



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تشخیص چندمتغیره عناصر غذایی در بوم‌سامانه‌های آهکی: ادغام چارچوب‌های CND و DOP برای بهینه‌سازی عملکرد لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) در شرایط نیمه‌خشک

سیدماشاله حسینی^{۱*}، محمد سعید تدین^۲

- ۱- عضو هیئت علمی بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (AREEO)، شیراز، ایران* پست الکترونیکی mhoseini20@yahoo.ca
- ۲- عضو هیئت علمی بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (AREEO)، شیراز، ایران

چکیده

خاک‌های آهکی در مناطق نیمه‌خشک با ایجاد تثبیت و پادگنی عناصر غذایی، بهره‌وری لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) را محدود کرده و این وضعیت با خشکی تشدید می‌شود. این مطالعه با هدف تدوین هنجارهای تغذیه‌ای بومی و تشخیص برهم‌کنش‌های محدودکننده عملکرد لوبیا در بوم‌سامانه‌های آهکی استان فارس طی سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ در ۱۰۱ مزرعه لوبیای چیتی انجام شد. چارچوب‌های «تشخیص ترکیبی تغذیه‌ای» (CND) و «انحراف از درصد بهینه» (DOP) تلفیق گردید. نمونه‌برداری خاک و برگ برای تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و وضعیت عناصر غذایی صورت گرفت و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد و عدم تعادل‌های استوکیومتری انجام شد. خاک‌های آهکی (pH=7.85، ۳۴/۸٪ CaCO_3) سبب کمبود شدید فسفر (۹۱٪ مزارع)، روی (۶۰٪)، آهن (۵۱٪) و بور (۳۸٪) شدند که ناشی از رسوب‌گذاری کلسیم-فسفر و رقابت ردوکس Fe-Mn-Cu بود. مزارع با شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) بالاتر از ۲۰۰، عملکردی ۳۴٪ کمتر (۲۲۸۰ در مقابل ۳۴۶۰ کیلوگرم در هکتار) داشتند. روش CND نسبت به DOP، ۲۳٪ واریانس بیشتری را توضیح داد و برهم‌کنش‌های پنهان مانند کمبود Mn و پادگنی Fe-Cu را آشکار ساخت. نتایج PCA نشان داد که در عملکرد پایین، عناصر ماکرو (Ca, K, Mg) و بور اثرگذارند (PC1: 43.1٪ واریانس)، در حالی که دینامیک ردوکس ریزمغذی‌ها و کمبود نهفته Mn عملکرد بالا را تنظیم می‌کند. آستانه‌های بحرانی برگ برای مزارع پربازده عبارتند از: نیتروژن (۳/۵۲٪)، فسفر (۰/۲۹٪)، پتاسیم (۲/۸٪)، کلسیم (۱/۵۳٪)، منیزیم (۰/۵۹٪)، روی (۲۴/۲۱)، آهن (۱۸۱/۷۵)، مس (۹/۷۵)، منگنز (۸۹/۵)، بور (۵۵/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم). کمبود فسفر-روی و عدم تعادل عناصر غذایی، مهم‌ترین محدودیت عملکرد لوبیا در خاک‌های آهکی شناخته شد. این پژوهش چارچوب CND را به‌عنوان ابزاری نوین برای مدیریت تغذیه دقیق توصیه می‌کند که با ارائه آستانه‌های منطقه‌ای، استراتژی‌های کوددهی را بهینه ساخته و شکاف عملکرد را در بوم‌سامانه‌های نیمه‌خشک کاهش می‌دهد.

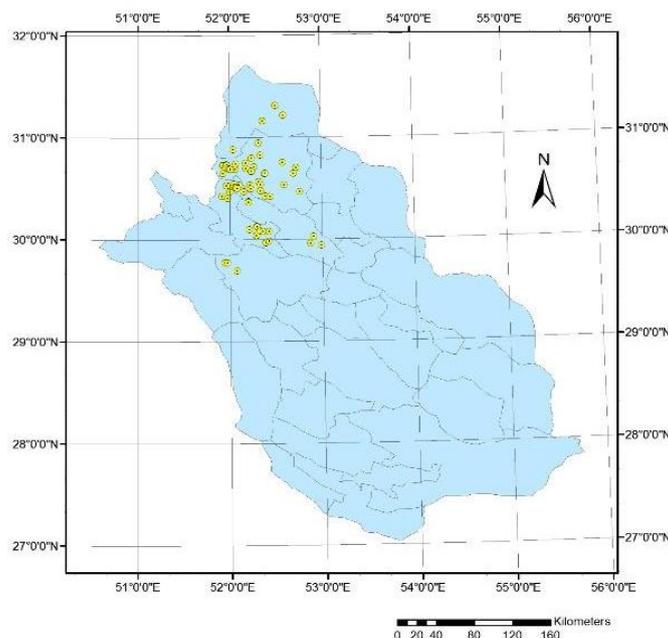
واژگان کلیدی: خاک‌های آهکی، تشخیص ترکیبی تغذیه‌ای (CND)، حاصلخیزی خاک، پایداری تولید، لوبیای چیتی

مقدمه

لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) منبعی ارزشمند از پروتئین در کشورهای در حال توسعه است و استان فارس سهمی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد در تولید ملی دارد (FAO, 2022). با وجود ظرفیت تثبیت نیتروژن و سازگاری گسترده، عملکرد آن تحت تأثیر کمبود آب، تنش‌های اقلیمی و مدیریت نادرست عناصر غذایی محدود شده است (Dave et al., 2024; Khan et al., 2025). خاک‌های آهکی با تثبیت عناصر و کاهش دسترسی‌پذیری فسفر و ریزمغذی‌ها، کمبود و عدم تعادل تغذیه‌ای را تشدید می‌کنند (Roozitalab et al., 2018). این مطالعه با فرض وجود برهم‌کنش‌های پیچیده بین عناصر غذایی، با هدف تدوین هنجارهای منطقه‌ای و ارائه راهکار تغذیه دقیق بر اساس چارچوب‌های CND و DOP انجام شد (Parent and Dafir, 1992; Montañés et al., 1993). تا بهره‌وری پایدار لوبیا در شرایط نیمه‌خشک افزایش یابد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه سه‌ساله (۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴) در ۱۰۱ مزرعه لوبیای چیتی (*Phaseolus vulgaris* cv. Khomein) در استان فارس، ایران، منطقه‌ای نیمه‌خشک با خاک‌های آهکی و بارندگی نامنظم، انجام شد. مزارع منتخب (شکل ۱) در سه شهرستان اصلی تولید لوبیا شامل سپیدان، آباد و اقلید پراکنده بودند که به دلیل عملکرد ناهمگون (عملکرد بالا: بیش از ۲/۵ تن در هکتار، متوسط: ۱/۵ تا ۲/۵ تن در هکتار، پایین: کمتر از ۱/۵ تن در هکتار) و بازتاب محدودیت‌های زراعی منطقه‌ای (کم‌آبی، شوری خاک) انتخاب شدند.



شکل ۱- موقعیت‌های نمونه‌برداری مزارع لوبیا در استان فارس، ایران.

در مرحله گل‌دهی (BBCH 16-18; Meier et al., 2009) تعداد ۳۰ بوته از هر مزرعه به صورت تصادفی انتخاب شد. برگ‌های جوان و کامل از یک‌سوم فوقانی گیاه جدا، شسته (۱/۰٪ اسیدکلریدریک، آب دیونیزه)، در آون در ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و آسیاب شدند. ترکیب عناصر ماکرو و ریزمغذی‌ها در برگ‌ها اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل برگ (٪ وزن خشک) با روش میکروکجلدال (Helrich, 1990) و دستگاه (Kjeltec 2300 Foss Tecator, سوئد) تعیین شد. فسفر به روش رنگ زرد فسفومولیبیدات (Chapman and Pratt, 1978) و پتاسیم با فلیم‌فوتومتتری (Helmke et al., 1996) اندازه‌گیری شد. کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی و مس به روش جذب اتمی (Perkin-Elmer 1100B) (Isaac et al., 2015) و بور با روش طیف‌سنجی آزمونین H (Krug et al., 1981) تعیین شدند. عملکرد در زمان برداشت محاسبه شد.

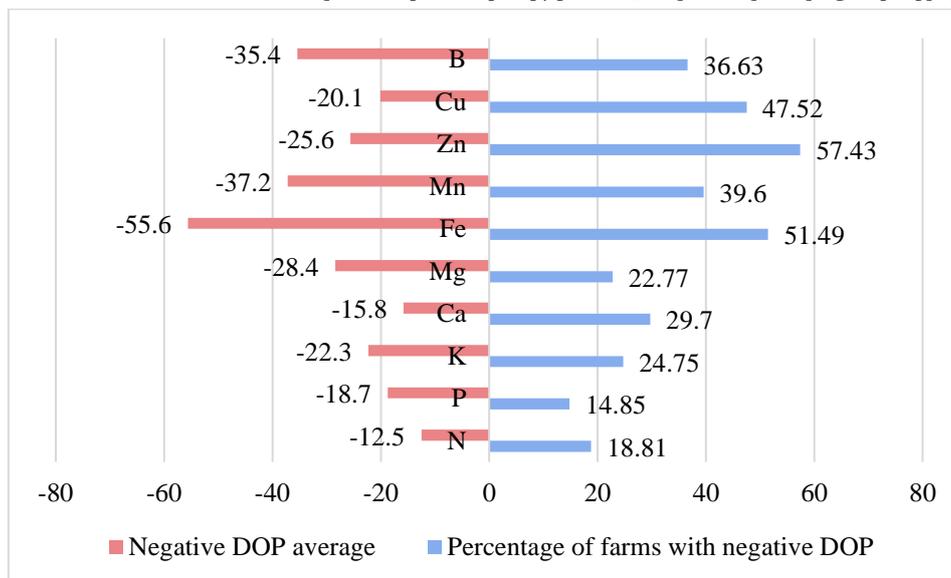
شاخص انحراف از درصد بهینه (DOP) طبق فرمول شماره ۱ در زیر:

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

محاسبه شد که در آن C غلظت اندازه‌گیری شده و C_{ref} مقدار مرجع در جمعیت‌های پرمحصول است. شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) مجموع قدرمطلق DOP عناصر است و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده عدم تعادل بیشتر هستند (Montañés et al., 1993؛ Leitzke Betemps et al., 2020؛ Parent and Dafir, 1992؛ Khiari et al., 2001؛ Tadayon et al., 2025). روش CND-clr برای تحلیل چندمتغیره برهم‌کنش عناصر استفاده شد. نسبت عناصر به میانگین هندسی، نسبت لگاریتمی و شاخص CND-t² طبق معادلات ارائه شده محاسبه شد. طبقه‌بندی داده‌ها به زیرجمعیت‌های پرمحصول و کم‌محصول با روش Cate-Nelson انجام شد. تجزیه‌های آماری (میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، میانگین هندسی) و هنجارهای مرجع CND در Excel 2016 محاسبه و تحلیل‌های رگرسیون قطعه‌ای و مؤلفه‌های اصلی (PCA) در SPSS v27 و Minitab 14 انجام شد.

نتایج و بحث

شکل ۲ مقادیر DOP را برای مزارع پربازده (< ۲۵۰۰ کیلوگرم) نشان می‌دهد. بیشترین کمبود مربوط به آهن با DOP منفی ۵۵/۶ بود که ۵۱/۴۹ درصد مزارع را درگیر کرد. روی و مس نیز با DOP منفی ۲۵/۶ و ۲۰/۱ درصد، کمبود قابل توجهی داشتند. کمبود منگنز و بور نیز قابل توجه بود. کمبودهای عناصر پرمصرف کمتر شدید بودند.



شکل ۲- انحراف منفی درصد بهینه‌سازی (DOP) برای عناصر غذایی ضروری گیاه (میله‌های قرمز)، همراه با درصد مزارع (در ۱۰۱ مزرعه) در استان فارس که بر اساس مقادیر منفی DOP دارای کمبود عناصر غذایی هستند (میله‌های آبی). رگرسیون قطعه‌ای نشان داد با افزایش NBI، عملکرد کاهش می‌یابد. مزارعی که NBI بالای ۲۰۰ داشتند، افت عملکرد شدیدتری داشتند (۳۴ درصد کمتر) و عدم تعادل‌های اصلی عناصر غذایی در جدول ۱ نشان داده شد.

جدول ۱- رابطه شاخص تعادل تغذیه‌ای (NBI) با عملکرد محصول همراه با نقطه شکست (e = 200)

دسته‌بندی NBI	تعداد مزارع	میانگین عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	دامنه عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	عدم تعادل‌های اصلی عناصر غذایی
NBI ≤ ۲۰۰	۵۴	۳۴۶۰	۲۴۰۰-۴۱۵۰	عدم تعادل متوسط: P، K، کمبود Cu، Fe
NBI > ۲۰۰	۴۷	۲۲۸۰	۱۰۰۰-۳۷۰۰	عدم تعادل شدید: B، Mg، Fe، کمبود Ca، Mn

تشخیص تغذیه‌ای ترکیبی (CND) نشان داد پتاسیم، منیزیم و بور در عملکرد بالا نقش کلیدی دارند. آستانه بحرانی برای عملکرد بالا حدود ۳۱۲۴ کیلوگرم تعیین شد. مزرعه‌های پربازده ۱۵/۸۴ درصد کل بودند (جدول ۲).

جدول ۲- شاخص‌های عناصر غذایی، سطوح بحرانی و دامنه کفایت با استفاده از روش CND

شاخص عنصر غذایی	حد بالای بحرانی	حد پایین بحرانی	دامنه شاخص	عملکرد بحرانی (کیلوگرم در هکتار)
I ² N	۱,۵۱۳	-۱,۵۱۳	۲,۲۹۰	۲۰,۸۴,۱۴۱
I ² P	۱,۳۵۶	-۱,۳۵۶	۱,۸۳۸	۲۲۵۴,۳۸۳
I ² K	۲,۳۱۸	-۲,۳۱۸	۵,۳۷۳	۳۱۲۴,۳۳۰
I ² Ca	۱,۰۸۷	-۱,۰۸۷	۱,۱۸۲	۲۲۷۱,۵۶۶
I ² Mg	۳,۷۳۳	-۳,۷۳۳	۱۳,۹۳۳	۲۹۸۷,۹۶۴
I ² Zn	۱,۱۱۹	-۱,۱۱۹	۱,۲۵۱	۱۹۲۵,۵۴۴
I ² Fe	۱,۱۲۰	-۱,۱۲۰	۱,۲۵۵	۲۶۶۹,۲۱۶
I ² Cu	۱,۵۹۱	-۱,۵۹۱	۲,۵۳۲	۱۸۹۷,۷۴۶
I ² Mn	۱,۵۷۵	-۱,۵۷۵	۲,۴۸۱	۸۵۳,۲۲۵
I ² B	۳,۶۷۳	-۳,۶۷۳	۱۳,۴۹۱	۳۰۹۵,۰۲۵
I ² Rd	۲,۷۱۰	-۲,۷۱۰	۷,۳۴۶	۱۱۰۶,۰۷۹

تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد DOP بیشتر برای تشخیص انفرادی مناسب است، اما CND تعاملات تغذیه‌ای را بهتر نمایان می‌کند. در مزارع کم‌بازده، ماکرومغذی‌ها و بور عوامل محدودکننده اصلی بودند. در مزارع پرپازده، کمبود منگنز و تضاد آهن-مس آشکار شد (جدول ۳). ترکیب هر دو روش برای مدیریت دقیق تغذیه لوبیا توصیه می‌شود.

جدول ۱۲. مقایسه روش‌های DOP و CND در تشخیص محدودیت‌های تغذیه‌ای در مزارع لوبیا

جنبه	مزارع با عملکرد پایین	مزارع با عملکرد بالا
تمرکز اصلی	عناصر پرمصرف (Mg + B, Ca, K)	تعادل عناصر کم‌مصرف (Mn, Cu, Fe)
محدودیت کلیدی	Zn/P کمبود	کمبود Mn، آنتاگونیسم Fe-Cu
نقطه قوت روش	DOP برای تشخیص سریع و ساده	CND برای شناسایی برهم‌کنش‌ها

این پژوهش برای نخستین‌بار ترکیب دو روش تشخیص تغذیه‌ای ترکیبی (CND) و انحراف از درصد بهینه (DOP) را به‌عنوان ابزاری برای مدیریت عدم تعادل‌های تغذیه‌ای در لوبیا در شرایط خاک‌های آهکی و نیمه‌خشک معرفی کرده است. نتایج نشان داد که آستانه‌های بحرانی ($CND-I^2 = 14/33$; $NBI = 200$) نقطه‌ای هستند که کاهش عملکرد در اثر کمبودهای هم‌افزا (مانند آهن، روی و بور) و اثرات متقابل منفی (مانند کلسیم-فسفر و منگنز-مس) شدت می‌گیرد. دامنه‌های بهینه عناصر مانند پتاسیم (۲/۲۲ درصد) و آهن (۱۸۱/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با استانداردهای جهانی متفاوت است که علت آن ویژگی‌های خاص خاک‌های آهکی (pH حدود ۷/۸۵ و درصد آهک حدود ۳۴/۸) است. نتایج نشان داد که کمبود شدید عناصر (NBI بالای ۲۰۰) می‌تواند عملکرد را تا ۳۴ درصد کاهش دهد. این یافته‌ها با مطالعات اخیر در حوزه بیونمیک که بر تعاملات تغذیه‌ای سیستماتیک تأکید دارند، همسو است (De Oliveira et al., 2020; Matsuoka, 2020). تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تضادهای اکسید-احیاء بین آهن، مس و منگنز و هم‌افزایی بین منیزیم و بور را برجسته کرد و لزوم به‌کارگیری تشخیص‌های چندمتغیره در این خاک‌ها را تأیید نمود (Tadayon et al., 2025). از منظر روش‌شناسی، CND در شناسایی آنتاگونیسم‌های پنهان مانند رقابت آهن-منگنز در خاک‌های قلیایی عملکرد بهتری نسبت به DOP داشت (Mostashari et al., 2022). چارچوب لگاریتمی CND امکان شناسایی جمعیت‌های پرپازده و درک تنش‌های غیرتغذیه‌ای مانند کم‌آبی را فراهم کرد (Parent et al., 2013). در مقابل، DOP بیشتر بر عناصر پرمصرف تمرکز داشت و تعاملات ریزمغذی‌ها را نادیده گرفت. همچنین، CND به‌دلیل استفاده از تبدیلات نسبتی (clr) قادر بود رقابت‌های ظریف عناصر مانند آهن-مس را آشکار کند، در حالی که DOP این ظرفیت را نداشت. در خاک‌های آهکی ($pH > 7/5$) کمبود فسفر، روی و آهن بسیار شایع است که ناشی از واکنش‌های تثبیت فسفر و تشکیل کمپلکس‌های پایدار کربناتی برای ریزمغذی‌هاست. تثبیت فسفر در اثر ترکیب یون‌های کلسیم با فسفر محلول، دسترسی گیاه را محدود می‌کند و عملکرد را کاهش می‌دهد (Roozitalab et al., 2018). ریشه لوبیا با ترشح اسیدهای آلی مانند سیترات، یون‌های کلسیم و آهن را کلاته کرده و حلالیت عناصر را افزایش می‌دهند (Schwerdtner et al., 2022). با این حال خشکی شدید تولید این اسیدها را محدود می‌کند. برای کاهش این محدودیت‌ها، اصلاح خاک با مواد آلی و کاربرد محلول‌پاشی‌های

هدفمند مانند Zn-EDTA توصیه می‌شود. تنش خشکی، محدودیت عناصر را تشدید می‌کند زیرا انتقال عناصر کم‌تحرک مانند فسفر و روی را کاهش می‌دهد. بستن روزنه‌ها نیز حرکت عناصر در آوندها را مختل می‌کند. این امر کاهش شدید عملکرد در مزارع با NBI بالا را توضیح می‌دهد (Priya et al., 2025). یافته‌های این تحقیق چارچوبی عملی برای مدیریت دقیق کوددهی در خاک‌های آهکی فراهم می‌کند. ترکیب CND با مدل‌های داده‌محور می‌تواند برنامه‌های آبیاری و تغذیه را بهینه کند و در راستای کشاورزی پایدار و افزایش تاب‌آوری در برابر خشکی مؤثر باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با ترکیب دو روش نوین تشخیص تغذیه‌ای ترکیبی (CND) و انحراف از درصد بهینه (DOP)، چارچوبی عملی و دقیق برای ارزیابی و مدیریت کمبودها و عدم تعادل‌های تغذیه‌ای در لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris*) در شرایط خاک‌های آهکی نیمه‌خشک ارائه کرد. نتایج نشان داد که خاک‌های آهکی با pH بالا و درصد بالای کربنات کلسیم، کمبود گسترده فسفر، آهن، روی و بور را به دنبال دارند که این کمبودها در تعامل با آنتاگونیسم‌های عناصر (مانند تثبیت فسفر با کلسیم یا تضاد آهن-مس-منگنز) باعث کاهش معنی‌دار عملکرد می‌شوند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و چارچوب چندمتغیره CND توانستند عوامل پنهان کاهش عملکرد را آشکار کنند که روش‌های مرسوم مانند DOP قادر به شناسایی آن‌ها نبودند. این یافته‌ها اهمیت رویکردهای چندمتغیره و مدیریت تغذیه‌ای دقیق را در اکوسیستم‌های کشاورزی شکننده مانند مناطق آهکی و نیمه‌خشک نشان می‌دهد. ترکیب داده‌های یونومیک، روش CND و فناوری‌های نوین مانند نانوکودها و مدل‌های یادگیری ماشین، امکان پیش‌بینی دقیق نیازهای کودی، کاهش تنش‌های تغذیه‌ای و سازگاری بهتر با تنش‌های خشکی را فراهم می‌کند. بنابراین، اجرای این راهکارها می‌تواند ضمن بهینه‌سازی مصرف کود و آب، بهره‌وری پایدار و امنیت غذایی را در راستای اهداف توسعه پایدار (SDG2 و SDG13) ارتقا دهد.

فهرست منابع

1. Chapman, H.D., and Pratt, P.E. (1978). Method of Analysis for Soil Plant and Water. University of California, Dep of Agric Sci U.S.A pp. 1-309.
2. Dave, K., Kumar, A., Dave, N., Jain, M., Dhanda, P.S., Yadav, A. and Kaushik, P. (2024). Climate change impacts on legume physiology and ecosystem dynamics: a multifaceted perspective. Sustainability, 16(14), p.6026.
3. De Oliveira, C.T., Rozane, D.E., De Amorim, D.A., De Souza, H.A., Fernandes, B.S., and Natale, W. (2020). Diagnosis of the nutritional status of 'Paluma' guava trees using leaf and flower analysis. Rev Bras Frutic 42:1-9.
4. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. (2022). The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. Rome, FAO.
5. Helrich, K. (1990). Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists.
6. Isaac, R.A., Kerber, J.D., and Walsh, L.M. (2015). Atomic Absorption and Flame Photometry: Techniques and Uses in Soil, Plant, and Water Analysis. Pesticides in Soil and Water. Soil Science Society of America: Madison WI USA 15th ed pp 17-37.
7. Khan, M.N., Wahab, S., Wahid, N., Shah, S.N., Ullah, B., Kaplan, A., Razzaq, A., Bibi, M., Suleman, F. and Ali, B. (2025). Impact of climate change on yield and quality of legumes. In Challenges and Solutions of Climate Impact on Agriculture (pp. 85-111). Academic Press.
8. Khiari, L., Parent, L.-É., and Tremblay, N. (2001). Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. Agron J 93:802-808.
9. Krug, F.J., Mortatti, J., Pessenda, L.C.R., Zagatto, E.A.G., and Bergamin, H. (1981). Flow injection spectrophotometric determination of boron in plant material with azomethine-H. Analytica Chimica Acta 125:29-35.
10. Leitzke Betemps, D., Vahl de Paula, B., Parent, S.É., Galarça, S.P., Mayer, N.A., Marodin, G.A., Rozane, D.E., Natale, W., Melo, G.W.B., Parent, L.E. and Brunetto, G., (2020). Humboldtian diagnosis of peach tree (*prunus persica*) nutrition using machine-learning and compositional methods. Agronomy, 10(6), p.900.
11. Matsuoka, K. (2020). Methods for nutrient diagnosis of fruit trees early in the growing season by using simultaneous multi-element analysis. The Horticulture Journal, 89(3), pp.197-207.

12. Montañés, L., Heras, L., Abadía, J., and Sanz, M. (1993). Plant analysis interpretation based on a new index. Deviation from optimumpercentage (DOP). *J. Plant Nutr.* 16(7):1289-1308.
13. Mostashari, M.M., Khosravinejad, A., Mousavi, S.M. and Kashanizadeh, S. (2022). Nutritional status assessment of pistachio orchards in Qazvin plain, Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(1), pp.104-113.
14. Parent, L.E., and Dafir, M. (1992). A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *J Am Soc Hortic Sci* 117:239-242.
15. Parent, S-É, Parent, L.E., Rozane, D.E., and Natale, W. (2013). Plant ionome diagnosis using sound balances: Case study with mango (*Mangifera indica*). *Front Plant Sci* 4:449.
16. Priya, M., Farooq, M. and Siddique, K.H. (2025). Enhancing Tolerance to Combined Heat and Drought Stress in Cool-Season Grain Legumes: Mechanisms, Genetic Insights, and Future Directions. *Plant, Cell & Environment*.
17. Roozitalab, M.H., Siadat, H., and Farshad, A. (2018). *The Soils of Iran*. Springer International Publishing AG Switzerland pp 255.
18. Schwardtner, U., Lacher, U. and Spohn, M. (2022). Lupin causes maize to increase organic acid exudation and phosphorus concentration in intercropping. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 1(3), pp.191-202.
19. Tadayon, M.S., Mousavi, S.M. and Mostashari, M. (2025). Ionome composition and interaction influence olive yield on calcareous soils: the case of *Olea europaea* L. cv. 'Shengeh'. *Journal of Plant Nutrition*, pp.1-14.

Multivariate Diagnosis of Plant Nutrients in Calcareous Agro-Ecosystems: Integrating CND and DOP Frameworks to Optimize Bean (*Phaseolus vulgaris*) Yield under Semi-Arid Conditions

Seyed Mashallah Hosseini^{1*}, Mohammad Saeed Tadayon²

¹ Faculty Member, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran (*Email: mhoseini20@yahoo.ca)

² Faculty Member, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Abstract

Calcareous soils in semi-arid regions limit bean (*Phaseolus vulgaris*) productivity by causing nutrient fixation and antagonisms, a condition exacerbated by drought stress. This study aimed to establish site-specific nutrient norms and identify key nutrient interactions constraining bean yield in the calcareous agro-ecosystems of Fars Province. The research was conducted from 2022 to 2024 across 101 pinto bean fields. The frameworks of *Compositional Nutrient Diagnosis* (CND) and *Deviation from Optimum Percentage* (DOP) were integrated. Soil and leaf samples were collected to determine physicochemical properties and nutrient status, and Principal Component Analysis (PCA) was performed to identify the main yield determinants and stoichiometric imbalances. The calcareous soils (pH = 7.85, 34.8% CaCO₃) caused severe phosphorus (91% of farms), zinc (60%), iron (51%), and boron (38%) deficiencies due to calcium–phosphorus precipitation and Fe-Mn-Cu redox competition. Farms with a Nutrient Balance Index (NBI) higher than 200 had yields 34% lower (2,280 vs. 3,460 kg/ha). The CND method explained 23% more variance than DOP and uncovered hidden interactions, such as Mn deficiency and Fe-Cu antagonism. PCA results indicated that in low-yield farms, macronutrients (Ca, K, Mg) and boron were dominant constraints (PC1: 43.1% variance explained), whereas micronutrient redox dynamics and latent Mn deficiency governed high-yield performance. Critical leaf nutrient thresholds for high-yield fields were as follows: nitrogen (3.52%), phosphorus (0.29%), potassium (2.80%), calcium (1.53%), magnesium (0.59%), zinc (24.21 mg/kg), iron (181.75 mg/kg), copper (9.75 mg/kg), manganese (89.5 mg/kg), and boron (55.29 mg/kg). Phosphorus–zinc deficiency and nutrient imbalance were identified as the primary constraints on bean yield in calcareous soils. This research recommends the CND framework as an innovative tool for precision nutrient management by providing region-specific thresholds that optimize fertilization strategies and help close the yield gap in semi-arid agro-ecosystems.

Keywords: Calcareous soils, Compositional Nutrient Diagnosis (CND), soil fertility, production sustainability, common bean (*Phaseolus vulgaris*)