Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Various aspects of analysis, interpretation and diagnosis of nutrient status using PCA, CND-clr and CND-ilr methods (a case study on sugar beet)

Abdolmohammad Daryashenas[a]*, Karim Shahbazi[a], and Kambiz bazargan[a]

[a] Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
January 04, 2026
Revised
May 13, 2026
Accepted
May 16, 2026
Published online
June 17, 2026

Keywords
Mineral nutrition,
Nutrient balance,
Foliar analysis,
Sugar beet

***Corresponding author's email**
amdaryashenas1335@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Optimizing fertilizer use through plant analysis requires robust nutrient standards based on growth stage and a thorough understanding of nutrient interactions (the plant ionome). Statistical methods based on Compositional Data Analysis (CDA)—such as Principal Component Analysis (PCA) and Compositional Nutrient Diagnosis (CND)—overcome major limitations of single-factor approaches, provided they minimize bias in result interpretation. In this study, nutrient concentrations and root yield data from 170 sugar beet fields were compared using three models: PCA, CND-clr, and CND-ilr. This research aims to: (1) introduce the theoretical foundations of PCA, CND-clr, and CND-ilr; (2) validate nutrient indices through two interpretive approaches (minimum limit-maximum limit, LMi-LMa, and lower limit-upper limit, LL-LU) within the CND-clr model; (3) derive critical concentrations and sufficiency ranges using CND-clr indices; (4) validate CND-ilr reference standards and compare them with other models; and (5) assess nutrient status using PCA and compare it with CND-clr and CND-ilr.

Materials and Methods: Leaf concentrations of N, P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu, along with root yield, were collected from 170 sugar beet farms in Khuzestan Province, southwestern Iran. Leaf samples were taken from plants aged 90–120 days, washed, oven-dried at 65 °C for 48 h, ground, and sieved. Nutrients were analyzed using standard laboratory methods: micro-Kjeldahl for N, spectrophotometry for P, flame photometry for K, and atomic absorption spectrophotometry for Fe, Mn, Zn, and Cu. At harvest, average root yield per hectare was recorded. The study area soils had a saturated extract pH of 7.5–7.8, salinity <1 dS m^{-1}, lime content of 30–50%, and silty loam to silty clay loam textures.

Results: Principal Component Analysis using absolute nutrient concentrations showed that four components explained approximately 85 % of the total variance (eigenvalues > 1). In the first principal component (PC1), potassium, zinc, and copper exhibited the highest positive correlations, while nitrogen showed the highest negative correlation with root yield. However, interpreting nutrient status based on the nutrient index (IX) within the PCA framework led to bias. In contrast, the same nutrient index produced unbiased results when used with Pearson correlation. Consequently, PCA is capable of prioritizing nutrient–yield correlations at a macro scale (regional level) but lacks standard criteria for plot, farm, or orchard scale evaluation. Using the CND-clr method, critical concentrations and sufficiency ranges for N, P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu were established. Validation of these standards on multiple farms using the two approaches revealed that the lower limit-upper limit (LL-LU) approach is more stringent than the minimum-maximum (LMi-LMa) approach. After determining CND-ilr reference standards, farm level validation effectively detected nutrient balances indicating synergistic and antagonistic effects, with the CND-ilr method providing the most diagnostically informative outputs.

Comparative analysis demonstrated that both CND-clr and CND-ilr, supported by credible reference standards, are capable of assessing plant nutritional status at both micro scale (individual field) and macro scale (regional) levels.

Conclusion: PCA is a valuable tool for macro scale prioritization of nutrient yield correlations, but its lack of micro scale evaluation standards limits its application at the farm level. By contrast, the CND-clr and CND-ilr methods, equipped with robust reference standards, effectively assess nutrient status across both spatial scales. Critical concentrations and sufficiency ranges for N, P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu were determined as reference standards indicative of nutrient interactions. The LL-LU validation approach proved more stringent than LMi-LMa. Furthermore, the CND-ilr method enabled a more accurate diagnosis of synergistic and antagonistic nutrient interactions, making it particularly suitable for site-specific nutrient management.

Cite this article: Daryashenas, A.M., Shahbazi, K., Bazargan, K., 2026. Various aspects of analysis, interpretation and diagnosis of nutrient status using PCA, CND-clr and CND-ilr methods (a case study on sugar beet). Research Article, *Journal of Soil Research, 40 (1)*, pp 81-104.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371888.808
Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

جنبه‌های مختلف تحلیل، تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی با روش‌های PCA، CND-clr و CND-ilr (مطالعه موردی چغندر قند)

عبدالمحمد دریاشناس[1*]، کریم شهبازی[1] و کامبیز بازرگان[1]

[1] مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی

تغذیه معدنی،

تعادل عناصر غذایی،

تشخیص برگی،

چغندر قند

*** ایمیل نویسنده مسئول**

amdaryashenas1335@gmail.com

چکیده

بهینه کردن مصرف کودها در مراحل مختلف رشد، متناسب با گونه‌های گیاهی و نیازهای تغذیه‌ای، نقش مؤثری در افزایش عملکرد محصولات و کاهش مصرف کود ایفا می‌کند. تحقق این هدف مستلزم وجود استانداردهای جامع مبتنی بر شناخت اثرات متقابل عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است. در این پژوهش، داده‌های مربوط به غلظت عناصر غذایی و عملکرد ریشه در ۱۷۰ مزرعه چغندر قند واقع در شمال استان خوزستان استخراج و با استفاده از سه مدل PCA1، CND-clr2 و CND-ilr3 با پشتیبانی روش تحلیل داده‌های ترکیبی (CDA) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر غذایی مشتق یافته از نرم‌های استاندارد CND-clr تعیین شد، سپس شاخص‌های عناصر غذایی با دو رویکرد حد پایین –حد بالا ۴ (LL- LU) و رویکرد حداقل–حداکثر ۵ (LMi-LMa)، در تعدادی از مزارع مورد مقایسه و اعتبار سنجی قرار گرفتند. همچنین با استفاده از نرم‌های استاندارد CND-ilr، تعدادی مزارع از نظر تشخیص تعادل‌های عناصر غذایی و اثرات سینرژیستی و آنتاگونیستی مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش PCA قادر به الویت‌بندی همبستگی بین عناصر غذایی و عملکرد ریشه چغندر قند است، ولی فاقد نرم‌های استاندارد برای ارزیابی در مقیاس خرد (کرت، مزرعه و باغ) است؛ بنابراین، روش PCA برای ارزیابی‌های کلان وضعیت عناصر غذایی یک منطقه‌ی کشاورزی با تعداد داده‌های بالا کاربرد دارد. نتایج مقایسه‌ها نشان داد که روش‌های CND-clr و CND-ilr، به‌دلیل داشتن نرم‌های استاندارد معتبر، توانایی ارزیابی وضعیت تغذیه گیاهان را در هر دو مقیاس خرد و کلان دارا است.

استناد: دریاشناس، ع.، شهبازی، ک.، بازرگان، ک.، ۱۴۰۵. جنبه‌های مختلف تحلیل، تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی با روش‌های PCA، CND-clr و CND-ilr (مطالعه موردی چغندر قند) مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰*، ص ۸۱–۱۰۴.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371888.808

مقدمه

در سال‌های اخیر با وارد شدن بخش خصوصی کشور در زمینه تولید و واردات انواع کودهای شیمیایی، آلی و زیستی اهمیت بهینه کردن مصرف کودها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. هم‌اکنون بازار کود ایران سرشار از انواع ترکیبات کودی حاوی عناصر غذایی سریعاً محلول در آب، ترکیبات ضد تنش‌های محیطی و محرک‌های رشد آلی و بهبود دهنده‌های آلی خاک است که این مواد می‌توانند نقش قابل‌توجهی در بهینه کردن مصرف کود کشور داشته باشند. علاوه بر این، با تأسیس و توسعه‌ی آزمایشگاه‌های خصوصی امکان تجزیه دقیق و اعتبارسنجی این کودها نیز افزایش یافته است. بهینه کردن مصرف کودها در مراحل مختلف رشد با توجه به گونه-های گیاهی و نیاز مراحل مختلف رشد از طریق سرک‌دهی برگی و خاکی امکان‌پذیر است (Cheraghi et al., 2020; Khademi et al., 2001). بهینه کردن با توجه به نیاز مرحله رشد دو وجه اصلی دارد که یکی حداکثر کردن و دیگری حداقل کردن عناصر غذایی است. در گیاهانی مانند چغندرقند که کیفیت محصول اهمیت بسزایی دارد حداکثر کردن و حداقل کردن بدین طریق است که در مراحل اولیه رشد با حداکثر کردن مصرف کودها، به‌ویژه کودهای نیتروژنی، باید بیشترین سایه انداز ایجاد شود ولی در انتهای رشد (۶ تا ۱۰ هفته قبل از برداشت) باید مصرف کود به‌ویژه عنصر نیتروژن را به منظور جلوگیری از کاهش عیار قند و ناخالصی‌ها و نیتروژن مضر حداقل کرد. برای بهینه کردن کودها با استفاده از روش تجزیه گیاه نیاز به استانداردهای عناصر غذایی مبتنی بر نیاز مرحله‌ی رشد و شناخت اثرات متقابل عناصر است (Baxter et al., 2008; Parent et al., 2012).

استانداردهایی که بیانگر وضعیت عناصر غذایی می‌باشند، با استفاده از روش‌های غلظت بحرانی، حد کفایت، دریس و تشخیص چند گانه عناصر غذایی، برای گیاهان مختلف زراعی و باغی تعیین شده‌اند Daryashenas and Sagafi. 2011; Basirat et al. 2016; Ghaderi et al. 2025). با این وجود، تفسیر صحیح نتایج حاصل از تجزیه گیاه، خاک و آب برای ارزیابی وضعیت تغذیه گیاه و توصیه‌های کودی حائِز اهمیت است. روش‌های ارزیابی آماری مبتنی بر کاربرد (تحلیل داده‌های ترکیبی[1] یا CDA) مانند روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی[2] (PCA) و تشخیص چندگانه عناصر غذایی[3] (CND) نارسایی‌های روش‌های تک عاملی را تا حدود زیادی بر طرف می‌کنند به شرطی که کمترین مقدار اریبی[4] در تفسیر نتایج را داشته باشند؛ زیرا این اریبی‌ها موجب استنتاج اشتباه در تشخیص می‌شوند (Pawlosky-Glahn Egozcue, 2008). برای پرهیز از این اشتباهات نیاز است که هدف و مقیاس ارزیابی وضعیت تغذیه گیاه را مد نظر داشت. مدل‌هایی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تحلیل وضعیت عناصر غذایی در مقیاس کلان که با داشتن تعداد داده زیاد از طریق کاهش ابعاد[5] استفاده می‌کنند، نتایج خوبی را برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری ارائه می‌دهند اما فاقد نرم‌های استاندارد برای ارزیابی در مقیاس خرد یعنی تعیین وضعیت تغذیه تا سطح و مقیاس یک کرت، مزرعه و باغ می‌باشند. درحالی‌که روش CND با توسل به نرم‌های استاندارد معتبر امکان ارزیابی در هر دو مقیاس کلان و خرد را داشته و علاوه بر آن ارزیابی در مقیاس کلان توسط روش CND از جمع ساده‌ی وضعیت تک تک مزارع بدست می‌آید که بیشتر به واقعیت نزدیک است و اعتبار بیشتری دارد. در روش CND-ilr که نسبت به CND-clr توسعه یافته‌تر است این امکان وجود دارد که سطح و مقیاس ارزیابی وضعیت تغذیه گیاهان برای بهینه کردن با لحاظ اثرات متقابل آنتاگونیستی و سینرژیستی به‌نحو دقیق‌تری بررسی گردد.

در این زمینه، Daryashenas و همکاران (۲۰۲۰) با کاربرد روش CND-ilr و طراحی ۸ تعادل متعامد دو تایی بدون همپوشانی و تلفیق آن با روش تعادل ترازویی[6] توانستند ارزیابی دقیق‌تری را برای بهینه کردن مصرف کود در چغندر قند ارائه نمایند. به‌طور مشابه، Parent و همکاران (۲۰۱۲) با طراحی ۱۲ تعادل متعامد دو تایی بدون همپوشانی را با ۱۲ عنصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی، مس، بر، گوگرد، کلسیم، منیزیم و کلر برای ۴۳۳ باغ کیوی نیوزلند منظور کردند و نهایتاً سه تعادل P|N و Cl, S |P, N و Cl|S را به عنوان اثرات متقابل مؤثر بر کاهش عملکرد درختان کیوی نیوزلند گزارش کردند. Tadayon و همکاران (۲۰۲۳) شاخص‌های عناصر غذایی مشتق شده از روش CND-clr را به‌عنوان متغیر مرتبط با عملکرد درختان انار با روش PCA ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که عناصر S ،B ،Ca و Mg به ترتیب بیشترین تأثیر را بر افزایش گروه عملکرد پایین داشتند. Zolfi Bavariani و همکاران، (۲۰۲۲) با استفاده از روش CND-clr وضعیت ۷۹ مزرعه گوجه فرنگی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تعداد مزارع با تعادل عناصر مطلوب‌تر در گروه عملکرد بالا بیشتر از تعداد مزارع با عملکرد پایین است که این نتایج نشان‌دهنده درستی فلسفه روش

---

[1] Compositional Data Analysis
[2] Principal Component Analysis
[3] Compositional Nutrient Diagnosis
[4] Bias
[5] Dimensionality reduction technique
[6] Pan balance

CND مبنی بر اینکه غلظت‌های موجود در گروه عملکرد بالا معیار خوبی برای ارزیابی وضعیت تعادل عناصر تغذیه گیاهان هستند، است.

با توجه به اهمیت موضوع تشخیص و تفسیر نتایج تجزیه برگی جهت استفاده در توصیه‌های کودی، مطالعه حاضر با هدف معرفی تئوری‌های حاکم بر روش شناسی ۳ مدل CND-clr و CND-ilr و PCA و اعتبار سنجی نرم‌های استاندارد و شاخص‌های عناصر غذایی از طریق دو نوع رویکرد تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی (رویکرد حداقل – حداکثر LMi-LMa) و (رویکرد حد پایین – حد بالا LL-LU) در مدل CND-clr در مزارع چغندر قند انجام شد. در این مطالعه همچنین، غلظت‌های بحرانی و محدوده ی بسندگی عناصر غذایی از طریق شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr استخراج شد و با نرم‌های استانداردهای مرجع مدل CND-ilr در تعدادی از مزارع چغندر قند و نیز با سایر مدل‌ها مقایسه شد. در نهایت، ارزیابی وضعیت عناصر غذایی ۱۷۰ مزرعه چغندرقند با استفاده از مدل PCA و مقایسه آن با دو مدل CND-clr و CND-ilr انجام شد.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

در این مطالعه از یک بانک اطلاعاتی، شامل غلظت مختلف عناصر غذایی برگ- نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس- و همچنین عملکرد ریشه چغندرقند مربوط به ۱۷۰ مزرعه استفاده شد. محل نمونه‌برداری داده‌ها در استان خوزستان و از مزارع اطراف شهرستان‌های دزفول، شوش، اندیمشک و هفت‌تپه بود که از واحدهای کشت و صنعت، زارعین و کرت‌های آزمایشی، در مدت هفت سال متناوب (۱۳۷۹- ۱۳۷۳)، استخراج شدند. نمونه‌های گیاهی از مزارعی که ۹۰ تا ۱۲۰ روز از تاریخ کاشت آنها گذشته بود و از بوته‌های بالغ کاملاً بازشده (بین جوان‌ترین برگ‌ها در مرکز بوته و برگ‌های مسن‌تر) تهیه شد. از ۳۰ نقطه واقع در هر مزرعه، ۳۰ بوته انتخاب و اندام‌های پهنک و دمبرگ تفکیک و دو نمونه مرکب تهیه گردید. در این نمونه‌ها، نیتروژن کل به روش میکروکلدال و با استفاده از دستگاه اتوآنالیزر کجلتک (Helrich, 1990)، فسفر به روش کالریمتری توسط اسپکتروفتومتر (Chapman & Pratt 1978) و پتاسیم به وسیله دستگاه فلیم فتومتر (Hemke et al., 1996)اندازه‌گیری شد. عناصر روی، منگنز، آهن و مس نیز به روش استخراج با هضم خشک عصاره‌گیری و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Isaac et al., 2015).

خاک‌های مناطق تحت مطالعه، از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری و تجزیه شد. به‌طور کلی، خاک این مناطق دارای pH گل اشباع حدود ۷/۲ تا ۷/۸، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع کمتر از یک دسی زیمنس بر متر، میزان آهک در دامنه ۵۰-۳۰ درصد، بافت خاک سیلتی لوم تا سیلتی کلی لوم، میزان مواد آلی کمتر از ۰/۷ در صد، فسفر قابل جذب ۱۲- ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم قابل جذب ۲۱۰-۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آهن در محدوده ۳-۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، منگنز ۴/۵-۳/۵، مس در محدوده ۰/۹-۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و روی در حدود ۱/۱- ۰/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در زمان برداشت میزان عملکرد ریشه در هر مزرعه نیز اندازه‌گیری شد.

روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی (CND-clr)

در این مطالعه از مبانی ریاضی و آماری پیشنهادی توسط Parent و Dafir (۱۹۹۲) که بعداً توسط خیاری و همکاران (۲۰۰۱) توسعه یافته است، استفاده شد که به شرح زیر است.

۱- ترکیبات بافت گیاهی به صورت یک سادک[1] (S^d) حاوی عناصر غذایی (N, P, K ...) و یک بخش باقیمانده عناصر (R_d) به‌شکل رابطه (۱) قابل بیان است که در آن d نماینده تعداد عناصر غذایی و R_d بیانگر باقیمانده عناصر است.

رابطه (۱)

$$S^d = [(N, P, K, \dots, R_d): N > 0, P> 0, K> 0\dots R_d >0\ N + P+ K+ \dots+ R_d = ۱۰۰]$$

در این رابطه عدد ۱۰۰ بیان کننده کل غلظت ماده خشک گیاه است (درصد) و N، P، K ... و R_d که R_d نشان دهنده سایر عناصر غذایی باقیمانده و اندازه‌گیری نشده است که از رابطه (۲) محاسبه شد(Aitchison, 1986).

رابطه (۲)

$$R_d = ۱۰۰ - (N + P + K\dots)$$

۲- میانگین هندسی عناصر غذایی با رابطه (۳) اندازه گیری شد.

رابطه (۳)

$$G= \left[N\times P\times K\times \dots \times R_d\right]^{\frac{1}{d+1}}$$

۳- نسبت لگاریتم طبیعی عناصر از طریق روابط (۴) به شرح زیر محاسبه شد.

رابطه (۴)

[1] Simplex

$$Z_i = \log\left[x_i / g(x)\right]$$

$$V_{N} = Ln\ (N/G),\quad V_P = Ln\ (P/G),$$
$$V_K = Ln\ (K/G) \ldots V_{Rd} = Ln\ (R_d/G) \qquad \text{رابطه (۵)}$$
$$V_N + V_P + V_K + \cdots + V_{Rd} = 0$$

بنابراین در این روابط، V_x بیانگر نسبت لگاریتمی عناصر برای x عنصر است. رابطه ۵ درستی محاسبات را تأیید می‌کند. بر اساس این تعریف، مجموع عناصر گیاهی بر مبنای عدد ۱۰۰ است و مجموع نسبت لگاریتمی عناصر با احتساب مقدار باقیمانده عناصر (R_d) برابر صفر خواهد بود. V_x برای عناصری مانند N، P، K، ... R_d فرم بیانی از وضعیت و نسبت عناصر غذایی در گیاه است که مقادیر آن در جامعه با عملکرد زیاد بیانگر غلظت مطلوب و ایده آل است و به‌عنوان ارقام مرجع یا نرم‌های استاندارد CND محسوب شدند و ً به‌صورت V^*_N، V^*_P، V^*_K و ... V^*_{Rd} معرفی شد. غلظت هر عنصر غذایی گیاه مورد مطالعه را با غلظت ایده آل یا همان نرم‌های استاندارد CND استاندارد شد و بدین ترتیب شاخص‌های عناصر غذایی CND به دست آمد که برای عناصر N، P، K و ... R_d با استفاده از رابطه‌های ۶ محاسبه شد.

رابطه(۶)

$$I_N = (V_N - V^*_N) / SD^*_N \quad I_P = (V_P - V^*_P) / SD^*_P \quad I_K = (V_K - V^*_K) / SD^*_K \quad I_{Rd} = (V_{Rd} - V^*_{Rd}) / SD^*_{Rd}$$

در روابط مـذکور V^*_N، V^*_P، V^*_K، V^*_{Rd}، SD^*_V، SD^*_P، SD^*_K، SD^*_{Rd} به ترتیب میانگین و انحراف معیار نسبت لگاریتمی عنا صر غذایی بودند که به‌عنوان نرم اســتاندارد و یا ارقام مرجع CND محسـوب شـدند. V_N، V_P، V_K و V_{Rd} نسـبت لگاریتمی مربوط به نمونه مطالعاتی بود. I_N، I_P، I_K و I_{Rd} به ترتیب شـــاخص عناصـــر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر باقیمانده هستند.

۴- شاخص تعادل عنا صر غذایی با روش CND از طریق رابطه (۷) م حاسـ به شــد. در این راب طه r^2 مجموع مرب عات شاخص‌های عناصر غذایی است و همیشه می‌تواند اعداد صفر و بی شتر را به خود اخت صاص دهد. از نظر تئوری هر اندازه r^2 به عدد صفر نزدیک‌تر شود، تعادل عنا صر غذایی مطلوب‌تر خواهد شد.

رابطه (۷)

$$r^2 = I^2_N + I^2_P + I^2_K + \ldots + I^2_{Rd}$$

بنابراین، برای هر نمو نه مشــخص گ یاهی از طریق به‌دست آوردن r^2 عدم توازن عناصر غذایی تعیین گردید. با توجه به اینکه شاخص‌های عنا صر غذایی CND متغیری م ستقل و نرمال[1] هسـتند، مجموع این شـاخص‌ها یعنی r^2 از یک توزیع مربع کای با درجه آزادی d+۱ تبعیت می‌کنند(Ross, 1987). تبعیت متغیر شـــاخص توازن عناصـــر غذایی CND یعنی r^2 از تابع توزیع مربع کای یک مزیت به شــمار می‌رود که در ســامانه دریس امکان‌پذیر نبوده است.

۵- تمایز جامعه عملکرد به دو گروه زیاد و کم می‌تواند بر اســاس ترسیم تابع تجمعی بین عملکرد و نسبت واریانس شاخص‌های عنا صر غذایی با شد که مراحل محا سبه آن به طریق زیر انجام شد (Khiari et al. 2001).

۱) عملکردها از زیاد به کم ردیف شدند؛

۲) نسبت لگاریتمی (V_x) عناصر غذایی محاسبه گردید؛

۳) وار یانس م قادیر V_X برای اولین گروه عملکرد و برای سایر عملکردها محا سبه و نسبت واریانس آنها بر ا ساس رابطه زیر محاســـبه شـــد. این عمل برای دومین گروه عملکرد و الی آخر به عمل آمد؛

رابطه (۸)

$$F_i\ (V_X) = \frac{\text{واریانس } V_X \text{ برای } n_1 \text{ مشاهده}}{\text{واریانس } V_X \text{ برای } n_2 \text{ مشاهده}}$$

۴) تابع تجمعی نسبت واریانس نیز به روش بند ۳ و بر اساس رابطه (۹) محاسبه شد؛

رابطه (۹)

$$F_i^c = \frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i\ (V_X)}{\sum_{i=1}^{n-3} f_i\ (V_X)} \times ۱۰۰$$

۵) تابع تجمعی $F_i^c\ (V_X)$ مرتبط با عملکرد (Y) با الگوی درجه ۳ قابل نمایش است؛

رابطه (۱۰)

$$F_i^C(V_x) = aY^3 + BY^2 + cy + d$$

۶) نقطه عطف این منحنی که شــکل کاوی دارد، از طریق مشتق اول و دوم معادله محاسبه گردید؛

رابطه (۱۱)

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

[1] Unit-Normal

رابطه (۱۲)

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

از حل معادله (۱۲) مقدار b/3a– بیانگر عملکرد حد واسط بین گروه عملکرد کم و زیاد است که برای ۱+ d عنصر غذایی قابل محاسبه است.

روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی (CND-ilr)

در روش CND ilr که نسبت به CND clr توسعه یافته‌تر است، این امکان وجود دارد که سطح و مقیاس ارزیابی وضعیت تغذیه گیاهان برای بهینه کردن با لحاظ اثرات متقابل آنتاگونیستی و سینرژیستی به نحو دقیق‌تری بررسی گردد.

فضای داده‌های ترکیبی[1]

یک بردار ترکیبی[2] بسته شده بین یک مقدار معین[3] مثلاً بین اعداد صفر تا ۱۰۰ درصد برای داده‌های تجزیه گیاه به شرح رابطه‌ی (۱۳) بیان شد (Parent, 2011; Aitchison and Greenacre, 2002; Egozcue et al., 2003).

رابطه (۱۳)

$$S_D = C(c_1, c_2, \dots c_D) = \left(\frac{c_1 k}{\sum_{i=1}^{D} c_i}, \frac{c_2 k}{\sum_{i=1}^{D} ci}, \dots, \frac{c_D k}{\sum_{i=1}^{D} ci}\right)$$

که در آن (S_D) یک سادک و K واحد اندازه‌گیری (مثلاً درصد یا گرم در کیلوگرم یا قسمت در میلیون و....) و C_i برابر i امین قسمت از یک مجموعه ترکیبی با D قسمت است. در این رابطه مقدار باقیمانده عناصر از تفریق مقادیر اندازه‌گیری شده عناصر غذایی از عدد ۱۰۰ محاسبه گردید.

داده‌های ترکیبی که به فرم درصد و یا نسبت بیان می شوند و محصور بین یک محدوده ثابت هستند، معمولاً دارای توزیع نرمال نیستند اما داده‌هایی که مقادیر بین ∞− تا ∞+ را اختیار می کنند می‌توانند توزیع نرمال داشته باشند و فاصله اطمینان کمتر از صفر و بالاتر از ۱۰۰ را بیان می‌کنند. لذا با تبدیل داده‌های نتایج تجزیه گیاه مثلاً تبدیل لگاریتمی، آنها را به توزیع نرمال و یا نزدیک به توزیع نرمال تبدیل گردید.(Parent, 2011; Rezaii, 1997).

نسبت لگاریتم ایزومتریک (ilr) و طراحی مقایسات دوتایی متوالی (تعادل‌های متعامد یا SBP)

ایده تفسیر نتایج برای نسبت‌های دو عنصری A/B (مانند روش دریس) و یا نسبت یک عنصر به چند عنصر (روش CND-clr) ممکن است برای بعضی از نسبت عناصر مناسب باشد ولی این روش‌ها، همیشه تعدادی از نسبت عناصر غذایی را به‌عنوان نرم مرجع نشان می‌دهند که نمایانگر شرایط تغذیه گیاه نیست و یک نرم اضافی از بیان تعادل عناصر غذایی است (Parent, 2011; Bergmann, 1988; Marschner, 2011). بنابراین، رویکرد نسبت عناصر که دارای D-1 درجه آزادی است به ایده تعادل‌های مستقل خطی[4] برای D-1 جزء تبدیل گردید؛ که متقابلاً به جای تعداد D×(D-1) /2 جفت عناصر (مانند N/P و N/K و....) تعداد $D×(D-1)^2$ /2 دوتائی متوالی از نسبت‌های آمیخته (Amalgamated) مانند N/ (P, K) و... با درجه آزادی D-1 جزء ممکن استخراج شد. بر این اساس، نسبت‌های لگاریتمی ایزومتریک (ilr) تهیه گردید. (Aitchison and Greenacre, 2002; Egozcue et al., 2003). به‌عبارت دیگر یک سادک متشکل از داده‌های ترکیبی را در یک فضای اقلیدسی به تعداد D-1 مقایسه لگاریتمی متعامد (Orthogonal log contrast) بدون هم‌پوشانی مقایسات انجام گرفت؛ که تحت عنوان تعادل‌های متعامد یا نسبت‌های ژئومتریک نیز گفته می‌شود؛ بنابراین یک سامانه مبتنی بر رویکرد تعادلی به شکل مقایسات دوتائی متوالی (SBP) طراحی شد. در واقع SBP یک ماتریس D×(D-1) مقایسات دوتایی متوالی است که یک جزء از یک مقایسه در صورت کسر[5] با علامت 1+ و یک جزء دیگر از مقایسه در مخرج کسر[6] با علامت -1 مشخص گردید و برای یک مقایسه دوتایی متوالی (یک تعادل متعامد) به کار گرفته شد. در نتیجه مقدار ilr از طریق رابطه (۱۴) محاسبه شد (Modesto et al. 2014 and Egozcue et al., 2003).

رابطه(۱۴)

$$ilrj = \sqrt{\frac{n_j^+ n_j^-}{n_j^+ n_j^-}}\, \mathrm{Log}\, \frac{g(c_j^+)}{g(c_j^-)}$$

n^+_j و n^-_j: تعداد اجزاء تشکیل‌دهنده گروه صورت و مخرج کسر؛

$g(c^+_j)$ و $g(c^-_j)$: میانگین هندسی اجزاء تشکیل‌دهنده گروه مثبت صورت (۱+) و گروه منفی مخرج (۱−)؛

ilr: نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای یک تعادل متعامد؛

[1] Compositional data space
[2] Compositional vector
[3] Unit-sum constraint

[4] linearly independent balance
[5] group numerator
[6] group denominator

در نتیجه تعادل به‌صورت { گروه ۱+ | گروه ۱- } فرموله شد. برای مثال تعادل عنصر Fe در مقابل عناصر Cu, Zn, وMn به صورت [(Mn, Zn, Cu) + |Fe−] برآورد گردید. بررسی اثر متقابل یک یا چند عنصر در مقابل سایر عناصر غذایی یک تعادل نامیده می‌شود. برای طراحی مقایسات دوتایی متوالی یا تعادل‌های متعامد، تعداد D-1 مقایسه لگاریتمی متعامد (Orthogonal log contrast) بدون هم پوشانی می‌توان ایجاد کرد که در این مطالعه برای ۷ عنصر N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu و باقیمانده عناصر F_V به شرح (جدول ۱) تعداد ۷ تعادل متعامد دوتایی شامل ilr_1 : [P | N] و ilr_2 : [NP | K] و ilr_3 : [Fe | Mn] و Ilr_4 : [Zn | CU] و Ilr_5 : [Fe,Mn| Zn,Cu] و Ilr_6 : [N,P,K|Mn,Zn,Fe,Cu] و Ilr_7 : [F_V|N,P,K, Mn, Zn, Fe, Cu] برای چغندر قند پاییزه طراحی گردید.

جدول ۱- طراحی تعادل‌های متعامد دوتایی متوالی هفت عنصر N ، P، K، Fe، Mn، Zn وCu و باقیمانده عناصر(FV) برای چغندر قند

Table 1. Design of sequential binary orthogonal balances (SBP) of seven elements N, P, K, Fe, Mn, Zn Cu and FV in sugar beet

Ilr*	N	P	K	Fe	Mn	Zn	Cu	Fv	n^+_j**	n^-_j***	تعادل‌ها Balances
ilr_1	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	[P | N]
ilr_2	-1	-1	1	0	0	0	0	0	1	2	[NP | K]
ilr_3	0	0	0	-1	1	0	0	0	1	1	[Fe | Mn]
Ilr_4	0	0	0	0	0	-1	1	0	1	1	[Zn | CU]
Ilr_5	0	0	0	-1	-1	1	1	0	2	2	[Fe,Mn| Zn,Cu]
Ilr_6	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0	4	3	[N,P,K|Mn,Zn,Fe,Cu]
Ilr_7	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	7	[F_V|N,P,K, Mn, Zn, Fe, Cu]

Ilr= نسبت لگاریتمی ایزومتریک، **= تعداد علامت مثبت، ***= تعداد علامت منفی، Fv= سایر عناصر.

*Ilr = isometric log ratios; **: numbers of positive sign; ***: numbers of negetive sign; F_V = fill value

فواصل اقلیدسی

شاخص فاصله ماهالانوبیس و شاخص فاصله ایچسن به‌عنوان تخمین‌گر تعادل عناصر غذایی استفاده شد. فاصله ایچسن بطور ساده فقط با تبدیل لگاریتمی غلظت‌ها و نسبت‌های عناصر غذایی محاسبه شد. ولی فاصله ماهالانوبیس با لحاظ ماتریس کوواریانس تبدیل یافته لگاریتمی این تفاضل‌ها یعنی تفاوت بین غلظت‌ها و یا نسبت‌های عناصر غذایی تبدیل یافته لگاریتمی نمونه‌های مطالعاتی نسبت به نمونه مرجع محاسبه گردید. رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ به‌ترتیب بیان فاصله ایچسن و فاصله ماهالانوبیس می‌باشند.

رابطه (۱۶)

$$A = \sqrt{\sum_{i=1}^{D=1} (ilr_i - ilr_i^*)^2}$$

A: فاصله ایچسن

ilr_i: نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای یک نمونه مطالعاتی

ilr_i^*: نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای نمونه مرجع

رابطه (۱۷)

$$M = \sqrt{(ilr_i - ilr_i^*)^T COV^{-1} (ilr_i - ilr_i^*)}$$

M فاصله ماهالانوبیس و T ماتریس ترانهاده و Cov^{-1} معکوس ماتریس کوواریانس و ilr_i نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای یک نمونه مطالعاتی و ilr_i^* نسبت لگاریتمی ایزومتریک برای نمونه مرجع با توجه به مبانی دو مدل ذکر شده، استانداردهای مرجع ilr CND و CND- clr (جدول ۲) و فاصله ماهالانوبیس مرجع (۴/۲) که توسط تحقیقات قبلی برای چغندر قند تعیین شده بود در ارزیابی های عناصر تغذیه ایی برای تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- استانداردهای مرجع عناصر غذایی CND-clr برای ۷ عنصر و استانداردهای مرجع عناصر غذایی -CND ilr برای ۷ تعادل برای چغندر قند پاییزه (دریاشناس و همکاران، ۱۳۹۹)

Table 2. CND-clr nutrient reference standards for 7 elements and CND-ilr nutrient reference (standards for 7 blances (Ilr coordinate) in fall sugar beet (Daryashenas et al., 2020

متغیر عناصر Nutrient variate	میانگین Mean	انحراف معیار Standard division	متغیر عناصر Nutrient variate	میانگین Mean	انحراف معیار Standard division
	Clr variate استاندارد Clr			Ilr coordinate استاندارد Ilr	
N	3.05	0.12	ilr_1	1.84	0.07
P	0.42	0.07	ilr_2	1.12	0.15
K	3.07	0.12	ilr_3	-0.68	0.18
Fe	-1.77	0.17	Ilr_4	-0.48	0.13
Mn	-2.72	0.15	Ilr_5	-1.89	0.18
Zn	-3.83	0.13	Ilr_6	-7.04	0.11
Cu	-4.50	0.14	Ilr_7	-6.74	0.07

ilr= نسبت لگاریتمی ایزومتریک، Clr variate= استانداردهای مرجع روش CND-clr، Ilr coordinate= استانداردهای مرجع روش CND-ilr

ilr = isometric log ratio; Clr variate = It is refrence norm for the centered log ratio method; Ilr coordinate = It is refrence norm for the isometric log ratio method

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تبدیلی در فضای برداری است که تحلیل مجموعه داده‌های بزرگ با تعداد زیادی بعد یا ویژگی، افزایش تفسیرپذیری داده‌ها با حفظ حداکثر مقدار اطلاعات و تجسم داده‌های چند بعدی را فراهم می‌کند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی در واقع یک تکنیک آماری برای کاهش ابعاد یک مجموعه داده است. این کار با تبدیل خطی داده‌ها به یک سیستم مختصات جدید انجام می‌شود که (بیشتر) تغییرات در داده‌ها را می‌توان با ابعاد کمتری نسبت به داده‌های اولیه توصیف کرد. بسیاری از مطالعات از دو مؤلفه اصلی اول (PC1 و PC2) برای نمایش داده‌ها در دو بعد و شناسایی بصری خوشه‌های نقاط داده نزدیک به هم استفاده می کنند. اولین مؤلفه اساسی PC1 یک ترکیب خطی از پیش‌بینی‌های اصلی بود که بیشترین واریانس موجود در مجموعه داده‌ها را به خود اختصاص داد. این مؤلفه، جهت بیشترین تغییرات در داده‌ها را تعیین کرد. هیچ مؤلفه دیگری نمی‌تواند بیش از مؤلفه اساسی اول PC1دامنه تغییرات داشته باشد. نتیجه محاسبه اولین مؤلفه اساسی، خطی بود که نزدیک‌ترین خط به داده‌ها را به خود اختصاص داد. در واقع این خط مجموع مربع فواصل را بین یک نقطه داده و خط، به کمینه مقدار می‌رساند. دومین مؤلفه اساسیPC2 نیز یک ترکیب خطی از پیش‌بین‌های اصلی بود که واریانس باقی‌مانده در مجموعه داده را در خود حفظ کرد و با مقدار PC1 نا همبسته است. به عبارت دیگر، همبستگی بین مؤلفه اساسی اول و دوم صفر است (Greenacre et al. 2023). منظور از پیش‌بینی‌ها در مطالعه حاضر، تعیین بیشترین همبستگی‌ها و اولویت‌بندی تأثیر متغیرهای عناصر غذایی (N, P, K, Mn, Zn, Cu, Fe) بر عملکرد ریشه چغندر قند بود. معیار انتخاب(SC) از طریق رابطه (SC=0.5/√Eigenvalues) برای ارزیابی همبستگی معنی‌دار بین عناصر و عملکرد ریشه در نظر گرفته شد.

محاسبات آماری

کلیه روابط و گراف‌های آماری مربوط به روش-CND clr و CND-ilr با استفاده از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ (Jakson, 2016) فرمول نویسی شد و کلیه محاسبات و گراف‌های روش PCA با نرم‌افزار مینی تب ۱۴ تهیه گردید.

نتایج و بحث

تحلیل، تفسیر، تشخیص و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با هدف یافتن مناسب‌ترین روش ارزیابی و بهینه کردن تغذیه عناصر غذایی با کاربرد ۴ روش انجام شد: الف: روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حداقل- حداکثر شاخص عناصر غذایی ب: روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حد پایین - حد بالا شاخص عنا صر غذایی ج: روش کلاسیک CND-ilr به منظور تشخیص دقیق‌تر اثرات سینرژیستی – آنتاگونیستی عنا صرغذایی د: روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی. بدین منظور داده‌های گروه عملکرد کل مزارع (۱۷۰ مزرعه) و گروه عملکرد بالا (عملکردهای بیشتر از ۶۰ تن در

هک تار) و گروه عملکرد پایین (عملکرد های کمتر از ۶۰ تن در هکتار) با استفاده از ۴ رویکرد فوق مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حداقل- حداکثر (LMi-LMa) و محدوده بسندگی حد پایین - حد بالا (LL-LU)

ابتدا داده‌های عملکرد ریشه و غلظت عناصر N, P,K, Mn, Zn, Cu, Fe بافت گیاهی ۱۷۰ مزرعه چغندر قند با استفاده از تابع تجمعی نسبت عناصر غذایی و معیار قرار دادن ۶۰ تن در هکتار (Cut-off yield) برای عملکرد ریشه حد واسط، به دو گروه عملکرد بالاتر و پایین‌تر از ۶۰ تن در هکتار تفکیک شد و استانداردهای مرجع (CND-clr) با استفاده از محاسبات روش‌شناسی مذکور استخراج گردید (جدول ۲ و ۳). ارزیابی تغذیه‌ایی برای هر کدام از عناصر برای کلیه مزارع چغندر قند با استفاده از این استانداردها، می‌تواند انجام گیرد. علاوه بر استانداردهای مرجع (CND-clr) پارامترهای حداقل – حداکثر (LMi-LMa) و حد پایین – حد بالا (LL- LU) شاخص‌های عناصر غذایی (IX) برای عناصر N, P,K, Mn, Zn, Cu, Fe تعیین گردید (جدول ۳). روش کلاسیک CND-clr با استفاده از محدوده بسندگی حد پایین و حد بالا (LL–LU) شاخص‌های عناصر استفاده شد. در ارتباط با روش حد پایین و حد بالا با توجه به اینکه رابطه شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr با عملکرد رفتاری مشابه تابع کای‌اسکوئر دارد، امکان بیان این شاخص‌ها به صورت یک محدوده فراهم شد. در این روش، مقدار r^2 از حاصل جمع مربع شاخص‌های تمامی عناصر غذایی محاسبه شد. بر این اساس، مربع شاخص هر عنصر غذایی به صورت یک محدوده متقارن نسبت به صفر(symmetrical about zero) محاسبه گردید(Khiari et al. 2001). در واقع r^2 یک مجموعه متشکل از محدوده‌های شاخص عناصر غذایی است که هر کدام از شاخص‌های عناصر غذایی به‌صورت محدوده‌هایی از IX – تا IX + (حد پایین و حد بالا) قابل بیان شدند. شاخص عناصر غذایی که مقدار آنها در بین این محدوده قرار گرفت متعادل و خارج از آن نامتعادل (کمبود یا بیش بود) تفسیر شدند. محدوده‌های حد بالا و حد پایین با استفاده از روش رگرسیون استخراج شد (شکل ۱). نتایج نشان داد معادلات درجه ۲ برای روابط نیتروژن- عملکرد (عناصر پر مصرف) و عنصر روی- عملکرد (عناصر کم مصرف) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P\leq0.05$*) معنی‌دار شدند. سایر عناصر هم معنی‌دار شد (نتایج ارائه نشده است). در این اشکال، بیشترین عملکرد در محدوده + و – عدد ۰/۹۹ تا حدود ۱ مشاهده شد و برای عنصر روی، در محدوده + و – عدد ۰/۷۵ محاسبه گردید (جدول۳ و شکل ۱)

جدول ۳ - استانداردهای مرجع CND-clr مشتق شده از جامعه عملکرد بالای ۶۰ تن در هکتار (۳۴ مزرعه) و ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با دو رویکرد (LMi-LMa) و (LL- UL)

Table 3. CND-clr standards derived from the high yield population more than 60 t h^{-1} (34 fields) and assessing the nutrient status using two approaches (LMi-LMa) and (LL-LU)

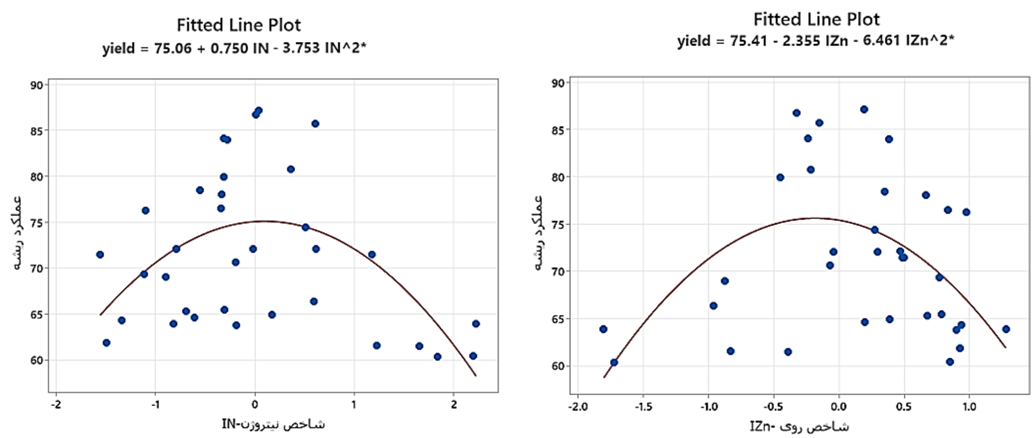
استاندارد مرجع CND-clr-Standards	N	P	K	Mn	Zn	Fe	Cu	
Mean–(میانگین)	3.05	0.42	3.06	-2.73	-3.83	-1.77	-4.50	
SD- (انحراف معیار)	0.12	0.07	0.12	0.15	0.13	0.17	0.14	
(parameters)پارامترها	IN	IP	IK	IMn	IZn	IFe	Icu	CND-r^2
حداکثر (LMa)	2.14	3.11	1.91	2.91	1.28	2.33	1.57	31.03
حداقل (LMi)	-1.46	-2.83	-2.46	-1.55	-3.74	-1.82	-2.75	1.42
(SD IX)– (انحراف معیار)	0.95	0.99	0.96	0.96	0.95	0.99	0.99	7.21
حد بالا (LU)	+0.99	+0.99	+0.99	+0.99	+0.74	+0.99	+0.99	
حد پایین (LL)	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.74	-0.99	-0.99	
(SD IX) -(انحراف معیار)	0.45	0.43	0.51	0.59	0.56	0.73	0.54	

SD= انحراف معیار، LMa= محدوده حداکثر شاخص عنصر، LMi= محدوده حداقل شاخص عنصر، SD IX= انحراف معیار از میانگین شاخص‌های عناصر غذایی ، LU= حد بالا شاخص عنصر، LL= حد پایین شاخص عنصر، CND- r^2= شاخص تعادل عناصر غذایی که از جمع مربع شاخص های عناصر از طریق رابطه ($r^2 = I^2_N + I^2_P + I^2_K +\ldots + I^2_{Rd}$) محاسبه شد. محدوده حد پایین – حد بالا به روش رگرسیون محاسبه شد.

SD=standard deviation; LMa= maximum limit; LMi= minimum limit; SD IX= standard deviation from the mean; LU = upper limit; LL= lower limit; CND- r^2. The CND nutrient imbalance index of a diagnosed specimen is its CND r^2 and is computed as follows: $r^2 = I^2_N + I^2_P + I^2_K +\ldots + I^2_{Rd}$. The upper and lower bounds were extracted using the regression method (Figure 1).

در هر دو روش فوق الذکر استانداردهای مرجع CND-clr یکسان است و تفاوت آنها در نحوه استفاده از غلظت‌های محدوده بسندگی و به تبع آن شاخص عناصر غذایی (IX: IN, IP, IK, IMn, IZn, Ife, ICu) است که در یکی محدوده حداقل–حداکثر و دیگری محدوده پایین–بالا شاخص عناصر غذایی در محاسبه و تحلیل و تفسیر نتایج استفاده شد (Rozane et al. 2020; Khiari et al. 2001). Rozane و همکاران (۲۰۲۰) حد بحرانی و محدوده بسندگی برای انگور را با استفاده از استانداردهای مرجع CND-clr و با منظور نمودن محدوده حداقل - حداکثر بجای محدوده پایین- بالا ارزیابی کردند. در مطالعه حاضر نیز، ابتدا استانداردهای مرجع CND-clr برای ۱۷۰ مزرعه با استفاده از روش شناسی گام به گام استخراج شده از روش تشخیص چند گانه عناصر غذایی CND-clr تعیین گردید (جدول ۳).

پارامترهای مرجع مانند محدوده حداقل - حداکثر و محدوده حد پایین – حد بالا برای شاخص‌های عناصر غذایی (IK, IN, IP, IMn, IZn, ICu, IFe) محاسبه شد (جدول ۳). از این پارامترها برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی بدین گونه استفاده گردید که اگر شاخص هر عنصری بین محدوده حداقل و حداکثر و یا بین محدوده حد پایین و حد بالا قرار گرفت، متعادل، اگر از مقدار حداکثر و یا حد بالا بیشتر بود، نامتعادل بیش‌بود و اگر از مقدار حداقل یا حد پایین کمتر بود، نامتعادل کمبود تفسیر شدند. در ادامه، وضعیت چهار مزرعه از گروه عملکرد کمتر از ۶۰ تن در هکتار انتخاب و با استفاده از دو محدوده شاخص عناصر غذایی شامل محدوده پایین - بالا و دیگری محدوده حداقل- حداکثر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. این چهار مزرعه از مزارع ۶۰ تن در هکتار به پایین با کاهش فاصله حدود ۱۰ تن به‌طور تصادفی از بانک اطلاعاتی انتخاب گردید. بررسی و تحلیل این ۴ مزرعه نشان داد که در هر چهار مزرعه تعداد نتایج متعادل در روش حداقل- حداکثر بیشتر از روش محدوده پایین – بالا بود که نشان می‌دهد روش محدوده پایین–بالا برای نشان دادن مزارع متعادل سخت گیرانه تر است (جدول ۴ و ۵ و۶ و ۷). در روش حداقل- حداکثر ۱۹ مرتبه متعادل در برابر ۷ مرتبه متعادل برای روش محدوده پایین – بالا مشاهده شد. همچنین، ۵ مرتبه نامتعادل بیش‌بود در روش حداقل- حداکثر در برابر ۱۳ مرتبه نامتعادل بیش-بود برای روش محدوده پایین – بالا و ۴ مرتبه نامتعادل کمبود در روش حداقل- حداکثر در برابر ۸ مرتبه نامتعادل کمبود برای روش محدوده پایین – بالا مشاهده شد (جدول ۴ مزرعه A و جدول ۵ مزرعه B و جدول ۶ مزرعه C و جدول ۷ مزرعه D).



شکل ۱- تعیین محدوده‌های حد بالا و حد پایین(LL-LU) شاخص عناصر غذایی با استفاده با روش رگرسیون برای عناصر پر مصرف (نیتروژن) و کم مصرف (روی)

Figure 1. Determining of upper and lower limit (LL-LU) ranges nutrient indices using regression for macro (N) and micro nutrients (Zn)

جدول ۴- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدلCND-clr از طریق ۲ روش محدوده‌های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین – حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۵۲/۶۱۱ تن در هکتار)- مزرعه A

Table 4. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 52.611 t h^{-1}) – field A

شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX)	IN	IP	IK	IMn	IZn	IFe	ICu
روش حد پایین- حد بالا LL-LU method	نا متعادل بیشبود Imb.-H	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb.D	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb.D	نا متعادل بیشبود Imb.-H	نا متعادل کمبود Imb.D
روش حداقل- حداکثر LMi-LMa method	متعادل B	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb.D	متعادل B	متعادل B	نا متعادل بیشبود Imb.-H	متعادل B
غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg^{-1}	39.8	2.5	25	0.116	0.026	0.410	0.014
مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX)	1.47	0.47	-2.51	0.72	-2.98	2.50	-1.68

B= balance; Imb. – H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU = upper limit; LL = lower limit

جدول ۵- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین – حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۴۹/۱۲ تن در هکتار)- مزرعه B

Table 5. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 49.12 t h^{-1}) – field B

شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX)	IN	IP	IK	IMn	IZn	IFe	ICu
روش حد پایین- حد بالا LL- LU method	نا متعادل بیشبود Imb.- H	نا متعادل بیشبود Imb.- H	متعادل B	نا متعادل بیشبود Imb.- H	نا متعادل کمبود Imb.- D	متعادل B	متعادل B
روش حداقل- حداکثر LMi-LMa method	متعادل B	متعادل B	متعادل B	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb. - D	متعادل B	متعادل B
غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg^{-1}	41.4	2.6	30	0.130	0.023	0.269	0.015
مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX)	1.86	1.03	-0.88	1.55	-3.98	0.02	-0.94

B= balance; Imb. – H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU= upper limit; LL = lower limit

جدول ۶ - ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۴۱/۹۲۰ تن در هکتار)- مزرعه C

Table 6. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 41.920 t h^{-1}) – field C

شاخص عناصر غذایی **Nutrient index (IX)**	IN	IP	IK	IMn	IZn	IFe	ICu
روش حد پایین- حد بالا **LL- LU method**	نا متعادل بیشبود Imb.- H	نا متعادل بیشبود Imb.- H	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb. D	متعادل B	نا متعادل بیشبود Imb.- H	نا متعادل کمبود Imb. D
روش حداقل- حداکثر **LMi-LMa method**	متعادل B	متعادل B	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb. D	متعادل B	متعادل B	متعادل B
غلظت عناصر غذایی **Concentration of nutrients g kg^{-1}**	39.6	2.9	32	0.072	0.039	0.390	0.015
مقدار شاخص عناصر غذایی **Nutrient Index value (IX)**	1.1	1.91	-0.79	-2.72	0.72	1.90	-1.7

B= balance; Imb. – H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU = upper limit; LL = lower limit

جدول ۷- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-clr از طریق ۲ روش محدوده های بسندگی حداقل- حداکثر و حد پایین - حد بالا شاخص عناصر غذایی (عملکرد ریشه ۳۸/۵۱۸ تن در هکتار)- مزرعه D

Table 7. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-clr model through 2 methods of LMi-LMa and LL-LU nutrient indices (root yield 38.518 t h^{-1}) – field D

شاخص عناصر غذایی Nutrient index (IX)	IN	IP	IK	IMn	IZn	IFe	ICu
روش حد پایین- حد بالا LL- LU method	نا متعادل بیشبود Imb. - H	نا متعادل بیشبود Imb. - H	نا متعادل کمبود Imb. D	نا متعادل بیشبود Imb. - H	نا متعادل کمبود Imb. D	بیشبود نا متعادل Imb. - H	بیشبود نا متعادل Imb. - H
روش حداقل- حداکثر LMi-LMa method	نا متعادل بیشبود Imb. - H	نا متعادل بیشبود Imb. - H	متعادل B	متعادل B	نا متعادل کمبود Imb. D	نا متعادل بیشبود Imb. - H	نا متعادل بیشبود Imb. - H
غلظت عناصر غذایی Concentration of nutrients g kg^{-1}	44.9	3.10	25.9	0.112	0.005	0.442	0.021
مقدار شاخص عناصر غذایی Nutrient Index value (IX)	3.50	4.93	-1.26	1.30	-19.40	3.65	2.12

B= balance; Imb. – H = imbalance high; Imb.D = imbalance deficiency; LMa = maximum limit; LMi = minimum limit; LU = upper limit; LL = lower limit

استخراج غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر غذایی از طریق شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr

غلظت‌های بحرانی و یا محدوده بسندگی عناصر غذایی برای گیاهان زراعی که از آزمایش‌های تک عاملی[1] مشتق شده‌اند، فاقد اثرات متقابل عناصر غذایی هستند. در حالیکه، اگر از آزمایش‌های چندعاملی نظیر CND استخراج شوند جامعیت بیشتری داشته و بیانگر اثرات متقابل عناصر غذایی خواهند بود Rozane et al., 2020; Khiari et al., 2001). Rozane و همکاران (2020) با استفاده ارتباط رگرسیونی بین دو پارامتر، شامل شاخص‌های عناصر غذایی (IX) که توسط روش تحلیل داده‌های ترکیبی (CDA) پشتیبانی شدند و دیگری غلظت مطلق عناصر غذایی (X)، توانستند غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر پر مصرف و کم مصرف را از داده‌های تعریف‌شده در محیط CND برای انگور استخراج کنند. در مطالعه حاضر نیز با استفاده از روابط رگرسیونی بین دو پارامتر مذکور، غلظت‌های بحرانی و محدوده بسندگی عناصر پر مصرف و کم‌مصرف استخراج شد (جدول ۸). غلظت‌های بحرانی برای همه عناصر با صفر قرار دادن معادلات رگرسیونی مذکور استخراج شد. همچنین مقادیر محدوده‌های بسندگی از حاصل جمع غلظت‌های بحرانی به اضافه و منهای دو سوم انحراف معیار (2/3SD) محاسبه گردید (Melo et al., 2018). این غلظت‌ها جامع و بیانگر اثرات متقابل عناصر غذایی برای چغندر قند می‌باشند. با استفاده از این غلظت‌ها می‌توان ارزیابی جامعی مبتنی بر لحاظ اثرات متقابل عناصر غذایی را برای مزارع مختلف چغندر قند انجام داد. همچنین رابطه همبستگی منفی بین عملکرد ریشه و مجموع مربعات شاخص‌های عناصر غذایی (r^2) در سطح ۹۹ درصد (**P≤0.01) معنی‌دار شد(جدول ۸). نتیجه اخیر دلالتی است بر اثبات این نظریه که هر چه میزان r^2 کمتر و به‌طرف صفر میل کند احتمالاً تعادل مناسب‌تری بین عناصر غذایی ایجاد شده و به تبع آن عملکرد افزایش خواهد یافت (Khiari et al., 2001).

[1] Univariate

جدول ۸ - مدل‌های آماری برای تعیین سطوح بحرانی و حدود بسندگی عناصر غذایی از طریق شاخص‌های عناصر غذایی CND-clr

Table 8. Statistical models for determining critical level and sufficiency range through CND-clr nutrient indices

عناصر Nutrients	معادلات همبستگی Statistical models	ضریب تبیین (R^2)	غلظت بحرانی Critical level(1)	محدوده بسندگی Sufficiency range(2)
N	IN=0.3060N-11.298**	0.84	36.8 g kg^{-1}	34-39 g kg^{-1}
P	IP=3.5545P-9.4582**	0.48	2.66 g kg^{-1}	2.54-2.76 g kg^{-1}
K	IK=0.172 K-6.4782**	0.89	37.6 g kg^{-1}	36-38 g kg^{-1}
Mn	IMn=55.34Mn- 6.3297 **	0.84	115 mg kg^{-1}	104-126 mg kg^{-1}
Zn	IZn=162.71Zn-6.2268**	0.92	38 mg kg^{-1}	34-42 mg kg^{-1}
Fe	IFe=15.593Fe-4.6941۴**	0.88	301 mg kg^{-1}	262-340 mg kg^{-1}
Cu	ICu= 296.96Cu-5.8118۵**	0.90	19 mg kg^{-1}	17-21mg kg^{-1}
Root yield	CND-r^2= 7.47-0.09110 yield**	(R^2=0.3125)	-	-

۱ و ۲= به ترتیب غلظت‌های بحرانی برای همه عناصر با صفر قرار دادن معادلات رگرسیونی و محدوده بسندگی هر عنصر با اضافه و منهای کردن ۲/۳ انحراف معیار به غلظت بحرانی تعیین گردید، ** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

(**) Significance at 1%

(1) Critical level (CL) values or appropriate concentrations drawn by assigning the null value to the indices of the equations applied to each nutrient

(2)The sufficiency range for each element was determined by adding or subtracting 2/3 standard deviations from the critical concentration.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش کلاسیک CND-ilr به منظور تشخیص دقیق‌تر اثرات سینرژیستی – آنتاگونیستی عناصرغذایی

همان‌گونه که در بخش مربوط به روشCND-ilr تشریح شد، این امکان وجود دارد که اثرات متقابل عناصر بر تغییرات رشد و عملکرد با طراحی هفت اثر متقابل عناصر پرمصرف و کم مصرف (به‌عبارت دیگر، هفت تعادل عناصر) و با بکارگیری نسبت لگاریتم ایزومتریک (ilr) مندرج در (جدول ۱) ، با دقت بیشتری ارزیابی شود. بر این اساس همان چهار مزرعه‌ای که با روش CND-clr ارزیابی شده بودند، مجدداً با روش CND-ilr و با در نظر گرفتن فاصله ماهالانوبیس مرجع برابر با ۴/۲ محاسبه و بررسی شد. بدین منظور، برای هر مزرعه اختلاف بین ilr محاسبه شده و مقدار استاندارد مرجع *ilr یعنی (*ilr-ilr) برای هر تعادل عناصر غذایی محاسبه شد. تعادل‌هایی که بیشترین عدد چه علامت مثبت و یا منفی را به خود اختصاص دهند بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی خواهند داشت. با تغییر مقدار عناصر مربوطه در تعادل (کاهش یا افزایش)، مقدار فاصله ماهالانوبیس متعادل شده برآورد گردید. کلیه محاسبات در (جدول ۹) ارائه شد و تحلیل نتایج در ادامه آورده شده است.

جدول ۹- ارزیابی و مقایسه وضعیت عناصر غذایی با کاربرد مدل CND-ilr با طراحی ۷ تعادل عناصر غذایی برای ۴ مزرعه عملکرد پایین

Table 9. Assessment and comparison of nutrient status using the CND-ilr model through 7 nutrient balance designs for 4 low-yield population fields (named A, B, C, D).

	عملکرد ریشه/ root yield	**[P | N] ilr_1-ilr_1***	**[NP | K] Ilr_2-ilr_2***	**[Fe | Mn] Ilr_3-ilr_3***	**[Zn | CU] Ilr_4-ilr_4***	**[Fe, Mn| Zn, Cu] Ilr_5-ilr_5***	**[N,P,K|Mn,Zn,Fe,Cu] Ilr_6-ilr_6***	**[F_V | N, P, K, Mn, Zn, Fe, Cu] Ilr_7-ilr_7***	**فاصله ماهالانوبیس Mahalanobis distance**	**فاصله ماهالانوبیس متعادل شده Balanced Mahalanobis distance**
مزرعه A Field-A	52.611	0.114	-0.373	-0.240	0.046	**-0.545**	0.034	-0.112	5.38	3.4
مزرعه B Field-B	49.128	0.11	-0.25	0.14	0.19	**-0.40**	-0.19	-0.11	4.74	2.6
مزرعهC Field-C	41.920	0.005	-0.23	**-0.54**	-0.22	-0.06	-0.16	0.063	4.62	3.8
مزرعهD Field-D	38.518	0.05	-0.48	-0.31	**-1.5**	-1.24	-0.55	-0.235	27.6	5.77

ilr= نسبت‌های لگاریتمی ایزومتریک – نمونه مزرعه، *ilr= نسبت‌های لگاریتمی ایزومتریک – استاندارد عناصر غذایی، Fv= سایر عناصر

ilr = isometric log ratios - farm sample; ilr* = isometric log ratios - nutrient standard; F_V = fill value

مزرعه A: تحلیل داده‌های مزرعه با عملکرد ۵۲/۶۱۱ تن در هکتار نشان داد شاخص‌های فاصله ماهالانوبیس محاسبه شده مزرعه A برابر با ۵/۳۸ شد که نسبت به مقدار فاصله ماهالانوبیس مرجع ۴/۲ بیشتر بود که بیانگر عدم تعادل عناصر غذایی بود؛ اما پرسش اصلی این بود که کدامیک از ۷ تعادل نقش بیشتری را در این نامتعادلی ایفا کرده است. بررسی نتایج مندرج در جدول ۹ نشان داد که تعادل [Fe,Mn| Zn,Cu] :ilr5، با اختصاص عدد ۰/۵۴۵- بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی ایجاد کرده بود. غلظت آهن و روی برگ در این مزرعه به‌ترتیب ۴۱۰ و ۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود و محدوده مطلوب غلظت این دو عنصر برای حداکثر عملکرد به ترتیب ۳۴۰ – ۲۶۲ و ۴۲- ۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۸). حال اگر برای آهن غلظت ۳۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم را جایگذاری کنیم یا به عبارت دیگر از جنبه عملی کود دهی آهن را کاهش دهیم (اگر کود دهی آهن انجام شده باشد) مقدار شاخص ماهالانوبیس از ۵/۳۸ به ۴/۳۵ کاهش می‌یابد که نزدیک حد بحرانی ۴/۲ است و متعاقب آن اگر عنصر روی را از ۲۶ به ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش دهیم (به عبارت دیگر کود دهی روی را افزایش دهیم) عدد شاخص ماهالانوبیس به ۳/۴ کاهش یافته و وضعیت عناصر این مزرعه در منطقه متعادل قرار خواهد گرفت و به تبع آن انتظار عملکرد بیشتری خواهیم داشت.

مزرعه B: در مزرعه با عملکرد ۴۹/۱۲۸ تن در هکتار مقدار شاخص فاصله ماهالانوبیس ۴/۷۴ محاسبه شد (جدول ۹) که از فاصله ماهالانوبیس مرجع (۴/۲) کمی بیشتر بود و بیانگر نامتعادلی عناصر غذایی در این مزرعه بود. در جدول ۹ با بررسی هفت تعادل مربوط به این مزرعه، تعادل ilr_3:[Fe,Mn| Zn,Cu] بیشترین فاصله بین نمونه این مزرعه با نمونه مرجع نشان داد که مقدار آن برابر با ۰/۴- بود. در این مزرعه مقدار عنصر روی ۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که از مقدار بهینه روی (۴۲-۳۴ میلی‌گرم به کیلوگرم، جدول ۸) فاصله دارد. حال اگر در معادله محاسبه فاصله ماهالانوبیس مقدار عنصر روی را از ۲۳ به ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش و جایگزین کنیم (به عبارتی دیگر کود دهی روی را افزایش دهیم)، مقدار فاصله ماهالانوبیس از ۴/۷۴ به ۲/۶ کاهش یافت و تعادل عناصر برقرار شد و انتظار افزایش عملکرد بیشتری خواهیم داشت. این یک ویژگی منحصر به فردی است که با استفاده از رویکرد نسبت لگاریتم ایزومتریک (ilr) با تغییر فقط یک عنصر می‌توان به یک تعادل بسیار مناسبی دست یافت(Parent, 2011).

مزرعه C: تحلیل داده‌های مزرعه با عملکرد ۴۱/۹۲۰ تن در هکتار نشان داد که شاخص فاصله ماهالانوبیس ۴/۶۲ (جدول ۹) بیشتر از مقدار مرجع (۴/۲) بود که بیانگر نامتعادلی عناصر غذایی است؛ اما کدامیک از ۷ تعادل نقش بیشتری در این نامتعادلی را ایفا کرده است. نتایج جدول ۹ نشان داد که تعادل ilr_3: Fe:Mn با اختصاص عدد ۰/۵۴- بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی ایفا کرده است. غلظت آهن و منگنز برگ به ترتیب ۲۹۰ و ۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود در حالیکه مقدار مطلوب غلظت این دو عنصر برای حداکثر عملکرد به ترتیب ۳۴۰ – ۲۶۲ و ۱۲۶-۱۰۴ میلی‌گرم در کیلوگرم است (جدول ۸). حال اگر غلظت ۱۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم منگنز را جایگذاری کنیم یا به عبارت دیگر از جنبه عملی کود دهی منگنز را افزایش دهیم، مقدار فاصله ماهالانوبیس ۴/۶۲ به ۳/۸ کاهش یافته و بهبود تعادل عناصر غذایی و در نتیجه افزایش احتمالی عملکرد قابل انتظار خواهد بود.

مزرعه D: تحلیل داده‌های مزرعه D با عملکرد ۳۸/۵۱۸ تن در هکتار(جدول ۹) نشان داد که شاخص‌های فاصله ماهالانوبیس این مزرعه برابر ۲۷/۶ بود که بیانگر نامتعادلی زیادی است. بررسی دقیق‌تر نشان داد که غلظت عنصر روی تنها ۵ میلی-گرم در کیلوگرم است و پیش‌بینی شد علت این نامتعادلی شدید مربوط به کمبود شدید عنصر روی باشد. نتایج جدول ۹ نشان داد که تعادل ilr_4: Zn:Cu با اختصاص عدد ۱/۵- بیشترین نقش را در نامتعادلی عناصر غذایی ایفا کرده است با جایگزینی غلظت روی به مقدار ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در معادله (به عبارتی، افزایش قابل‌توجه کود دهی عنصر روی)، فاصله ماهالانوبیس به ۴/۷۷ کاهش یافت و یک تعادل عنصری مناسب به دست آمد. این یافته‌ها نشان داد که تنش شدید روی Zn باعث نامتعادلی عناصر و کاهش شدید رشد و عملکرد این مزرعه شده است.

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش PCA برای داده‌های مطالعه حاضر، از دو جنبه مورد بررسی قرار گرفت. در جنبه نخست، کل جامعه مورد مطالعه شامل عملکرد بالا و پایین (۱۷۰ مزرعه) بررسی شد. در این مرحله، هدف مقایسه نتایج ارزیابی عناصر غذایی در دو حالت بود: (۱) استفاده از مقادیر غلظت مطلق عناصر غذایی (X) و (۲) به‌کارگیری شاخص‌های عناصر غذایی (IX) استخراج شده از روش CND-clr (جدول ۱۰). در جنبه دوم، ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با روش PCA برای گروه عملکرد پایین (گروه با عملکرد کمتر از ۶۰ تن در هکتار) انجام شد. هدف از بررسی اخیر،

شناخت عناصر غذایی مؤثر در کاهش یا افزایش عملکرد ریشه در این گروه بود (جدول ۱۳).

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی کل ۱۷۰ مزرعه مرتبط با عملکرد ریشه چغندر قند به روش PCA با لحاظ غلظت مطلق عناصر غذایی (X) و شاخص عناصر غذایی (IX): CND-clr

کل داده‌های مربوط به ۱۷۰ مزرعه با استفاده از روش PCA برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف، با لحاظ نمودن غلظت مطلق عناصر غذایی به‌عنوان متغیر (X) نسبت به عملکرد ریشه، انجام شد. این نتایج نشان داد که در مجموع حدود ۸۵ درصد واریانس تغییرات داده‌ها (Eigenvalues>1) توسط چهار مؤلفه اصلی تبیین شد (جدول ۱۰ و شکل ۲). تفسیر نتایج جدول ۱۰ و شکل ۲ نشان داد که در مؤلفه اصلی اول (PC1)، عناصر پتاسیم و روی و مس به ترتیب بیشترین همبستگی مثبت و عنصر نیتروژن بیشترین همبستگی منفی را با عملکرد ریشه به خود اختصاص دادند. تأثیر مثبت پتاسیم و تأثیر منفی نیتروژن و همچنین عدم تعادل این دو عنصر بر عملکرد ریشه چغندر قند در منطقه شمال خوزستان قبلاً نیز گزارش شده است (Daryashenas et a,l. 2020). در مؤلفه اصلی دوم (PC2)، فسفر بیشترین همبستگی مثبت و منگنز بیشترین همبستگی منفی را با عملکرد ریشه نشان داد. در مؤلفه اصلی سوم (PC3)، آهن بیشترین همبستگی منفی و در مؤلفه اصلی چهارم (PC4)، منگنز بیشترین همبستگی مثبت را با عملکرد ریشه داشت. این همبستگی‌ها همچنین با در نظر گرفتن شاخص عناصر غذایی (IX) به‌عنوان متغیر در جدول ۱۰ و شکل ۲ ارائه‌شده‌اند؛ اما تحلیل و تفسیر وضعیت عناصر غذایی بر اساس شاخص عناصر غذایی (IX) دارای یک تناقض اساسی بین عملکرد و وضعیت عناصر غذایی را نشان داد؛ زیرا بر اساس تئوری حاکم بر روش CND-clr، بیشترین همبستگی مثبت بین عملکرد ریشه و وضعیت تغذیه عناصر زمانی حاصل می‌شود که شاخص‌های عناصر غذایی به سمت صفر میل کنند (r^2=0)، درحالی‌که روش PCA همبستگی بین عملکرد و متغیر بیان کننده وضعیت عناصر غذایی را به‌صورت مثبت یا منفی محاسبه می‌کند.

در این ارتباط Khiari و همکاران (۲۰۰۱) برای ذرت و Daryashenas و Saghafi (۲۰۱۱) برای چغندر قند نشان دادند که همبستگی بین عملکرد با شاخص عنصر غذایی نیتروژن (IN) از یک معادله درجه چهار پیروی می‌کند، به‌طوری که بیشترین عملکرد در مناطقی که IN به‌طرف صفر میل می‌کند حاصل می‌شود. در مطالعه حاضر نیز، برازش داده‌های عملکرد ریشه در مقابل شاخص نیتروژن (IN) در شکل (۳)، این موضوع را تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که عملکردهای بالا در نقطه متمایل به صفر تجمع یافته‌اند. همچنین، مقایسه نتایج ارزیابی وضعیت عناصر غذایی با شاخص عناصر غذایی (IX) در جدول (۱۰)، با نتایج همبستگی‌های پیرسون ارائه شده در جدول (۱۱)، روندی متضاد را نشان می‌دهد؛ بنابراین استفاده از شاخص عناصر غذایی (IX) به‌عنوان متغیر در روش PCA موجب تفسیر غلط می‌شود. به‌عبارت دیگر، تفسیر همبستگی‌ها در مدل PCA با استفاده از شاخص عناصر غذایی (IX) موجب اریبی شد که باعث استنتاج غلط می‌شود. یک تابع اریب بدین معنی است که مقدار واقعی تغییرات با مقادیر محاسبه شده (امید ریاضی) منطبق نباشد. با انتخاب مدل‌های اختصاصی ad hoc، می‌توان فرم‌های بیانی از عناصر غذایی را انتخاب کرد که با واقعیت اثرات متقابل عناصر منطبق بوده و توسط دانش تغذیه گیاه و محققین عرصه کشاورزی و اکولوژی طی تجربه‌های چندین ساله تأیید شده مورد توجه و ملاک قرار گرفته است (Parent, 2011; Pawlosky-Glahn; Egozcue, 2008). ولی با اختصاص غلظت مطلق عناصر غذایی به‌عنوان متغیر (X) تفسیر نا اریب (Unbias) می‌شود؛ بطوریکه وضعیت عناصر غذایی با غلظت مطلق عناصر غذایی به‌عنوان متغیر (X) (جدول ۱۰) با نتایج همبستگی‌های پیرسون در جدول (۱۲) روند مشابه نشان داد؛ بنابراین، در روش PCA استفاده از شاخص غلظت مطلق عناصر غذایی به‌عنوان متغیر (X) نسبت به عملکرد، تصویر روشن‌تری را در مقایسه با کاربرد شاخص عناصر غذایی (IX) نسبت به عملکرد نشان داد.

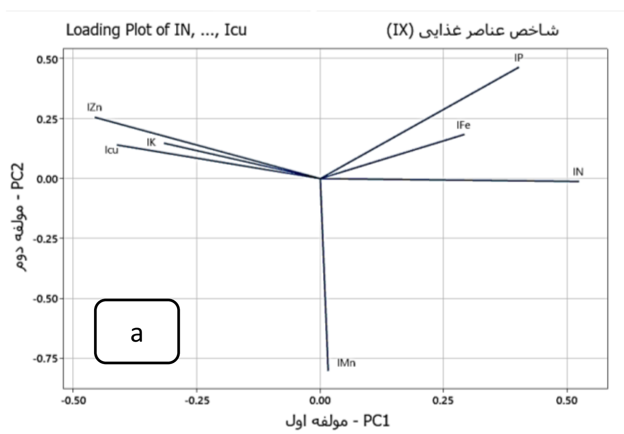
جدول ۱۰- ارزیابی وضعیت عناصر غذایی کل ۱۷۰ مزرعه به روش PCA با در نظر گرفتن شاخص عناصر غذایی (IX) : CND-clr و غلظت مطلق عناصر غذایی(X) نسبت به عملکرد ریشه

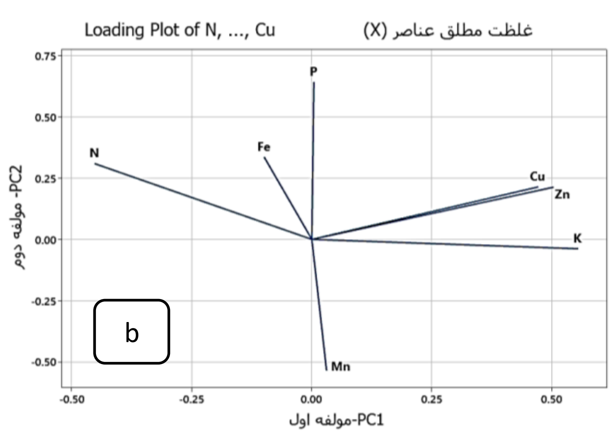
Table 7. Evaluation of the nutrient status of all 170 fields using the PCA method, considering nutrient index (IX) and absolute nutrient concentration (X) in relation to root yield.

متغیر(IX)	PC1	PC2	PC3	PC4	متغیر(X)	PC1	PC2	PC3	PC4
IN	**0.524***	-0.012	0.304	-0.299	N	**-0.453**	0.309	0.234	0.487
IP	**0.402**	**0.464**	0.341	-0.135	P	0.004	**0.642**	0.124	0.022
IK	**-0.317**	0.148	**0.527**	**0.606**	K	**0.555**	-0.038	0.004	-0.291
IMn	**0.016**	**-0.802**	0.091	-0.015	Mn	0.031	**-0.535**	-0.280	**0.598**
IZn	**-0.457**	0.256	-0.059	-0.089	Zn	**0.504**	0.213	0.036	0.229
IFe	0.292	0.184	**-0.700**	0.366	Fe	-0.099	0.336	**-0.922**	-0.044
ICu	**-0.412**	0.140	-0.113	**-0.619**	Cu	**0.472**	0.214	0.005	0.516
Eigenvalues مقادیر ویژه	2.5933	1.4919	1.2292	0.8085	Eigenvalues مقادیر ویژه	2.4313	1.8413	0.8932	0.7863
Explained variance(%) توزیع واریانس	0.370	0.213	0.176	0.116	Explained variance (%) توزیع واریانس	0.347	0.263	0.128	0.112
Accumulated variance (%) تجمع واریانس	0.370	0.584	0.759	0.875	Accumulated variance (%) تجمع واریانس	0.347	0.610	0.738	0.850
Selection criterion(SC) معیار انتخاب	0.31	0.409	0.45	0.556	Selection criterion(SC) معیار انتخاب	0.32	0.368	0.529	0.563

* مقادیری که با رنگ تیره مشخص شده اند نشاندهنده ارتباط معنی‌دار بین شاخص عناصر غذایی (IX) و غلظت مطلق عناصر (X) با عملکرد ریشه هستند که بوسیله رابطه (SC=0.5/√Eigenvalues) محاسبه شد. IN تا ICu شاخص عناصر غذایی هستند.

*Values in boldface are dominant in the PC loadings by setting the level of significance defined according to the selection criterion(SC=0.5/√Eigenvalues). According to the SC, the boldface coefficients in the table are considered dominant in the PC loadings. This means that the traits associated with these coefficients are significantly related to the respective principal components. IN until ICu are nutrient indices





شکل ۲- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌منظور تشخیص میزان اثر گذاری عناصر بر عملکرد ریشه ۱۷۰ در مزرعه چغندر قند (a): غلظت مطلق عناصر غذایی (X) ، اولین مؤلفه (PC1) و دومین مؤلفه (PC2) به ترتیب با اختصاص ۳۴/۷ و ۲۶/۳ درصد واریانس‌ها و (b) شاخص عناصر غذایی (IX) ،اولین مؤلفه (PC1) و دومین مؤلفه (PC2) به ترتیب با اختصاص ۳۷ و ۲۱/۳ درصد واریانس‌ها

Figure 2. Principal component analysis (PCA) to determine the effect of nutrients on root yield -170 sugar beet fields (a): Absolute nutrient concentration (X), the first component (PC1) and the second component (PC2), respectively, 34.7 and 26.3 percent of the variances (b): Nutrients index (Ix), the first component (PC1) and the second component (PC2), respectively, 37 and 21.3 percent of the variances.

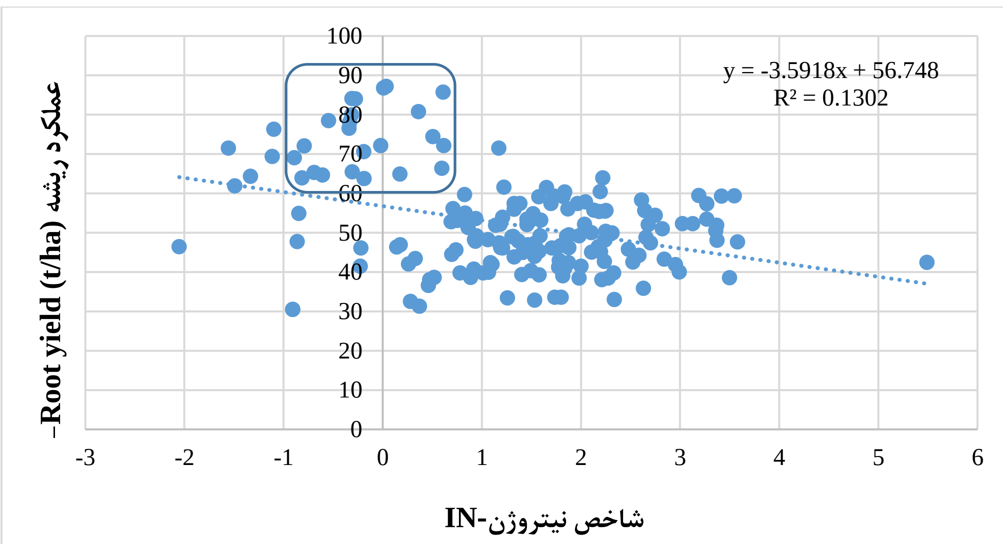
جدول ۱۱- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شاخص های عناصر غذایی (IX) نسبت به هم و نسبت به عملکرد ریشه چغندر قند(۱۷۰ مزرعه)

Table 8. Pearson correlation coefficient (r) between nutrient indices (IX) relative to each other and relative to sugar beet root yield (170 fields)

IX	Root yield عملکرد ریشه	IN	IP	IK	IMn	IZn	IFe
IN	-0.361**						
IP	-0.305**	0.600**					
IK	0.339**	-0.383**	-0.092				
IMn	0.028	0.026	-0.446**	-0.155*			
IZn	0.294**	-0.564**	-0.330**	0.203**	-0.320**		
IFe	-0.426**	0.035	0.099	-0.438**	-0.294**	-0.328**	
ICu	0.486**	-0.496**	-0.304**	0.108	-0.199**	0.328**	-0.299**

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، IN تا ICu شاخص عناصر غذایی هستند

* Significance at 5%; ** Significance at 1%; IN until ICu are nutrient indice



شکل ۳- برازش عملکرد ریشه در مقابل شاخص غذایی نیتروژن (IN)

Figure 3. Root yield versus nitrogen nutrient index (IN)

تفسیر همبستگی‌های عناصر غذایی به روش پیرسون در مقایسه با روش PCA

همبستگی عناصر غذایی با عمکرد ریشه چغندر قند برای ۱۷۰ مزرعه به روش همبستگی پیرسون در (جدول ۱۲) انجام شد. مقایسه داده‌های این جدول با نتایج مندرج در جدول ۱۰ (شاخص غلظت مطلق عناصر غذایی (X) در ستون مؤلفه اول PC1)، نشان داد در هر دو روش الگویی تقریباً مشابه دارند. بطوریکه در هر دو روش، عنصر پتاسیم بیشترین همبستگی مثبت معنی‌دار را با عملکرد نشان داد (**0.456 و 0.555) و نیتروژن در هر دو روش همبستگی منفی معنی‌دار را با عملکرد ریشه نشان دادند (**0.317- و -0.453). همچنین عناصر روی و مس در هر دو روش همبستگی مثبتی با عملکرد نشان دادند. در روش پیرسون، همبستگی فسفر با عملکرد در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار شد، در حالی‌که فسفر در مؤلفه اصلی اول (PC1) معنی‌دار نشد ولی در مؤلفه اصلی دوم (PC2) معنی‌دار شد. آهن در روش پیرسون دارای همبستگی منفی معنی‌دار با عملکرد بود و در PCA نیز در مؤلفه اصلی سوم همبستگی منفی

معنی‌دار نشان داد؛ به عبارتی در هر دو معنی‌دار شدند. تحلیل مجموعه این مقایسه‌ها نشان داد که می‌توان با اطمینان بیشتری نتیجه گرفت پتاسیم مهم‌ترین عنصر مؤثر در افزایش عملکرد ریشه چغندر است، در حالیکه نیتروژن نقش کاهشی داشته است؛ به عبارت دیگر، کاهش نیتروژن و افزایش پتاسیم می‌تواند به ایجاد تعادل عنصری مطلوب‌تر و در نتیجه افزایش عملکرد منجر شود. این نتیجه با یافته‌های حاصل از روش تعادل ترازویی (Pan balance) برای همین ۱۷۰ مزرعه چغندرقند مطابقت دارد (Daryashenas et al. 2020).

جدول ۱۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین عناصر غذایی برگ نسبت به هم و نسبت به عملکرد ریشه چغندر قند (۱۷۰ مزرعه)

Table 12. Pearson correlation coefficient (r) between leaf nutrients relative to each other and relative to root yield of sugar beet (170 fields)

	عملکرد ریشه Root yield	N	P	K	Mn	Zn	Fe
N	-0.317**						
P	-0.154*	0.341**					
K	0.456**	-0.654**	0.026				
Mn	0.055	-0.179	-0.497**	-0.104			
Zn	0.291**	-0.327 **	0.184	-0.149**	-0.104		
Fe	-0.337**	0.111	0.260**	-0.014	-0.149*	-0.017	
Cu	0.491**	-0.223**	0.200**	-0.104**	-0.014	0.614**	0.001

* = معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **= معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

* Significance at 5% ** Significance at 1%

ارزیابی وضعیت عناصر غذایی گروه عملکرد پایین به روش PCA با لحاظ روش غلظت مطلق عناصر غذایی (X) نسبت به عملکرد ریشه

گروه مزارع با عملکرد پایین با استفاده از روش PCA برای تعیین وضعیت عناصر غذایی پر مصرف و کم مصرف با لحاظ غلظت مطلق عناصر غذایی به‌عنوان متغیر X نسبت به عملکرد ریشه ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که در مجموع، حدود ۶۸/۴ درصد از واریانس تغییرات داده‌ها (Eigenvalues>1) با اختصاص ۳ مؤلفه تبیین گردید (جدول ۱۳ و شکل ۴). تفسیر نتایج (جدول ۱۳) و (شکل ۴) نشان داد که در مؤلفه اصلی اول (PC1)، عناصر فسفر و مس و روی به ترتیب بیشترین همبستگی مثبت و عنصر منگنز بیشترین همبستگی منفی را با عملکرد ریشه به خود اختصاص دادند. در مؤلفه اصلی دوم (PC2)، عنصر نیتروژن بیشترین همبستگی منفی و پتاسیم بیشترین همبستگی مثبت را با عملکرد ریشه نشان داد. در مؤلفه اصلی سوم (PC3) نیز، منگنز بیشترین همبستگی منفی با عملکرد ریشه را نشان داد.

جدول ۱۳- ارزیابی وضعیت عناصر غذایی گروه عملکرد پایین به روش PCA با لحاظ غلظت مطلق عناصر غذایی (X)

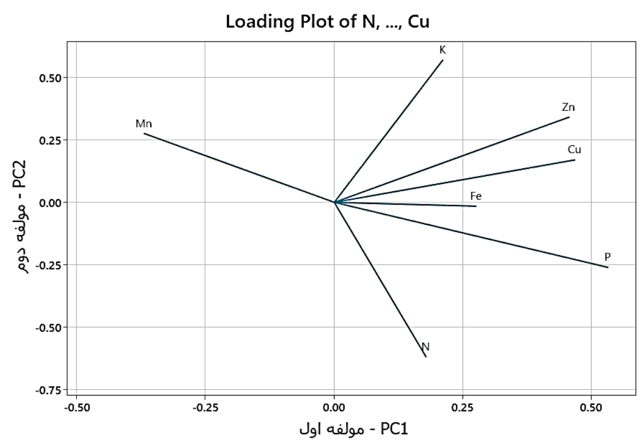
Table 13. Assessment of nutrient status of low-yield population fields using PCA method considering absolute nutrient concentration (X)

متغیر (X)	PC1	PC2	PC3
N	0.179	**-0.620**	-0.340
P	**0.532***	-0.261	0.207
K	0.211	**0.571**	0.333
Mn	**-0.370**	0.276	**-0.589**
Zn	**0.457**	0.341	-0.260
Fe	0.276	0.341	0.134
Cu	**0.468**	0.170	-0.547
Eigenvalues[1]	2.1364	1.6229	1.0304
Explained variance(%)[2]	0.305	0.232	0.147
Accumulated variance(%)[3]	0.305	0.537	0.684
Selection criterion(SC)[4]	0.342	0.392	0.492

1: مقادیر ویژه،2: توزیع واریانس، 3: تجمع واریانس،4: معیار انتخاب * مقادیری که با رنگ تیره مشخص شده اند نشاندهنده سطح معنی‌دار بین غلظت مطلق عناصر غذایی (X) و عملکرد ریشه هستند که بوسیله رابطه (SC=0.5/√Eigenvalues)محاسبه شد.

*Values in boldface are dominant in the PC loadings by setting the level of significance defined.

according to the selection criterion(SC=0.5/√Eigenvalues). According to the SC, the boldface coefficients in the table are considered dominant in the PC loadings. This means that the traits associated with these coefficients are significantly related to the respective principal components.



شکل ۴- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌منظور تشخیص میزان اثر گذاری عناصر بر عملکرد ریشه ۱۳۶ مزرعه چغندر قند (گروه عملکرد پایین) با در نظر گرفتن غلظت‌های مطلق عناصر (X)، اولین مؤلفه (PC1) و دومین مؤلفه (PC2) به ترتیب با اختصاص ۵ /۳۰ و ۲۳/۲ درصد واریانس‌ها

Figure 4. Principal component analysis (PCA) to determine the effect of nutrients on root yield of 136 sugar beet fields (low yield population) considering "absolute nutrient concentration" (X), first component (PC1) and second component (PC2) with 30.5 and 23.2 percent of variances, respectively.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مزایا و معایب سه روش PCA، CND-clr و CND-ilr برای تفسیر و تشخیص وضعیت عناصر غذایی در مزارع چغندر قند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش PCA قادر به اولویت‌بندی همبستگی بین عناصر غذایی و عملکرد در مقیاس کلان بود، با این وجود، فاقد نرم‌های استاندارد برای ارزیابی در مقیاس خرد (کرت، مزرعه و باغ) است. در حالیکه دو روش CND-clr و CND-ilr با داشتن ارقام و استانداردهای مرجع امکان ارزیابی وضعیت عناصر غذایی در هر دو مقیاس خرد و کلان را دارا می‌باشند. غلظت بحرانی و محدوده بسندگی برای عناصر N، P، K، Fe، Mn، Zn، Cu به‌عنوان استانداردهای مرجع بیانگر اثرات متقابل تعیین گردید. با استفاده از استانداردهای مرجع CND-clr تعدادی از مزارع با دو رویکرد حد پایین- حد بالا (LL- LU) و حداقل- حداکثر (LMi-LMa)، مقایسه و اعتبار سنجی شدند. نتایج نشان داد رویکرد حد پایین- حد بالا سخت‌گیرانه‌تر بود. همچنین با استفاده از روش CND-ilr تشخیص دقیق‌تر اثرات سینرژیستی – آنتاگونیستی

عناصر غذایی نشان داده شد. تحلیل مجموعه این مقایسه‌ها نشان داد که می‌توان با اطمینان بیشتری نتیجه گرفت که پتاسیم مهم‌ترین عنصر مؤثر در افزایش عملکرد ریشه چغندر قند است، در حالیکه نیتروژن نقش کاهشی داشت؛ به عبارت دیگر، کاهش نیتروژن و افزایش پتاسیم می‌تواند به ایجاد تعادل عنصری مطلوب‌تر و در نتیجه افزایش عملکرد منجر شود.

References

1. Aitchison J. and M. Greenacre. 2002. “Biplots of Compositional Data,” *Journal of the Royal Statistical Society Series C Applied*, Vol. 51, No. 4, pp. 375-392. DOI: 10.1111/1467-9876.00275
2. Aitchison, J. 1986. *Statistical analysis of compositional data*. Chapman and Hall, New York
3. Basirat M., Akhyani A., Daryashenas A.M (2016). Estimation of nutrient reference for Shahroudi grape variety using Compositional Nutrient Diagnosis (CND) method, *Journal of soil research*, 30 (1), (in Persian) doi:10.22092/IJSR.2016.106306
4. Baxter I. R., Vitek O., Lahner B., Muthukumar B., Borghi M., Morrissey J., et al. 2008. *The leaf ionome as a multivariable system to detect a plant’s physiological status*. Proc Natl Acad Sci U S A. 105(33):12081-6.
5. Bergmann, W. 1988. *Ernährungs-störungen bei Kulturpflanzen*. 2. Auflage. Gustav Fischer.
6. Chapman, H. D., and P. F. Pratt. 1978. *Method of Analysis for Soil and Water*. 2nd Ed., Chapter 17, p. 150-161. Uni. Calif.
7. Cheraghi, M., Motesharezadeh, B. and Alikhani, H.A., 2020. Nutritional and morpho-physiological responses of tomato plant (Lycopersicon esculentum Mill) affected by biological and chemical fertilizers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*(10), pp.2559-2574.
8. Daryashenas A.M., and Saghafi K, (2011). Compositional Nutrient Diagnosis(CND) in sugar beet”, *Journal of soil research*, 25 (1), (in Persian) doi: 10.22092/IJSR.2011.126454
9. Daryashenas A.M., Basirat M., Paknejad A. R. and Daryashenas S. (2017). Compositional Data Analysis Method for Diagnosing Micronutrients Status of Fall Sugar Beet with the approach of “Nutrients Balance”, *Journal of soil research*, 31 (4), pp 497- 509. (in Persian) doi:10.22092/ijsr.2018.115840
10. Daryashenas A.M., Saghafi K, and Davoodi M. H. (2020). Diagnosis of Macro and Micro Nutrients Balance in Sugar Beet Using Mahalanobis Distance, Aitchison Distance, and Pan Balance, *Journal of soil research*, 34 (2), (in Persian) doi:10.22092/ijsr.2020.122634
11. Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., and Barceló-Vidal, C. 2003. Isometric log ratio transformations for compositional data analysis 1. *Math. Geol*. 35, 279–300.
12. Emami, A. 1996. Plant Analysis Methods. Soil and Water Research Institute. Technical Publication No. 982, Tehran, Iran. (in Persian).
13. Ghaderi, J. Akhiani, A. Khalkhal, Kamal. 2025. Nutritional status analysis of sugar beet in Shahroud county using the Compositional Nutrient Diagnosis (CND) method. *Journal of Soil Research/Volume 38*/Number 4.https://doi.org/10.22092/ijsr.2025.368423.768
14. Greenacre, M., Patrick J. F. Groenen, Trevor Hastie, Alfonso Iodice d’Enza, Angelos Markos, and Elena Tuzhilina (2023). *Principal Component Analysis* https://www.researchgate.net/publication/366501387_Principal_component_analysis#fullTextFileContent
15. Helrich, K. 1990. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Association of official analytical chemists.
16. Hemke, P. H. Spark, D. L. Dl, et al. 1996. Potassium. 551–74. Sparks *Method of soil analysis*. Published by: Madison, WI: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc.
17. Isaac, R. A., and J. D. Kerber. 1971. Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. In: Walsh, L.M., (Ed.), *Instrumental Methods for Analysis of Soil and Plant Tissues*, 17-37. Madison: SSSA
18. Jackson, J. (2016). *Learn Excel Basics with Quick Examples* (excel 2016, excel 2013, excel vba, Excel 2016, Excel Charts, Excel project, MS Excel, MS Excel book, spreadsheet excel) Vol. Volume 1 (North Charleston, SC, United States: CreateSpace Independent Publishing Platform), pp 128.
19. Khademi, Z., Mohajermilani, P., Balali, M.R., Dorodi, M.S., Shahbazi, K. and Malakouti,

M.J., 2001. A comprehensive computer model for fertilizer recommendation towards sustainable agriculture. *Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran.(In Persian, abstract in English)*.

20. Khiari, L., L.E. Parent, and N. Tremblay. 2001. Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agron. J*. 93:809–814. doi: 10.2134/agronj2001.934809x
21. Malavolta, E. *Manual de nutrição de plantas*. 2006. Pav. Chimica, ESALQ and Ed. Agron. CERES, São Paulo, Brazil, 631 p.
22. Marschner, P. 2011. *Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd Edn*. London: Academic Press.
23. Melo G.W., Rozane, D.E., and Brunetto G. (2018) Identification of the critical levels, sufficiency ranges and potential response to nutrient fertilization in vineyards by the DRIS method. Acta Hortic. 1217. ISHS 2018. Proc. VIII International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops Eds.: T. Mimmo, Y. Pii and F. Scandellari. DOI 10.17660/ActaHortic.2018.1217.55
24. Modesto Viviane Cristina, Serge-Étienne Parent, William Natale, and Léon Etienne Parent. 2014. Foliar Nutrient Balance Standards for Maize (Zea mays L.) at High-Yield Level. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5, 497-507.
25. Parent Serge-Étienne, Philip Barlow and Léon E. Parent1. 2012_b. Balance-based Nutrient Diagnosis of New Zealand kiwifruit orchards. Available at:://www.biosoil.co.nz/vdb/document/6.
26. Parent, L .E .2011. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. *Rev. Bras. Frutic.* vol.33 no.1 Jaboticabal Mar. 2011. [Online]. Available at: http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452011000100041.
27. Pawlosky-Glahn, V.; Egozcue, J.J. 2008. Compositional data and Simpson's paradox. Codawork. In: Com positional analysis workshop, 3. 2008. Girona, Disponível. [Online]. Available at: <http: //dugi-doc. udg.edu/bitstream/10256/718/1/.
28. Rezaei, A. 1997. *Concepts of Statistics and Probability*, Mashhad Publication. (in Persian)
29. Ross, S.M. 1987. *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, New York.
30. Rozane, D.E., Paula, B.V., Melo, G.W.B.; Santos, E.M.H.; Trentin, E.; Marchezan, C.; Silva, L.O.S.; Tassinari, A.; Dotto, L.; and Oliveira, F.N. 2020. Compositional nutrient diagnosis (CND) applied to grapevines grown in subtropical climate region. *Horticulturae* 2020, 6, 56. https://doi.org/10.3390/horticulturae6030056
31. Tadayon, M.S., Saghafi, K., and Sadeghi, S. Applying the compositional nutrient diagnosis (CND) to pomegranate (Punica granatum cv. 'Rabab') under saline and calcareous soil condition. *J. Plant Nutr*. 2023, 46, 1–16. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2067762
32. Wild, D. J. (2005). MINITAB release 14. doi: 10.1021/ci040130h
33. Zolfi Bavariani M., Ghaffarinejad, S. A. and M. Nowroozi, M. (2022). Evaluation of Nutritional Status and Priority of Nutrients Requirement of Tomato by Compositional Nutrient Diagnosis Method in Bushehr Province. *Journal of soil research, 36 (1)*, (in Persian). doi:10.22092/ijsr.2022.126889