مقاله علمی مروری
مجله دوفصل نامه
مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی
ISSN 2588-5073 چاپی
ISSN 2588-5081 الکترونیکی online
دوره ۱٤، شماره ۱، بهار و تابستان ۱٤۰٤
صفحه ۱٤٦-۱۳۳

Research Article
Genetic Engineering and Biosafety Journal 2025
Volume 14, Number 1, Pages: 133-146

http://gebsj.ir/

https://ecc.isc.ac/showJournal/23064

10.61882/gebsj.14.1.11

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 Zakipour[2], Elham Ashrafi-Dehkordi[3]

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: Ghorbaniraziyeh@gmail.com
* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی:

(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

چکیده

با افزایش جمعیت جهان، تقاضا برای محصولات کشاورزی همچنان رو به افزایش است. با این حال، گیاهان در معرض طیف گسترده‌ای از تنش‌های زیستی، از جمله آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، و همچنین تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری، گرما، سرما و فلزات سنگین قرار دارند. این تنش‌ها به طور قابل توجهی رشد گیاه و بهره‌وری محصولات کشاورزی را در سراسر جهان کاهش می‌دهند و تهدید جدی برای تولید کشاورزی و امنیت غذایی جهانی ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، آنها منجر به خسارات اقتصادی قابل توجهی می‌شوند. برای کنترل آفات، علف‌های هرز و عوامل بیماری‌زای گیاهی و به حداکثر رساندن عملکرد محصولات، از آگروشیمیایی‌ها به طور گسترده استفاده شده است. با این حال، استفاده بیش از حد از این ترکیبات منجر به عواقب زیست‌محیطی شدید، ایجاد خطر برای سلامت انسان و تحمیل هزینه‌های اقتصادی قابل توجهی شده است. بنابراین، نیاز به استفاده پایدار از منابع طبیعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، توجه به توسعه و کاربرد فناوری‌های نوآورانه را افزایش داده است. در این میان، نانوتکنولوژی به عنوان رویکردی امیدوارکننده و مؤثر برای ارائه راه‌حل‌های پایدار در زمینه‌های مختلف، از جمله مدیریت محصولات کشاورزی، ظهور کرده است. در سال‌های اخیر، کاربرد نهاده‌های کشاورزی در مقیاس نانو، از جمله نانوکودها، نانوآفت‌کش‌ها و نانوعلف‌کش‌ها، توجه قابل توجهی به عنوان یک استراتژی نوآورانه و امیدوارکننده برای ارتقای رشد گیاه، افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی و بهبود عملکرد کشاورزی جلب کرده است. در مقایسه با آگروشیمیایی‌های متعارف، این نانومواد کارایی بیشتر، تحویل هدفمند بهبود یافته و کاهش اثرات زیست‌محیطی را ارائه می‌دهند. هدف از این مطالعه بررسی جامع کاربردهای نانوذرات در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های زیستی و غیرزیستی و روشن کردن نقش آنها در بهبود بهره‌وری محصولات کشاورزی و تقویت امنیت غذایی جهانی برای برآورده کردن نیازهای جمعیت رو به رشد جهان است.

کلمات کلیدی: امنیت غذایی، تنش زیستی، تنش غیرزیستی، نانوذرات، بهره‌وری گیاه

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
URL: http://gebsj.ir/article-1-533-en.html

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 منحصربه‌فرد خود، به‌عنوان 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، نانوآفت‌کش‌ها و نانوعلف‌کش‌ها، به‌عنوان 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 بهره وری محصولات و تامین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان می‌باشد.

کلمات کلیدی: امنیت غذایی، تنش زیستی، تنش غیر زیستی، نانوذرات، بهره وری 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. یماری‌های گیاهی، آفات و علف‌های هرز سالانه موجب از دست رفتن بخش قابل‌توجهی از تولیدات کشاورزی در جهان می‌شوند. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2025)، آفات گیاهی سالانه تا ٤٠ 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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 ۱۹۷٤ 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) ونانوذرات زیستی (مانند مگنتوزوم‌ها، اگزوزوم‌ها، 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 پیش‌بینی‌شده 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 می باشد. 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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

محرک‌های 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 فیزیکوشیمیایی 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).

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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	ZnO و CuO	فعالیت ضد قارچی	Ganjali et al., 2025
عصاره برگ زعفران (*Crocus sativus*)	ZnO	فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی	Rahaiee et al., 2020
بیوسورفکتانت باکتریایی	ZnO	افزایش جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه	Das et al., 2024
عصاره برگ *Psidium guajava*	Fe،ZnO	افزایش رشد، عملکرد و تحمل به شوری	Sheta et al., 2024
باکتری *Bacillus subtilis*	ZnO	فعالیت ضدقارچی علیه عوامل بیماری‌زای گیاهی	Murali et al., 2023
باکتری *Bacillus subtilis*	Fe_3O_4	کاهش اثرات شوری، افزایش فعالیت آنزیم‌ها و بهبود رشد	Naik et al., 2025
عصاره برگ *Cassia fistula*	ZnO،Ag	افزایش جوانه‌زنی در غلظت‌های پایین	Rabbani et al., 2025
عصاره *Ocimum gratissimum*	Fe_3O_4	افزایش جذب آهن و بهبود رشد	John et al., 2024
عصاره گیاه گشنیز *Coriandrum sativum*	ZnO	افزایش درصد جوانه‌زنی، رشد ریشه و شاخه در گیاهچه‌های نخود و ماش	Ukidave et al., 2022
عصاره برگ اکالیپتوس *lanceolata Eucalyptus*	ZnO	افزایش رشد گیاه و خاصیت ضدمیکروبی	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 می‌شود، اما چالش‌های 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 می‌کند. در حال حاضر، تراریختی با آگروباکتریوم تومفیشنز (*Agrobacterium tumefaciens*) و بمباران با تفنگ ژنی، پرکاربردترین تکنیک‌ها برای ایجاد رویدادهای تراریخته در گیاهان هستند. با این حال، این دو روش یا به تعداد کمی از گونه‌های گیاهی از نظر ژنتیکی قابل تغییر محدود می‌شوند یا می‌توانند اثرات نامطلوبی مانند آسیب بافتی در گیاهان ایجاد کنند (Landry & Mitter, 2019). یکی از تنگناهای تراریختی گونه‌های غیرمدل، راندمان پایین و فرآیندهای پرزحمت مانند کشت کالوس است. استفاده از نانوذرات، راهکاری جدید و مؤثر برای تولید گیاهان تراریخته، به‌ویژه در گونه‌های غیرمدل، محسوب می‌شود. نانوذرات علاوه بر عمل به عنوان یک پلتفرم انتقال برای تولید رویدادهای تراریخته، می‌توانند به عنوان یک داربست نیز عمل کنند تا راندمان انتقال مواد شیمیایی یا معرف‌های 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 گسترده‌ای از نانوذرات می‌توانند برای انتقال و جابجایی DNA، RNA و پروتئین‌ها به ژنوم میزبان استفاده شوند و ادغام موفقیت‌آمیز 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، می‌توانند به عنوان پلتفرم‌هایی برای تحویل مواد ژنتیکی کاربردی با بار منفی به سلول‌های گیاهی نیز استفاده شوند. دسترسی به نانوذرات و سادگی عملیات تا حد زیادی فراوانی استفاده از این تکنیک تراریخته مبتنی بر نانو را تعیین می‌کند (Wu & Li, 2022) (جدول ۲).

تأثیر نانوذرات برای محافظت از گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی

نانوذرات به عنوان یک گلوله جادویی عمل می‌کنند و می‌توانند به طور بالقوه بر محدودیت‌های تنش‌های زیستی و غیرزیستی در گیاهان غلبه کنند. کمبود آب یکی از محدودیت‌های اصلی تولید کشاورزی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. استفاده از نانومحصولات سازگار با محیط زیست برای افزایش تحمل خشکی می‌تواند به حفظ یا بهبود سود کشاورزی در مناطق کم‌آب کمک کند. تحمل خشکی گیاه با استفاده از نانومحصولات در بسیاری از گونه‌های گیاهی نشان داده شده است (Sun et al., 2021). نانوذرات اکسید سریم (نانوسریا CeO_2) تحمل خشکی را در سورگوم بهبود بخشید (Djanaguiraman et al., 2018). پرایمینگ بذر با نانوسریای پوشش داده شده با پلی‌اکریلیک

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 ٤٨ 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.

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

در دو مطالعه دیگر، نانوذرات اکسید سریم پوشش داده شده با اسید پلی‌آکریلیک، تحمل شوری را در گیاه آرابیدوپسیس (اسپری برگی) و پنبه (اسپری برگی) افزایش دادند، به طوری که گیاهان تحت تنش شوری به ترتیب ۱۸ درصد و ٤٠ درصد افزایش زیست توده نسبت به گیاهان کنترل بدون نانوذرات نشان دادند. مکانیسم این امر به صورت جارو کردن گونه های 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.

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 (Ocsoy 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.

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

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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 می‌شوند که خواص شیمیایی و فیزیکی ریزوسفر را کنترل می‌کنند (Zhao et al., 2021). هنگامی که نانوذرات وارد ریشه می‌شوند، باید با ساختارهای مختلف ریشه مانند اپیدرم، بافت قشری، نوارهای کاسپاری و اندودرم تعامل داشته باشند. هنگامی که نانوذرات وارد اپیدرم می‌شوند، از طریق مسیر آپوپلاستی یا سیمپلاستیک در سراسر گیاه جابجا می‌شوند (Khan et al., 2022).

طبق گزارش‌های مختلف، نانوذرات می‌توانند از طریق مسیر آپوپلاستی جابجا شوند، جایی که از طریق منافذ دیواره سلولی وارد بافت گیاه می‌شوند و به فضای درون سلولی بین غشای سلولی و دیواره سلولی نفوذ می‌کنند (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 می‌شود (Khan et al., 2022). انتقال نانوذرات از طریق مسیر آپوپلاستی نشان می‌دهد که نوارهای کاسپاری به دلیل ماهیت لیپوفیلی خود، عبور آنها را از دیواره سلولی، غشای سلولی و بافت قشر محدود می‌کنند. با این حال، نانوذرات می‌توانند 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 می‌شوند که به عنوان پلاسمودسماتا شناخته می‌شوند. طبق بررسی، نانوذرات می‌توانند از طریق آکواپورین‌ها، کانال‌های غشایی و اندوسیتوز از غشای سلولی عبور کنند. گزارش شده است که نانوذرات فلزی از طریق اندوسیتوز منتقل می‌شوند، اما این فرآیند به شدت به خواص فیزیکوشیمیایی سطح نانوذرات بستگی دارد. به طور کلی، فرآیند اندوسیتوز می‌تواند 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 می‌کند (Schwab et al., 2016). علاوه بر این، علائم نکروز و آسیب در سطح برگ مانند حمله عوامل بیماری‌زا و بیماری‌ها می‌تواند ورود نانوذرات به گیاه را تسهیل کند. نانوذرات می‌توانند از طریق مسیر کوتیکولی و مسیرهای روزنه از طریق تماس برگی وارد شوند. برگ‌ها توسط یک لایه کوتیکولی مومی پوشیده شده‌اند که اولین مانع برای ورود نانوذرات به گیاه است. لایه کوتیکولی از برگ‌های گیاه در برابر از دست دادن آب محافظت می‌کند و تبادل املاح را تنظیم می‌کند (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 می‌توانند مستقیماً از طریق کوتیکول وارد شوند. روزنه‌ها منافذ کوچکی هستند که تبادل CO_2 و بخار آب را بین گیاهان و محیط تنظیم می‌کنند (Pillitteri & Torii, 2012). بنابراین، مسیر روزنه می‌تواند نقش مهمی در جذب و انتقال نانوذرات به گیاهان از طریق سیستم آوند آبکش ایفا کند، علیرغم مطالعات کمی که این موضوع را نشان می‌دهند. 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 شده‌اند، به نانوذرات کوچک، با اندازه بین ۵ تا ۲۰ نانومتر، اجازه می‌دهند تا به سلول‌های گیاهی نفوذ کنند (Dietz & Herth, 2011). نشان داده شده است که برخی از نانوذرات منافذ بزرگ‌تری در دیواره سلولی ایجاد می‌کنند تا وارد سلول شوند (Kurepa et al., 2010). به طور کلی، نانوذرات می‌توانند از طریق کانال‌های یونی، آکواپورین و اندوسیتوز به پروتئین‌های حامل متصل شوند و همچنین غشای پلاسما 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 می‌کنند (Fleischer et al., 1999). در حالی که نانوذرات بزرگتر از هیداتودها، کلاله و روزنه‌ها عبور می‌کنند (Hossain et al., 2016). نانوذرات وقتی

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

ابعادشان کمتر از ۱۵ تا ٤٠ نانومتر باشد، از طریق روزنه‌ها منتقل می‌شوند (Eichert et al., 2008). چنین نانوذراتی می‌توانند به عنوان جایگزینی برای کامبیوم 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 ریزمغذی‌ها (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 بیوسنتز 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 می توانند بیوسنتز 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 وهمکاران (Siegel et al., 2018) مشاهده کردند که نانوذرات طلا بیان ژن مربوط به پاسخ به تنش اکسیداتیو و فلزی را در گیاه آرابیدوپسیس 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 بیوسنتز 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 جیبرلیک پس از کشت در محیط کشت با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، به ترتیب حداکثر ۰.۳، ۰.۳۵، ۰.۲، ۰.۳ و ۰.٤ 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، ٤۲ درصد) و جیبرلین‌ها (٦۳ 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 گونه های 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 گونه های اکسیژن فعال شوند. وقتی گونه های اکسیژن فعال زیادی در نتیجه نانوذرات تولید می‌شود، تمام اجزای بیولوژیکی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و باعث تغییرات پروتئین، پراکسیداسیون لیپید

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 فرآیندهای 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., Demirer, G. S., Torre, B., Di Fabrizio, E., Landry, M. P., & Mahfouz, M. M. (2022). DNA–carbon

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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-Khedhairy, 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 Al_2O_3, 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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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., Jośko, I., Zhu, Y., Yang, M., & Mao, C. (2019). Nanoparticle–plant interactions: Two-way traffic. Small, 15(37), 1901794. https://doi.org/10.1002/smll.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 TiO_2 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

Ocsoy, I., Paret, M. L., Ocsoy, 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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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 nanoplatforms 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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]

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

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

[Downloaded from gebsj.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.61882/gebsj.14.1.11]