

نانوفناوری به عنوان ابزاری قدرتمند در علوم گیاهی: پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای اخیر

مهرناز میرزایی^۱، فاطمه اسلامی چلندر^۲، زهرا کمایستانی^۳، بابک کرمی^۴، یاسمن ارمان^۵

۱: دانشجوی کارشناسی گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

Email:iranscience20@gmail.com

۲: دانشجوی کارشناسی گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

۳: دانشجوی کارشناسی گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

۴: استادیار گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

۵: دانشجوی کارشناسی گروه صنایع غذایی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

چکیده

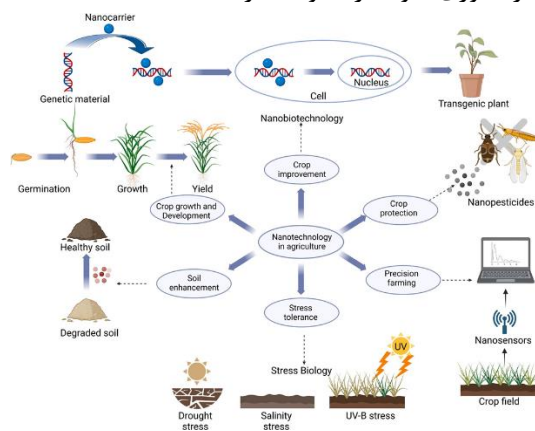
در شرایط اضطراری اقلیمی جهانی امروز، روش‌های کشاورزی به طور فزاینده‌ای غیرپایدار شده‌اند. تعدادی از مسائل نگران‌کننده وجود دارد که نیاز به اقدام فوری دارند، از جمله فرسایش خاک، استفاده‌ی بیش از حد از منابع طبیعی، از بین رفتن تنوع زیستی و انفجار جمعیت. اگرچه کشاورزی به شدت مدرن شده است، اما با رویکردهای سنتی، به دلیل چشم‌اندازهای مختلف، تقاضای بالای مواد مغذی و کمبود فناوری، امکان مقابله با این چالش‌ها وجود ندارد. علاوه بر تأثیرات منفی بر کشاورزی، استفاده از مواد شیمیایی همچنین منجر به بروز مشکلات جدی سلامت و اثرات نامطلوب بر اکوسیستم شده است. در نتیجه، فناوری نانو نقش قابل‌توجهی در ارائه‌ی صنعتی کشاورزی سازمان‌یافته و پایدار با کاهش استفاده از مواد شیمیایی و رسیدگی به مشکلات موجود ایفا خواهد کرد. تشخیص سریع بیماری، بهبود جذب مواد مغذی توسط گیاه، و افزایش توانایی گیاه برای جذب مواد مغذی را می‌توان از طریق فناوری نانو در صنایع غذایی و کشاورزی به دست آورد. گیاهان کشاورزی می‌توانند با استفاده از فناوری نانو که به عنوان حسگر برای پایش کیفیت خاک و آب عمل می‌کند، در برابر حشرات و آفات محافظت شوند. با وجود پتانسیل آن‌ها، پژوهشگران نتوانسته‌اند درک کنند که این ترکیبات چگونه عمل می‌کنند، زیرا نانوذرات (NPs) بسته به مقدار غلظتی که به کار می‌رود، یا باعث افزایش رشد می‌شوند یا سمیت سلولی ایجاد می‌کنند. در این مقاله، امیدوارکننده‌ترین نانوذرات مورد استفاده در مدیریت تنش‌های غیرزیستی و ویرایش ژن‌های گیاهی، همچنین رویکردهای نانوبیونیک نوین برای بهبود عملکردها و اندامک‌های گیاهی ارائه شده است.

کلمات کلیدی استرس غیرزیستی، عملکرد محصول، مهندسی ژنتیک، نانوذرات، نانوبیونیک، کشاورزی، هوشمند

مقدمه

چالشی عظیم برای تأمین غذای جمعیت جهان در دهه‌های آینده وجود دارد که یکی از اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. برای تأمین غذای جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰، سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) برآورد کرده است که تولید جهانی غذا باید ۷۰٪ افزایش یابد. پذیرفته شده است که کشاورزی سهم قابل توجهی در سلامت مناسب، آلودگی محیط‌زیست، تغذیه‌ی کافی و شکوفایی اقتصادی دارد. در طول سال‌ها، گسترش کشاورزی عمدتاً تحت تأثیر تمایل به افزایش بهره‌وری زمین در هر واحد سطح مورد استفاده برای تولید محصول قرار داشته است و این امر از طریق استفاده‌ی گسترده از کودها و آفت‌کش‌ها و همچنین سوءاستفاده از خاک و آب تحقق یافته است [۲]، [۳] از آنجا که گسترش زمین‌های زراعی ناکامل است و نمی‌تواند با چشم‌اندازهای محتمل تولید محصولات کشاورزی هم‌خوانی داشته باشد، در واکنش به انباشت اثرات زیست‌محیطی در پی تأثیرات زیست‌محیطی، جهان شروع به استفاده از روش‌های کشاورزی منطقی‌تر برای آینده‌ای سالم‌تر کرده است [۴] با این حال، کشاورزی جهانی امروزه با چالش‌های متعددی روبه‌رو است، از جمله کنترل مواد شیمیایی کشاورزی، آلودگی آب، تخریب خاک، تغییرات اقلیمی، و گسترش مداوم عوامل بیماری‌زا و بیماری‌های گیاهی [۵]، [۶]، [۷]، [۸] نیاز فوری به مواد شیمیایی کشاورزی برای تأمین مواد مغذی، محافظت از محصولات در برابر حشرات و آفات، و افزایش هزینه تولیدات کشاورزی وجود دارد، که این امر به نوبه خود منجر به تخریب بیشتر محیط‌زیست می‌شود. علاوه بر این، هیچ مجالی برای بهبود در روش‌های سنتی کشاورزی وجود ندارد و فناوری‌های موجود نمی‌توانند اکوسیستم‌هایی را که توسط این روش‌ها آسیب دیده‌اند، بازیابی کنند [۹] در نتیجه، نگرانی‌های جهانی درباره بهره‌وری و پایداری کشاورزی افزایش خواهد یافت. استفاده مضر از حشره‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها در نظام‌های کشاورزی موجب آلودگی هوا و آب و کاهش سلامت و کیفیت خاک را کاهش می‌دهد [۱۰] علاوه بر این، تنش‌های غیرزیستی مانند شوری، خشکی و سیل در زمانی که هدف کشاورزی جهانی افزایش ۷۰ درصدی تا پیش از سال ۲۰۵۰ است، موجب کاهش بازده محصولات کشاورزی می‌شوند [۱۱]، [۱۲]. بنابراین، استفاده‌ی مداوم از آن بدون کاهش، تأثیرات نامطلوبی دارد که در نهایت تمام منابع طبیعی را تحلیل برده و وجود کره زمین را به طور کلی تهدید خواهد کرد. افزودن شیوه‌های گوناگون پایدار، مانند کودهای زیستی، بیوچار، ورمی‌کمپوست و تنوع‌بخشی به محصولات، موجب بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش بهره‌وری محصولات شده است [۱۳]، [۱۴]. با رشد توانمندی‌های علمی، فناوری نانو توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده و به عنوان راه‌حلی کارآمد برای رفع مشکلات امنیت غذایی و بهره‌وری به‌صورت مؤثرتر مطرح شده است. علاوه بر این، کاربردهای زراعی فناوری نانو در علوم گیاهی (فیتونانوتکنولوژی) ظرفیت بالایی برای دگرگونی بخش کشاورزی دارد [۱۵] هدف اصلی کشاورزی مبتنی بر فناوری نانو، بهبود بهره‌وری محصولات از طریق افزایش توان گیاه برای بقا در شرایط متغیر اقلیمی، کمبود آب، شوری آب و سطوح مختلف [۱۶]. نیاز فوری به استفاده از فناوری نانو، به‌ویژه نانوذرات (NPs)، برای افزایش تولید و کیفیت محصولات کشاورزی وجود دارد [۱۷]، [۱۸]. نانواپزارها نه تنها به عنوان سلاحی قدرتمند عمل می‌کنند، بلکه در اندازه‌گیری رشد و بهره‌وری گیاهان، ارزیابی ترکیب خاک و ایجاد تغییرات خاص در مواد ژنتیکی گیاه که عملکرد آن را بهبود می‌بخشند نیز اهمیت دارند تا دستیابی به نانوزیست‌حسگرها برای پایش کیفیت محصولات محیطی پایدار دست

یابند[۱۹]. کشاورزی و شناسایی عوامل بیماری‌زا با هدف ارتقای ایمنی غذایی توسعه یافته‌اند [۲۰]. اگرچه داده‌های پژوهشی فراوانی در این زمینه موجود است، چندین مقاله منتشر شده‌اند که مروری جامع بر این موضوع ارائه می‌دهند و به کاربرد فناوری نانو در بخش‌های مختلف کشاورزی می‌پردازند، اما هنوز چنین بررسی جامعی در ادبیات علمی به طور کامل دیده نمی‌شود. افزون بر این، استفاده از نانوذرات (NPs) برای مدیریت تنش‌های غیرزیستی، افزایش بهره‌وری محصولات، و نانوحسگرها برای کشاورزی هوشمند نیز به‌طور مفصل مورد بحث قرار گرفته است. نمایش شماتیکی از کاربردهای فناوری نانو در کشاورزی نیز ارائه شده است (شکل ۱). ما همچنین مهندسی ژنتیک گیاهان از طریق فناوری نانو و برهم‌کنش‌های نانوذرات با گیاهان را برجسته کرده‌ایم. به‌عنوان ابزاری مرجع و منحصربه‌فرد، این مرور به برخی فرصت‌ها و مسیرهای آینده فناوری نانو در کشاورزی و امنیت غذایی برای پژوهشگران فعال در زمینه‌های مختلف کشاورزی مبتنی بر فناوری نانو اشاره خواهد کرد.



شکل ۱. نقش‌های بالقوه فناوری نانو در کشاورزی. افزایش عملکرد محصولات، بهبود سلامت خاک، محافظت در برابر بیماری‌های گیاهی و کشاورزی دقیق از جمله حوزه‌های امیدبخش برای به‌کارگیری فناوری نانو هستند.

2: نانوذرات (NPs) برای افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی

با تغییرات در کشاورزی و تولید مواد غذایی، فناوری نانو پتانسیل آن را دارد که سهم قابل توجهی ایفا کند. در یک آزمایش اخیر، استفاده از نانوذرات اکسید روی (ZnO NPs) با غلظت ۰.۱۲ گرم در هر گلدان، منجر به افزایش ۴۲.۲ درصدی عملکرد دانه و افزایش ۷۴.۵ درصدی و ۶۳.۱ درصدی وزن تر و خشک ریشه در گندم به ترتیب شد [۲۱] به طور مشابه، در مطالعه‌ای دیگر، نانوذرات سیلیکا (SiNPs) با غلظت ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر باعث تقویت رشد گندم شدند [۲۲] علاوه بر این، [۲۳] از نانوذرات اکسید روی (ZnO NPs) با غلظت‌های مختلف در کاه و هویج استفاده کردند که در آن غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم ZnO باعث افزایش بیوتوده در هر دو گیاه کاه و هویج شد. همچنین نقش نانوذرات نقره (AgNPs) نیز بر گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) مورد بررسی

قرار گرفت، که در آن غلظت ۴۰ میلی گرم بر لیتر باعث افزایش طول ساقه به ۳۲.۳۳ سانتی‌متر، افزایش تعداد برگ‌ها به ۱۳ عدد در هر گیاه و افزایش وزن خشک ساقه به ۲.۸۴ گرم در هر گیاه شد [۲۴]. مواد نانویی کربنی (CNMs) نیز توانایی بهبود رشد و عملکرد گیاهان مختلف را دارند و در سویا مورد ارزیابی قرار گرفتند. در یک مطالعه، سویا با غلظت‌های ۰.۱، ۱۰۰ یا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم CNMs تیمار شد که در آن پتانسیل تثبیت نیتروژن کل گیاه کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر، [25] نشان دادند که قرار گرفتن بذره‌های *Phaseolus vulgaris* در معرض نانوذرات اکسید سرب (CeO_2 NPs) بر کیفیت تغذیه‌ای بذرها در سطح سلولی و مولکولی تأثیر گذاشت. به‌طور مشابه، عملکرد گیاهان برنج با تیمار آن‌ها توسط نقاط کربنی (CDS) حدود ۱۴.۵٪ بهبود یافت. نقاط کربنی به تمامی بخش‌های گیاه، از جمله هسته، نفوذ کردند و باعث افزایش غلظت بیان ژن تیونین (*Os06g32600*) شدند که مقاومت گیاه برنج را در برابر بیماری‌ها افزایش دادند [۲۶].

1.2. نانوکودها

از آنجایی که نانوذرات (NPs) دارای نسبت سطح به حجم بالا و نقص‌های ساختاری کمتر هستند، می‌توانند در زمینه جذب ریزمغذی‌ها به‌عنوان کود، مزایای متعددی برای گیاهان فراهم کنند [۲۷]. از نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) به‌عنوان حامل نانوذرات اکسید روی (ZnONPs) برای افزایش نرخ جوانه‌زنی بذره‌ای پیاز استفاده شد. نانوکامپوزیت-MWCNT- ZnO باعث افزایش نرخ تقسیمات میتوزی و کاهش میزان آب مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذره‌ای پیاز گردید [۲۸]. چنین حامل‌هایی برای نانوکودها موجب افزایش استفاده از نانوذرات به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های جذب مواد مغذی در گیاهان می‌شوند. به‌طور مشابه، در مطالعه‌ای دیگر، عنصر بور (B) به‌صورت نانوکود در گیاه لوبیای سبز استفاده شد. غلظت ۲۵ قسمت در میلیون (ppm) مؤثرتر بود و بیوتوده را تا ۱۰۱.۴۴٪ افزایش داد، در حالی که بیشترین عملکرد (۶۴.۱۳٪) با استفاده از ۵۰ ppm مشاهده شد و سپس با افزایش غلظت به ۱۰۰ ppm، عملکرد تا ۵۴.۱۶٪ کاهش یافت. نتایج مشابهی نیز در درختان انار مشاهده شد، جایی که استفاده برگی از نانوکود بور با غلظت 6.5 mg L^{-1} باعث افزایش عملکرد به میزان ۳۰.۴۴٪ گردید [۲۹]. در مطالعه‌ای دیگر، نانوذرات تری‌اکسید بور و اکسید روی به ترتیب در غلظت‌های ۲۰ ppm و ۲۰۰ ppm باعث افزایش درصد روغن دانه و کاهش اسیدیته شدند [۳۰]. فسفر یکی از عناصر پرمصرف ضروری برای رشد گیاه است، زیرا در دسترس بودن آن می‌تواند توانایی تثبیت نیتروژن گیاه را در طول چرخه زندگی تنظیم کند [۳۱]. از بیوکود نانوفاز ($450 \mu\text{l}$) حاوی باکتری‌های حل‌کننده فسفات در ذرت (*Zea mays L. cv. DH296*) استفاده کردند.

علاوه بر این، [۳۲] اثر نانوذرات سelenیم (SeNPs) را بر بذره‌ای جو (*Hordeum vulgare L.*) بررسی کردند. غلظت 5 mg L^{-1} بهترین نتیجه را در افزایش طول ریشه و جوانه

نشان داد و غلظت 10 mg L^{-1} برای افزایش ضخامت ریشه مؤثرترین بود. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، رشد و عملکرد گیاهان توت‌فرنگی نیز با محلول پاشی نانوذرات SiO_2 ، Se و Se/SiO_2 در غلظت‌های ۵۰ و 100 mg L^{-1} بهبود یافت [۳۳]. با این حال، دوزهای مختلف نانوذرات ممکن است به دلیل اندازه بسیار کوچک آن‌ها اثرات منفی بر گیاهان داشته باشند. [۳۴] اثر تیمار بذر در گونه مصری گیاه چای ترش (*Hibiscus sabdariffa L.*) را با استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم ($\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ NPs}$) بررسی شد. استفاده از غلظت پایین (۰.۰۱٪) از نانوذرات Al_2O_3 تأثیرات قابل توجهی در تحریک رشد نشان داد و موجب افزایش وزن تر (۱۴.۴۵٪)، وزن خشک (۱۴.۲۸٪)، طول ریشه (۱۴.۳۷٪)، طول ساقه (۱۷.۱۷٪) و سطح برگ (۱۳.۲۵٪) در گیاه چای ترش (*roselle*) گردید. با این حال، افزایش غلظت‌ها (۰.۰۵٪، ۰.۱٪ و ۰.۵٪) از Al_2O_3 باعث کاهش صفات رشد گیاه شد. [۳۵] در نتیجه، نانوکودها قادرند تا راندمان جذب را تا ۹۰.۶٪ افزایش دهند، که آن‌ها را به موادی بسیار مطلوب برای کوددهی محصولات کشاورزی تبدیل می‌کند، و استفاده از نانوکودها منجر به افزایش عملکرد محصولات می‌شود. [1]

۲.۲. نانوآفت‌کش‌ها

آفت‌کش‌ها مانند علف‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها دارای کارایی استفاده پایینی هستند، به‌طوری‌که تنها ۴۰٪ از آفت‌کش اعمال‌شده به بهبود کیفیت محصول و افزایش تولید کمک می‌کند. با افزایش فشارها بر تولیدات کشاورزی، نیاز فزاینده‌ای به روش‌های مؤثرتر برای تحویل مواد فعال آفت‌کش (*AIs*) وجود دارد. بسیاری از نانومواد، مانند نانوامولسیون‌ها [۳۶]، دندریمرها [۳۷]، نانوکپسول‌ها [۳۸] و نانوسوسپانسیون‌ها [۳۹]، برای تحویل مواد فعال آفت‌کش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نانومواد سیلیکا نیز برای آزادسازی آهسته آفت‌کش‌ها [۴۰]؛ [۴۱] و روغن‌های ضروری ضدقارچ [۴۲]؛ [۴۳] استفاده شده‌اند. به‌طور مشابه، نانوکامپوزیت‌های اکسید روی-تیامتوکسام برای مبارزه با لاروی‌های مرحله چهارم *Spodoptera litura* استفاده شدند. این نانوکامپوزیت مانع ظهور حشرات بالغ از لاروی‌ها شد. همچنین تغییرات وابسته به دوز در آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز (*SOD*)، گلوکاتیون-S-ترانسفراز (*GST*) و مواد واکنش‌پذیر با تیوباربیتوریک اسید (*TBARS*) در لاروی‌های تیمار شده مشاهده شد [۴۴]. نانوذرات مهندسی‌شده نیز به‌عنوان آفت‌کش به مدت ۵ روز استفاده شده‌اند. نانوذرات نقره و مس به‌عنوان عوامل ضدقارچ و ضد میکروب مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴۵]؛ [۴۶] کاربرد نانوآفت‌کش‌های $\text{Cu}(\text{OH})_2$ علائم سمی قابل مشاهده‌ای در برگ‌های کاهو ایجاد نکرد و علاوه بر این، محلول پاشی برگ‌ی نانوآفت‌کش‌های $\text{Cu}(\text{OH})_2$ باعث تغییرات معنی‌دار در ترکیبات متابولیتی برگ‌های کاهو شد [۴۷] نانوذرات نقره سنتز شده از عصاره برگ *Ocimum basilicum* می‌توانند به‌طور ایمن برای کنترل *S. litura* استفاده شوند و در مقایسه با دیگر حشره‌کش‌های سنتزی، مرگ و میر بیشتری را نیز ایجاد کردند [۴۸] به‌طور مشابه، با استفاده از عصاره برگ گیاه *Borago*

officinalis. نانوذرات نقره (Ag NPs) برای کرم برگ پنبه، *Spodoptera littoralis*، سمیت بیشتری نشان دادند [۴۹] مشخص شد که کاربرد نانوذرات کیتوزان (CNP) در غلظت ppm ۵۰۰ بیشترین مرگ و میر *S. littoralis* را با ۲۹٪ ایجاد کرد و با غلظت ppm ۲۰۰، مرگ و میر *Locusta migratoria* به ۲۲٪ رسید. مطالعه‌ای دیگر پتانسیل نانوذرات مس (CuNPs) را علیه پاتوژن‌های ذرت نشان داد؛ غلظت CuNPs ۲۰ ppm سه قارچ پاتوژن، شامل *Fusarium*، *Bipolaris maydis*، *Macrophomina phaseolina* و *verticillioidea* را مهار کرد، در حالی که ۵۰ ppm CuNPs موجب کاهش *Rhizoctonia solani* شد. [۱] علاوه بر این، مشخص شد که غلظت CuNPs ۳۰۰ ppm بهترین میزان برای جوانه‌زنی بذرهاست، زیرا طول و تعداد ریشه‌ها، طول ساقه، وزن تازه و خشک گیاهان با ppm ۳۰۰ CuNPs بیشتر بود اخیراً، از میان پنج نوع مختلف نانوذرات، شامل *CuONPs*، *Co₃O₄NPs*، *NiONPs*، *Fe₃O₄NPs* و *ZnONPs*، نانوذرات *CuONPs* با غلظت 100 mg L^{-1} مؤثرترین درمان برای کاهش بیماری قارچی پژمردگی *Fusarium* در گیاهان لوبیا معمولی بود [۵۰]. در مطالعه‌ای دیگر، نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت (n-HAP) و قارچ‌های مایکوریزا به‌طور مشترک برای بررسی عفونت *Meloidogyne incognita* در گیاهان گوجه فرنگی مورد ارزیابی قرار گرفتند. کاربرد n-HAP با غلظت ppm ۲۰۰ باعث افزایش ۱۹۵.۶۷٪ مرگ و میر جوانه‌ها و ۸۰.۷۱٪ مهار تفریح تخم‌ها شد. مطالعه نشان داد که گیاهان تیمار شده با n-HAP نه تنها از عفونت جلوگیری کردند، بلکه با تأمین فسفر، نیتروژن و کلسیم مقاومت گیاه را نیز افزایش دادند. علاوه بر این، ارتباط مایکوریزا مواد مغذی فراهم کرده و گیاه را در برابر عفونت *Meloidogyne incognita* حمایت می‌کند [۵۱]. بنابراین، نانوافت‌کش‌ها به‌عنوان عوامل کنترل طولانی‌مدت آفات قابل استفاده هستند، زیرا به‌طور آهسته تجزیه می‌شوند و مواد فعال را آزاد می‌کنند. [۵۲]. بنابراین، نانوافت‌کش‌ها روشی مؤثر و پایدار برای مدیریت آفات ارائه می‌دهند و این پتانسیل را دارند که خطرات زیست‌محیطی ناشی از مواد شیمیایی سنتزی را کاهش دهند. از آنجا که گیاهان موجوداتی بی‌تحرک هستند، در معرض انواع تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، قلیائیت، شوری و سمیت مواد معدنی قرار دارند که موجب کاهش عملکرد محصول می‌شود. نانوذرات (NPs) نقش مهمی در کمک به گیاهان برای مقابله با تنش‌های خشکی و شوری ایفا کرده‌اند، زیرا باعث ایجاد پاسخ‌های مختلفی در گیاهان تحت تنش غیرزیستی می‌شوند (جدول ۱) در یک مطالعه، برگ‌هایی که با فرمولاسیون‌های نانو تیمار شده بودند، مقادیر بالایی از قند را در خود جمع‌آوری کردند و بیان ژن‌های مسئول تنش‌های غیرزیستی در آن‌ها کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر، گیاهان برنجی که با نانوذرات سلنیوم-سیلیکا تیمار شدند، محتوای نسبی آب، شاخص پایداری غشا و بهره‌وری مصرف آب بالاتری از خود نشان دادند. نانوذرات همچنین توانایی تحمل خشکی در گیاهان توت‌فرنگی را با افزایش فعالیت آنزیم‌های

آنتی‌اکسیدانی از جمله آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و گایاکول پراکسیداز بهبود دادند. همچنین شاخص‌های بیوشیمیایی مانند آنتوسیانین، ترکیبات فنولی کل (TPCs) و ویتامین C در گیاهان توت‌فرنگی تیمار شده با نانوذرات افزایش یافتند [۵۳]

3. نانوذرات برای بهبود کیفیت خاک

نانوذرات (NPs) در حال حاضر در محصولات متنوعی مانند نانوکودها، نانوأفت‌کش‌ها، غیرعلف‌کش‌ها، تحویل مواد شیمیایی کشاورزی و تحویل DNA به کار گرفته می‌شوند، که می‌توانند به عنوان همیارهای مواد مغذی یا کود برای افزایش کیفیت خاک، بهره‌وری محصولات و عملکرد محصول عمل کنند. در نتیجه با تمامی این کاربردها، خاک بزرگ‌ترین گیرنده نانوذرات است [1]. در یک مطالعه، نانوذرات نقره سنتر شده با عصاره گیاهی وقتی به خاک اعمال شدند، pH خاک را به سمت خنثی شدن تغییر دادند و افزایش قابل توجهی در نگهداری آب، ظرفیت تبادل کاتیونی و دسترسی N/P مشاهده شد [۵۴]، نشان دادند که افزودن ۰.۲٪ نانولوله‌های کربنی چنددیواره به خاک رس، هیدرولیک خاک را بهبود بخشیده و ترک‌های خاک را کاهش می‌دهد. مشخص شد که نانو سیلیکا کیفیت و بافت خاک، نوع خاک و فعالیت آنزیمی خاک را بهبود می‌بخشد. با این حال، دوز بالای نانوذرات به طور منفی بر فعالیت آنزیم دهیدروژناز، کیفیت مواد مغذی خاک و توانایی خودپاک‌کنندگی خاک تأثیر می‌گذارد؛ همچنین قابل توجه است که pH خاک عامل مهم دیگری است که بر حاصلخیزی خاک تأثیر می‌گذارد و ممکن است تحت تأثیر تجمع انواع مختلف نانوذرات، شامل Zn، Ag و Cu قرار گیرد به طور مشابه، نانوذرات بر جامعه میکروبی خاک نیز تأثیر دارند. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و دوز بالای نانولوله‌های کربنی چنددیواره ترکیب جمعیتی میکروبی را تغییر دادند. در مقاله‌ای تازه منتشر شده، کاربرد نانوذرات عناصر نادر باعث افزایش مقاومت میکروبی خاک در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها شد. علاوه بر افزایش مقاومت آنتی‌بیوتیکی، ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی نیز در فراوانی افزایش یافتند و تمامی کلاس‌های اصلی آنتی‌بیوتیک‌ها را هدف قرار دادند. گزارش دادند که تیمار گیاهان توت‌فرنگی با نانوذرات CeO_2 باعث افزایش طول و سطح ریشه‌ها و همچنین محتوای کلروفیل شد. تنوع میکروبی ریزسفره کاهش یافت و ترکیب جمعیتی باکتریایی توسط گونه‌های Ce در خاک تغییر کرد. از نانوذرات کربنی استفاده کردند. با اعمال نانوذرات کیتوزان (CNPs) برای رشد ذرت (*Zea mays L.*) در دو نوع خاک کشاورزی مختلف، اسپودوزول و آلفیسول، مشخص شد که با استفاده از $200 \text{ mg CNP kg}^{-1}$ ، گیاهان توانستند بلندتر رشد کنند، بیوماس بیشتری تولید کنند و مواد مغذی را به طور مؤثرتری جذب نمایند. این مطالعه نتیجه گرفت که اصلاح خاک با CNP ممکن است فعالیت اوره‌آز خاک را تحریک کرده و منجر به سطوح بالای فسفر و نیتروژن در خاک شود. مطالعات مشابه قبلی نیز گزارش شده‌اند که در آن‌ها نانوذرات سلیسیم به عنوان کود برای افزایش حاصلخیزی خاک استفاده شده‌اند. غلظت‌های ۵ و $10 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ بیشترین نرخ رشد گیاه را ایجاد کردند. بنابراین، معرفی نانوذرات می‌تواند میکروبیوتای خاک را دستکاری کند، که منجر به پاسخ‌های متنوع در فعالیت‌های

آنزیمی میکروب‌های مفید، تغییر pH خاک و تسریع دسترسی به خواص تغذیه‌ای برای گیاهان می‌شود و پنجره جدیدی برای بهبود سلامت خاک باز می‌کند [1].

Plant	NPs	Stress	Response in plant	References
<i>Crocus sativus</i>	Ag	Flooding	Augmentation in root length and dry weight of the leaves	Rezvani et al. (2012)
<i>Solanum lycopersicum</i>	SiO ₂	Salinity	germination rate, root length, and dry weight enhanced	Haghighi and Pessarakli (2013)
<i>Lens culinaris</i>	SiO ₂	Salinity	Improves bud length and germination percentage	Sabaghnia and Janmohammadi (2015)
<i>Capsicum annum</i>	SiO ₂	Salinity	plant height, fresh and dry leaf weight, and fruit weight enhanced	Tantawy et al. (2015)
<i>Vicia faba</i>	SiO ₂	Salinity	Rise in CAT, APX, and POD activity	Qados (2015)
<i>S. lycopersicum</i>	Ag	Salinity	MAPK2, P5CS, AREB, and CRK1 genes upregulated	Almutairi (2016)
<i>Mentha piperita</i>	Fe ₂ O ₃	Salinity	Enhancement in essential oil content 1,8-cineol, cis-sabinene hydrate, germacrene D, and β -pinene	Askary et al. (2016)
<i>Brassica napus</i>	CeO ₂	Salinity	plant biomass was increased and efficiency of the photosynthetic apparatus was also augmented	Rossi et al. (2016)
<i>S. lycopersicum</i>	TiO ₂	Salinity	Activity of enzymes like SOD, POX, carbon anhydrase, and, nitrate reductase. Enhancement in total phenols, proline, lycopene, and glycine betaine	Khan (2016)
<i>L. culinaris</i>	Ag	Drought	Germination was enhanced	Hojjat and Ganjali

<i>Linum usitatissimum</i>	TiO ₂	Drought	Chlorophyll and carotenoid content was enhanced	Aghdam et al. (2016)
<i>Glycine max</i>	Al ₂ O ₃	Flooding	Upsurge in ribosomal proteins	Mustafa and Komatsu (2016)
<i>S. lycopersicum</i>	ZnO	Salinity	RNA levels of GPX and, SOD enhanced	Alharby et al. (2017)
<i>S. lycopersicum</i>	ZnO	Salinity	GPX and, SOD activity enhanced	Alharby et al. (2017)
<i>Fragaria ananass</i>	Fe ₃ O ₄	Drought	growth and quality parameters of plant enhanced	Mozafari et al. (2018)
<i>Triticum aestivum</i>	Chitosan	Drought	Improved relative water content, leaf area, photosynthesis rate, chlorophyll content, catalase, and superoxide dismutase activities	Behboudi et al. (2019)

جدول ۱. نانوذرات در مدیریت انواع تنش‌ها در گیاهان مختلف با پاسخ‌های گوناگون

Sugarcane	Chitosan	Drought	Increased root biomass and photosynthesis	Silveira et al. (2019)
Musa acuminata	SiO ₂	Salinity	Improved chlorophyll content and decreased cell wall damage	Mahmoud et al. (2020)
<i>Gossypium hirsutum</i>	CeO ₂	Salinity	Increased root length, modified root anatomy and also improved root vitality	An et al. (2020)
<i>Dracocephalum moldavica</i>	TiO ₂	Salinity	Improved agronomic traits and augmented antioxidant enzyme activity	Gohari et al. (2020)
Pea seedlings	Se	Salinity	Reduced chromosomal abnormalities percentage and enhanced seedling performance	El-Araby et al. (2020)
<i>Glycine max</i>	Ag	Flooding	Root length/weight and hypocotyl length/weight of soybean was enhanced	Hashimoto et al. (2020)
<i>Triticum aestivum</i>	Fe ₃ O ₄	Drought	improved the photosynthesis, and yield	Adrees et al. (2020)
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	ZnO	Salinity	peroxidase, lipoxygenase, polyphenol oxidase, and phenylalanine ammonia lyase significantly improved	Noohpisheh et al. (2021)

Plant	NPs	Stress	Response in plant	References
<i>Triticum aestivum</i>	Fe ₃ O ₄	Salinity	Shown positive effects on plant growth, chlorophyll and enzymatic antioxidants	El-Saber et al. (2021)
<i>Triticum aestivum</i>	FeO	Salinity	Plant growth was enhanced by 36.7%	Manzoor et al. (2021)
Maize	Cu	Drought	Higher plant biomass and leaf water content	Van Nguyen et al. (2021)

<i>Catharanthus roseus</i>	Chitosan	Drought	Enhanced alkaloid content and expression of genes such as DAT, STR, PRX1 and GS was also augmented.	Ali et al. (2021)
Wheat	SiNPs	Drought	Decreased H ₂ O ₂ and MDA content, increased relative water content (RWC), Stress genes, <i>DREB2</i> , <i>MYB33</i> , <i>MYB3R</i> , <i>WRKY 19</i> , and <i>SnRK 2.4</i> upregulated	Boora et al. (2023)
<i>Salvia abrotanoides</i>	CNPs	Drought	Improved the RWC of the stressed plants, especially at the 70% stress level	Attaran Dowom et al. (2022)
Canola	FeNPs	Drought	H ₂ O ₂ content and lipid peroxidation decreased	Rezaviani et al. (2023)
<i>Arabidopsis thaliana</i>	MSNs	Drought	Increased root length, number of lateral roots, leaf area and shoot biomass	Tran et al. (2023)
Soybean	TiO ₂ NPs	Salinity	Enhanced germination traits, DPPH free radical scavenging, reduced H ₂ O ₂ and MDA contents	Abdalla et al. (2022)

۴. رویکرد نانوبیونیک و گیاهان

افزایش کارایی فتوسنتزی گیاهان یکی از چالش‌های اصلی است که باید برای تأمین نیازهای غذایی جمعیت در حال رشد و تغییرات اقلیمی حل شود. گیاهان به‌طور طبیعی موجودات ساکن هستند که مسیرهای سیگنال‌دهی درونی دارند تا خود را با تغییرات محیط خارجی تطبیق دهند، که این موضوع توسعه نانوبیونیک گیاهان را تشویق کرده است. بنابراین، نانوبیونیک گیاهان حوزه‌ای از علوم گیاهی است که از تعامل نانوذرات با گیاهان برای مهندسی گیاهان با عملکردهای نوین و برتر استفاده می‌کند. این رویکرد برای افزایش نرخ فتوسنتز در گیاهان به‌کار رفته است. گیاهان می‌توانند با وارد کردن نانومواد به برگ‌ها به حسگرهای شیمیایی تبدیل شوند. گیاهانی مانند اسفناج و شب‌بوی آبی برای تشخیص مواد منفجره‌ای مانند نیتروزامین‌ها استفاده شده‌اند. علاوه بر این، بهبود تولید محصول با افزایش کارایی فتوسنتزی اهمیت دارد. نور جذب شده توسط کلروپلاست‌ها محدود به طیف مرئی است، که کارایی بالقوه انرژی خورشیدی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. نانوذرات پلیمری کانژوگه (CPNs) ساخته شده از پلی‌فلورین، نور فرابنفش را جذب و نور آبی شدید منتشر می‌کنند و گزینه‌های بالقوه‌ای برای مواد جمع‌آوری نور هستند و قابلیت افزایش نرخ فتوسنتز را دارند. به‌عنوان نمونه، نانوذرات پلیمری کانژوگه ساخته شده از poly [2,7- (9,9-dihexylfluorene)-co-alt-poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-co-(1,4-benzo-{2,1',3}-p-phenylene) (PFP) thiadiazole]] (PFBT) بر سطح کلروپلاست‌ها، نور فرابنفش را جذب و آن را به نور مرئی تبدیل می‌کنند که کلروپلاست‌ها قادر به جذب آن هستند. به دلیل توانایی بالاتر CPNs در جمع‌آوری نور، PS II می‌تواند نور اضافی تبدیل شده توسط CPNs را برای اکسیداسیون آب جذب کند و الکترون‌های بیشتری در زنجیره انتقال الکترون نسبت به کلروپلاست‌های طبیعی تولید کند، که منجر به افزایش قابل توجه فعالیت فتوسنتزی می‌شود. مطالعه نشان داد که وارد کردن نانومواد به کلروپلاست‌ها نرخ فتوسنتز را افزایش می‌دهد. در آزمایشی توسط، کاربرد برگی نقاط کربنی نارنجی کارایی فتوسنتزی ذرت را افزایش داد. نقاط کربنی نارنجی همچنین

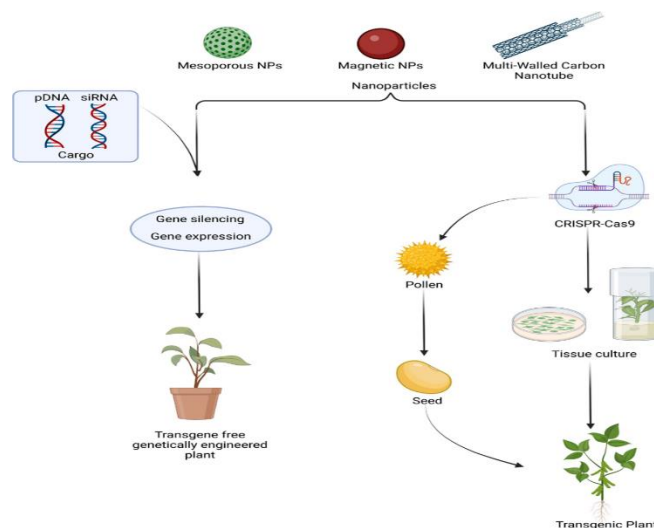
به دلیل ظرفیت بالای جمع‌آوری نور، کارایی کارایی انتقال الکترون در فتوسستم را افزایش دادند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نانوذرات TiO_2 در غلظت‌های مختلف ($0, 50, \text{ and } 100 \mu\text{mol L}^{-1}$) کارایی فتوسنتزی را تحت شدت نور پایین فوتون فتوسنتزی (PPFD) افزایش دادند، اما تحت PPFD بالا آن را کاهش دادند. *Raphanus raphanistrum L.* روبیسکو، آنزیم مهم در بهبود نرخ فتوسنتز، توسط نانوذرات TiO_2 به طور قابل توجهی بهبود یافته است. علاوه بر این، در مطالعه‌ای دیگر، نانوذرات کیتوزان-پلی‌اتیلن‌ایمین اصلاح‌شده (gPEI-Chi) بر برگ توتون نشان دادند که توانایی جذب CO_2 در شرایط زنده را دارند. نانوذرات نه تنها کارایی فتوسنتزی و ذخیره‌سازی CO_2 در گیاهان را افزایش دادند، بلکه CO_2 را جذب کرده و به بی‌کربنات تبدیل کردند که با آنزیم روبیسکو واکنش می‌دهد و تولید ۳-PGA را در آزمایش‌های *in vitro* ۲۰٪ افزایش می‌دهد. علاوه بر این، رویکرد نانوبیونیک گیاهان برای تولید گونه‌های نورافشان برخی گیاهان معمولی نیز به کار گرفته شده است *Eruca sativa*، *Spinacia oleracea*، *Brassica oleracea* و *Nasturtium officinale* سه نوع نانوذره با طراحی منطقی و بار سطحی و شیمی متفاوت سنتز شده‌اند تا بخش‌های خاصی از برگ را هدف قرار دهند. منافذ روزه‌ای ($10\text{--}15 \mu\text{m}$) در هر دو سمت ادکسیال و آبکسیال برگ، نفوذپذیری بالایی نسبت به نانوذرات دارند. برای ایجاد گیاهان نورافشان، از نانوذرات سیلیکا لوسیفراز (SiNP-Luc)، نانوذرات PLGA با لوسیفیرین (PLGA-LH_2) و حامل‌های Co-A-کیتوزان (CoA-CS) استفاده شد SiNP-Luc برای ورود به سلول‌های مزوفیل برگ و سلول‌های نگهبان روزه طراحی شد و در نزدیکی کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها، جایی که تولید ATP بیشترین مقدار را دارد، مستقر شد PLGA-LH_2 و CoA-CS در فضاها بین سلولی مزوفیل برگ به عنوان مواد آزادکننده مستقر شده و سپس از طریق غشاهای دیواره‌های سلولی منتقل شدند. با وارد کردن نانوذرات طراحی‌شده به گیاهان، نانوبیونیک گیاهی می‌تواند عملکردهای غیرطبیعی را در گیاهان ایجاد کند. از طریق گیاه کاهش یافت و این مسیر سیم‌پلاستیک، گیاهان ترکیبات نیتروآروماتیک را جذب می‌کنند که سپس به زیلوم منتقل شده و یا جذب یا تجمع می‌یابند. یک کلاس پتیدی از خانواده بمبولیتین، اجازه می‌دهد نانوذرات SWCNT فلورسانس نزدیک به مادون قرمز (NIR) تغییرات خاصی در ساختار خود در پاسخ به اتصال ترکیبات نیتروآروماتیک ایجاد کنند. کمپلکس بمبولیتین-SWCNT از طریق نفوذ برگ در سمت آبکسیال به برگ‌های *Spinacia oleracea* وارد شد. سپس اسید پیکریک از طریق ریشه و سطح برگ اضافه شد. در هر دو حالت، شدت بمبولیتین-SWCNT در پاسخ به جذب اسید پیکریک توسط اطلاعات از طریق یک جفت سیگنال NIR به آشکارساز ارسال شد. آرسنیک نیز یک فلز سمی است که تهدیدی برای انسان و اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. SWNT پیچیده شده با توالی‌های الیگونکلوئیدی با محتوای بالای G-/T- افزایش قابل توجهی در شدت فلورسانس SWCNT ها پس از افزودن آرسنیت نشان داد. این نانوحسگر در مزوفیل برگ سرخس کرتایی (*Pteris cretica*) کارگذاری شد. بدین ترتیب، مولکول‌های آرسنیت می‌توانند در طول رگبرگ‌های گیاه شناسایی شده و در تیغه برگ متمرکز شوند. جذب نانوذرات

توسط گیاهان از طریق ریشه و برگ صورت می‌گیرد و به گونه گیاه، اندازه، ترکیب شیمیایی، نوع و پایداری نانوذرات بستگی دارد. در مطالعه‌ای، نانوذرات CeO_2 با اندازه ۴ نانومتر و بار مثبت، منفی و خنثی برای بررسی ارتباط بین بار سطحی ذره و انتقال نانوذرات از ریشه به برگ‌ها استفاده شدند. نتایج نشان داد که نانوذرات با بار مثبت به ریشه می‌چسبند، در حالی که نانوذرات CeO_2 با بار منفی با گذشت زمان وارد ریشه شده و به طور مؤثرتری به سمت برگ‌ها منتقل می‌شوند. به طور مشابه، در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از نانوذرات نقره ۲۰ نانومتری در *Landoltia punctata*، نقش بار سطحی در جذب ریشه بررسی شد و نشان داد که نانوذرات نقره بر سطح ریشه تجمع یافته و تا حدی به بافت‌ها نفوذ می‌کنند. آناتومی گیاه نیز نقش کلیدی در تجمع نانوذرات دارد. به عنوان مثال، یک گیاه دو لپه‌ای نسبت به یک تک لپه‌ای نانوذرات بیشتری از ریشه و برگ جذب می‌کند، به دلیل نرخ‌های بالاتر تعرق و جذب بیشتر آب ریشه به دلیل فضاهای هوایی بزرگ‌تر در برگ‌ها مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات می‌توانند خود را به بافت‌های گیاه منتقل کنند. پژوهشگران فرض کردند که نانوذرات می‌توانند از مسیر دیگری، یعنی از طریق روزه‌ها، جذب شوند. تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذرات جذب شده توسط گیاهان با استفاده از سه اندازه مختلف نانوذرات طلا (۳، ۱۰ و ۵۰ نانومتر) با پوشش PVP و سیترات بررسی شد. نانوذرات کوچک طلا نسبت به نانوذرات ۵۰ نانومتری بیشتر به سطح برگ می‌چسبند. نانوذرات طلای پوشش‌داده شده با PVP نسبت به نانوذرات پوشش‌داده شده با سیترات، بیشتر روی سطح برگ می‌چسبند. نانوذرات زین هنگام استفاده در نیشکر از طریق ریشه‌ها وارد گیاه شدند. انومولسیون‌های پایه‌چربی، نانوذرات چربی جامد (solid lipid NPs) و حامل‌های چربی با ساختار نانویی (nano-structured lipid carriers) از طریق مسیر آپوپلاستی (apoplastic route) و مسیر سیم‌پلاستی (symplastic pathway) وارد گیاه می‌شوند. به‌تازگی، کشف کردند که نانوذرات سیلیسیمی ساخته‌شده از کیتوزان با اندازه ۱۶۶ نانومتر می‌توانند توسط برگ‌های گیاه برنج (*Oryza sativa L.*) جذب شده و در بافت‌های آن توزیع شوند [1].

۵. نانوحسگرها برای کشاورزی هوشمند

منبع اصلی غذا عمدتاً گیاهان هستند که سهم قابل توجهی در تولید کشاورزی دارند. با این حال، عوامل تنش غیرزیستی مانند خشکسالی، شوری، تابش نور خورشید و دماهای شدید ممکن است همچنان به گیاهان آسیب برسانند و منجر به کاهش عملکرد شوند برخلاف انسان‌ها، بیان علائم در گیاهان به‌طور کلی خاموش‌تر است و نیاز به مشاهدات طولانی‌مدت و مستمر دارد. با پیشرفت فناوری، ابزارهای مبتنی بر نانوذرات می‌توانند به‌عنوان منبع تغذیه پایدار برای نانوحسگرهای بی‌سیم گیاهان عمل کنند و امکان نظارت بلادرنگ بر وضعیت سلامت گیاهان را فراهم آورند. یک نانوذراتور تریبو الکتریک ساخته شده از نانوفیبرهای پلی (وینیلیدن فلوراید-کو-هگزافلوروپروپیلن) که با نانوذرات کربن فلورینه ترکیب شده‌اند، قادر است انرژی را از باد و قطرات باران برداشت کند. این نانوذراتورها می‌توانند به‌صورت خودکار به گیاهان متصل شوند بدون اینکه فعالیت‌های فیزیولوژیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. برای بخش کشاورزی بسیار مهم است که

فناوری‌های نوآورانه‌ای برای شناسایی بیومارکرها مرتبط با کمبودهای تغذیه‌ای محصول توسعه یابد. در یکی از این مطالعات، از نانوحسگرهای قابل حمل مبتنی بر نانوذرات تبدیل‌کننده و اکسید گرافن و RNA استخراج‌شده از گیاه استفاده شد تا هیبریداسیون توالی‌های هدف امکان‌پذیر شود. خروجی فلورسانس برای حضور یا عدم حضور توالی mRNA هدف پایش شد. با استفاده از این حسگر، کمبود زینک (Zn) در مراحل اولیه شناسایی شد کمبود زینک در محصولات از طریق شناسایی mRNA هایی که کدکننده ZIP-transporters هستند، تشخیص داده شد. یک نشانگر استرس اکسیداتیو در پیری و بیماری، هیدروژن پراکسید (H_2O_2) است که به‌عنوان مولکول سیگنال‌دهنده در طیف گسترده‌ای از فرآیندهای انتقال سیگنال عمل می‌کند. به همین ترتیب، نانوذرات کربن تک‌جداره فلورسانس نزدیک به مادون قرمز (NIR SWCNTs) طراحی و با برگ‌های گیاهان *Arabidopsis thaliana* ترکیب شدند تا امکان پایش نوری سلامت گیاه در پاسخ به تنش‌هایی مانند نور شدید، UVB و پپتیدهای مرتبط با عوامل بیماری‌زا فراهم شود [1]



شکل ۲. استفاده از انواع مختلف نانومواد برای تبدیل گیاهان. این مؤلفه‌ها به نظر می‌رسد که اجزای انقلابی برای مداخلات بیوتکنولوژیکی در محصولات کشاورزی مهم باشند.

علاوه بر این، با پیشرفت فناوری، حسگرهای مولکولی نیز توسعه یافته‌اند که بدون اختلال در فلورسانس در NIR ($>1000\text{ nm}$) کار می‌کنند، و با اتصال DNA تک‌رشته‌ای (ssDNA) از طریق گوانین روی سطح SWCNT، حرکت‌های غیر اختصاصی کاهش یافته و رویدادهای شناسایی مولکولی به فلورسانس خاص و معنی‌دار تبدیل می‌شوند [۹۴]. به‌همین ترتیب، گرافن، نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره (SWCNTs)، نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs)، نانوروبان‌های گرافنی و اکسید گرافن کاهش‌یافته برای بهبود ویژگی‌های گازسنجی حسگرهای NH_3 مبتنی بر پلی‌آنیلین (PANI) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اتصال هیدروژنی بین نانوذرات کربن کربوکسیله‌شده و PANI، که با وارد کردن SWCNT ها به PANI شکل می‌گیرد، تعامل بین NH_3 و کامپوزیت SWCNT-OH/PANI را افزایش می‌دهد. شناسایی آمونیاک با استفاده از SWCNT هایی که با گروه‌های کربوکسیلی عملکردی شده‌اند، انجام می‌شود. [1]

6. گیاهان مهندسی ژنتیکی با استفاده از نانو تکنولوژی

مهندسی ژنتیک به‌عنوان ابزاری برای افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی استفاده می‌شود تا ارزش غذایی آن‌ها افزایش یابد، مقاوم به بیماری و خشکی شوند و منابع زیست‌محیطی کمتری مصرف شود. ابزارهای مهندسی ژنتیک مورد استفاده در گیاهان محدودیت‌هایی دارند، مانند: اختصاصی بودن به یک گونه خاص، بازده پایین و آسیب به بافت‌ها؛ بنابراین نانومواد مزیت بزرگی در انتقال بیومولکول‌ها به گیاهان بدون انسداد بافت و تسهیل ویرایش ژن ارائه می‌دهند. با پیشرفت فناوری، نانو تکنولوژی حامل‌های مختلفی ارائه داده است که قادر به انتقال پلاسمید DNA و siRNA به گیاهان هستند. نانوها هم‌چنین می‌توانند برای انتقال CRISPR-Cas9 gRNA استفاده شوند و بدین ترتیب انتقال مبتنی بر نانوها به ابزاری حیاتی برای مهندسی ژنتیک گیاه تبدیل شده است (شکل ۲) نانومواد به‌طور گسترده‌ای در مهندسی ژنتیک شامل نانومواد مغناطیسی، نانولوله‌های کربنی و نانوساختارهای DNA هستند. نانوذرات مغناطیسی حامل DNA خارجی، در حضور میدان مغناطیسی به گرده منتقل شدند. گیاهانی که با گرده ترانسفورم شده تلقیح شدند، برای تولید بذره‌های ترانسفورم شده و در نهایت تولید گیاهان تراریخته استفاده شدند. این روش سریع، ساده و قادر به انتقال چندین ژن است. موانع اصلی در انتقال به سلول گیاهی، غشاهای سلولی و جذب اندوزومی هستند. نانولوله‌های کربنی که با پروپلاست‌های گیاهی انکوبه شدند، حالت درون‌سلولی بدون جذب اندوزومی را نشان دادند و هدف قرار دادن ساختارهای خاص سلولی مانند پلاستیدها، واکوئل‌ها و هسته‌ها مشاهده شد. مطالعه‌ای دیگر گزارش داد که نانو لوله‌های کربنی ایموبیلاز شده با سلولاز می‌توانند از دیواره سلولی عبور کرده و از طریق نانوسوراخ‌های ایجاد شده توسط سلولاز، درون سلول حرکت کنند. نانوساختارهای DNA با اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر جذب بهتری در سیتوپلاسم سلول‌های گیاهی گونه‌های *Nicotiana tabacum*، *Nicotiana benthamiana*، *Nasturtium officinale* و *Eruca sativa* نشان دادند. علاوه بر این، siRNA هدفمند ژن پروتئین سبب فلورسانس روی نانوساختارهای DNA بارگذاری شد و نشان داد که این نانوساختارها باعث خاموش شدن ژن در برگ‌ها می‌شوند. گزارش دادند که خوشه‌های طلا

عملکردی شده با پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI-AuNCs) هنگام تحویل مستقیم به گیاه، siRNA را از تخریب محافظت کرده و امکان خاموش‌سازی مؤثر ژن را فراهم می‌کنند. ویژگی‌ها و عملکرد نانوذرات را می‌توان با مطالعات بیشتر بهبود داد؛ با این حال، یافته‌های اولیه نقطه شروع خوبی برای استفاده از نانوذرات به عنوان حامل بیومولکول‌های گیاهی هستند که محدودیت‌های روش‌های متداول را برطرف می‌کنند. تحقیقات گسترده‌ای هنوز لازم است تا راهکارهای تغذیه‌ای و افزایش محصول با بهره‌وری بالا توسعه یابد. با وجود پیشرفت‌های اخیر در مهندسی ژنتیک، هنوز برای توسعه گونه‌های گیاهی با بهره‌وری بالا و مقاوم از طریق نانوتکنولوژی تحقیقات گسترده‌ای لازم است [1].

7. نتیجه‌گیری و چشم‌اندازهای آینده

مداخلات نانوتکنولوژیکی ابزار مهمی برای نسل بعدی انقلاب فناوری کشاورزی (Agritech) خواهند بود. نانوتکنولوژی ابزارهای متنوعی را برای تقویت ویژگی‌های زراعی گیاهان ارائه کرده است، از جمله: افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش‌ها، بهبود کارایی گیاهان در مواجهه با سموم و کودها، ارائه نانوحسگرها برای کشاورزی هوشمند و مهندسی ژنتیک گیاهان. با این حال، علاوه بر پتانسیل بالای آن، نانوتکنولوژی با چالش‌هایی نیز همراه است. برای درک بهتر پاسخ گیاهان به نانوذرات (NPs)، تحقیقات بیشتری نیاز است. مسیرهای مختلف کاربردی، مانند جذب از طریق برگ، ریشه و خاک، باید پیش از استفاده از نانوذرات به طور دقیق و گسترده مورد بررسی قرار گیرند. کاربرد نانوذرات با اندازه، مقدار، پوشش و روش تحویل مناسب حیاتی است، زیرا مقادیر زیاد می‌توانند باعث استرس اکسیداتیو در سلول‌ها شوند. استفاده از مقدار مناسب می‌تواند بخش‌های خاص گیاه را هدف قرار دهد و همچنین در دسترس بودن مواد مغذی با حلالیت پایین در خاک را افزایش دهد. علاوه بر این، انتظار می‌رود که تشکیل کرونا (corona) نانوذرات هنگام عبور از غشای سلولی با پروتئین‌ها و لیپیدها در گیاه رخ دهد. هنوز مشخص نیست که چه نوع کروناهایی شکل می‌گیرند و چگونه توسط پوشش‌های سطحی مختلف تحت تأثیر قرار می‌گیرند. اثر کرونا بر سرنوشت نانوذرات در گیاهان هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است. نانوذرات باید برای استفاده در گیاه/بافت خاصی ایمن باشند و اثرات جانبی ناشی از اندازه نانویی آن‌ها ارزیابی شود. همچنین، هنوز مشخص نیست که نانوذرات چگونه می‌توانند ریزبیوم گیاه و عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهند. تحقیقات بیشتری برای درک مکانیسم‌های جذب نانوذرات در گیاهان مورد نیاز است. درک بهتر تعاملات نانوذرات با کوتیکول‌ها با ترکیب‌های مختلف لازم است تا پیش‌بینی شود نانوذرات چگونه توسط گیاهان جذب می‌شوند. قرار گرفتن برگ‌های گیاه با سنین مختلف در معرض نانوذرات می‌تواند چسبندگی، جذب و تحرک نانوذرات را تحت تأثیر قرار دهد، زیرا ویژگی‌هایی مانند چگالی روزنه‌ها و ضخامت کوتیکول تغییر می‌کند. این موارد همچنین ممکن است تحت تأثیر شرایط رشد گیاه قرار گیرند. علاوه بر این، از آنجا که نانوذرات مختلف به روش‌های متفاوتی حل می‌شوند، بارگذاری در آوند فلوئم ممکن است متفاوت باشد یا گیاهان رفتار متفاوتی نشان دهند. بنابراین دانستن اینکه آیا پوشش‌های مشابه روی نانوذرات مختلف باعث جذب مشابه در گیاهان با مکانیسم‌های جذب و انتقال متفاوت می‌شود، مفید خواهد بود. در این مرور، جنبه‌های مختلف پیشرفت نانوذرات و استفاده

آن‌ها برای رشد موفقیت‌آمیز کشاورزی مورد بحث قرار گرفت. در این مقاله، چند نوع نانوذره، از جمله نانوکودها، نانوسموم‌ها، نانوبیونیک و نانوحسگرها، که بهترین مداخله برای بهبود بهره‌وری محصول را ارائه می‌دهند، بررسی شد. با غلبه بر چالش‌های ذکرشده، نانوتکنولوژی می‌تواند برای ارزیابی مؤثرتر همه پارامترها و ریسک‌های مرتبط استفاده شود. هر فناوری نقاط قوت و ضعف خود را دارد؛ بنابراین، بدون نادیده گرفتن اثرات منفی نانوتکنولوژی بر محیط زیست، تحقیقات بیشتر برای بهره‌برداری از مزایای آن ضروری است و گام بعدی مناسب خواهد بود.

منابع :

1. Avnesh Kumari a,b,Varnika Rana c,1 SudeshKumar Yadav a,dVinay Kumar c,* Biotechnology Division, Council of Scientific and Industrial Research -Institute of Himalayan Bioresource Technology (CSIR-IHBT), Palampur, Himachal Pradesh176061, India b AcSIR Headquarters CSIR-HRDC Campus, Ghaziabad, Uttar Pradesh 201002, India c Department of Botany, School of Basic Sciences, Central University of Punjab, Bathinda 151401, India d Center of innovative and Applied Bioprocessing, Mohali, Punjab 140306, India(2023)
2. Damalas, C.A., Eleftherohorinos, I.G., 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 8, 1402–1419.
3. Dhakate, P., Kandhol, N., Raturi, G., Ray, P., Bhardwaj, A., Srivastava, A., Kaushal, L., Singh, A., Pandey, S., Chauhan, D.K., 2022. Silicon nanoforms in crop improvement and stress management. *Chemosphere* 305, 135165.
4. Mishra, S., Keswani, C., Abhilash, P., Fraceto, L.F., Singh, H.B., 2017. Integrated approach of agri-nanotechnology: challenges and future trends. *Front. Plant Sci.* 8, 471.
5. Dura'n, N., Marcato, P.D., 2013. Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnology in the food industry: a review. *Int. J. Food Sci. Technol.* 48, 1127–1134.
6. Trdan, S., 2013. Insecticides: Development of Safer and More Effective Technologies. BoD–Books Demand.
7. Campbell, B.M., Thornton, P., Zougmore', R., Van Asten, P., Lipper, L., 2014. Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture? *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 8, 39–43.
8. Prasad, A., Astete, C.E., Bodoki, A.E., Windham, M., Bodoki, E., Sabliov, C.M., 2017a. Zein nanoparticles uptake and translocation in hydroponically grown sugar cane plants. *J. Agric. Food Chem.* 66, 6544–6551.
9. Tripathi, M., Kumar, S., Kumar, A., Tripathi, P., Kumar, S., 2018. Agro-nanotechnology: a future technology for sustainable agriculture. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 7, 196–200.
10. Bisht, N., Chauhan, P.S., 2020. Excessive and disproportionate use of chemicals cause soil contamination and nutritional stress. *Soil Contam. -Threats Sustain. Solut.* 1–10.
11. Lipiec, J., Doussan, C., Nosalewicz, A., Kondracka, K., 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *Int. Agrophys.* 27.
12. Saha, L., Baudh, K., 2020. Sustainable agricultural approaches for enhanced crop productivity, better soil health, and improved ecosystem services. In Book: *Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture*. Publisher Springer, pp. 1–23.
13. Barman, A., Saha, P., Patel, S., Bera, A., 2022. Crop Diversif. Eff. Strategy Sustain. Agric. Dev.
14. Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.-J., Kopittke, P.M., 2016. Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends Plant Sci.* 21, 699–712.
15. Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S.A., ur Rehman, H., Ashraf, I., Sanaullah, M.,

2020. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Sci. Total Environ.* 721, 137778.
16. Kole, C., Kole, P., Randunu, K.M., Choudhary, P., Podila, R., Ke, P.C., Rao, A.M., Marcus, R.K., 2013. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordicacharantia*). *BMC Biotechnol.* 13, 1–10.
17. Agrawal, S., Rathore, P., 2014. Nanotechnology pros and cons to agriculture: a review. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 3, 43–55.
18. Chen, Y.W., Lee, H.V., Juan, J.C., Phang, S.-M., 2016. Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass *Gelidium elegans*. *Carbohydr. Polym. Lett.* 15, 15–22.
19. Singh, H., Sharma, A., Bhardwaj, S.K., Arya, S.K., Bhardwaj, N., Khatri, M., 2021. Recent advances in the applications of nano-agrochemicals for sustainable agricultural development. *Environ. Sci.: Process. Impacts* 23, 213–239.
20. Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Asghar, R.M.A., Alkahtani, J., Dwiningasih, Y., Elshikh, M.S., 2022. Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Front. Plant Sci.* 13.
21. Li, Y., Xi, K., Liu, X., Han, S., Han, X., Li, G., Yang, L., Ma, D., Fang, Z., Gong, S., 2023. Silica nanoparticles promote wheat growth by mediating hormones and sugar metabolism. *J. Nanobiotechnol.* 21, 2.
22. Song, U., Kim, J., 2020. Zinc oxide nanoparticles: a potential micronutrient fertilizer for horticultural crops with little toxicity. *Hortic., Environ., Biotechnol.* 61, 625–631.
23. Sadak, M.S., 2019. Impact of silver nanoparticles on plant growth, some biochemical aspects, and yield of fenugreek plant (*Trigonellafoenum-graecum*). *Bull. Natl. Res. Cent.* 43, 1–6.
24. Majumdar, S., Almeida, I.C., Arigi, E.A., Choi, H., VerBerkmoes, N.C., Trujillo-Reyes, J., Flores-Margez, J.P., White, J.C., Peralta-Videa, J.R., Gardea-Torresdey, J.L., 2015. Environmental effects of nanocerium on seed production of common bean (*Phaseolus vulgaris*): a proteomic analysis. *Environ. Sci. Technol.* 49, 13283–13293.
25. Li, H., Huang, J., Lu, F., Liu, Y., Song, Y., Sun, Y., Zhong, J., Huang, H., Wang, Y., Li, S., 2018. Impacts of carbon dots on rice plants: boosting the growth and improving the disease resistance. *ACS Appl. Bio Mater.* 1, 663–672.
26. Zhao, L., Ortiz, C., Adeleye, A.S., Hu, Q., Zhou, H., Huang, Y., Keller, A.A., 2016. Metabolomics to detect response of lettuce (*Lactuca sativa*) to Cu (OH) 2 nanopesticides: oxidative stress response and detoxification mechanisms. *Environ. Sci. Technol.* 50, 9697–9707.
27. Kumar, V., Sachdev, D., Pasricha, R., Maheshwari, P.H., Taneja, N.K., 2018. Zinc- supported multiwalled carbon nanotube nanocomposite: a synergism to micronutrient release and a smart distributor to promote the growth of onion seeds in arid conditions. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10, 36733–36745.
28. Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., Khorasani, R., 2016. Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punicagranatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Sci. Hortic.* 210, 57–64.
29. Genaidy, E.A., Abd-Alhamid, N., Hassan, H.S., Hassan, A.M., Hagagg, L.F., 2020. Effect of foliar application of boron trioxide and zinc oxide nanoparticles on leaves chemical composition, yield and



- fruit quality of *Olea europaea* L. cv. Picual. Bull. Natl. Res. Cent. 44, 1–12.
30. Chaudhary, P., Chaudhary, A., Parveen, H., Rani, A., Kumar, G., Kumar, R., Sharma, A., 2021. Impact of nanophos in agriculture to improve functional bacterial community and crop productivity. BMC Plant Biol. 21, 1–12. 151, 1210–1219.
 31. Miranda-Villago´mez, E., Trejo-Te´llez, L.I., Go´mez-Merino, F.C., Sandoval-Villa, M., S´anchez-García, P., Aguilar-Me´ndez, M.A´., 2019. Nanophosphorus fertilizer stimulates growth and photosynthetic activity and improves P status in rice. J. Nanomater. 2019, 1–11.
 32. Nagdalian, A.A., Blinov, A.V., Siddiqui, S.A., Gvozdenko, A.A., Golik, A.B., Maglakelidze, D.G., Rzhepakovsky, I.V., Kukharuk, M.Y., Piskov, S.I., Rebezov, M.B., 2023. Effect of selenium nanoparticles on biological and morphofunctional parameters of barley seeds (*Horde´umvulg´are* L.). Sci. Rep. 13, 6453.
 33. Zahedi, S.M., Maharani, F., Sarikhani, S., Padervand, M., 2020. Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. Sci. Rep. 10, 17672.
 34. Abdel Latef, A.A.H., Zaid, A., Abu Alhmad&, M.F., Abdelfattah, K.E., 2020. The impact of priming with Al₂O₃ nanoparticles on growth, pigments, osmolytes, and antioxidant enzymes of Egyptian Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) cultivar. Agronomy 10, 681.
 35. Abdalla, H., Adarosy, M.H., Hegazy&, H.S., Abdelhameed, R.E., 2022. Potential of green synthesized titanium dioxide nanoparticles for enhancing seedling emergence, vigor and tolerance indices and DPPH free radical scavenging in two varieties of soybean under salinity stress. BMC Plant Biol. 22, 1–18.
 36. Feng, J., Shi, Y., Yu, Q., Sun, C., Yang, G., 2016. Effect of emulsifying process on stability of pesticide nanoemulsions. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 497, 286–292.
 37. Liu, X., He, B., Xu, Z., Yin, M., Yang, W., Zhang, H., Cao, J., Shen, J., 2015. A functionalized fluorescent dendrimer as a pesticide nanocarrier: application in pest control. Nanoscale 7, 445–449.
 38. Sun, C., Shu, K., Wang, W., Ye, Z., Liu, T., Gao, Y., Zheng, H., He, G., Yin, Y., 2014. Encapsulation and controlled release of hydrophilic pesticide in shell cross-linked nanocapsules containing aqueous core. Int. J. Pharm. 463, 108–114.
 39. Chin, C.-P., Wu, H.-S., Wang, S.S., 2011. New approach to pesticide delivery using nanosuspensions: research and applications. Ind. Eng. Chem. Res. 50, 7637–7643.
 40. Qian, K., Shi, T., He, S., Luo, L., Cao, Y., 2013. Release silica nanospheres prepared by miniemulsion method. M.
 41. Wanyika, H., 2014. Sustained release of fungicide metalaxyl by mesoporous silica nanospheres. In Nanotechnology for Sustainable Development. Springer,, pp. 321–329.
 42. Bernardos, A., Marina, T., Zˇaˇcek, P., P´erez-Esteve, E. , Mart´ınez-Ma´ıez, R., Lhořka, M., Kouřimsk´a, L., Pulkr´abek, J., Klouřek, P., 2015. Antifungal effect of essential oil

- components against *Aspergillus niger* when loaded into silica mesoporous supports. J. Sci. Food Agric. 95, 2824–2831.
43. Zhao, X., Meng, Z., Wang, Y., Chen, W., Sun, C., Cui, B., Cui, J., Yu, M., Zeng, Z., Guo, S., 2017. Pollen magnetofection for genetic modification with magnetic nanoparticles as gene carriers. Nat. Plants 3, 956–964.
 44. Jameel, M., Shueb, M., Khan, M.T., Ullah, R., Mobin, M., Farooqi, M.K., Adnan, S.M., 2020. Enhanced insecticidal activity of thiamethoxam by zinc oxide nanoparticles: A novel nanotechnology approach for pest control. ACS Omega 5, 1607–1615.
 45. Kim, H.S., Kang, H.S., Chu, G.J., Byun, H.S., 2008. Antifungal effectiveness of nanosilver colloid against rose powdery mildew in greenhouses. Solid State Phenom. 135, 15–18.
 46. Rajesh, S., Raja, D.P., Rathi, J., Sahayaraj, K., 2012. Biosynthesis of silver nanoparticles using *Ulva fasciata* (Delile) ethyl acetate extract and its activity against *Xanthomonas campestris* pv. *malvacearum*. J. Biopestic. 5, 119.
 47. Zhao, F., Xin, X., Cao, Y., Su, D., Ji, P., Zhu, Z., He, Z., 2021. Use of carbon nanoparticles to improve soil fertility, crop growth and nutrient uptake by corn (*Zea mays* L.). Nanomaterials 11, 2717.
 48. Jafir, M., Ahmad, J.N., Arif, M.J., Ali, S., Ahmad, S.J.N., 2021. Characterization of *Ocimum basilicum* synthesized silver nanoparticles and its relative toxicity to some insecticides against tobacco cutworm, *Spodoptera litura* Fab. (Lepidoptera; Noctuidae). Ecotoxicol. Environ. Saf. 218, 112278.
 49. Hazaa, M., Alm-Eldin, M., Ibrahim, A.-E., Elbarky, N., Salama, M., Sayed, R., Sayed, W., 2021. Biosynthesis of Silver Nanoparticles using *Borago officinalis* leaf extract, characterization and larvicidal activity against cotton leaf worm, *Spodoptera littoralis* (Bosid). Int. J. Trop. Insect Sci. 41, 145–156.
 50. Dorjee, L., Gogoi, R., Kamil, D., Kumar, R., Verma, A., 2023. Copper nanoparticles hold promise in the effective management of maize diseases without impairing environmental health. Phytoparasitica 1–27.
 51. El-Sayed, E.-S.R., Mohamed, S.S., Mousa, S.A., El-Seoud, M.A.A., Elmehlawy, A.A., Abdou, D.A., 2023. Bifunctional role of some biogenic nanoparticles in controlling wilt disease and promoting growth of common bean. AMB Express 13, 41.
 52. Alamri, S., Nafady, N.A., El-Sagheer, A.M., El-Aal, M.A., Mostafa, Y.S., Hashem, M., Hassan, E.A., 2022. Current utility of arbuscular mycorrhizal fungi and hydroxyapatite nanoparticles in suppression of Tomato Root-Knot Nematode. Agronomy 12, 671.
 53. Chhipa, H., 2017. Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. Environ. Chem.