



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



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



مدیریت تغذیه ای گیاهان و فناوری‌های نوین؛ راهبردی مؤثر برای کشاورزی پایدار در جهت مدیریت بیماری‌های گیاهی و غنی‌سازی زیستی محصولات کشاورزی محمد ماله‌میر چگینی^{۱*}، داود جوادی مجدد^۲، علی محبوب خمایی^۲، علی لاهیجی^۲

- ۱- کارشناس تحقیقات حاصل‌خیزی خاک و تغذیه گیاه ایستگاه تحقیقات زیتون رودبار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان (mohamadmc71@gmail.com)
- ۲- اعضای هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان

چکیده

کشاورزی پایدار با چالش‌های جدی مانند بیماری‌های گیاهی، وابستگی به آفت‌کش‌های شیمیایی و تغییرات اقلیمی مواجه است. این مطالعه مروری با هدف بررسی راهکارهای نوین مدیریت بیماری‌های گیاهی با تأکید بر نقش عناصر غذایی و فناوری‌های نوین انجام شد. روش تحقیق مبتنی بر تحلیل مطالعات معتبر در زمینه تأثیر عناصر غذایی (نیتروژن، پتاسیم، فسفر و ریزمغذی‌ها) بر مقاومت گیاهان و کاربرد فناوری نانو در کنترل بیماری‌ها بود. نتایج نشان داد که مدیریت بهینه تغذیه گیاهی می‌تواند با فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی گیاه، مقاومت به بیماری‌ها را افزایش دهد. همچنین، فناوری نانو با ارائه راهکارهای کم‌خطر و هدفمند مانند استفاده از نانوذرات فلزی گزینه امیدبخشی برای کاهش مصرف آفت‌کش‌ها است. از سوی دیگر، غنی‌سازی زیستی محصولات از طریق روش‌های پیشرفته برپایه روش‌های ژنتیکی و مصرف انواع کودها و اصلاح‌کننده‌ها می‌تواند به بهبود کیفیت مواد غذایی کمک کند. در مجموع، تلفیق مدیریت تغذیه‌ای، فناوری نانو و روش‌های ژنتیکی می‌تواند راهبرد مؤثری برای دستیابی به کشاورزی پایدار باشد. این رویکردها نه تنها کارایی تولید را افزایش می‌دهند، بلکه با کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی امنیت غذایی پایدار را تضمین می‌کنند. مطالعه حاضر بر ضرورت توسعه تحقیقات کاربردی در این حوزه تأکید دارد.

واژگان کلیدی: نانوذرات، حامل، ویرایش ژنوم، مقاومت و تحمل به بیماری، محرک زیستی

مقدمه

در سال‌های اخیر، اهمیت کشاورزی پایدار به یکی از مهم‌ترین مسائل در کشاورزی تبدیل شده است و بیماری‌های گیاهی همچنان نقش محدودکننده‌ی عمده‌ای در تولید محصولات کشاورزی دارند. بیماری‌های گیاهی همچنان نقش محدودکننده‌ی عمده در تولید محصولات دارند و کنترل این بیماری‌ها با آفت‌کش‌های شیمیایی، نگرانی‌های جدی در مورد ایمنی غذایی، کیفیت محیط زیست و مقاومت آفات ایجاد کرده است. عناصر غذایی می‌توانند بر تحمل بیماری و مقاومت گیاهان در برابر عوامل بیماری‌زا تأثیر بگذارند (Tripathi et al., 2022; Sharma et al., 2022). در کشاورزی پایدار، مدیریت اکوسیستم باید تنوع زیستی و بهره‌وری را حفظ کرده و نیازهای اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی را بدون آسیب به محیط زیست تأمین کند، ضمن اینکه بهبود عملکرد و کیفیت محصول نیز مد نظر قرار گیرد (Camprubi et al., 2007). کشاورزی پایدار با چالش‌های عمده‌ای از جمله رشد جمعیت و تقاضا برای منابع کشاورزی، وابستگی به انرژی فسیلی، تغییرات آب‌وهوایی و جهانی‌شدن مواجه است (Dordas, 2008; Hanson et al., 2007). این چالش‌ها، توسعه سیستم‌های مدیریتی پایدار را ضروری ساخته است. برای تأمین نیازهای غذایی جمعیت رو به رشد، باید راهکارهای جایگزینی برای کنترل بیماری‌های گیاهی یافت که همزمان با افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول، به محیط زیست نیز آسیب نرسانند (Kopecky et al., 2021; Batish et al., 2007). عناصر غذایی برای رشد گیاهان و میکروارگانیسم‌ها ضروری بوده و نقش مهمی در کنترل بیماری‌های گیاهی دارند. مدیریت صحیح این عناصر در کشاورزی پایدار مورد توجه ویژه قرار گرفته است (Tripathi et al., 2022; Gupta et al., 2017; Datnoff et al., 2007). گیاهان در طول تکامل، سیستم‌های دفاعی چندلایه‌ای برای مقابله با پاتوژن‌ها توسعه داده‌اند (Sun et al., 2020). مواد معدنی نیز با تأثیرپذیری از عوامل محیطی مانند نور، رطوبت و دما، در حفظ سلامت گیاهان نقش حیاتی ایفا می‌کنند (Velasquez et al., 2018). دمای بالای خاک، میزان نیتروژن قابل دسترس و متابولیسم گیاه را افزایش می‌دهد که منجر به جذب بیشتر نیتروژن می‌شود (Lukac et al., 2011; Dong et al., 2001). در شرایط کم‌آبی، نیاز گیاه به پتاسیم برای مقابله با تنش اکسیداتیو افزایش می‌یابد (Wang Y. et al., 2013). همچنین نور شدید باعث کاهش دسترسی به فسفر و تحریک رشد ریشه می‌شود (Wen et al., 2017). مواد معدنی نقش ساختاری و تنظیم‌کننده در محافظت و غنی‌سازی زیستی محصولات کشاورزی دارند. لذا هدف این پژوهش، بررسی نقش عناصر غذایی و فناوری نوین در مقابله با بیماری‌های گیاهی و غنی‌سازی زیستی محصولات با رویکرد کشاورزی پایدار می‌باشد.

مواد و روش

این مطالعه به روش مروری نظام‌مند (Systematic Review) و با جمع‌آوری، تحلیل و ترکیب یافته‌های پژوهش‌های معتبر انجام شده است. استراتژی جستجو بر اساس کلیدواژه‌های فارسی و انگلیسی اصلی شامل تغذیه معدنی و بیماری‌های گیاهی، نانوذرات در مدیریت بیماری‌های گیاهی، مقاومت القایی و غنی‌سازی زیستی طراحی شد. جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر علمی از جمله ScienceDirect و Google Scholar در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ انجام گرفت. تمرکز اصلی بر مقالات منتشر شده در دهه اخیر (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴) بود تا یافته‌ها از به‌روزترین مبانی علمی برخوردار باشند. معیارهای ورود به این مطالعه شامل مقالات اصلی و مقالات مروری که در مجلات معتبر بین‌المللی چاپ و به‌طور مستقیم به بررسی نقش عناصر غذایی (ماکرو و میکرو) در مقاومت به بیماری‌های گیاهی، مکانیسم عمل نانوذرات در کنترل بیماری‌های گیاهی و روش‌های غنی‌سازی زیستی می‌پرداختند بود. در نهایت، داده‌های استخراج‌شده از منابع منتخب، به‌صورت کیفی تحلیل و با رویکردی یکپارچه و در راستای اهداف مطالعه، تلفیق و ارائه گردیدند.

تغذیه معدنی گیاه و مقاومت در برابر بیماری: پیوندی مهم برای حفاظت پایدار از محصولات کشاورزی

عناصر معدنی با مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم، مقاومت و تحمل گیاهان در برابر بیماری‌ها را تقویت می‌کنند. در مکانیسم مستقیم، این عناصر با فعال کردن آنزیم‌های کلیدی، سنتز ترکیبات دفاعی مانند کالوز، لیگنین و

فیتوالکسین‌ها را افزایش می‌دهند. به‌طور غیرمستقیم نیز با تغییر محیط ریزوسفر (مانند تنظیم pH، تغییر ترشحات ریشه و فعالیت میکروبی) شرایط را به نفع گیاه تغییر می‌دهند (Datnoff et al., 2007). اگرچه مقاومت (توانایی محدود کردن عامل بیماری‌زا) و تحمل (حفظ رشد علیرغم آلودگی) پایه ژنتیکی دارند، اما هر دو به شدت تحت تأثیر وضعیت عناصر غذایی قرار می‌گیرند (Dordas, 2008). اهمیت تغذیه معدنی در مدیریت این بیماری‌های گیاهی را می‌توان در سه زمینه اصلی تأثیر کوددهی بر شدت بیماری، نقش تغذیه معدنی در ایجاد مقاومت گیاهی، و اثر کمبود یا وجود مواد مغذی خاص بر بیماری با توجه به مرحله رشد گیاه و شرایط محیطی بررسی کرد (Meena et al., 2015). مدیریت عوامل زراعی و تغذیه‌ای نقش کلیدی در کنترل بیماری‌های گیاهی دارد. عواملی مانند تاریخ کاشت، تناوب زراعی، آبیاری، مدیریت خاک و به‌ویژه مصرف کودها و اصلاح کننده‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با تأثیر بر فیزیولوژی گیاه و محیط ریزوسفر، شدت بیماری را کاهش دهند. استفاده بهینه از کودها، به‌ویژه در شرایط کمبود عناصر، با بهینه‌سازی رشد گیاه، مقاومت آن را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، آلودگی به عوامل بیماری‌زا می‌تواند جذب و انتقال عناصر غذایی را مختل کرده و علائم کمبود را تشدید کند، به‌طوری‌که این اثر در صورت پایین بودن سطح عناصر غیرمتحرک بحرانی‌تر می‌شود. بنابراین، مدیریت یکپارچه تغذیه و شیوه‌های زراعی یک راهبرد اساسی برای کنترل بیماری‌ها محسوب می‌شود (Sharma et al., 2022; Wang et al., 2020; Gupta et al., 2017).

عناصر غذایی پر مصرف اولیه و ثانویه با تحریک آبشار سیگنال‌دهی دفاعی، افزایش بیان ژن‌های دفاع، سنتز پروتئین‌های مرتبط با بیماری‌زایی^۱ (PR)، تقویت بافت‌ها در برابر تخریب آنزیمی، کاهش رقابت برای مواد مغذی با پاتوژن‌ها، تشکیل سدهای دفاعی ساختاری و تنظیم هدایت روزنه‌ای، موجب کاهش بارگذاری پاتوژن‌های مهاجم و افزایش سلامت گیاه می‌شوند (Tripathi et al., 2022). عناصر غذایی کم‌مصرف از طریق مکانیسم‌های اختصاصی، مقاومت گیاهان در برابر عوامل بیماری‌زا را افزایش می‌دهند. روی با فعال‌سازی سیستم‌های سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن، سیلیسیم با تقویت دیواره سلولی و افزایش سنتز پروتئین‌های PR و فیتوالکسین، مگنیز از طریق فعال‌سازی مسیر فنیل پروپانوئید، آهن با کاتالیز گونه‌های فعال اکسیژن و سنتز سیدروفورهای مهارکننده رشد قارچ، بور با تنظیم نفوذپذیری غشا و تقویت ساختار دیواره سلولی، و مس با کاهش تخریب و تقویت لیگنین و غشای سلولی، در مجموع سیستم دفاعی گیاه را تقویت می‌کنند (Tripathi et al., 2022). این عناصر با تأثیر بر سنتز ترکیبات دفاعی مانند لیگنین و فنول‌ها، موجب القای مقاومت سیستمیک^۲ شده که از طریق تشکیل موانع ساختاری، تولید پروتئین‌های مرتبط با بیماری‌زایی و شرطی‌سازی گیاهان، یک استراتژی مؤثر برای مدیریت بیماری‌ها و کاهش مصرف آفت‌کش‌ها محسوب می‌شود (Sharma et al., 2022). یک ماده مغذی خاص ممکن است اثرات متضادی بر بیماری‌های مختلف و در محیط‌های مختلف داشته باشد، به عنوان مثال، یک ماده مغذی مشابه ممکن است بروز یک بیماری را افزایش دهد اما در عین حال ممکن است بروز سایر بیماری‌ها را کاهش دهد (Agrios, 2005). جدول (۱) اثرات عناصر غذایی بر واکنش‌های بیماری در برخی از محصولات کشاورزی را نشان می‌دهد (Tripathi et al., 2022; Datnoff et al., 2007).

جدول ۱- اثرات عناصر غذایی بر واکنش‌های بیماری در برخی از محصولات کشاورزی

عناصر غذایی	محصول	بیماری	اثرات بر روی واکنش‌های بیماری با تأمین عنصر غذایی
	گوجه فرنگی	سوختگی زودرس	تامین بالای نیتروژن، شدت بیماری را کاهش می‌دهد.
		کیک خاکستری	تامین بالای نیتروژن، مقاومت گیاه را افزایش می‌دهد.
نیتروژن	سیب‌زمینی	سوختگی زودرس	تامین بالای نیتروژن، شدت بیماری را کاهش می‌دهد.
	برنج	بلاست	تامین بالای نیتروژن، شدت بیماری را افزایش می‌دهد.
	گندم	زنگ نواری	تامین نیتروژن، شدت عفونت را کاهش می‌دهد.

¹ Pathogenesis-related (PR) protein

² induced systemic resistance (SIR)

افزایش عرضه پتاسیم شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	سوختگی برگ	گندم	
افزایش عرضه پتاسیم شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	زنگ برگ	برنج	پتاسیم
کاهش شدت بیماری با افزایش عرضه پتاسیم.	سوختگی غلاف	سویا	
کامبود پتاسیم حساسیت به بیماری را افزایش می‌دهد.	سوختگی ساقه و غلاف	بادام زمینی	
کاهش موارد بیماری با افزایش عرضه پتاسیم.	لکه برگی تیکا	سیب‌زمینی	
افزایش شدت بیماری با افزایش عرضه پتاسیم.	جرب	خیار	فسفر
کاربرد فسفر شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	سفیدک پودری	برنج	
کاربرد فسفر شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	سوختگی باکتریایی برگ	گندم	
کاربرد فسفر ممکن است شدت بیماری‌ها را افزایش دهد.	سیاهک پرچی	سویا	کلسیم
کاربرد کلسیم شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	پوسیدگی ساقه فیتوفتورا	چلیپاییان	
میزان کافی کلسیم در خاک، میزان بروز بیماری را کاهش می‌دهد.	ریشه چماقی	انگور	گوگرد
کاربرد گوگرد شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	سفیدک پودری	کلزا	
کاربرد گوگرد شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	لکه برگی	برنج	منیزیم
کاربرد منیزیم شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	لکه قهوه‌ای	ذرت	
کاربرد منیزیم شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	کوتولگی ذرت	چلیپاییان	
کاربرد بور شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	ریشه چماقی	انگور	بور
کاربرد بور مقاومت به بیماری را افزایش می‌دهد.	سرخشکیدگی	گوجه‌فرنگی	
کاربرد بور شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	ویروس موزاییک گوجه‌فرنگی	گندم	روی
کاربرد روی شدت بیماری را کاهش می‌دهد.	سوختگی فوزاریومی سنبله	موز	
کاربرد روی مقاومت به بیماری را افزایش می‌دهد.	پژمردگی موز	گوجه‌فرنگی	مس
کاربرد مس میزان بروز بیماری را کاهش می‌دهد.	شانکر باکتریایی	گندم	
کاربرد مس باعث سرکوب بیماری می‌شود.	سفیدک پودری	سیب‌زمینی	منگنز
کاربرد منگنز میزان بروز بیماری را کاهش می‌دهد.	جرب	چمن	
کاربرد منگنز مقاومت به بیماری را افزایش می‌دهد.	پاخوره	سیب	آهن
کاربرد آهن، مقاومت به بیماری را افزایش می‌دهد.	شانکر	موز	
کاربرد آهن، شدت به بیماری را کاهش می‌دهد.	آنتراکنوز موز	برنج	سیلیکون
کاربرد سیلیسیوم، مقاومت به بیماری را افزایش می‌دهد.	بلاست	چمن	
کاربرد سیلیسیوم، مقاومت به بیماری را افزایش می‌دهد.	لکه قهوه‌ای		
کاربرد سیلیسیوم، شدت به بیماری را کاهش می‌دهد.	سفیدک پودری		

فناوری‌های نوین راهبردی برای کشاورزی پایدار

استفاده از نانوذرات در مدیریت بیماری‌های گیاهی

هر ساله ۲۰ تا ۴۰ درصد از محصولات کشاورزی به دلیل آفات و عوامل بیماری‌زای گیاهی از بین می‌روند. مدیریت فعلی بیماری‌های گیاهی عمدتاً به سموم دفع آفات سمی متکی است که می‌توانند برای انسان و محیط‌زیست مضر باشند. فناوری نانو می‌تواند مزایایی مانند کاهش سمیت، افزایش ماندگاری و افزایش حلالیت سموم کم محلول در آب را ارائه دهد که همگی می‌توانند تأثیرات مثبت زیست‌محیطی داشته باشند. سه رویکرد اصلی استفاده از نانوذرات در مدیریت بیماری‌های گیاهی شامل: (۱) استفاده از نانوذراتی که به تنهایی به‌عنوان محافظ عمل می‌کنند: نانوذرات فلزی مانند آلومینیوم، نقره (به‌ویژه انواع سنتز شده به‌روش سبز)، مس، اکسید روی، طلا و دی‌اکسید تیتانیوم به‌طور

گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Worrall et al., 2018; Fu et al., 2020). این نانوذرات در آزمایش‌ها توانایی خود را در مهار قارچ‌های بیماری‌زای مهمی مانند *Alternaria alternata* و *Sclerotinia sclerotiorum* و همچنین سرکوب کامل ویروس‌هایی مانند ویروس روزت sun-hemp در لوبیا نشان داده‌اند (Elbeshehy et al., 2015; Jain et al., 2014). نانوذراتی مانند دی‌اکسید تیتانیوم و مس علاوه بر کاربردهای کودی همراه با نانوذرات نقره محافظت در برابر باکتری‌ها و غیرفعال‌سازی ویروس‌ها را نیز ایجاد کرده‌اند و نانوذرات آلومینیوم به عنوان گرد حشره‌کش پوششی مورد بررسی قرار گرفته است (Worrall et al., 2018; Fu et al., 2020, Kah and Hofmann, 2014). در کنار این مواد، نانوذرات پلیمری و زیستی مانند کیتوزان به دلیل دارا بودن ویژگی‌های مطلوبی از قبیل زیست‌تخریب‌پذیری، سمیت کم برای انسان و فعالیت ضد میکروبی گسترده، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات نه تنها مقاومت در برابر ویروس‌های مختلف را در گیاهانی مانند یونجه و سیب‌زمینی القا کرده‌اند، بلکه مکانیسم اثر آنها شامل آگلوتیناسیون، اختلال در غشای سلولی، مهار فعالیت H^+ -ATPase، مهار تولید سم و رشد میکروبی، مهار سنتز RNA پیام‌رسان و پروتئین‌ها همراه با انسداد جریان مواد مغذی می‌باشد (Hoang et al., 2022; Xue et al., 2021; Worrall et al., 2018). نانوذرات به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان حامل‌های هوشمند برای رهایش کنترل‌شده و محافظت‌شده مولکول‌های فعال کشاورزی مانند آفت‌کش‌ها و القاکننده‌های تداخل RNA مورد استفاده قرار می‌گیرند (Xue et al., 2021; Worrall et al., 2018). به‌طور خلاصه، نانوذرات سیلیس به‌ویژه در فرم‌های مزومتخلخل و توخالی متخلخل به‌دلیل ساختار متخلخل و کنترل‌پذیر خود، امکان کپسوله‌سازی و محافظت از مولکول‌های فعال در برابر تخریب نوری ماوراء بنفش و ارائه رهایش پایدار را فراهم می‌کنند. نانوذرات کیتوزان نیز به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات با وجود حلالیت اولیه کم، از طریق اصلاح شیمیایی گروه‌های عاملی خود بهبود یافته و به دلیل چسبندگی عالی به سطوح گیاهی، زمان تماس و جذب را افزایش می‌دهند. نانوذرات لیپیدی جامد^۱ نیز گزینه دیگری هستند که یک ماتریس لیپیدی برای به دام انداختن مواد فعال لیپوفیلک بدون نیاز به حلال‌های آلی فراهم کرده و امکان رهایش کنترل‌شده را ارائه می‌دهند؛ اگرچه چالش‌هایی مانند راندمان بارگذاری پایین و خطر نشت مواد وجود دارد. علاوه بر این، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای^۲ به‌عنوان نانوحامل‌های معدنی، با تجزیه در شرایط اسیدی و تسهیل انتقال مواد از طریق دیواره سلولی گیاه، یک سیستم رهایش پاسخگو به محرک‌های محیطی را ایجاد می‌کنند. به‌طور کلی، این نانوحامل‌ها با بهبود پایداری، افزایش کارایی و کاهش اتلاف مواد شیمیایی، پتانسیل بالایی برای تحول در مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهی دارند (Hoang et al., 2022; Xue et al., 2021; Fu et al., 2020; Worrall et al., 2018). به عنوان محرک‌های زیستی که ایمنی ذاتی گیاه را القا می‌کنند مطالعات نشان می‌دهند که نانوذراتی مانند نقره (AgNPs)، اکسید منیزیم (MgO)، سلنیوم، مس و اکسید سربیم (CeO_2) می‌توانند با فعال کردن مسیرهای سیگنال-دهی دفاعی (مانند اسید سالیسیلیک و جاسمونیک) و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن^۳ (ROS)، آزیم‌های دفاعی (مانند-1,3-β-گلوکاناز) و ترکیبات فنلی، مقاومت سیستمیک گیاه در برابر پاتوژن‌هایی مانند *Alternaria solani* و *Ralstonia solanacearum* را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. نکته حائز اهمیت این است که فرم نانومقیاس این مواد در مقایسه با اشکال معمولی (فله) آنها، در دوزهای بسیار پایین‌تر (تا ۱۰ برابر کمتر) مؤثرتر عمل می‌کنند که نشان‌دهنده برتری ذاتی اثرات در اندازه نانو است. به عنوان مثال، نانوذرات کیتوزان در دوزی بسیار کمتر از کیتوزان معمولی، با تعامل بهتر با سلول‌های گیاهی و تعدیل مسیر اکسید نیتریک، ایمنی قوی‌تری القا کردند. اگرچه این محرک‌های نانومقیاس پتانسیل عظیمی برای جایگزینی آفت‌کش‌های شیمیایی دارند، اما تعیین دقیق محدوده غلظت سودمند و بی‌خطر برای جلوگیری از سمیت گیاهی و همچنین درک مکانیسم‌های مولکولی دقیق و ارزیابی پایداری اثرات آنها در درازمدت، نیازمند پژوهش‌های گسترده‌تر است (Fu et al., 2020).

¹ Solid lipid nanoparticles (SLN)

² Layered double hydroxides (LDHs)

³ Reactive oxygen species (ROS)

رویکردهای مختلف جهت غنی‌سازی زیستی محصولات کشاورزی

با افزایش جمعیت جهان از ۳/۲ میلیارد نفر در سال ۱۹۳۹ به بیش از ۹/۷ میلیارد نفر در حال حاضر، تأمین امنیت غذایی و رفع سوءتغذیه به یک چالش جهانی تبدیل شده است (Folberth et al., 2020). گزارش‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۸۲۰ میلیون نفر از گرسنگی رنج می‌برند و حدود دو میلیارد نفر نیز با کمبود عناصر غذایی کم‌مصرف (مانند آهن، روی و ویتامین A) مواجه هستند که این امر منجر به افزایش بروز بیماری‌هایی مانند کم‌خونی و حتی افزایش حساسیت به بیماری‌های عفونی مانند کووید-۱۹ شده است (UNEP, 2021; Akhtar et al., 2021). از آنجا که محصولات اصلی غذایی مانند گندم، برنج و ذرت غالباً فقیر از این ریزمغذی‌ها هستند (Wakeel et al., 2018). راهکار "غنی‌سازی زیستی" به عنوان یک استراتژی مقرون‌به‌صرفه و پایدار برای افزایش فراهمی زیستی عناصر غذایی در بخش‌های خوراکی گیاهان مطرح شده است (Koç and Karayığit, 2022). رویکردهای مختلف جهت غنی‌سازی زیستی برای بهبود ارزش غذایی گیاهان، غلبه بر مشکلات تغذیه‌ای در شکل (۱) ارائه شده است (Prasad, 2022). غنی‌سازی زیستی ژنتیکی مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته ویرایش ژنوم، به‌ویژه تکرارهای کوتاه پالیندرمیک با فاصله منظم خوشه‌ای باکتریایی^۱ (CRISPR-Cas9) به‌عنوان راهبردی امیدوارکننده برای حل مشکل کمبود عناصر غذایی کم‌مصرف در محصولات کشاورزی مطرح شده است (Koç and Karayığit, 2022). این فناوری با دستکاری دقیق بیان ژن‌های تنظیم‌کننده هموستاز فلزات و پروتئین‌های حامل، امکان افزایش محتوای ریزمغذی‌ها و بهره‌وری محصولات را بدون نیاز به فرآیندهای سنتی و وقت‌گیر تغییر شکل و کشت بافت فراهم می‌کند (Malik and Maqbool, 2020). در سطح جهانی، این رویکرد که تحت عنوان تکنیک‌های جدید اصلاح ژنتیکی^۲ (nGMs) شناخته می‌شود، به‌طور فزاینده‌ای در تحقیقات پایه و کاربردی برای توسعه محصولات کشاورزی با ویژگی‌های بهبودیافته به ویژه ویرایش ژنوم به کار می‌رود (Prasad, 2022; Eckerstorfer et al., 2019).

نتیجه‌گیری

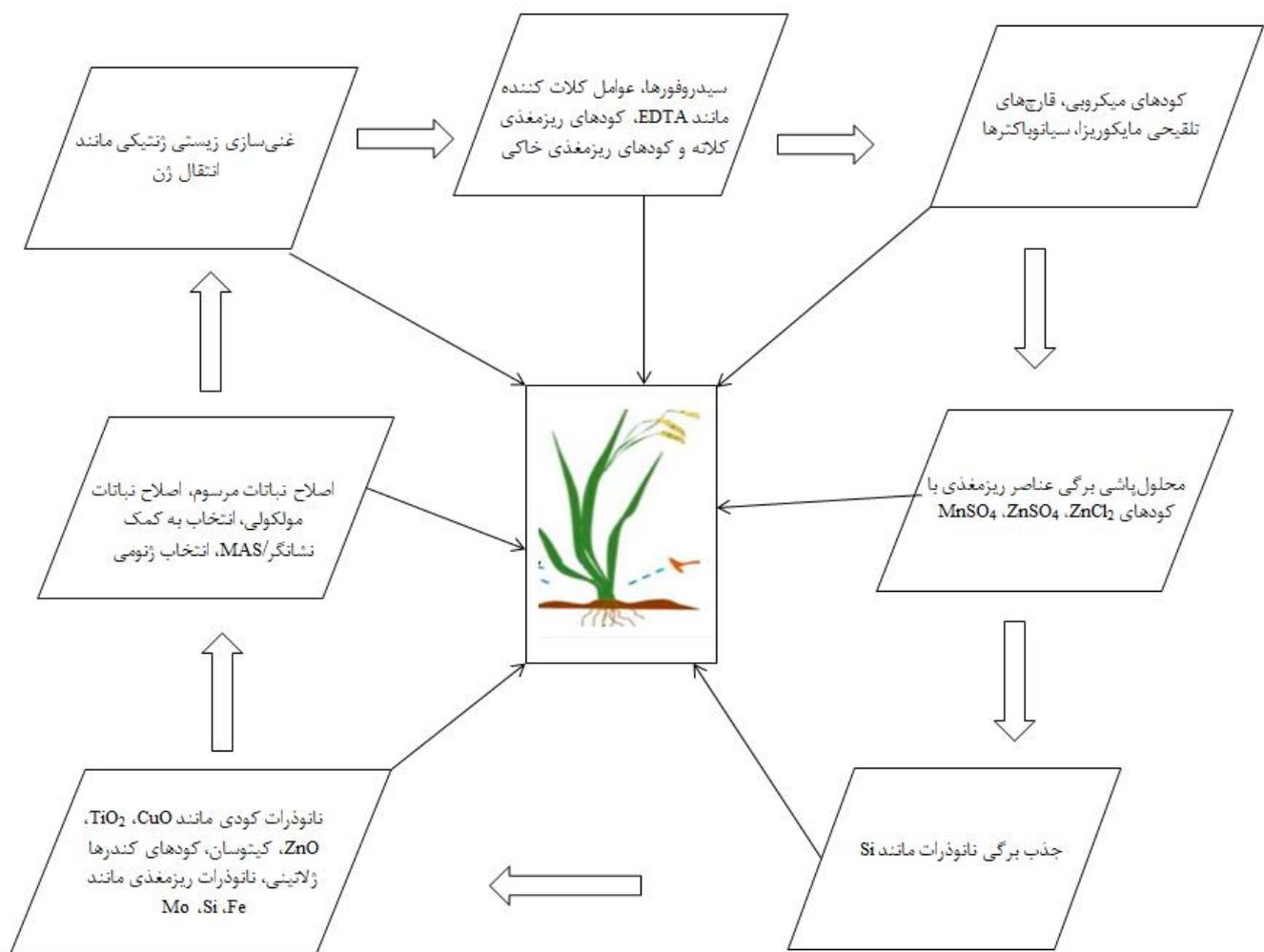
نتایج این مطالعه مروری به وضوح نشان می‌دهد که مدیریت هوشمند تغذیه گیاهی نه تنها یک ضرورت برای رشد مطلوب گیاه محسوب می‌شود، بلکه قدرتمندترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین استراتژی برای تقویت سیستم ایمنی ذاتی گیاهان در برابر پاتوژن‌هاست. عناصر غذایی ماکرو و میکرو، از طریق مکانیسم‌های مستقیم مانند تقویت دیواره سلولی و سنتز ترکیبات دفاعی، و مکانیسم‌های غیرمستقیم مانند تعدیل محیط ریزوسفر، پایه‌ای اساسی برای ایجاد «سلامتی» در گیاه فراهم می‌کنند. در این راستا، فناوری نانو با ارائه نانوذراتی مانند نقره، اکسید روی و کیتوزان، یک انقلاب در مدیریت بیماری‌ها ایجاد کرده است. این فناوری امکان مقابله هدفمند و کم‌خطر با پاتوژن‌ها را فراهم می‌کند و با کارایی بالا در دوزهای بسیار پایین، وابستگی به سموم سنتی را به حداقل می‌رساند. نانوذرات هم به عنوان عامل ضد میکروبی مستقیم و هم به عنوان حامل‌های هوشمند برای رهایش کنترل‌شده مواد فعال، نقش خود را به اثبات رسانده‌اند. همزمان، غنی‌سازی زیستی محصولات کشاورزی، به‌ویژه با استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند ویرایش ژنوم پاسخی استراتژیک به معضل جهانی «گرسنگی پنهان» است. این رویکرد، ظرفیت آن را دارد که محصولاتی با ارزش غذایی بالاتر و مقاومت بهبودیافته ابداع کند. در نهایت، پیام کلیدی این تحلیل آن است که هیچ یک از این راهکارها به تنهایی نمی‌توانند پاسخگوی کامل چالش‌های پیچیده کشاورزی پایدار باشند. آینده کشاورزی در گرو تلفیق هوشمندانه این سه حوزه مدیریت تغذیه‌ای، فناوری نانو و مهندسی ژنتیک در قالب یک سیستم مدیریتی یکپارچه است. چنین نظامی قادر خواهد بود تا ضمن افزایش تولید و تضمین امنیت غذایی، سلامت اکوسیستم‌ها و مصرف بهینه منابع را نیز به همراه داشته باشد.

چالش‌های آینده و تحقیقات پیشنهادی:

¹ bacterial Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (CRISPR-Cas9)

² new genetic modification technique (nGMs)

علیرغم دستاوردهای قابل توجه در حوزه‌های مدیریت تغذیه‌ای، فناوری نانو و غنی‌سازی زیستی، چالش‌های متعددی در مسیر توسعه و تجاری‌سازی این راهکارها در مقیاس وسیع وجود دارد. اول، بهینه‌سازی و استانداردسازی نانوذرات از نظر دوز، غلظت سودمند و بی‌خطر ضروری است تا از سمیت گیاهی و اثرات نامطلوب اکوسیستمی جلوگیری شود. دوم، انجام مطالعات میدانی بلندمدت در شرایط اقلیمی و خاکی متنوع برای ارزیابی کارایی و پایداری این فناوری‌ها در محیط‌های واقعی مورد نیاز است. سوم، بررسی مکانیسم‌های مولکولی و برهمکنش‌های چندعامله به‌ویژه نقش اسفنگولیپیدها در تنظیم ایمنی گیاهان و پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی، از زمینه‌های پژوهشی امیدبخش محسوب می‌شود. چهارم، توسعه نانوحامل‌های هوشمند با قابلیت رهایش کنترل‌شده مانند نانوذرات مزومتخلخل سیلیس، کیتوزان، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای و پاسخگویی به محرک‌های محیطی می‌تواند تحول بزرگی در مدیریت هدفمند بیماری‌ها ایجاد کند. پنجم، به‌کارگیری فناوری‌های ویرایش ژنوم مانند (CRISPR-Cas9) برای غنی‌سازی زیستی پیشرفته و بهبود همزمان مقاومت به بیماری‌ها نیازمند ارزیابی دقیق ایمنی زیستی و ملاحظات حقوقی-مقرراتی است. ششم، یکپارچه‌سازی این راهکارها در قالب سامانه‌های هوشمند با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، به بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و افزایش پایداری کمک شایانی می‌کند. هفتم، انجام تحلیل‌های چرخه عمر و ارزیابی اقتصادی برای تعیین مقرون به‌صرفه بودن و پایداری زیست‌محیطی این فناوری‌ها در مقیاس بزرگ ضروری است.



شکل ۱- مهم‌ترین رویکردها و فناوری‌های کاربردی برای غنی‌سازی زیستی محصولات کشاورزی

References

- Agrios, G. (2005). *Plant Pathology*, 5th Edn. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Akhtar, S., Das, J. K., Ismail, T., Wahid, M., Saeed, W., and Bhutta, Z. A. (2021). Nutritional Perspectives for the Prevention and Mitigation of COVID-19. *Nutr. Rev.* 79 (3), 289–300.
- Arnon DI, Stout PR (1939) The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper.
- Batish D.R., Singh H.P., Setia N., Kohli R.K., Kaur S., Yadav S.S. (2007) Alternative control of littleseed canary grass using eucalypt oil, *Agron. Sustain. Dev.* 27, 171–177.
- Camprubi, A., Estaun, V., El Bakali, M. A., Garcia-Figueres, F., and Calvet, C. (2007). Alternative strawberry production using solarization, metham sodium and beneficial soil microbes as plant protection methods. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 179–184.
- Datnoff, L. E., Elmer, W. H., and Huber, D. M. (2007). *Mineral Nutrition and Plant Disease*. St. Paul Davis: APS Press.
- Dong, S., Scagel, C. F., Gheng, L., Fuchigami, L. H., and Rygiewicz, P. (2001). Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. *Tree Physiol.* 21, 541–547.
- Dordas, C. (2008). Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for sustainable development*, 28(1), 33-46.
- Eckerstorfer, M. F., Engelhard, M., Heissenberger, A., Simon, S., and Teichmann, H. (2019). Plants Developed by New Genetic Modification Techniques- Comparison of Existing Regulatory Frameworks in the EU and Non-EU Countries. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 7, 26.
- Elbeshehy, E. K., Elazzazy, A. M., & Aggelis, G. (2015). Silver nanoparticles synthesis mediated by new isolates of *Bacillus* spp., nanoparticle characterization and their activity against Bean Yellow Mosaic Virus and human pathogens. *Frontiers in microbiology*, 6, 453.
- Folberth C, Khabarov N, Balkovič J, Skalský R, Visconti P, Ciaia P, Janssens IA, Penuelas J, Obersteiner M (2020) The global cropland-sparing potential of high-yield farming. *Nat Sustain* 3:281–289.
- Fu Lin, F. L., Wang ZhenYu, W. Z., Dhankher, O. P., & Xing BaoShan, X. B. (2020). Nanotechnology as a new sustainable approach for controlling crop diseases and increasing agricultural production.
- Gupta, N., Debnath, S., Sharma, S., Sharma, P., & Purohit, J. (2017). Role of nutrients in controlling the plant diseases in sustainable agriculture. *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture: Volume 2: Applications in Crop Production and Protection*, 217-262.
- Hanson J.D., Liebig M.A., Merrill S.D., Tanaka D.L., Krupinsky J.M., Stott D.E. (2007) Dynamic cropping systems: increasing adaptability amid an uncertain future, *Agron. J.* 99, 939–943.
- Hoang, N. H., Le Thanh, T., Sangpueak, R., Treekoon, J., Saengchan, C., Thepbandit, W., ... & Buensanteai, N. (2022). Chitosan nanoparticles-based ionic gelation method: a promising candidate for plant disease management. *Polymers*, 14(4), 662.
- Jain, D., & Kothari, S. L. (2014). Green synthesis of silver nanoparticles and their application in plant virus inhibition. *J Mycol plant pathol*, 44(1), 21-24.
- Kah, M., & Hofmann, T. (2014). Nanopesticide research: current trends and future priorities. *Environment international*, 63, 224-235.
- Koç, E., and Karayigit, B. (2022). Assessment of Biofortification Approaches Used to Improve Micronutrient-Dense Plants that Are a Sustainable Solution to Combat Hidden Hunger. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 22, 475–500.
- Kopecky, J., Rapoport, D., Sarikhani, E., Stovicek, A., Patmanova, T., & Sagova-Mareckova, M. (2021). Micronutrients and soil microorganisms in the suppression of potato common scab. *Agronomy*, 11(2), 383.
- Lukac, M., Calfapietra, C., Lagomarsino, A., and Loreto, F. (2011). Global climate change and tree nutrition: effects of elevated CO2 and temperature. *Tree Physiol.* 30, 1209–1220.
- Lusser, M., Parisi, C., Plan, D., and Rodríguez-Cerezo, E. (2012). Deployment of New Biotechnologies in Plant Breeding. *Nat. Biotechnol.* 30, 231–239.
- Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International journal of molecular sciences*, 17(7), 996.
- Malik, K. A., and Maqbool, A. (2020). Transgenic Crops for Biofortification. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 571402.

- Meena, V. S., Meena, S. K., Verma, J. P., Meena, R. S., and Ghosh, B. N. (2015). The needs of nutrient use efficiency for sustainable agriculture. *J Clean Prod.* 102, 562–563. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.044
- Prasad, R. (2022). Cytokinin and its key role to enrich the plant nutrients and growth under adverse conditions-an update. *Frontiers in Genetics*, 13, 883924.
- Sharma, J., Dua, V. K., Sharma, S., Choudhary, A. K., Kumar, P., & Sharma, A. (2022). Role of plant nutrition in disease development and management. In *Sustainable Management of Potato Pests and Diseases* (pp. 83-110). Singapore: Springer Singapore
- Sun, Y., Wang, M., Mur, Luis, A., Shen, Q., and Guo, S. (2020). Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences international journal of molecular sciences. *Int. J. Mol. Sci.* 21:572.
- Tripathi, R., Tewari, R., Singh, K. P., Keswani, C., Minkina, T., Srivastava, A. K., ... & Sansinenea, E. (2022). Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop protection. *Frontiers in Plant science*, 13, 883970.
- UNEP (2021). Food Systems Hold Key to Ending World Hunger. Available at: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/food-systems-hold-key-ending-world-hunger> (Accessed Sept 29, 2021).
- Velasquez, A. C., Castroverde, C., and He, S. Y. (2018). Plant-pathogen warfare under changing climate conditions. *Curr. Biol.* 28, 619–634.
- Wakeel, A., Farooq, M., Bashir, K., & Ozturk, L. (2018). Micronutrient malnutrition and biofortification: recent advances and future perspectives. *Plant micronutrient use efficiency*, 225-243.
- Wang, Y., Loake, G. J., and Chu, C. (2013). Cross-talk of nitric oxide and reactive oxygen species in plant programmed cell death. *Front. Plant Sci.* 4:314.
- Wang, Z., Hassan, M. U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F., and Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Front. Plant Sci.* 10:1727.
- Wen, Z., Li, H., Shen, J., & Rengel, Z. (2017). Maize responds to low shoot P concentration by altering root morphology rather than increasing root exudation. *Plant and Soil*, 416(1), 377-389.
- Worrall, E. A., Hamid, A., Mody, K. T., Mitter, N., & Pappu, H. R. (2018). Nanotechnology for plant disease management. *Agronomy*, 8(12), 285.
- Xue, X., Geng, T., Liu, H., Yang, W., Zhong, W., Zhang, Z., ... & Chu, Z. (2021). Foliar application of silicon enhances resistance against *Phytophthora infestans* through the ET/JA-and NPR1-dependent signaling pathways in potato. *Frontiers in Plant Science*, 12, 609870.

Plant nutritional management and new technologies; an effective strategy for sustainable agriculture for the management of plant diseases and biofortification of agricultural products

Mohammad malehmir chegini^{1*}, Davod javadi mojjaddad², Ali mahbob khomami², Ali lahiji²

- 1- Soil fertility and plant nutrition research expert, rudbar olive research station, agricultural and natural resources research and education center of guilan province (mohamadmc71@gmail.com)
- 2- Faculty members of the agricultural and natural resources research and education center of guilan province

Abstract

Sustainable agriculture faces significant challenges, including plant diseases, reliance on chemical pesticides, and climate change. This review study aimed to investigate innovative strategies for managing plant diseases, focusing on the role of nutritional elements and novel technologies. The research methodology was based on analyzing credible studies concerning the effects of plant nutrients (nitrogen, potassium, phosphorus, and micronutrients) on plant resistance and the application of nanotechnology in disease control. The results indicated that optimized plant nutrition management can enhance disease resistance by activating plant defense mechanisms. Furthermore, nanotechnology offers promising, low-risk, and targeted solutions, such as using metallic nanoparticles, to reduce pesticide use. On the other hand, biofortification of crops through advanced methods based on genetic approaches and the application of various fertilizers and modifiers can contribute to improved food quality. In conclusion, integrating nutritional management, nanotechnology, and genetic methods can form an effective strategy for achieving sustainable agriculture. These approaches not only increase production efficiency but also ensure sustainable food security by reducing environmental pollution. The present study underscores the necessity for further applied research in this field.

Keywords: Nanoparticles, Carrier, Genome editing, Disease resistance and tolerance, Biostimulant