

Optimization of Fertilizer Use in Sugar Beet Fields in Khorasan Razavi Province Using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) Method: Results of a Two-Year Study

J. Ghaderi^{1*}, Sh. Fathi¹, M. Forouhar², K. Khalkhal¹

1- Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran

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

2- Soil and Water Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Iran

Received: 24 February 2025

Revised: 17 July 2025

Accepted: 21 September 2025

Available Online: 27 September 2025

How to cite this article:

Ghaderi, J., Fathi, Sh., Forouhar, M., & Khalkhal, K. (2025). Optimization of fertilizer use in sugar beet fields in Khorasan Razavi province using the compositional nutrient diagnosis (CND) method: Results of a two-year study. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 349-360. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92310.1468>

Introduction

In Iran, sugar beet is the second most prominent irrigated crop after forage corn and wheat, occasionally ranking third after sugarcane in specific years. This versatile plant not only serves as a primary source of sugar but also contains essential nutrients beneficial to human health. Its adaptability to diverse environmental conditions allows it to be cultivated across various regions of the country. Sugar beet production plays a significant role in Iran's agricultural sector, with recent data indicating an increase in production levels over the years. However, achieving optimal performance and desired product quality requires a precise understanding of the nutritional status of sugar beet. Therefore, awareness of its nutritional condition is crucial for enhancing both quantity and quality. Soil tests based on critical levels can indicate the adequacy of nutrients, but in some cases, soil testing alone is insufficient to reveal nutrient deficiencies or nutritional imbalances. Under these conditions, plant analysis leads to better identification of deficiencies as well as understanding the concentration of elements and comparing them with reference concentrations to ensure optimal plant growth. One method for interpreting leaf analysis results is the use of compositional nutrient diagnosis (CND) method. The CND method offers an effective approach for assessing the nutritional status of sugar beet plants by analyzing nutrient composition in plant tissues against standard values. Its primary objective is to identify nutritional deficiencies, optimize fertilizer use, mitigate adverse environmental impacts from excessive fertilization, and boost crop yields. This research aims to evaluate and optimize the nutritional status of sugar beet over two agricultural years in Khorasan Razavi province using the CND method.

Materials and Methods

The study was conducted over two agricultural years on sugar beet crops in Khorasan Razavi province, involving 30 fields in the first year and 31 fields in the second year, with varying soil properties. After selecting the fields, prior to planting and fertilizing the sugar beet, a composite soil sample was taken from each field, covering an area of one hectare and a depth of 0-30 cm. The physical and chemical properties of these samples were measured in the laboratory. Leaf sampling was performed in both years to determine nutrient concentrations, approximately 90 to 120 days after planting, using young, healthy, fully developed leaves. After washing with



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.2025.92310.1468>

distilled water, the leaf samples were dried in an oven at 70°C for 48 hours, ground with an electric grinder, and then nutrient concentrations were measured. In this study, the high-yielding group in sugar beet farms was identified using the CND method through mathematical and statistical analysis and the application of the cumulative function.

Result

Soil analysis revealed a wide range of physical and chemical characteristics among the selected fields. The findings in this province revealed that 67%, 52.5%, 82%, 62%, 59%, and 53% of the fields were deficient in phosphorus, potassium, iron, manganese, zinc, and copper, respectively. The results showed that the average yield across all fields was 58.5 tons per hectare, and the median yield of 70.9 tons per hectare was used as the threshold to distinguish between fields with favorable and unfavorable nutritional status. Based on the mean CND indices, 54.27% of the fields in this province were in a balanced nutritional state, while 45.43% were imbalanced. The most limiting macronutrients in low-yield farms were phosphorus (49%) and potassium (44%), while for micronutrients, the main limitations were copper (29%) and manganese (22%).

Conclusion

An assessment of the nutritional status of sugar beet fields in Khorasan Razavi province reveals significant challenges in nutrient balance. Widespread imbalances, particularly in phosphorus, potassium, and copper, along with soil salinity and alkalinity, highlight the need for a revision in fertilization programs. The CND results emphasize that over 45% of fields require adjustments in fertilizer application patterns to prevent the adverse effects of excesses and critical deficiencies. Additionally, the high yield of some fields (20 farms with an average of 70.9 tons per hectare) proves that achieving nutritional balance not only improves productivity but also reduces financial resource wastage and environmental pollution. The CND method, as a precise tool, enables the detection of nutritional imbalances even in cases where soil nutrient concentrations appear optimal. Therefore, it is recommended that management programs based on soil testing and modern diagnostic methods like CND, along with consideration of local conditions (salinity and lime content), be implemented to ensure sustainable sugar beet production in the region.

Keywords: Compositional nutrient diagnosis (CND), Sugar beet, Tissue analysis

بهینه‌سازی مصرف کود در مزارع چغندر قند با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND): نتایج یک مطالعه دو ساله

جلال قادری^{۱*} - شاهرخ فاتحی^۱ - مجید فروهر^۲ - کمال خلخال^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

چکیده

استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND-clr) روش مفیدی برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی چغندر قند است. هدف از این تحقیق ارزیابی و بهینه‌سازی وضعیت تغذیه‌ای چغندر قند به مدت دو سال زراعی در استان خراسان رضوی با روش CND-clr است. در سال اول ۳۰ مزرعه و در سال دوم ۳۱ مزرعه با دامنه متفاوتی از خصوصیات خاک، انتخاب گردید. در سال‌های اول و دوم، نمونه‌برداری از برگ‌ها برای تعیین غلظت عناصر غذایی انجام شد. در این پژوهش گروه عملکرد زیاد در مزارع چغندر قند، با استفاده از روش CND از طریق ریاضی، آماری و کاربرد تابع تجمعی متمایز گردید. نتایج حاصل از تجزیه خاک در استان خراسان رضوی نشان داد که ۶۷٪، ۵۲٪، ۸۲٪، ۶۲٪ و ۵۳٪ مزارع به ترتیب دچار کمبود فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس در خاک بودند. میانگین عملکرد در کل مزارع ۵۸/۵ تن بر هکتار بود و عملکرد حد واسطه ۷۰/۹ تن در هکتار به عنوان معیار تفکیک مزارع با وضعیت تغذیه‌ای مطلوب و نامطلوب استفاده شد. بر اساس میانگین شاخص‌های CND، ۲۷٪/۵۴٪ مزارع این استان در وضعیت متعادل تغذیه‌ای و ۴۳٪/۴۵٪ آن در وضعیت نامتعادل قرار دارند. محدود کننده‌ترین عناصر غذایی پرمصرف در مزارع با عملکرد پایین فسفر (۴۹٪) و پتاسیم (۴۴٪) و برای عناصر غذایی کم مصرف مربوط به مس (۲۹٪) و منگنز (۲۲٪) بود. بنابراین به منظور افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول چغندر قند بایستی توجه ویژه‌ای به کوددهی پتاسیم، فسفر، مس در این مزارع شود. وضعیت نامتعادل تغذیه‌ای مزارع شامل ۵۰٪ کمبود و ۵۰٪ بیش بود عناصر غذایی بود. روش CND با در نظر گرفتن وضعیت تغذیه‌ای متعادل و نامتعادل و همچنین بیش بود و کمبود عناصر غذایی، ضمن توصیه کودی مناسب از هدررفت کود و منابع مالی نیز جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه گیاه، چغندر قند، CND-clr

مقدمه

سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ رتبه چهارم میزان تولید (حدود ۶/۶۷ میلیون تن که ۸/۸۳٪ از کل میزان تولید) محصولات زراعی آبی را به خود اختصاص داده است. این محصول تنها ۲/۰۲٪ از کل سطح کشت آبی کشور را تشکیل داد، در حالی که گندم با تولید ۸/۸۱ میلیون تن، ۳۶/۵۲٪ از سطح زیر کشت آبی را به خود اختصاص داد که مساحت خیلی زیادی است (Statistical Yearbook of Agriculture, 2022 & 2023).

چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) به دلیل توانایی‌اش در سازگاری با شرایط مختلف خاک و آب، به عنوان یک محصول کلیدی در کشاورزی مدرن مورد توجه قرار گرفته است. این گیاه نه تنها منبع تولید شکر است بلکه دارای مواد مغذی و ترکیبات مفید برای سلامتی انسان نیز می‌باشد. طبق آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰، چغندر قند پس از ذرت علوفه‌ای و گندم، بالاترین مقدار تولید آبی و در

۱- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: ghaderij@yahoo.com

۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، مشهد، ایران

این پژوهش با هدف بررسی وضعیت تغذیه‌ای مزارع چغندر قند با استفاده از روش CND-clr، شناسایی عناصر غذایی محدود کننده و بهینه‌سازی وضعیت تغذیه‌ای چغندر قند انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی محصول چغندر قند از سال ۱۳۹۷ به مدت دو سال در استان خراسان رضوی انجام شد. در هر سال، حداقل ۳۰ مزرعه انتخاب گردید که این مزارع در تمامی مناطق کشت چغندر قند به نسبت سطح زیر کشت آن منطقه توزیع شدند. همچنین، در این مزارع دامنه‌ای متنوع از خصوصیات خاک (با استفاده از مطالعات خاک و ... وجود داشت

پس از انتخاب مزارع، پیش از کشت و کودپاشی چغندر قند، از هر مزرعه یک نمونه مرکب خاک از سطح یک هکتار و عمق ۳۰-۰ سانتی متری تهیه شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این نمونه‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. برای تجزیه نمونه‌های خاک، بافت به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، کربن آلی به روش والکلی و بالک (Walkley & Black, 1934)، pH با روش گل اشباع (McLean, 1982)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع با دستگاه هدایت سنج (Black et al., 1965)، درصد کربنات کلسیم (Page et al., 1982)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen, 1964) و پتاسیم قابل استفاده با عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982) اندازه‌گیری شدند. همچنین منیزیم، کلسیم و پتاسیم به روش استات آمونیوم یک نرمال در pH ۸/۲ (Hanway & Heidel, 1952)، آهن، روی، منگنز و مس قابل استفاده خاک با عصاره‌گیر DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) اندازه‌گیری گردید. بور قابل جذب به روش آب داغ (Berger & Truog, 1939) و گوگرد به روش منوکلسیم فسفات (Fox et al., 1964) مورد بررسی قرار گرفت.

در سال‌های اول و دوم، نمونه‌برداری از برگ‌ها برای تعیین غلظت عناصر غذایی انجام شد. این نمونه‌برداری حدود ۹۰ تا ۱۲۰ روز پس از کاشت و از برگ‌های جوان کامل و سالم (بین جوان‌ترین برگ‌ها در مرکز بوته و برگ‌های مسن‌تر) صورت گرفت. نمونه‌های برگ پس از شستشو با آب مقطر، در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و سپس با آسیاب برقی پودر شدند. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر گیاه، مقدار ۰/۵ گرم از نمونه آسیاب شده به روش هضم تر روی اِجاق الکتریکی در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. نیتروژن کل به روش کج‌لدال (Buresh et al., 1982)، فسفر کل به روش تیفسنجی (رنگ زرد مولیبدات

تجزیه گیاه می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان در نظر گرفته شود. برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان زراعی و باغی، از روش‌های مختلفی مانند غلظت بحرانی (CVA)، روش تلفیقی تشخیص و توصیف (DRIS)، روش انحراف از درصد بهینه (DOP) و روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) استفاده می‌شود. روش CND-clr با استفاده از تجزیه و تحلیل ریاضی و آماری، نسبت‌های مختلف عناصر غذایی را بررسی می‌کند. این اطلاعات می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا با توجه به نیازهای خاص خاک و شرایط محیطی، بهترین تصمیمات را اتخاذ کنند. در تحقیقات انجام شده، نشان داده شده است که استفاده از CND-clr^۱ می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت محصول منجر شود و با در نظر گرفتن نسبت‌های چند عنصری تا حدود زیادی نارسایی‌های روش دریس را برطرف کند (Daryashenas et al., 2020). این روش بر اساس تجزیه و تحلیل ترکیب عناصر غذایی در بافت‌های گیاهی و مقایسه آن با مقادیر استاندارد طراحی شده است. هدف اصلی CND-clr، شناسایی کمبودها و نواقص تغذیه‌ای گیاهان است تا با بهینه‌سازی مصرف کودها و سایر عوامل تغذیه‌ای، تأثیرات منفی زیست محیطی ناشی از استفاده بی‌رویه از کودها را کاهش دهند و در عین حال، عملکرد محصولات خود را افزایش دهند (García-Hernández et al., 2006). دریا شناس و ثقفی (Daryashenas & Thaqafi, 2011) در یک تحقیق، با بررسی داده‌های ۳۸۲ مزرعه چغندر قند و استفاده از مدل‌های ریاضی و آماری، وضعیت عناصر غذایی مختلف را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که استفاده از CND می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت محصول منجر شود. همچنین، این روش به کشاورزان کمک می‌کند تا با توجه به نیازهای خاص خاک و شرایط محیطی، بهترین تصمیمات را اتخاذ کنند. تحقیقات دیگری توسط پژوهشگران مختلفی از جمله قادری و همکاران (Ghaderi et al., 2023, 2025)، بابازاده جعفری و همکاران (Babazadeh Jafari et al., 2024)، دریا شناس و همکاران (Daryashenas et al., 2020)، بصیرت و همکاران (Basirat et al., 2018)، و سایرین (Parent et al., Parent & Dafir, 1992) انجام شده است. به طور کلی، روش CND نه تنها در زمینه تولید شکر بلکه در مدیریت منابع غذایی و پایدارسازی کشاورزی نقش مهمی ایفا می‌کند. با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی با کیفیت بالا همچون چغندر قند، استفاده از روش‌های نوین مانند CND برای مدیریت تغذیه‌ای چغندر قند ضروری است. بنابراین با توجه به اهمیت و کشت چغندر قند و کمبود نرم‌های تغذیه‌ای برای این محصول مهم،

برای عناصری مانند $R_d, K, P, N, \dots$ ، فرم بیانی از وضعیت و نسبت عناصر غذایی در گیاه است که مقادیر آن در جامعه با عملکرد زیاد بیانگر غلظت مطلوب و ایده‌آل است و به‌عنوان ارقام مرجع یا نرم‌های استاندارد CND محسوب می‌شوند و معمولاً با $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Rd}^*$ و... نشان داده می‌شود. اگر غلظت هر عنصر غذایی گیاه مورد مطالعه را با غلظت ایده‌آل یا همان نرم‌های استاندارد مقایسه کنیم شاخص عناصر غذایی CND بدست خواهد آمد و برای عناصر R_d, K, P, N ، به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$I_{zi} = \frac{(Z_i - Z_i^*)}{SD_{zi}}, \quad I_N = \frac{V_N - V_N^*}{SD^*N}, \quad (6)$$

$$I_P = \frac{V_P - V_P^*}{SD^*P}, \quad I_K = \frac{V_K - V_K^*}{SD^*K}, \quad I_{Rd} = \frac{V_{Rd} - V_{Rd}^*}{SD^*R_d}$$

در این روابط $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Rd}^*, SD^*N, SD^*P, SD^*K, SD^*R_d$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار نسبت لگاریتمی عناصر غذایی هستند که به‌عنوان نرم استاندارد و یا ارقام مرجع CND محسوب می‌شوند.

V_N, V_P, V_K, V_{Rd} نسبت لگاریتمی مربوط به نمونه مطالعاتی است. I_N, I_P, I_K, I_{Rd} به ترتیب شاخص عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر باقیمانده هستند.

در روش CND، غلظت یک عنصر نسبت به میانگین هندسی کل عناصر و ترکیبات با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Daryashenas & Thaqafi, 2011; Parent & Dafir, 1992).

$$I_{zi} = \frac{Z_i - Z_i^*}{SD_{zi}^*} \quad (7)$$

۴- شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI^2) با روش CND از رابطه ذیل قابل محاسبه است (رابطه ۸). در این رابطه r^2 مجموع مربعات شاخص‌های عناصر غذایی است و همیشه می‌تواند اعداد صفر و بیشتر را به خود اختصاص دهد. از نظر تئوری هر اندازه r^2 به عدد صفر نزدیک‌تر شود تعادل عناصر غذایی مطلوب‌تر خواهد شد (Daryashenas & Thaqafi, 2011).

$$r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \dots + I_{Rd}^2 \quad (8)$$

بنابراین، برای هر نمونه مشخص گیاهی از طریق بدست آوردن r^2 می‌توان عدم توازن عناصر غذایی را تعیین کرد. با توجه به اینکه شاخص‌های عناصر غذایی CND متغیری مستقل و نرمال هستند، بنابراین مجموع این شاخص‌ها یعنی r^2 از یک توزیع مربع کای با درجه آزادی $d+1$ تبعیت می‌کند (Ross, 1987). تبعیت متغیر شاخص توازن عناصر غذایی CND یعنی r^2 از تابع توزیع مربع کای یک مزیت به شمار می‌رود که در سامانه دریس امکان‌پذیر نبوده است

وانادات) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر، پتاسیم کل با دستگاه فلیم فتومتر، گوگرد به روش کدورت سنجی با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر، منیزیم، آهن، روی، منگنز و مس کل به روش خاکستر کردن خشک با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (Ryan et al., 2001). بور نیز به روش آزومیتین-اچ با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۲۰ نانومتر قرائت گردید (Jones, 2001). حدود کفایت عنصر فسفر ۱/۱-۴۵/۰، پتاسیم ۶-۲، منیزیم ۱-۲۵/۰ درصد و برای آهن ۱۴۰-۶۰، روی ۸۰-۱۰، منگنز ۳۶۰-۲۶ و بور ۲۰۰-۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم برگ چغندر قند گزارش کرده‌اند.

محاسبه روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND-clr) به روش زیر انجام می‌شود. این روش که مبانی ریاضی و آماری آن توسط پارتو دافیر (Parent & Dafir, 1992) مطرح شده است، به شرح زیر است (Daryashenas & Thaqafi, 2011):

۱- ترکیبات بافت گیاهی به صورت یک ساختار سادک^۱ (S^d) شامل عناصر غذایی ($N, P, K, \dots$) و یک بخش باقی مانده ترکیبات (R_d) قابل بیان است. این رابطه به شکل زیر می‌باشد که در آن d نمایانگر تعداد عناصر غذایی و R_d نشان‌دهنده باقی مانده ترکیبات گیاهی است:

$$S_d = [(N, P, K, \dots, R_d): N > 0, P > 0, K > 0, R_d > 0, N + P + K + \dots + R_d = 100] \quad (9)$$

در این رابطه عدد ۱۰۰ بیان کننده کل غلظت ماده خشک گیاه است (درصد) و $N, P, K, \dots, R_d$ عناصر غذایی تشکیل دهنده بافت گیاهی هستند که R_d نشانگر سایر عناصر غذایی باقی مانده و اندازه‌گیری نشده است که از رابطه (۲)، محاسبه می‌شود (Aitchison, 1986).

$$R_d = 100 - (N + P + K + \dots) \quad (2)$$

۲- میانگین هندسی عناصر غذایی با رابطه ۳ نشان داده می‌شود.

$$G = [N \times P \times K \times \dots \times R_d] \frac{1}{d+1} \quad (3)$$

۳- نسبت لگاریتم طبیعی عناصر از طریق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.

$$ZI = \log[x_i / g(x)]$$

$$V_N = \ln\left(\frac{N}{G}\right), \quad V_P = \ln\left(\frac{P}{G}\right), \quad V_K = \ln\left(\frac{K}{G}\right), \quad V_{Rd} = \ln\left(\frac{R_d}{G}\right) \quad (4)$$

$$V_N + V_P + V_K + \dots + V_{Rd} = 0 \quad (5)$$

V_x بیانگر نسبت لگاریتمی عناصر برای x عنصر است. رابطه ۵ درستی محاسبات را تأیید می‌کند. براساس این تعریف، مجموع ترکیبات گیاهی بر مبنای عدد ۱۰۰ است و مجموع نسبت لگاریتمی عناصر با احتساب مقدار باقی مانده ترکیبات (R_d) برابر صفر خواهد بود.

در مجموع، وسیع‌ترین کمبود در بین عناصر غذایی مربوط به کمبود آهن بود و بعد از آن عناصر فسفر، منگنز، روی، مس و پتاسیم قرار داشتند.

برخی از مزارع مشکل شوری داشتند و هدایت الکتریکی در سطح خاک‌ها بین مقادیر ۰/۶ تا ۱۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود (جدول ۱). pH خاک بین ۷/۵ الی ۸/۲ در نوسان بوده و در محدوده کمی قلیایی قرار داشت. کربن آلی خاک بین مقادیر ۰/۱۸ تا ۱/۶۶٪ در نوسان بود که نشان‌دهنده آن است که مزارع به مصرف نیتروژن برای رشد نیازمند بودند. مقدار آهک بین مقادیر ۶/۱٪ الی ۳۷٪ متغیر و فسفر قابل جذب خاک بین مقادیر ۳/۶ الی ۵۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک متغیر بود. غلظت بهینه فسفر در خاک برای اغلب گیاهان زراعی آبی بین ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997). نتایج نشان داد ۶۷٪ مزارع بررسی شده دارای فسفر قابل جذب کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بودند. پتاسیم قابل جذب مزارع انتخابی بین مقادیر ۶۷ الی ۷۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نوسان بود. حد بحرانی پتاسیم قابل جذب خاک برای اغلب گیاهان زراعی آبی ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997). نتایج آزمایشگاهی بیانگر بهینه بودن غلظت پتاسیم قابل جذب خاک در بیش از ۴۷/۵٪ خاک‌های مورد ارزیابی بود و ۵۲/۵٪ مزارع دارای پتاسیم کمتر از حد بهینه بودند.

غلظت آهن قابل جذب در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک در اراضی تحت کشت در محدوده ۰/۴۶ الی ۱۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر بود. با توجه به حد بحرانی ۶-۵ میلی‌گرم در کیلوگرم آهن در خاک (Malakooti & Ghaibi, 1997)، ۸۲٪ مزارع بررسی شده دچار کمبود آهن قابل جذب بودند. حداقل و حداکثر منگنز قابل جذب خاک‌ها در محدوده ۱/۹ الی ۷۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک قرار داشت و با توجه به حد بحرانی ۶ میلی‌گرم در کیلوگرم منگنز در خاک (Malakooti & Ghaibi, 1997)، حدود ۳۸٪ خاک‌های مورد آزمایش مقدار منگنز قابل جذب آن‌ها در حد مطلوب بود. ولی ۶۲٪ خاک‌ها دارای منگنز کمتر از ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز قابل جذب بودند که بیانگر کمبود نسبی منگنز در حدود دوسوم اراضی تحت کشت چغندرقد بود (جدول ۱). همانطور که در جدول ۱، قابل مشاهده است غلظت روی در خاک مزارع بین مقادیر ۰/۲۶ الی ۶/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در نوسان بود. حد بحرانی روی براساس روش DTPA در خاک ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997). نتایج نشان داد حدود ۵۹٪ خاک‌های مورد بررسی دچار کمبود شدید روی قابل جذب بودند. همچنین، نتایج نشان داد ۵۳٪ مزارع کمبود مس وجود دارد. حد بحرانی مس در خاک ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم تعیین شده است (Malakooti & Ghaibi, 1997).

(Khiari et al., 2001b; Daryashenas & Thaqafi, 2011).

۵- روش مناسب برای تمایز جامعه عملکرد به دو گروه زیاد و کم می‌تواند بر اساس ترسیم تابع تجمعی بین عملکرد و نسبت واریانس شاخص‌های عناصر غذایی باشد. این تابع عملکرد - عنصر غذایی شکل کاوی (concavity) دارد که با تعیین نقاط عطف منحنی (Inflection point) می‌توان گروه‌های عملکردی را با دقت ریاضی تفکیک نمود (Khiari et al., 2001b; Daryashenas & Thaqafi, 2011).

۱- مراحل به طریق زیر تعیین می‌شود:

۱- عملکردها از زیاد به کم ردیف می‌شوند؛

۲- نسبت لگاریتمی (Vx) عناصر غذایی محاسبه می‌شود.

۳- واریانس مقادیر VX برای اولین گروه عملکرد و برای سایر عملکردها محاسبه و نسبت واریانس آنها براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود. این عمل برای دومین گروه عملکرد و الی آخر انجام می‌شود.

$$F_i(V_x) = \frac{\text{واریانس } V_x \text{ برای } n_1 \text{ مشاهده}}{\text{واریانس } V_x \text{ برای } n_2 \text{ مشاهده}} \quad (9)$$

۴- تابع تجمعی نسبت واریانس نیز به روش بند ۳ بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$F_i^c = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} f_i(V_x)}{\sum_{i=1}^{n-3} f_i(V_x)} \times 100 \quad (10)$$

۵- تابع تجمعی $F_i^c(V_x)$ مرتبط با عملکرد (Y) با الگوی درجه ۳

به صورت رابطه ۱۱ است.

$$F_i^c(V_x) = aY^3 + bY^2 + cY + d \quad (11)$$

۶- نقطه عطف این منحنی که شکل کاوی دارد، از طریق مشتق

اول و دوم معادله بدست خواهد آمد.

$$\frac{\partial F_i^c(V_x)}{\partial Y} = 3ay^2 + 2by + c \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 F_i^c(V_x)}{\partial Y^2} = 6ay + 2b = 0 \quad (13)$$

از حل معادله (۱۳) مقدار $-\frac{b}{3a}$ - بیانگر عملکرد حدوا سط بین گروه عملکرد کم و زیاد است که برای $d+1$ عنصر غذایی قابل محاسبه است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک‌های مزارع انتخابی نشان داد که از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها دارای طیف وسیعی از خصوصیات بودند (جدول ۱). مزارع عمدتاً از نظر کربن آلی زیر ۱/۶۶٪ بودند. در بسیاری از مزارع فسفر، آهن، روی و تا حدودی منگنز در مقایسه با حد بحرانی عناصر غذایی در خاک، جزو کمبودهای شاخص بود. ولی در تعداد کمی از مزارع کمبود پتاسیم و مس مشاهده شد. در تمام ویژگی‌های مورد بررسی اختلاف زیادی بین مزارع وجود داشت که انحراف استاندارد بالا در جدول ۱، نشان‌دهنده این موضوع است.

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک های مزارع چغندر قند در استان خراسان رضوی (۶۱ مزرعه)
Table 1- Soil test results of sugar beet fields in Khorasan Razavi province (61 fields)

صفت مورد بررسی Variable	واحد Unit	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف استاندارد SD	فراوانی کمتر از حد بحرانی Abundance less than critical	فراوانی بیشتر از حد بحرانی Abundance more than critical	ضریب تغییرات CV
pH		7.50	8.20	7.90	0.11	-	-	1.39
EC	(dS/m)	0.60	11.10	2.50	0.21	-	-	8.40
CaCO ₃	(%)	6.10	37	19.70	6.40	-	-	32.49
OC	(%)	0.18	1.66	0.81	0.41	-	-	50.62
Available P	(mg/kg)	3.60	56.40	14.60	10.80	67	33	73.97
Available K	(mg/kg)	67	780	276	139.70	52.50	47.50	50.62
Available Fe	(mg/kg)	0.46	13.60	3.16	3.10	82	18	98.10
Available Mn	(mg/kg)	1.90	70.40	8.60	7.10	62	38	82.56
Available Zn	(mg/kg)	0.26	6.20	1.06	0.01	59	41	0.94
Available Cu	(mg/kg)	0.28	3	1.10	0.64	53	47	58.18

$F_i^c(V_{Fe})=57/3$, $F_i^c(V_K)=53$, $F_i^c(V_P)=56/2$, $F_i^c(V_N)=70/9$
 $F_i^c=48/70$, $F_i^c(V_{Mn})=65/2$, $F_i^c(V_{Zn})=43/9$, $F_i^c(V_{Cu})=61/2$
 (V_B) و $F_i^c(V_R)=56/7$ همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می شود.
 مدل درجه ۳ برای تمام عناصر غذایی و باقی مانده در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. عملکرد چغندر قند $70/9$ تن در هکتار به عنوان عملکرد حد واسط برای تفکیک دو گروه با عملکرد بالا و پایین استفاده گردید (Pernet & Tremilli, 2001). بر اساس روش ذکر شده توسط پارنت و تری میلی (Pernet & Tremilli, 2001) حداکثر عملکرد در نقاط عطف مشاهده شده در منحنی های مقادیر تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی، به عنوان عملکرد حد واسط انتخاب شد. همانگونه که مشاهده می شود حداکثر عملکرد در نیتروژن مشاهده شده است. در مجموع و با این تفکیک ۲۰ مزرعه در جامعه با عملکرد بالا و ۴۱ مزرعه در گروه با عملکرد پایین قرار گرفتند.

روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND)

گروه بندی مزارع چغندر قند

داده های عملکرد و غلظت عناصر غذایی مربوطه به ۶۱ مزرعه بر اساس میزان عملکرد از زیاد به کم مرتب شدند. سپس مقادیر میانگین هندسی (G) و نسبت لگاریتمی (V_X) ، ۸ عنصر غذایی محاسبه گردید. در ادامه مقادیر تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی یعنی $F_i^c(V_N)$ ، $F_i^c(V_P)$ ، $F_i^c(V_K)$ ، $F_i^c(V_{Fe})$ ، $F_i^c(V_{Zn})$ ، $F_i^c(V_{Mn})$ ، $F_i^c(V_{Cu})$ و $F_i^c(V_R)$ برای کلیه عناصر محاسبه و ترسیم گردید که به صورت ۹ معادله درجه ۳ برای ۸ عنصر و یک قسمت باقی مانده (R_d) برازش داده شد (جدول ۲). نقاط عطف منحنی ها برای ۱۰ عنصر غذایی و ترکیبات باقی مانده برای چغندر قند استان خراسان رضوی بر حسب تن در هکتار محاسبه شدند و مطابق جدول ۲، عبارت بودند از:

جدول ۲- برآورد عملکرد حد واسط با روش توابع تجمعی واریانس نسبت لگاریتمی عناصر غذایی چغندر قند در استان خراسان رضوی
Table 2- Estimation of intermediate performance using cumulative variance functions of the logarithmic ratio of nutrients in sugar beet in Khorasan Razavi Province

عناصر غذایی Nutrients	$F_i^c(V_X)=aY^3+bY^2+cY+d$	R^2	عملکرد Yield
N	$y = 0.0004x^3 - 0.0851x^2 + 3.4491x + 61.114$	0.99**	70.9
P	$y = 0.0003x^3 - 0.0506x^2 + 1.5107x + 86.305$	0.99**	56.2
K	$y = 0.0003x^3 - 0.0477x^2 + 0.5621x + 1$	0.99**	53.0
Fe	$y = 0.0002x^3 - 0.0344x^2 + 0.9031x + 89.95$	0.99**	57.3
Mn	$y = 0.0003x^3 - 0.0587x^2 + 2.0681x + 79.321$	0.99**	65.2
Zn	$y = 0.0003x^3 - 0.0395x^2 - 0.5358x + 129.74$	0.98**	43.9
Cu	$y = 0.0002x^3 - 0.0367x^2 + 0.1238x + 113.$	0.99**	61.2
B	$y = 0.0002x^3 - 0.0292x^2 + 0.4307x + 97.253$	0.99**	48.7
R_d	$y = 0.0011x^3 - 0.187x^2 + 8.0943x - 0.0306$	0.65**	56.7

جدول ۳- نرم‌های CND و انحراف معیار برای عناصر غذایی در مزارع چغندر قند استان خراسان رضوی

Table 3- CND norms and standard deviation for nutrients in sugar beet fields in Khorasan Razavi Province

نرم CND norms	میانگین نرم Mean CND norms	انحراف معیار نرم SD of CND norms	عناصر غذایی Nutrients	میانگین غلظت در جامعه با عملکرد مطلوب Mean concentration in the population with optimal performance	واحد Unit	انحراف معیار SD
V_N^*	3.77	0.18	N	4.4	%	0.73
V_P^*	1.08	0.25	P	0.26	%	0.09
V_K^*	3.26	0.32	K	2.56	%	1.16
V_{Fe}^*	-1.82	0.56	Fe	185	mg/kg	106.11
V_{Mn}^*	-2.2	0.36	Mn	113	mg/kg	57.01
V_{Zn}^*	-3.73	0.24	Zn	28	mg/kg	28.86
V_{Cu}^*	-4.51	0.29	Cu	11	mg/kg	3.48
V_B^*	-2.7	0.37	B	51	mg/kg	26.97

جدول ۴- شاخص عناصر غذایی و دامنه کفایت و بحرانی برای ۸ عنصر غذایی در مزارع چغندر قند استان خراسان رضوی

Table 4- Nutrients indices and the sufficiency and critical ranges for 8 nutrients in sugar beet fields in Khorasan Razavi Province

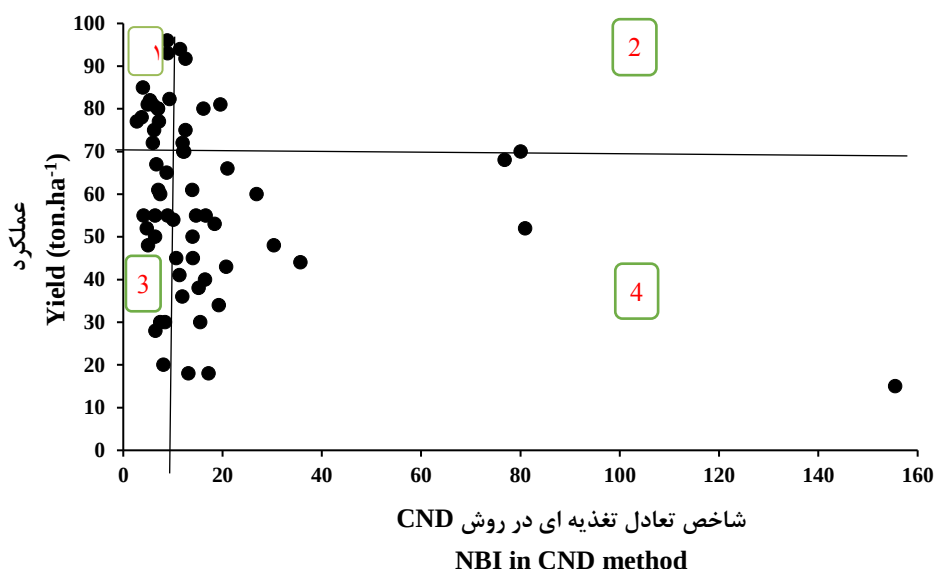
شاخص عناصر غذایی Nutrients Index	عملکرد بحرانی Critical Performance	مربع شاخص عناصر غذایی Nutrients Index Square (I^2x)	حد بحرانی پایین Low Critical Level (I^2x)	حد بحرانی بالا High Critical Level (I^2x)
I_N^2	46	1.73	-1.31	1.31
I_P^2	84	0.09	-0.29	0.29
I_K^2	90	0.45	-0.67	0.67
I_{Fe}^2	51	0.61	-0.78	0.78
I_{Mn}^2	49	1.12	-1.06	1.06
I_{Zn}^2	54	11.11	-3.33	3.33
I_{Cu}^2	57	0.14	-0.38	0.38
I_B^2	33	5.5	-2.34	2.34
جمع (r^2) Total	31	2.12	-1.25	1.25

این شاخص به عنوان معیاری برای ارزیابی وضعیت تعادل تغذیه‌ای می‌باشد و می‌تواند صفر و یا بزرگتر از صفر باشد. در این شاخص تعادل تغذیه‌ای نیز هر چه مجموع توان دوم شاخص‌های CND بزرگتر از صفر باشد، عدم تعادل تغذیه‌ای بیشتر می‌شود. در این روش، شاخص تعادل تغذیه‌ای از مجموع توان دوم شاخص‌های CND کلیه عناصر غذایی به دست می‌آید ($I_K, I_P, I_N, \dots$) که رابطه‌ی معکوس با میزان عملکرد دارد (Basirat et al., 2018). شاخص عناصر غذایی (I^2x) با استفاده از روش تصویری کیت-نلسون و عملکرد بحرانی آن عنصر و بر اساس تابع توزیع آماری کای اسکوئر (K^2) با درجه آزادی $d+1$ (d برای تعداد عنصر بررسی شده و یک برای قسمت باقی‌مانده) و فرمول مربوط در اکسل به دست آمد (شکل ۱). و مقدار آن برای عملکرد ۷۰/۹ تن در هکتار، ۱۰/۲۸ بدست آمد. البته اگر بر اساس روش تصویری کیت-نلسون بخواهد این شاخص برای ۱۰/۲۸ برآورد گردد، می‌تواند در این محدوده قرار گیرد تا حداکثر نقاط در قطعات اول و سوم قرار گیرد. شکل ۱، نشان‌دهنده رابطه عملکرد در دو گروه عملکرد بالا و پایین با شاخص تعادل عناصر غذایی است و نشان می‌دهد که در عملکردهای کمتر از ۷۰/۹ تن در هکتار تعادل تغذیه‌ای دچار اختلال شده است (۴۱ مزرعه یا ۶۷ درصد مزارع) و شاخص تعادل تغذیه‌ای افزایش یافته است. در عملکردهای بیشتر از ۷۰/۹ تن در هکتار (۱۲ مزرعه)، شاخص تعادل تغذیه‌ای کاهش یافته است.

برآورد اعداد مرجع عناصر غذایی به روش تشخیص چندگانه

با توجه به اینکه غلظت عناصر در جامعه با عملکرد بالا به عنوان اعداد مرجع و حد بهینه عناصر غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Khari et al., 2001a,b,c) در نتیجه با در نظر گرفتن عملکرد ۷۰/۹ تن در هکتار، مقادیر $V_N^*, V_P^*, V_K^*, V_{Fe}^*, V_{Mn}^*, V_{Zn}^*, V_{Cu}^*$ و V_B^* به عنوان اعداد مرجع تعیین شدند که در جدول ۳ آورده شده است. غلظت عناصر در جامعه با عملکرد بالا به عنوان اعداد مرجع و حد بهینه عناصر غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Khari et al., 2001a, b, c). حدود بالا و پایین شاخص بحرانی عناصر غذایی در استان خراسان رضوی در جدول ۴ ارائه شده است. دامنه‌های بحرانی ارائه شده در این جدول را می‌توان به عنوان یک "دامنه‌ی کفایت" برای شاخص‌های عناصر غذایی در نظر گرفت که اعداد خارج از این دامنه بیانگر وضعیت بحرانی و داخل دامنه، نشانه‌ی وضعیت خوب و بسنده است (Basirat et al., 2018). مربع شاخص‌های بحرانی (I^2x) برای عناصر غذایی $I_N^2, I_P^2, I_K^2, I_{Fe}^2, I_{Mn}^2, I_{Zn}^2, I_{Cu}^2$ و I_B^2 که به عنوان اعداد مرجع تعیین شدند، در جدول ۴ ارائه شده است.

ارتباط شاخص تعادل عناصر غذایی (NBI) با عملکرد چغندر قند



شکل ۱- رابطه بین عملکرد (t ha⁻¹) و شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) در چغندر قند در استان خراسان رضوی
(خط افقی عملکرد ۷۰/۹ تن در هکتار و خط عمودی شاخص ۱۰/۲۸ می باشد).

Figure 1- Relationship between yield (t.ha⁻¹) and nutrient balance index (NBI) in sugar beet in Khorasan Razavi province
(Horizontal line is yield 70.9 tons per hectare and vertical line is index 10.28).

(41.46%) > N (36.59%) > Zn (14.63%) > B (4.88%)
به صورت کلی ۵۴/۲۷٪ مزارع این استان در وضعیت متعادل تغذیه‌ای و ۴۵/۴۳٪ آن در وضعیت نامتعادل تغذیه‌ای قرار دارند (جدول ۶). نکته قابل توجهی که بایستی به آن اشاره کرد این است که زمانی که وضعیت یک عنصر غذایی نامتعادل است به این معنی نیست که این عنصر دارای کمبود است چرا که ممکن است دارای بیش بود باشد (Ghaderi et al., 2025). چنانچه در جدول ۶ مشاهده می شود در مزارعی که وضعیت نامتعادلی از لحاظ تغذیه‌ای دارند حدود ۵۰٪ کمبود و ۵۰٪ دارای بیش بود بوده و نیازی به مصرف کود نیست. بنابراین وجود همزمان کمبود و بیش بود عناصر در مزارع نامتعادل، لزوم مدیریت اختصاصی برای هر مزرعه را تأکید می کند. در بین عناصر غذایی پر مصرف در مزارع با عملکرد پایین، فسفر و پتاسیم به ترتیب ۴۹٪ و ۴۴٪ نیاز به مصرف کود دارند و در بین عناصر کم مصرف، مس بیشترین نیاز به مصرف کود را دارا می باشد (۲۹٪ مزارع دارای کمبود). علاوه بر این عناصر فسفر، پتاسیم و مس که بیشترین کمبود را دارا می باشند همزمان دارای بیشترین بیش بود می باشند (جدول ۶). بنابراین روش CND با در نظر گرفتن متعادل و نامتعادل بودن وضعیت تغذیه‌ای و همچنین بیش بود و کمبود عناصر مربوطه، ضمن توصیه کودی مناسب، جلوگیری از آلودگی خاک، از هدررفت کود و منابع مالی نیز جلوگیری می کند. بنابراین، کوددهی بایستی با دقت و براساس شاخص‌های CND صورت گیرد.

تفسیر نتایج تعدادی از مزارع با عملکرد پایین با روش تشخیص چندگانه

مزیت و برتری روش CND-clr نسبت به روش‌های DRIS و DOP این است که با استفاده از روش‌های آماری مانند کای اسکویر می توان وضعیت متعادل و یا نامتعادل عناصر غذایی هر مزرعه (با استفاده از جدول ۴ و ۵) را تعیین کرد (Khiari et al., 2001a, b, c; Daryashenas & Thaqafi, 2011). در روش CND-clr و یا CND-ilr برخلاف روش DRIS، منفی بودن شاخص عناصر غذایی (مثلا IN یا IP و ...) الزامی دلیل بر کمبود آن عناصر نیست. در روش CND-clr ممکن است یک شاخص عناصر غذایی منفی باشد (جدول ۵) ولی در محدوده بین حد پایین بحرانی و حد بالای بحرانی قرار گیرد (جدول ۴) که در این صورت بیانی از حالت متعادل است و خارج از این محدوده نامتعادل است (Khiari et al., 2001a, b, c; Daryashenas & Thaqafi, 2011). در جدول ۶ شاخص‌های عناصر غذایی را به دو حالت متعادل و نامتعادل بیان شده است. همان طور که در جدول ۶ نشان داده شده است عناصر به ترتیب زیر دارای وضعیت متعادل یا نامتعادل هستند:

وضعیت متعادل:

B (95.12%) > Zn (82.93%) > N (63.41%) > Mn (58.54%) > Fe (56.1%) > Cu (34.15%) > K, P (21.95%)

وضعیت نامتعادل:

K, P (78.05%) > Cu (65.85%) > Fe (43.9%) > Mn

جدول ۵- شاخص‌های CND، عملکرد و نیاز عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در مزارع عملکرد پایین در استان خراسان رضوی

Table 5- CND indicators, performance, and the needs of high- and low-consumption nutrients in low-yield farms in Razavi Khorasan Province

عملکرد Yeild	I _N	I _P	I _k	I _{Fe}	I _{Mn}	I _{Zn}	I _{Cu}	I _B	r ²
70	0.8	0.77	-0.09	1.66	-2.32	-0.75	0.82	-1.15	23.67
70	2.99	-0.17	3.57	-1.43	-1.26	-3.56	0.31	-0.68	27.02
70	1.23	-0.31	-1.18	-0.53	-1.06	-0.91	1.69	1.26	22.81
68	3.54	0.81	3.92	-1.58	-2.21	-4.23	1.74	-0.81	27.72
67	1.31	-0.33	-1.16	0.54	0.36	-0.27	-0.98	-0.04	22.80
66	-2.77	-2.14	-0.47	1.05	1.03	0.74	-0.38	1.04	20.47
65	-1.51	-1.16	-0.67	1.04	1.21	-1.02	-0.24	0.46	21.43
61	1.53	-0.81	1.03	-0.63	0.31	0.01	-0.46	-0.46	24.03
61	0.04	1.73	-3.00	1.22	0.53	-1.30	0.28	-2.41	23.71
60	-0.28	-0.15	-1.43	0.56	-0.51	4.20	0.45	-1.45	21.79
60	-1.14	-0.55	-0.38	-0.19	0.90	-1.66	0.51	1.26	22.19
55	1.27	0.58	0.19	-0.722	-0.44	0.25	0.01	0.39	23.85
55	0.27	-0.28	-1.85	-0.32	-1.57	-0.09	1.45	2.33	21.96
55	0.39	0.41	-1.3	0.77	-1.29	0.61	1.26	-0.81	22.74
55	0.74	0.72	0.95	0.57	-0.80	1.72	-3.22	-0.44	24.36
55	0.55	-0.33	1.41	-0.70	1.39	-1.69	0.10	-0.74	24.10
54	0.77	-0.04	-0.95	0.58	0.87	-1.76	1.60	-1.21	22.68
53	-2.27	-1.68	0.96	1.33	-0.02	1.63	0.36	-1.45	21.84
52	0.59	1.04	-0.91	0.41	-0.29	0.86	-1.13	-0.12	23.21
52	-2.58	-2.45	-0.24	-0.24	-1.78	7.92	-0.13	0.52	20.60
50	0.04	-0.07	0.01	1.26	-2.17	0.96	0.47	-1.37	23.29
50	1.52	0.94	0.15	-0.75	0.67	-0.21	-1.10	-0.29	24.30
48	1.94	-1.16	2.58	-0.70	-0.30	-3.33	1.26	-0.44	25.07
48	-0.64	-0.06	0.87	1.12	-0.41	0.03	-0.92	-1.14	23.39
45	1.53	0.59	-0.41	-0.33	0.03	0.42	1.63	-2.10	23.75
45	0.78	-0.93	-2.55	0.78	1.57	-0.78	-0.57	0.33	21.41
44	2.95	0.49	3.20	-2.68	-0.42	0.08	-0.30	-0.70	26.74
43	-0.39	-0.96	-2.84	1.35	2.04	-1.91	0.17	0.001	20.79
41	0.70	-0.31	-1.52	1.51	0.31	-1.39	-1.64	0.50	22.33
40	-0.14	-0.79	-1.49	0.13	0.08	3.33	-1.26	0.60	21.61
38	-0.68	-1.95	-1.44	0.01	-0.52	2.33	0.77	0.92	21.05
36	2.00	0.46	0.67	-1.68	-0.06	1.18	-0.38	-0.23	24.65
24	-1.01	-1.10	1.88	-1.18	2.01	-1.27	1.41	0.16	22.76
30	-0.48	1.38	0.71	0.84	-0.56	0.67	0.32	-2.06	23.82
30	-0.04	-0.83	-1.29	0.34	-0.27	1.64	0.118	0.72	21.66
30	-0.05	-0.18	0.75	0.77	0.69	-0.31	0.33	-2.34	23.42
28	1.01	-0.11	-1.19	0.76	-0.27	-0.54	7.00	-1.06	22.72
20	2.23	0.11	0.25	-0.50	-1.06	0.97	0.07	-0.48	24.18
18	-0.73	-2.11	-1.40	-0.11	1.15	1.40	-0.16	0.86	21.00
18	-0.11	-1.61	0.72	-1.31	3.24	-0.16	-0.61	-0.36	22.79
15	6.17	-0.29	-1.76	-2.11	1.19	-3.19	1.38	-0.98	25.07

جدول ۶- وضعیت تعادل عناصر غذایی مزارع چغندر قند با عملکرد پایین در استان خراسان رضوی

Table 6- Nutrient balance status of low-yield sugar beet farms in Razavi Khorasan Province

وضعیت عناصر غذایی Nutreints status	I _N	I _P	I _k	I _{Fe}	I _{Mn}	I _{Zn}	I _{Cu}	I _B	مجموع Total
متعادل Balanced (%)	63.41	21.95	21.95	56.10	58.54	82.93	34.15	95.12	54.27
نامتعادل Unbalanced (%)	36.59	78.05	78.05	43.90	41.46	14.63	65.85	4.88	45.43
نامتعادل بیشبود Unbalanced(%)	26.83	29.27	34.15	26.83	19.51	7.32	36.59	0.00	22.56
نامتعادل کمبود Unbalanced shortage (%)	9.76	48.78	43.90	17.07	21.95	7.32	29.27	4.88	22.87

نتیجه‌گیری

بررسی وضعیت تغذیه‌ای مزارع چغندر قند خراسان رضوی حاکی از چالش‌های جدی در تعادل عناصر غذایی است. عدم تعادل گسترده، به ویژه در فسفر، پتاسیم و مس، همراه با شوری و قلیایی بودن خاک‌ها، نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در برنامه‌های کوددهی است. نتایج روش CND تأکید می‌کند که بیش از ۴۵٪ مزارع نیازمند اصلاح الگوی مصرف کود هستند تا از اثرات منفی بیش‌بودها (فسفر، پتاسیم و مس) و کمبودهای بحرانی (مانند فسفر، پتاسیم و مس) جلوگیری شود. همچنین، عملکرد بالای برخی مزارع (۲۰ مزرعه با میانگین ۷۰،۹ تن در هکتار) اثبات می‌کند که دستیابی به تعادل تغذیه‌ای نه تنها عملکرد را بهبود می‌بخشد، بلکه از هدررفت منابع مالی و آلودگی محیط‌زیست نیز می‌کاهد. روش CND به عنوان یک ابزار دقیق، امکان تشخیص عدم تعادل‌های تغذیه‌ای را حتی در مواردی که غلظت عناصر در خاک به ظاهر مطلوب است، فراهم می‌کند. بنابراین، توصیه می‌شود برنامه‌های مدیریتی مبتنی بر آزمون خاک و روش‌های نوین تشخیص مانند CND، همراه با توجه به شرایط بومی (شوری و آهک)، در دستور کار قرار گیرد تا پایداری تولید چغندر قند در این منطقه تضمین شود.

روش CND-clr به عنوان یک ابزار دقیق، امکان تشخیص عدم تعادل‌های تغذیه‌ای را حتی در مواردی که غلظت عناصر در خاک به ظاهر مطلوب است، فراهم می‌کند. چراکه تجزیه خاک‌ها (جدول ۱) نشان‌دهنده کمبود گسترده عناصر غذایی به ویژه آهن (۸۲٪ مزارع)، فسفر (۶۷٪)، منگنز (۶۲٪)، روی (۵۹٪) و مس (۵۳٪) بود، در حالی که کمبود عناصر غذایی مذکور در چغندر قند بر اساس شاخص‌های CND متفاوت از نتایج خاک و به صورت زیر بود:

$$P (48.78\%) > K (43.9\%) > Cu (29.27\%) > Mn (21.95\%) > Fe (17.07\%) > N (9.76\%) > Zn (7.32\%) > B (4.88\%)$$

این مطالعه اثبات می‌کند که رویکرد CND نه تنها کارایی مصرف کود را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش هزینه‌های تولید و حفظ محیط‌زیست، گامی مؤثر به سوی کشاورزی پایدار است. برای دستیابی به عملکردهای بالاتر از ۷۰ تن در هکتار، ادغام این روش با مدیریت آبیاری و کنترل آفات ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، توصیه می‌شود هنگام کوددهی مزارع علاوه بر آزمون خاک، از روش‌های نوین تشخیص و ارزیابی وضعیت عناصر غذایی مانند CND-clr، با توجه به شرایط بومی نیز استفاده شود.

References

- Aitchison, J. (1986). *Statistical analysis of compositional data*. Chapman and Hall, New York.
- Babazadeh Jafari, S.B., Davatgar, N., Feizian, M., & Shakouri, M. (2024). Determining limitation of nutrients for rice using the compositional nutrient diagnosis (CND) method. *Journal of Soil and Plant Science*, 34(4), 53–73. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/sps.2024.19183>
- Basirat, M., Haghighatnia, H., & Mousavi, S.M. (2018). Evaluation and determination the nutritional status of Valencia orange orchards in south of Fars Province. *Water and Soil*, 32(1), 143-154. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i1.67597>
- Berger, K.C., & Truog, E. (1939). Boron determination in soils and plants. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 11(10), 540-545. <https://doi.org/10.1021/ac50138a007>
- Black, C.A., Evans, D.D., & Dinauer, R.C. (1965). *Methods of soil analysis* (Vol. 9, pp. 653-708). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1>
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Buresh, R.J., Austin, E.R., & Craswell, E.T. (1982). Analytical methods in N-15 research. *Fertilizer Research*, 3(1), 37-62. <https://doi.org/10.1007/bf01063408>
- Daryashenas, A.M., & Thaqafi, K. (2011). Compositional nutrient diagnosis in sugar beet. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(1), 1-12. (In Persian with English abstract). <https://www.magiran.com/p891678>
- Daryashenas, A., Saghaei, K., & Davoodi, M.H. (2020). Diagnosis of macro and micro nutrients balance in sugar beet using ahalanobis distance, aitchison distance, and pan balance. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(2), 247-263. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2020.122634>
- Fox, R.L., Olson, R.A., & Rhoades, H.F. (1964). Evaluating the sulfur status of soils by plants and soil tests. *Soil Science Society of America Journal Proceedings*, 21(3), 287-292. <https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800020034x>
- García-Hernández, J.L., Valdez-Cepeda, R.D., & Murillo-Amador, B. (2006). Preliminary compositional nutrient diagnosis norms in *Aloe vera* L. grown on calcareous soil in an arid environment. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3), 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.09.001>
- Ghaderi, J., Akhyani, A., & Khalkhal, K. (2025). Nutritional status analysis of sugar beet in Shahroud county using the compositional nutrient diagnosis (CND) method. *Iranian Journal of Soil Research*, 38(4), 315-330. (In Persian)

- with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.367639.765>
13. Ghaderi, J., Tehrani, M.M., Hamed, F., & Heydari, K. (2023). Evaluation of nutritional balance in sugar beet fields through deviation from optimum percentage (DOP) and compositional nutrient diagnosis (CND) methods. *Iranian Journal of Soil Research*, 37(2), 95-115. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2023.359848.678>
 14. Hanway, J.J., & Heidel, H. (1952). Soil analysis methods as used in Iowa State College soil testing laboratory. *Iowa Agricultural Experiment Station*, 57, 1-13. <https://doi.org/10.31274/agronomy-20210302-001>
 15. Jones, J. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>
 16. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001b). The phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. *Agronomy Journal*, 93, 815-819. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.935815x>
 17. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001c). Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal*, 93, 802-808. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0172>
 18. 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/agronj2001.935809x>
 19. Knudsen, D., Peterson, G.A., & Pratt P.F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. Pp. 225-246. In Page A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis. Part2. Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America. Book Ser. 5. Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c13>
 20. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(4), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
 21. Malakooti, M.J., & Ghaibi, M.N. (1997). *Determining the critical limit of nutrients for strategic crops and correct fertilizer recommendations in the country*. Agricultural Education Publication. 11, 56. (In Persian)
 22. McLean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis, part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 199-224). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12>
 23. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., & Dean, L.A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate*. USDA Circular 939. US Government Printing Office, Washington DC.
 24. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Chemical and microbiological properties*. In *Methods of soil analysis, part 2, no. 9* (2nd ed., pp. 443-444). Madison, WI: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12>
 25. Parent, L.-E., & Dafir, M. (1992). A theoretical concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of The American Society for Horticultural Science*, 117(2), 239-242. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239>
 26. Parent, L.E., Cambouris, A.N., & Muhawenimana, A. (1994). Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1432-1438. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050022x>
 27. Pernet, D., & Tremilli, D. (2001). Modeling sugar beet yield and its components. In *Proceedings of the International Conference on Sugar Beet Research* (pp. 123-130).
 28. Ross, S.M. (1987). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, New York.
 29. Ryan, J.R., Stefan, G., & Rashid, A. (2001). *Soil and plant analysis laboratory manual* (2nd ed.). ICARDA.
 30. Statistical Yearbook of Agriculture. (2022). Center for Statistics, Information Technology and Communications, Deputy of Economic Planning, Ministry of Agriculture-Jihad. (In Persian)
 31. Statistical Yearbook of Agriculture. (2023). Center for Statistics, Information Technology and Communications, Deputy of Economic Planning, Ministry of Agriculture-Jihad. (In Persian)
 32. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>