The University of Tehran Press

Iranian Journal of Horticultural Science

Online ISNN: 2008-482X

Homepage: http:// ijhs.ut.ac.ir/

Evaluating Nitrogen Fertilizer Utilization Efficiency and Analyzing Its Relationship with Nitrogen Nutrition Index in Lettuce

Hadisseh Rahimikhoob[1] | Mojtaba Delshad[2]✉ | Romina Habibi[3]

1. Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: h.rahimikhoob@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Horticultural Sciences Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: delshad@ut.ac.ir
3. Department of Horticultural Sciences Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: romi.hb1375@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 31 January 2023

Received in revised form: 1 September 2023

Accepted: 3 September 2023

Published online: Spring 2024

Keywords:

Critical nitrogen concentration,

Plant nutrition,

Greenhouse,

Nitrogen fertilizer management.

ABSTRACT

Improving nitrogen utilization efficiency (NUtE) is one of the most important challenges in the agricultural sector. The NUtE index, which is the amount of dry biomass (g) produced per nitrogen absorbed (g) by the plant, is influenced by some factors such as climate and nitrogen nutrition status. Therefore, providing management strategies to increase NUtE should be performed by taking into account the nitrogen status of the plant. In this study, relationships between nitrogen nutrition index (NNI) and NUtE in lettuce were extracted based on the concept of critical nitrogen concentration. For this purpose, two experiments were conducted in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, located in Karaj, Iran, with six N fertilizer treatments. Then, NUtE and NNI were calculated for all treatments. The results showed that the NNI varied from 0.70 to 1.22 and 0.60 to 1.23 for the first and second experiments, respectively. The NUtE decreased due to the increase in fertilizer application rate. Also, application of nitrogen fertilizer more than the plant uptake capacity led to a decrease in the nitrogen uptake efficiency (NUpE). The relationship between NUtE and NNI for different dry biomass values was investigated. The results showed that at constant NNI values, NUtE increased non-linearly with increasing dry biomass production. Also, the critical nitrogen utilization efficiency curve (NUtEc) discriminated well between different N treatments. Under the optimal nitrogen nutrition conditions (NNI = 1), the critical value of NUtE for lettuce was equal to 24 (g g-1 N).

Cite this article: Rahimikhoob, H., Delshad, M. & Habibi, R. (2024). Evaluating Nitrogen Fertilizer Utilization Efficiency and Analyzing Its Relationship with Nitrogen Nutrition Index in Lettuce. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 55 (1), 87-101. DOI: https://doi.org/10.22059/ijhs.2023.352103.2076

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijhs.2023.352103.2076

Extended Abstract

Introduction

Nitrogen (N) is an essential element involved in most important physiological plant processes such as photosynthesis, growth and enzymatic functions. In order to achieve crop production at a desired level, application of N fertilizers is an indispensable strategy. Improving crop nitrogen use efficiency (NUE) is a primary goal to reduce N input while maximizing crop yield and production. The commonly stated goal of maximizing NUE will not always result in desired agronomic and environmental outcomes unless both crop N status and biomass are analyzed through a plant-based approach. The term NUE is a product of N uptake efficiency (NU_pE) (the ratio between N uptake and N applied) and N utilization efficiency (NU_tE) (the ratio between dry matter production and N uptake). The objectives of the present study were to calculate lettuce NU_tE, NU_pE and also quantifying the relationships between nitrogen nutrition index (NNI) and NU_tE in lettuce based on the critical nitrogen concentration concept. The NNI is a useful tool to express the N status of a given crop. Values of NNI lower or higher than 1 indicate N deficiency and luxury N consumption, respectively.

Materials and methods

In the present study, two experiments were conducted in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, located in Karaj, Iran, with six N fertilizer treatments. The lettuce plants were cultivated as seedlings in pots. Fertilization was carried out at rates of zero (control treatment), 50, 100, 150, 200, and 250 kg ha^{-1}. Urea fertilizer was applied to the plants in three stages, at one-week intervals, at rates of 30%, 30%, and 40% of the mentioned amounts. In order to prevent water stress, irrigation was performed on a daily basis. Crop sampling was done weekly, one week after the last fertilization. One pot from each treatment and replication was randomly selected, and the plant was cut at soil level. The lettuce plants were placed in bags and dried in an oven at 70˚C for three days. The dry matter of the plant was weighed and then ground. The total nitrogen content in each treatment was also determined using the Kjeldahl method. Then, NU_tE, NU_pE and NNI were calculated for all treatments.

Results and discussion

Results demonstrated that NU_tE, NU_pE and NNI are highly influenced by N application rates and availability. The lettuce NNI varied from 0.70 to 1.22 and 0.60 to 1.23 for the first and second experiments, respectively. The Control N treatment had greater NU_tE (31.75 and 39.36 g g^{-1} N for the first and second experiments, respectively) than the highest fertilized treatment (18.79 and 20.95 g g^{-1} N for the first and second experiments, respectively). The NU_tE decreased due to the increase in fertilizer application rate. Also, application of nitrogen fertilizer more than the plant uptake capacity led to a decrease in the NU_pE. The relationship between NU_tE and NNI for different dry matter values was investigated. The results showed that at constant NNI values, NU_tE increased non-linearly with increasing dry biomass production. Higher or lower NU_tE can be expected as the result of lettuce grown under N deficiency (NNI <1) or luxury consumption (NNI >1) conditions, respectively. Also, the critical nitrogen utilization efficiency curve (NU_tE_c) discriminated well between different N treatments. Under the optimal nitrogen nutrition conditions (NNI = 1), the critical value of NU_tE for lettuce was equal to 24 (g g^{-1} N).

Conclusion

This study demonstrates that N application rates and availability significantly impact NU_tE, NU_pE, and the NNI in lettuce. Higher NU_tE values were observed in control treatments compared to those with high N application rates, indicating that excessive N application does not enhance efficiency. The NNI values, indicating nitrogen status, showed that NU_tE increased non-linearly with dry biomass at constant NNI, highlighting the need to balance nitrogen supply with crop demand. To enhance lettuce nitrogen use efficiency, it is essential to consider both NNI and biomass production, enabling precise N management to maximize yield while minimizing environmental impact. By monitoring NNI, farmers can adjust nitrogen applications to ensure the crop is neither deficient nor experiencing luxury consumption of nitrogen, thus avoiding inefficiency and potential environmental pollution. Implementing this knowledge, growers can fine-tune fertilization schedules and quantities to match the specific growth stages and nutrient demands of the lettuce crop, leading to more sustainable and efficient agricultural practices. Ultimately, integrating these insights into practical farming can contribute to better resource use, reduced costs, and enhanced environmental conservation, fostering a more sustainable agricultural system**.**

نشریه علوم باغبانی ایران، دوره ۵۵، شماره ۱

انتشارات دانشگاه تهران

شاپا الکترونیکی: ۷۹۳۰-۲۴۲۳

Homepage: http://ijhs.ut.ac.ir//

ارزیابی شاخص بهره‌وری کاربرد کود نیتروژن و تحلیل ارتباط آن با شاخص تغذیه نیتروژن در کاهو

حدیثه رحیمی خوب[۱] | مجتبی دلشاد[۲]✉ | رومینا حبیبی[۳]

۱. دکتری تخصصی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی ، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: h.rahimikhoob@ut.ac.ir

۲. گروه علوم باغبانی ، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: delshad@ut.ac.ir

۳. گروه علوم باغبانی ، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: romi.hb1375@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۳

کلیدواژه‌ها:

غلظت نیتروژن بحرانی، تغذیه گیاه، گلخانه، مدیریت کود نیتروژن.

چکیده

ارتقای بهره‌وری کاربرد کود نیتروژن (NUtE) در گیاه یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در بخش کشاورزی است. شاخص NUtE که به مفهوم مقدار زیست‌توده خشک (گرم) به ازای نیتروژن جذب شده (گرم) توسط گیاه است، تحت تاثیر عواملی مانند اقلیم و وضعیت تغذیه نیتروژن قرار دارد. بنابراین، ارائه راهکارهای مدیریتی برای افزایش NUtE می‌بایست با در نظر گرفتن وضعیت نیتروژن در گیاه انجام گیرد. در این پژوهش، رابطه‌ای بین شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) و شاخص NUtE در گیاه کاهو بر اساس مفهوم غلظت نیتروژن بحرانی استخراج شد. بدین منظور آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج، در دو دوره کشت با اعمال تیمارهای مختلف کود نیتروژن انجام شد. شاخص‌های بهره‌وری جذب (NUpE)، کاربرد و تغذیه نیتروژن برای تمامی تیمارها محاسبه شدند. نتایج نشان‌داد که شاخص NNI برای کشت اول در بازه ۰/۷۰ تا ۱/۲۲ و برای کشت دوم در بازه ۰/۶۰ تا ۱/۲۳ متغیر بود. شاخص NUtE در اثر افزایش نرخ کاربرد کود، کاهش یافت. هم‌چنین، استفاده از کود نیتروژن بیشتر از ظرفیت جذب گیاه، منجر به کاهش شاخص NUpE شد. رابطه بین شاخص NUtE و NNI به ازای مقادیر مختلف زیست‌توده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، در مقادیر ثابت NNI با افزایش زیست توده، شاخص NUtE به صورت غیرخطی افزایش یافت. هم‌چنین، نمودار بهره‌وری کاربرد نیتروژن بحرانی (NUtEc) به درستی تیمارهای با و بدون محدودیت نیتروژن را از یکدیگر متمایز نمود. در شرایط بهینه از نظر تغذیه کود نیتروژن، مقدار بحرانی شاخص NUtE برای گیاه کاهو، ۲۴ (گرم بر گرم) به‌دست آمد.

استناد: رحیمی خوب، حدیثه؛ دلشاد، مجتبی و حبیبی، رومینا (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص بهره‌وری کاربرد کود نیتروژن و تحلیل ارتباط آن با شاخص تغذیه نیتروژن در کاهو. *نشریه علوم باغبانی ایران*، ۵۵ (۱)، ۱۰۱-۸۷. DOI: https://doi.org/10.22059/ijhs.2023.352103.2076

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijhs.2023.352103.2076

مقدمه

نیتروژن یکی از مهم‌ترین نهاده‌ها برای افزایش تولید محصولات کشاورزی است. کاربرد کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن با تسریع فرآیند فتوسنتز و افزایش نرخ رشد، تولید در واحد سطح را افزایش می‌دهد. باید در نظر داشت که مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژن‌دار و مدیریت نامناسب آن، تبعات منفی زیست‌محیطی مانند آلودگی منابع آب زیرزمینی و ورود به چرخه غذایی را به‌همراه دارد (Fageria & Baligar, 2005). افزایش میزان کاربرد کود ممکن است اثر معناداری بر افزایش تولید نداشته باشد، ولی قطعا منجر به آبشویی و کاهش بهره‌وری مصرف نیتروژن (NUE[1]) خواهد شد (Ma *et al*., 2019). مدیریت پایدار کود در کشاورزی به معنای ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای نیتروژن است. هدف از مدیریت پایدار کود، تعیین نیتروژن مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر میزان تولید با کم‌ترین ریسک آلودگی است. در این راستا، شاخص‌های مدیریتی متعددی به عنوان مبنای تصمیم‌گیری تعریف و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شاخص NUE که بیانگر میزان عملکرد یا زیست‌توده تولید شده به ازای کود نیتروژن مصرف شده است، یکی از شاخص‌های پرکاربرد در زمینه مدیریت مصرف کود به‌شمار می‌رود (Bock, 1984).

شاخص NUE تحت تاثیر عوامل متعددی مانند شرایط اقلیمی، نوع کود (آلی، معدنی) و اقدامات مدیریتی قرار دارد. بدین جهت، مقایسه این شاخص بین گیاهان مختلف می‌بایست با در نظر گرفتن تمامی عوامل اثرگذار صورت گیرد. از طرف دیگر، فرآیندهای مختلفی مانند آبشویی، در برآورد شاخص NUE در نظر گرفته نشده است. به همین دلیل این شاخص به‌طور دقیق نمی‌تواند میزان بهره‌وری کاربرد کود را نشان دهد. برای درک بیشتر فرآیندهای مرتبط با جذب نیتروژن از خاک توسط گیاه و محاسبه بهره‌وری مصرف نیتروژن، Moll *et al*. (1982) شاخص NUE را ترکیبی از دو شاخص بهره‌وری کاربرد نیتروژن (NU_tE[2]) و بهره‌وری جذب نیتروژن (NU_pE[3]) معرفی کرده است. شاخص NU_tE نشان‌دهنده میزان افزایش تولید زیست‌توده به ازای نیتروژن جذب شده در گیاه است. شاخص NU_pE نیز، به‌صورت نسبت نیتروژن جذب شده توسط گیاه (تجمع یافته در گیاه) به نیتروژن فراهم شده از طریق کوددهی تعریف می‌شود.

باید در نظر داشت که میزان نیتروژن جذب شده توسط گیاه، از حاصلضرب ماده خشک تولید شده در غلظت نیتروژن گیاه به‌دست می‌آید. در نتیجه، زمانی شاخص NU_pE می‌تواند به عنوان مبنای مقایسه قرار گیرد که ماده خشک تولید شده برای گیاهان مورد مطالعه یکسان باشد (Lemaire & Gastal, 2009). علاوه بر این، شاخص NU_pE وضعیت نیتروژن (کمبود یا مازاد) را در گیاه مشخص نمی‌کند. بدین جهت، به عنوان یک شاخص مدیریتی نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، برای پایش وضعیت نیتروژن، بهبود مدیریت کود و همچنین کاهش ریسک آلودگی، ترکیب روش‌های مبتنی بر گیاه با شاخص بهره‌وری جذب نیتروژن توصیه می‌شود (Lemaire *et al*., 2008; Lemaire & Gastal, 2009).

در این راستا، محاسبه شاخص تغذیه نیتروژن (NNI[5]) و استفاده از آن برای تعیین حد کمبود، کفایت و مازاد نیتروژن به‌عنوان روشی دقیق و جامع پیشنهاد شده است (Lemaire *et al*., 2008). شاخص NNI از تقسیم غلظت واقعی نیتروژن[6] به غلظت نیتروژن بحرانی (N_c[7]) به‌دست می‌آید. غلظت نیتروژن بحرانی نیز به معنای حداقل نیتروژن مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر رشد گیاه تعریف شده است (Lemaire & Gastal, 2009). نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که استفاده از شاخص NNI برای پایش وضعیت نیتروژن در گیاه و تفسیر روابط بین شاخص‌های بهره‌وری، پیش‌بینی تولید محصول، و

1 Nitrogen use efficiency
2 Nitrogen utilization efficiency
3 Nitrogen uptake efficiency
4 Plant-based methods
5 Nitrogen nutrition index
6 Actual nitrogen concentration
7 Critical nitrogen concentration

ارزیابی پیامدهای کاربرد کود نیتروژن ضروری است (Sadras & Lemaire, 2014; Gastal *et al*., 2015; Rahimikhoob *et al*., 2020a). اگر مدیریت کود به‌گونه‌ای انجام گیرد که بین عرضه و تقاضای نیتروژن تعادل برقرار باشد، میزان شاخص NNI در طول دوره رشد همواره برابر با ۱ خواهد بود. به‌عبارت دیگر، غلظت نیتروژن تجمع یافته در گیاه مساوی با غلظت نیتروژن بحرانی است. در مقابل، شاخص NU_tE در طول دوره رشد مقدار ثابتی نیست. با توجه به تعریف شاخص NU_tE و براساس فرآیند رقیق شدن نیتروژن درگیاه، با افزایش سن و نزدیک شدن به انتهای دوره رشد، NU_tE افزایش می‌یابد (Sandaña *et al*., 2021). بنابراین، حتی اگر گیاه از لحاظ تغذیه نیتروژن دچار کمبود نباشد (NNI=1)، عوامل دیگری مثل تفاوت در شرایط محیطی و مدیریتی، با تاثیر بر میزان تولید زیست‌توده، منجر به ایجاد تغییرات در شاخص NU_tE خواهند شد.

با توجه به تعاریف و مفاهیم ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت کود در کشاورزی نمی‌تواند تنها بر اساس شاخصی واحد انجام شود، بلکه مدیریت جامع و پایدار کود می‌بایست مبتنی بر ارزیابی شاخص‌های مختلف مدیریتی به‌طور هم‌زمان صورت پذیرد.

پیشینه پژوهش

در پژوهش‌های اخیر، ارتباط بین شاخص‌های NU_tE و NNI برای چندین گیاه به دست آمده است. در کشور آمریکا پژوهشی با هدف تعیین رابطه بین شاخص‌های بهره‌وری و تغذیه نیتروژن برای گیاه سیب‌زمینی انجام شد (Bohman *et al*., 2021). نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که به ازای مقدار ثابت شاخص NNI، شاخص NU_tE در گیاه به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، شاخص‌های NNI و NU_tE برای گیاه چمن تحت تیمارهای مختلف کودی و زمان برداشت ارزیابی شدند (Sandaña *et al*., 2021). ارتباط میان شاخص‌ها توسط یک رابطه توانی توصیف شد. نتایج نشان داد که شاخص NU_tE در گیاه چمن وابسته به وضعیت تغذیه نیتروژن و تولید زیست‌توده است. در پژوهشی دیگر، کاربرد شاخص NNI در فرآیند تولید و پیش‌بینی عملکرد گیاه ریحان در شرایط گلخانه مورد مطالعه قرار گرفت (Rahimikhoob *et al*., 2024). نتایج نشان داد که شاخص NNI یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر تغییرات شاخص NU_tE در طول دوره رشد گیاه ریحان است.

تاکنون پژوهشی به‌منظور تعیین رابطه بین شاخص بهره‌وری کاربرد کود نیتروژن با شاخص تغذیه نیتروژن در گیاه کاهو تحت شرایط کنترل شده گلخانه انجام نشده است. باتوجه به روند رو به رشد جمعیت در کشور و هم‌چنین کاهش منابع آب در دسترس، بهره‌گیری از تکنولوژی کشت در محیط کنترل شده گلخانه از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش ارزیابی شاخص بهره‌وری کاربرد کود نیتروژن و تحلیل ارتباط آن با شاخص تغذیه نیتروژن برای گیاه کاهو در شرایط گلخانه بود.

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق در گلخانه پژوهشی دانشکده 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 ۸×۵ مترمربع، از نوع چند دهانه‌ای با دیواره‌های شیشه‌ای و پوشش سقف از جنس پلی‌کربنات بود. پارامترهای هواشناسی، شامل حداکثر و حداقل دما، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی به‌صورت روزانه برداشت گردیدند. سنجش

1Nitrogen dilution

متغیر دما و رطوبت با استفاده از سنسور دیجیتال مدل HTC-1 انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در گلخانه در ماه‌های آذر تا فروردین ۱۴۰۱ به‌مدت ۱۵۱ روز انجام گرفت. میانگین دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه در طول دو دوره به ترتیب برابر با ۲۰/۴۶ درجه سلسیوس و ۲۴/۳۵ درصد بود. خاک مورد استفاده در این تحقیق، بافت لوم (۴۶ درصد شن، ۳۴ درصد سیلت و ۲۰ درصد رس)، 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.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	جرم مخصوص ظاهری	شوری	اسیدیته	کربن آلی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
(درصد)	(درصد)	(گرم بر سانتی‌متر مکعب)	(دسی-زیمنس/ متر)	(pH)	(درصد)	(درصد)	(میلی-گرم/ کیلوگرم)	(میلی-گرم/ کیلوگرم)
۲۱/۲۴	۱۰/۳۶	۱/۲۳	۱/۴۶	۸/۱	۲/۴۹	۰/۲	۵۲/۵	۲۸۰

مشخصات طرح آزمایشی

آزمایش‌های گلدانی در دو دوره کشت شامل ۶ تیمار (کود اوره) و ۳ تکرار در قالب طرح کاملا تصادفی انجام گرفت. گیاه کاهو به صورت نشا در گلدان‌ها کشت شد.کوددهی به میزان صفر (تیمار شاهد)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم برهکتار انجام شد. کود اوره در ۳ نوبت با فاصله یک هفته و به میزان ۳۰، ۳۰ و ۴۰ درصد مقادیر ذکر شده به گیاهان داده شد. عملیات کوددهی در کشت اول ۱۷، ۲۲ و ۳۰ روز پس از کاشت و در کشت دوم ۱۴، ۱۹ و ۲۷ روز پس از کاشت انجام شد. به منظور جلوگیری از ایجاد تنش رطوبتی، عملیات آبیاری به‌صورت روزانه انجام پذیرفت. نحوه برآورد نیاز آبی به‌طور کامل در پژوهش پیشین آورده شده است (Habibi *et al.*, 2022). اطلاعات دقیق مربوط به تاریخ کاشت و برداشت، نرخ کاربرد کود، تاریخ کوددهی و نمونه برداری در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. اطلاعات مربوط به هر دوره کشت گیاه کاهو

دوره کشت	تاریخ کاشت/ برداشت	تیمارهای کود اوره (کیلوگرم بر هکتار)	تاریخ نمونه‌برداری (روز پس از کاشت)
اول	۲۸ آبان ۱۴۰۰ ۵ بهمن ۱۴۰۰	N0- 0	۲۵
		N1-50	۳۲
		N2-100	۳۹
		N3-150	۴۶
		N4-200	۵۳
		N5- 250	۶۰
			۶۷
دوم	۱۶ بهمن ۱۴۰۰ ۲۵ فروردین ۱۴۰۱	N0- 0	۲۸
		N1-50	۳۵
		N2-100	۴۲
		N3-150	۴۹
		N4-200	۵۶
		N5- 250	۶۳
			۷۰

اندازه‌گیری و نمونه‌برداری‌ها

نمونه‌برداری به‌صورت هفتگی و به فاصله‌ی یک هفته بعد از آخرین کوددهی انجام شد. از هر تیمار و تکرار یک گلدان به‌صورت تصادفی انتخاب و گیاه از سطح خاک قطع شد. بوته‌های کاهو درون پاکت گذاشته شدند و در داخل آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت سه روز خشک شدند. زیست‌توده خشک گیاه توزین و سپس آسیاب شد. میزان نیتروژن کل در هر تیمار نیز با استفاده از روش کجلدال (Kjeldahl, 1883) به‌دست آمد.

شاخص تغذیه نیتروژن

به‌طور کلی، تولید زیست‌توده ارتباط مستقیمی با میزان نیتروژن جذب شده از خاک توسط گیاه دارد (Plénet & Lemaire, 2000). با توجه به عدم قطعیت در مورد میزان جذب و ذخیره نیتروژن در بافتهای گیاه، استفاده از یک مفهوم جامع و گیاه‌محور به‌منظور تشخیص کمبود یا فراوانی کود نیتروژن ضروری است. مفهوم غلظت نیتروژن بحرانی به معنای حداقل نیتروژن مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر زیست‌توده گیاه به‌عنوان یک الگوواره علمی در مطالعات کشاورزی مطرح شده است. بر این اساس، رابطه بین نیتروژن بحرانی و زیست‌توده خشک[1]گیاه توسط یک معادله غیرخطی بیان می‌شود (Plénet & Lemaire, 2000).

رابطه ۱)

$$\%N_c = aDM^{-b}$$

در رابطه ۱، DM مقدار ماده خشک اندام هوایی گیاه بر حسب تن در هکتار و N_c غلظت نیتروژن بحرانی (درصد)، a و b ضرایب معادله هستند که برای نوع، واریته گیاه، و شرایط اقلیمی خاص منطقه با استفاده از روش‌های آماری به‌دست می‌آیند.

منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی (CNDC) می‌تواند برای محاسبه شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) و به عبارتی کمی نمودن وضعیت نیتروژن در گیاه مورد استفاده قرار گیرد (Lemaire *et al*., 1997). این شاخص از محاسبه نسبت بین غلظت واقعی نیتروژن جذب شده و غلظت نیتروژن بحرانی در گیاه به‌دست می‌آید (Lemaire *et al*., 2008).

رابطه ۲)

$$NNI = \frac{N_a}{N_c} = \frac{N_a}{aDM^{-b}}$$

در رابطه ۲، N_c و N_a به ترتیب غلظت نیتروژن بحرانی و غلظت واقعی نیتروژن در گیاه بوده که، هر دو بر حسب درصد یا کیلوگرم در هکتار بیان می‌شوند. مقادیر NNI نزدیک به ۱ نشان‌دهنده عدم محدودیت نیتروژن است. مقادیر بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده مصرف بیش از حد نیتروژن و مقادیر کم‌تر از ۱ بیان کننده شرایط کمبود نیتروژن است. در این تحقیق مقادیر نیتروژن بحرانی و شاخص NNI از رابطه ۳ محاسبه شد (Habibi *et al*., 2022).

رابطه ۳)

$$\%N_c = 4.84DM^{-0.11}$$

شاخص‌های بهره‌وری جذب و کاربرد نیتروژن

Molle *et al*. (1982) شاخص NUE را به‌عنوان تابعی از دو شاخص NU_tE و NU_pE بیان نموده‌اند (روابط ۳ و ۴). شاخص NU_pE نشان‌دهنده قابلیت گیاه در جذب نیتروژن از خاک و شاخص NU_tE بیانگر قابلیت گیاه در استفاده از نیتروژن برای تولید زیست‌توده است.

1. Dry matter

2Critical nitrogen dilution curve

$$NU_tE = \frac{DM}{N_a}$$ رابطه ۳)

$$NU_pE = \frac{N_a - N_0}{N_{Input}}$$ رابطه ۴)

در روابط ۳ و ۴، N_a مقدار نیتروژن جذب شده توسط گیاه (کیلوگرم در هکتار)، N_0 مقدار نیتروژن جذب شده توسط گیاه در تیمار شاهد (کیلوگرم در هکتار)، N_{Input} میزان نیتروژن داده شده به گیاه از طریق کوددهی (کیلوگرم در هکتار) و DM زیست‌توده تولید شده (کیلوگرم در هکتار) است.

تعیین رابطه بین NU_tE و NNI

مشابه با روند تعیین معادله و منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی (CNDC) که به‌طور کامل در تحقیق Rahimikhoob *et al.* (2020b) توضیح داده شده است، منحنی دیگری با عنوان منحنی جذب نیتروژن بحرانی (CNUC) را می‌توان استخراج[1] نمود، با این تفاوت که غلظت نیتروژن به‌جای درصد، بر حسب کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته می‌شود. میزان نیتروژن تجمع یافته در بافت گیاه، از حاصلضرب ماده خشک تولید شده (تن در هکتار) در غلظت نیتروژن (درصد) از رابطه زیر به‌دست می-آید:

$$N_a = \%N_a \times DM \times 10$$ رابطه ۵)

در رابطه بالا، N_a و $\%N_a$ به ترتیب نیتروژن موجود در گیاه بر حسب کیلوگرم در هکتار و درصد هستند. متغیر DM معرف زیست‌توده خشک گیاه (تن در هکتار) و عدد ۱۰ نیز برای تبدیل واحد استفاده شده است. به همین ترتیب، غلظت نیتروژن بحرانی (رابطه ۱) نیز از طریق رابطه ۶ بر حسب کیلوگرم در هکتار به‌دست می‌آید.

$$N_c = 10 \times a \times DM^{(1-b)}$$ رابطه ۶)

چنانچه رابطه ۲ به صورت رابطه ۷ نوشته شود، رابطه زیر به‌دست خواهد آمد:

$$N_a = NNI \times N_c = NNI \times 10 \times a \times DM^{(1-b)}$$ رابطه ۷)

با جای‌گذاری رابطه ۷ در رابطه ۳، رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

$$NU_tE = \frac{DM}{NNI \times 10 \times a \times DM^{(1-b)}} = 1000 \times (NNI \times 10 \times a \times DM^{-b})^{-1}$$ رابطه ۸)

رابطه ۸ نشان‌دهنده ارتباط بین شاخص NNI با NU_tE است. در این رابطه، DM بر حسب تن در هکتار است. حد بحرانی بهره‌وری جذب نیتروژن (NU_tE_c) زمانی حاصل می‌شود که مقدار NNI برابر با ۱ باشد، بنابراین رابطه ۹ به‌دست می‌آید:

$$NU_tE_c = 1000 \times (10 \times a \times DM^{-b})^{-1}$$ رابطه ۹)

طبق رابطه (۸)، میزان شاخص NU_tE بستگی به مقادیر NNI و پارامترهای a و b دارد.

یافته های پژوهش

[1] Critical nitrogen uptake curve

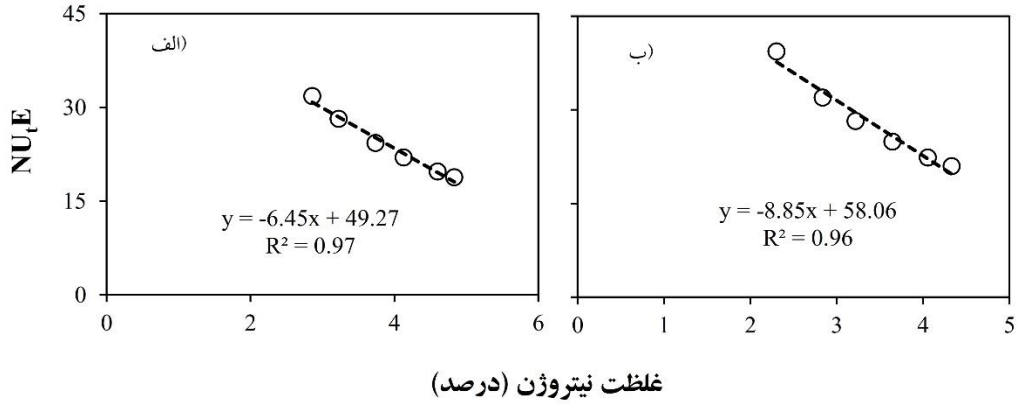
مقادیر شاخص‌های NNI، NU_tE و NU_pE برای هر دوره کشت تحت تیمارهای مختلف کود نیتروژن در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شاخص NNI برای کشت اول در بازه ۰/۷۰ تا ۱/۲۲ و برای کشت دوم در بازه ۰/۶۰ تا ۱/۲۳ متغیر بود. مقدار بهینه این شاخص در کشت اول و دوم برای تیمار N3 به‌دست آمد. در نتیجه، این تیمار به‌عنوان بهترین تیمار از نظر نرخ کاربرد کود شناخته شد. به‌طور کلی، با افزایش نرخ کاربرد کود، شاخص NNI در گیاه افزایش یافته است. نتیجه مشابه در تحقیقات دیگر برای گیاهانی مانند گندم (Justes *et al*., 1994)، ذرت (Plénet & Lemaire, 2000) و برنج (Ata-Ul-Karim *et al*. 2013) نیز گزارش شده است.

جدول ۳ . شاخص‌های بهره‌وری جذب، کاربرد و تغذیه نیتروژن تحت تیمارهای مختلف کوددهی برای کشت اول و دوم کاهو.

تیمارها	NNI	NU_tE (گرم بر گرم)	NUpE (گرم بر گرم)
کشت اول			
N0 (صفر کیلوگرم بر هکتار)	۰/۷۰	۳۱/۷۵	–
N1 (۵۰ کیلوگرم بر هکتار)	۰/۸۰	۲۸/۱۴	۰/۵۲
N2 (۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار)	۰/۹۴	۲۴/۲۶	۰/۶۸
N3 (۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار)	۱/۰۱	۲۱/۹۹	۰/۷۰
N4 (۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار)	۱/۱۶	۱۹/۷۲	۰/۶۴
N5 (۲۵۰ کیلوگرم بر هکتار)	۱/۲۲	۱۸/۷۹	۰/۵۶
کشت دوم			
N0 (صفر کیلوگرم بر هکتار)	۰/۶۰	۳۹/۳۶	–
N1 (۵۰ کیلوگرم بر هکتار)	۰/۷۷	۳۱/۹۷	۲/۳۰
N2 (۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار)	۰/۸۹	۲۸/۲۰	۲/۶۹
N3 (۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار)	۱/۰۱	۲۴/۸۹	۲/۸۷
N4 (۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار)	۱/۱۶	۲۲/۳۶	۲/۴۱
N5 (۲۵۰ کیلوگرم بر هکتار)	۱/۲۳	۲۰/۹۵	۲/۰۹

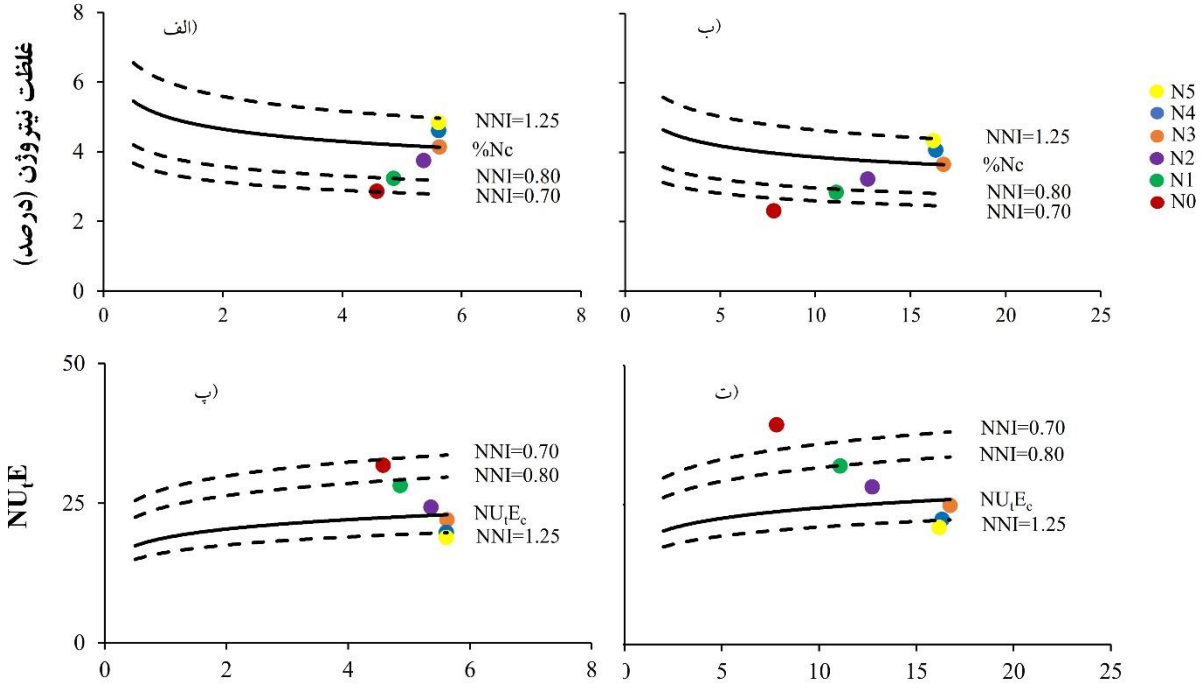
مقدار شاخص NU_tE به‌طور میانگین بین دو دوره کشت، برای تیمار بدون کاربرد کود نیتروژن ۳۵/۵۶ گرم بر گرم و برای تیمار کاربرد کود ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار برابر با ۱۹/۸۷ گرم بر گرم به‌دست آمد. کاهش شاخص NU_tE در اثر افزایش نرخ کاربرد کود، در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است (Dordas, 2011; Bohman *et al*., 2021). به‌عنوان مثال، در پژوهشی که در کشورهای فرانسه و انگلستان انجام شده است، شاخص NU_tE برای گیاه گندم تحت تیمارهای صفر و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌ترتیب برابر با ۵۵ و ۳۶ گرم بر گرم به‌دست آمد (Gaju *et al*., 2011).

نمودار تغییرات شاخص NU_tE تحت تاثیر غلظت نیتروژن موجود در گیاه کاهو در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، یک ارتباط معکوس بین این دو متغیر وجود دارد. به‌عبارت دیگر، با افزایش غلظت نیتروژن در گیاه، شاخص NU_tE کاهش یافته است.



شکل ۱. رابطه بین غلظت نیتروژن در گیاه با شاخص بهره‌وری کاربرد نیتروژن در کشت اول (الف)، کشت دوم (ب) در کاهو. (منبع: یافته‌های تحقیق)

به‌منظور درک بهتر رابطه بین شاخص NU_tE با NNI و بررسی تاثیر میزان زیست‌توده بر این دو شاخص، نمودارهایی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف NNI (۰/۷، ۰/۸، ۱ و ۱/۲۵) ترسیم شدند. منحنی‌های موجود در شکل ۲ (پ و ت) بر اساس رابطه ۸ استخراج شده‌اند. نقاط روی نمودارها نیز معرف مقادیر اندازه‌گیری شده در هر کشت برای تیمارهای مختلف کودی هستند.



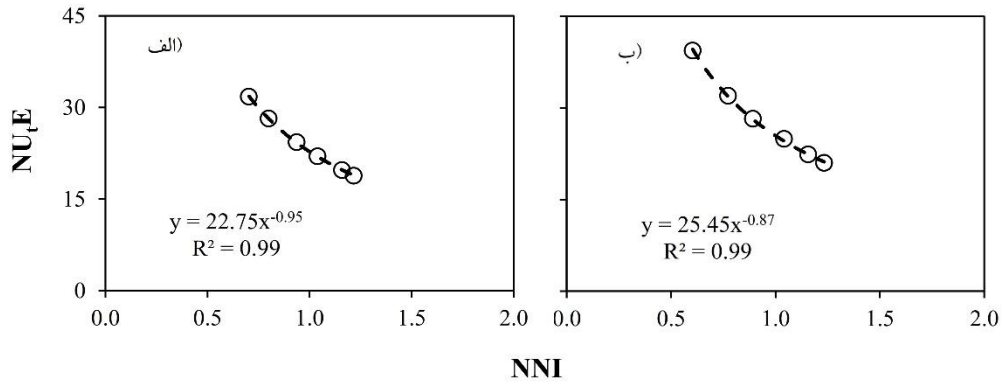
شکل ۲. رابطه بین زیست‌توده گیاه با درصد غلظت نیتروژن (الف و ب) و شاخص بهره‌وری کاربرد نیتروژن (پ و ت) در کاهو. (منبع: یافته‌های تحقیق)

مقادیر اندازه‌گیری شده (نقاط رنگی) در شکل (۲ الف و ب) نشان می‌دهد، زمانی که نیتروژن موجود در گیاه کمتر از حد بحرانی بوده (NNI<1)، میزان زیست‌توده کمتری تولید شده است. هم‌چنین کاربرد مازاد کود نیتروژن، اثر معناداری بر تولید نداشته و تنها منجر به تجمع بیش از حد نیتروژن در بافت گیاه شده است. همانطور که در شکل ۲ (نمودارهای الف و ب)

مشاهده می‌شود، رابطه بین غلظت نیتروژن در گیاه (درصد) و زیست‌توده تولید شده (تن در هکتار) به ازای مقادیر مختلف NNI غیرخطی است.

رابطه بین NU_tE و زیست‌توده گیاه در شکل ۲ (نمودارهای پ و ت) نشان داده شده است. در مقادیر یکسانی از NNI با افزایش تولید زیست‌توده، شاخص NU_tE نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین، به ازای مقدار ثابتی از زیست‌توده، با افزایش شاخص NU_tE، NNI کاهش یافته که بیانگر کمبود نیتروژن در گیاه است. به‌عبارت دیگر، هر افزایشی در شاخص NU_tE که ناشی از افزایش زیست‌توده نباشد، نشان‌دهنده شرایط تنش نیتروژن است. هم‌چنین، با توجه به مقادیر شاخص NU_tE می‌توان تیمارهای با محدودیت ($NU_tE_c < NU_tE$) و بدون محدودیت ($NU_tE_c > NU_tE$) نیتروژن را از یکدیگر تفکیک نمود. علاوه بر این، صحت رابطه توسعه داده شده در این پژوهش (رابطه ۸) با توجه به شکل ۲ کاملا مشهود است، زیرا تیمار بهینه از نظر نرخ کاربرد کود (N3) دقیقا روی منحنی بحرانی در نمودارهای غلظت نیتروژن و شاخص NU_tE قرار گرفته‌اند. البته می‌بایست در نظر داشت که ممکن است برخی از شرایط محیطی و مدیریتی تاثیر مستقیم بر جذب و کاربرد نیتروژن در گیاه داشته باشند. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آتی شرایط مدیریتی مختلف مانند کم آبیاری و تاثیر آن بر روابط توسعه داده شده مورد بررسی قرار گیرد.

علاوه بر نمودارهای کلی ترسم شده در شکل ۲، نموداری برای تعیین رابطه بین شاخص NNI با شاخص NU_tE، برای گیاه کاهو تحت کشت گلخانه‌ای ترسیم شد (شکل ۳). همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود افزایش کاربرد کود نیتروژن، و در نتیجه آن افزایش شاخص NNI منجر به کاهش شاخص NU_tE شده است. مطابق با رابطه ۸ همان‌گونه که انتظار می‌رفت، معادله به‌دست آمده برای هر دو کشت (شکل ۳) از نوع توانی و با سیر نزولی است. به عبارتی، این معادله نشان‌دهنده کاهش بهره‌وری (بازده)، در اثر کاربرد بیش از اندازه کود نیتروژن است. نتیجه مشابهی نیز در پژوهش Sandaña *et al.* (2021) گزارش شده است.



شکل ۳. رابطه بین شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) با شاخص بهره‌وری کاربرد نیتروژن در کشت اول (الف) و کشت دوم (ب) کاهو. (منبع: یافته‌های تحقیق)

با استفاده از روابط ارائه شده در شکل ۳، به ازای شاخص NNI=1 (حد بهینه تغذیه گیاه)، مقدار شاخص NU_tE به‌طور میانگین بین دو دوره کشت، در حدود ۲۴ گرم بر گرم تخمین زده می‌شود. این مقدار می‌تواند به‌عنوان حد بحرانی یا مبنا در پژوهش‌های مرتبط با تولید کاهو در گلخانه و بررسی عوامل مدیریتی دیگر بر بهره‌وری کاربرد نیتروژن مورد استفاده قرار گیرد.

بحث

نیتروژن یکی از مهم‌ترین عوامل محدودیت کننده رشد و تولید گیاه کاهو شناخته می‌شود. همانطور که نتایج این پژوهش (شکل ۲) نشان داد مقدار زیست‌توده و نیتروژن تجمع یافته در گیاه تحت تاثیر تیمارهای مختلف کاربرد کود متغیر بود. نتایج پژوهش دیگری که با هدف ارزیابی اثر کاربرد نرخ‌های مختلف کود نیتروژن بر میزان تولید و تجمع مواد غذایی انجام گرفته بود، نشان داد که افزایش نرخ کاربرد کود تاثیر قابل توجهی بر تولید زیست‌توده کاهو دارد (Barickmean et al., 2018).

رابطه بین غلظت نیتروژن در گیاه کاهو (درصد) و زیست‌توده تولید شده (تن در هکتار) به ازای مقادیر مختلف NNI، غیرخطی بود (شکل ۲. الف و ب) . این نمودار در واقع منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی یا CNDC نام دارد. منحنی CNDC نشان می‌دهد که با رشد و نمو گیاه، غلظت نیتروژن در ماده‌ی خشک کاهش می‌یابد و این کاهش، که به‌عنوان رقیق شدن نیتروژن ناشی از رشد و تفاوت غلظت نیتروژن در بافت‌های مختلف تعبیر شده تا پایان فصل رشد ادامه خواهد داشت (Lemaire *et al*., 2008). به طور کلی، رقیق شدن نیتروژن در گیاه به‌طور عمده به دلیل سایه‌اندازی برگ‌ها و تغییر در نسبت برگ به ساقه، طی دوره رشد گیاه رخ می‌دهد (Lemaire *et al*., 1997).

شاخص NU_pE بیانگر درصد نیتروژن جذب شده توسط گیاه به ازای مصرف هر کیلوگرم کود نیتروژن است. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۳، میزان شاخص NU_pE در تیمار بهینه (N3) حداکثر است. می‌توان نتیجه گرفت، در این تیمار، عرضه و جذب نیتروژن توسط گیاه در حالت تعادل قرار دارد. با کاربرد نیتروژن بیش‌تر از ظرفیت جذب گیاه، شاخص NU_pE کاهش می‌یابد. در پژوهشی شاخص‌های بهره‌وری نیتروژن برای گیاه سیب‌زمینی به‌صورت مجزا تحت تیمارهای مختلف کودی بررسی شدند (Zebarth *et al*., 2004). نتایج نشان داد که با افزایش سطح کاربرد کود از صفر تا ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، شاخص NU_pE از ۰/۷۵ به ۰/۶۸ (گرم بر گرم) کاهش یافته است.

علت اختلاف در مقادیر شاخص NU_pE بین کشت اول و دوم در این تحقیق، تفاوت در میزان زیست‌توده خشک تولید شده است. کشت دوم در ماه‌های اسفند و فروردین انجام گرفت. در این دوره مقادیر تابش، ساعت آفتابی و هم‌چنین میانگین دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه نسبت به دوره کشت اول بیشتر بود. از مقایسه شاخص‌های NU_pE و NU_tE می‌توان نتیجه گرفت که شاخص NU_pE نمی‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی جنبه‌های مختلف مدیریت کود باشد، زیرا این شاخص تحت تاثیر میزان زیست‌توده گیاه قرار داشته و اثر عوامل دیگر، مانند شرایط اقلیمی را در افزایش تولید محصول متمایز نمی‌کند. درحالی که، افزایش یا کاهش شاخص NU_tE ناشی از تغییرات مقادیر زیست‌توده تولید شده تنها در اثر کاربرد کود نیتروژن است. همانطور که نتایج به‌دست آمده در شکل ۳ نشان داد، مقدار NU_tE تحت شرایط تنش نیتروژنی (NNI<1) بیشتر از زمانی است که هیچ‌گونه کمبودی از لحاظ میزان کود نیتروژن وجود ندارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نرخ کوددهی، غلظت نیتروژن در گیاه و متعاقبا شاخص NNI افزایش یافته است. درحالی که یک روند کاهشی در شاخص NU_tE مشاهده شد. بنابراین، برای تفسیر شاخص NU_tE اگر وضعیت نیتروژن در گیاه (NNI) در نظر گرفته نشود ارزیابی اثر عوامل دیگر (شرایط محیطی، مدیریتی و گونه گیاهی) و هم‌چنین تشخیص منشأ تفاوت‌های به وجود آمده در شاخص NU_tE دشوار خواهد بود (Sadras & Lemaire, 2014).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی اجزای شاخص NUE به طور مجزا، و هم‌چنین ارزیابی ارتباط بین میزان جذب و وضعیت نیتروژن در گیاه کاهو انجام شد. وضعیت نیتروژن در گیاه با استفاده از شاخص تغذیه نیتروژن (NNI) بررسی شد. مقادیر NNI برای کشت اول و دوم محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کاربرد کود، شاخص NNI در گیاه افزایش یافته است. شاخص‌های بهره‌وری نیتروژن شامل NU_tE و NU_pE برای تیمارهای مختلف کودی محاسبه شدند. سپس، یک رابطه تئوری بین شاخص NU_tE و NNI توسعه داده شد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کاربرد کود نیتروژن، شاخص NU_tE کاهش یافت. هم‌چنین، کاربرد نیتروژن بیش‌تر از ظرفیت جذب گیاه منجر به کاهش شاخص NU_pE شد. شاخص

NU_tE بر اساس رابطه به‌دست آمده به ازای مقادیر مختلف NNI و زیست‌توده محاسبه شدند. نتایج نشان داد که رابطه توسعه داده شده در این پژوهش، به‌خوبی تیمارهای با و بدون محدودیت نیتروژن را از یکدیگر تفکیک می‌نماید. هم‌چنین، رابطه بین شاخص NU_tE با شاخص NNI در گیاه کاهو تحت شرایط گلخانه استخراج شد. در کشت گیاه کاهو تحت شرایط بهینه از نظر تغذیه کود نیتروژن (NNI = 1)، مقدار شاخص NU_tE برابر با ۲۴ (گرم بر گرم) به‌دست آمد. با توجه به ارزیابی و تحلیل‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که ارتقای بهره‌وری کاربرد کود نیتروژن و مقایسه جنبه‌های مختلف مدیریتی می‌بایست با در نظر گرفتن وضعیت موجود از لحاظ تغذیه نیتروژن صورت پذیرد.

REFERENCES

حبیبی، رومینا؛ دلشاد، مجتبی و رحیمی خوب، حدیثه (۱۴۰۱). ارزیابی وضعیت نیتروژن در گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) با استفاده از کلروفیل متر در شرایط گلخانه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۹)، ۲۱۱۱-۲۱۲۲.

رحیمی خوب حدیثه؛ سهرابی تیمور و دلشاد مجتبی. (۱۳۹۹). پیش بینی نیاز نیتروژنی گیاه ریحان در طول دوره رشد با استفاده از شاخص تغذیه نیتروژن. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱ (۸)، ۲۰۳۹-۲۰۴۹.

Ata-Ul-Karim, S.T., Yao, X., Liu, X., Cao, W., & Zhu, Y. (2013). Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches. *Field Crops Research*, 149,149–158

Bock, B.R. (1984). Efficient use of nitrogen in cropping systems. In: Hauck, R.D. (Ed.), Nitrogen in Crop Production. ASA, CSSA, SSSA, Madision, WI, 273–294.

Bohman, B., Rosen, C. & Mulla, D. (2021). Relating nitrogen use efficiency to nitrogen nutrition index for evaluation of agronomic and environmental outcomes in potato. *Field Crops Research*, 262, 108041. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.108041.

Barickman, T. C., Sublett, W. L., Miles, C., Crow, D., & Scheenstra, E. (2018). Lettuce biomass accumulation and phytonutrient concentrations are influenced by genotype, N application rate & location. *Horticulturae*, 4(3), 12.

Dordas, C. (2011). Nitrogen nutrition index and its relationship to N use efficiency in linseed. European *Journal of Agronomy*, 34(2), 124-132. DOI: 10.1016/j.eja.2010.11.005

Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97–185.

Gaju, O., Allard, V., Martre, P., Snape, J., Heumez, E., LeGouis, J., Moreau, D., Bogard, M., Griffiths, S., Orford, S., Hubbart, S., & Foulkes, M. (2011). Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes. *Field Crops Research*, 123(2), 139-152.

Gastal, F., Lemaire, G., Dur, & J. L., & Louarn, G. (2015). Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. *Crop Physiology*, 161–206.

Habibi, R., Delshad, M., & Rahimikhoob, H., (2022). Evaluation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Nitrogen Status Using Chlorophyll Meter under Greenhouse Conditions. *Iranian Journal of Soil & Water Research*, 53(9), 2111-2122. (In Persian)

Justes, E., Mary, B., Meynard, J. M., Machet, J. M., Thelier-Huch'e, L. (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74, 397–407.

Kjeldahl, J. (1883). Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 22, 366–382.

Lemaire, G., & Meynard, J.M. (1997). Use of the Nitrogen Nutrition Index for analysis of agronomical data. In: G. Lemaire (Ed.), Diagnosis on the Nitrogen Status in Crops, Heidelberg, Springer-Verlag.

Lemaire, G, Marie-Hélène J, & François G. (2008). Diagnosis Tool for Plant and Crop N Status in Vegetative Stage: Theory & Practices for Crop N Management. *European Journal of Agronomy* .28 (4), 614–24.

Lemaire, G., & Gastal, F. (2009). Quantifying crop response to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In V. O. Sadras, V., & D. Calderini (Eds.), Crop Physiology. *Applications for Genetic Improvements and Agronomy* (pp. 171–211). Academic Press, San Diego.

Marino, M. A., Mazzanti, A., Assuero, S. G., Gastal, F., Echeverría, H. E., & rade, F. (2004). Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter-spring growth of annual ryegrass. *Agronomy Journal*, 96, 601–607.

Ma, G., Liu, W., Li, S., Zhang, P., Wang, C., Lu, H., Wang, L., Xie, Y., Ma, D. & Kang, G. (2019). Determining the Optimal N Input to Improve Grain Yield and Quality in Winter Wheat with Reduced Apparent N Loss in the North China Plain. *Frontiers in Plant Science*, 10.

Moll, R.H., Kamprath, E.J., & Jackson, W.A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74, 562–564.

Plénet, D., & 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., & Delshad, M. (2020a). Estimation of In-season Basil Nitrogen Requirement Using the Nitrogen Nutrition Index. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(8): 2039-2049. (In Persian)

Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020b). Development of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Basil (*Ocimum basilicum* L.) Under Greenhouse Conditions. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 20, 881-891. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00174-5

Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., Delshad, M., & Balkhi, A. (2024). Toward potential applications of the nitrogen nutrition index in Sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) production under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 47(1), 49-64.

Sadras, V. O., & Lemaire, G. (2014). Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research*. 164, 54–64.

S&aña, P., Lobos, I., Pavez, P., & Moscoso, C. (2021). Nitrogen nutrition index and forage yield explain nitrogen utilization efficiency in hybrid ryegrasses under different nitrogen availabilities. *Field Crops Research*, 265, 108101.

Zebarth, B. J., Tai, G., Tarn, R., de Jong, H., & Milburn, P. H. (2004). Nitrogen use efficiency characteristics of commercial potato cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*, 84, 589–598.