


Construction of Critical Nitrogen Dilution Curve Based on Stem Dry Matter in Rapeseed

Seyed Ataollah Siadat¹, Abolfazl Derakhshan^{2*} 

- 1- Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Bavi, Iran
- 2- Ph.D. Graduate of Agronomy, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Bavi, Iran

Citation: Siadat, S. A., & Derakhshan, A. (2022). Construction of critical nitrogen dilution curve based on stem dry matter in rapeseed. *Plant Productions*, 45(1), 143-156.

Abstract

Introduction

There are mathematical equations to distinguish nitrogen (N) status based on the concept of critical nitrogen (N_c), the lowest N concentration required to achieve maximum growth. The N_c demonstrates the ideal N status in crops. Whenever crop N concentration is greater than the N_c , at that time N is in surplus, but if it is less, then N is inadequate. The contribution of the stem dry matter (SDM) toward total crop dry matter is significantly higher than that of other tissues, therefore, it is the most determinant factor for N dilution of the whole plant. The objectives of this research were to construct a N_c dilution curve based on SDM and to evaluate the plausibility of this curve for assessment of the N nutrition status of spring rapeseed.

Materials and Methods

A field experiment was conducted with seven levels of N fertilizer application (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 kg N ha⁻¹) in which the amount of the SDM and stem N concentration (SNC) of two spring rapeseed cultivars (Hyola 401 and Dalgan) were measured during the growing season. The approach proposed by Justes *et al.* (1994) was used to construct the SDM basis N_c dilution curve. The N nutrition index (NNI) on each sampling date was calculated by dividing actual SNC by stem N_c concentration. The accumulated N deficit (N_{and}) in rapeseed stems for each sampling

* **Corresponding Author:** Abolfazl Derakhshan
E-mail: derakhshan.abo@gmail.com

date was determined by subtracting the N accumulation in stems under the N_c condition from actual N accumulation in stems under different N fertilizer application rates.

Results and Discussion

Overall, both SDM and SNC showed an increasing and decreasing trend with increasing crop age, respectively, regardless of fertilizer treatment. The N_c dilution curve of both cultivars during the growing season was described by the equation $N_c = 5.71SDM^{-0.29}$. Both NNI and N_{and} criteria were able to diagnosis the N deficiency or excess in the spring rapeseed cultivars studied. At all of the crop growth stages, there was a significant positive correlation between the difference value of the N application rate (ΔN) and the difference value of NNI (ΔNNI). For both cultivars studied, however, the positive correlation between ΔN and differences in N_{and} among N fertilizer treatments (ΔN_{and}) was not significant at early growth stages. In any case, for accurate management of N fertilizer during the growing season, it is sufficient to determine only one of the two NNI or N_{and} criteria per day from planting to silique formation, and then the N fertilizer required for maximum growth is calculated based on the equations presented to describe the relationships between ΔN and ΔNNI or between ΔN and ΔN_{and} . The most important application of the N_c dilution curve is to determine the N requirement of crops during the growing season under variable field conditions. These curves can be used as ideal and economically efficient tools for accurate management of fertilizer in the field, which is very important from the aspect of environmental protection and human health. Both NNI and N_{and} were well able to distinguish the N status of spring rapeseed.


Conclusion

The present N_c dilution curve based on SDM provides an insight into N nutrition status in spring rapeseed crop and can serve as a novel tool to improve N fertilization management in spring rapeseed.

Keywords: Nitrogen deficiency, Nitrogen nutrition index, Nitrogen use optimization, Precise nitrogen management



ساخت منحنی رقیق شدن نیتروژن بحرانی در کلزا بر پایه ماده خشک ساقه

سید عطااله سیادت^۱، ابوالفضل درخشان^{۲*} 

۱- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، باوی، ایران
۲- دانش‌آموخته دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، باوی، ایران

چکیده

مصرف بی‌رویه کود نیتروژن نگرانی‌ها در مورد سلامت انسان و پایداری محیط‌زیست را افزایش داده است. مدل‌های ریاضی توصیف‌کننده رقیق شدن نیتروژن در بافت‌های گیاهی در طول دوره رشد را می‌توان برای برآورد وضعیت تغذیه و نیاز نیتروژنی گیاه در طی فصل استفاده کرد. این مطالعه در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ با هدف ساخت منحنی رقیق شدن نیتروژن بحرانی (N_c)؛ حداقل غلظت نیتروژن لازم برای رشد حداکثر) بر پایه ماده خشک ساقه در کلزای بهاره در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. آزمایش مزرعه‌ای با هفت سطح مصرف صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار انجام گرفت و ماده خشک و غلظت نیتروژن ساقه دو رقم کلزای بهاره (هایولا ۴۰۱ و دلگان) در طی فصل رشد اندازه‌گیری شد. رقیق شدن نیتروژن بحرانی هر دو رقم در طی فصل رشد توسط یک منحنی با معادله $N_c = 5.71SDM^{0.29}$ توصیف شد. شاخص تغذیه نیتروژنی (NNI) و کمبود نیتروژن تجمعی (N_{and}) به خوبی قادر به تشخیص کمبود یا بیش‌بود غلظت نیتروژن در گیاه بودند. در همه مراحل رشدی گیاه، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین تفاوت مصرف نیتروژن (ΔN) و تفاوت NNI میان تیمارهای کودی (ΔN_{and}) وجود داشت. با این حال، همبستگی مثبت بین ΔN و تفاوت N_{and} میان تیمارهای کودی (ΔN_{and}) در مراحل ابتدایی رشد معنی‌دار نبود. به هر حال، برای مدیریت دقیق نیتروژن در طی فصل تنها کافی است یکی از دو معیار NNI یا N_{and} در هر روز از کاشت تا تشکیل خورجین‌ها تعیین شود و نیتروژن مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر رشد بر اساس معادله‌های ارائه‌شده جهت توصیف روابط بین ΔN و ΔNNI یا ΔN و ΔN_{and} محاسبه گردد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی مصرف نیتروژن، شاخص تغذیه نیتروژنی، کمبود نیتروژن، مدیریت دقیق نیتروژن

* نویسنده مسئول: ابوالفضل درخشان

رایانامه: derakhshan.abo@gmail.com



مقدمه

نیتروژن (N) مهم‌ترین ماده مغذی مورد نیاز برای رشد گیاه است. از این رو مصرف بی‌رویه آن در کشاورزی فشرده به ابزاری برای تضمین سودآوری در خاک‌های کم حاصلخیز تبدیل شده است (Ata-Ul-Karim et al., 2013). مصرف کود N در طی ۴۰ سال گذشته در سراسر جهان به موازات ۲ برابر شدن تولید مواد غذایی در حدود ۷ برابر افزایش یافته است (Gastal et al., 2015). در مقابل، کاربرد بیش از حد کود N منجر به ایجاد یک سری مشکلات زیست‌محیطی مانند اسیدی شدن خاک، اوتریفیکاسیون و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است (Ju et al., 2009). این وضعیت نگرانی‌ها در مورد پایداری محیط‌زیست و سلامت انسان را افزایش داده است (Eftekhari and Heidari, 2014; Kohanmoo and AghaAlikhani, 2014).

تشخیص وضعیت N گیاه زراعی در طی فصل رشد یک روش کلیدی برای بهینه‌سازی مدیریت کود است (Ata-Ul-Karim et al., 2014). در این راستا، مفهوم نیتروژن بحرانی (Critical nitrogen) (N_c) به‌عنوان یک رویکرد تحلیلی برای تشخیص وضعیت N گیاه ارائه شده است که به‌صورت حداقل غلظت N مورد نیاز برای دستیابی به رشد حداکثر تعریف می‌شود (Justes et al., 1994). نتایج مطالعات قبلی حاکی از آن است که غلظت N موجود در بافت‌های گیاهی با افزایش ماده خشک گیاه حتی مواقعی که مصرف N به‌صورت تجملی است، کاهش می‌یابد (de Oliveira et al., 2017; Zhao et al., 2013). این پدیده را می‌توان به افزایش سن گیاه و به‌تبع آن تغییر نسبت بافت‌های متابولیکی و ساختاری نسبت داد (Lemaire et al., 2008). کاهش غلظت N برای نخستین بار توسط یک تابع توانی منفی بر پایه تجمع ماده خشک در بخش هوایی یونجه به شرح زیر توصیف شده است (Lemaire and Salette, 1984):

$$N_c = \alpha W^{-\beta} \quad (1)$$

که W، ماده خشک بخش هوایی؛ N_c، غلظت N در بخش هوایی؛ α، غلظت N وقتی W معادل با یک تن در هکتار است و β، کاهش غلظت N با افزایش W را نشان می‌دهد.

منحنی رقیق شدن N_c بر پایه ماده خشک بخش هوایی برای گونه‌های گیاهی مختلفی مانند گندم (Yue et al., 2012)، برنج (Ata-Ul-Karim et al., 2013; He et al., 2017) و ذرت (Zhao et al., 2017) توسعه داده شده است. با وجود این، باید توجه داشت که تسهیم ماده خشک میان بافت‌های مختلف گیاهی بر رابطه آلومتریک بین غلظت N و وزن تأثیر می‌گذارد و شکل منحنی رقیق شدن N را تغییر می‌دهد و از این رو پذیرش آن را به‌عنوان یک روش قابل اعتماد محدود می‌سازد (Ata-Ul-Karim et al., 2014). در طول دوره رشد رویشی، سهم ماده خشک ساقه (stem dry matter) نسبت به ماده خشک کل گیاه به مقدار قابل توجهی بالاتر از سهم ماده خشک برگ است، لذا به‌نظر می‌رسد می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌تری برای توصیف رقیق شدن N در کل گیاه باشد (de Oliveira et al., 2013). بنابراین، ایده استفاده از منحنی رقیق شدن N_c بر پایه SDM ممکن است رویکرد بهتری نسبت به روش‌های مبتنی بر ماده خشک کل گیاه یا برگ جهت تعیین وضعیت تغذیه N گیاه زراعی در طول فصل رشد باشد (Ata-Ul-Karim et al., 2014). لذا، هدف از این پژوهش توسعه منحنی رقیق شدن N_c بر پایه SDM و ارزیابی معقول بودن این منحنی برای تعیین وضعیت تغذیه N دو رقم کلزای بهاره بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. مقدار مصرف کود در هفت سطح صفر (N0)، ۵۰ (N1)، ۱۰۰ (N2)، ۱۵۰ (N3)، ۲۰۰ (N4)، ۲۵۰ (N5) و ۳۰۰ (N6) کیلوگرم N خالص در هکتار (از منبع اوره) به‌عنوان عامل اصلی و دو رقم کلزای بهاره هایولا ۴۰۱ و دلگان به‌عنوان سطوح عامل فرعی انتخاب شد.

بعد از انجام شخم با گاوآهن برگردان‌دار، کود پایه مورد نیاز برحسب نتایج تجزیه شیمیایی خاک مصرف شد (جدول ۱). آماده‌سازی زمین با دو مرتبه دیسک عمود بر هم، ایجاد مرز و نهر و درنهایت تسطیح دستی

ارائه شده توسط Justes et al. (1994) استفاده شد. ابتدا، نقطه‌ای که در آن رشد کلزا توسط N محدود شده بود (یعنی تیمار N-محدود)، تعیین گردید. تیمار N-محدود به عنوان تیماری در نظر گرفته شد که در آن مصرف مقادیر بیشتر N با افزایش معنی‌دار هر دوی SDM و SNC همراه بود. در مقابل، تیمار N-غیرمحدود به عنوان تیماری تعریف شد که در آن مصرف مقادیر بیشتر N به افزایش معنی‌دار SDM منتج نشد، اما در عین حال SNC را به طور معنی‌داری افزایش داد. مقادیر N_c برای هر مرحله نمونه‌برداری تخریبی به صورت زیر تعیین شد:

۱- برای هر رقم، مقادیر SDM و SNC مربوط به سطوح مختلف مصرف N با رویه GLM تجزیه واریانس و به روش LSD محافظت شده در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه میانگین شد.

۲- یک رابطه رگرسیون ساده خطی به داده‌های تیمارهای N-محدود برازش داده شد (خطوط مورب).

۳- حداکثر SDM با میانگین‌گیری از مقادیر SDM تیمارهای N-غیرمحدود محاسبه شد (خطوط عمودی).

۴- مقدار N_c با استفاده از مختصات نقطه تقاطع خطوط مورب و عمودی در هر مرحله نمونه‌برداری تخریبی تعیین شد.

۵- از یک تابع آلومتری (معادله توانی منفی) برای تعیین رابطه بین N_c و SDM استفاده شد.

شاخص تغذیه نیتروژنی (Nitrogen Nutrition Index (NNI)

این شاخص برای هر مرحله نمونه‌برداری تخریبی با تقسیم SNC مشاهده شده بر مقدار N_c ساقه محاسبه شد (Ziadi et al., 2008)، یعنی:

$$NNI = \frac{SNC}{N_c} \quad (2)$$

مقدار اختلاف NNI میان تیمارهای مختلف N (ΔNNI) طبق روش پیشنهاد شده توسط Ata-Ul-Karim et al. (2013) به شرح زیر محاسبه شد:

$$\Delta NNI = NNI_i - NNI_{ck} \quad (3)$$

کرت‌ها با شن‌کش تکمیل شد. سپس، دو رقم کلزای بهاره در تاریخ ۲۷ آبان در کرت‌های فرعی به طول ۲/۵ متر و عرض ۳ متر کشت شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت معادل ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و کاشت بذرها با دست در یک بستر بذر مسطح صورت پذیرفت. پس از استقرار گیاهچه‌ها، بوته‌های اضافی تنک و تراکم گیاهی معادل ۸۰ بوته در متر مربع تنظیم شد. در هر تکرار آزمایش، بین کرت‌های فرعی یک متر و بین کرت‌های اصلی دو متر فاصله در نظر گرفته شد.

کود N لازم برای هر یک از سطوح فاکتور کودی به چهار بخش تقسیم و یک بخش از آن در مرحله ۳-۲ برگی (۳ دی)، دو بخش از آن قبل از شروع ساقه رفتن (۲۵ دی) و یک بخش در مرحله ظهور اولین گل‌ها روی ساقه اصلی (۱۵ بهمن) به روش نواری در عمق حدود دو سانتی‌متری خاک و در فاصله‌ای حدود ۵ سانتی‌متر از هر ردیف کاشت مصرف شد. آزمایش در شرایط آبیاری بهینه (پس از حدود ۴۰ درصد تخلیه رطوبت در دسترس خاک) و عاری از تنش‌های زنده انجام گرفت.

اندازه‌گیری‌ها

روند تغییرات ماده خشک ساقه (SDM) و غلظت N موجود در این بافت (SNC) با انجام هشت مرحله نمونه‌برداری تخریبی (S1 تا S8) به فاصله ۷-۱۰ روز از اوایل دوره رشد تا مرحله تشکیل خورجین‌ها تعیین شد. در هر مرحله، با رعایت اثر حاشیه‌ای ۵ بوته از هر کرت آزمایشی برداشت شد. مقدار ماده خشک پهنک برگ‌های سبز و ساقه (ساقه + دم‌برگ) به‌طور جداگانه پس از خشک شدن در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. پس از آسیاب ساقه‌های خشک‌شده، SNC به روش میکرو-کج‌لدال اندازه‌گیری شد (Bremner and Mulvaney, 1982).

توسعه منحنی رقیق شدن نیتروژن بحرانی

برای ساخت منحنی رقیق شدن N_c بایستی نقطه‌ای را شناسایی کرد که در آن N نه منجر به بهبود رشد گیاه و نه باعث محدود شدن آن گردد. برای این منظور از رویکرد

Table 1. Physical and chemical characteristics of the top 30-cm layer of soil at the experiment site.

Nitrogen (%)	Phosphorus (mg kg ⁻¹)	Potassium (mg kg ⁻¹)	Electric conductivity (ds m ⁻¹)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
0.03	20.31	124.00	6.30	34	48	18

در متر مربع متغیر بود. به طور کلی، افزایش مصرف N با افزایش SDM همراه بود، اما در برخی تاریخ‌های نمونه‌برداری تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای N3 تا N6 از لحاظ تأثیر بر مقدار SDM وجود نداشت یا حتی مصرف مقادیر بسیار زیاد کود (N6) به کاهش معنی‌دار آن منتج شد (شکل ۱). مقدار SNC نیز در پاسخ به افزایش مصرف N افزایش یافت، ولی در عین حال با افزایش SDM در طی دوره رشد کلزا در همه سطوح مصرف N روندی کاهشی نشان داد (شکل ۲). بسته به مرحله رشدی کلزا و تیمار کودی، SNC هیبرید هایولا ۴۰۱ از ۱/۱۷ تا ۸/۹۲ درصد و در رقم دلگان از ۱/۳۹ تا ۸/۸۵ درصد متغیر بود.

برای ساخت منحنی رقیق شدن N_c، ابتدا بر پایه رویکرد ارائه‌شده توسط Justes et al. (1994) تیمارهایی که رشد ساقه را محدود می‌ساختند، تعیین شدند. به داده‌های SNC در مقابل SDM تیمارهای N-محدود مربوط به هر یک از تاریخ‌های نمونه‌برداری به‌طور جداگانه یک تابع رگرسیون ساده خطی برازش داده شد (خطوط مورب؛ شکل ۳). مختصات نقاط برخورد خطوط مورب با خطوط عمودی (متوسط SDM در تیمارهایی که N رشد ساقه را محدود نمی‌کرد) مشخص و تابع آلومتریک به داده‌های N_c مشاهده‌شده در مقابل SDM برازش داده شد (شکل ۳). تابع توانی منفی برای هیبرید هایولا ۴۰۱ و رقم دلگان به ترتیب در حدود ۹۸ و ۹۵ درصد از تغییرات N_c در پاسخ به افزایش SDM در طی دوره رشد را توجیه کرد (شکل ۳).

که NNI_i ، مقدار NNI سطح نام مصرف N و NNI_{ck} ، مقدار NNI در تیمار کمترین سطح مصرف N است. کمبود نیتروژن تجمعی (Accumulated Nitrogen Deficit (N_{and})) در ساقه برای هر تاریخ نمونه‌برداری با کم کردن N تجمع‌یافته در ساقه تحت شرایط N_c (N_{cna}) از تجمع واقعی N در ساقه (N_{na}) در شرایط مصرف سطوح مختلف N تعیین شد (Ata-Ul-Karim et al., 2016):

$$N_{and} = N_{na} - N_{cna} \quad (4)$$

مقدار اختلاف N_{and} میان تیمارهای مختلف N (ΔN_{and}) با رابطه زیر محاسبه شد (Ata-Ul-Karim et al., 2016):

$$\Delta N_{and} = N_{and}i - N_{and}ck \quad (5)$$

که $N_{and}i$ ، مقدار N_{and} سطح نام مصرف N و $N_{and}ck$ ، مقدار N_{and} در تیمار کمترین سطح مصرف N است. برازش مدل‌های رگرسیونی به داده‌ها با رویه nlin و رسم گراف‌ها با رویه SGPLOT در نرم‌افزار SAS (نسخه 9.3) انجام شد.

نتایج و بحث

تغییرات SDM در طی زمان در شرایط مصرف سطوح مختلف N برای هر دو رقم کلزای بهاره مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده‌شده است. در هر دو رقم، کود N در همه تاریخ‌های نمونه‌برداری تأثیر معنی‌داری بر مقدار SDM داشت. مقدار SDM بسته به تاریخ نمونه‌برداری و مقدار مصرف N در هیبرید هایولا ۴۰۱ بین ۱/۷۸ و ۱۰۳۴/۰۴ گرم در مترمربع و برای رقم آزاد‌گرده‌افشان دلگان بین ۱/۷۱ و ۱۰۲۳/۰۲ گرم

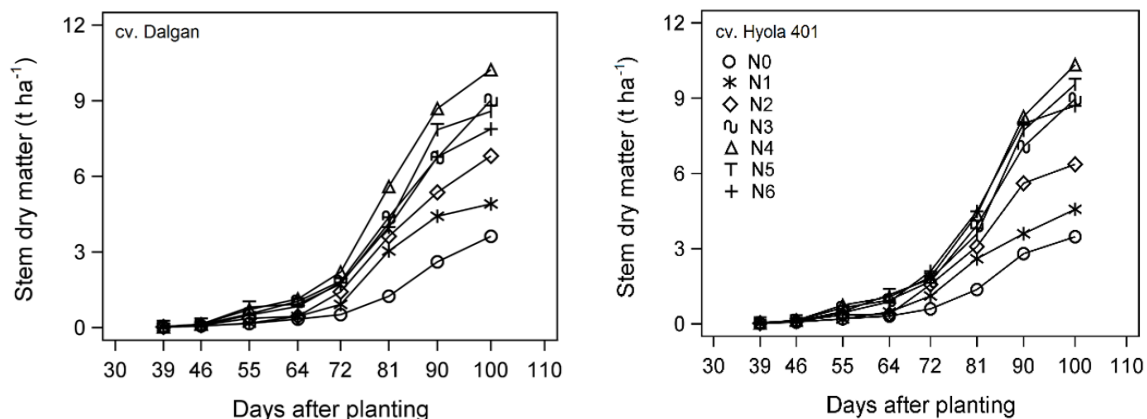


Figure 1. Changes in stem dry matter of two spring rapeseed cultivars (Dalgan and Hyola 401) with time under different levels of nitrogen utilization. Symbols represent fertilizer treatments (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 kg N ha⁻¹)

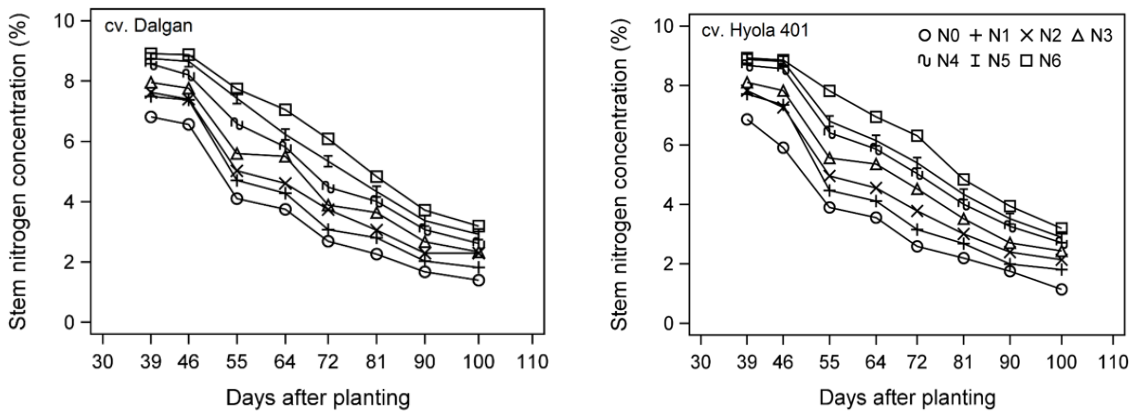


Figure 2. Changes in stem nitrogen concentration of two spring rapeseed cultivars (Dalgan and Hyola 401) with time under different levels of nitrogen utilization. Symbols represent fertilizer treatments (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 kg N ha⁻¹)

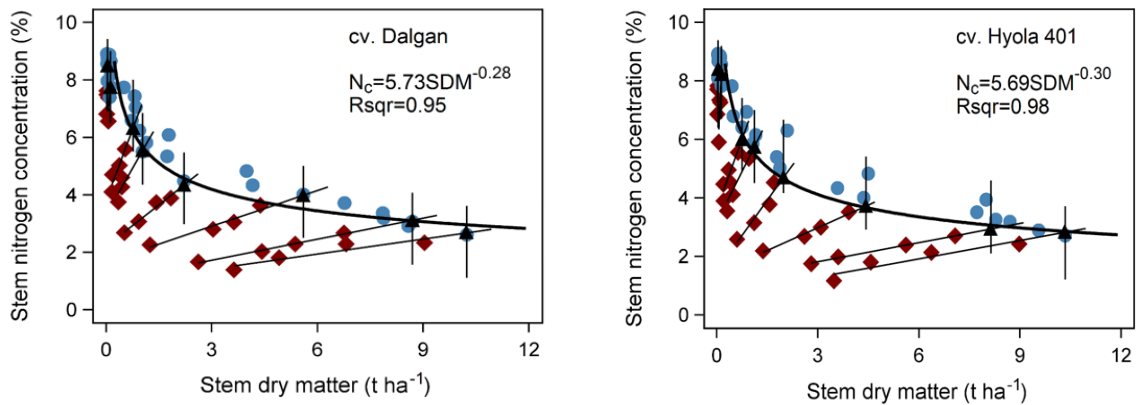


Figure 3. Critical nitrogen (N_c) values used to construct the N_c dilution curves for two spring rapeseed cultivars (Dalgan and Hyola 401). The diamond and circle symbols represent the values measured in the nitrogen-limiting and non-nitrogen-limiting treatments, respectively. The triangular symbol represents the calculated N_c value for each sampling date

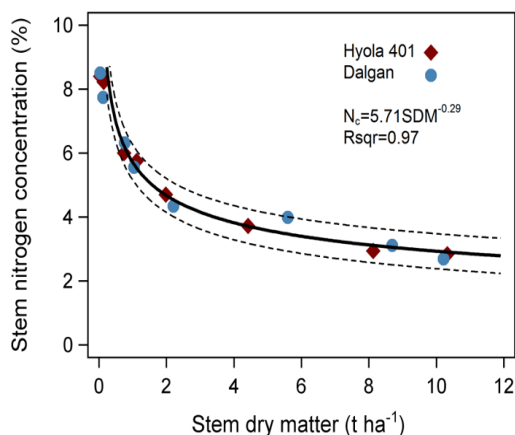


Figure 4. Fitted power function (solid line) to critical nitrogen (N_c) values against stem dry matter data of both spring rapeseed cultivars studied. The dashed lines represent the 95% prediction bands

با توجه به این که بین دو رقم کلزای بهاره مطالعه شده از نظر برآورد ضرایب α $5/0 \pm 69/10$ درصد برای هیبرید هایولا ۴۰۱ و $5/73 \pm 0/19$ درصد برای رقم دلگان) و β $0/0 \pm 30/02$ برای هیبرید هایولا ۴۰۱ و $0/28 \pm 0/03$ برای رقم دلگان) تفاوت معنی داری وجود نداشت، تابع توانی به مجموع داده های هر دو رقم برآزش یافت و با رابطه زیر مشخص شد:

$$N_c = 5.71SDM^{-0.29} \quad (6)$$

بر اساس نتایج به دست آمده غلظت N بحرانی در هنگام تجمع یک تن ماده خشک ساقه در هکتار معادل $5/71 (\pm 10/0)$ درصد تعیین شد که با افزایش SDM به صورت توانی با ضریب $0/29 (\pm 0/02)$ کاهش می یافت (شکل ۴).

نتایج اعتبار استفاده از NNI برای تشخیص وضعیت تغذیه N کلزا را تأیید می‌کند.

در هر دو رقم کلزای بهاره مطالعه‌شده و در همه تاریخ‌های نمونه‌برداری، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین ΔN و ΔNNI مشاهده شد (شکل ۶). مقدار این همبستگی (R) بسته به مرحله رشدی گیاه در هیبرید هایولا ۴۰۱ بالاتر از ۰/۹۵ و در رقم دلگان بالاتر از ۰/۹۸ بود. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که در هر دو رقم می‌توان تغییرات ΔN با ΔNNI را با یک معادله خطی ساده به صورت $\Delta N = A \times \Delta NNI + B$ توضیح داد. لازم به ذکر است که میان تاریخ‌های نمونه‌برداری (S1-S8) تفاوت‌های معنی‌داری از لحاظ برآورد شیب (A) و عرض از مبدأ (B) این خط رگرسیونی وجود داشت (شکل ۶). لذا، تغییرات این دو با روزهای پس از کاشت (DAP) بررسی و با توابع مناسبی توصیف شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ضریب B برای هر روز از دوره رشد هیبرید هایولا ۴۰۱ با رابطه $B = -504.62 + 14.35DAP$ و $R^2 = 0.099$ و در رقم دلگان با رابطه $B = -298.43 + 9.05DAP - 0.065DAP^2$ (با $R^2 = 0.74$) و $P = 0.03$ قابل تعیین بود. ضریب A را نیز می‌توان برای هر روز از چرخه رشد در هیبرید هایولا ۴۰۱ با تابع $A = 4217.84 - 98.32DAP + 0.619DAP^2$ (با $R^2 = 0.92$) و در رقم دلگان با تابع $A = 3898.58 - 89.05DAP + 0.559DAP^2$ (با $R^2 = 0.89$ و $P < 0.01$) تعیین نمود. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که بر پایه رابطه بین ΔN و ΔNNI امکان مدیریت دقیق و توصیه کود N مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر رشد در هر روز از چرخه رشد کلزای بهاره وجود دارد.

مقادیر NNI به‌دست‌آمده برای تیمارهای مختلف کودی، تاریخ‌های نمونه‌برداری و دو رقم کلزای بهاره مطالعه‌شده در شکل ۵ نشان داده‌شده است. NNI معیاری از شدت تنش N پس از مواجه شدن گیاه با کمبود N است (Yao et al., 2014a). تغذیه N گیاه وقتی $NNI = 1$ باشد بهینه فرض می‌شود، درحالی‌که $NNI > 1$ نشان‌دهنده مصرف لوکس و $NNI < 1$ بیانگر کمبود N در گیاه است. در هر دو رقم، تفاوت‌های قابل‌توجهی میان تیمارهای کودی و تاریخ‌های نمونه‌برداری از لحاظ مقدار NNI محاسبه‌شده وجود داشت (شکل ۵). NNI در پاسخ به افزایش مقدار مصرف N افزایش یافت و بسته به مرحله رشدی گیاه در هیبرید هایولا ۴۰۱ دامنه‌ای بین ۰/۴۱ (۱۰۰ روز پس از کاشت در تیمار N0) و ۱/۳۴ (۷۲ روز پس از کاشت در تیمار N6) و در رقم دلگان دامنه‌ای بین ۰/۵۲ (۱۰۰ روز پس از کاشت در تیمار N0) و ۱/۴۰ (۷۲ روز پس از کاشت در تیمار N6) را شامل بود. در هیبرید هایولا ۴۰۱، NNI پس از ۳۶ یا ۴۶ روز از کاشت در تیمارهای N3 و N4، پس از ۶۴ روز از کاشت در تیمار N4، پس از ۷۲ روز از کاشت در تیمار N3 و پس از ۱۰۰ روز از کاشت در تیمارهای N4 و N5 نزدیک به یک بود. در رقم دلگان، NNI پس از ۳۹ روز از کاشت در تیمارهای N4 تا N6، پس از ۴۶ روز از کاشت در تیمارهای N1 تا N3، پس از ۵۵ روز از کاشت در تیمار N4، پس از ۶۴ روز از کاشت در تیمارهای N3 و N4 و در تاریخ‌های نمونه‌برداری بعدی در تیمار N4 معادل یک یا نزدیک به آن بود (شکل ۵). با افزایش سن گیاه و پیشرفت به‌سمت تشکیل خورجین، NNI در تیمارهای N-محدود با شدت بیشتری کاهش یافت. این

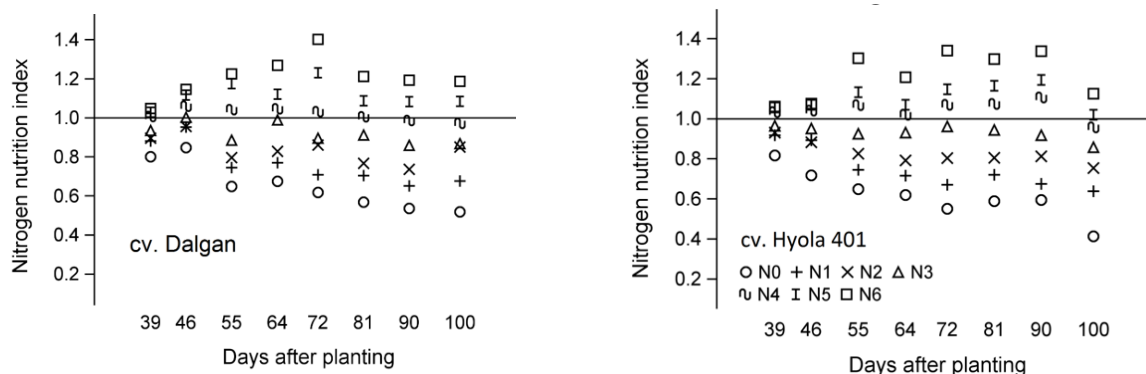


Figure 5. Nitrogen nutrition index (NNI) changes over time for two spring rapeseed cultivars studied under different levels of nitrogen utilization. Symbols represent fertilizer treatments (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 kg N ha⁻¹)

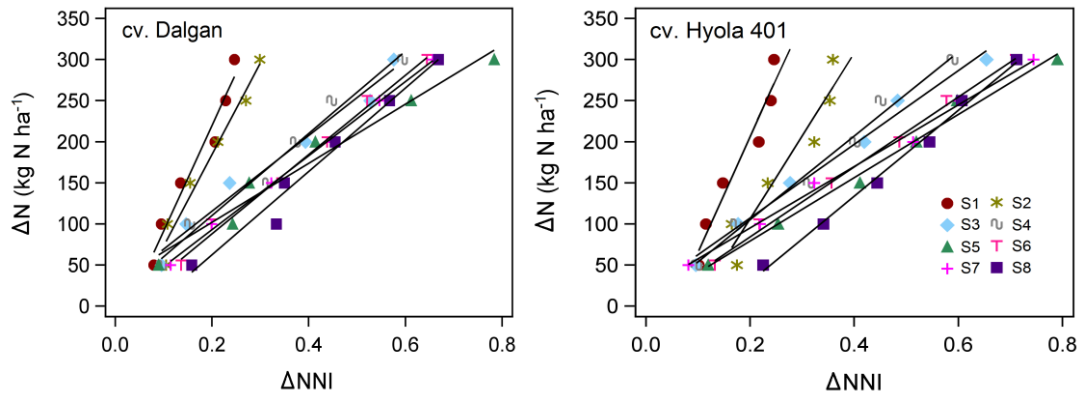


Figure 6. Relationship between the differences in nitrogen application rates (ΔN) and the changes in nitrogen nutrition index among fertilizer treatments (ΔNNI) during the growth period of two spring rapeseed cultivars. Symbols show destructive sampling performed during the growing season (39, 46, 55, 64, 72, 81, 90 and 100 days after planting)

به دست آمده می توان برای هر رقم تغییرات ΔN با ΔN_{and} را با یک معادله خطی ساده به صورت $\Delta N = A \times \Delta N_{and} + B$ توضیح داد. با توجه به این که رابطه فوق با گذر زمان تغییر داشت، این وابستگی ضرایب معادله به DAP می بایست با توابع دیگری توصیف می شد. تغییرات ضریب B با DAP در هیبرید هایولا ۴۰۱ با تابع درجه دوم $B = 164.98 - 3.00DAP + 0.0134DAP^2$ ($P = 0.09$ و $R^2 = 0.62$) و در رقم دلگان با تابع $B = 343.72 - 7.43DAP + 0.0391DAP^2$ ($P < 0.01$ و $R^2 = 0.88$) توصیف شد. هم چنین، تغییرات ضریب A با زمان در هیبرید هایولا ۴۰۱ توسط تابع هذلولی مانند $A = -2.89DAP / (-37.79 + DAP)$ ($P < 0.01$ و $R^2 = 0.97$) و در رقم دلگان با تابع $A = -2.81DAP / (-36.50 + DAP)$ ($P < 0.01$ و $R^2 = 0.88$) توصیف شد. این روابط امکان مدیریت دقیق N در طی فصل رشد کلزای بهار بر پایه SDM و SNC را میسر می سازد.

در این مطالعه، منحنی رقیق شدن N_c در دو رقم کلزای بهار بر پایه SDM گیاهی توسعه یافت که می تواند به عنوان رویکردی جدید برای تشخیص وضعیت N این گیاه در طی فصل رشد استفاده شود. هردوی SDM و SNC به شدت به تیمار کودی وابسته بودند، اما SNC برخلاف SDM با افزایش سن گیاه (تا زمان شروع تشکیل خورجین ها) کاهش یافت. تغییر SNC در طی فصل رشد کلزای بهار با گزارش های قبلی در مورد گندم (Yao et al., 2014b) و برنج (Ata-Ul-Karim et al., 2013) مطابقت دارد و آن را می توان به تغییر نسبت بافت های

شاخص دیگری که می تواند برای تشخیص وضعیت N گیاه استفاده گردد، N_{and} است. تغذیه N گیاه وقتی $N_{and} = 0$ است بهینه فرض می شود، اما $N_{and} > 0$ بیانگر کمبود N و $N_{and} < 0$ نشان دهنده مصرف تجملی آن در طی دوره رشد است. در هر دو رقم، N_{and} به شدت به تیمار کودی و مرحله رشدی گیاه (تاریخ نمونه برداری) بستگی داشت (شکل ۷). بسته به این دو عامل، مقادیر N_{and} محاسبه شده برای هیبرید هایولا ۴۰۱ بین $53/55 - 90$ روز پس از کاشت در تیمار N6 و $251/88$ کیلوگرم N در هکتار (۱۰۰ روز پس از کاشت در تیمار N0) و در رقم دلگان بین $12/67 - 72$ روز پس از کاشت در تیمار N6 و $226/85$ کیلوگرم N در هکتار (۹۰ روز پس از کاشت در تیمار N0) متغیر بود (شکل ۷). این نتایج نشان می دهد که N_{and} در شرایط مصرف مقادیر کمتر N بالاتر است. افزایش N_{and} در تیمارهای N-محدود با پیشرفت مراحل نمو گیاه به تدریج تشدید شد و در مرحله تشکیل خورجین ها به حداکثر رسید. این نتایج سودمندی N_{and} جهت ارزیابی وضعیت تغذیه N در کلزای بهار را تأیید می کند.

در هر دو رقم کلزای مطالعه شده، بین ΔN و ΔN_{and} همبستگی مثبتی وجود داشت (شکل ۸). این همبستگی (R) برای هیبرید هایولا ۴۰۱ بین $0/60$ (S2) و $0/98$ (S5) و برای رقم دلگان بین $0/35$ (S1) و $0/96$ (S5) متغیر بود. این همبستگی در تاریخ های نمونه برداری S1 و S2 برای هر دو رقم و در S3 برای هیبرید هایولا ۴۰۱ از نظر آماری معنی دار نبود. در هر حال، بر اساس نتایج

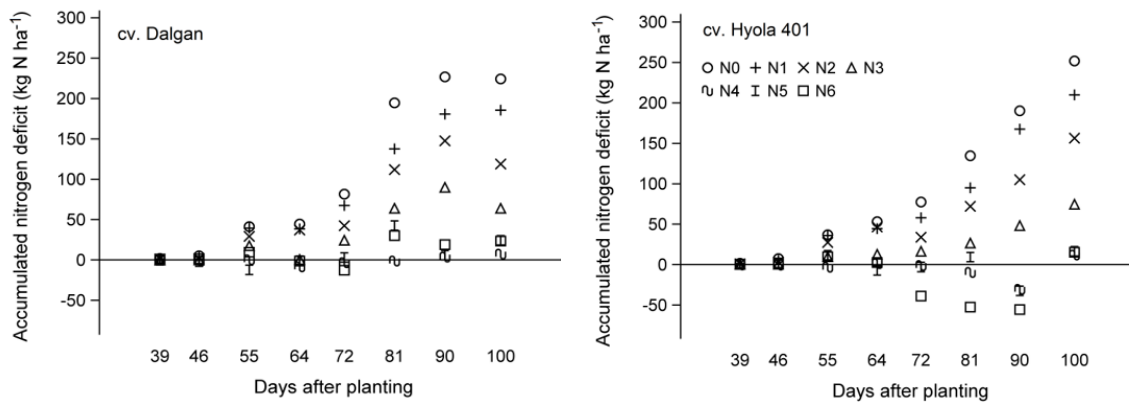


Figure 7. Changes of accumulated nitrogen deficit (N_{and}) over time for two spring rapeseed cultivars studied under different levels of nitrogen utilization. Symbols represent fertilizer treatments (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 kg N ha⁻¹)

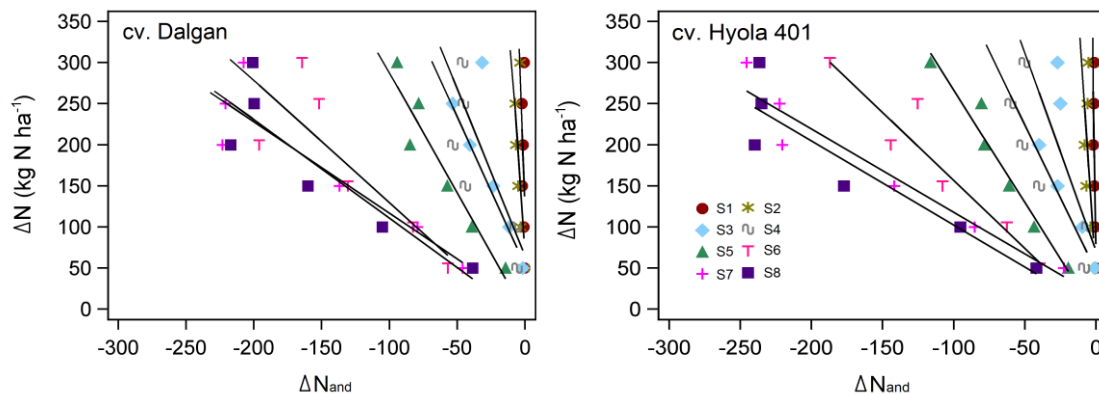


Figure 8. Relationship between the differences in nitrogen application rates (ΔN) and the changes in accumulated nitrogen deficit among fertilizer treatments (ΔN_{and}) during the growth period of two spring rapeseed cultivars. Symbols show destructive sampling performed during the growing season (39, 46, 55, 64, 72, 81, 90 and 100 days after planting)

نشان می‌دهد غلظت N موجود در ساقه در تیمارهای N-غیرمحدود در ابتدای دوره رشد این گیاه بیشتر از N موجود در برگ‌ها است اما به ازای هر واحد افزایش ماده خشک (SDM و LDM) با شیب تندتری (بیش از ۵ برابر) کاهش می‌یابد. ظرفیت جذب و تجمع N در گیاه توسط مکانیسم‌هایی تنظیم می‌شود که به‌طور مستقیم با رشد و به‌طور غیرمستقیم با متابولیسم N در گیاه در ارتباط هستند (Ata-Ul-Karim et al., 2014). مقدار جذب N توسط گیاه در محدوده بین دو منحنی رقیق شدن N_c و N_{max} به مقدار فراهمی N معدنی در خاک بستگی دارد و مستقل از سرعت رشد گیاه است

گیاهی (برگ و ساقه) و سایه‌اندازی برگ‌ها در طول فصل رشد نسبت داد (Yue et al., 2012). منحنی مرز بالایی (N_{max}) و پایینی (N_{min}) غلظت N موجود در ساقه دو رقم کلزای بهاره مطالعه‌شده با روابط زیر توصیف شد:

$$N_{max} = 6.64SDM^{-0.26} \quad (7)$$

$$N_{min} = 2.30SDM^{-0.35} \quad (8)$$

منحنی N_{max} تخمینی از حداکثر ظرفیت جذب N در ساقه است. در مطالعه قبلی، حداکثر ظرفیت جذب N برگ‌های کلزای بهاره (LDM) با معادله $N_{max}=5.45LDM^{0.05}$ توصیف شد (Siadat and Derakhshan, 2020) که

آزمایش، کاهش غلظت N بخش هوایی با افزایش TDM در کلزای زمستانه ($\beta=0.25$) (Colnenne et al., 1998) نزدیک به برآورد ضریب β در مطالعه فعلی اما خیلی بیشتر از کاهش غلظت N برگ در پاسخ به افزایش LDM کلزای بهاره است. به نظر می‌رسد کندی کاهش غلظت N در برگ‌ها در قیاس با ساقه یا کل بخش هوایی گیاه به دلیل فعال تر بودن این بافت از لحاظ متابولیکی (فتوسنتز، تنفس و تعرق) باشد. ریزش برگ‌های مسن و انتقال مجدد N به بافت‌های جوان تر منجر به حفظ مقادیر بالاتر N در برگ‌ها خواهد شد. علاوه بر این، با رشد طولی ساقه نسبت ماده خشک ساختاری و غیرفتوسنتزی که دارای غلظت N کمی هستند، افزایش می‌یابد که برآیند این‌ها منجر به کاهش شدیدتر غلظت N بخش هوایی نسبت به برگ می‌شود.

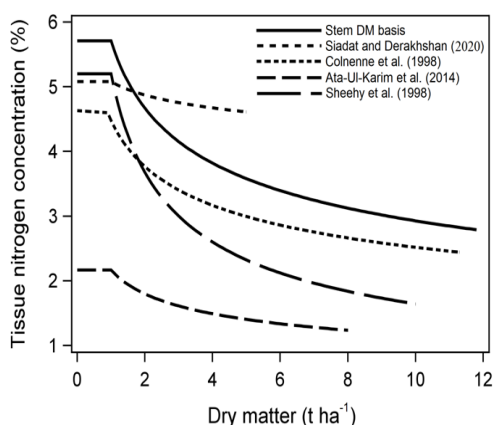


Figure 9. Comparison of critical nitrogen (N_c) dilution curves. The solid line represents the N_c dilution curve on the stem dry matter basis in spring rapeseed ($N_c=5.71SDM^{0.29}$). The dotted line represents the N_c dilution curve provided by Siadat and Derakhshan (2020) ($N_c=5.08LDM^{0.06}$) on leaf dry matter basis in spring rapeseed, and the short dashed line represents the N_c dilution curve developed by Colnenne et al. (1998) ($N_c=4.48TDM^{0.25}$) on plant dry matter basis for winter rapeseed. The medium dashed line represents the N_c dilution curve of Ata-Ul-Karim et al. (2014) ($N_c=2.17SDM^{0.27}$) on the stem dry matter basis in rice, and the long dashed line represents the N_c dilution curve of Sheehy et al. (1998) ($N_c=5.20TDM^{0.50}$) on plant dry matter basis in rice

(Yao et al., 2014b). مقایسه منحنی N_{min} به دست آمده بر پایه SDM با منحنی N_{min} برگگی ($N_{min}=3.39LDM^{\cdot}$)^{0.17} (Siadat and Derakhshan, 2020) نشان می‌دهد که غلظت N موجود در برگ‌ها در تیمارهای N-محدود در ابتدای دوره رشد بیشتر از غلظت N موجود در ساقه است. همچنین، تندی کاهش غلظت N در طی فصل رشد در ساقه‌ها حدود دو برابر رقیق شدن N در برگ‌ها است. در سطح زیر منحنی رقیق شدن N_c ، جذب N توسط مقدار N معدنی در دسترس در خاک محدود می‌شود و به نوبه خود سرعت رشد گیاه را تعیین می‌کند (Justes et al., 1994; Ata-Ul-Karim et al., 2013; Yao et al., 2014a). این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که در شرایط مصرف تجملی کود، N مازاد در ساقه کلزا ذخیره می‌شود، در حالی که در شرایط N-محدود، بخش بزرگ‌تری از N موجود در گیاه به برگ‌ها انتقال داده خواهد شد که ممکن است به دلیل نیاز بیشتر بافت‌های فعال تر از نظر متابولیکی به این عنصر باشد.

بالاتر بودن مقدار پارامتر β منحنی N_{min} (۰/۳۵) نسبت به N_{max} (۰/۲۶) بیانگر آن است که رقیق شدن N ساقه در شرایط N-محدود محسوس تر از شرایط N-غیرمحدود می‌باشد. در شرایط N-محدود، نیاز N کلزا با مقدار N در دسترس در خاک مطابقت نداشت که همین مسئله ممکن است در کاهش سریع تر SNC دخیل باشد.

منحنی رقیق شدن N_c توسعه یافته در اینجا بر پایه SDM گیاه ($\alpha=5.71\pm 0.10$) از منحنی مرجع ارائه شده بر مبنای LDM این دو رقم کلزا ($\alpha=5.08\pm 0.16$) (Siadat and Derakhshan, 2020) بالاتر بود (شکل ۹). در عین حال، تندی رقیق شدن N موجود در ساقه در ازای هر واحد افزایش ماده خشک ($\beta=0.29\pm 0.02$) به طور معنی داری بیشتر از میزان رقیق شدن N در برگ‌ها ($\beta=0.06\pm 0.01$) بود (شکل ۹). در این راستا، Colnenne et al. (1998) منحنی N_c کلزای زمستانه را بر پایه کل ماده خشک گیاه (TDM) با معادله $N_c=4.48TDM^{0.25}$ تعریف کردند (شکل ۹). بدون در نظر گرفتن اختلاف‌های موجود از نظر نوع رقم و تیپ رشدی آن‌ها و همچنین شرایط محیطی محل اجرای

ΔN_{and} تعیین گردد. هردوی NNI و N_{and} در گیاهان زراعی مثل گندم بهاره (Ziadi et al., 2010)، گندم زمستانه (Yao et al., 2014b)، ذرت (Zhao et al., 2017) و برنج ژاپونیکا (Yao et al., 2014a) برای تشخیص وضعیت تغذیه N در طی فصل رشد استفاده شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در مجموع، هر دو شاخص SDM و SNC بدون در نظر گرفتن تیمار کودی با افزایش سن گیاه به ترتیب روندی افزایشی و کاهش‌ی نشان دادند. بین دو رقم کلزای بهاره مطالعه‌شده از نظر برآورد ضرایب معادله آلومتریک برآزش داده‌شده بین N_c و SDM تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. بنابراین، رقیق شدن N بحرانی در هر دو رقم با تابع $N_c = 5.71SDM^{0.29}$ توصیف شد. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه اعتبار استفاده از NNI و N_{and} را برای تشخیص وضعیت N گیاه تأیید کرد. رابطه بین ΔN و ΔNNI (یا ΔN_{and}) با یک تابع خطی ساده توضیح داده شد که بر اساس آن می‌توان مقدار کمبود N را در هر روز از چرخه رشد کلزای بهاره تعیین نمود.

منحنی رقیق شدن N_c که در این مطالعه برای دو رقم کلزای بهاره بر پایه SDM گیاه ارائه شد تفاوت قابل توجهی با منحنی N_c گزارش‌شده برای گیاه برنج بر مبنای TDM (Sheehy et al., 1998) یا SDM گیاهی (Ata-Ul-Karim et al., 2014) داشت (شکل ۹). اختلاف میان این منحنی‌های مرجع را می‌توان با تفاوت‌های موجود بین دو گونه از نظر ظرفیت جذب استفاده از N (Lemaire et al., 2007) توضیح داد.

تشخیص وضعیت و نیاز N گیاه زراعی در طی فصل رشد در شرایط متغیر مزرعه مهم‌ترین کاربرد منحنی رقیق شدن N_c است. این منحنی‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزارهایی ایده‌آل و به‌صرفه از لحاظ اقتصادی برای مدیریت دقیق کود در مزرعه استفاده شوند که این مسئله از جنبه حفاظت از محیط‌زیست و سلامت انسان بسیار حائز اهمیت است. هردوی NNI و N_{and} به‌خوبی قادر به تشخیص وضعیت N کلزای بهاره بودند. برای مدیریت دقیق N در طی فصل رشد تنها کافی است یکی از این دو شاخص در هر زمانی پس از کاشت تعیین شود و کود N مورد نیاز برای دستیابی به رشد بهینه بر اساس رابطه بین ΔN و ΔNNI یا ΔN و

References

- Ata-Ul-Karim, S. T., Cao, Q., Zhu, Y., Tang, L., Rehmani, M. I. A., & Cao, W. (2016). Non-destructive assessment of plant nitrogen parameters using leaf chlorophyll measurements in rice. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1829.
- Ata-Ul-Karim, S. T., Xia, Y., Liu, X. J., Cao, W. X., & Zhu, Y. (2013). Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches. *Field Crops Research*, 149, 149-158.
- Ata-Ul-Karim, S. T., Yao, X., Liu, X., Cao, W., & Zhu, Y. (2014). Determination of critical nitrogen dilution curve based on stem dry matter in rice. *PLoS ONE*, 9(8), 1-12.
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-total. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis* (Part 2, pp. 595-624). Madison, WI.: American Society of Agronomy.
- Colnenne, C., Meynard, J. M., Reau, R., Justes, E., & Merrien, A. (1998). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of Botany*, 81(2), 311-317.
- De Oliveira, E. C., de Castro Gava, G. J., Trivelin, P. C., Otto, R., & Franco, H. C. (2013). Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(5), 712-723.
- Eftekhari, S., & Heidari, M. (2014). Nitrate and nitrite accumulation in Iranian Spinach (*Spinacia oleracea* L.) landraces. *Plant Productions*, 37(2), 89-98. [In Farsi]

- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J. L., & Louarn, G. (2015). Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. In V. O. Sadras and D. Calderini (Eds.), *Crop physiology-applications for genetic improvement and agronomy*, (2nd ed, pp. 161-206). London, UK: Academic Press, Elsevier.
- He, Z., Qiu, X., Ata-Ul-Karim, S. T., Li, Y., Liu, X., Cao, Q. & Tang, L. (2017). Development of a critical nitrogen dilution curve of double cropping rice in south China. *Frontiers in Plant Science*, 8, 638.
- Ju, X. T., Xing, G. X., Chen, X. P., Zhang, S. L., Zhang, L. J., Liu, X. J., & Zhang, F. S. (2009). *Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems*. Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.
- Justes, E., Mary, B., & Machet, J. M. (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74(4), 397-407.
- Kohanmoo, M., & AghaAlikhani, M. (2014). The effect of biological and chemical fertilizers on yield components and secondary metabolites of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). *Plant Productions*, 37(2), 99-112. [In Farsi]
- Lemaire, G., & Salette, J. (1984): Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prelevement d'azote pour un peuplement de graminees fourragères. II. Etude de la variabilite entre genotypes. *Agronomie*, 4(5), 431-436.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Jeuffroy, M. H., Gastal, F., & Massignam, A. (2008). Crop species present different qualitative type of response to N deficiency during their vegetative growth. *Field Crops Research*, 105(3), 253-265.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Sheehy, J., Jeuffroy, M. H., Massignam, A., & Rossato, L. (2007). Is crop demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crops Research*, 100(1), 91-106.
- Sheehy, J. E., Dionora, M. J. A., Mitchell, P. L., Peng, S., Cassman, K. G., Lemaire, G., & Williams, R. L. (1998). Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field Crops Research*, 59(1), 31-41.
- Siadat, S. A., & Derakhshan, A. (2020). Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter for two spring rapeseed cultivars. *Journal of Agroecology*, 11(4), 55, 1343-1356. [In Farsi]
- Yao, X., Ata-Ul-Karim, S. T., Zhu, Y., Tian, Y., Liu, X., & Cao, W. (2014a). Development of critical nitrogen dilution curve in rice based on leaf dry matter. *European Journal of Agronomy*, 55, 20-28.
- Yao, X., Zhao, B., Tian, Y. C., Liu, X. J., Ni, J., Cao, W. X., & Zhu, Y. (2014b). Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China. *Field Crops Research*, 159, 33-42.
- Yue, S. C., Meng, Q. F., Zhao, R. F., Li, F., Chen, X. P., Zhang, F. S., & Cui, Z. L. (2012). Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain. *Agronomy Journal*, 104(2), 523-529.
- Zhao, B., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Z., Ning, D., Xiao, J., Liu, Z., & Duan, A. (2017). Development of a critical nitrogen dilution curve based on leaf dry matter for summer maize. *Field Crops Research*, 208, 60-68.
- Ziadi, N., Belanger, G., Claessens, A., Lefebvre, L., Cambouris, A. N., Tremblay, N., & Parent, L. E. (2010). Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agronomy Journal*, 102(1), 241-250.

Ziadi, N., Brassard, M., Belanger, G., Claessens, A., Tremblay, N., Cambouris, A., & Parent, L. E. (2008). Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. *Agronomy Journal*, 100(5), 271-273.