

Estimation of In-season Basil Nitrogen Requirement Using the Nitrogen Nutrition Index

HADISSEH RAHIMIKHOOB^{1*}, TEYMOUR SOHRABI¹, MOJTABA DELSHAD²

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
 2. Department of Horticultural Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- (Received: May. 26, 2020- Revised: June. 15, 2020- Accepted: July. 1, 2020)

ABSTRACT

Nitrogen is one of the most widely used nutrients for crop development. Application of nitrogen fertilizers plays a crucial role in increasing agricultural yield and production. In order to achieve maximum crop yield and reduce the negative environmental effects, application of nitrogen fertilizers should be based on the dynamics between nitrogen supply and crop demand. In order to manage the consumption of nitrogen fertilizers, it is necessary to accurately predict the crop nitrogen requirements at different growth stages. In present study, the concept of critical nitrogen concentration (N_c) has been used as an effective approach to determine nitrogen status and estimate nitrogen requirement of basil. For this purpose, basil was cultivated in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Different nitrogen fertilizer treatments were applied at seven levels with three replications. Crop dry matter and nitrogen concentrations were measured seven times during the growth period. Then nitrogen nutrition index (NNI) and basil nitrogen requirement (NR) were calculated for the first experiment. Results showed that, there was a significant regression relationship between basil NNI and NR ($R^2 > 0.96$). Accordingly, the NR prediction model was developed using NNI values and day after planting (DAP). Then, accuracy and performance of the NR-NNI relationship were verified by the second experiment data. The values obtained for RMSE, NMB and NRMSE statistical indicators were less than 1 kg / ha, 0.10% and 3.10%, respectively, which indicates high accuracy of the model for prediction of crop nitrogen requirement. In general, results showed that estimation of crop NR based on the concept of N_c could be used as a scientific and suitable approach for managing nitrogen application in agricultural production.

Keywords: Nitrogen Nutrition Index, Nitrogen Recovery Efficiency, Critical Nitrogen Concentration, Basil.

پیش‌بینی نیاز نیتروژنی گیاه ریحان در طول دوره رشد با استفاده از شاخص تغذیه نیتروژن

حدیثه رحیمی‌خوب^{۱*}، تیمور سهرابی^۱، مجتبی دلشاد^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه علوم باغبانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۱۱)

چکیده

نیتروژن یکی از پرمصرف‌ترین عناصر مورد نیاز گیاه است. کاربرد کودهای نیتروژنی نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد بسیاری از محصولات کشاورزی دارد. برای دستیابی به حداکثر عملکرد محصول و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، کاربرد کودهای نیتروژنی می‌بایست بر اساس دینامیک بین عرضه نیتروژن و تقاضای گیاه انجام گیرد. برای مدیریت مصرف کودهای نیتروژنی، پیش‌بینی دقیق نیاز گیاه به نیتروژن در مراحل مختلف رشد ضروری است. در این پژوهش، مفهوم غلظت نیتروژن بحرانی ($N_{critical}$) به عنوان یک رویکرد مؤثر برای سنجش وضعیت نیتروژن و تخمین نیاز نیتروژنی گیاه ریحان مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور، گیاه ریحان در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج طی دو دوره کشت شد. تیمارهای مختلف کود نیتروژن در هفت سطح با سه تکرار اعمال شدند. مقادیر زیست‌توده خشک و غلظت نیتروژن در هفت نوبت طی دوره رشد اندازه‌گیری و شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) و نیاز نیتروژنی (NR) ریحان برای کشت اول محاسبه شد. نتایج نشان داد، بین NR و NNI گیاه ریحان رابطه رگرسیونی معناداری ($R^2 > 0.96$) وجود دارد. بر این اساس، مدل پیش‌بینی NR با استفاده از مقادیر NNI و روز پس از کاشت (DAP) توسعه یافت. سپس دقت و عملکرد رابطه NR-NNI توسط داده‌های کشت دوم صحت‌سنجی شد. مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب نرمال شده (NMB) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) به ترتیب کمتر از ۱ کیلوگرم در هکتار و ۰/۱۰ درصد و ۳/۱۰ درصد بود که بیانگر دقت بالای مدل در برآورد نیاز گیاه به نیتروژن است. به طور کلی نتایج نشان داد، تخمین NR بر اساس مفهوم N_c می‌تواند به عنوان یک روش علمی و مناسب برای مدیریت مصرف کودهای نیتروژنی در تولید محصولات کشاورزی به کار رود.

واژه‌های کلیدی: شاخص تغذیه نیتروژن، کارایی بازیافت نیتروژن، نیاز نیتروژنی، غلظت نیتروژن بحرانی، ریحان.

مقدمه

کودهای شیمیایی و آلی تأمین‌گرده (Yan and Gong, 2010). لازم به ذکر است که میزان جذب نیتروژن توسط گیاه دقیقاً برابر با میزان کود داده شده به خاک نیست. به عبارت دیگر، تخمین میزان جذب نیتروژن توسط گیاه از روی میزان کود به کار رفته قابل پیش‌بینی نخواهد بود. یکی از مهم‌ترین علت‌های آن زیاد بودن پتانسیل آبشویی یون نیترات در خاک است. در نتیجه به منظور مدیریت صحیح و ایجاد تعادل بین تقاضا و عرضه کودهای شیمیایی، کاهش میزان آبشویی یون نیترات و جلوگیری از تجمع بیش از حد نیتروژن در گیاه، کاربرد یک روش دقیق برای تعیین وضعیت نیتروژن در گیاه ضروری است.

راهکارهای مدیریتی زیادی برای تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه در طول فصل رشد از قبیل توزیع تمام کود در ابتدای فصل یا توزیع در فواصل معین، پیشنهاد شده است، اما نمی‌تواند دقیقاً در زمانی که گیاه بیشترین نیاز به نیتروژن را دارد آن را تأمین

نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر مؤثر در رشد و توسعه گیاه است. این عنصر نه تنها عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد، بلکه منجر به افزایش محتوای کلروفیل در برگ‌ها شده و شدت فرآیند فتوسنتز را نیز تسریع می‌کند. از طرف دیگر، کمبود نیتروژن در گیاه باعث محدودیت رشد، کاهش سطح و کلروزه شدن برگ‌ها می‌شود. کاربرد بیش از حد آن نیز موجب ضخیم شدن ساقه‌ها، تیره شدن رنگ سبز برگ‌ها و تجمع مازاد نیتروژن در بافت‌های گیاه خواهد شد (Leghari et al., 2016).

یون‌های نیترات و آمونیوم موجود در محلول خاک، منابع اصلی برای تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه هستند (Ruan et al., 2016). از آنجایی که میزان مواد آلی در خاک‌های زراعی عمدتاً کم است و پاسخگوی کل نیاز نیتروژنی گیاه در طول دوره رشد نمی‌باشد، ضروری است که کمبود نیتروژن از طریق کاربرد

گیاه ریحان در طبقه بندی مربوط به زیرگروه گیاهان C3 قرار می‌گیرد، کارایی مصرف نیتروژن کمتری نسبت به گیاهان C4 دارد (Umar *et al.*, 2013). به عبارت دیگر غلظت نیتروژن تجمع یافته در گیاهان C3 بیشتر از گیاهان C4 است. تجمع بیش از حد نیتروژن در بافت گیاه به خصوص گیاهانی که مصرف خوراکی دارند، باعث ایجاد سمیت شده و تهدید جدی برای سلامتی به شمار می‌رود. در نتیجه باتوجه به ضرورت بهینه سازی مصرف و مدیریت کود نیتروژن در راستای توسعه پایدار محیط زیست و کاهش ریسک بروز بیماریها، پایش وضعیت نیتروژن در گیاهان مختلف به خصوص سبزیجات از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف از انجام این تحقیق، تخمین نیاز نیتروژنی به عنوان تابعی از شاخص NNI برای گیاه ریحان تحت کشت کنترل شده گلخانه بوده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا انجام شد. ابعاد سالن گلخانه مورد مطالعه ۸×۲۰ متر، از نوع چند دهانه‌ای با دیواره‌های شیشه-ای و پوشش سقف از جنس پلی‌کربنات بود. بمنظور تعدیل درجه حرارت محیط، گلخانه مجهز به سیستم پد و فن خودکار و حرارت مرکزی است. پارامترهای هواشناسی، شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و تابش طول موج کوتاه رسیده به داخل گلخانه به صورت روزانه برداشت گردید. سنجش متغیر دما و رطوبت با استفاده از سنسور دیجیتال مدل TES-1 و متغیر تابش توسط دستگاه تابش سنج مدل TES-1333R انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در گلخانه در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد انجام گرفت. میانگین دما و رطوبت نسبی در طول دوره به ترتیب برابر با ۳۳/۴ درجه سانتی‌گراد و ۳۱/۳ درصد بود. تابش طول موج کوتاه توسط دستگاه تابش سنج به صورت تجمعی در ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. میانگین میزان تابش طول موج کوتاه ثبت شده برابر با ۲۰/۹ مگاژول بر متر مربع بر روز بود. خاک مورد استفاده در این تحقیق، بافت لوم که در این منطقه بخش عمده‌ای از خاک بستر گلخانه‌ها را تشکیل می‌دهد، انتخاب شد. نتایج آنالیز خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

کند (Mills *et al.*, 2009). به جای کاربرد حجم زیاد کود نیتروژن بهتر است که نیاز گیاه به نیتروژن در طی دوره رشد همواره تحت پایش قرار گیرد (Gislum and Boelt, 2009). دستیابی به این هدف، نیازمند تعریف و ارزیابی پاسخ گیاه به محدودیت عناصر غذایی و بررسی اثرات احتمالی آن بر محصولات کشاورزی است. در این راستا، تئوری و مفاهیمی برای تعیین وضعیت و غلظت نیتروژن در گیاه از جمله تئوری غلظت نیتروژن بحرانی^۱ (N_c) و شاخص تغذیه نیتروژن^۲ (NNI) ارائه شده‌اند (Justes *et al.*, 1994). غلظت نیتروژن بحرانی (N_c) حداقل غلظت نیتروژن در اندام هوایی گیاه است که منجر به تولید حداکثر زیست توده می‌شود (Greenwood *et al.*, 1991). مفهوم غلظت نیتروژن بحرانی برای تعیین وضعیت N در گیاهان مختلف مانند ذرت (Plénet and Lemaire, 2000) and گندم (Justes *et al.*, 1994)، جو (Zhao, 2014)، گوجه‌فرنگی (Tei *et al.*, 2002) و سورگوم (Plénet and Cruz, 1997) مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) نیز نشان دهنده کمبود یا کفایت نیتروژن برای یک موقعیت معین و در هر دوره زمانی از فصل رشد گیاهان است. این شاخص به صورت نسبت بین غلظت واقعی نیتروژن جذب شده و غلظت نیتروژن بحرانی در گیاه برای یک مقدار معین از عملکرد ماده خشک بیان می‌شود (Lemaire *et al.*, 2008). به نظر می‌رسد از آنجایی که شاخص NNI به طور مستقیم میزان جذب نیتروژن در بافت گیاه را مشخص می‌کند، بهترین شاخص برای مدیریت کود نیتروژن در مزارع و کشت‌های گلخانه‌ای باشد. (Ata-Ul-Karim *et al.*, 2017) نشان دادند، بین نیاز نیتروژنی^۳ (NR) گیاه برنج و شاخص NNI همبستگی خطی وجود دارد. هم‌چنین در تحقیق دیگری، با اعمال تیمارهای مختلف نیتروژن بر روی شش رقم گیاه برنج، رابطه بین NR و شاخص NNI با استفاده از داده‌های برداشت شده طی چهار سال نمونه‌برداری استخراج شد. نتایج صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های مستقل نشان داد رابطه به دست آمده دقت بالایی در تخمین نیاز نیتروژنی برنج در طول دوره رشد دارد (Wang *et al.*, 2020).

پس از غلات، سبزیجات برگی منبع اصلی تغذیه بشر است. ریحان از جمله سبزی‌های برگی و معطر از خانواده نعنائیان است. کاربرد این گیاه علاوه بر صنایع داروسازی، آرایشی و بهداشتی، به صورت مصرف خوراکی رواج دارد (Nguyen *et al.*, 2010; Ahmed *et al.*, 2014). نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که درصد تجمع نیترات در اغلب سبزیجات برگی مانند اسفناج و کاهو زیاد است (Umar *et al.*, 2013). هم‌چنین با توجه به اینکه

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ذرات تشکیل دهنده خاک	ظرفیت زراعی		نقطه پژمردگی	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	شوری عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر)	اسیدیته (pH)	کربن آلی (%)	نیتروژن
	سن	ش						
	(%)	(%)	(درصد وزنی)					
	۴۶	۳۴	۲۱/۲۴	۱۰/۳۶	۱/۳۳	۸/۱	۰/۷۵	۰/۰۹

از ۵ عدد میکرولاسیسمتر استفاده گردید. میزان آب آبیاری از طریق توزین گلدان‌ها و محاسبه کمبود رطوبت نسبت به حد ظرفیت نگهداری رطوبتی خاک گلدان به دست آمد. سپس باتوجه به اطلاعات برداشت شده، میزان آب آبیاری برای هر میکرولاسیسمتر از رابطه زیر محاسبه شد:

$$IW_i = W_{fci} - W_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه فوق، IW_i میزان آب آبیاری برای میکرولاسیسمتر نام (گرم)، W_{fci} وزن میکرولاسیسمتر نام در حالت ظرفیت زراعی (گرم) و W_i وزن میکرولاسیسمتر نام پیش از انجام آبیاری (گرم) می‌باشد.

آزمایش‌های گلدانی (قطر و ارتفاع ۲۱ سانتی‌متر) در قالب طرح کامل تصادفی در دو دوره کشت با هفت تیمار کودی (کود اوره) در سه تکرار انجام شد. اطلاعات دقیق مربوط به تاریخ کاشت و برداشت، نرخ کاربرد کود، تاریخ کوددهی و نمونه برداری برای هر دوره کشت در جدول (۲) آورده شده است. بذر گیاه ریحان در عمق ۱ سانتی‌متری از سطح خاک کشت شد. سپس لابه نازکی از کوکوپیت برای جلوگیری از جابه‌جایی بذرها در حین آبیاری، روی سطح خاک ریخته شد. پس از جوانه زدن بذرها با انجام عملیات تنک کاری، تراکم کشت معادل ۲۵ عدد بوته در هر گلدان تثبیت شد. در طول دوره رشد برای جلوگیری از ایجاد تنش رطوبتی، عملیات آبیاری به صورت روزانه انجام شد. بدین منظور

جدول ۲- اطلاعات مربوط به هر دوره کشت گیاه ریحان

دوره کشت	تاریخ کاشت/ برداشت	تیمارهای کودی ($kg\ h^{-1}$)	تاریخ کوددهی (روز پس از کاشت)	تاریخ نمونه برداری (روز پس از کاشت)
اول	۱۸ ام اردیبهشت ۱۳۹۷ / ۲۷ ام خرداد ۱۳۹۷	N0-0	۱۸	۲۱
		N1-50		۲۳
		N2-80	۲۴	۲۶
		N3-100		۳۳
		N4-120	۳۰	۳۵
		N5-140		۳۸
دوم	۸ ام تیر ۱۳۹۷ / ۱۵ ام مرداد ۱۳۹۷	N6-200	۱۸	۲۲
		N0-0		۲۶
		N1-50		۳۰
		N2-100	۲۴	۳۲
		N3-120		۳۴
		N4-140	۳۰	۳۷
		N5-200		۳۹
		N6-300		

آنالیز خاک توسط کودهای پتاسیم سولفات (۸۰ کیلوگرم بر هکتار) و سوپرفسفات (۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار) تأمین گردید. بدین ترتیب تنها عامل محدود کننده رشد گیاه، کمبود نیتروژن بود.

محاسبه نیاز نیتروژنی گیاه ریحان

برای محاسبه نیاز نیتروژنی گیاه در مراحل مختلف رشد، غلظت نیتروژن بحرانی ($N_{critical}$: حداقل نیتروژن مورد نیاز برای

برای تعیین میزان زیست‌توده کل، نمونه‌های گیاهی (۲۵ عدد بوته) در هفت نوبت از هر تیمار در طول دوره رشد گیاه برداشت شدند. نمونه‌ها پس از برداشت به آزمایشگاه منتقل و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس توزین شدند. نیتروژن تجمع یافته در اندام هوایی گیاه ریحان نیز با استفاده از روش کج‌دال^۱ (Kjeldahl, 1883) به دست آمد. نیاز گیاه به عناصر فسفر و پتاسیم بر اساس نتیجه

برای تیمار کود داده شده (کیلوگرم بر هکتار)، N_{aunfert} تجمع نیتروژن در زمان برداشت برای تیماری که کود دریافت نکرده (کیلوگرم بر هکتار) و N_{rate} کل کود مصرف شده (کیلوگرم بر هکتار) است. کارایی بازیافت نیتروژن نشان دهنده آشفی و اثرات منفی کاربرد بیش از حد نیتروژن بر محیط زیست است (Ranjbar *et al.*, 2018). به طوری که هرچه کارایی بازیافت نیتروژن به عدد یک نزدیک‌تر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که کوددهی کاملاً مطابق با نیاز گیاه صورت گرفته است.

صحت‌سنجی روابط NNI-NR

از داده‌های دوره اول کشت برای توسعه مدل و دوره دوم برای صحت‌سنجی روابط به دست آمده استفاده شد. سنجش دقت معادلات در تخمین نیاز نیتروژنی گیاه، توسط شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب نرمال شده (NMB)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) انجام گرفت:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{\text{max}} - O_{\text{min}}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در معادلات فوق n بیانگر تعداد داده‌ها، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر واقعی، O_{min} حداقل مقدار مشاهده شده یا اندازه‌گیری شده در روز نمونه‌برداری بین تیمارهای مختلف، O_{max} حداکثر مقدار مشاهده شده یا اندازه‌گیری شده در روز نمونه‌برداری بین تیمارهای مختلف، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده است. مقادیر بالای شاخص R^2 و مقادیر پایین شاخص‌های NMB، NRMSE و RMSE نشان دهنده دقت بالای مدل در کمی‌سازی و پیش‌بینی NR بر اساس مقادیر NNI است.

نتایج و بحث

تغییرات پارامترهای زیست‌توده خشک گیاه و نیتروژن در طول دوره رشد ریحان برای هر دوره کشت در شکل (۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان زیست‌توده تولید شده با افزایش کاربرد کود، افزایش داشته است، هرچند که نرخ افزایش برای هر تیمار متفاوت است. در اولین تاریخ نمونه‌برداری بین

دستیابی به حداکثر تولید) به عنوان حد بهینه غلظت نیتروژن در گیاه در نظر گرفته می‌شود. با رشد گیاه، غلظت N_{critical} در زیست‌توده کاهش پیدا می‌کند. این روند توسط یک معادله غیرخطی به نام منحنی ترقیق نیتروژن تعریف می‌شود (Justes *et al.*, 1994). در این تحقیق، NR گیاه ریحان بر اساس منحنی N_c توسعه یافته در پژوهش (Rahimikhoob *et al.*, 2020) محاسبه شد.

منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی می‌تواند برای محاسبه شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) و به عبارتی کمی نمودن وضعیت نیتروژن در گیاه مورد استفاده قرار گیرد (Lemaire and Meynard, 1997). برای یک موقعیت معین و در هر دوره زمانی از فصل رشد گیاهان زراعی، برای تعیین سطح تغذیه نیتروژن از شاخص تغذیه نیتروژن استفاده می‌شود. این شاخص به صورت نسبت بین غلظت واقعی نیتروژن جذب شده (N_{actual}) و غلظت نیتروژن بحرانی (N_{critical}) در گیاه برای یک مقدار معین از عملکرد ماده خشک بیان می‌شود (Lemaire *et al.*, 2008).

$$NNI = \frac{N_{\text{actual}}}{N_{\text{critical}}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

مقادیر NNI نزدیک به عدد یک نشان دهنده عدم محدودیت نیتروژن در گیاه است. مقادیر بزرگ‌تر از یک نشان دهنده مصرف بیش از حد نیتروژن و مقادیر کم‌تر از یک بیان‌کننده کمبود نیتروژن است. به طور کلی شدت کمبود نیتروژن را می‌توان توسط شاخص NNI مشخص نمود.

نیاز نیتروژنی گیاه ریحان در مراحل مختلف رشد از اختلاف میزان غلظت واقعی نیتروژن و غلظت نیتروژن بحرانی متناظر با زیست‌توده گیاه در همان روز (محاسبه شده از رابطه $N_{\text{critical}} = 4.8DM^{-0.38}$ از $Ata-Ul-$ (Karim *et al.* 2017):

$$NR = \frac{(\%N_{\text{critical}} - \%N_{\text{actual}}) \times DM}{RE_N} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه (۳)، N_{critical} بیانگر غلظت نیتروژن بحرانی (درصد)، N_{actual} غلظت واقعی نیتروژن (درصد)، DM زیست‌توده خشک گیاه (کیلوگرم بر هکتار)، RE_N کارایی بازیافت نیتروژن (درصد) و NR نیاز نیتروژنی گیاه (کیلوگرم بر هکتار) است. مقادیر NR برابر با صفر نشان دهنده شرایط بهینه از نظر تغذیه کود نیتروژن است. اگر $NR > 0$ باشد، بیانگر شرایط کمبود و نیاز گیاه به نیتروژن و $NR < 0$ مازاد نیتروژن در گیاه است. کارایی بازیافت نیتروژن (RE_N) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Fageria and Baligar, 2005).

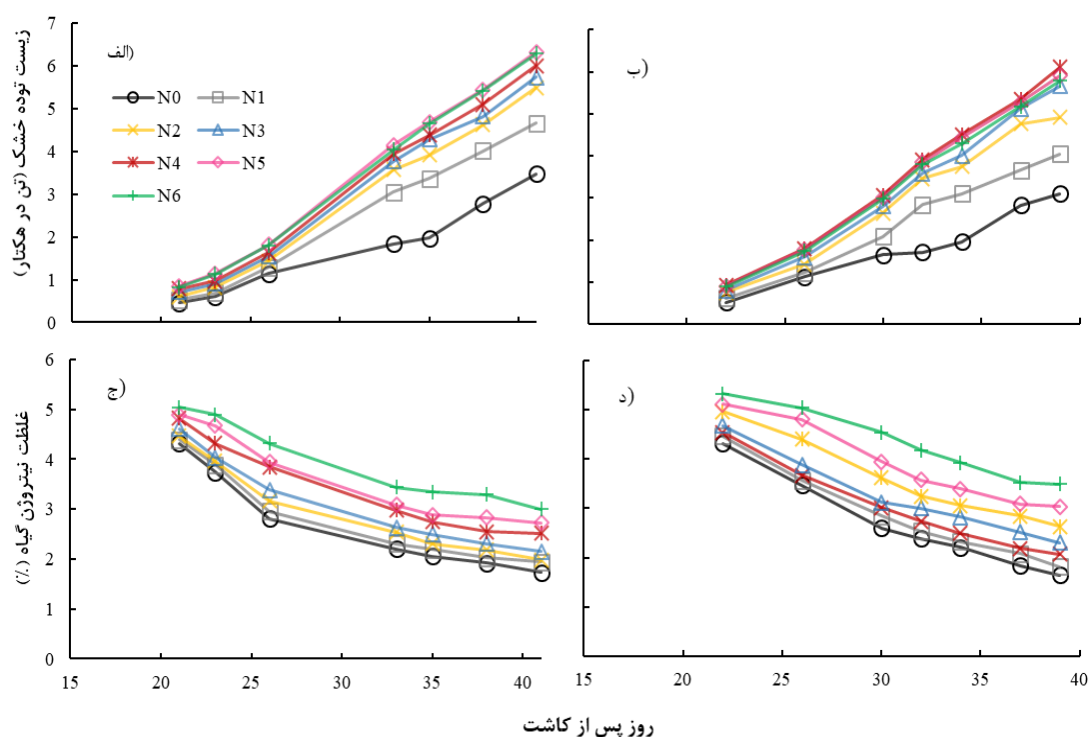
$$RE_N = \frac{N_{\text{afert}} - N_{\text{aunfert}}}{N_{\text{rate}}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه (۴)، N_{afert} میزان تجمع نیتروژن در زمان برداشت

تن در هکتار گزارش شده است (Saha *et al.*, 2016). می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد محصول وابسته به شرایط اقلیم محلی، مدیریتی و بستر کشت دارد.

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تیمارهای مختلف کود اثر قابل توجهی بر غلظت نیتروژن در اندام هوایی گیاه در سطح آماری ۰/۰۵ داشت (جداول ۳ و ۴). میانگین غلظت نیتروژن در تیمارها بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) مقایسه شدند.

تیمارهای مختلف تفاوت معناداری از لحاظ درصد نیتروژن و مقدار زیست‌توده خشک گیاه مشاهده نشد. علت آن می‌تواند به این دلیل باشد که در این مرحله نیتروژن موجود در خاک نیاز گیاه را تأمین کرده است. زیست‌توده و غلظت نیتروژن گیاه ریحان به ترتیب از ۰/۴ تا ۶/۳ تن در هکتار و ۵/۰۴ و ۱/۵۵ درصد در طول دوره کشت متغیر بودند. میزان تولید و عملکرد در واحد سطح گیاه ریحان کشت شده در خاک تحت شرایط گلخانه در آمریکا برابر با ۴/۳۶ تن در هکتار (Zheljazkov *et al.*, 2008) و تحت کشت آکواپونیک و هیدروپونیک به ترتیب برابر با ۱۵/۹۰ و ۹/۶۰



شکل ۱- تغییرات زیست توده خشک و غلظت نیتروژن تحت تیمارهای مختلف در هر نمونه برداری، شکل الف و ج): کشت اول، شکل ب و د): کشت دوم

جدول ۳- نتیجه مقایسه میانگین غلظت نیتروژن موجود (درصد) در ماده خشک گیاه در تیمارهای مختلف برای کشت اول (حروف روی اعداد نشان دهنده نتیجه آزمون مقایسه میانگین LSD است)

تیمار	روز نمونه برداری						
	۴۱	۳۸	۳۵	۳۳	۲۶	۲۳	۲۱
N0	۱/۷۳ ^f	۱/۹۲ ^f	۲/۰۶ ^f	۲/۲۵ ^f	۲/۸۱ ^f	۳/۷۴ ^e	۴/۳۲ ^f
N1	۱/۹۴ ^e	۱/۹۹ ^e	۲/۱۹ ^e	۲/۲۱ ^e	۲/۹۵ ^e	۳/۸۹ ^d	۴/۳۹ ^e
N2	۱/۹۹ ^d	۲/۱۸ ^d	۲/۳۰ ^d	۲/۵۴ ^d	۳/۱۷ ^d	۳/۹۶ ^c	۴/۴۶ ^d
N3	۲/۱۵ ^c	۲/۳۰ ^c	۲/۵۰ ^c	۲/۶۳ ^c	۳/۳۹ ^c	۴/۰۳ ^b	۴/۶۱ ^c
N4	۲/۵۲ ^b	۲/۵۵ ^b	۲/۷۵ ^b	۲/۹۷ ^b	۳/۸۴ ^b	۴/۳۲ ^b	۴/۸۲ ^b
N5	۲/۷۲ ^a	۲/۸۳ ^a	۲/۸۸ ^a	۳/۰۸ ^{ba}	۳/۹۴ ^a	۴/۶۸ ^a	۴/۹۰ ^{ba}
N6	۳/۰۰ ^a	۳/۲۹ ^a	۳/۳۵ ^a	۳/۴۴ ^a	۴/۳۲ ^a	۴/۹۰ ^a	۵/۰۴ ^a

بر اساس آزمون LSD میانگین‌های دارای حروف متفاوت، در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند.

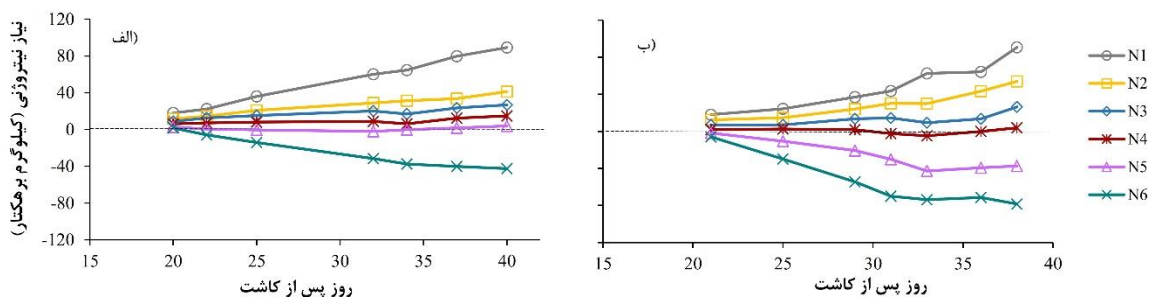
جدول ۴- نتیجه مقایسه میانگین غلظت نیتروژن موجود (درصد) در ماده خشک گیاه در تیمارهای مختلف برای کشت دوم (حروف روی اعداد نشان دهنده نتیجه آزمون مقایسه میانگین LSD است)

تیمار	روز نمونه‌برداری					
	۲۲	۲۶	۳۰	۳۲	۳۴	۳۷
N0	۴/۳۱ ^d	۳/۴۷ ^e	۲/۶۰ ^e	۲/۴۹ ^e	۲/۲۶ ^e	۱/۸۴ ^e
N1	۴/۴۶ ^c	۳/۵۶ ^d	۲/۸۴ ^d	۲/۵۴ ^d	۲/۲۳ ^d	۱/۸۲ ^d
N2	۴/۵۴ ^b	۳/۶۷ ^c	۳/۰۱ ^c	۲/۷۴ ^c	۲/۵۰ ^c	۲/۰۷ ^c
N3	۴/۶۸ ^b	۳/۸۸ ^b	۳/۱۲ ^b	۳/۰۰ ^b	۲/۸۲ ^{cb}	۲/۵۲ ^b
N4	۴/۹۷ ^a	۴/۴۱ ^a	۳/۶۱ ^a	۳/۲۵ ^a	۳/۰۶ ^{ba}	۲/۸۴ ^a
N5	۵/۱۱ ^a	۴/۸۱ ^a	۳/۹۵ ^a	۳/۵۸ ^a	۳/۴۰ ^a	۳/۰۹ ^a
N6	۵/۳۳ ^a	۵/۰۴ ^a	۴/۵۴ ^a	۴/۱۸ ^a	۳/۹۲ ^a	۳/۵۳ ^a

بر اساس آزمون LSD میانگین‌های دارای حروف متفاوت، در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند.

و مجاز آن ($N_{critical}$) فراتر رفته است. در مقابل، مقادیر نیاز نیتروژنی محاسبه شده برای تیمارهای N1 و N2 بیانگر شرایط کمبود شدید نیتروژن در گیاه است. شدت کمبود نیتروژن در این تیمارها با رشد گیاه و افزایش زیست‌توده خشک، افزایش یافته است. تیمارهای N5 در کشت اول و N4 در کشت دوم در شرایط بهینه از نظر تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه قرار دارند. میزان کود مصرف شده در این تیمارها کاملاً منطبق با نیاز گیاه در طول دوره رشد بوده است.

نمودار تغییرات نیاز نیتروژنی در طول دوره رشد ریحان در شکل (۲) ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کاربرد کود، نیاز نیتروژنی کاهش یافته است. محدوده تغییرات نیاز نیتروژنی در کشت اول و دوم به ترتیب برابر با $[(۸۹/۲۰)-(۴۲/۵۸)]$ و $[(۹۰/۶۴)-(۷۸/۴۴)]$ کیلوگرم بر هکتار است. مقادیر منفی نیاز نیتروژنی برای تیمارهای N6 در دوره اول و N5 و N6 در دوره دوم نشان‌دهنده کاربرد بیش از اندازه نیتروژن است. به طوری که نیتروژن در گیاه از حد استاندارد



شکل ۲- نیاز نیتروژنی ریحان در طول دوره رشد، (الف) کشت اول، (ب) کشت دوم

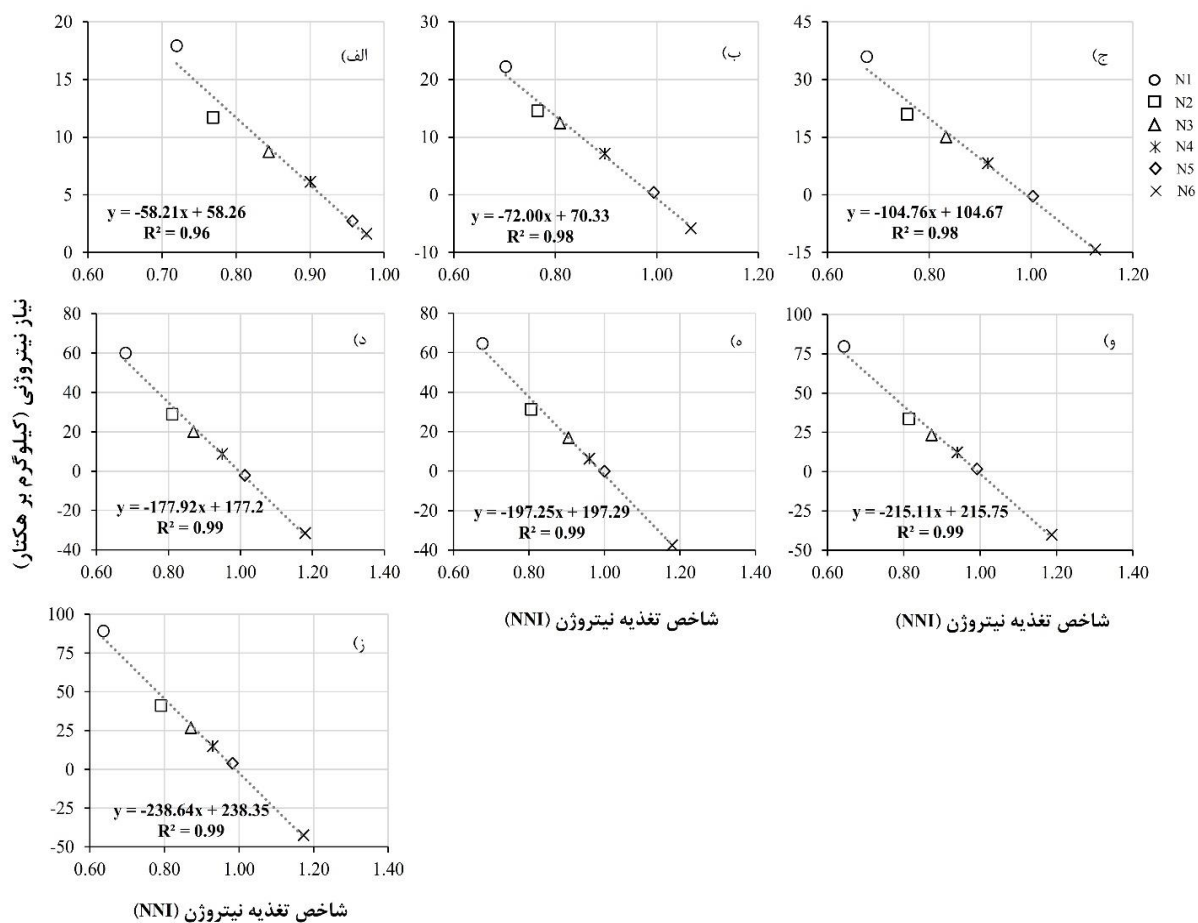
از نظر آماری تفاوت معناداری ندارند. بنابراین، برای ساده‌سازی و یکی کردن مدل تخمین نیاز نیتروژنی، از رابطه زیر استفاده شد (Wang et al., 2020):

$$NR=S(1-NNI) \quad (\text{رابطه ۸})$$

در رابطه فوق، S برابر با قدرمطلق شیب نمودار NR-NNI است. نمودار شیب معادلات رگرسیونی در مقابل روز نمونه برداری در شکل (۴) ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، رابطه خطی معناداری ($p < 0.01$) بین شیب (S) و روزهای نمونه برداری وجود دارد (رابطه ۹). ضریب تبیین برای معادله خط برازش داده شده برابر با ۰/۹۹ به دست آمد.

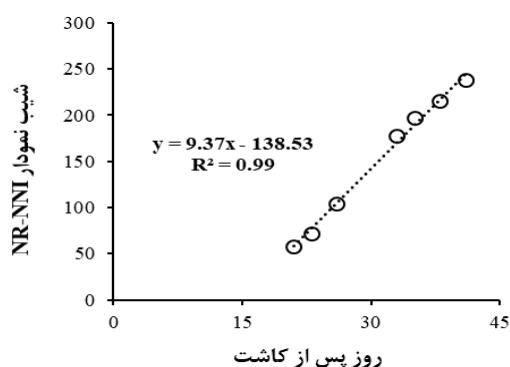
$$S=9.37DAP-138.53 \quad (\text{رابطه ۹})$$

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، نیاز گیاه به کود نیتروژن با شاخص NNI رابطه عکس دارد. علاوه بر این، نرخ کاهش نیاز نیتروژنی در اثر افزایش NNI (شیب نمودار) با گذشت زمان افزایش یافته است. مقادیر ضریب تبیین (R^2) در نمودارهای ترسیم شده بیشتر از ۰/۹۶ است. با استناد به تعریف علمی شاخص NNI، شرایط بهینه از نظر کاربرد کود زمانی رخ می‌دهد که مقدار عددی این شاخص برابر با یک باشد. در این صورت، مقدار نیاز نیتروژنی برابر با صفر است. در نتیجه عرض از مبدأ رابطه رگرسیون از لحاظ تئوری برابر با قدر مطلق شیب نمودار خواهد شد. با توجه به شکل (۳) اختلاف جزئی بین مقادیر شیب و عرض از مبدأ در روابط به دست آمده مشاهده می‌شود که



شکل ۳- رابطه نیاز نیتروژنی و شاخص تغذیه نیتروژن ریحان در کشت اول. (الف) ۲۱، (ب) ۲۳، (ج) ۲۶، (د) ۳۳، (ه) ۳۵، (و) ۳۸، (ز) ۴۱ روز پس از کاشت

داده‌های دوره دوم کشت انجام شد. بدین منظور مقادیر نیاز نیتروژنی تخمین زده شده از رابطه (۱۰) با مقادیر مشاهداتی به دست آمده از رابطه (۳) مقایسه شدند (شکل ۵). همانطور که ملاحظه می‌شود، پراکندگی نقاط اطراف خط ۱:۱ بسیار کم بوده که بیانگر خطای کم در شبیه‌سازی است. علاوه بر این، برای ارزیابی دقت و عملکرد مدل، شاخص‌های آماری محاسبه شدند (جدول ۵). مقادیر به دست آمده برای شاخص R^2 ، تطابق کامل مدل با واقعیت را نشان می‌دهد. هم-چنین میزان خطای شبیه‌سازی توسط شاخص‌های RMSE، NRMSE و NMB محاسبه شدند. مقادیر به دست آمده برای شاخص RMSE، NRMSE و NMB به ترتیب کمتر از ۱ کیلوگرم در هکتار، ۳/۱۰ درصد و ۰/۱۰ درصد بود. نتیجه مشابه ($RMSE < 1$) از کاربرد این روش در تخمین نیاز نیتروژنی برنج در چین نیز گزارش شده است (Wang et al., 2020). به طور کلی، نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است، تخمین نیاز نیتروژنی گیاه بر اساس شاخص NNI دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد (Stockle and Debaeke, 1997; Ata-Ul-Karim et al., 2017; Wang et al., 2020).

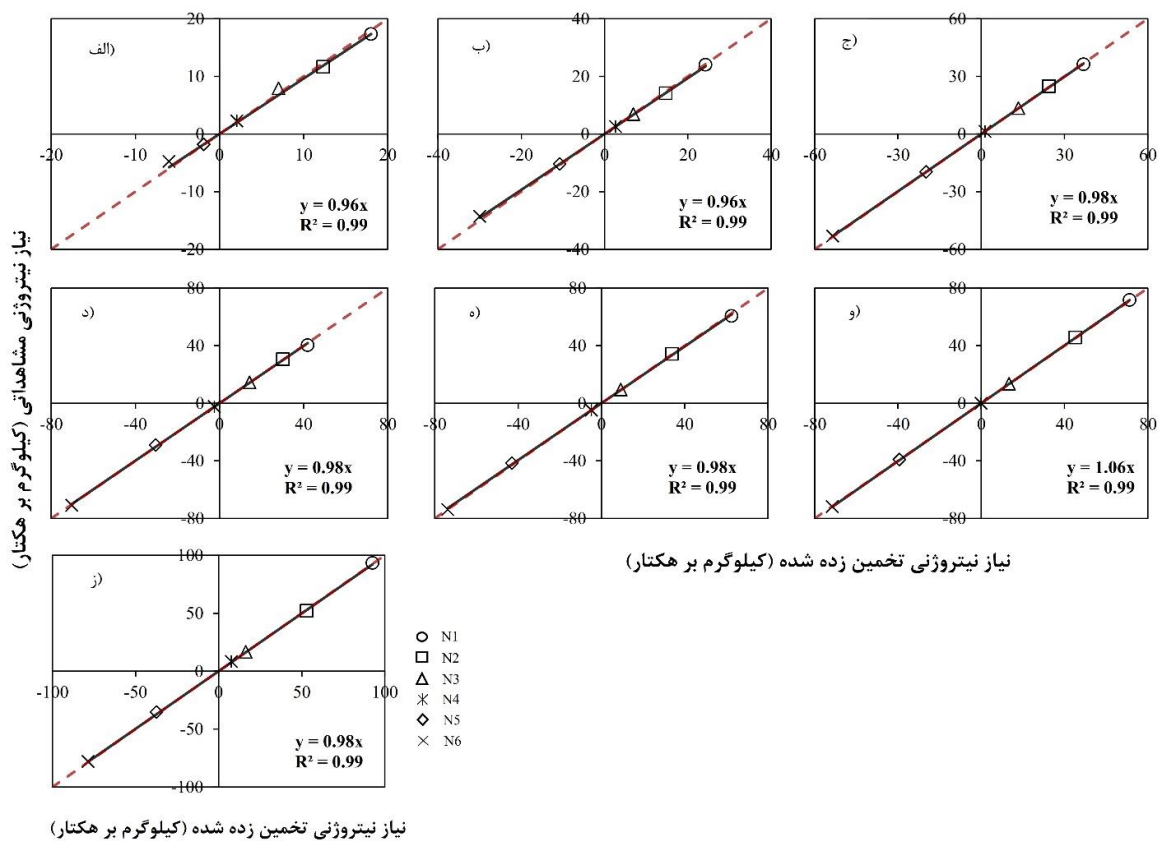


شکل ۴- رابطه شیب نمودارهای NR-NNI و روز پس از کاشت

در رابطه (۹)، متغیر DAP بیانگر روز نمونه برداری (روز پس از کاشت) است. با جای‌گذاری رابطه (۹) در رابطه (۸)، مدل تخمین نیاز نیتروژنی ریحان به عنوان تابعی از روز نمونه برداری و شاخص NNI به دست می‌آید (رابطه ۱۰).

$$NR = (9.37DAP - 138.53)(1 - NNI) \quad (\text{رابطه } 10)$$

صحت سنجی معادله NR-NNI گیاه ریحان با استفاده از



شکل ۵- مقایسه نیاز نیتروژنی تخمین زده شده (توسط رابطه ۲) با مقادیر مشاهده‌ای کشت دوم (محاسبه شده از رابطه ۳)

جدول ۵- شاخص‌های آماری

NRMSE (%)	RMSE (kg ha ⁻¹)	NMB (%)	روزهای نمونه‌برداری (روز پس از کاشت)
۳/۱۰	۰/۷۴	۰/۰۳	۲۲
۱/۱۲	۰/۶۱	۰/۰۹	۲۶
۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۰۵	۳۰
۰/۸۱	۰/۹۲	۰/۰۳	۳۲
۰/۶۹	۰/۹۴	۰/۰۱	۳۴
۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۰۴	۳۷
۰/۵۶	۰/۹۷	۰/۰۵	۳۹

نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است، دقت مدل NR- NNI تحت تأثیر معادله غلظت نیتروژن بحرانی است. در نتیجه، اطمینان از صحت ضرایب منحنی غلظت نیتروژن بحرانی پیش از استفاده از آن ضروری است (Wang et al., 2020).

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی و تخمین دقیق نیاز گیاه به نیتروژن عامل اصلی و مهم برای افزایش بهره‌وری مصرف نیتروژن، کاهش تلفات و اثرات مخرب زیست‌محیطی است. در این پژوهش، روشی جدید برای تخمین نیاز نیتروژنی گیاه ریحان بر اساس شاخص تغذیه نیتروژن و کارایی بازیافت نیتروژن معرفی شد. نیاز نیتروژنی گیاه ریحان

با توجه به نتایج به دست آمده، از مدل توسعه داده شده می‌توان به عنوان یک ابزار مناسب برای مدیریت کود نیتروژن در کشت گیاه ریحان استفاده نمود. به طور متداول، برای دستیابی به تولید و عملکرد معین تخمین نیاز کودی گیاه بر اساس اختلاف بین نیاز نیتروژنی گیاه و نیتروژن موجود در خاک انجام می‌گیرد (Yan et al., 2008; Cui et al., 2010). در حالی که، عملکرد محصول علاوه بر تغذیه گیاه، تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارد و استفاده از این روش منجر به عدم قطعیت در نتایج خواهد شد. در مقابل، تخمین نیاز نیتروژنی در طول فصل رشد (روش ارائه شده در این پژوهش)، کاملاً منطبق بر شرایط واقعی رشد گیاه بوده و اثر عوامل دیگر بر تغییرات احتمالی زیست‌توده گیاه در

محاسبه رابطه NR-NNI قابلیت تلفیق با مدل‌های شبیه‌ساز رشد را دارد. به منظور اطمینان از کارایی رابطه به دست آمده در این پژوهش، تحقیقات بیشتری در شرایط کشت و اقلیم متفاوت برای گیاه ریحان پیشنهاد می‌گردد.

سپاس‌گزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی (شماره ۹۶۰۱۳۰۷۳) با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا گردیده است و نویسندگان از مساعدت‌های آنان تقدیر می‌نمایند.
"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ahmed, E. A., Hassan, E. A., Tobgy, K.M., Ramadan, E.M. (2014). Evaluation of rhizobacteria of some medicinal plants for plant growth promotion and biological control. *Annals of Agricultural Sciences*. 59 (2), 273–280.
- Ata-Ul-Karim S, Zhu Y, Cao Q, Rehmani M, Cao W, Tang L (2017) In-season assessment of grain protein and amylose content in rice using critical nitrogen dilution curve. *European Journal of Agronomy*, 90: 139-151. doi: 10.1016/j.eja.2017.08.001
- Cui, Z., Zhang, F., Chen, X., Dou, Z., Li, J. (2010) In-season nitrogen management strategy for winter wheat: maximizing yields, minimizing environmental impact in an over fertilization context. *Field Crops Research*. 116, 140–146.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. (2005) Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*. 88, 97–185.
- Gislum, R., and Boelt, B. (2009) Validity of accessible critical nitrogen dilution curves in perennial ryegrass for seed production. *Field Crops Research*. 111:152-156.
- Greenwood, D. J., F. Gastal, G. Lemaire, A. Draycott, P. Millard, and J. J. Neeteson (1991) Growth Rate and % N of Field Grown Crops: Theory and Experiments. *Annals of Botany*. 67 (2): 181–90.
- Kjeldahl J (1883) Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Fresenius J. Anal. Chem.* 22: 366–382.
- Leghari SJ, Wahocho NA, Laghari GM, Laghari AH, Bhabhan GM, Talpur KH, Bhutto TA, Wahocho S A, Lashari AA (2016) Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A Review. *Advances in Environmental Biology*. 10 (9): 209-218
- Lemaire G, and Meynard, J.M. (1997). Use of the Nitrogen Nutrition Index for analysis of agronomical data. pp. 45–55. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis on the Nitrogen Status in Crops*, Heidelberg, Springer-Verlag.
- Lemaire, Gilles, Marie-Hélène Jeuffroy, and François Gastal. (2008). *Diagnosis Tool for Plant and Crop N Status in Vegetative Stage: Theory and Practices for Crop N Management*. *European Journal of Agronomy*. 28 (4): 614–24.
- Mills, A., D. J. Moot, and P. D. Jamieson. (2009). Quantifying the Effect of Nitrogen on Productivity of Cocksfoot (*Dactylis Glomerata* L.) Pastures. *European Journal of Agronomy*. 30(2) 63-69.
- Nguyen, P.M., Kwee, E.M., Niemeier, E.D. (2010). Potassium rate alters the antioxidant capacity and phenolic concentration of basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Food Chemistry*. 123, 1235–1241.
- Plénet D and Cruz P (1997) The nitrogen requirement of major agricultural crops: maize and sorghum. in *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*, ed G. Lemaire (Heidelberg: Springer-Verlag), 93–106.
- Plénet D and Lemaire G (2000) Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil*. 216: 65–82
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T. and Delshad, M. (2020) Development of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Basil (*Ocimum basilicum* L.) Under Greenhouse Conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00174-5>
- Ranjbar A., Rahimikhoob A., Ebrahimian H. and Varavipour M. (2018) Monitoring Nitrogen Nutrition Index to Improve Fertilizer Use Efficiency. *Iranian journal of soil and water research*. 49(5): 1189-1200.
- Ruan L, Wei K, Wang L, Cheng H, Zhang F, Wu L, Bai P, Zhang C (2016) Characteristics of NH₄⁺ and NO₃⁻ fluxes in tea (*Camellia sinensis*) roots measured by scanning ion-selective electrode technique. *Scientific Reports*. 6: 38370. doi: 10.1038/srep38370
- Saha, S., Monroe, A., and Day, M. (2016). Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 181-186. doi: 10.1016/j.aos.2016.10.001
- Stockle, C.O., Debaeke, P., 1997. Modeling crop nitrogen requirements: a critical analysis. *Dev.*

- Crop Science*. 25, 217–225.
- Tei F, Benincasa P and Guiducci M (2002) Critical nitrogen concentration in processing tomato. *European Journal of Agronomy*. 18: 45-55.
- Umar S, Anjana Anjum NA, Khan NA (2013) Nitrate management approaches in leafy vegetables. In: Umar S, Anjum NA, Khan NA (eds) Nitrate in leafy vegetables: toxicity and safety measures. *IK International Publishing House Pvt. Ltd, New Delhi*, pp 166–181
- Wang, Y., Shi, P., Ji, R., Min, J., Shi, W. and Wang, D., (2020) Development of a model using the nitrogen nutrition index to estimate in-season rice nitrogen requirement. *Field Crops Research*. 245: 107664.
- Yan, X., Jin, J.Y., He, P., Liang, M.Z., (2008) Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency. *Scientia Agriculturae*. 41: 450–459.
- Yan X, Gong W (2010) The role of chemical and organic fertilizers on yield, yield variability and carbon sequestration— results of a 19-year experiment. *Plant and Soil*. 331(1-2): 471-480. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0268-7>
- Zhao B (2014) Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. *Field Crops Research*. 160: 64-72. doi: 10.1016/j.fcr.2014.02.016
- Zheljaskov, V.D., Callahan, A., Cantrell, C.L., (2008) Yield and oil composition of 38 basil (*Ocimum basilicum* L.) accessions grown in Mississippi. *J. Agric. Food Chem*. 56, 241–245.