

Determining the Nutritional Status of Canola (*Brassica napus*) in Different Climates of Iran before the Flowering Stage

F. Nourgholipour^{1*}, M.S. Tadayon², M. Pasandideh¹, M.A. Khodshenas³

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: nourfg@yahoo.com)

2- Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Shiraz, Iran

3- Soil and Water Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Arak, Iran

Received: 08 February 2026

Revised: 01 August 2026

Accepted: 18 August 2026

Available Online: 18 August 2026

How to cite this article:

Nourgholipour, F., Tadayon, M.S., Pasandideh, M., & Khodshenas, M.A. (2026). Determining the nutritional status of canola (*Brassica napus*) in different climates of Iran before flowering stage. *Journal of Soil and Water*, 40(3), 275-292. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97760.1525>

Introduction

Rapeseed (*Brassica napus* L.), particularly the low erucic acid and glucosinolate cultivars known as canola, is the third largest oilseed crop in the world after soybean and oil palm. In Iran, canola cultivation covers approximately 173 thousand hectares, making it the largest cultivated area among oilseed crops. Golestan and Khuzestan provinces have the largest cultivated areas. Balanced fertilization is crucial for optimizing canola yield, especially under adverse environmental conditions. Plant tissue analysis serves as a fundamental tool for diagnosing nutrient status and exploits the principle that tissue nutrient concentration reflects soil nutrient availability. Advanced diagnostic methods, such as Deviation from Optimum Percentage (DOP) and Nutrient Nalance Index (NBI), provide quantitative measures of nutrient adequacy and imbalance. The DOP method ranks nutrient deficiencies by comparing observed tissue concentrations with those in high-yielding populations. Meanwhile, the NBI integrates multiple nutrient statuses into a single measure ($\Sigma|DOP|$) and provides a comprehensive assessment of overall nutrient health.

Materials and Methods

The study was conducted in four provinces: Alborz, Markazi, Golestan, and Ardabil (Moghan region), to reflect the diverse agro-ecological conditions of the country. Thirty farms were randomly selected in each province.

Alborz province (Karaj region) is located at coordinates 35°48'N and 51°10'E. Markazi province (Arak city) is located at coordinates 34°5'30'N and 49°41'30'E. East Golestan Province (Gonbad Kavus region) is located at coordinates 37°16'N and 55°12'E, while Ardabil Province (Parsabad and Moghan regions) is located at coordinates between 39°12'N and 39°42'N and 47°10'E and 48°21'E.

Soil samples were collected from the fields before planting. Plant tissue samples were taken at the beginning of stem elongation stage (two-digit growth code 30), which is a sensitive stage for identifying and eliminating nutrient deficiencies before canola flowering. Plant samples were collected as whole plants from 20 random points per hectare, and 20 plants were sampled from each point. Total nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and micronutrients zinc (Zn), manganese (Mn), iron (Fe), copper (Cu), and boron (B) were measured in plant tissue. Grain yield was measured at maturity. To assess nutrient status and identify yield-limiting factors,



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97760.1525>

the key diagnostic index, deviation from optimum percentage (DOP), quantifies the deviation in nutrient concentrations from the optimal values observed in high-yielding populations. The NBI index was also used in this study.

Results and Discussion

In terms of soil properties, there was significant variation in pH, salinity, organic carbon, and nutrient availability across the studied provinces.

In Alborz province, the average organic carbon content was low (0.81%) and the frequency of nutrient deficiencies was high, including nitrogen (N, 73%), phosphorus (P, 47%), potassium (K, 20%), sulfur (S, 87%), magnesium (Mg, 37%), iron (Fe, 83%), copper (Cu, 20%), zinc (Zn, 50%), manganese (Mn, 43%), and boron (B, 60%). In Markazi Province, with an average salinity of 1.47 dS/m, severe deficiencies of nitrogen (90%), phosphorus (75%), and potassium (37%) were observed. In Golestan Province, non-saline soils in this region with an average organic carbon percentage of 1.4% showed deficiencies of nitrogen (27%), phosphorus (94%), potassium (32%), magnesium (100%), iron (32%), copper (22%), manganese (31%), and zinc (81%). In Ardabil Province, high clay content (40%) and salinity (2.4 dS/m) led to deficiencies of phosphorus (50%), potassium (1%), sulfur (99%), magnesium (99%), iron (50%), copper (3%), zinc (87%), and manganese (10%).

DOP standards for nutrient concentrations in canola shoots during stem elongation were determined as follows: nitrogen 3.61%, phosphorus 0.46%, potassium 2.8%, sulfur 0.513%, magnesium 0.44%, calcium 1-2%, iron 226 mg kg⁻¹, copper 1.8 mg kg⁻¹, manganese 78.5 mg kg⁻¹, zinc 45.8 mg kg⁻¹, and boron 54 mg kg⁻¹.

The nutrient balance index (NBI), calculated as the sum of absolute DOP values, was inversely correlated with yield, confirming that greater nutrient imbalances resulted in reduced yield. Statistical analyses confirmed that NBI thresholds between 133 and 146 corresponded to significant yield reductions ($p < 0.01$). Based on these thresholds, yield decreased by 12 to 18% for each unit increase in NBI. It is noteworthy that when NBI exceeds a certain threshold (NBI breakpoint; BPC), yield reduction becomes more evident. Below this threshold, yield is less affected by NBI. Alborz province had the highest BPC (146), followed by Ardabil (139), Markazi (138), and Golestan (133) provinces, respectively. Farmers and advisors can use this range as a guide for fertilizer recommendations.

Conclusion

This study shows that the variability of canola yield in agro-ecological regions of Iran is primarily due to the deficiency of region-specific nutrients, especially phosphorus and zinc, combined with soil alkalinity, low organic carbon, and mineralogical characteristics. By implementing region-specific nutrient management strategies, yield gaps can be closed, and sustainability in semi-arid oilseed systems can be promoted. The Nutrient Balance Index integrates vital nutrient ratios (such as phosphorus:zinc, magnesium:potassium) to detect imbalances.

Acknowledgement

Authors are thankful to and appreciate Soil and Water Research Institute (SWRI) for supporting the project. The results of this article are derived from the national project number 01-10-10-023-970098 of the Soil and Water Research Institute.

Keywords: Concentration, DOP, Nutritional Status, NBI

تشخیص وضعیت تغذیه‌ای کلزا (*Brassica napus*) در اقلیم‌های مختلف ایران قبل از مرحله گلدهی

فریدون نورقلی پور^{۱*} - محمد سعید تدین^۲ - محمد پسندیده^۱ - محمد علی خودشناس^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

چکیده

کلزا با داشتن بیشترین سطح زیر کشت در میان محصولات دانه‌روغنی در ایران، به دلیل مدیریت نامتعادل عناصر غذایی با محدودیت عملکرد مواجه است. در این مطالعه، با به کارگیری روش تشخیص خاک-گیاه و رویکردهای مدل‌سازی بیوژئوشیمیایی مبتنی بر شاخص‌های تشخیصی، کمبودهای عناصر غذایی در چهار منطقه کشاورزی-اکولوژیکی کشور (البرز، مرکزی، گلستان و اردبیل) بررسی شد. با تجزیه و تحلیل داده‌های ۱۲۰ مزرعه از طریق روش‌های انحراف از درصد بهینه (DOP) و شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI)، کمبود گسترده فسفر و روی در تمامی استان‌ها شناسایی گردید. قلیائیت خاک (pH=۷/۵-۸/۵) و محتوای کم کربن آلی (کمتر از ۱/۴ درصد) به واسطه رسوب هیدروکسیدی و رقابت کاتیونی، تثبیت عناصر کم‌مصرف به ویژه روی (DOP=-۲۴/۶) و آهن (DOP=-۱۶/۴) را تشدید می‌کند. افزودن براین، خاک‌های آهکی باعث تثبیت فسفر به صورت کانی‌های فسفات کلسیم می‌شوند. درحالی‌که خاک‌های غنی از رس در اردبیل، پتاسیم تبادل (K) را حفظ کرده‌اند، اما به دلیل تثبیت بین‌لایه‌ای، کمبود منیزیم نشان دادند. مقادیر NBI برای مزارع کلزای مورد مطالعه از ۱۳۳ تا ۱۴۶ متغیر بود. فراتر از این حدود، عملکرد به ازای هر واحد افزایش NBI، ۱۲ تا ۱۸ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده هم‌افزایی عناصر غذایی است. تغییرات منطقه‌ای در مقادیر NBI به شدت با نتایج عملکرد مشاهده شده، همبستگی داشت. بررسی آماری آستانه‌های NBI برای کاهش عملکرد (۱۳۳-۱۴۶، $p < ۰/۰۱$) نشان داد که نسبت‌های متعادل منیزیم به پتاسیم (۱:۸/۲) در اردبیل به عملکرد بهتر (۲۸۷۰ کیلوگرم در هکتار) کمک نمود؛ در حالی‌که عملکرد پایین‌تر استان مرکزی (۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار) با کمبود فسفر (۱۱/۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و مقادیر بالای NBI (بیش از ۱۳۸) مرتبط بود. این یافته‌ها بر اهمیت توجه به محدودیت‌های عناصر غذایی در خاک‌های آهکی تأکید دارد، زیرا بیش از ۷۵ درصد مزارع کلزای کشور با کمبود فسفر و روی مواجه‌اند. نتایج ما بر ضرورت به کارگیری راهبردهای مدیریت عناصر غذایی به صورت مکان‌ویژه برای بهبود پایدار عملکرد در اکوسیستم‌های کشاورزی کشور تأکید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: غلظت، وضعیت تغذیه‌ای، انحراف از درصد بهینه، شاخص تعادل تغذیه‌ای

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: nourfg@yahoo.com

۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس (AREEO)، شیراز، ایران

۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی (AREEO)، اراک، ایران

مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.)، به‌ویژه ارقام با اسید اروسیک و گلوکوزینولات کم که به‌عنوان کانولا شناخته می‌شوند، سومین محصول دانه‌روغنی جهان پس از سویا و نخل روغنی می‌باشد (Statista, 2025). در میان تولیدکنندگان اصلی، کانادا با تولید سالانه بیش از ۸/۱۸ میلیون تن، پیش‌تاز است (Statista, 2025). کشت کلزا در ایران تقریباً ۱۷۳ هزار هکتار را در بر می‌گیرد و بیشترین مساحت کشت را در میان محصولات زراعی دانه‌روغنی دارد. استان‌های گلستان و خوزستان بیشترین سطح کشت را به خود اختصاص داده‌اند (Agricultural statistics, 2025). علی‌رغم سازگاری با شرایط متنوع کشاورزی-اکولوژیکی، عملکرد کلزا به‌دلیل عدم تعادل عناصر غذایی، ویژگی‌های ناهمگن خاک و روش‌های کوددهی نامتعادل با محدودیت‌های قابل‌توجهی روبه‌رو است که با تغییرپذیری اقلیمی و بروز عوامل تنش‌زای محیطی مانند خشکسالی و شوری تشدید می‌شود (Meena et al., Dönmez, 2024 & Aghabeygi, 2024). کوددهی متعادل برای بهینه‌سازی عملکرد کلزا، به‌ویژه در شرایط نامساعد محیطی، بسیار مهم است. مطالعات انجام‌شده در آمریکای شمالی، اروپا و استرالیا بر اهمیت کوددهی متعادل برای جبران شکاف‌های عملکردی ناشی از کمبود عناصر غذایی تأکید دارند (Mahmoodi Nezhad Dezfully & Chaleshtori et al., 2021; Mostashari, 2022). اثربخشی راهبردهای کوددهی بسته به نوع خاک، اقلیم و روش‌های مدیریتی به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است و نیازمند برنامه‌ریزی ویژه برای هر منطقه می‌باشد. کمبود یا بیش‌بود عناصر غذایی می‌تواند به‌شدت بر رشد گیاه، کیفیت بذر و عملکرد دانه تأثیر بگذارد (Wang et al., 2025). بررسی‌های مزرعه‌ای در مزارع کلزای ایران، کاهش دسترسی به فسفر (P) خاک را نشان می‌دهد. این روند در خاک‌های آهکی در سطح جهانی نیز مشاهده شده است؛ جایی‌که تثبیت فسفر به صورت مواد معدنی نامحلول فسفات کلسیم، قابلیت دسترسی آن را برای گیاه محدود می‌کند (Murphy, 2015; Taalab et al., 2019). اجرای مدیریت یکپارچه عناصر غذایی در کاهش این کمبودها مؤثر بوده و گزارش‌ها حاکی از افزایش عملکرد تا ۲۵ درصد در صورت اجرای روش‌های مناسب کوددهی است (Roy et al., 2006; Nourgholipour et al., 2022). با این حال، دستیابی به تعادل بهینه عناصر غذایی به‌دلیل تنوع منطقه‌ای از لحاظ خواص خاک، از جمله pH قلیایی (بیش از ۷)، کربن آلی کم (کمتر از ۱٪) و درصد بالای آهک خاک که بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی تأثیر می‌گذارند، همچنان چالش برانگیز است (Muhammad et al., 2023; Purakayastha et al., 2023).

مکانیسم‌های ایجادکننده محدودیت دسترسی عناصر غذایی در کشت کلزا چندوجهی و اغلب درهم‌تنیده هستند. در خاک‌های آهکی،

افزایش سطح کلسیم موجب تشکیل کانی‌های پایدار فسفات کلسیم شده و حلالیت و جذب فسفر توسط گیاه را کاهش می‌دهد (Muhammad et al., 2025). این پدیده به‌ویژه در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک ایران با pH قلیایی، تثبیت فسفر را تشدید می‌کند (Hosseini & Tadayon, 2024). مقادیر بالای pH همچنین باعث رسوب هیدروکسید عناصر کم‌مصرفی مانند روی (Zn) و آهن (Fe) شده و آن‌ها را برای گیاه غیرقابل‌دسترس می‌سازد (Taalab et al., 2019). افزون‌براین، رقابت بین کاتیون‌ها برای جایگاه‌های جذب روی کلئیدهای خاک، دسترسی به عناصر کم‌مصرف را پیچیده‌تر می‌کند (Reddy et al., 2024). محتوای کم ماده آلی (کمتر از ۱ درصد)، معدنی‌شدن نیتروژن را مختل کرده، فعالیت میکروبی را کاهش داده و به‌تدریج حاصلخیزی خاک را کم می‌کند (Naseri Rad, 2021; Jost et al., 2025). این اثرات با کشت تک‌محصولی فشرده و الگوهای نامنظم بارندگی که از ویژگی‌های محیط‌های نیمه‌خشک است، تشدید می‌شوند.

تجزیه بافت گیاهی به‌عنوان ابزاری بنیادی برای تشخیص وضعیت عناصر غذایی عمل می‌کند و از این اصل بهره می‌گیرد که غلظت عناصر غذایی در بافت، نشان‌دهنده در دسترس بودن آن‌ها در خاک است (Reddy et al., 2024). روش‌های تشخیصی پیشرفته‌ای مانند انحراف از درصد بهینه (DOP) و شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI)، معیارهای کمی از کفایت و عدم تعادل عناصر غذایی ارائه می‌دهند. روش DOP با مقایسه غلظت‌های مشاهده‌شده در بافت با غلظت‌های عناصر در جمعیت‌های پرمحصول، کمبودهای غذایی را رتبه‌بندی کرده و در نتیجه حدود بحرانی را برای هر عنصر مشخص می‌کند (Walworth & Sumner, Mostashari et al., 2018). در همین حال، NBI وضعیت چندین عنصر غذایی را در یک معیار واحد ($\sum |DOP|$) ادغام کرده و ارزیابی جامعی از سلامت کلی تغذیه ارائه می‌دهد (Khiari et al., Dixon & Qaderi, 2025; Goodarzi et al., 2010; Jemenez et al., 2007; Mostashari et al., 2018).

کاربرد این روش در محصولات دانه‌روغنی یک‌ساله مانند کلزا، به‌ویژه در شرایط کشاورزی-اکولوژیکی منحصربه‌فرد ایران، هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است. افزون‌براین، به‌دلیل تنوع ویژگی‌های خاک در مناطق مختلف، کالیبراسیون منطقه‌ای شاخص‌های تشخیصی برای اطمینان از ارتباط و دقت آن‌ها ضروری است. با توجه به پیچیدگی برهمکنش‌های عناصر غذایی و چالش‌های ناشی از محیط نیمه‌خشک ایران، این مطالعه با اهداف زیر انجام شد: ۱) تعیین کمی تنوع مکانی قابلیت دسترسی عناصر غذایی در مناطق کشت کلزا در ایران؛ ۲) رتبه‌بندی کمبودهای عناصر غذایی خاص هر مکان با

بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری تعیین شد (Gee & Bauder, 1986). کربن آلی (OC%) از طریق تکنیک اکسیداسیون مربوط به اندازه‌گیری شد (Nelson & Sommers, 1996). عناصر کم‌مصرف با استفاده از روش DTPA که توسط استخراج شدند (Lindsay & Norvell, 1978). روش استخراج DTPA برای عناصر کم‌مصرف به‌طور مؤثر عواملی مانند رسوب ناشی از pH و رقابت کاتیونی را که جذب روی و آهن را در خاک‌های قلیایی محدود می‌کنند، در نظر می‌گیرد (Lindsay Purakayastha et al., 2023). کربنات کلسیم معادل (Loeppert & Norvell, 1978); pH خاک و هدایت الکتریکی (EC) (با استفاده از سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک به آب) (Rhoades, 1982) نیز اندازه‌گیری شدند. پتاسیم قابل جذب (K) از طریق عصاره گیر استات آمونیوم (Sparks et al., 1996) و فسفر قابل دسترس (P) با استفاده از روش اولسن (Olsen & Sommers, 1982) اندازه‌گیری شد.

در بافت گیاه، نیتروژن کل (N) با استفاده از روش هضم کج‌لدال اندازه‌گیری شد (Horneck & Miller, 1998). فسفر (P) به‌صورت رنگ‌سنجی با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. پتاسیم (K) از طریق نورسنجی شعله‌ای تعیین شد (Chapman & Pratt, 1962). عناصر کم‌مصرف روی (Zn)، منگنز (Mn)، آهن (Fe) و مس (Cu) با استفاده از خاکستر خشک و به‌دنبال آن هضم با اسید هیدروکلریک استخراج و با استفاده از طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. بور (B) با استفاده از روش آزومتین-H-اندازه‌گیری شد (Chapman & Pratt, 1962).

عملکرد دانه در زمان رسیدگی اندازه‌گیری شد. اطلاعات مربوط به رقم، داده‌های هواشناسی دوره رشد، و جزئیات نوع، مقدار، زمان و روش مصرف کودها ثبت گردید.

روش‌های آماری و تشخیصی

برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی و شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد، از شاخص تشخیصی کلیدی انحراف از درصد بهینه استفاده شد. رویکردهای مدل‌سازی بیورژئوشیمیایی در این مطالعه شامل استفاده از شاخص‌های DOP و NBI برای کمی‌سازی فرآیندهای شیمیایی نظیر رسوب هیدروکسیدی، تثبیت فسفات کلسیم و تثبیت بین‌لایه‌ای عناصر در خاک‌های آهکی و رسی است. مدل انحراف از درصد بهینه (DOP)، انحراف در غلظت عناصر غذایی را نسبت به مقادیر بهینه مشاهده‌شده در جمعیت‌های پرمحصول کمی می‌کند (Sharma et al., 2005). مزارع براساس عملکرد دانه به سه گروه طبقه‌بندی شدند: عملکرد پایین (کمتر از میانگین منهای انحراف معیار)، عملکرد متوسط (بین میانگین $\pm$ انحراف معیار) و عملکرد بالا (بیشتر از میانگین به‌علاوه انحراف معیار).

جزئیات طبقه‌بندی برای هر استان در قسمت زیر ارائه شده است.

استفاده از شاخص DOP؛ و ۳) تعیین حدود بحرانی برای غلظت عناصر غذایی در بافت گیاه کلزا در شرایط مختلف خاک و اقلیمی. دستیابی به این اهداف برای بهبود عملکرد کلزاکاران ایران و پایداری تولید، بسیار مؤثر خواهد بود.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه و طرح نمونه‌گیری

این مطالعه در چهار استان البرز، مرکزی، گلستان و اردبیل (منطقه مغان) برای نشان دادن شرایط متنوع کشاورزی-بوم‌شناختی کشور انجام شد. در هر استان ۳۰ مزرعه به‌صورت تصادفی انتخاب گردید. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی مناطق مورد مطالعه به شرح زیر است:

- استان البرز (منطقه کرج): واقع در عرض جغرافیایی $48^{\circ} 35'$ شمالی و $51^{\circ} 10'$ شرقی. دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک و معتدل سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۰۰-۲۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا. میانگین دمای ۳۰ ساله $13/7^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد و دامنه دمایی 41° تا $21/7^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد.

- استان مرکزی (شهر اراک): واقع در مختصات $5^{\circ} 34'$ شمالی و $49^{\circ} 41'$ شرقی. دارای آب‌وهوای معتدل سرد و نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۲ میلی‌متر و میانگین دمای $13/9^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد. - شرق استان گلستان (منطقه گنبد کاووس): واقع در مختصات $16^{\circ} 37'$ شمالی و $55^{\circ} 12'$ شرقی. دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با میانگین بارندگی $453/7$ میلی‌متر، میانگین دمای $17/8^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد و ارتفاع 40 متر.

- استان اردبیل (مناطق پارس‌آباد و مغان) که در مختصات بین 39° درجه و 12° دقیقه تا 39° درجه و 42° دقیقه شمالی و 47° درجه و 10° دقیقه تا 48° درجه و 21° دقیقه شرقی قرار دارد. این منطقه برخی از حاصلخیزترین زمین‌های کشاورزی ایران را در بر می‌گیرد (شکل ۱).

نمونه‌های خاک از لایه سطحی خاک (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) با استفاده از یک روش نمونه‌برداری شبکه‌ای استاندارد جمع‌آوری شدند. نمونه‌های بافت گیاهی در مرحله رشد ساقه دهی (کد دو رقمی رشد ۳۰ مطابق Meier et al., 2009)، که مرحله‌ای حساس برای شناسایی و رفع کمبودهای غذایی پیش از گلدهی است، گرفته شدند. تشخیص زودهنگام کمبودها در این مرحله امکان مداخله به‌موقع برای اصلاح عدم تعادل غذایی را فراهم می‌کند. برای تجزیه و تحلیل وضعیت خاک مزارع، نمونه‌های مرکب از نقاط مختلف هر مزرعه تهیه شد. به‌طور مشابه، نمونه‌های گیاهی به‌صورت گیاه کامل از ۲۰ نقطه تصادفی در هر هکتار جمع‌آوری شده و از هر نقطه ۲۰ گیاه نمونه‌برداری شد. این روش، پوشش جامعی از تنوع خاک و گیاه در هر مزرعه را تضمین می‌کرد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان‌های مورد مطالعه و پراکندگی مزارع کلزای انتخاب شده

Figure 1- Geographical locations of the studied provinces in Iran and the distribution of selected canola fields

انحراف معیار ۱۲۶۲ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع با عملکرد بالا به‌طور متوسط ۴۷۲۵ کیلوگرم در هکتار و مزارع با عملکرد متوسط رو به پایین ۲۳۷۷ کیلوگرم در هکتار تولید دانه داشتند. تفاوت عملکرد

- استان البرز: پنج مزرعه به‌عنوان مزرعه پرمحصول طبقه‌بندی شدند، در حالی که ۲۵ مزرعه در دسته عملکرد کم تا متوسط قرار گرفتند. میانگین عملکرد ۲۷۶۸ کیلوگرم در هکتار با

آلی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی وجود داشت (جدول ۱، شکل ۲). غلظت‌های بهینه عناصر غذایی قابل جذب برای کلزا عبارتند از: فسفر = ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، پتاسیم = ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، گوگرد = ۲۱-۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، منیزیم = ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، آهن = ۵-۶ میلی‌گرم در کیلوگرم (روش دی‌تی‌بی‌ا)، مس = ۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم، روی = ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم، منگنز = ۶-۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و بور = ۰/۸-۰/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم (Jones & Olson-Rutz, 2016; Faizullahzadeh Ardabili, 2003; Nourgholipour et al., 2022). pH خاک بالاتر از ۷ به‌طور قابل توجهی بر تعدادی از عناصر کم‌مصرف و پر مصرف، به‌ویژه فسفر (P)، روی (Zn) و آهن (Fe) تأثیر می‌گذارد (Landoll, 2018). pH بالای خاک (۸/۵-۷/۵) تشکیل هیدروکسیدهای نامحلول روی و آهن (به‌عنوان مثال، $Zn(OH)_2$)، $(Fe(OH)_3)$ را افزایش می‌دهد. در pH بالا، یون‌های هیدروکسید (OH^-) با Zn^{2+} و $Fe^{2+/3+}$ واکنش می‌دهند و فراهمی زیستی آنها را ۶/۲۴ درصد (Zn) و ۴/۱۶ درصد (Fe) کاهش می‌دهند. حساسیت کلزا به شوری در مراحل مختلف رشد متفاوت است، به‌طوری‌که آستانه کاهش عملکرد در ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر (۱۰ درصد کاهش)، ۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر (۲۵ درصد کاهش) و ۹/۵ دسی‌زیمنس بر متر (۵۰ درصد کاهش) قرار دارد (Bandeagh et al., 2021). این موضوع بر اهمیت مدیریت شوری خاک برای دستیابی به عملکرد بهینه تأکید می‌کند.

تنوع منطقه‌ای در حاصلخیزی خاک

استان البرز: میانگین pH خاک ۸/۰۷، با محتوای کربن آلی پایین (۰/۸۱ درصد) و فراوانی بالای کمبود عناصر غذایی (بر حسب درصد)، از جمله نیتروژن (۷۳، N)، فسفر (۴۷، P)، پتاسیم (۲۰، K)، گوگرد (۸۷، S)، منیزیم (۳۷، Mg)، آهن (۸۳، Fe)، مس (۲۰، Cu)، روی (۵۰، Zn)، منگنز (۴۳، Mn) و بور (۶۰، B) بود (شکل ۲). pH کلیایی و سطوح پایین کربن آلی، تثبیت عناصر کم‌مصرف به‌ویژه روی و آهن را از طریق رسوب هیدروکسیدی و رقابت کاتیونی تشدید می‌نماید (Molnár et al., 2023; Taalab et al., 2019). **استان مرکزی:** با میانگین pH برابر ۷/۹ و شوری ۱/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر، کمبود شدید نیتروژن (۹۰)، فسفر (۷۵) و پتاسیم (۳۷) را نشان داد (واحد‌ها بر حسب درصد) (شکل ۲). سطوح پایین فسفر (۱۱/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پایین بودن درصد کربن آلی احتمالاً در کمبود گسترده نیتروژن مشاهده شده در ۹۰ درصد از مزارع نقش داشته‌اند (۹۰ درصد مزارع با مقدار کربن آلی کمتر از یک درصد). علی‌رغم مصرف کود، تثبیت فسفر در خاک‌های آهکی دسترسی به آن را محدود کرده است (Raeisi et al., 2021). لذا کمبود فسفر در خاک‌های این استان آشکارتر مشاهده شد. کربنات کلسیم بالا در

بین این دو گروه با اختلاف ۲۳۴۸ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

- استان مرکزی: پنج مزرعه در گروه با عملکرد بالا و ۲۵ مزرعه در گروه با عملکرد متوسط رو به پایین قرار داشتند. میانگین عملکرد ۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۱۰۹۱/۴ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع با عملکرد بالا به‌طور متوسط ۴۱۰۹ کیلوگرم در هکتار و مزارع با عملکرد پایین به‌طور متوسط ۱۸۷۷ کیلوگرم در هکتار، تولید دانه داشتند. تفاوت عملکرد بین این دو گروه با اختلاف ۲۲۳۲ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

- استان گلستان: شش مزرعه به‌عنوان گروه عملکرد بالا طبقه‌بندی شدند و ۳۱ مزرعه در گروه عملکرد کم تا متوسط قرار گرفتند. میانگین عملکرد ۲۷۲۹ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۱۱۰۴ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع پربازده به‌طور متوسط ۴۴۴۰ کیلوگرم در هکتار و مزارع کم‌بازده ۲۳۹۷ کیلوگرم در هکتار بودند. تفاوت عملکرد بین گروه‌ها با اختلاف ۲۰۴۳ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

- استان اردبیل: پنج مزرعه در گروه عملکرد بالا و ۲۵ مزرعه در گروه عملکرد پایین قرار گرفتند. میانگین عملکرد ۲۸۷۰ کیلوگرم در هکتار با انحراف معیار ۵۲۲ کیلوگرم در هکتار بود. مزارع با عملکرد بالا به‌طور متوسط ۳۸۲۳ کیلوگرم در هکتار و مزارع با عملکرد متوسط رو به پایین به‌طور متوسط ۲۷۶۴ کیلوگرم در هکتار تولید دانه داشتند. تفاوت عملکرد بین گروه‌ها با اختلاف ۱۰۵۹ کیلوگرم در هکتار از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

شاخص DOP با استفاده از فرمول ۱ محاسبه شد که در آن C غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه گیاه و C_{ref} مقدار مرجع حاصل از جمعیت‌های پرمحصول است. همچنین، شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) با جمع‌زدن مقادیر مطلق شاخص‌های DOP (فرمول ۲)، چندین عنصر غذایی را در یک معیار واحد ادغام می‌کند.

$$DOP = [(C \times 100) / C_{ref}] - 100 \quad (1)$$

$$\Sigma DOP = |IA| + |IB| + |IC| + \dots + |IN| \quad (2)$$

مقدار بالاتر $|\Sigma DOP|$ نشان‌دهنده عدم تعادل تغذیه‌ای بیشتر و محدودیت‌های بالقوه برای عملکرد محصول است (Montañés et al., 1993; Dixon & Qaderi, 2025). این شاخص‌ها چارچوبی مستحکم برای تشخیص کمبودهای غذایی و بهینه‌سازی راهبردهای کوددهی منطبق بر نیازهای منطقه‌ای ارائه می‌دهند.

نتایج و بحث

کمبود عناصر غذایی در خاک

ویژگی‌های خاک در استان‌های مورد مطالعه تنوع قابل توجهی را نشان داد، به‌طوری‌که تفاوت‌های معنی‌داری در pH، شوری، کربن

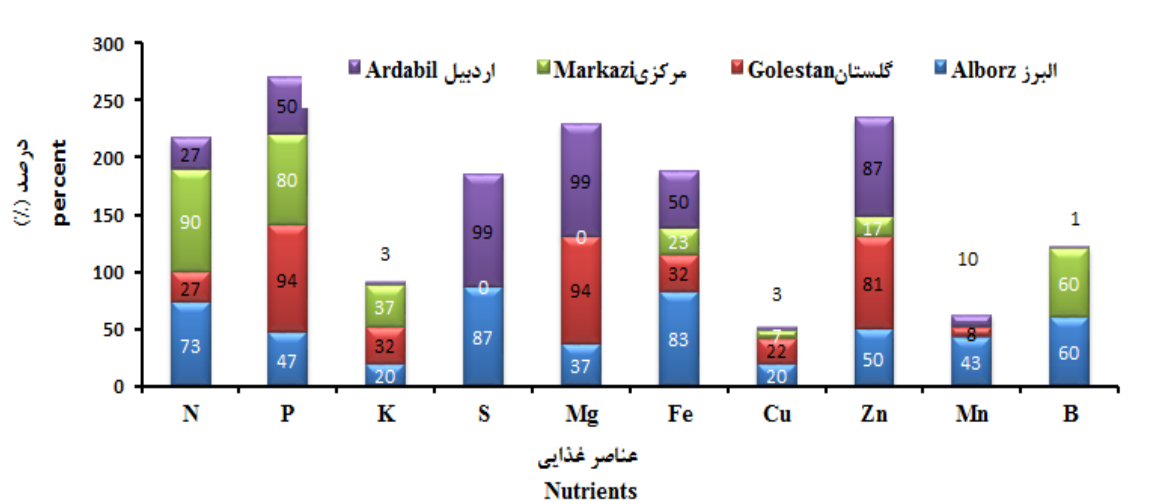
کم مصرف را پیچیده تر می کند (Reddy et al., 2024). سطوح پایین کربن آلی (کمتر از ۱/۴ درصد) منجر به اختلال در معدنی شدن نیتروژن، کاهش فعالیت میکروبی و کاهش تدریجی حاصلخیزی خاک می شود (Smith et al., 2024; Naseri Rad et al., 2021). این اثرات با کشت تک محصولی فشرده و الگوهای نامنظم بارندگی که مشخصه محیط های نیمه خشک است، تشدید می شوند. کربن آلی کمتر از ۱/۴ درصد، ساختار خاک را مختل کرده، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) را کاهش داده و فعالیت میکروبی را محدود می سازد. میکروارگانیسم های حیاتی برای چرخه عناصر غذایی (مانند میکوریزا) غیرفعال می شوند.

رقابت کاتیونی، کمبود روی را بیشتر تشدید می کند. کمبود روی سنتز اکسین و فعالیت آنزیمی را مختل می کند، در حالی که کمبود آهن تولید کلروفیل را مختل کرده و به کلروز و توقف رشد می انجامد. در تمامی استان ها، مواد آهکی باعث تثبیت فسفر به صورت کانی های کلسیم-فسفر نامحلول شده و جذب آن توسط گیاه را محدود کردند. خاک های غنی از رس در استان هایی مانند اردبیل، علی رغم حفظ سطوح بالای پتاسیم تبدلی (۵۰۳ میلی گرم بر کیلوگرم)، کمبود منیزیم (DOP برابر ۱۲/۴-) نشان دادند. این کمبود در درجه اول به تثبیت بین لایه ای ایلیت نسبت داده می شود که یون های منیزیم را در ساختارهای رس محبوس می کند. در نتیجه، کمبودهای خاص عناصر غذایی با وجود مقدار کل کافی ایجاد می شود (Parent et al., 2020). کمبود منیزیم فتوسنتز (کلروفیل) و توزیع کربوهیدرات را مختل کرده و اختلاف عملکرد را تشدید می کند. به کارگیری اصلاح کننده های خاص کانی های رس (مانند ژئولیت) می تواند آزادسازی عناصر غذایی را تعدیل نماید.

خاک های آهکی باعث تثبیت فسفر به هیدروکسی آپاتیت نامحلول $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ می شود و فسفر قابل دسترس گیاه را به سطوح بحرانی (۱۱/۳۹ میلی گرم بر کیلوگرم) کاهش می دهد. **استان گلستان:** خاک های غیرشور این منطقه با میانگین درصد کربن آلی ۱/۴ درصد، کمبود نیتروژن (۲۷)، فسفر (۹۴)، پتاسیم (۳۲)، منیزیم (۱۰۰)، آهن (۳۲)، مس (۲۲)، منگنز (۳۱) و روی (۸۱) را نشان داد (واحدها بر حسب درصد) (شکل ۲). آب و هوای مدیترانه ای ممکن است به آبشویی منیزیم انجامیده و در کمبود کامل آن در تمامی مزارع نمونه برداری شده نقش داشته باشد. **استان اردبیل:** محتوای بالای رس (۴۰ درصد) و شوری (۲/۴ دسی زیمنس بر متر) منجر به کمبود فسفر (۵۰)، پتاسیم (۱)، گوگرد (۹۹)، منیزیم (۹۹)، آهن (۵۰)، مس (۳)، روی (۸۷) و منگنز (۱۰) شده است (واحدها بر حسب درصد) (شکل ۲). افزایش محتوای رس، ظرفیت نگهداری آب را افزایش داد، اما تثبیت منیزیم در لایه های میانی را تشدید کرده و به کمبود منیزیم انجامید (Khoulood et al., 2025; Guo et al., 2016).

در خاک های آهکی، افزایش سطح کلسیم تشکیل کانی های پایدار فسفات کلسیم را افزایش داده و حلالیت و فراهمی زیستی فسفر را کاهش می دهد (Muhammad et al., 2025). این پدیده به ویژه در مناطق نیمه خشک مانند ایران که pH قلیایی، تثبیت فسفر را تشدید می کند، شایع است.

مقادیر pH بالا (بیش از ۷/۵) به رسوب هیدروکسید عناصر کم مصرف ضروری مانند روی و آهن کمک می کند و آنها را برای جذب گیاه غیرقابل دسترس می سازد (Dhaliwal et al., 2021; Molnár et al., 2023). افزون بر این، رقابت بین کاتیون ها برای جایگاه های جذب روی کلوئیدهای خاک، دسترسی به عناصر



شکل ۲- توزیع کمبود عناصر غذایی (به صورت درصد) در خاک های استان های مورد مطالعه

برای نیتروژن، مقدار کربن آلی خاک کمتر از ۱٪ به عنوان آستانه بحرانی برای نشان دادن کمبود نیتروژن استفاده شد.

Figure 2- Distribution of nutrient deficiencies (expressed as percentages) in the soils of the studied provinces
For nitrogen, a soil organic carbon content of less than 1% was used as the critical threshold to indicate nitrogen deficiency.

جدول ۱- محدوده خصوصیات خاک اندازه گیری شده مناطق اجرا (SD: انحراف استاندارد)

Table 1: Ranges of measured soil properties in canola fields across the studied regions (*SD: standard deviation)																
منطقه Region	pH	EC-se	Clay	Sand	OC	S	K	P	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B	
	-	dS m ⁻¹			%					قابل دسترس	Available (mg kg ⁻¹)					
البرز Alborz	means	8.07	0.931	32	35.7	0.81	11.72	398	30.01	2492	554	1.38	3.96	5.44	1.23	0.94
	range	7.6-8.5	0.43-2.17	7-53	14-86	0.28-1.6	2.6-31.3	116-745	3-80	1256-3825	94-1412	0.28-2.62	1.3-6.88	1.62-13.46	0.22-2.8	0.18-2.94
	SD	0.2	0.47	11.9	20	0.31	6.7	184	27.3	610	292	0.56	1.7	2.2	0.78	0.77
مرکزی Markazi	means	7.9	1.47	30.2	36.9	0.66	-	307	11.39	-	-	1.48	8.37	16.68	1.56	0.77
	range	7.6-8.4	0.44-3.7	18-48	14-58	0.13-1.21	-	134-602	3.9-18.2	-	-	0.3-3.4	3.9-14.9	11-22	0.7-2.9	0.15-1.72
	SD	0.17	1	7.9	12	0.23	-	131	4	-	-	0.6	3.6	3.7	0.57	0.44
گلستان Golestan	means	7.7	2.1	22	17	1.4	-	240	8.6	408	98.4	2.1	13.4	8.6	0.8	-
	range	7.5-8	0.7-6.9	10-40	8-40	0.7-2.8	-	84-506	1-23.7	64-3441	24-528	0.6-5.5	3.1-47	4.4-24	0.2-2	-
	SD	0.14	1.8	7.2	6.6	0.57	-	99	4.6	753	105	1.3	11	4.1	0.55	-
اردبیل (مغان) Ardabil (Moghan)	means	7.7	2.4	40	11	1.3	14.1	503	14.8	1708	181	2.8	5.4	8.1	0.6	4.2
	range	7.5-8.1	0.6-5.8	25-55	2.32	0.2-3.1	10.2-17.6	234-831	6.4-27.4	1044-2929	114-303	0.8-4.8	1.4-12.5	4.1-12.7	0.2-1.8	2.2-5.5
	SD	0.13	1.2	8.5	8.8	0.56	2	148	6.7	465	57	0.93	2.8	2.4	0.34	0.86

جدول ۲- غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی کلزا در استان های مختلف (SD: انحراف استاندارد)

منطقه Region	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	%							mg kg ⁻¹			
		N	P	K	S	Mg	Ca	Fe	Cu	Zn	Mn	B
البرز Alborz	Mean	3.892	0.421	2.343	0.465	0.425	1.41	273	6.922	42.55	98.92	45.9
	Range	5.08-2.6	0.54-0.18	3.27-1.25	1.07-0.33	0.99-0.19	2.55-0.75	102-868	13-3.35	75-17	148-49	27-100
	SD	0.616	0.100	0.557	0.151	0.184	0.466	220	2.7	19.7	33	16.52
مرکزی Markazi	Mean	3.360	0.314	2.24	-	-	-	245	5.70	29	73	-
	Range	2.54-4.1	0.22-0.43	1.95-3.02	-	-	-	130-624	3.8-8.3	17-52	51-115	-
	SD	0.443	0.060	0.343	-	-	-	136	1.1	8.2	15.4	-
گلستان Golestan	Mean	3.20	0.62	3.74	-	0.55	3.17	186	8.2	41	62	-
	Range	3.01-3.51	0.37-0.77	2.55-5.95	-	0.27-1.63	1.69-8.31	92-634	5.1-12.6	13-77	30-131	-
	SD	0.091	0.11	0.88	-	0.37	1.37	128	1.7	14	23	-
اردبیل (مغان) Ardabil (Moghan)	Mean	3.5	0.4	3.3	0.5	0.4	1.6	191	7.9	46	80	-
	Range	3.1-4.6	0.3-0.7	3-4.1	0.5-0.9	0.2-0.8	1.12-2.3	101-341	6.5-11	45-57	78-105	-
	SD	0.488	0.101	0.303	0.127	0.13	0.35	80	1.2	7.6	17	-

جدول ۳- انحراف عناصر غذایی از نرم‌های مرجع درصد بهینه (DOP) برای مزارع کلزا در استان‌های مورد مطالعه

Table 3- Nutrient deviation from the optimum percentage (DOP) reference norms for canola fields in the studied provinces

استان‌ها	N	P	K	Ca	S	Mg	B	Zn	Mn	Cu	Fe
Provinces	%						mg kg ⁻¹				
البرز Alborz	3.68	0.412	2.47	1.56	0.44	0.38	54	56	92	8.4	260
مرکزی Markazi	3.62	0.39	2.37	-	-	-	-	33	80	6	284
گلستان Golestan	3.26	0.602	3.05	2.75	-	0.38	-	47	56	8.6	145
مغان Moghan	3.88	0.453	3.25	1.19	0.58	0.56	-	47	86	9.3	214
محدوده Range	3.26-3.88	0.39-0.602	2.37-3.25	1.19-2.75	0.44-0.58	0.38-0.56	54	33-56	56-92	6-9.3	145-284
میانگین Mean	3.61	0.46	2.8	1.83	0.513	0.44	54	45.8	78.5	8.1	226

روی عامل محدودکننده اصلی عملکرد دانه کلزا است. به‌طور مشابه، کمبود فسفر در استان مرکزی (شکل b۳) (DOP -۲۳/۵)، علی‌رغم کوددهی، وجود داشت که نشان‌دهنده تثبیت قوی فسفر در خاک‌های آهکی است (Raiesi et al., 2021). ترتیب اولویت نیازهای غذایی در گیاهان کلزا در این استان به شرح زیر بود: فسفر (۹۳/۵-) < آهن (۱۶/۴-) < روی (۱۴/۶-) < منگنز (۱۱-) < نیتروژن (۸/۵-) < پتاسیم (۶/۸-) < مس (۶/۳-). تجزیه و تحلیل خاک مزارع کلزا در سراسر کشور (Nourgholipour et al., 2022) نشان داد که بیش از ۸۰ درصد مزارع کلزای ایران، فسفر قابل دسترس کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم داشتند.

در استان گلستان، تنها سه عنصر غذایی روی، مس و نیتروژن مقادیر DOP منفی نشان دادند (شکل c۳). وضعیت عناصر غذایی این استان بهتر از سایر مناطق بود که احتمالاً به‌دلیل شرایط اقلیمی مطلوب و محتوای بالاتر کربن آلی (۱/۴ درصد) در مقایسه با سایر مناطق است. خاک دارای کربن آلی مناسب به جلوگیری از آبشویی عناصر غذایی کمک کرده و شرایط فیزیکی و بیولوژیکی بهینه خاک را ارتقا می‌دهد (Smith et al., 2024; Murphy, 2015).

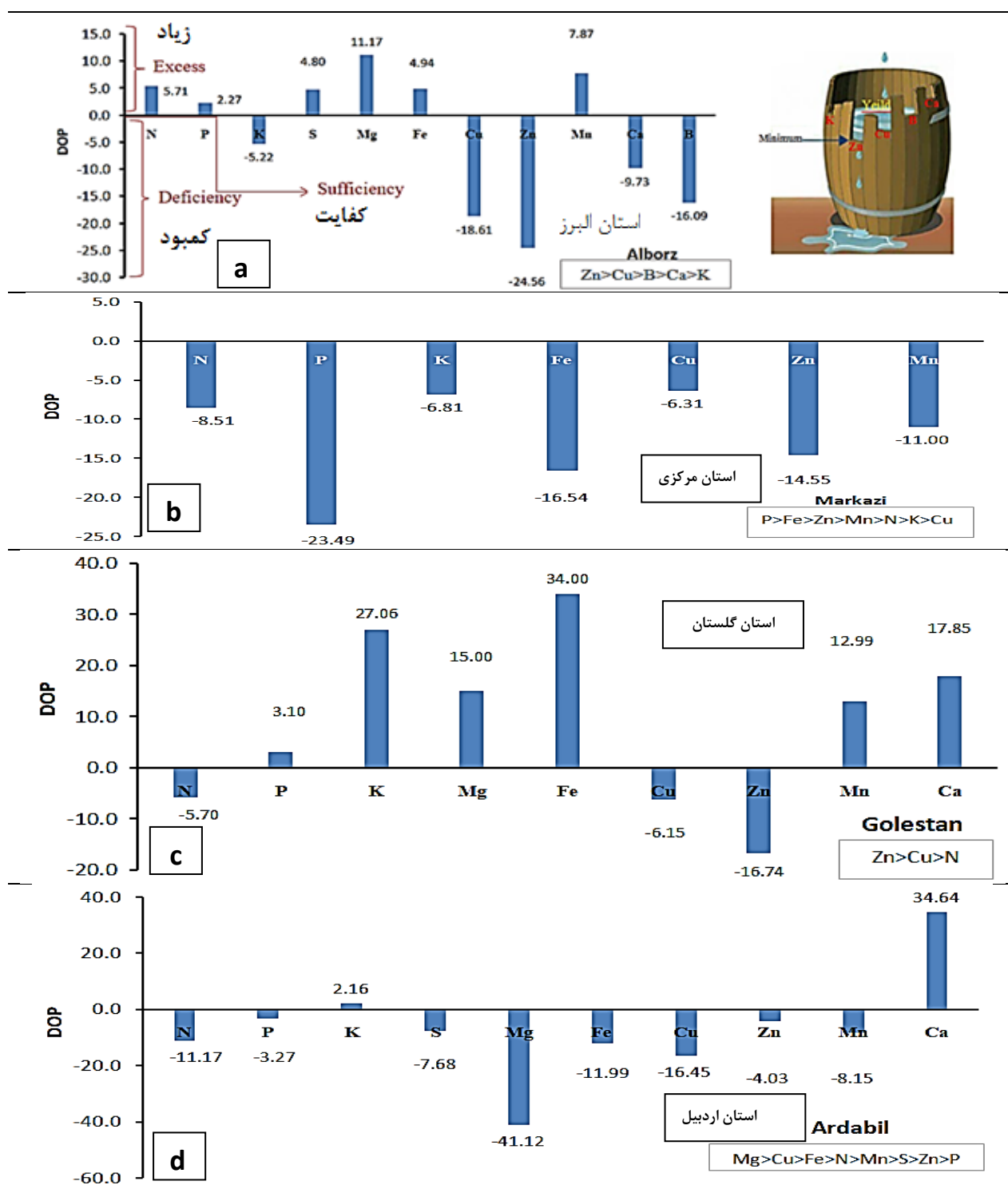
در استان اردبیل (شکل d۳)، منیزیم بحرانی‌ترین عنصر غذایی دارای کمبود بود (DOP = -۱۲/۴۱) و پس از آن گوگرد (۷/۶۸-) (DOP =) بود که نشان‌دهنده رقابت با پتاسیم در پیوند با رس است (Thapa et al., 2025). تجزیه و تحلیل ما از ۱۲۰ مزرعه در چهار استان کشور، تنوع مکانی قابل‌توجهی از لحاظ کمبود عناصر غذایی نشان داد (شکل ۳). فسفر و روی به‌عنوان فراگیرترین محدودیت‌ها بروز نمودند و بین ۴۷ تا ۹۴ درصد مزارع را تحت تأثیر قرار دادند. الگوهای خاص کمبود عناصر غذایی در هر استان متفاوت بود (شکل ۴).

وضعیت عناصر غذایی گیاه و شاخص‌های DOP

غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی کلزا به‌طور قابل توجهی در استان‌های مختلف متفاوت بود (جدول ۲). براساس منابع، آستانه‌های بحرانی برای غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی کلزا در مرحله ساقه‌دهی عبارتند از: نیتروژن ۴-۴/۷ درصد، فسفر ۰/۳۵-۰/۵ درصد، پتاسیم ۳-۴/۴ درصد، گوگرد ۰/۵۳-۰/۵۵ درصد، منیزیم ۰/۱۲-۰/۴ درصد، کلسیم ۱-۲ درصد، آهن ۶۰-۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، مس ۴-۲/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم، منگنز ۳۰-۱۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، روی ۳۰-۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و بور ۱۶-۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم (Reuter & Grant & Bailey, 1990; Ma et al., 2024; Robinson, 1986). نرم‌های DOP با استفاده از میانگین غلظت عناصر غذایی برگ در جمعیت‌های پرمحصول به‌عنوان مرجع تعیین شدند (جدول ۳).

کشت در منطقه گلستان به‌صورت دیم -Golestan is rain-fed region

تجزیه برگ، اختلافاتی بین نتایج خاک و گیاه نشان داد که بر نیاز به رویکردهای تشخیصی یکپارچه تأکید دارد. به‌عنوان مثال، استان البرز با وجود سطوح کافی گوگرد خاک، کمبود گسترده روی (DOP -۲۴/۶) و مس (DOP -۱۸/۲) را نشان داد که احتمالاً به‌دلیل تثبیت ناشی از pH بالا است (Taaleb et al., 2019). این با قانون حداقل لیبیگ (Morris & Blackwood, 2007) همسو است (در شکل a۳ با استفاده از شبکه لیبیگ نشان داده شده است). پرداختن به کمبود سایر عناصر غذایی بدون اصلاح کمبود روی، عملکرد دانه را بهبود نخواهد بخشید. نورقلی‌پور و همکاران (Nourgholipour et al., 2022) روی را به‌عنوان یکی از عناصر غذایی دارای کمبود زیاد در خاک‌های تحت کشت کلزای ایران شناسایی کردند. شکل a۳ نشان می‌دهد که در استان البرز، غلظت



شکل ۳- انحراف از مقادیر شاخص درصد بهینه (DOP) برای عناصر غذایی در مزارع کلزا در استان‌های مورد مطالعه
Figure 3- Deviation from Optimum Percentage (DOP) indicator values for nutrients in canola farms across the studied provinces

جدول ۴- ترتیب کمبود عناصر غذایی در استان‌های مختلف

Table 4- Order of nutrient deficiencies in different provinces

نام استان	ترتیب کمبود عناصر غذایی
Province	Nutrient deficiency order
البرز	Zn > Cu > B > Ca
Alborz	
مرکزی	فسفر < آهن < روی < منگنز
Markazi	P > Fe > Zn > Mn
گلستان	روی < مس < نیتروژن
Golestan	Zn > Cu > N
اردبیل	منیزیم < مس < آهن < گوگرد
Ardabil	Mg > Cu > Fe > S

قرار می‌گیرد. استان البرز بالاترین نقطه شکست منحنی NBI یا BPC (۱۴۶) را داشت و پس از آن به ترتیب استان‌های اردبیل (۱۳۹)، مرکزی (۱۳۸) و گلستان (۱۳۳) قرار گرفتند.

البرز: با ۴۷ درصد خاک‌هایی که پس از نقطه شکست منحنی NBI قرار دارند، با عدم تعادل عناصر غذایی قابل توجهی روبرو است که احتمالاً به دلیل کوددهی بیش از حد یا تعادل ضعیف عناصر غذایی است. شیب متوسط (۰/۵۶-) نشان‌دهنده کاهش تدریجی اما تأثیرگذار عملکرد با افزایش NBI است. عنصر روی (۲۴/۶- DOP) و مس (۱۸/۲- DOP) محدودکننده‌ترین عوامل بودند (شکل ۴ ا).

مرکزی: شیب کم (۰/۱۴-) و انحراف معیار پایین (۵۳/۹) نشان‌دهنده پویایی پایدارتر عناصر غذایی است، اگرچه ۲۳ درصد از خاک‌ها بعد از BPC قرار دارند که مدیریت دقیق را ضروری می‌نماید (شکل ۴ ب). کاهش عملکرد (۲۲۴۹ کیلوگرم در هکتار) با کمبود شدید فسفر و افزایش مقادیر NBI (بیش از ۱۳۸) همسو بود که نشان‌دهنده عدم تعادل در تأمین عناصر غذایی است. کمبود عنصر فسفر (۲۳/۵- DOP) در این منطقه غالب بود که نشان‌دهنده تثبیت قوی کلسیم-فسفر در خاک‌های آهکی است. کمبود فسفر، متابولیسم انرژی (ATP/ADP) و توسعه ریشه و رشد گیاه را به‌ویژه در مراحل رشدی که نیازمند فسفر است مثل گلدهی، محدود می‌کند.

گلستان: انحراف معیار شدید و دامنه وسیع NBI به شرایط ناهمگن خاک یا شیوه‌های کشاورزی ناسازگار اشاره دارد که مدیریت مناسب را ضروری می‌سازد. شرایط آب و هوایی بهتر و محتوای بالاتر کربن آلی (۱/۴ درصد) برخی کمبودهای غذایی را کاهش داد، ولی منیزیم و فسفر همچنان محدودیت‌های زیادی داشتند (شکل ۴ ج).

اردبیل: دارای شدیدترین شیب نمودار (۰/۶۹-) است و نشان می‌دهد که عدم تعادل جزئی عناصر غذایی می‌تواند تولید محصول را به شدت کاهش دهد (شکل ۴ د). با این حال، درصد پایین‌تر خاک‌های پس از نقطه BPC (۱۷٪) نشان‌دهنده مسائل محلی به جای مشکلات گسترده است. عملکرد بهتر (۲۸۷۰ کیلوگرم در

انحراف از درصد بهینه (DOP) این کمبودها را به صورت کمی بیان نمود؛ به طوری که عنصر روی بالاترین انحراف (۲۴/۶- DOP) و آهن با اختلاف کمی (۱۶/۴- DOP) رتبه دوم را نشان داد. نکته قابل توجه این است که کمبود فسفر در استان مرکزی که در آن سطوح فسفر قابل‌دسترس به شدت پایین بود (۱۱/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، مشهودتر بود.

عملکرد دانه و شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI)

شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI) که به صورت مجموع مقادیر مطلق DOP محاسبه می‌شود، با عملکرد همبستگی معکوس داشته و تأیید می‌کند که عدم تعادل بیشتر عناصر غذایی به کاهش عملکرد می‌انجامد. تجزیه و تحلیل‌های آماری تأیید کردند که حدود آستانه NBI بین ۱۳۳ تا ۱۴۶ با کاهش قابل توجه عملکرد مطابقت دارند ($p < 0.01$). همبستگی معکوس بین NBI و عملکرد (شکل ۴) نظر مینا و همکاران (Meena et al., 2024) را تأیید می‌کند، که نشان دادند آستانه‌های NBI بیش از ۱۳۰ با اختلال در زنجیره‌های انتقال الکترون، راندمان فتوسنتز را در کلزای کانادایی کاهش می‌دهد (Kheshtpaz et al., 2024). در سیستم‌های کشت دیم مانند گلستان، NBI بالا را می‌توان به تنش اکسیداتیو در شرایط کمبود آب مرتبط دانست که باعث تشدید کاهش عملکرد می‌شود. آستانه‌های NBI مختص هر منطقه از ۱۳۳ (گلستان) تا ۱۴۶ (البرز) متغیر بود. فراتر از این حدود، عملکرد به ازای هر واحد افزایش NBI، ۱۲ تا ۱۸ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده هم‌افزایی عناصر غذایی است (شکل ۴ a,b,c,d). تغییرات منطقه‌ای در مقادیر NBI به شدت با نتایج عملکرد مشاهده شده همبستگی داشت.

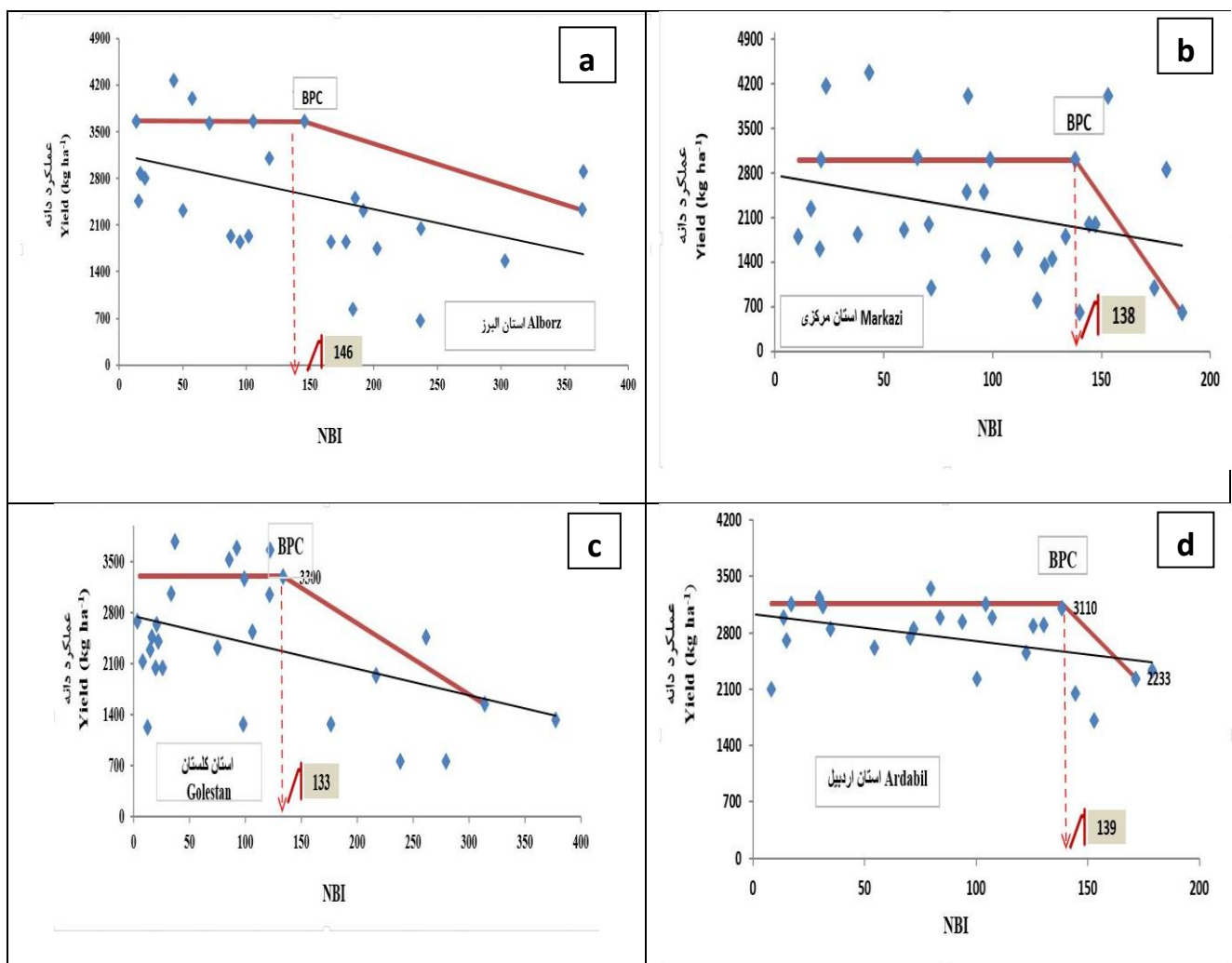
نکته قابل توجه این است که وقتی NBI از یک آستانه مشخص (نقطه شکست منحنی NBI یا BPC) فراتر می‌رود، کاهش عملکرد بیشتر مشهود می‌شود. نقطه شکست منحنی (BPC) NBI به مثابه آستانه‌ای تعریف می‌شود که فراتر از آن، کاهش عملکرد با شیب تندتری رخ می‌دهد. در زیر این آستانه، عملکرد کمتر تحت تأثیر NBI

(*et al.*, 2023).

این مطالعه بر اهمیت پرداختن به تنوع منطقه‌ای در خواص خاک و پویایی عناصر غذایی برای بهینه‌سازی تولید کلزا تأکید می‌کند. بینش‌های دقیق‌تر در مورد فرآیندهای تثبیت عناصر غذایی، مانند رسوب هیدروکسیدی، رقابت کاتیونی و تثبیت به‌صورت فسفات کلسیم، راهبردهای عملی برای غلبه بر عوامل محدودکننده عملکرد ارائه می‌دهد. اقداماتی مانند استفاده از اصلاح‌کننده‌ها، کودهای زیستی حل‌کننده فسفات، کوددهی دقیق و تناوب زراعی برای افزایش سلامت خاک و کارایی استفاده از عناصر غذایی ضروری هستند (*Banerjee et al.*, 2025; *Smith et al.*, 2024).

هکتار) در شرایط نسبت متعادل منیزیم: پتاسیم (۱۰/۲) حاصل شد که نشان‌دهنده بهینه بودن برهمکنش‌های عناصر غذایی است. عناصر منیزیم (DOP - ۱۲/۴) و گوگرد (DOP - ۱۰/۳) بحرانی‌ترین کمبودها بودند که احتمالاً به دلیل رقابت با پتاسیم پیوند خورده با رس بود (*Thapa et al.*, 2025).

به‌طور کلی، مقادیر NBI برای مزارع کلزای مورد مطالعه از ۱۳۳ تا ۱۴۶ متغیر بود. کشاورزان و مشاوران می‌توانند از این محدوده به‌عنوان راهنمایی برای توصیه‌های کودی استفاده کنند. شکل ۴ نشان می‌دهد که توزیع نقاط داده در اطراف خط رگرسیون در همه استان‌ها قابل توجه است، که نشان می‌دهد عملکرد نهایی نه تنها تحت تأثیر NBI بلکه تحت تأثیر عوامل دیگر نیز قرار دارد (*Shehu*



شکل ۴- شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI) برای مزارع کلزا در استان‌های مورد مطالعه

a: استان البرز، b: استان مرکزی، c: استان گلستان و d: استان اردبیل. NBI: شاخص تعادل تغذیه ای. BPC: نقطه شکست منحنی NBI.

Figure 4- Nutrient Balance Index (NBI) for canola farms across the studied provinces

a: Alborz province, b: Markazi province, c: Golestan province, d: Ardabil province. NBI: nutrient balance index. BPC: break point of NBI curve

همسوسازی روش‌های مدیریتی با شرایط کشاورزی-اکولوژیکی منطقه‌ای، ایران می‌تواند عملکرد کلزا، تاب‌آوری خاک و پایداری کشاورزی بلندمدت را بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که محدودیت عملکرد کلزا در اکوسیستم‌های کشاورزی نیمه‌خشک ایران عمدتاً ریشه در کمبودهای غذایی خاص منطقه، به‌ویژه فسفر و روی، دارد که تحت تأثیر شرایط قلیایی خاک، محتوای کم ماده آلی و ویژگی‌های کانی‌شناسی تشدید می‌شوند. با به‌کارگیری روش‌های تشخیصی پیشرفته‌ای مانند انحراف از درصد بهینه (DOP) و شاخص تعادل غذایی (NBI)، نه تنها این کمبودها به‌صورت کمی شناسایی شدند، بلکه آستانه‌های بحرانی عملکرد ($133-146$ NBI) برای هر منطقه تعیین گردید. یافته‌ها حاکی از آن است که حتی با وجود مقادیر کل کافی عناصر در خاک، فرآیندهای شیمیایی مانند تثبیت کلسیمی فسفر، رسوب هیدروکسیدی روی و آهن، و تثبیت بین‌لایه‌ای منیزیم در خاک‌های رسی، قابلیت جذب آن‌ها را به‌شدت محدود می‌کنند. بنابراین، مدیریت یکسان و توصیه‌های کودی عمومی برای این خاک‌های ناهمگن ناکارآمد است. راه‌حل پایدار برای غلبه بر این چالش، گذار از مدیریت سنتی به سمت کشاورزی دقیق و مکان‌محور است. این امر مستلزم تلفیق ابزارهای تشخیصی مانند DOP و NBI با راهبردهای عملی نظیر کاربرد کودهای زیستی (مانند باکتری‌های حل‌کننده فسفر و روی)، افزایش ماده آلی خاک، اصلاح pH، و رعایت نسبت‌های بهینه عناصر غذایی (مانند منیزیم به پتاسیم) است. چنین رویکرد یکپارچه‌ای نه تنها شکاف عملکرد را کاهش می‌دهد، بلکه کارایی مصرف کود را افزایش داده و سلامت و تاب‌آوری خاک را در بلندمدت تضمین می‌کند. برای تحقق این هدف، انجام تحقیقات آتی برای بومی‌سازی بیشتر آستانه‌های تشخیصی و ترویج فناوری‌های نقشه‌برداری مکانی در بین کشاورزان و کارشناسان، ضروری به‌نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

از مؤسسه تحقیقات خاک و آب به‌پاس فراهم‌آوردن امکانات لازم برای اجرای این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود. نتایج این مقاله برگرفته از پروژه ملی به شماره ۹۷۰۰۹۸-۹۶۰۵۶-۰۳۳-۱۰-۱۰-۰۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب می‌باشد.

این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرپذیری عملکرد کلزا در مناطق کشاورزی-اکولوژیکی ایران در درجه اول ناشی از کمبود عناصر غذایی خاص منطقه، به‌ویژه فسفر و روی، همراه با قلیائیت خاک، کربن آلی کم و ویژگی‌های کانی‌شناسی است. بینش‌های دقیق در مورد فرآیندهای تثبیت عناصر غذایی، اهمیت پرداختن به pH خاک، افزایش محتوای مواد آلی و بهینه‌سازی نسبت‌های عناصر غذایی برای بهبود فراهمی زیستی را آشکار می‌سازد. آستانه‌های معتبر NBI دستورالعمل‌های عملی برای کشاورزی دقیق ارائه داده و کشاورزان را قادر می‌سازد تا کاربرد کود را با نیازهای منطقه‌ای تطبیق دهند. با اجرای راهبردهای مدیریت عناصر غذایی خاص منطقه، می‌توان شکاف‌های عملکرد را برطرف کرده و پایداری را در سیستم‌های دانه‌روغنی نیمه‌خشک ارتقا داد. شاخص تعادل، نسبت‌های حیاتی عناصر غذایی (مانند فسفر:روی، منیزیم:پتاسیم) را برای تشخیص عدم تعادل‌ها ادغام می‌کند. با این حال، تغییرپذیری عملکرد (شکل ۴) بر لزوم درنظر گرفتن NBI همراه با عوامل محلی (مانند شوری، سمیت بور) تأکید می‌کند.

استفاده از کودهای زیستی، اصلاح‌کننده‌های آلی و فناوری‌های کشاورزی دقیق، در مدیریت عناصر غذایی راه‌های امیدوارکننده‌ای برای غلبه بر این چالش‌ها ارائه می‌دهند. به‌عنوان مثال، نشان داده شده است که تلقیح‌کننده‌های زیستی غنی‌شده (مانند باکتری‌های حل‌کننده روی)، انحلال فسفر و جذب روی را در خاک‌های آهکی افزایش می‌دهند (Purakayastha et al., 2023). به‌طور مشابه، کشت پوششی و شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌توانند محتوای ماده آلی خاک را افزایش دهند، چرخه عناصر غذایی را بهبود دهند و خطرات فرسایش را کاهش دهند (Aliyu et al., 2021). شاخص DOP کمبودهای خاص هر مکان را شناسایی می‌کند. با ترکیب این راهبردها با ابزارهای تشخیصی پیشرفته مانند DOP و NBI، می‌توان راه‌حل‌های زمینه‌مختصی توسعه داد که تولید را با نظارت بر محیط‌زیست متعادل می‌سازد. نقشه‌برداری مکانی می‌تواند مداخلات (مانند اسیدی‌سازی در مناطق با pH بالا، کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی در مناطق با کربن آلی پایین) را هدف قرار دهد.

تحقیقات آینده باید با ادغام عوامل محیطی و داده‌های عملکرد، بر اصلاح آستانه‌های NBI تمرکز کنند، درحالی‌که ذینفعان باید رویکردهای جامعی را برای به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی اتخاذ نمایند (Wen et al., 2023; Kirkegaard et al., 2021).

References

1. Aghabeygi, M., & Dönmez, C. (2024). Estimating yield response functions to nitrogen for annual crops in Iran. *Agronomy*, 14(3), 436. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030436>
2. Agricultural statistics. (2025). *Crop products of 2023-2024. The first volume*. Bureau of Statistics and Information Technology, Vice President of Planning and Economic Affairs. Ministry of Jihad Agriculture, Iran, 163 pages. (In

- Persian). <https://dpe.maj.ir/uploads/21/2024/Aug/27/AJ1-1401-1402.pdf>
3. Aliyu, K.T., Huising, J., Kamara, A.Y., Jibrin, J.M., Mohammed, I.B., Nziguheba, G., Adam, A.M., & Vanlauwe, B. (2021). Understanding nutrient imbalances in maize (*Zea mays* L.) using the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) approach in the Maize belt of Nigeria. *Scientific Reports*, 11(1), 16018. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95172-7>
4. Bandehagh, A., Dehghanian, Z., Henry, R., & Hossain, M.A. (2021). Salinity tolerance in Canola: insights from proteomic studies. In *Brassica Breeding and Biotechnology*. Intech Open. ISBN: 9781839686962. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96649>
5. Banerjee, K., Dutta, S., Das, S., & Sadhukhan, R. (2025). Crop simulation models as decision tools to enhance agricultural system productivity and sustainability – a critical review. *Technology in Agronomy*, 5, e002. <https://doi.org/10.48130/tia-0024-0032>
6. Chaleshtori, A.A., Panahpour, E., Iranipour, R., & Moezzi, A. (2021). Diagnosing the nutritional balance of almond (*Prunus* sp.) orchards using DRIS and DOP methods. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 1640-1651. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10214-0>
7. Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants, and waters. *Soil Science*, 93, 1-68.
8. Dhaliwal, S.S., Sharma, V., & Verma, G. (2021). Agronomic strategies for improving micronutrient use efficiency in crops for nutritional and food security. In *Input Use Efficiency for Food and Environmental Security*, 123-156. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5199-1_5
9. Dixon, S.L., & Qaderi, M.M. (2025). Canola responds differently to nitrogen forms under temperature and carbon dioxide conditions. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 37(1), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s40626-024-00350-3>
10. Faizullahzadeh Ardabili, M. (2003). Correlation between sulfur extracted by five methods with responses of Canola plant in some soils of country. *Proceedings of the 8th Congress of Soil Sciences of Iran*, 9-12 September 2003, Iran. (In Persian)
11. Gee, G., & Bauder, J. (1986). Particle-size Analysis. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
12. Goodarzi, K., Hosseini Farahi, M., & Kavooosi, B. (2010). Relationship of nutritional balance index (NBI) with yield and quality indices of grape vine (*Vitis vinifera* L.). *Acta Horticulturae*, 931, 259-266. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.931.28>
13. Grant, C.A., & Bailey, L.D. (1990). Fertility management in canola production. In: *Proceed. International Canola Conference*, April 1990, Atlanta, GA, USA. Potash & Phosphate Institute, Atlanta, GA, USA. <https://doi.org/10.4141/cjps93-087>
14. Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, 4(2), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
15. Horneck, D.A., & Miller, R.O. (1998). Determination of total nitrogen in plant tissue. In: *Handbook of methods for plant analysis* (Kalra, Y.P., Ed.). CRC Press, Boca Raton, FL (USA), pp.75-84. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.812089>
16. Hosseini, S.M., & Tadayan, M.S. (2024). Ionome composition influence wheat yield on saline and calcareous soils: the case of *Triticum aestivum* L. var. 'Sirvan'. *Journal of Plant Nutrition*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2408398>
17. Jemenez, S.J., Pinochet, Y., Gogocena, J.A., & Betran, M.A.M. (2007). Influence of different vigor cherry rootstocks on leaves and shoot mineral composition. *Scientia Horticulturae*, 112, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.010>
18. Jones, C., & Olson-Rutz, K. (2016). *Soil nutrient management for canola*. EB0224. Montana State University Extension, Bozeman, MT. <https://www.montana.edu/extension/pspp/documents/SoilNutrientCanola.pdf>
19. Jost, E., Schönhart, M., Mitter, H., Zoboli, O., & Schmid, E. (2025). Integrated modelling of fertilizer and climate change scenario impacts on agricultural production and nitrogen losses in Austria. *Ecological Economics*, 227, 108398. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108398>
20. Kheshtpaz, N., Janmohammadi, M., & Sabaghnia, N. (2024). Foliar spray can improve rapeseed yield components under continuous irrigation. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 54, p.e80539. <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5480539>
21. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001a). Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agronomy Journal*, 93, 809-814. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934809x>
22. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001b). Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal*, 93(4), 802-808. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934802x>
23. Khoulood, M., Ferji, K., Six, J.L., Beniazza, R., & Lahcini, M. (2025). Clay-based modulation of nutrient release: Ghassoul as nutrient carrier for enhanced fertilizer efficiency. *Emergent Materials*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00943-3>

24. Kirkegaard, J.A., Lilley, J.M., Berry, P.M., & Rondonini, D.P. (2021). Canola. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, 518-549. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00017-7>
25. Landoll, E.K. (2018). *Impacts of Soil pH on Winter Canola Cultivars in the Southern Great Plains* (Doctoral dissertation, Oklahoma State University). <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2275074>
26. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
27. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA and ASA, Madison, WI, 437-474. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>
28. Ma, B.L., Herath, A., & Smith, D.L. (2024). Assessing critical plant sulfur concentration and nitrogen to sulfur ratio in spring canola production. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(6), 711-724. <https://doi.org/10.1002/jpln.202400096>
29. Mahmoodi Nezhad Dezfully, S.H., & Mostashari, M. (2022). Evaluation of nutritional status and priority of nutrients requirement of canola by compositional nutrient diagnosis (CND) and deviation from optimum percentage (DOP) methods in north of Khuzestan. *Iranian Journal of Soil Research*, 36(1),
30. Mahmoud Soltani, S., Ebadi, A.A., Tajadoditalab Rashti, K., Sartipi, S., & Shakouri Katigari, M. (2025). Foliar spray of glycine-chelated zinc (Zn) and iron (Fe) lowered the effect of macronutrient deficiencies and enhanced rice yield components, yield, and grain biofortification. *Journal of Plant Nutrition*, 48(1), 147-163. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2378923>
31. Meena, V., Dotaniya, M.L., Meena, M.D., Jat, R.S., Meena, M.K., Choudhary, R.L., Meena, H.S., Meena, B.L., Meena, L.K., & Rai, P.K. (2024). Conjoint application of nutrients as customized fertilizers influences growth and yield characteristics of *Brassica juncea* L., augmented profitability and nutrient use efficiency indices. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02062-8>
32. Meier, U., Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Heß, M., Lancashire, P.D., Schnock, U., Stauß, R., Van Den Boom, T., & Weber, E. (2009). The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants—history and publications. *Journal für Kulturpflanzen*, 61(2), 41-52. ISSN 0027-7479
33. Molnár, Z., Solomon, W., Mutum, L., & Janda, T. (2023). Understanding the mechanisms of Fe deficiency in the rhizosphere to promote plant resilience. *Plants*, 12(10), 1945. <https://doi.org/10.3390/plants12101945>
34. Montañés, L., Heras, L., Abadia, J., & Sanz, M. (1993). Plant analysis interpretation based on a new index: deviation from optimum percentage. *Journal of Plant Nutrition*, 16, 1289-1308. <https://doi.org/10.1080/019041693.09364613>
35. Morris, S.J., & Blackwood, C.B. (2007). The ecology of soil organisms. In *Soil microbiology, ecology and biochemistry*, pp.195-229. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047514-1.50012-3>
36. Mostashari, M., Khosravinejad, A., & Golmohammadi, M. (2018). Comparative study of DOP and CND methods for leaf nutritional diagnosis of *Vitis Vinifera* in Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(5), 576-584. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1432633>
37. Muhammad, H., Ijaz, M., Sattar, A., Ul-Allah, S., Sher, A., Asif, M., Dilshad, M., Mahmood, K., Riaz, M.W., Zaheer, M.S., & Rizwan, M. (2025). Synergistic effects of PGPRs and fertilizer amendments on improving the yield and productivity of Canola (*Brassica napus* L.). *BMC Plant Biology*, 25(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06062-3>
38. Murphy, B.W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605-635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
39. Naseri Rad, H., Rezvani Moghadam, P., Koocheki, A., & Ashraf Jafari, A. (2021). The effect of cropping systems management and wheat residues on grain yield and efficiency indices of nitrogen and phosphorus in autumnal rapeseed. *Applied Field Crops Research*, 34(2), 142-120. <https://doi.org/10.22092/aj.2021.352417.1509>
40. Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, 961-1010. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
41. Nourgholipour, F., Tohidlu, S., Jafarnejadi, A., Mohammadnejad, Y., Mirzashahi, K., Ghaderi, J., Arzanesh, M., Passandideh, M.H., Bybordi, A., Montajabi, N., Zolfi Bavariani, M., Keshavarz, P., Seilsepour, M., Asadi, A., Izadi, P., Sedighi, S., Davatgar, N., Mohajer, A., & Dadivar, M. (2022). Comparison of farmer-specific fertilization method and the recommended combined fertilization in parts of Iran. *Land Management Journal*, 10(2), 209-220. <https://doi.org/10.22092/lmj.2022.127564>
42. Nur, M.A., Kamruzzaman, M., & Amin, M.S. (2025). Microbial immobilization and phosphorus transformation in saline soil: Effects of organic amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02209-1>
43. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In: A.L. Page (ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, pp.403-430.

44. Parent, L.E., Rozane, D.E., de Deus, J.A.L., & Natale, W. (2020). Diagnosis of nutrient composition in fruit crops: Major developments. In *Fruit Crops*, 145-156. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00012-5>
45. Purakayastha, T.J., Bhaduri, D., Kumar, D., Yadav, R., & Trivedi, A. (2023). Soil and plant nutrition. In *Trajectory of 75 years of Indian agriculture after independence*, 365-411. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7997-2_15
46. Raiesi, T., Moradi, B., & Mousavi, S.M. (2021). Alterations of P fractions and some biochemical features in rhizosphere soil induced by the root activities of citrus rootstocks with different P acquisition efficiency. *Eurasian Soil Science*, 55(2), 212-220. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020107>
47. Reddy, M.B., Sravani, P., Kumar, S., Rajawat, M.V.S., Jaiswal, D.K., Dhar, S., Azman, E.A., Garg, K., & Kumar, S. (2024). Nitrogen use efficiency reimagined: advancements in agronomic, ecophysiological, and molecular strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 1-27. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2447840>
48. Reuter, D.J., & Robinson, J.B. (1986). Plant analysis: An interpretation manual. Inkata Press Pty. Ltd., Melbourne, Australia. ISBN: 9780643101265.
49. Rhoades, J. (1982). Soluble salts. In: Page, A.L. (ed.), *Methods of soil analysis*, Part 2, Chemical and microbiological properties. SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10>
50. Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J., & Tandon, H.L.S. (2006). Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*, pp. 348.
51. Sharma, J., Shikhamany, S.D., Singh, R.K., & Raghupathi, H.B. (2005). Diagnosis of nutrient imbalance in Thompson seedless grape grafted on Dog Ridge rootstock by DRIS common. *Soil Science and Plant Analysis*, 36(11), 2823-2838. <https://doi.org/10.1080/00103620500305991>
52. Shehu, B.M., Garba, I.I., Jibrin, J.M., Kamara, A.Y., Adam, A.M., Craufurd, P., Aliyu, K.T., Rurinda, J., & Merckx, R. (2023). Compositional nutrient diagnosis and associated yield predictions in maize: A case study in the northern Guinea savanna of Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 87(1), 63-81. <https://doi.org/10.1002/saj2.20472>
53. Smith, P., Poch, R.M., Lobb, D.A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G.D., Anjos, L.H., Castellano, M., Ndzana, G.M., Chenu, C., & Naidu, R. (2024). Status of the world's soils. *Annual Review of Environment and Resources*, 49. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030323-075629>
54. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
55. Statista, (2025). Leading producing countries of rapeseed in 2023/2024. [online] Available at: <https://www.statista.com/statistics/263930/worldwide-production-of-rapeseed-by-country>
56. Taalab, A.S., Ageeb, G.W., Siam, H.S., & Mahmoud, S.A. (2019). Some characteristics of calcareous soils. A review. *Middle East Journal of Agriculture Science*, 8(1), 96-105.
57. Thapa, D., Westra, S., Oas, V., Kilin, D., & Kilina, S. (2025). Tunable magnetic order in Fe-Mg codoped montmorillonite nanoclay interfaced with amino acids. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06483>
58. Walworth, J.L., & Sumner, M.E. (1987). The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Advances in Soil Science*, 6, 149-188. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_4
59. Wang, L., Ju, C., Han, C., Yu, Z., Bai, M.Y., & Wang, C. (2025). The interaction of nutrient uptake with biotic and abiotic stresses in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*. <https://doi.org/10.1111/jipb.13827>
60. Wen, G., Ma, B.L., Luce, M.S., Liu, K., Mooleki, P.S., Crittenden, S., Gulden, R., Semach, G., Tiege, P., & Lokuruge, P. (2023). Optimizing nitrogen fertilization for hybrid canola (*Brassica napus* L.) production across Canada. *Field Crops Research*, 302, 109048. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109048>