتروژن استفاده کرد (Zhu *et al.*, 2007). از همین رو، سه شاخص مذکور همبستگی خوبی با مقدار نیتروژن نشان دادند. در جدول (۴) مجموعه‌های مختلفی از یک تا نه متغیر شامل شاخص‌های پوشش گیاهی پیش‌بینی کننده مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای در مرحله V8 به وسیله آماره‌های رگرسیونی، و مدل بهترین زیرمجموعه ارائه و مقایسه شدند.

با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از حداقل شاخص‌های پوشش گیاهی با ضریب تعیین زیاد و خطای استاندارد کم‌تر، مجموعه رگرسیونی شامل شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، NIR و MTVI2 انتخاب شدند. در جدول (۵) مجموعه‌های مختلفی از یک تا نه متغیر شامل شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی پیش‌بینی کننده مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای در مرحله رشد ظهور گل تاجی به وسیله آماره‌های رگرسیونی، مدل بهترین زیرمجموعه ارائه و مقایسه شدند. به طور مشابه شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، NIR و MTVI2 نیز در مرحله رشد ظهور گل تاجی انتخاب شدند. این نتایج با نتایج به دست آمده از محاسبه ضرایب همبستگی مطابقت داشت. از این رو، می‌توان اذعان کرد براساس آماره‌های به دست آمده از بررسی ضرایب همبستگی و رگرسیون (مدل بهترین زیرمجموعه)، شاخص‌های NDVI، NIR و MTVI2 در هر دو مرحله رشد، بهترین شاخص‌ها برای

برآورد مقدار نیتروژن در گیاه ذرت علوفه‌ای بودند. از این‌رو، ارتباط بین هر یک از این شاخص‌ها با مقدار نیتروژن گیاه در هر مرحله از طریق معادلات رگرسیونی بررسی شد که نتایج آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. ضرایب همبستگی پیرسون (r)، فاصله اطمینان (CI) ۹۵ درصد و عدد معنی‌داری (P-Value) بین مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای و شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی در دو مرحله رشد V8 و VT

P-Value	CI 95%	r	متغیرهای گروه دو	متغیرهای گروه یک
۰/۰۰۰	(۰/۴۶۱، ۰/۹۱۹)	۰/۷۷۹	Na	NDVIa
۰/۶۴۵	(-۰/۵۸۴، ۰/۳۹۵)	-۰/۱۲۵	Na	SRa
۰/۵۸۶	(-۰/۵۹۹، ۰/۳۷۶)	-۰/۱۴۸	Na	GIa
۰/۰۰۲	(۰/۳۲۹، ۰/۸۹۲)	۰/۷۰۹	Na	NR1a
۰/۱۸۱	(-۰/۱۷۴، ۰/۷۳۲)	۰/۳۵۲	Na	MCAR1a
۰/۰۰۴	(۰/۲۷۳، ۰/۸۷۸)	۰/۶۷۷	Na	MTVI2a
۰/۸۸۴	(-۰/۵۲۵، ۰/۴۶۵)	-۰/۰۴۰	Na	TCAR1a
۰/۷۴۸	(-۰/۴۲۷، ۰/۵۵۹)	۰/۰۸۷	Na	PSR1a
۰/۲۲۱	(-۰/۲۰۵، ۰/۷۰۶)	۰/۳۲۴	Na	REIPa
۰/۰۰۰	(۰/۴۴۶، ۰/۹۱۷)	۰/۷۷۱	Nb	NDVIb
۰/۴۵۹	(-۰/۳۲۹، ۰/۶۳۲)	۰/۱۹۹	Nb	SRb
۰/۳۰۴	(-۰/۲۵۶، ۰/۶۷۸)	۰/۲۷۴	Nb	GIb
۰/۰۰۰	(۰/۶۸۰، ۰/۹۵۸)	۰/۸۷۹	Nb	NR1b
۰/۸۹۵	(-۰/۵۲۲، ۰/۴۶۸)	-۰/۰۳۶	Nb	MCAR1b
۰/۰۰۵	(۰/۲۵۶، ۰/۸۷۴)	۰/۶۶۷	Nb	MTVI2b
۰/۵۲۰	(-۰/۶۱۶، ۰/۳۵۲)	-۰/۱۷۴	Nb	TCAR1b
۰/۲۰۱	(-۰/۷۱۴، ۰/۱۹۰)	-۰/۳۳۸	Nb	PSR1b
۰/۷۲۸	(-۰/۵۶۴، ۰/۴۲۱)	-۰/۰۹۵	Nb	REIPb

اختصارات: N: مقدار نیتروژن گیاه، a: مرحله رشد V8 و b: VT، NDVI: شاخص تقاضا پوشش گیاهی نرمال شده، NRI: شاخص بازتاب نیتروژن، MTVI2: شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده ۲، SR: شاخص نسبت ساده، GI: شاخص سبزیگی، MCAR1: شاخص نسبت جذب کلروفیل تعدیل شده ۲، TCAR1: شاخص جذب و بازتاب کلروفیل تعدیل شده، PSRI: شاخص بازتاب پیری گیاه، REIP: شاخص نقطه عطف لبه قرمز.

جدول ۴. رگرسیون، مدل بهترین زیرمجموعه و ضرایب تعیین (R^2)، آماره Mallows Cp و خطای استاندارد رگرسیون (S) توصیف‌کننده بهترین مجموعه از شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی پیش‌بینی‌کننده مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای در مرحله V8

REIP	PSRI	TCAR1	MTVI2	MCAR1	NRI	GI	SR	NDVI	S	Mallows Cp	R^2	تعداد متغیرها
								X	-۰/۲۱	۱۷/۴	۶۰/۶	۱
					X				-۰/۲۳	۲۵/۱	۵۰/۳	۱
X								X	-۰/۱۶	۶/۰	۷۸/۵	۲
X					X				-۰/۱۶	۶/۰	۷۸/۵	۲
			X		X			X	-۰/۱۱	-۰/۳	۸۹/۶	۳
		X			X	X			-۰/۱۳	۱/۸	۸۶/۸	۳
		X			X		X	X	-۰/۱۱	۱/۵	۹۰/۰	۴
		X			X	X	X	X	-۰/۱۱	۱/۵	۸۹/۹	۴
		X		X	X	X	X	X	-۰/۱۱	۲/۶	۹۱/۱	۵
	X	X	X		X	X	X		-۰/۱۲	۳/۳	۹۰/۲	۵
	X	X	X	X	X	X	X		-۰/۱۲	۴/۲	۹۱/۷	۶
	X	X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۲	۴/۳	۹۱/۵	۶
	X	X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۲	۶/۱	۹۱/۸	۷
X		X	X	X	X	X	X		-۰/۱۲	۶/۱	۹۱/۸	۷
X	X	X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۳	۸/۰	۹۱/۹	۸
	X	X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۳	۸/۱	۹۱/۹	۸
X	X	X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۴	۱۰/۰	۹۲/۰	۹

NDVI: شاخص تقاضا پوشش گیاهی نرمال شده، NRI: شاخص بازتاب نیتروژن، MTVI2: شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح شده ۲، SR: شاخص نسبت ساده، GI: شاخص سبزیگی، MCAR1: شاخص نسبت جذب کلروفیل تعدیل شده ۲، TCAR1: شاخص جذب و بازتاب کلروفیل تعدیل شده، PSRI: شاخص بازتاب پیری گیاه، REIP: شاخص نقطه عطف لبه قرمز.

جدول ۵. رگرسیون، مدل بهترین زیرمجموعه و ضرایب تعیین (R²)، آماره Mallows Cp و خطای استاندارد رگرسیون (S) توصیف‌کننده بهترین مجموعه از شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی پیش‌بینی‌کننده مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای در مرحله رشد VT

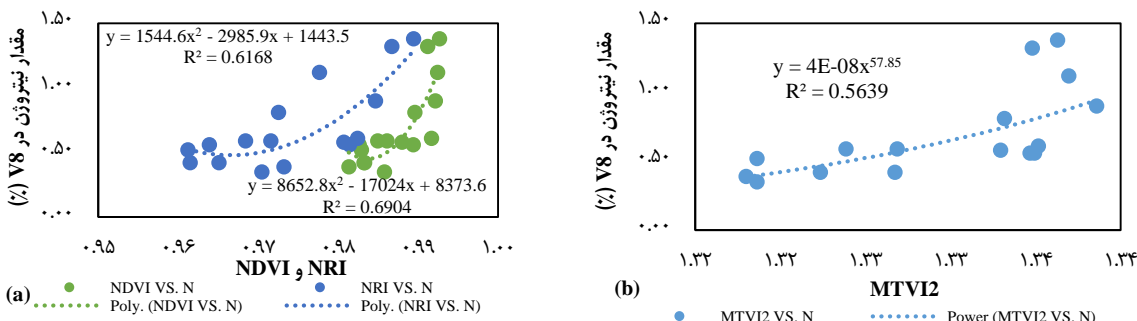
REIP	PSRI	TCARI	MTVI2	MCARI1	NIR	GI	SR	NDVI	S	Mallows Cp	R ²	تعداد متغیرها
					X				-۰/۱۴	-۲/۷	۷۷/۳	۱
								X	-۰/۱۹	۴/۷	۵۹/۵	۱
				X	X				-۰/۱۳	-۲/۲	۸۱/۱	۲
	X				X				-۰/۱۴	-۱/۳	۷۸/۸	۲
		X		X	X				-۰/۱۳	-۱/۱	۸۳/۳	۳
			X		X			X	-۰/۱۳	-۰/۸	۸۲/۶	۳
X		X		X	X				-۰/۱۳	-۰/۳	۸۴/۸	۴
X				X	X	X			-۰/۱۳	-۰/۴	۸۴/۵	۴
X		X	X	X	X				-۰/۱۴	۲/۲	۸۵/۰	۵
X		X		X	X	X			-۰/۱۴	۲/۲	۸۴/۹	۵
X		X	X	X	X			X	-۰/۱۴	۴/۱	۸۵/۱	۶
X	X	X	X	X	X				-۰/۱۴	۴/۲	۸۵/۰	۶
X		X	X	X	X		X	X	-۰/۱۵	۶/۱	۸۵/۲	۷
X	X	X	X	X	X			X	-۰/۱۵	۶/۱	۸۵/۲	۷
X		X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۶	۸/۱	۸۵/۳	۸
X	X	X	X	X	X		X	X	-۰/۱۶	۸/۱	۸۵/۲	۸
X	X	X	X	X	X	X	X	X	-۰/۱۷	۱۰/۰	۸۵/۴	۹

NDVI: شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده، NRI: شاخص بازتاب نیتروژن، MTVI2: شاخص نسبت جذب کلروفیل اصلاح‌شده^۲، SR: شاخص نسبت ساده، GI: شاخص سبزیگی، MCARI1: شاخص نسبت جذب کلروفیل تعدیل‌شده^۲، TCARI: شاخص جذب و بازتاب کلروفیل تبدیل‌شده، PSRI: شاخص بازتاب پیری گیاه، REIP: شاخص نقطه عطف لبه قرمز.

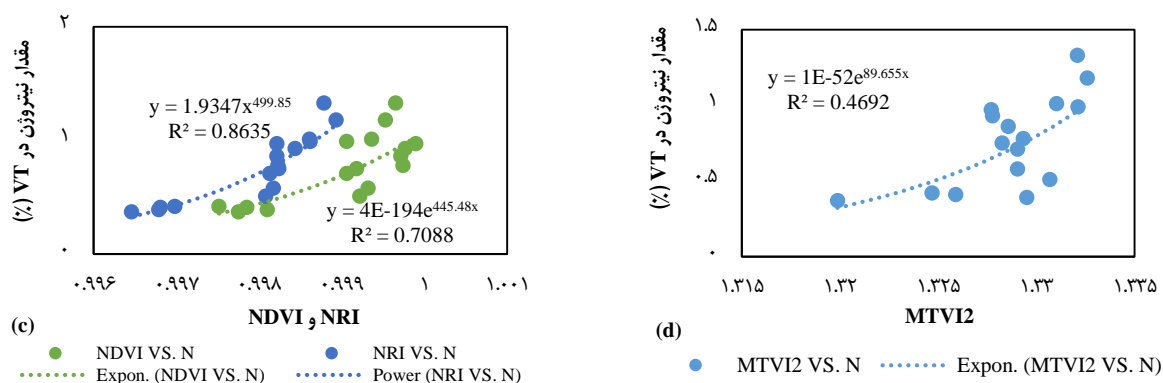
مطابق شکل (۳-a)، در مرحله رشد V8 رگرسیون چندجمله‌ای، به‌عنوان بهترین مدل برازش‌شده، رابطه مثبت و معنی‌دار بین شاخص‌های NDVI ($R^2=0/61$, $P\leq 0/01$) و NIR ($R^2=0/69$, $P\leq 0/01$) با مقدار نیتروژن گیاه ذرت نشان داد ($P\leq 0/01$).

هم‌چنین، رگرسیون توانی (شکل ۳-b)، به‌عنوان بهترین مدل برازش‌شده، رابطه مثبت و معنی‌داری بین شاخص MTVI2 ($R^2=0/61$, $P\leq 0/01$) و مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مرحله V8 نشان داد ($R^2=0/56$, $P\leq 0/01$). در مرحله رشد ظهور گل تاجی نیز به‌ترتیب رگرسیون نمایی و توانی (شکل ۳-c)، به‌عنوان بهترین مدل‌های برازش‌شده، رابطه مثبت و معنی‌دار بین شاخص‌های NDVI ($R^2=0/86$, $P\leq 0/01$) و NIR ($R^2=0/70$, $P\leq 0/01$) با مقدار نیتروژن گیاه ذرت ارائه کردند ($P\leq 0/01$).

هم‌چنین رگرسیون نمایی (شکل ۳-d)، به‌عنوان بهترین مدل برازش‌شده، توصیف کرد که یک رابطه مثبت و معنی‌دار بین شاخص MTVI2 ($R^2=0/46$, $P\leq 0/01$) و مقدار نیتروژن گیاه ذرت در مرحله رشد ظهور گل تاجی وجود داشت ($R^2=0/56$, $P\leq 0/01$). در مجموع در هر دو مرحله، شاخص‌های NDVI و NRI از نظر شدت رابطه و درجه معنی‌داری بر شاخص MTVI2 برتری داشتند.



شکل ۳. رابطه رگرسیونی بین مقدار نیتروژن گیاه و شاخص‌های NDVI و NRI (a) و MTVI2 (b) در مرحله V8. اختصارات: N: مقدار نیتروژن گیاه، Poly، رابطه رگرسیونی چندجمله‌ای، Power، رابطه رگرسیونی توانی، Expon، رابطه رگرسیونی نمایی.



ادامه شکل ۳. رابطه رگرسیونی بین مقدار نیتروژن گیاه و شاخص‌های NDVI و NRI (c)، MTVI2 (d) در مرحله VT. اختصارات: N: مقدار نیتروژن گیاه، Poly، رابطه رگرسیونی چندجمله‌ای، Power، رابطه رگرسیونی توانی، Expon، رابطه رگرسیونی نمایی.

۵. بحث

عنصر نیتروژن به‌عنوان عنصر کلیدی کلروپلاست در برگ و عامل فتوسنتز گیاه برای رشد ضروری است و معمولاً در دوره رشد رویشی گیاه آن را به حداکثر مقدار جذب می‌کند. گیاه با افزایش مقدار عنصر نیتروژن در بافت خود، امکان انتقال دوباره آن را در دوره رشد زایشی برای بقا و تولید عملکرد بیش‌تر فراهم می‌آورد (Nasielski *et al.*, 2019). در نتیجه، مطابق نتایج پژوهش حاضر و نیز پژوهش‌های پیشین (Nasielski *et al.*, 2019)، جذب این عنصر توسط گیاه محدودیتی ندارد، اما عرضه مقادیر زیاد نیتروژن بیش‌تر از حد نیاز خاک بر اساس آزمون خاک و نیز گیاه برای دستیابی به عملکرد قابل قبول، از نظر اهداف زیست‌محیطی توصیه نمی‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از بررسی روابط همبستگی و رگرسیون در پژوهش حاضر، ابتدا می‌تواند اهمیت سه شاخص NDVI، NRI و MTVI2 را در ارزیابی وضعیت نیتروژن گیاه در دو مرحله رشد رویشی و زایشی در گیاه ذرت نشان دهد. همچنین، این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بیش‌تر برخی از شاخص‌های پوشش گیاهی برای ارزیابی وضعیت نیتروژن در گیاه هستند (Osco *et al.*, 2020). حساسیت بیش‌تر برخی از شاخص‌های پوشش گیاهی نسبت به شاخص‌های دیگر می‌تواند به‌دلیل پتانسیل بیش‌تر آن‌ها در حذف اثر خاک و اشباع‌شدن این شاخص‌ها در تراکم زیاد پوشش گیاهی باشد (Xu *et al.*, 2021). در پژوهش‌های اخیر، NDVI به‌طور گسترده برای پایش و برآورد دقیق وضعیت نیتروژن در ذرت (Rhezali & Lahlali, 2017) و گندم (Kizilgeci *et al.*, 2021) توصیه شده است. در آزمایشی مشابه روی گندم دوروم، بیش‌ترین مقادیر NDVI در بیش‌ترین مقدار مصرف کود نیتروژن (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد، در حالی‌که در هر دو فصل کم‌ترین مقدار NDVI در تیمار شاهد (بدون مصرف کود نیتروژن) مشاهده شد (Kizilgeci *et al.*, 2021) که این نتیجه با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. در پژوهش دیگر، شاخص NDVI برای پایش وضعیت نیتروژن در مراحل مختلف رشد برنج در شرق چین استفاده شد و مقدار R² برای پیش‌بینی مقدار نیتروژن بافت گیاهی با این شاخص از ۰/۵۶ تا ۰/۸۹ متغیر بود. نتایج نشان داد در تمام مراحل رشد این رابطه معنی‌دار بوده است (Zhang *et al.*, 2017). همچنین، نتایج سایر پژوهش‌ها نشان داده که شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NRI می‌توانند برای برآورد تغییرات درون مزرعه‌ای و برآورد عملکرد و پارامترهای گیاهی در ذرت علوفه‌ای استفاده شود (Diker & Bausch, 2003) و مقدار R² برای این شاخص در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت از ۰/۴۸ در مرحله شش‌برگی تا ۰/۹۳ در مرحله ظهور گل‌تاجی متغیر بود. با این حال، روابط احتمالی این شاخص با صفات کیفی همچون نیتروژن اندام‌ها در این پژوهش بررسی نشده است. همچنین، در گزارشی دیگر، از بین شاخص‌های محاسبه‌شده برای برآورد نیتروژن ذرت شاخص MTVI2، بیش‌ترین همبستگی (R² ۰/۸۷) و کم‌ترین RMSE (۰/۰۸۸) را با مقدار نیتروژن در بافت گیاهی ذرت نشان داد

(Bagheri *et al.*, 2013). همبستگی زیاد MTVI2 با مقدار نیتروژن به این دلیل است که این شاخص یک مدل بهبودیافته از شاخص TVI^۱ است که وابسته به رنگ محصول و مقدار کلروفیل است. هم‌چنین در پژوهش دیگر، شاخص MTVI2 با ضریب تعیین ۰/۸۰ بهترین شاخص طیفی برای برآورد نیتروژن ذرت تشخیص داده شد (Cilia *et al.*, 2014).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش توانایی تصاویر چندطیفی هوایی برداشت‌شده با پهپاد برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت در دو مرحله رشد ارزیابی شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد مقدار نیتروژن بافت گیاه و شاخص‌های NDVI، NRI و MTVI2 تحت تأثیر مقادیر مختلف کود نیتروژن در مزرعه قرار گرفتند، به طوری که سطح بیش‌تر کود نیتروژن (N100% و N150%) نسبت به سطوح کم کود نیتروژن (N50% و N100%)، موجب افزایش متغیرهای ذکرشده بود. در تأیید نتایج تجزیه واریانس، نتایج محاسبه ضرایب همبستگی (r) و رگرسیون (مدل بهترین زیرمجموعه) نشان دادند، از بین شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی بررسی‌شده، شاخص‌های NDVI، NIR و MTVI2 به ترتیب در هر دو مرحله رشد V8 و VT بهترین شاخص‌ها برای برآورد مقدار نیتروژن ذرت علوفه‌ای بودند. در هر دو مرحله V8 و VT مدل‌های رگرسیونی برازش‌شده براساس آماره‌های R² و P-value نشان-دهنده رابطه‌های قوی و مثبتی بین هر سه شاخص NDVI، NIR و MTVI2 با مقدار نیتروژن در بافت گیاه ذرت بودند. مطابق یافته‌ها پیشنهاد می‌شود روش تصویربرداری چندطیفی هوایی با استفاده از پهپاد برای برآورد مقدار نیتروژن گیاه ذرت علوفه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. سرعت و راحتی دسترسی به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای به وسیله تصویربرداری هوایی با پهپاد می‌تواند ابزار ارزشمندی برای مدیریت پایدارتر کودهای نیتروژنی در طول فصل رشد باشد.

۷. تشکر و قدردانی

از آقایان مهندس محمد حاجیان مالک مزرعه و مهندس حمیدرضا ابراهیمی (خلبان پهپاد) به خاطر همکاری در اجرای پروژه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- جابری‌اقدم، مهریار؛ ممیزی، محمد رضا؛ باقری، نیکروز؛ عزیزی، پیمان و نصری، محمد (۱۳۹۹). تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت و مخاطرات آن با استفاده از تصویربرداری چندطیفی هوایی به وسیله پهپاد. مدیریت مخاطرات محیطی. ۷ (۲)، ۱۶۳-۱۷۰.
- حسینی، سید عارفه؛ مسعودی، حسن؛ سجادیه، سید مجید و آبدانان مهدی‌زاده، سامان (۱۳۹۸). تعیین مقدار نیتروژن و کلروفیل گیاه نیشکر از روی شاخص‌های رنگی تصاویر دیجیتال هوایی با مدلسازی رگرسیونی. مجله علمی کشاورزی مهندس زراعی. ۴۲ (۲)، ۸۳-۹۸.

References

- Bagheri, N. (2016). Development of a high-resolution aerial remote sensing system for precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8), 2053-2065.

۱. Triangle vegetation index

- <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1225182>.
- Bagheri, N., Bordbar, M. (2014). *Solutions for fast development of precision agriculture in Iran*. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 16(3), 119-123.
- 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), 1394-1401. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000011>.
- Ballester, C., Hornbuckle, J., Brinkhoff, J., Smith, J., & Quayle, W. (2017). Assessment of In-Season Cotton Nitrogen Status and Lint Yield Prediction from Unmanned Aerial System Imagery. *Remote Sensing*, 9, 1149. <https://doi.org/doi:10.3390/rs9111149>.
- Caturegli, L., Corniglia, M., Gaetani, M., Grossi, N., Magni, S., Migliazzi, M., & Volterrani, M. (2016). Unmanned aerial vehicle to estimate nitrogen status of turfgrasses. *PloS one*, 11(6), e0158268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158268>.
- Cilia, C., Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Picchi, V., & Colombo, R. (2014). Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 6(7), 6549-6565. <https://doi.org/10.3390/rs6076549>.
- Chen, J., Yang, C., Wu, Sh., Chung, Y., Linton, A., Charles, A. L., & Chen, Ch. (2007). Leaf chlorophyll content and surface spectral reflectance of tree species along a terrain gradient in Taiwan's Kenting National Park. *Botanical Studies*, 48, 71-77.
- Evadas, 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, 459-470. <https://DOI: 10.1007/s11119-008-9100-2>.
- Diker, K., & Bausch, W. C. (2003). Potential use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. *Biosystems Engineering*, 85(4), 437-447. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00097-7).
- Elvanidi, A., Katsoulas, N., Augoustaki, D., Loulou I., & Kittas, C. (2018). Crop reflectance measurements for nitrogen deficiency detection in a soilless tomato crop. *Biosystems engineering*, 176, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.019>.
- Gilliot, J. M., Michelin, J., Hadjard, D., & Houot, S. (2020). An accurate method for predicting spatial variability of maize yield from UAV- based plant height estimation: a tool for monitoring agronomic field experiments. *Precision Agriculture*, 22(6), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09764-w>.
- Guo, J., Zhang, J., Xiong, Sh., Zhang, Zh., Wei, Q., Zhang, W., Feng, W., & Ma, X. (2021). Hyperspectral assessment of leaf nitrogen accumulation for winter wheat using different regression modeling. *Precision Agriculture*, 22, 1634-1658. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09804-z>.
- Habibullah, M., Mohebian, M. R., Soolanayakanahally, R., Bahar, A. N., Vail, S., Wahid, K. A., & Dinh, A. (2020). Low-cost multispectral sensor array for determining leaf nitrogen status. *Nitrogen*, 1(1), 67-80. <https://doi.org/10.3390/nitrogen1010007>.
- Hawkins, J. A., Sawyer, J. E., Barker, D. W., & Lundvall, J. P. (2007). Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn. *Agronomy Journal*, 99, 1034-1040. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0309>.
- Kizilgeci, F., Yildirim, M., Islam, M. S., Ratnasekera, D., Iqbal, M. A., & Sabagh, A. E. (2021). Normalized Difference Vegetation Index and Chlorophyll Content for Precision Nitrogen Management in Durum Wheat Cultivars under Semi-Arid Conditions. *Sustainability*, 13(7), 3725. <https://doi.org/10.3390/su13073725>.
- 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), 900-915. <https://doi 10.1007/s11119-017-9534-5>.
- Laruffa, J. M., Raun, W. R., Phillips, S. B., Solie, J. B., Stone, M. L., & Johnson, G. V. (2001).

- Optimum field element size for maximum yields in winter wheat, using variable nitrogen rates. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 313-325. <https://doi.org/10.1081/PLN-100001390>.
- Lebourgeois, V., Begue, A., Labbe, S., Houles, M., & Martine, J. F. (2012). A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. *Precision Agriculture*, 13, 525-541. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9262-9>.
- Li, J., Zhang, F., Qian, X., Zhu, Y., & Shen, G. (2015). Quantification of rice canopy nitrogen balance index with digital imagery from unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing Letters*, 6(3), 183-189. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2015.1021934>.
- Liang, L., Di, L., Huang, T., Wang, J., Lin, L., Wang, L., & Yang, M. (2018). Estimation of leaf nitrogen content in wheat using new hyperspectral indices and a random forest regression algorithm. *Remote Sensing*, 10(12), 1940. <https://doi.org/10.3390/rs10121940>.
- 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, 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.006>.
- Liu, S., Li, L., Gao, W., Zhang, Y., Liu, Y., Wang, S., & Lu, J. (2018). Diagnosis of nitrogen status in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using in-situ hyperspectral data and unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.026>.
- Maresma, A., Ariza, M., Martínez, E., Loveras, J., Martínez-Casasnovas, J. A. (2016). Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize (*Zea mays* L.) from a Standard UAV Service. *Remote Sensing*, 8, 973. <https://doi.org/10.3390/rs8120973>.
- Mistele, B., & Schmidhalter, U. (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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.11.002>.
- Nasielski, J., Earl, H., & Deen, B. (2019). Luxury vegetative nitrogen uptake in maize buffers grain yield under post-silking water and nitrogen stress: a mechanistic understanding. *Frontiers in plant science*, 10, 318. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00318>.
- Oscó, L. P., Junior, J. M., Ramos, A. P. M., Furuya, D. E. G., Santana, D. C., Teodoro, L. P. Gonçalves, W. N.; Baio, F. H. R., Pistori, H., Junior, C. A. d. S., & Teodoro, P. E. (2020). Leaf nitrogen concentration and plant height prediction for maize using UAV-based multispectral imagery and machine learning techniques. *Remote Sensing*, 12, 3237. <https://doi.org/10.3390/rs12193237>.
- Padua, L., Vanko, J., Hruska, J., Adao, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1297548>.
- Rahimi Jahangirlou, M., Akbari, G. A., Alahdadi, I., Soufizadeh, S., Ludemann, C., & Parsons, D. (2022). Phenotypic predictors of dent maize grain quality based on different genetics and management practices. *Journal of Cereal Science*, 103388. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103388>.
- Rahimi Jahangirlou, M., Akbari, G. A., Alahdadi, I., Soufizadeh, S., & Parsons, D. (2021). Grain Quality of Maize Cultivars as a Function of Planting Dates, Irrigation and Nitrogen Stress: A Case Study from Semiarid Conditions of Iran. *Agriculture*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010011>.
- Rhezali, A., & Lahlali, R. (2017). Nitrogen (N) mineral nutrition and imaging sensors for determining N status and requirements of maize. *Journal of Imaging*, 3(4), 51. <https://doi.org/10.3390/jimaging3040051>.
- Shendryk, Y., Sofonia, J., Garrard, R., Rist, Y., Skocaj, D., & Thorburn, P. (2020). Fine-scale prediction of biomass and leaf nitrogen content in sugarcane using UAV LiDAR and multispectral imaging. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102177. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102177>.
- Wen, P., Shi, Z., Li, A., Ning, F., Zhang, Y., Wang, R., & Li, J. (2020). Estimation of the vertically

- integrated leaf nitrogen content in maize using canopy hyperspectral red edge parameters. *Precision Agriculture*, 22, 984-1005. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09769-5>.
- Xu, X., Fan, L., Li, Z., Meng, Y., Feng, H., Yang, H., & Xu, B. (2021). Estimating Leaf Nitrogen Content in Corn Based on Information Fusion of Multiple-Sensor Imagery from UAV. *Remote Sensing*, 13(3), 340. <https://doi.org/10.3390/rs13030340>.
- Yang, M., Hassan, M. A., Xu, K., Zheng, C., Rasheed, A., Zhang, Y., Jin, X., Xia, X., Xiao, Y., & He, Z. (2020). Assessment of water and nitrogen use efficiencies through UAV-based multispectral phenotyping in winter wheat. *Frontiers in plant science*, 11, 927. [https://doi: 10.3389/fpls.2020.00927](https://doi:10.3389/fpls.2020.00927).
- Yang, B., Wang, M., Sha, Z., Wang, B., Chen, J., Yao, X., Cheng, T., Cao, W., & Zhu, Y. (2019). Evaluation of Aboveground Nitrogen Content of Winter Wheat Using Digital Imagery of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 19, 4416. <https://doi:10.3390/s19204416>.
- Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., & Whiting, M. L. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97, 641-653. [https://doi: 10.2134/agronj2003.0257](https://doi:10.2134/agronj2003.0257).
- Zhang, K., Ge, X., Liu, X., Zhang, Z., Liang, Y., Tian, Y., Cao, Q., Zhu, Y., & Liu, X. (2017). Evaluation of the chlorophyll meter and GreenSeeker for the assessment of rice nitrogen status. *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), 359-363. <https://doi.org/10.1017/S2040470017000917>.
- Zhu, Y., Zhou, D., Yao, X., Tian, Y., & Cao, W. (2007). Quantitative relationships of leaf nitrogen status to canopy spectral reflectance in rice. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(11), 1077-1085. [https://doi.org/ 10. 1071/ AR064 13](https://doi.org/10.1071/AR06413).
- Zillmann, E., Graeff, S., Link, J., Batchelor, W. D., & Claupein, W. (2006). Assessment of Cereal Nitrogen Requirements Derived by Optical On-the-Go Sensors on Heterogeneous Soils. *Agronomy Journal*, 98(3), 682-690. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0253>.