



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



افزایش بهره‌وری درختان سیب در خاک‌های آهکی از طریق سیستم‌های تغذیه‌ای تلفیقی:

اثرات هم‌افزایی زیست‌کودها و کوددهی دقیق

محمد سعید تدین^{۱*}، عزیز مجیدی^۲، سید ماشاله حسینی^۳، سهراب صادقی^۴

- ۱- نویسنده مسئول^{*}، 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 m.tadayon@areeo.ac.ir
- ۲- عضو هیئت علمی بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (AREEO)، ارومیه، ایران
- ۳- اعضای هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (AREEO)، شیراز، ایران

چکیده

تولید سیب در خاک‌های آهکی مناطق نیمه‌خشک با چالش‌هایی مانند عدم تعادل عناصر غذایی، کارایی پایین مصرف کود (NUE) و فعالیت زیستی ضعیف خاک روبه‌رو است. این پژوهش مزرعه‌ای چهارساله (۱۴۰۰-۱۴۰۳) به منظور ارزیابی اثرات سامانه‌های تغذیه گیاهی یکپارچه (IPNS) اجرا شد. در این مطالعه، دو سطح اصلاح آلی متداول (COA) و COA همراه با زیست‌کود (COAB) با سه راهبرد کوددهی معدنی شامل کوددهی متداول (COF)، کوددهی بر اساس بودجه‌بندی عناصر (NB-F) و کوددهی هدایت‌شده با تشخیص ترکیبی عناصر غذایی (CND-F) ترکیب شدند. آزمایش در یک باغ سیب بالغ (Malus domestica Borkh. cv. 'Golden Delicious') در استان فارس انجام شد. شاخص‌هایی مانند فعالیت میکروبی خاک، تغذیه، رشد، فتوسنتز، عملکرد، کیفیت میوه و بازده اقتصادی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد ترکیب COAB با CND-F سلامت بیوشیمیایی خاک (افزایش ۱۱۶٪ دهیدروژناز)، تغذیه (افزایش ۴۰٪ فسفر برگ و ۷۸/۹٪ روی میوه) و تعادل عناصر (کاهش ۳/۶۲٪ NBI) را بهبود داد. این راهبرد رشد رویشی، جذب CO₂، عملکرد (افزایش ۴۴٪) و کیفیت پس از برداشت را ارتقا داد و سال‌آوری را کاهش داد. تحلیل‌های چندمتغیره، برتری CND-F را در ترکیب با ورودی‌های آلی-زیستی تأیید کرد. یافته‌ها اثربخشی IPNS، به‌ویژه کوددهی دقیق CND همراه با ورودی آلی-میکروبی را به‌عنوان راهکاری پایدار برای مدیریت باغ‌های سیب خاک آهکی نشان داد.

واژگان کلیدی: بودجه‌بندی عناصر غذایی، تشخیص ترکیبی عناصر غذایی (CND)، سیب، خاک‌های آهکی، زیست‌کود.

مقدمه

سیب (*Malus domestica* Borkh.) یکی از محصولات باغی مهم مناطق معتدل و نیمه‌خشک از جمله ایران است، اما تولید آن در خاک‌های آهکی با چالش‌هایی مانند عدم تعادل عناصر غذایی، pH بالا، مواد آلی پایین و دسترسی محدود به عناصری مانند فسفر، آهن و روی مواجه است (Bolan و همکاران، ۲۰۲۳). کوددهی مرسوم اغلب این محدودیت‌ها را رفع نمی‌کند. برای بهبود عملکرد و پایداری، رویکردهای نوینی چون سیستم‌های تغذیه گیاهی یکپارچه (IPNS) که ترکیب ورودی‌های آلی، زیست‌کودها و کوددهی دقیق معدنی هستند، اهمیت یافته‌اند (Kuldeep et al., 2024). تشخیص ترکیبی عناصر (CND) روشی چندمتغیره برای ارزیابی تعادل عناصر و ارائه توصیه‌های کودی دقیق است (Yuan و همکاران، ۲۰۲۴). کاربرد قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (AMF)، باکتری‌های PGPR و PSB به همراه اصلاحات آلی، جذب عناصر و مقاومت به تنش خشکی را بهبود می‌دهد (Garcia-Caparrros et al., 2025). این پژوهش اثرات ترکیب دو سطح ورودی آلی (COA و COAB) و سه استراتژی کوددهی معدنی (COF، CND-F و NB-F) را بر دسترسی عناصر، رشد، عملکرد و کیفیت میوه سیب در خاک‌های آهکی نیمه‌خشک بررسی می‌کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در یک باغ تجاری سیب رقم گلدن دلشس (*Malus domestica* Borkh) در سپیدان استان فارس (۳۰°۵۷'۵۴" شمالی، ۵۲°۰۵'۵۳" شرقی؛ ارتفاع ۲۰۳۲ متر) طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ اجرا شد. باغ شامل درختان ۱۹ ساله پیوندی روی پایه نیمه‌پاکوتاه MM.111 با تراکم ۴۱۶ اصله در هکتار بود. در این مطالعه، آزمایش مزرعه‌ای به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با چهار تکرار اجرا شد و هر واحد آزمایشی شامل شش درخت بود. آرایش آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی (۲ × ۳) طراحی شد تا اثرات اصلی و متقابل ورودی‌های آلی و راهبردهای کوددهی معدنی بر وضعیت عناصر غذایی خاک، جذب عناصر توسط گیاه و عملکرد درختان سیب ارزیابی شود. عامل اول شامل دو سطح ورودی آلی بود: سطح نخست (COA) استفاده از ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم کود دامی کاملاً پوسیده به‌ازای هر درخت در چاله‌های کود در اواخر زمستان و سطح دوم (COAB) مشابه تیمار COA بود که با زیست‌کودها غنی شد؛ به طوری که در این سطح، کود دامی با قارچ میکوریزا آربوسکولار بومی (*Rhizophagus irregularis*) به میزان ۲ کیلوگرم به‌ازای هر درخت، گوگرد عنصری معادل ۱۰ درصد وزن کود دامی تلقیح‌شده با باکتری *Thiobacillus thiooxidans* و ترکیب باکتری‌های محرک رشد گیاهی (*Azotobacter chroococcens*، *Pseudomonas fluorescens* و *Bacillus subtilis*) مخلوط گردید. عامل دوم نیز شامل سه سطح راهبرد کوددهی معدنی: کوددهی بهینه مرسوم (COF) بر اساس نتایج آزمون خاک، آب و برگ؛ کوددهی هدایت‌شده با تشخیص ترکیبی عناصر غذایی (CND-F) بر اساس شاخص‌های تعادل عناصر؛ و کوددهی مبتنی بر بودجه‌بندی عناصر غذایی (NB-F) متناسب با برداشت محصول و بازده مصرف عناصر بود. در تیمار COAB، ترکیب کود دامی با قارچ میکوریزا، گوگرد و باکتری‌های PGPR در چاله‌های کود به‌طور یکنواخت پخش و خاک‌ورزی شد تا تماس مناسب ریشه با عناصر غذایی و راندمان جذب در شرایط خاک‌های آهکی نیمه‌خشک افزایش یابد. فعالیت میکروبی خاک با شاخص‌هایی مانند فعالیت دهیدروژناز و کربن زیست‌توده‌ای اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های رشدی شاخه، صفات فیزیولوژیکی برگ و کیفیت میوه در برداشت و پس از انبارداری ارزیابی شدند. تجزیه واریانس ترکیبی (ANOVA)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آزمون دانکن برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد تا اثرات ساده و متقابل تیمارها مشخص گردد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از کودهای آلی زیستی و استراتژی‌های نوین کوددهی معدنی تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های زیستی و شیمیایی خاک، رشد درختان سیب و کیفیت میوه در باغ‌های واقع بر خاک‌های آهکی دارد. افزودن کودهای زیستی متشکل از کود دامی، قارچ‌های میکوریزا (AMF)، گوگرد عنصری، باکتری‌های محلول‌ساز فسفات (PSB) و باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) موجب شد فعالیت دهیدروژناز ۲۱٪، زیست‌توده میکروبی ۱۸/۳٪، فسفاتاز ۱۶/۴٪ و ماده آلی خاک

۱۴/۹٪ افزایش یابد که بیانگر ارتقای فعالیت‌های متابولیک میکروارگانیسم‌ها و تجمع ماده آلی است (جدول ۱). در بُعد تغذیه‌ای، کوددهی مبتنی بر تشخیص ترکیبی عناصر غذایی (CND-F) نسبت به کوددهی متداول، کارایی بیشتری در افزایش فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی نشان داد. ترکیب کودهای زیستی با CND-F بیشترین اثرات هم‌افزا را داشت و به‌طور قابل توجهی شاخص‌های زیستی خاک را بهبود بخشید؛ به طوری که فعالیت دهیدروژناز تا ۱۱۶٪، زیست‌توده میکروبی ۸۰٪، فسفاتاز ۷۱٪ و ماده آلی ۵۳٪ افزایش یافت.

جدول ۱- اثر تیمارها بر فعالیت میکروبی و پارامترهای بیوشیمیایی خاک باغ سیب (میانگین ۱۴۰۳-۱۴۰۰)

تیمار	فعالیت دهیدروژناز (میکروگرم TPF در گرم خاک در ۲۴ ساعت)	کربن زیست‌توده میکروبی (میلی‌گرم C در کیلوگرم خاک)	فعالیت فسفاتاز (میکروگرم pNP در گرم خاک در ساعت)	درصد ماده آلی خاک (%)
I- ورودی آلی				
(شاهد) COA	۱۹,۵ b	۲۵۳,۰ b	۵۱,۳ b	۱,۸۸ b
COAB	۲۳,۶ a	۲۹۹,۳ a	۵۹,۷ a	۲,۱۶ a
F آزمون	**	**	**	**
II- استراتژی کوددهی معدنی				
(شاهد) COF	۲۴,۱ b	۳۰۷,۵ b	۶۰,۶ b	۲,۲۳ a
NB-F	۲۷,۴ a	۳۳۳,۰ ab	۶۵,۴ ab	۲,۳۱ a
CND-F	۳۰,۰ a	۳۴۷,۵ a	۶۸,۴ a	۲,۳۷ a
F آزمون	**	*	**	ns
برهم‌کنش				
(شاهد) COA×COF	۱۷,۹ d	۲۳۸ e	۴۸,۰ d	۱,۸۱ b
COA×NB-F	۱۹,۳ cd	۲۵۴ de	۵۱,۴ cd	۱,۸۸ b
COA×CND-F	۲۱,۳ c	۲۶۷ cd	۵۴,۶ c	۱,۹۶ b
COAB×COF	۳۰,۲ b	۳۷۷ bc	۷۳,۲ b	۲,۶۴ a
COAB×NB-F	۳۵,۴ a	۴۱۲ ab	۷۹,۳ ab	۲,۷۳ a
COAB×CND-F	۳۸,۷ a	۴۲۸ a	۸۲,۱ a	۲,۷۷ a
F آزمون	**	**	**	ns

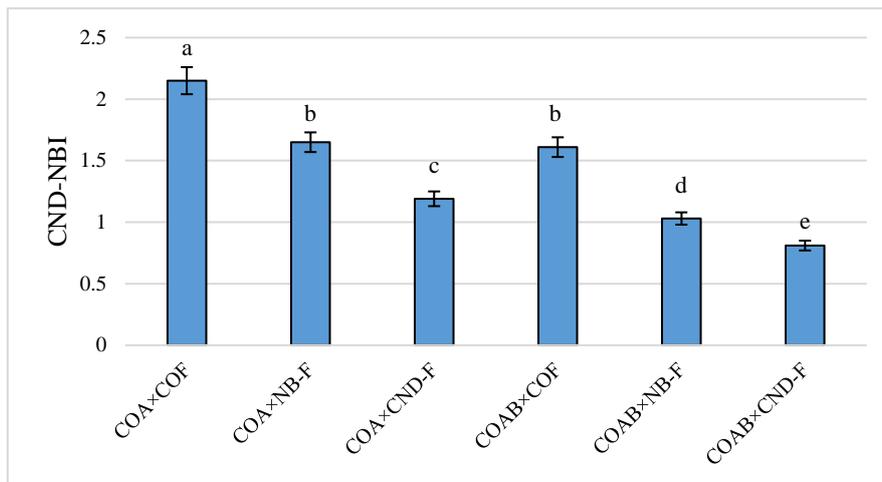
TPF تری‌فنیل فورمازان؛ pNP پارا-نیتروفنل؛ حروف مشابه در یک ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار در سطح آزمون دانکن است.

در بخش عناصر غذایی، کوددهی معدنی نقش اصلی در افزایش دسترسی عناصر کم مصرف و پرمصرف داشت؛ در حالی که افزودن مواد آلی خالص یا حتی همراه با کودهای زیستی تأثیر محدودی بر غلظت عناصر در برگ‌ها داشت. تیمار ترکیبی COAB×CND-F بیشترین افزایش در غلظت نیتروژن (۱۰۵٪)، فسفر (۱۴۶٪)، پتاسیم (۶۵٪) و ریزمغذی‌هایی مانند روی و آهن را ثبت کرد (جدول ۲) که منجر به بهبود تعادل تغذیه‌ای (شکل ۱)، درختان گردید (Okba et al., 2025).

جدول ۲- اثر تیمارها بر غلظت عناصر غذایی قابل جذب در خاک باغ سیب (میانگین ۱۴۰۳-۱۴۰۰)

عوامل آزمایشی	نیتروژن (N)	فسفر (P)	پتاسیم (K)	آهن (Fe)	روی (Zn)
I- ورودی آلی					
(شاهد) COA	۲۹,۴ a	۱۳,۵ a	۲۰۷ a	۳,۸ a	۱,۲ a
COAB	۳۰,۴ a	۱۴,۱ a	۲۱۰ a	۳,۹ a	۱,۳ a
F آزمون	ns	ns	ns	ns	ns
II- استراتژی کوددهی معدنی					
(شاهد) COF	۲۴,۶ b	۱۰,۵ c	۱۹۰ c	۳,۵ c	۱,۱ c
NB-F	۳۶,۸ a	۱۶,۲ b	۲۴۰ b	۴,۳ b	۱,۶ b
CND-F	۴۰,۵ a	۲۰,۳ a	۲۶۵ a	۴,۹ a	۲,۰ a
F آزمون	**	**	**	*	**
برهم‌کنش					
COA×COF	۲۳,۱ e	۹,۶ e	۱۸۵ d	۳,۴ e	۱,۰ d
COA×NB-F	۳۱,۴ c	۱۴,۰ c	۲۱۰ c	۳,۹ cd	۱,۳ c
COA×CND-F	۳۳,۷ c	۱۷,۰ b	۲۲۵ c	۴,۱ c	۱,۴ c
COAB×COF	۲۶,۱ d	۱۱,۴ d	۱۹۵ d	۳,۶ de	۱,۲ cd
COAB×NB-F	۴۲,۲ b	۱۸,۵ b	۲۷۰ b	۴,۷ b	۱,۹ b
COAB×CND-F	۴۷,۳ a	۲۳,۶ a	۳۰۵ a	۵,۴ a	۲,۵ a
F آزمون	**	**	**	*	**

حروف مشابه در یک ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد است.



شکل ۱- شاخص تعادل تغذیه‌ای (CND-NBI) در درختان سیب را در بازه زمانی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ نشان می‌دهد. مقادیر پایین‌تر این شاخص بیانگر تعادل بهتر عناصر غذایی در گیاه است. ستون‌هایی که دارای حروف مشابه هستند، از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در سطح اطمینان کمتر از ۰/۰۱ بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ندارند.

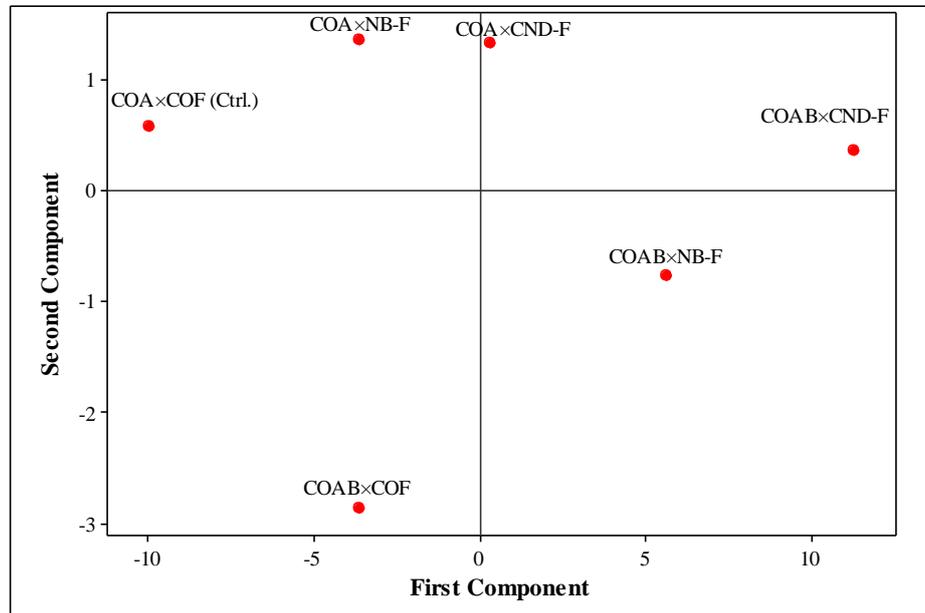
از نظر شاخص‌های فیزیولوژیک، تیمار CND-F همراه با COAB باعث بهبود طول و قطر شاخه، تعداد برگ، شاخص کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، تعرق و نرخ فتوسنتز شد. افزایش این شاخص‌ها به‌طور میانگین بیش از ۳۰٪ نسبت به شاهد گزارش شد که بیانگر تأثیر مثبت تلفیق کوددهی دقیق و ورودی‌های زیستی بر رشد رویشی درختان است (Wang et al., 2024; Singh et al., 2025). در نهایت، عملکرد میوه و کیفیت پس‌از برداشت تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب کود آلی زیستی و کوددهی تشخیصی قرار گرفت. ترکیب COAB×CND-F باعث افزایش عملکرد تا ۴۴٪، افزایش سفتی میوه ۲۵/۸٪، شاخص طعم ۱۹/۴٪ و کاهش چشمگیر اختلالات فیزیولوژیک مانند لکه تلخ (۷۹/۲٪)، هسته آبی (۴۸/۳٪) و قهوه‌ای شدن داخلی (۷۴/۶٪) شد (جدول ۳). این راهکار با کاهش چشمگیر اختلالات فیزیولوژیک مانند لکه تلخ و قهوه‌ای شدن داخلی، کیفیت و ماندگاری میوه را ارتقا بخشید (Torres et al., 2024).

جدول ۳- تأثیر تیمارها بر عملکرد محصول و ویژگی‌های کیفیت میوه در درختان سیب (مقادیر میانگین از سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳).

تیمار	عملکرد میوه به ازای هر درخت (کیلوگرم)	شاخص دو سال بار (BBI)	سختی میوه (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	شاخص طعم میوه (TSS/TA)	درصد لکه تلخ میوه (%)	درصد آب‌گزیدگی میوه (%)	درصد قهوه‌ای شدن داخلی میوه (%)	درصد سوختگی سطحی میوه (%)
I- ورودی آلی								
COA (شاهد)	۴۲٫۲ a	۰٫۳۹ a	۶٫۷ a	۱۸٫۱ a	۷٫۰ a	۷٫۸ a	۴٫۷ a	۸٫۸ a
COAB	۴۴٫۱ a	۰٫۳۷ a	۶٫۹ a	۱۸٫۵ a	۶٫۵ a	۷٫۴ a	۴٫۱ a	۸٫۰ a
F آزمون	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
II- استراتژی کوددهی معدنی								
COF (شاهد)	۴۲٫۰ b	۰٫۳۹ a	۶٫۵ b	۱۷٫۷ b	۹٫۴ a	۸٫۳ a	۵٫۱ a	۹٫۷ a
NB-F	۴۸٫۴ a	۰٫۳۵ ab	۷٫۲ a	۱۹٫۲ a	۴٫۷ b	۶٫۲ b	۳٫۰ b	۶٫۵ b
CND-F	۵۰٫۵ a	۰٫۳۴ b	۷٫۵ a	۱۹٫۶ a	۳٫۵ c	۵٫۹ b	۲٫۷ b	۵٫۶ c
F آزمون	**	**	**	**	**	**	**	**
تعامل								
COA×COF	۳۹٫۱ d	۰٫۴۲ b	۶٫۲ d	۱۷٫۰ c	۱۰٫۱ a	۸٫۹ a	۵٫۹ a	۱۰٫۸ a
COA×NB-F	۴۲٫۸ c	۰٫۳۸ ab	۶٫۹ c	۱۸٫۴ b	۶٫۱ b	۷٫۵ a	۴٫۳ b	۸٫۳ b
COA×CND-F	۴۴٫۶ bc	۰٫۳۷ a	۷٫۱ bc	۱۸٫۸ b	۴٫۸ b	۷٫۱ a	۳٫۸ b	۷٫۲ c
COAB×COF	۴۴٫۹ bc	۰٫۳۶ a	۶٫۷ c	۱۸٫۳ b	۸٫۷ a	۷٫۷ a	۴٫۲ b	۸٫۵ b
COAB×NB-F	۵۴٫۰ a	۰٫۳۴ a	۷٫۵ ab	۲۰٫۰ a	۳٫۳ c	۴٫۹ b	۱٫۷ c	۴٫۷ d

۳,۹ e	۱,۵ c	۴,۶ b	۲,۱ d	۲۰,۳ a	۷,۸ a	۰,۳۳ a	۵۶,۳ a	COAB×CND-F
**	**	**	**	**	**	**	**	F آزمون

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) (شکل ۲) نشان داد تیمار COAB×CND-F در بهبود تعادل یونی، فعالیت‌های زیستی خاک و کیفیت میوه نقش چشمگیری دارد (Sharma et al., 2021).



شکل ۲- نمودار امتیاز تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) که توزیع شش ترکیب تیماری را بر اساس تأثیر آن‌ها بر فعالیت میکروبی خاک، وضعیت عناصر غذایی خاک و گیاه، صفات فیزیولوژیکی، عملکرد محصول و ویژگی‌های کیفیت میوه در درختان سیب (*Malus domestica*) Borkh.) طی چهار فصل (۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳) نشان می‌دهد. مؤلفه اصلی اول (PC1) که ۹۳/۲٪ واریانس را تبیین می‌کند، عمدتاً نمایانگر کارایی یکپارچه تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی است، در حالی که مؤلفه دوم (PC2) با تبیین ۴/۲٪ واریانس، تیمارها را بر اساس فعالیت زیستی خاک و صفات پس از برداشت تفکیک می‌کند. تیمارهای قرار گرفته در ربع بالای سمت راست، به‌ویژه COAB×CND-F، عملکرد زراعی برتر و پایداری بالاتری را نشان می‌دهند.

ارزیابی اقتصادی نشان داد این راهکار با نسبت فایده به هزینه ۱۹/۵۷، سودآوری بالاتری نسبت به سایر تیمارها دارد (Baima et al., 2024). این نتایج تأکید می‌کند که مواد آلی بدون پشتیبانی یک سیستم کوددهی دقیق در خاک‌های آهکی کافی نیستند و بهره‌گیری از رویکرد مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (IPNS) بهترین راهکار برای ارتقای بهره‌وری پایدار این اکوسیستم‌هاست (Srivastava et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داد که ترکیب ورودی‌های آلی زیستی غنی‌شده (شامل قارچ‌های میکوریزا، گوگرد عنصری و باکتری‌های محرک رشد) با کوددهی معدنی مبتنی بر تشخیص ترکیبی عناصر غذایی (CND-F)، راهکاری کارآمد برای بهبود هم‌زمان فعالیت‌های میکروبی و بیوشیمیایی خاک، تعادل تغذیه‌ای، شاخص‌های فیزیولوژیک، عملکرد کمی و کیفی میوه و کاهش اختلالات فیزیولوژیک سیب در خاک‌های آهکی نیمه‌خشک فراهم می‌کند. این تلفیق علاوه بر بهبود چشمگیر بهره‌وری عناصر ماکرو و میکرو و تثبیت ساختار خاک، کارایی جذب آب و عناصر را افزایش داده و موجب ارتقای کیفیت میوه و کاهش ضایعات پس از برداشت شده است. در نهایت، نسبت فایده به هزینه بالا و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، این راهکار را به مدلی پایدار، اقتصادی و قابل تعمیم برای مدیریت باغ‌های میوه در شرایط اقلیمی مشابه تبدیل می‌کند و اهمیت پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت تغذیه‌ای یکپارچه و تشخیصی را در کشاورزی پایدار تأیید می‌نماید.

فهرست منابع

1. Baima, L., Nari, L., Nari, D., Bossolasco, A., Blanc, S. and Brun, F., (2024). Sustainability analysis of apple orchards: Integrating environmental and economic perspectives. *Heliyon*, 10(19).
2. Garcia-Caparrós, P., Ciriello, M., Roupheal, Y. and Giordano, M., (2025). The Role of Organic Extracts and Inorganic Compounds as Alleviators of Drought Stress in Plants. *Horticulturae*, 11(1), p.91.
3. Kuldeep, Singh, A.K., Sajwan, A., Kamboj, A.D., Joshi, G., Gautam, R., Kumar, M., Mani, G., Lal, S. and Kaur, J., (2024). Advances in precision nutrient management of fruit crops. *Journal of Plant Nutrition*, 47(19), pp.3251-3271.
4. Okba, S.K., Abo Ogiela, H.M., Mehesen, A., Mikhael, G.B., Alam-Eldein, S.M. and Tubeileh, A.M., (2025). Influence of compost and biological fertilization with reducing the rates of mineral fertilizers on vegetative growth, nutritional status, yield and fruit quality of 'Anna' apples. *Agronomy*, 15(3), p.662.
5. Sharma, R., (2021). Multivariate diagnosis of nutrient imbalances in apple using compositional nutrient diagnosis and principal component analysis. *Biological Forum – An International Journal* 13(1): 776-781(2021). ISSN:0975-1130
6. Singh, B.K., Hu, H.W., Macdonald, C.A. and Xiong, C., (2025). Microbiome-facilitated plant nutrient acquisition. *Cell Host & Microbe*, 33(6), pp.869-881.
7. Srivastava, A.K., Wu, Q.S., Mousavi, S.M. and Hota, D., (2021). Integrated soil fertility management in fruit crops: An overview. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), pp.413-439.
8. Torres, E., Kalcsits, L., and Nieto, L. G. (2024). Is calcium deficiency the real cause of bitter pit? A review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1383645.
9. Wang, M., Xiang, L., Tang, W., Chen, X., Li, C., Yin, C., and Mao, Z. (2024). Improving apple orchard health: The role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviating replant disease and strengthening soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 196, 105278.
10. Yuan, Q., Qi, Y., Huang, K., Sun, Y., Wang, W. and Lyu, X., (2024). Research Progress in Intelligent Diagnosis Key Technology for Orchard Nutrients. *Applied Sciences*, 14(11), p.4744.

Enhancing Apple Productivity in Calcareous Soils through Integrated Plant Nutrition Systems: Synergistic Effects of Biofertilizers and Precision Fertilization

Mohammad Saeed Tadayon^{1*}, Aziz Majidi², Seyed Mashallah Hoseini³, Sohrab Sadeghi⁴

^{1*}Corresponding Author, 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: m.tadayon@areeo.ac.ir

² Faculty Member, Soil and Water Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran.

³ Faculty Members, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran.

Abstract

Apple production in calcareous soils of semi-arid regions faces major limitations such as nutrient imbalance, low nutrient use efficiency (NUE), and poor soil biological activity. This four-year field study (2021–2024) aimed to evaluate the synergistic effects of Integrated Plant Nutrition Systems (IPNS). In this experiment, two levels of conventional organic amendment (COA) and COA combined with biofertilizers (COAB) were integrated with three mineral fertilization strategies: conventional optimized fertilization (COF), nutrient budget-based fertilization (NB-F), and Compositional Nutrient Diagnosis-guided fertilization (CND-F). The experiment was conducted in a mature commercial apple orchard (*Malus domestica* Borkh. cv. 'Golden Delicious') on calcareous soils in Fars Province. Parameters such as soil microbial activity, nutrient availability, leaf and fruit nutrient composition, vegetative growth, photosynthetic traits, yield, fruit quality, and economic return were evaluated. Results showed that combining COAB with CND-F improved soil biochemical health (e.g., 116% increase in dehydrogenase activity), leaf and fruit nutrient concentrations (40% increase in leaf phosphorus and 78.9% increase in fruit zinc), and enhanced nutrient balance by reducing the Nutrient Balance Index (NBI) by 62.3%. This strategy also improved vegetative growth, net CO₂ uptake, yield (44% increase), postharvest quality, and reduced biennial bearing. Multivariate analyses and interaction effects confirmed the superiority of CND-F over conventional methods, especially when combined with bio-enriched organic inputs. These findings demonstrate the effectiveness of IPNS, particularly precision CND-guided fertilization combined with microbially enriched organics, as a sustainable approach for managing apple orchards in calcareous soils.

Keywords: Nutrient Budgeting, Compositional Nutrient Diagnosis (CND), Apple, Calcareous Soils, Biofertilizer.