



چکیده

رفرانس دهی این مقاله Citation

Ghorbani R, Zakipour Z, Ashrafi-Dehkordi E. 2025. Application of nanoparticles in enhancing tolerance to biotic and abiotic stresses in plants. Genetic Engineering and Biosafety Journal, 14 (1): 133-146. Doi: [10.61882/gebsj.14.1.11](https://doi.org/10.61882/gebsj.14.1.11)
URL: <http://gebsj.ir/article-1-533-en.html>

کاربرد نانوذرات در تقویت تحمل به تنش‌های زیستی و غیر زیستی در گیاهان

Application of nanoparticles in enhancing tolerance to biotic and abiotic stresses in plants

راضیه قربانی^{۱*}، زهرا زکی پور^۲، الهام اشرفی دهکردی^۳

Raziyeh Ghorbani^{*1}, Zahra Zakipour², Elham Ashrafi-Dehkordi³

۱-دکتری اصلاح نباتات، بخش تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران،

۲- استادیار گروه منابع طبیعی و کشاورزی، مرکز آموزش عالی اقلید، اقلید، ایران

۳-دکتری اصلاح نباتات، مرکز تحقیقات تغذیه و علوم غذایی، گروه بهداشت و کنترل کیفی مواد غذایی،

دانشکده تغذیه و علوم غذایی دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

1-PhD in Plant Breeding, Department of Plant Production and Genetics, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Agriculture and Natural Resources, Higher Education Center of Eghlid, Eghlid, Iran.

3- PhD in Plant Breeding, Nutrition Research Center, Department of Food Hygiene and Quality Control, School of Nutrition and Food Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran.

*Corresponding Author, Email: پست الکترونیکی: Ghorbaniraziyeh@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۲ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷ - تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷)

Received: 2025/11/13 | Accepted: 2026/01/17 | Published: 2026/01/17

Abstract

The demand for agricultural products continues to increase in parallel with the rapid growth of the global population. However, plants are exposed to a wide range of biotic stresses, including pests, diseases, and weeds, as well as abiotic stresses such as drought, salinity, heat, cold, and heavy metals. These stresses significantly reduce plant growth and crop productivity worldwide, posing a serious threat to agricultural production and global food security. Moreover, they result in substantial economic losses. To control pests, weeds, and plant pathogens and to maximize crop yields, agrochemicals have been widely used. However, the excessive use of these compounds has led to severe environmental consequences, posed risks to human health, and imposed considerable economic costs. Therefore, the need for sustainable utilization of natural resources and the reduction of environmental impacts has increased interest in the development and application of innovative technologies. Among these, nanotechnology has emerged as a promising and effective approach for providing sustainable solutions in various fields, including crop management. In recent years, the application of nanoscale agricultural inputs, including nanofertilizers, nanopesticides, and nanoherbicides, has attracted considerable attention as an innovative and promising strategy for promoting plant growth, enhancing crop productivity, and improving agricultural performance. Compared with conventional agrochemicals, these nanomaterials offer greater efficiency, improved targeted delivery, and reduced environmental impacts. The aim of this study is to comprehensively review the applications of nanoparticles in enhancing plant tolerance to biotic and abiotic stresses and to elucidate their role in improving crop productivity and strengthening global food security to meet the demands of the growing world population.

Keywords: Food security, Biotic stress, Abiotic stress, Nanoparticles, Plant productivity

Genetic Engineering and Biosafety Journal Volume 14, Number 1, 2025

خلاصه

تقاضا برای محصولات کشاورزی با رشد سریع جمعیت جهان، همچنان رو به افزایش است. با این حال گیاهان در معرض طیف وسیعی از تنش‌های زیستی شامل آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز و غیر زیستی شامل خشکسالی، شوری، گرما، سرما و فلزات سنگین قرار دارند که بر رشد گیاه و بهره‌وری محصولات خوراکی در سراسر جهان تأثیر منفی می‌گذارد و تهدید بزرگی برای تولید مواد غذایی کشاورزی محسوب می‌شوند. این تنش‌ها باعث بروز مشکلات امنیت غذایی بیشتری می‌شوند و منجر به خسارات اقتصادی می‌گردند. مواد شیمیایی کشاورزی به طور گسترده برای مدیریت آفات، علف‌های هرز و عوامل بیماری‌زای گیاهی برای به حداکثر رساندن عملکرد محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، استفاده بیش از حد از این ترکیبات عواقب زیست‌محیطی شدیدی ایجاد کرده، سلامت انسان را تهدید کرده و هزینه‌های اقتصادی هنگفتی را به همراه داشته است. با توجه به ضرورت بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، استفاده از فناوری‌های نوین بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، فناوری نانو به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، به عنوان یکی از راهکارهای نوین برای ارائه جایگزین‌های کارآمد در حوزه‌های مختلف، از جمله مدیریت محصولات کشاورزی، شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، کاربرد مواد شیمیایی کشاورزی در مقیاس نانو، از جمله نانوکودها، نانوأفت‌کش‌ها و نانوعلف‌کش‌ها، به عنوان فناوری‌های نوین و امیدبخش در تقویت رشد گیاهان، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است؛ زیرا می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری و بهبود عملکرد محصولات کشاورزی شود. هدف از این مطالعه، بررسی جامع کاربرد نانوذرات در تقویت تحمل به تنش‌های مختلف در گیاهان و در نتیجه افزایش بهره‌وری محصولات و تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان می‌باشد.

کلمات کلیدی: امنیت غذایی، تنش زیستی، تنش غیر زیستی، نانوذرات، بهره‌وری گیاهان

مقدمه و بررسی

Introduction and Review

سازمان غذا و کشاورزی (FAO) تخمین می‌زند که در سال ۲۰۵۰، جمعیت جهان به ۹ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت و تولید جهانی غذا باید ۷۰ درصد افزایش یابد تا تقاضای رو به رشد جمعیت برای غذا را برآورده کند (Tyczewska et al., 2018). در دهه‌های اخیر، جمعیت جهان به طور قابل توجهی افزایش یافته و فشار بر تولید مواد غذایی به صورت تصاعدی افزایش یافته است. در حال حاضر، عوامل تنش‌زای زیستی و غیرزیستی سبب از بین رفتن محصولات کشاورزی در سراسر جهان می‌شوند. تنش‌های غیرزیستی مانند دمای بالا، دمای پایین، خشکسالی، شوری، شرایط غرقابی و آب و هوای نامساعد تولیدات کشاورزی را تهدید می‌کنند. تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر تولید محصولات کشاورزی باعث از دست رفتن سالانه ۵۱ تا ۸۲ درصد از عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود (Oshunsanya et al., 2019). ظهور تغییرات اقلیمی به طور قابل توجهی به صورت منفی بر تولید جهانی کشاورزی تأثیر گذاشته است. علاوه بر تنش‌های غیرزیستی، تنش‌های زیستی شامل آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز نیز منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شوند. بیماری‌های گیاهی، آفات و علف‌های هرز سالانه موجب از دست رفتن بخش قابل توجهی از تولیدات کشاورزی در جهان می‌شوند. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2025)، آفات گیاهی سالانه تا ۴۰ درصد از محصولات کشاورزی جهان را از بین می‌برند و بیماری‌های گیاهی نیز بیش از ۲۲۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی در سال به همراه دارند.

مواد شیمیایی کشاورزی، از جمله علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و همچنین کودها، نقش ضروری در روش‌های سنتی کشاورزی دارند که سهم قابل توجهی در افزایش عملکرد محصولات کشاورزی، تأمین تقاضای غذایی جمعیت رو به افزایش جهان و تضمین توسعه

پایدار کشاورزی مدرن داشته‌اند. با این حال، استفاده گسترده و بی‌رویه از این مواد شیمیایی کشاورزی تأثیر زیادی بر کیفیت محصولات کشاورزی جهانی و محیط زیست دارد. بیش از ۹۰ درصد از این مواد در نهایت به موجودات هدف نمی‌رسند، بلکه با تبخیر، اتصال به مواد معدنی/آلی موجود در خاک یا شسته شدن با آب از بین می‌روند. در نتیجه، این بقایای مواد شیمیایی کشاورزی که در خاک و آب باقی می‌مانند، منجر به ایجاد مقاومت دارویی در موجودات هدف و از بین رفتن تنوع زیستی اکوسیستم‌ها می‌شوند. استفاده بیش از حد از آفت‌کش‌ها باعث ایجاد مقاومت در میکروارگانیسم‌ها شده و کنترل آنها را دشوارتر کرده و بر بهره‌وری تأثیر گذاشته است. استفاده مکرر از قارچ‌کش‌های مصنوعی علیه عوامل بیماری‌زای گیاهی، تعادل زیست‌محیطی را بر هم می‌زند و سبب افزایش مقاومت عوامل بیماری‌زای گیاهی شده است (Khandelwal et al., 2016). کوددهی بیش از حد در درازمدت، کودها را در خاک باقی می‌گذارد و منجر به اسیدی شدن شدید خاک و تخریب محیط زیست می‌شود. بنابراین، باید فناوری‌های سازگار با محیط زیست توسعه یابند تا به گیاهان در غلبه بر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و تضمین عملکرد بهینه محصول و پایداری کشاورزی کمک کنند (Wang et al., 2021).

با توجه به ضرورت بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، استفاده از فناوری‌های نوین بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، فناوری نانو به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین برای ارائه جایگزین‌های کارآمد در حوزه‌های مختلف، از جمله مدیریت محصولات کشاورزی، شناخته می‌شود (Aguirre-Becerra et al., 2022). کشاورزی مبتنی بر نانو یک موضوع داغ در حال ظهور است. پیاده‌سازی فناوری نانو در کشاورزی مدرن می‌تواند به بهبود بهره‌وری مصرف آب، جلوگیری از بیماری‌های گیاهی، تضمین امنیت غذایی، کاهش آلودگی محیط زیست و افزایش پایداری کمک کند. در این راستا، نانوذرات می‌توانند به مبارزه با کمبود مواد مغذی، افزایش تحمل به تنش و بهبود عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی کمک کنند. این امر می‌تواند با تحریک فعالیت آنزیم‌های خاص، افزایش محتویات (به عنوان مثال کلروفیل) و کارایی فتوسنتز و کنترل عوامل بیماری‌زای گیاهی حاصل شود (El-Saadony et al., 2022). طبق تعریفی که اولین بار در سال ۱۹۷۴ در دانشگاه علوم توکیو ارائه شد، فناوری نانو دستکاری ماده در مقیاس نانومتر است و نانوذرات به عنوان مولکول‌هایی تعریف می‌شوند که در این مقیاس تولید یا سنتز می‌شوند. نانوذرات مواد کوچکی با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که به سه روش اصلی شامل سنتز فیزیکی، سنتز شیمیایی و سنتز بیولوژیکی تولید می‌شوند (Khan & Upadhyaya, 2019). برخلاف معادل‌های بزرگترشان، نانوذرات دارای خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد و متنوعی هستند. برای مثال، نانوذرات به دلیل اندازه بسیار کوچکشان، نسبت سطح به حجم بالایی دارند، اثربخشی جذب بالایی دارند و راندمان اتصال و عملکردشان افزایش یافته است. روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی نانوذرات وجود دارد. طبقه‌بندی کلی آن به فرم‌های آلی و معدنی است. با این حال، با توجه به اندازه، شکل، ساختار و سنتز آنها، می‌توان آنها را به طور خاص‌تر به فلزات (مانند آلومینیوم، طلا، آهن، سرب، نقره، کبالت، روی، کادمیوم و مس)، اکسیدهای فلزی (مانند اکسید روی، دی اکسید سیلیکون، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم، اکسید سریم، اکسید تیتانیوم و مگنتیت) و نانوذرات زیستی (مانند مگنتوزوم‌ها، آگزوزوم‌ها، لیپوپروتئین‌ها و ویروس‌ها) طبقه‌بندی کرد (Khan and Hossain, 2022).

پتانسیل کشاورزی و تأثیر نانوذرات بر گیاهان

فناوری نانو در سال‌های اخیر به دلیل طیف گسترده‌ای از کاربردهای آن در پزشکی، داروسازی، انرژی و بخش کشاورزی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. علاوه بر تلاش‌ها در برنامه‌های اصلاح نژاد، مدیریت مزرعه و شیوه‌های کشت، رویکردهای جدیدی مانند کشاورزی مبتنی بر نانو نیز پتانسیل برآورده کردن کمبود پیش‌بینی شده غذا را دارند. کشاورزی مبتنی بر نانو، نه تنها پتانسیل بهبود تحمل گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی را دارد، بلکه از پتانسیل بهبود اصلاح نژاد و کشاورزی گیاهان نیز برخوردار می‌باشد. بنابراین، علاوه بر پرداختن به کمبود غذا در سال ۲۰۵۰، نانوتکنولوژی گیاهی می‌تواند نقش مهمی در کشاورزی پایدار نیز ایفا کند. در کشاورزی، فناوری نانو عمدتاً در کاربرد نانوکودها و نانوآفت‌کش‌ها برای ردیابی محصولات و سطوح مواد مغذی به منظور افزایش رشد و بهره‌وری و افزایش مقاومت گیاه در برابر آفات و بیماری‌های میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Shang et al., 2019). کاربرد نانوذرات به عنوان نانوکودها و

محرك‌های زیستی می‌تواند به بهبود رشد و بهره‌وری محصولات کمک کند. ویژگی‌های نانوذرات برای بهبود خصوصیات گیاهی و کاربرد آنها در فعالیت‌های کشاورزی کافی و امیدوارکننده است. ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر، نسبت سطح به حجم بالا، پتانسیل آزادسازی آهسته و پایدار، ماهیت متنوع (یعنی آلی، معدنی و هیبریدی)، شکل، بافت و تنوع بار سطحی، برهمکنش ویژه و پایداری، از ویژگی‌های مفید نانوذرات هستند که پتانسیل بالایی برای کاربرد آنها در فعالیت‌های کشاورزی ایجاد می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های ذکر شده نانوذرات، نفوذپذیری آنها را افزایش می‌دهد، نفوذ در غشای سلولی را افزایش می‌دهد و بنابراین ورود آنها را از طریق برگ‌ها و ریشه‌های گیاهان تسهیل می‌کند (Liscano et al., 2000). در طول دهه‌های گذشته، برای غلبه بر چالش‌های فعلی کشاورزی مدرن، از مواد پیشرفته برای ساخت نانوپلتفرم‌های سازگار با محیط زیست با خواص منحصر به فرد برای توسعه پایدار کشاورزی، مانند مواد مبتنی بر سیلیس، نانوذرات فلزی/اکسید فلزی، نانوذرات کربنی، نانوذرات تبدیل بالا و کانی‌های رسی استفاده شده است که چشم‌اندازهای روشن و اثرات بهبود یافته‌ای را در تشخیص آفت‌کش‌ها و مایکوتوکسین‌ها در محل، غیرفعال‌سازی پاتوژن‌های گیاهی، کنترل آفات و تنظیم رشد محصول نشان می‌دهند (Wang et al., 2021). نانوذرات همچنین می‌توانند به عنوان کودهای ماکرو و میکرو-نانو در گیاهان برای کاهش علائم کمبود مواد مغذی و تکمیل عناصر ضروری عمل کنند. در کشاورزی و تجارت محصولات کشاورزی، نانوذرات می‌توانند به شکل نانوحسگرها، نانوکودها، نانوعلف‌کش‌ها/نانو آفت‌کش‌ها و نانواصلاح‌کننده‌ها به کار روند. نانوفرمولاسیون مواد شیمیایی کشاورزی، مانند نانوآفت‌کش‌ها و نانوکودها، به طور قابل توجهی تلفات ریزمغذی‌های کودها را از طریق تبخیر و آبشویی کاهش می‌دهند، دسترسی مؤثر به گیاهان را افزایش می‌دهند، گیاهان را به تدریج و به صورت کنترل‌شده تغذیه می‌کنند و در نهایت خطرات زیست محیطی ناشی از استفاده بیش از حد از کودهای سنتی را کاهش می‌دهند (Shang et al., 2019).

یکی از روندهای این حوزه، جستجوی روش‌های سبز برای سنتز نانوذرات است که اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. در سال‌های اخیر، سنتز نانوذرات فلزی و اکسید فلزی با استفاده از عصاره‌های گیاهی، قارچ‌ها و جلبک‌ها در زمینه علوم نانو و نانوتکنولوژی ظهور کرده است که مزایای بی‌شماری نسبت به رویکردهای فیزیکیوشیمیایی مرسوم دارد. برخی از باکتری‌ها، قارچ‌ها و عصاره‌های گیاهی می‌توانند برای سنتز نانوذرات استفاده شوند، که فرآیند تولید را ساده کرده و استفاده از حلال‌ها و انرژی را کاهش می‌دهد و این فناوری سبز را برای دانشمندان و صنعت به طور فزاینده‌ای جذاب می‌کند. این روش‌های سازگار با محیط زیست، مقرون به صرفه، سریع، کم‌زحمت‌تر و کارآمدتر از روش‌های شیمیایی مرسوم هستند. سنتز سبز نانوذرات، جایگزینی سازگار با محیط زیست در کاربردهای کشاورزی ارائه داده است (Katiyar et al., 2020) (جدول ۱).

نانوحسگرها به عنوان یکی دیگر از کاربردهای نانوفناوری گزارش شده‌اند که می‌توانند کیفیت و عملکرد محصولات کشاورزی را بهبود بخشند، در حالی که خروجی محصولات غذایی با کیفیت بالا و سالم را تضمین می‌کنند. نانوحسگرهای جدید در درجه اول در ایمنی محصولات کشاورزی برای تشخیص و مدیریت عوامل بیماری‌زای گیاهی و برای اندازه‌گیری و نظارت بر کاربردها، نفوذ و بقایای مواد شیمیایی کشاورزی و همچنین آلودگی محیط زیست استفاده می‌شوند. استفاده از آنها باعث پیشرفت در مدیریت انسانی سلامت خاک و گیاه، بهبود کیفیت و حفاظت از غذا، روش‌های بسته‌بندی بهینه و بهبود نظارت بر خاک و شرایط محصول شده است (Shang et al., 2019). سایر کاربردهای کشاورزی نانوفناوری شامل استفاده از نانودستگاه‌ها در مهندسی ژنتیک گیاهان، مدیریت پس از برداشت و تشخیص بیماری‌های گیاهی است. نانوتکنولوژی شامل استفاده از روش‌های جدید برای اصلاح ژنتیکی و مهندسی برنامه‌های محصول است که بهره‌وری کشاورزی، ایمنی غذا و ظرفیت فرآوری را افزایش می‌دهد و در عین حال پایداری کشاورزی را ارتقا می‌دهد (El-Saadony et al., 2022).

جدول ۱- سنتز سبز نانوذرات و کاربرد آن در کشاورزی.

Table 1. Green synthesis of nanoparticles and its application in agriculture.

منبع سنتز	نوع نانوذره	کاربرد آن در کشاورزی	منبع
عصاره گیاه مورینگا	CuO و ZnO	فعالیت ضد قارچی	Ganjali et al., 2025
عصاره برگ زعفران (<i>Crocus sativus</i>)	ZnO	فعالیت آنتی اکسیدانی و ضد میکروبی	Rahaiee et al., 2020
بیوسورفکتانت باکتریایی	ZnO	افزایش جوانه زنی و رشد اولیه گیاهچه	Das et al., 2024
عصاره برگ <i>Psidium guajava</i>	Fe ₃ O ₄	افزایش رشد، عملکرد و تحمل به شوری	Sheta et al., 2024
باکتری <i>Bacillus subtilis</i>	ZnO	فعالیت ضد قارچی علیه عوامل بیماری زای گیاهی	Murali et al., 2023
باکتری <i>Bacillus subtilis</i>	Fe ₃ O ₄	کاهش اثرات شوری، افزایش فعالیت آنزیم ها و بهبود رشد	Naik et al., 2025
عصاره برگ <i>Cassia fistula</i>	ZnO و Ag	افزایش جوانه زنی در غلظت های پایین	Rabbani et al., 2025
عصاره <i>Ocimum gratissimum</i>	Fe ₃ O ₄	افزایش جذب آهن و بهبود رشد	John et al., 2024
عصاره گیاه گشنیز <i>Coriandrum sativum</i>	ZnO	افزایش درصد جوانه زنی، رشد ریشه و شاخه در گیاهچه های نخود و ماش	Ukidave et al., 2022
عصاره برگ اکالیپتوس <i>lanceolata Eucalyptus</i>	ZnO	افزایش رشد گیاه و خاصیت ضد میکروبی	Sharma et al., 2022

کاربرد فناوری نانو در اصلاح نباتات

اصلاح نباتات بر دو استراتژی اصلی متمرکز شده است: انتخاب طبیعی و اصلاح ژنتیکی، که مورد دوم شامل وارد کردن DNA مورد نظر به ژنوم گیاه است. با این حال، اگرچه این تکنیک یک تکنیک نسبتاً موفق در نظر گرفته می شود، اما چالش های متعددی مانند سمیت سلولی و قدرت نفوذ DNA خارجی، هم در سطح دیواره سلولی و هم در ژنوم سلول هدف را به همراه دارد (Krishna et al., 2018). در این راستا، فناوری نانو ابزارهای جدیدی را برای افزایش اصلاح ژن فراهم می کند. در حال حاضر، تراریختی با آگروباکتریوم تومفیشنز (*Agrobacterium tumefaciens*) و بمباران با تفنگ ژنی، پرکاربردترین تکنیک ها برای ایجاد رویدادهای تراریخته در گیاهان هستند. با این حال، این دو روش یا به تعداد کمی از گونه های گیاهی از نظر ژنتیکی قابل تغییر محدود می شوند یا می توانند اثرات نامطلوبی مانند آسیب بافتی در گیاهان ایجاد کنند (Landry & Mitter, 2019). یکی از تکنیک های تراریختی گونه های غیرمدل، راندمان پایین و فرآیندهای پرهزینه مانند کشت کالوس است. استفاده از نانوذرات، راهکاری جدید و مؤثر برای تولید گیاهان تراریخته، به ویژه در گونه های غیرمدل، محسوب می شود. نانوذرات علاوه بر عمل به عنوان یک پلتفرم انتقال برای تولید رویدادهای تراریخته، می توانند به عنوان یک داربست نیز عمل کنند تا راندمان انتقال مواد شیمیایی یا معرف های ناپایدار مانند RNA به عنوان siRNA یا dsRNA را نسبت به کاربرد RNA به تنهایی افزایش دهند (Wu & Li, 2022). در یک مطالعه نشان داده شده است که طیف گسترده ای از نانوذرات می توانند برای انتقال و جابجایی DNA، RNA و پروتئین ها به ژنوم میزبان استفاده شوند و ادغام موفقیت آمیز و صحیح تراریخته را تضمین کنند (Mohamed & Kumar, 2019). از لحاظ تئوری، نانوذرات با بار مثبت بدون فلزات سنگین و با هزینه کم، مانند نقاط کربنی یا نانوذرات سیلیس، می توانند به عنوان پلتفرم هایی برای تحویل مواد ژنتیکی کاربردی با بار منفی به سلول های گیاهی نیز استفاده شوند. دسترسی به نانوذرات و سادگی عملیات تا حد زیادی فراوانی استفاده از این تکنیک تراریخته مبتنی بر نانو را تعیین می کند (Wu & Li, 2022) (جدول ۲).

تأثیر نانوذرات برای محافظت از گیاه در برابر تنش های زیستی و غیرزیستی

نانوذرات به عنوان یک گلوله جادویی عمل می کنند و می توانند به طور بالقوه بر محدودیت های تنش های زیستی و غیرزیستی در گیاهان غلبه کنند. کمبود آب یکی از محدودیت های اصلی تولید کشاورزی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است. استفاده از نانومحصولات سازگار با محیط زیست برای افزایش تحمل خشکی می تواند به حفظ یا بهبود سود کشاورزی در مناطق کم آب کمک کند. تحمل خشکی گیاه با استفاده از نانومحصولات در بسیاری از گونه های گیاهی نشان داده شده است (Sun et al., 2021). نانوذرات اکسید سربیم (نانوسربیم CeO_2) تحمل خشکی را در سورگوم بهبود بخشید (Djanaguiraman et al., 2018). پرایمینگ بذر با نانوسربیم پوشش داده شده با پلی اکریلیک

اسید، تحمل شوری پنبه را بهبود بخشید (An et al., 2020). در یک بررسی نانوذرات اکسید سریم تحمل شوری را در گیاه *Brassica napus* افزایش دادند، که تحت تنش شوری افزایش ۴۸ درصدی وزن تازه نسبت به شاهد نشان داد (Rossi et al., 2016).

جدول ۲- کاربرد فناوری نانو در اصلاح نباتات و مهندسی ژنتیک.

Table 2. Application of nanotechnology in plant breeding and genetic engineering.

منبع	کاربرد در اصلاح نباتات و مهندسی ژنتیک	نانوماده
Demirer et al., 2019	انتقال DNA بدون استفاده از آگروباکتریوم	نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره
Ali et al., 2022	انتقال DNA به گیاهان سالم	نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن‌ایمین
Kwak et al., 2019	انتقال ژن به کلروپلاست	نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده با کیتوزان
Martin-Ortigosa et al., 2014	انتقال پروتئین Cre	نانوذرات سیلیکای مزو متخلخل
Mitter et al., 2017	انتقال RNA دو رشته‌ای (dsRNA)	نانوصفحات رسی دولایه
Demirer et al., 2020	انتقال RNA کوچک مداخله‌گر (siRNA)	نانولوله‌های کربنی
Zhao et al., 2017	انتقال ژن از طریق گرده	نانوذرات مغناطیسی
Demirer et al., 2019	انتقال DNA در گونه‌های مختلف گیاهی	نانولوله‌های کربنی
Cunningham et al., 2018	انتقال RNA و DNA	نانوحامل‌های کربنی
Rohela et al., 2024	انتقال سامانه CRISPR	نانوکامپوزیت‌های پلیمری

در دو مطالعه دیگر، نانوذرات اکسید سریم پوشش داده شده با اسید پلی‌آکریلیک، تحمل شوری را در گیاه آرابیدوپسیس (اسپری برگ) و پنبه (اسپری برگ) افزایش دادند، به طوری که گیاهان تحت تنش شوری به ترتیب ۱۸ درصد و ۴۰ درصد افزایش زیست توده نسبت به گیاهان کنترل بدون نانوذرات نشان دادند. مکانیسم این امر به صورت جارو کردن گونه‌های اکسیژن فعال توسط نانوسریا و در نتیجه تعدیل فعالیت کانال‌های یونی و ناقل‌ها برای امکان حفظ بهتر K^+ در مزوفیل و توانایی دفع Na^+ از شاخساره پیشنهاد شده است (Liu et al., 2021; Wu et al., 2018). نانوذرات اکسید سریم به صورت اسپری برگی تحمل سورگوم را در برابر خشکسالی و تحمل آرابیدوپسیس را در برابر اشعه ماوراء بنفش، نور زیاد و دما افزایش دادند (Djanaguiraman et al., 2018; Wu et al., 2017). نانوذرات سیلیکون می‌توانند کاندیدای دیگری برای افزایش تحمل تنش در گیاه باشند. قربانپور و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که گیاهان جو تیمار شده با نانوذرات سیلیکون (به صورت کاربرد خاک) بهبودی بیشتری و همچنین محتوای کلروفیل (تا ۱۷ درصد) و زیست توده شاخساره (تا ۲۷ درصد) بالاتری نسبت به شاهد در مقابل تنش خشکی نشان دادند. نانوذرات اکسید روی (کاربرد خاکی) تحمل خشکی را در گیاهان ذرت بهبود بخشیدند، بطوریکه در شرایط خشکسالی افزایش ۷۵ درصدی پرولین و کاهش ۱۸ درصدی پراکسید هیدروژن را نسبت به شاهد نشان داد. این نتیجه به افزایش سنتز ملاتونین و سیستم آنزیم آنتی‌اکسیدانی فعال‌شده که با بیان ژن‌های Fe/Mn SOD، Cu/Zn SOD و CAT نشان داده می‌شود، نسبت داده شد و آسیب اکسیداتیو به میتوکندری و کلروپلاست‌ها را کاهش داد (Sun et al., 2020). مصطفی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که کاربرد نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) همراه با کلسیم در گیاه گندم تحت تنش خشکی، سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشا، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد رشد شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نانومواد از طریق کاهش آسیب اکسیداتیو، حفظ عملکرد فتوسنتز، بهبود تعادل آب و تقویت سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی، نقش مؤثری در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های غیرزیستی ایفا می‌کنند. در مطالعه‌ای دیگر، سراف و همکاران (۲۰۲۲) نقش نانومواد فلزی و شبه‌فلزی را در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های غیرزیستی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوذرات آهن، روی، سیلیکا، تیتانیوم و سلنیوم باعث افزایش فتوسنتز، بهبود جذب عناصر غذایی، حفظ پایداری غشاهای سلولی، افزایش کارایی سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش خسارت ناشی از تنش‌های خشکی، شوری، دما و فلزات سنگین می‌شوند. نویسندگان همچنین بیان کردند که این نانوذرات از طریق تنظیم مسیرهای پیام‌رسانی سلولی و بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده به تنش، مقاومت گیاه را در شرایط نامساعد محیطی افزایش می‌دهند.

علاوه بر تنش‌های غیرزیستی، تنش‌های زیستی مانند تنش‌های ناشی از عوامل بیماری‌زا و حشرات نیز منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شوند. اگرچه آفت‌کش‌ها تولید محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهند، اما افزایش مقاومت در قارچ‌ها و آفات و نگرانی‌ها در مورد اثرات آنها بر سلامت انسان و محیط زیست رویکردهای کارآمدتر و سازگارتر با محیط زیست را برای محافظت از محصولات کشاورزی در برابر تنش‌های زیستی ایجاب می‌کند (Damalas & Eleftherohorinos, 2011). نانوتکنولوژی می‌تواند به توسعه آفت‌کش‌های کارآمد و سبز، مانند حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و علف‌کش‌ها کمک کند. بسیاری از نانوذرات برای اثرات مثبت تحمل تنش‌های زیستی گیاهان آزمایش شده‌اند، که از بین آنها نانوذرات مبتنی بر Ag و Cu دو مورد از پرکاربردترین‌ها هستند. نانوذرات مبتنی بر Ag نه تنها پتانسیل سرکوب بیماری، بلکه توانایی مهار نماتدها را نیز دارند (Ocoy et al., 2013). عملکردهای مشابهی نیز در نانوذرات مبتنی بر Cu یافت شد که نشان‌دهنده سرکوب بیماری و مهار فعالیت آفات است (Ayoub et al., 2018). نانوذرات فلزی/اکسید فلزی، به عنوان یکی از رایج‌ترین مواد، به دلیل فعالیت ضد میکروبی قابل توجه خود، حتی در غلظت‌های بسیار پایین، توجه زیادی را در زمینه کشاورزی مدرن به خود جلب کرده‌اند (Jo et al., 2009). نانوذرات فلزی/اکسید فلزی بر پایه Ag، Mg، Zn و Ti پرکاربردترین قارچ‌کش‌ها برای القای تولید گونه‌های فعال اکسیژن علیه پاتوژن گیاهی هستند. علاوه بر این، نانوذرات فلزی/اکسید فلزی نیز در تشخیص آفت‌کش‌ها به کار رفته‌اند که می‌توانند به طور مؤثر و پایدار به مولکول‌های هدف متصل شوند و سیگنال‌هایی با رنگ‌های مختلف تولید کنند که با چشم غیرمسلح یا آشکارسازها قابل تشخیص هستند (Park et al., 2020). در نتیجه، نانوذرات مبتنی بر فلز با اثر غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و تشخیص آفت‌کش‌ها، دریچه‌ای را به روی کشاورزی می‌گشایند (Wang et al., 2021) (جدول ۳).

جدول ۳- کاربرد نانوفرمولاسیون آفت‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها در کشاورزی

Table 3. Application of nanoformulations of pesticides and fungicides in agriculture.

منبع	نتایج	عامل هدف	نوع نانوفرمولاسیون
Bashir et al., 2026	مهار رشد میسلیم، کاهش شدت بیماری و افزایش رشد گیاه نسبت به قارچ‌کش معمولی	<i>Fusarium oxysporum</i>	نانوذرات نقره سنتز سبز با عصاره گیاهی
Chauhan & Tapwal, 2023	فعالیت ضدقارچی بالا، کاهش نیاز به قارچ‌کش‌های شیمیایی و سمیت کمتر برای محیط زیست	عوامل بیماری‌زای قارچی مختلف	نانوذرات نقره سنتز شده با عصاره گیاهان
Irshad et al., 2024	افزایش کارایی قارچ‌کش، اثر طولانی‌تر و کاهش دفعات محلول‌پاشی	قارچ‌های بیماری‌زای گیاهی	نانوذرات مس و اکسید مس سنتز سبز
Piao et al., 2026	رهایش آهسته، افزایش ماندگاری روی برگ و کاهش شستشو توسط بارندگی	آفات حشرات	نانوحامل‌های پلیمری برای آفت‌کش‌ها
Sharma & Thakur, 2025	افزایش کارایی زیستی، کاهش دوز مصرفی و کاهش سمیت برای موجودات غیرهدف	آفات مکنده و جونده	نانوکپسول‌های زیست‌تخریب‌پذیر حاوی آفت‌کش
Salvadori, 2026	افزایش هدفمندی، کاهش آلودگی محیط زیست و بهبود کارایی کنترل آفات	طیف وسیعی از آفات و عوامل بیماری‌زا	نانوآفت‌کش‌های گیاه‌پایه سنتز سبز
Xiao et al., 2026	افزایش نفوذ، کنترل بهتر بیماری و کاهش اثرات سوء بر موجودات غیرهدف	آفات و قارچ‌های گیاهی	نانوفرمولاسیون‌های گیاه‌پایه

مکانیسم جذب و انتقال نانوذرات در گیاهان

خواص منحصر به فرد نانوذرات، مانند مساحت سطح بزرگ و واکنش‌پذیری بالا، به آنها اجازه می‌دهد تا به راحتی با بافت گیاهی تعامل داشته باشند. برهمکنش نانوذرات با سیستم گیاهی یک فرآیند پیچیده در سطوح ریشه و برگ است (Khan et al., 2019). نانوذرات می‌توانند از طریق سیستم ریشه یا قسمت‌های بالای زمین مانند اتصالات ریشه و زخم‌ها به بافت‌های گیاهی برسند. مورفولوژی و ساختارهای شیمیایی برگ‌ها و ریشه‌ها نقش اساسی در جذب و انتقال نانوذرات به سیستم گیاهی دارند. علاوه بر این، اندازه، غلظت، پایداری و پیکربندی شیمیایی نانوذرات نقش اساسی در جذب و انتقال آنها در داخل گیاهان ایفا می‌کنند (Lv et al., 2019). نانوذرات به عنوان حامل، باید از چندین مانع

فیزیولوژیکی عبور کنند تا توسط گیاه جذب و منتقل شوند. توانایی نانوذرات در کاهش تنشهای زیستی و غیر زیستی در گیاهان به شدت به جذب و انتقال آنها در سیستم گیاهی بستگی دارد (Wang et al., 2022). ریزوسفر یک منطقه پویای باریک است که تحت تأثیر تعامل پیچیده بین میکروارگانیسمهای خاک و ترشحات ریشه قرار میگیرد (Sun et al., 2021). در وهله اول، جذب نانوذرات توسط ریشه گیاه به شدت تحت تأثیر شرایط ریزوسفر، ترشحات ریشه و مورفولوژی ریشه قرار میگیرد (Cervantes-Avilés et al., 2021). علاوه بر این، ترشحات ریشه پدیدههای مفید سیستم ریشه محسوب می شوند که خواص شیمیایی و فیزیکی ریزوسفر را کنترل می کنند (Zhao et al., 2021). هنگامی که نانوذرات وارد ریشه می شوند، باید با ساختارهای مختلف ریشه مانند اپیدرم، بافت قشری، نوارهای کاسپاری و اندودرم تعامل داشته باشند. هنگامی که نانوذرات وارد اپیدرم می شوند، از طریق مسیر آپوپلاستی یا سیمپلاستیک در سراسر گیاه جابجا می شوند (Khan et al., 2022).

طبق گزارشهای مختلف، نانوذرات می توانند از طریق مسیر آپوپلاستی جابجا شوند، جایی که از طریق منافذ دیواره سلولی وارد بافت گیاه می شوند و به فضای درون سلولی بین غشای سلولی و دیواره سلولی نفوذ می کنند (Pérez-de-Luque, 2017). طبق بررسیهای اخیر، منافذ دیوارههای سلولی ممکن است هنگام قرار گرفتن در معرض نانوذرات، اندازه خود را افزایش دهند و اجازه ورود آنها را بدهند. مسیر دیگر ورود، از طریق فضای بین سلولی است که در اثر آسیب به بافت ریشه ایجاد می شود (Khan et al., 2022). انتقال نانوذرات از طریق مسیر آپوپلاستی نشان می دهد که نوارهای کاسپاری به دلیل ماهیت لیپوفیلی خود، عبور آنها را از دیواره سلولی، غشای سلولی و بافت قشر محدود می کنند. با این حال، نانوذرات می توانند از نوارهای کاسپاری اجتناب کرده و از طریق مسیر آپوپلاستی وارد سیستم عروقی شوند (Lv et al., 2019). از سوی دیگر، انتقال نانوذرات از طریق مسیر سیمپلاستیک نیز گزارش شده است، جایی که نانوذرات وارد غشای سلولی و سیتوپلاسم یا منافذ دیواره سلولی مجاور می شوند که به عنوان پلاسمودسما شناخته می شوند. طبق بررسی، نانوذرات می توانند از طریق آکوپورین ها، کانال های غشایی و اندوسیتوز از غشای سلولی عبور کنند. گزارش شده است که نانوذرات فلزی از طریق اندوسیتوز منتقل می شوند، اما این فرآیند به شدت به خواص فیزیکوشیمیایی سطح نانوذرات بستگی دارد. به طور کلی، فرآیند اندوسیتوز می تواند برای نانوذرات بین ۵ تا ۱۵ نانومتر انجام شود، که یک پارامتر محدودکننده مهم برای جذب و انتقال است (Khan et al., 2022).

وضعیت برگ در انتقال نانوذرات به سیستم گیاهی ضروری است. برای مثال، ساختار آناتومیکی و ترکیب بیوشیمیایی برگهای جوان و پیر، جذب و انتقال نانوذرات را تعیین می کند (Schwab et al., 2016). علاوه بر این، علائم نکرز و آسیب در سطح برگ مانند حمله عوامل بیماریزا و بیماریها می تواند ورود نانوذرات به گیاه را تسهیل کند. نانوذرات می توانند از طریق مسیر کوتیکولی و مسیرهای روزنه از طریق تماس برگ وارد شوند. برگها توسط یک لایه کوتیکولی مومی پوشیده شده اند که اولین مانع برای ورود نانوذرات به گیاه است. لایه کوتیکولی از برگهای گیاه در برابر از دست دادن آب محافظت می کند و تبادل املاح را تنظیم می کند (Domínguez et al., 2017). کوتیکول بسته به ماهیت لیپوفیلیک یا هیدروفیلیک خود، دو مسیر برای جذب دارد. گزارش شده است که نانوذرات تا اندازه ۵ نانومتر می توانند مستقیماً از طریق کوتیکول وارد شوند. روزنهها منافذ کوچکی هستند که تبادل CO₂ و بخار آب را بین گیاهان و محیط تنظیم می کنند (Pillitteri & Torii, 2012). بنابراین، مسیر روزنه می تواند نقش مهمی در جذب و انتقال نانوذرات به گیاهان از طریق سیستم آوند آبکش ایفا کند، علیرغم مطالعات کمی که این موضوع را نشان می دهند. نشان داده شده است که اندازه مورفولوژیکی روزنهها دارای طول ۲۵ میکرومتر و عرض ۳ تا ۱۰ میکرومتر است (Khan et al., 2022). دیوارههای سلولی گیاهی که از سلولز ساخته شده اند، به نانوذرات کوچک، با اندازه بین ۵ تا ۲۰ نانومتر، اجازه می دهند تا به سلولهای گیاهی نفوذ کنند (Dietz & Herth, 2011). نشان داده شده است که برخی از نانوذرات منافذ بزرگتری در دیواره سلولی ایجاد می کنند تا وارد سلول شوند (Kurepa et al., 2010). به طور کلی، نانوذرات می توانند از طریق کانالهای یونی، آکوپورین و اندوسیتوز به پروتئینهای حامل متصل شوند و همچنین غشای پلاسم را مختل کنند تا تشکیل منافذی را برای ورود به سلولها القا کنند. عبور نانوذرات از دیواره سلولی به اندازه منافذ آنها بستگی دارد. نانوذرات کوچک به سادگی از دیواره سلولی عبور می کنند (Fleischer et al., 1999). در حالی که نانوذرات بزرگتر از هیداتودها، کلاله و روزنهها عبور می کنند (Hossain et al., 2016). نانوذرات وقتی

ابعادشان کمتر از ۱۵ تا ۴۰ نانومتر باشد، از طریق روزنه‌ها منتقل می‌شوند (Eichert et al., 2008). چنین نانوذراتی می‌توانند به عنوان جایگزینی برای کامپیوم آوندی در روزنه‌ها عمل کنند و از طریق آبکش به بخش‌های مختلف گیاه منتقل شوند (Tripathi, et al., 2017a). در پوشش بذر، نانوذرات از طریق فضاهای بین سلولی پارانشیمی در پوشش بذر وارد می‌شوند که در آنها آکواپورین‌ها نقش مهمی در کنترل ورود نانوذرات ایفا می‌کنند (Lee et al., 2010).

مکانیسم عمل نانوذرات

نانوذرات ممکن است با رساندن ریز مغذی‌ها (Liu & Lal, 2015)، تنظیم ژن (Nair & Chung, 2014) و تداخل با چندین فرآیند اکسیداتیو در گیاهان (Hossain et al., 2015) بر متابولیسم گیاه تأثیر بگذارند. نانوذرات می‌توانند به عنوان تعدیل‌کننده‌های بیان ژن در پاسخ به شرایط تنش عمل کنند و از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند فعال‌سازی سیستم آنزیم آنتی‌اکسیدان که تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهد، مداخله در بیوستز و سازماندهی سلولی و همچنین در انتقال الکترون و انرژی، از گیاه محافظت کنند (Sarraf et al., 2022). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که نانوذرات همچنین می‌توانند بر محتوا و فعالیت رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاهان تأثیر بگذارند (Tripathi, et al., 2017a). نانوذرات می‌توانند بیوستز فیتوهورمون‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (Zhao et al., 2020). هورمون‌های گیاهی مولکول‌های درون‌زا هستند که در تنظیم رشد گیاه و تحمل تنش نقش دارند (Sham et al., 2017). در پاسخ به تنش‌ها، مسیرهای هورمونی مختلفی می‌توانند فعال یا سرکوب شوند (O'Brien & Benková, 2013). فیتوهورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد می‌توانند به طور دقیق در جوانه‌زنی، فتوسنتز، پر شدن میوه، سیستم آنزیم آنتی‌اکسیدان و کاهش تنش‌های زیستی و غیرزیستی عمل کنند. مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات می‌توانند تولید این ترکیبات را القا کنند و فرآیندهای بیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان را افزایش دهند. به عنوان مثال سیگل و همکاران (Siegel et al., 2018) مشاهده کردند که نانوذرات طلا بیان ژن مربوط به پاسخ به تنش اکسیداتیو و فلزی را در گیاه آراییدوپسیس تالیانا افزایش اما بیان ژن مربوط به پاسخ به پاتوژن را کاهش داده و محرک‌های هورمونی مختلفی مانند تحریک اتیلن و پاسخ به اکسین را برای رشد گیاه اعمال می‌کنند. تأثیر هورمونی نانوذرات نقره بیوستز شده بر بیان ژن‌های تنظیم‌کننده رشد گیاه در کالوس‌های در حال باززایی برنج را نشان داد و دریافت که سطوح رونویسی ژن‌های پاسخ‌دهنده به اتیلن، ABA، اکسین، سیتوکینین و اسید جبرلیک پس از کشت در محیط کشت با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، به ترتیب حداکثر ۰.۳، ۰.۳۵، ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ برابر کاهش یافت، اما بالاتر از این غلظت، بیان همه ژن‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافت که نشان می‌دهد منحنی اثر دوز همیشه خطی نیست (Manickavasagam et al., 2019). علاوه بر این، پوچیچا و همکاران (Pociecha et al., 2021) نشان دادند که استفاده از دو سوسپانسیون مختلف نانوذرات نقره به طور متفاوتی بر تعادل فیتوهورمون‌ها در گندم تأثیر می‌گذارد، به طوری که پس از سه هفته، نسبت سیتوکینین‌ها (۲۹ درصد، ۴۲ درصد) و جبریلین‌ها (۶۳ درصد، ۵۵ درصد) به ترتیب در مقایسه با شاهد معکوس شد.

اثرات جانبی بالقوه نانوذرات بر گیاهان

نانوذرات طیف وسیعی از کاربردها را در کشاورزی دارند و استفاده از نانوذرات در گیاهان اثرات مفید مختلفی را نشان داده است. علیرغم اثرات مثبت مشاهده شده در گیاهان پس از قرار گرفتن در معرض نانوذرات، اکثر نانوذرات در غلظت‌های بالا برای گیاهان خطرناک هستند. جذب، تجمع و تداخل نانوذرات با فرآیندهای متابولیک کلیدی در بافت‌های مختلف گیاهی، بسته به دوز، حرکت، ویژگی‌ها و واکنش‌پذیری آنها، ممکن است اثرات مثبت یا منفی بر گیاهان داشته باشد (El-Saadony et al., 2022). دوز مصرفی باید بسته به نوع محصول و نوع خاک، در کنار سایر عوامل، در نظر گرفته شود تا از آسیب و اثرات نامطلوب بر ارگانیسم غیر هدف جلوگیری شود. محتوای بیش از حد نانوذرات می‌تواند گونه‌های اکسیژن فعال بیشتری تولید کند؛ بنابراین، در مکانیسم اکسیداتیو تداخل ایجاد کند. غلظت‌های بالای نانوذرات تأثیر منفی بر فتوسنتز دارند و منجر به کاهش رشد یا مرگ گیاهان می‌شوند (Tripathi et al., 2017b). نانوذرات می‌توانند زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری و کلروپلاست را مختل کنند و باعث انفجار اکسیداتیو و افزایش سطح گونه‌های اکسیژن فعال شوند. وقتی گونه‌های اکسیژن فعال زیادی در نتیجه نانوذرات تولید می‌شود، تمام اجزای بیولوژیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و باعث تغییرات پروتئین، پراکسیداسیون لیپید

و آسیب DNA می‌شوند (Van Breusegem & Dat, 2006). مطالعات متعددی افزایش پراکسیداسیون لیپید و آسیب DNA را در گیاهان در حین تعامل با نانوذرات نشان داده‌اند (Atha et al., 2012). افزایش سطح گونه های اکسیژن فعال می‌تواند باعث آپوپتوز یا نکروز شود و در نتیجه منجر به مرگ سلول‌های گیاهی شود (Faisal et al., 2013). گونه های اکسیژن فعال علیرغم ماهیت مخرب خود، در فعالیت‌های بیولوژیکی، از جمله تحمل تنش، نقش دارد. تعادل بین تولید گونه های اکسیژن فعال و پاکسازی آن، تعیین می‌کند که آیا گونه های اکسیژن فعال عملکرد مخرب یا سیگنالینگ دارد. سلول‌ها یک مکانیسم آنتی‌اکسیدانی قوی برای کنترل دقیق مقدار گونه های اکسیژن فعال ایجاد کرده‌اند. آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز) و غیرآنزیمی (آسکوربات، گلوتاتیون، کاروتنوئیدها، توکوفرول‌ها و فنول‌ها) به مکانیسم‌های دفاعی در گیاهان نسبت داده می‌شوند (Sharma et al., 2012b).

نتیجه گیری کلی

Conclusion

امنیت غذایی در آینده به دلیل افزایش عوامل تنش زا در سیستم خاک-گیاه، یک چالش است. برای دستیابی به کشاورزی پایدار، جامعه تحقیقاتی باید راه‌حل‌های مناسب و سازگار با محیط زیست را شناسایی کند که به کم کردن کاهش عملکرد محصول ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی بپردازد. فناوری نانو ابزاری نوآورانه و مؤثر برای ارتقای عملکرد و کیفیت محصول، بهبود بخش کشاورزی و مدیریت تقاضای جهانی غذا است. نانوذرات، با توجه به اندازه کوچکشان، می‌توانند به راحتی به بافت‌های گیاه نفوذ کنند و پس از آن به طور مثبت بر فرایندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه تأثیر بگذارند، رشد گیاه را ارتقا دهند و بهره‌وری محصول را در گیاهان تحت تنش‌های مختلف بهبود بخشند. نانوذرات سمیت تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی را در گیاهان کاهش می‌دهند. نانوذرات می‌توانند با فعال کردن مکانیسم‌های دفاعی گیاه از طریق القای تولید گونه های اکسیژن فعال، اثرات منفی تنش‌ها را در گیاهان کاهش دهند. علاوه بر این، نانوذرات دارای سطح وسیعی هستند که جذب و انتقال مواد مغذی مختلف هدفمند را بهبود می‌بخشد. با این وجود، کاربردهای نانوذرات در بهبود محصولات کشاورزی و کشاورزی پایدار هنوز در مراحل اولیه توسعه است و تحقیقات فعلی در این زمینه ناکافی و تا حدودی متناقض است. چالش‌های استفاده از نانومواد برای مقابله با تنش‌ها را می‌توان به عنوان نیاز به ارزیابی بهتر و بیشتر جذب، انتقال و اصلاح نانومواد در بافت گیاه برجسته کرد. همانطور که انتظار می‌رود، در غلظت‌های پایین، اثرات مثبت نانوذرات قابل مشاهده است، در حالی که سمیت در غلظت‌ها/دوزهای بالا یافت می‌شود. چالش دیگر پذیرش عمومی این فناوری است. زیرا مصرف‌کنندگان نهایی گیاهان تیمار شده با نانوذرات، انسان و یا حیوانات هستند و بنابراین باید اثرات این فناوری‌ها بر سلامت انسان و حیوان ارزیابی شود. در این راستا، مطالعات بوم‌شناسی سم‌شناسی نانوذرات و همچنین ارائه یک چارچوب نظارتی برای معرفی نانوذرات در تولید محصولات کشاورزی در مقیاس بزرگ بسیار مهم است. تحقیقات آینده با هدف توسعه استفاده ایمن از نانوذرات در مقیاس بزرگ در تولید محصولات کشاورزی مورد استقبال قرار می‌گیرد. علیرغم پیشرفت‌های اخیر در کاهش تنش‌ها با استفاده از نانوذرات، نیاز مبرمی به گسترش دانش از طریق مطالعات خوب طراحی‌شده و سیستماتیک وجود دارد. بنابراین، تحقیقات بیشتری باید صورت گیرد تا به محدود کردن اثرات نامطلوب نانوذرات بر اکوسیستم‌ها و محصولات کشاورزی کمک کند.

منابع

References

- Aguirre-Becerra, H., Feregrino-Pérez, A. A., Esquivel, K., Perez-Garcia, C. E., Vazquez-Hernandez, M. C., & Mariana-Alvarado, A. (2022). Nanomaterials as an alternative to increase plant resistance to abiotic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1023636. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1023636>
- Ali, Z., Serag, M. F., Demirel, G. S., Torre, B., Di Fabrizio, E., Landry, M. P., & Mahfouz, M. M. (2022). DNA-carbon

- nanotube binding mode determines the efficiency of carbon nanotube-mediated DNA delivery to intact plants. *ACS Applied Nano Materials*, 5(4), 4663–4676. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c03482>
- An, J., Hu, P., Li, F., Wu, H., Shen, Y., White, J. C., Tian, X., Li, Z., & Giraldo, J. P. (2020). Molecular mechanisms of plant salinity stress tolerance improvement by seed priming with cerium oxide nanoparticles. *Environmental Science: Nano*, 7(8), 2214–2228. <https://doi.org/10.1039/D0EN00387E>
- Atha, D. H., Wang, H., Petersen, E. J., Cleveland, D., Holbrook, R. D., Jaruga, P., Dizdaroglu, M., Xing, B., & Nelson, B. C. (2012). Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environmental Science & Technology*, 46(3), 1819–1827. <https://doi.org/10.1021/es202660k>
- Ayoub, H. A., Khairy, M., Elsaid, S., Rashwan, F. A., & Abdel-Hafez, H. F. (2018). Pesticidal activity of nanostructured metal oxides for generation of alternative pesticide formulations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(22), 5491–5498. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01600>
- Bashir, S., Batool, A., Showkat, M., Ashraf, S., Yatoo, G. N., Sudan, J., Hajini, M. A., Bhat, J. I. A., Bhat, Z. A., Mir, M. A., Dhekale, B., Sofi, P. A., Masi, A., & Zargar, S. M. (2026). Elucidating the potential of green synthesis: Formulation of nanofungicide from agricultural wastes against *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici*. *Frontiers in Nanotechnology*, 8, 1727211. <https://doi.org/10.3389/fnano.2026.1727211>
- Cervantes-Avilés, P., Huang, X., & Keller, A. A. (2021). Dissolution and aggregation of metal oxide nanoparticles in root exudates and soil leachate: Implications for nanoagrochemical application. *Environmental Science & Technology*, 55(20), 13443–13451. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00767>
- Chauhan, P., & Tapwal, A. (2023). Green synthesis of nanoparticles using botanicals and their application in management of fungal phytopathogens: A review. *Archives of Microbiology*, 205(3), 94. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03431-0>
- Cunningham, F. J., Goh, N. S., Demirer, G. S., Matos, J. L., & Landry, M. P. (2018). Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering. *Trends in Biotechnology*, 36(9), 882–897. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.03.009>
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
- Das, I., & Borah, D. (2024). Microbial biosurfactant-mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) and exploring their role in enhancing chickpea and rice seed germination. *Discover Nano*, 19, 174. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04134-1>
- Demirer, G. S., Silva, T. N., Jackson, C. T., et al. (2020). Nanotubes deliver siRNA for transient gene silencing in mature plants. *Nature Nanotechnology*, 15, 126–132. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0662-5>
- Demirer, G. S., Zhang, H., Goh, N. S., et al. (2019). Carbon nanotube-mediated DNA delivery without transgene integration in intact plants. *Nature Protocols*, 14, 2954–2971. <https://doi.org/10.1038/s41596-019-0218-3>
- Dietz, K. J., & Herth, S. (2011). Plant nanotoxicology. *Trends in Plant Science*, 16(11), 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.08.003>
- Djanaguiraman, M., Nair, R., Giraldo, J. P., & Prasad, P. V. V. (2018). Cerium oxide nanoparticles decrease drought-induced oxidative damage in sorghum leading to higher photosynthesis and grain yield. *ACS Omega*, 3(10), 14406–14416. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01894>
- Eichert, T., Kurtz, A., Steiner, U., & Goldbach, H. E. (2008). Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiologia Plantarum*, 134(1), 151–160. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01135.x>
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Soliman, S. M., Salem, H. M., Desoky, E. S. M., Babalghith, A. O., ... & AbuQamar, S. F. (2022). Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 946717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946717>
- Faisal, M., Saquib, Q., Alatar, A. A., Al-Khedhairi, A. A., Hegazy, A. K., & Musarrat, J. (2013). Phytotoxic hazards of NiO nanoparticles in tomato: A study on mechanism of cell death. *Journal of Hazardous Materials*, 250–251, 318–332. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.063>
- Fleischer, A., O'Neill, M. A., & Ehwald, R. (1999). The pore size of non-graminaceous plant cell walls is rapidly decreased by borate ester cross-linking of the pectic polysaccharide rhamnogalacturonan II. *Plant Physiology*, 121(3), 829–838. <https://doi.org/10.1104/pp.121.3.829>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). The hidden health crisis: How plant diseases threaten global food security. <https://www.fao.org/one-health/highlights/how-plant-diseases-threaten-global-food-security/en>
- Ganjali, S., Khajeh, H., Mazraei, A., & Ahmadi, K. (2025). Green synthesis of ZnO and CuO nanoparticles using extract of Moringa and evaluation of their effects on *Mo-CBP3* gene expression. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 14(1), 60–76. <https://doi.org/10.61882/gebsj.14.1.5>
- Ghorbanpour, M., Mohammadi, H., & Kariman, K. (2020). Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano*, 7(2), 443–461. <https://doi.org/10.1039/C9EN00973F>
- Hossain, Z., Mustafa, G., & Komatsu, S. (2015). Plant responses to nanoparticle stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(11), 26644–26653. <https://doi.org/10.3390/ijms161125980>
- Hossain, Z., Mustafa, G., Sakata, K., & Komatsu, S. (2016). Insights into the proteomic response of soybean towards Al₂O₃, ZnO, and Ag nanoparticles stress. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 291–305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.071>
- Irshad, M. A., Hussain, A., Nasim, I., Nawaz, R., Al-Mutairi, A. A., Azeem, S., Rizwan, M., Al-Hussain, S. A., Irfan, A., & Zaki, M. E. A. (2024). Exploring the antifungal activities of green nanoparticles for sustainable agriculture: A research update. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11, 133. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00662-1>
- Jo, Y. K., Kim, B. H., & Jung, G. (2009). Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi. *Plant Disease*, 93(10), 1037–1043. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1037>
- John, K. S., Parvathi, M. S., Krishna, A. S., Sidharth, A., & Geetha, T. (2024). *Ocimum gratissimum* mediated green synthesised iron oxide nanoparticles as a plausible nanofertilizer for peanut plant (*Arachis hypogaea*). *Discover Applied Sciences*, 6, 542. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06241-1>
- Katiyar, P., Yadu, B., Korram, J., Satnami, M. L., Kumar, M., & Keshavkant, S. (2020). Titanium nanoparticles attenuate arsenic toxicity by up-regulating expressions of defensive genes in *Vigna radiata* L. *Journal of Environmental Sciences*, 92, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.02.013>

- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Hassan, Z. U., Akram, M. A., Tariq, R., Brestic, M., & Xie, W. (2022). Nanoparticle uptake and translocation mechanisms in plants via seed priming, foliar treatment, and root exposure: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(60), 89823–89833. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23945-2>
- Khan, M. R., Adam, V., Rizvi, T. F., Zhang, B., Ahamad, F., Joško, I., Zhu, Y., Yang, M., & Mao, C. (2019). Nanoparticle-plant interactions: Two-way traffic. *Small*, 15(37), 1901794. <https://doi.org/10.1002/sml.201901794>
- Khan, S., & Hossain, M. K. (2022). Classification and properties of nanoparticles. In *Nanoparticle-Based Polymer Composites* (pp. 15–54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824272-8.00009-9>
- Khan, Z., & Upadhyaya, H. (2019). Impact of nanoparticles on abiotic stress responses in plants: An overview. In *Nanomaterials in Plants, Algae and Microorganisms* (pp. 305–322). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811488-9.00015-9>
- Khandelwal, N., Barbole, R. S., Banerjee, S. S., Chate, G. P., Biradar, A. V., Khandare, J. J., & Giri, A. P. (2016). Biofortification of plants with selenium nanoparticles: Present status and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 184, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.023>
- Krishna, V. D., Wu, K., Su, D., Cheeran, M. C., Wang, J. P., & Perez, A. (2018). Nanotechnology: Review of concepts and potential application of sensing platforms in food safety. *Food Microbiology*, 75, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.08.002>
- Kurepa, J., Paunesku, T., Vogt, S., Arora, H., Rabatic, B. M., Lu, J., Wanzer, M. B., Woloschak, G. E., & Smalle, J. A. (2010). Uptake and distribution of ultrasmall anatase TiO₂ Alizarin Red S nanoconjugates in *Arabidopsis thaliana*. *Nano Letters*, 10(7), 2296–2302. <https://doi.org/10.1021/nl903518f>
- Kwak, S. Y., Lew, T. T. S., Sweeney, C. J., Koman, V. B., Wong, M. H., Bohmert-Tatarev, K., et al. (2019). Chloroplast-selective gene delivery and expression in planta using chitosan-complexed single-walled carbon nanotube carriers. *Nature Nanotechnology*, 14(5), 447–455. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0375-4>
- Landry, M. P., & Mitter, N. (2019). How nanocarriers delivering cargos in plants can change the GMO landscape. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 512–514. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0463-5>
- Lee, C. W., Mahendra, S., Zodrow, K., Li, D., Tsai, Y. C., Braam, J., & Alvarez, P. J. J. (2010). Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(3), 669–675. <https://doi.org/10.1002/etc.58>
- Liu, J., Li, G., Chen, L., Gu, J., Wu, H., & Li, Z. (2021). Cerium oxide nanoparticles improve cotton salt tolerance by enabling better ability to maintain cytosolic K⁺/Na⁺ ratio. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00892-7>
- Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*, 514, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>
- Lv, J., Christie, P., & Zhang, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: Recent advances and methodological challenges. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 41–59. <https://doi.org/10.1039/C8EN00645H>
- Manickavasagam, M., Pavan, G., & Vasudevan, V. (2019). A comprehensive study of the hormetic influence of biosynthesized AgNPs on regenerating rice calli of indica cv. IR64. *Scientific Reports*, 9, 11563. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45214-y>
- Martin-Ortigosa, S., Peterson, D. J., Valenstein, J. S., Lin, V. S.-Y., Trewyn, B. G., & Lyznik, L. A. (2014). Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular Cre protein delivery for maize genome editing. *Plant Physiology*, 164(2), 537–547. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233791>
- Mitter, N., Worrall, E. A., Robinson, K. E., Li, P., Jain, R. G., Taochy, C., et al. (2017). Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses. *Nature Plants*, 3, 16207. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.207>
- Mohamed, M. S., & Kumar, D. S. (2019). Application of nanotechnology in genetic improvement in crops. In *Nanoscience for Sustainable Agriculture* (pp. 3–24). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97852-9_1
- Murali, M., Gowtham, H. G., Shilpa, N., et al. (2023). Zinc oxide nanoparticles prepared through microbial-mediated synthesis for agricultural applications. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1227951. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1227951>
- Mustafa, A., Rizwan, M., Ali, S., et al. (2021). Biosynthesis and characterization of titanium dioxide nanoparticles and its effects along with calcium phosphate on
- Naik, H., et al. (2025). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Bacillus subtilis* to mitigate salinity stress in rice (*Oryza sativa* L.) plants and enhance physiological activities. *Environmental Science: Nano*, 12, 2421–2435. <https://doi.org/10.1039/D4EN01184H>
- Nair, P. M. G., & Chung, I. M. (2014). Impact of copper oxide nanoparticles exposure on *Arabidopsis thaliana* growth, root system development, root lignification, and molecular level changes. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(22), 12709–12722. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3210-3>
- O'Brien, J. A., & Benková, E. (2013). Cytokinin cross-talking during biotic and abiotic stress responses. *Frontiers in Plant Science*, 4, 451. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00451>
- Ochoy, I., Paret, M. L., Ochoy, M. A., Kunwar, S., Chen, T., You, M., & Tan, W. (2013). Nanotechnology in plant disease management: DNA-directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against *Xanthomonas perforans*. *ACS Nano*, 7(10), 8972–8980. <https://doi.org/10.1021/nn4034794>
- Oshunsanya, S. O., Nwosu, N. J., & Li, Y. (2019). Abiotic stress in agricultural crops under climatic conditions. In *Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management* (pp. 71–100). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6830-1_3
- Park, H., May, A., Portilla, L., Dietrich, H., Münch, F., Rejek, T., et al. (2020). Magnetite nanoparticles as efficient materials for removal of glyphosate from water. *Nature Sustainability*, 3(2), 129–135. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0452-6>
- Pérez-de-Luque, A. (2017). Interaction of nanomaterials with plants: What do we need for real applications in agriculture? *Frontiers in Environmental Science*, 5, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00012>
- Piao, Z.-E., & Wang, D. (2026). Smart and sustainable polymers for nanopesticides in green plant protection innovation. *ChemBioChem*, 27(3), e202500883. <https://doi.org/10.1002/cbic.202500883>
- Pillitteri, L. J., & Torii, K. U. (2012). Mechanisms of stomatal development. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 591–614. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105451>
- Pociecha, E., Gorczyca, A., Dziurka, M., Matras, E., & Oćwieja, M. (2021). Silver nanoparticles and silver ions differentially affect the phytohormone balance and yield in wheat. *Agriculture*, 11(8), 729. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080729>

- Rabbani, A. H. M. M., Nahar, S. N., Islam, M. N., Jannat, F., Haque, M. M., & Rahman, M. M. (2025). Green-synthesized Ag and ZnO nanoparticles using *Cassia fistula* leaf extract: Biocompatibility and growth response in early plant development. *Fundamental and Applied Agriculture*, 10(1), 333–349. <https://doi.org/10.5455/faa.230028>
- Rahaiee, S., Ranjbar, M., Azizi, H., Govahi, M., & Zare, M. (2020). Green synthesis, characterization and biological activities of saffron leaf extract-mediated zinc oxide nanoparticles. *Applied Organometallic Chemistry*, 34, e5705. <https://doi.org/10.1002/aoc.5705>
- Rohela, G. K., Saini, P., Aziz, D., Rafiq, S., Jogam, P., & Zhang, B. (2024). Nanoparticles as elicitors and stimulators for plant tissue culture, transgenics, and genome editing: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products*, 222, 120097. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120097>
- Salvadori, M. R. (2026). Agrochemicals in a green nano-approach. *Discover Agriculture*, 4, 23. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00473-4>
- Sarraf, M., Vishwakarma, K., Kumar, V., Arif, N., Das, S., Johnson, R., ... & Hasanuzzaman, M. (2022). Metal/metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: An overview of the mechanisms. *Plants*, 11(3), 316. <https://doi.org/10.3390/plants11030316>
- Schwab, F., Zhai, G., Kern, M., Turner, A., Schnoor, J. L., & Wiesner, M. R. (2016). Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants: A critical review. *Nanotoxicology*, 10(3), 257–278. <https://doi.org/10.3109/17435390.2015.1048326>
- Sham, A., Moustafa, K., Al-Shamisi, S., Alyan, S., Iratni, R., & AbuQamar, S. (2017). Microarray analysis of Arabidopsis WRKY33 mutants in response to the necrotrophic fungus *Botrytis cinerea*. *PLOS ONE*, 12(2), e0172343. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172343>
- Shang, Y., Hasan, M. K., Ahammed, G. J., Li, M., Yin, H., & Zhou, J. (2019). Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: A review. *Molecules*, 24(14), 2558. <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
- Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M. G. H., Saradhi, P. P., Khanna, P. K., & Arora, S. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167(8), 2225–2233. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9759-8>
- Sharma, P., Urfan, M., Anand, R., Sangral, M., Hakla, H. R., Sharma, S., Das, R., Pal, S., & Bhagat, M. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus lanceolata* leaf litter: Characterization, antimicrobial and agricultural efficacy in maize. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(2), 363–381. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01136-0>
- Sharma, V., & Thakur, S. (2025). Crop protection in the nano era: Revolutionizing agriculture with biological nanopesticides. In S. Thakur (Ed.), *Application of Nanotechnology for Sustainable Agriculture and Food Security: Volume 1. The Role of Nanofertilizers and Nanopesticides* (ACS Symposium Series, Vol. 1509, pp. 1–12). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2025-1509.ch001>
- Sheta, M. H., et al. (2024). Green synthesis of zinc and iron nanoparticles using *Psidium guajava* leaf extract stimulates cowpea growth, yield, and tolerance to saline water irrigation. *Horticulturae*, 10(9), 915. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090915>
- Siegel, J., Záruba, K., Švorčík, V., Kroumanová, K., Burketová, L., & Martinec, J. (2018). Round-shape gold nanoparticles: Effect of particle size and concentration on *Arabidopsis thaliana* root growth. *Nanoscale Research Letters*, 13, 95. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2510-9>
- Sun, H., Jiang, S., Jiang, C., Wu, C., Gao, M., & Wang, Q. (2021). A review of root exudates and rhizosphere microbiome for crop production. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 54497–54510. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15838-7>
- Sun, L., Song, F., Guo, J., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., & Li, X. (2020). Nano-ZnO-induced drought tolerance is associated with melatonin synthesis and metabolism in maize. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(3), 782. <https://doi.org/10.3390/ijms21030782>
- Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y., & Li, X. (2021). Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(2), 245–259. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1718698>
- Tripathi, D. K., Shweta, Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., Prasad, S. M., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Srivastava, P. K., Singh, V. P., Singh, S., Prasad, S. M., Singh, P. K., Dubey, N. K., Pandey, A. C., & Chauhan, D. K. (2017). Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNPs)-induced phytotoxicity in *Pisum sativum* seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.015>
- Tyczewska, A., Woźniak, E., Gracz, J., Kuczyński, J., & Twardowski, T. (2018). Towards food security: Current state and future prospects of agrobiotechnology. *Trends in Biotechnology*, 36(12), 1219–1229. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.008>
- Ukidave, P., et al. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Coriandrum sativum* leaf extract and evaluation of seed germination. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 8310038. <https://doi.org/10.1155/2022/8310038>
- Van Breusegem, F., & Dat, J. F. (2006). Reactive oxygen species in plant cell death. *Plant Physiology*, 141(2), 384–390. <https://doi.org/10.1104/pp.106.078295>
- Wang, C. Y., Yang, J., Qin, J. C., & Yang, Y. W. (2021). Eco-friendly nanoplateforms for crop quality control, protection, and nutrition. *Advanced Science*, 8(9), 2004525. <https://doi.org/10.1002/advs.202004525>
- Wang, L., Ning, C., Pan, T., & Cai, K. (2022). Role of silica nanoparticles in abiotic and biotic stress tolerance in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1947. <https://doi.org/10.3390/ijms23041947>
- Wu, H., & Li, Z. (2022). Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance. *The Crop Journal*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.002>
- Wu, H., Shabala, L., Shabala, S., & Giraldo, J. P. (2018). Hydroxyl radical scavenging by cerium oxide nanoparticles improves Arabidopsis salinity tolerance by enhancing leaf mesophyll potassium retention. *Environmental Science: Nano*, 5(7), 1567–1583. <https://doi.org/10.1039/C8EN00323H>
- Wu, H., Tito, N., & Giraldo, J. P. (2017). Anionic cerium oxide nanoparticles protect plant photosynthesis from abiotic stress by scavenging reactive oxygen species. *ACS Nano*, 11(11), 11283–11297. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05723>
- Xiao, Z., White, J. C., Kah, M., Xing, B., & Cao, X. (2026). Nano-agrochemical use in sustainable agriculture and environmental protection. *Nature Reviews Earth & Environment*, 7, 447–468. <https://doi.org/10.1038/s43017-026-00796-w>

- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., Xing, B., Wang, Z., & Ji, R. (2020). Nano-biotechnology in agriculture: Use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(7), 1935–1947. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
- Zhao, M., Zhao, J., Yuan, J., Hale, L., Wen, T., Huang, Q., Vivanco, J. M., Zhou, J., Kowalchuk, G. A., & Shen, Q. (2021). Root exudates drive soil–microbe–nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 44(2), 613–628. <https://doi.org/10.1111/pce.13928>
- Zhao, X., Meng, Z., Wang, Y., Chen, W., Sun, C., Cui, B., et al. (2017). Pollen magnetofection for genetic transformation with magnetic nanoparticles as gene carriers. *Nature Plants*, 3, 956–964. <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0063-z>