گل و گیاهان زینتی (۱۴۰۵)، ۱۱(۱): ۱۲۵-۱۴۸
مقاله مروری

نانوذرات اکسیدروی: نقش در بهبود رشد، کیفیت و تحمل به تنش‌های محیطی در گیاهان زینتی

مژگان زنگنه، محمدرضا صالحی سلمی

گروه علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی

salehi@asnrukh.ac.ir; mrsalehisalmi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۶/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۲۳

چکیده

گیاهان زینتی به‌دلیل ارزش اقتصادی بالا، حساسیت فیزیولوژیک قابل‌توجه و نقش اساسی در بهبود کیفیت زندگی انسان، جایگاه ویژه‌ای در سامانه‌های نوین باغبانی دارند. بااین‌حال، تولید تجاری این گیاهان به دلیل وابستگی شدید به نهاده‌های شیمیایی، مصرف بالای آب و حساسیت بالا به تنش‌های زیوا و نازیوا با چالش‌های جدی روبرو است. روی به‌عنوان یک ریزمغذی ضروری، نقش کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله فعال‌سازی آنزیم‌ها، ساخت هورمون‌های رشد، پایداری غشاهای یاخته ای و تنظیم سامانه آنتی‌اکسیدانی ایفا می‌کند. با این‌حال، کارایی پایین و پیامدهای محیط زیستی کودهای متداول عنصر روی در خاک‌های آهکی و گلخانه‌ای، ضرورت گسترش رویکردهای نوین تغذیه‌ای را برجسته می‌سازد. هدف از این مطالعه مروری، ارائه تحلیلی جامع از نقش نانوذرات اکسیدروی در بهبود رشد، کیفیت، فرآیندهای فیزیولوژیک و افزایش تحمل به تنش‌ها در گیاهان زینتی، همراه با بررسی چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده این فناوری است. در این مقاله، مطالعات منتشرشده مرتبط با ساخت، جذب، انتقال و اثرات زیستی نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی به‌صورت نظام‌مند مرور و تحلیل شدند. روش‌های مختلف ساخت (فیزیکی، شیمیایی و زیستی)، مسیرهای جذب (ریشه‌ای و برگی) و سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اثر این نانوذرات بررسی شد. ویژگی‌هایی مانند اندازه نانومتری، سطح ویژه بالا، قابلیت نفوذ مؤثر و رهایش تدریجی یون‌های روی، نانوذرات اکسیدروی را به گزینه‌ای امیدبخش تبدیل کرده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که کاربرد نانوذرات اکسیدروی در غلظت‌های بهینه می‌تواند موجب بهبود معنی‌دار رشد رویشی، افزایش محتوای سبزینه، ارتقای کیفیت ظاهری و گلدهی، تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی و تحمل گیاهان زینتی به تنش‌های غیرزیستی نظیر شوری، خشکی و دما شود. این اثرات عمدتاً به افزایش فراهمی زیستی روی، تنظیم متابولیسم رنگ‌دانه‌ها، کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و تعدیل مسیرهای هورمونی نسبت داده می‌شوند. بااین‌حال، پاسخ گیاهان زینتی به نانوذرات اکسیدروی وابسته به غلظت، روش کاربرد، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذرات و گونه گیاهی است و مصرف بیش از حد ممکن است منجربه بروز سمیت، تجمع زیستی و اختلالات متابولیکی شود؛ بنابراین، نانوذرات اکسیدروی پتانسیل بالایی به‌عنوان منبع نوین و کارآمد روی در تولید پایدار گیاهان زینتی دارند، اما تعیین غلظت‌های بهینه، درک سازوکارهای مولکولی و ارزیابی اثرات بلندمدت محیط زیستی، پیش‌نیاز استفاده ایمن و گسترده از این فناوری در مقیاس تجاری است.

واژه‌های کلیدی: باغبانی پایدار، تنش زیوا، تنظیم‌کننده‌های رشد، نانو کود.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

مقدمه

صنعت گل و گیاهان زینتی به‌عنوان یکی از بخش‌های پویا، سودآور و روبه‌رشد کشاورزی در مقیاس جهانی شناخته می‌شود که ارزش اقتصادی بازار آن سالانه به ده‌ها میلیارد دلار می‌رسد (AIPH, 2024). این صنعت، علاوه بر نقش‌برجسته در ارتقای زیبایی محیط، بهبود کیفیت زندگی و سلامت روانی انسان، سهم قابل‌توجهی در ایجاد اشتغال و گسترش صادرات غیرنفتی در بسیاری از کشورها دارد. بااین‌وجود، تولید تجاری گیاهان زینتی با چالش‌های اساسی ازجمله مصرف بالای منابع آبی، وابستگی شدید به نهاده‌های شیمیایی و حساسیت بالا به تنش‌های زیوا و نازیوا مواجه است (AIPH, 2024). تداوم این روند نه‌تنها هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد، بلکه پیامدهای نامطلوب محیط زیستی مانند آلودگی خاک و آب را نیز در پی دارد. ازاین‌رو، شناسایی و گسترش راهکارهای نوین و پایدار برای افزایش بهره‌وری و کاهش اثرات منفی در این صنعت، امری ضروری تلقی می‌شود.

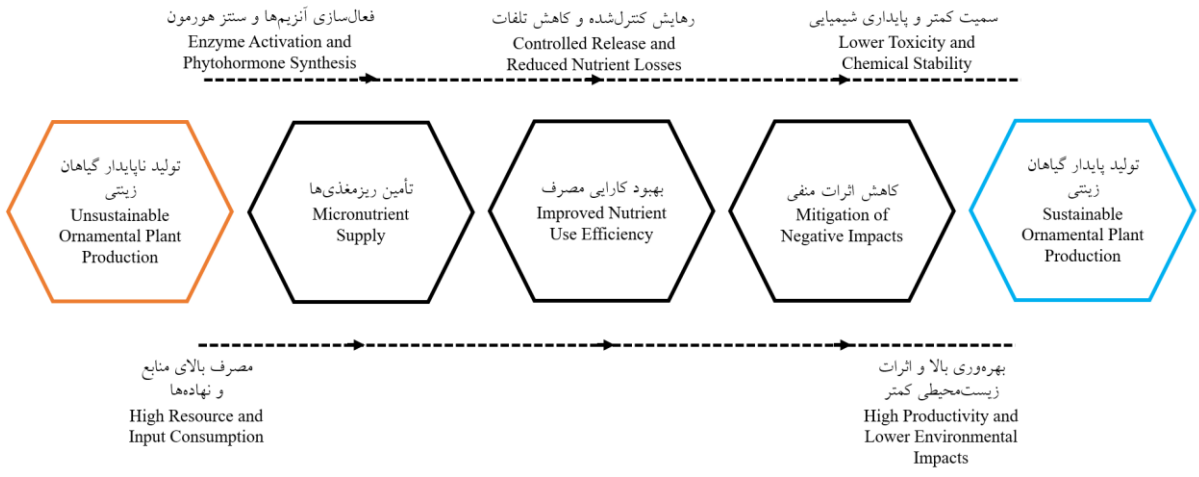
در این میان، تأمین صحیح عناصر غذایی ضروری، به‌ویژه ریزمغذی‌ها، یکی از ارکان اصلی تولید پایدار است. عنصر روی به‌عنوان یک عنصر ریزمغذی کلیدی، نقش اساسی در فعال‌سازی آنزیم‌ها (به‌عنوان کوفاکتور در بیش از ۳۰۰ آنزیم و پروتئین تنظیمی)، ساخت هورمون اکسین و حفظ یکپارچگی غشاهای یاخته ای ایفا می‌کند. کمبود این عنصر، به‌ویژه در خاک‌های آهکی و قلیایی که فراهمی زیستی عنصر روی در آن‌ها محدود است، منجر به نشانه‌هایی مانند کوتولگی، کلروز بین‌رگبرگی، کاهش کیفیت گل و کاهش عملکرد کمی و کیفی گیاهان زینتی حساسی مانند رز، میخک و داوودی می‌شود (Rudani *et al.*, 2018). در مقابل، مصرف بی‌رویه منابع متداول عنصر روی؛ مانند سولفات روی، می‌تواند موجب سمیت، اختلال تغذیه‌ای و آلودگی محیط‌زیست شود. افزون بر این، جذب پایین و تثبیت سریع این کودها در خاک، موجب مصرف چندباره آنها و افزایش هزینه می‌شود (Borm *et al.*, 2006)؛ بنابراین، گسترش اشکال نوین کودهای روی با کارایی بالاتر و اثرات جانبی کمتر، همواره موردتوجه پژوهش‌گران بوده است.

در ایران، بیش از ۸۰ درصد خاک‌های قابل کشت با کمبود روی مواجه هستند که این موضوع به طور میانگین باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد محصولات کشاورزی می‌گردد. علت اصلی این کمبود، ماهیت آهکی و pH قلیایی غالب خاک‌های کشور است که حلالیت و قابلیت جذب روی را به شدت کاهش می‌دهد. به عنوان نمونه، حدود ۴۰ درصد از زمین‌های زیر کشت گندم در ایران دچار فقر روی بوده و کمبود این عنصر به عنوان یکی از عوامل اصلی محدودکننده تولید معرفی شده است (Bakhshayesh *et al.*, 2018). در شرایط آهکی، کربنات کلسیم فعال و بی کربنات موجود در محلول خاک، فراهمی زیستی روی را کاهش داده و جذب آن توسط ریشه گیاه را با اختلال مواجه می‌سازد. بنابراین، استفاده از راهکارهای نوین و کارآمد مانند کاربرد نانوذرات اکسیدروی که به دلیل اندازه نانومتری و سطح ویژه بالا، قابلیت جذب و انتقال بهتری دارند، می‌تواند راهگشای جبران کمبود روی در خاک‌های کشاورزی ایران باشد.

در دو دهه اخیر، ظهور نانوتکنولوژی چشم‌اندازهای تحول‌آفرینی را در بخش کشاورزی رقم زده است. نانو کودها، به دلیل دارا بودن ذراتی در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، از سطح ویژه بسیار بالا، قابلیت نفوذپذیری بهتر و امکان رهایش کنترل‌شده (تدریجی) مواد مغذی برخوردارند (Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014). این ویژگی‌ها باعث افزایش کارایی مصرف، کاهش تلفات و کاهش دفعات مصرف کود می‌شود و آن‌ها را به گزینه‌ای مطلوب‌تر از نظر اقتصادی و محیط زیستی تبدیل می‌کند. در میان نانوکودهای مختلف، نانوذرات اکسیدروی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند ساختار کریستالی خاص،

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

خواص ضدمیکروبی، سمیت نسبتاً کمتر، پایداری شیمیایی بالا و هزینه تولید پایین، موردتوجه ویژه قرار گرفته‌اند (Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014). پژوهش‌های گوناگون نشان داده‌اند که کاربرد این نانوذرات می‌تواند شاخص‌های رشدی، نورساخت، کیفیت گل، محتوای سبزینه و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در گیاهان مختلف از جمله گیاهان زینتی بهبود بخشیده و تحمل به تنش‌های محیطی را افزایش دهد (García-López *et al.*, 2019; Khattab *et al.*, 2023). با وجود افزایش پژوهش‌ها در زمینه‌ی کاربرد نانوذرات اکسیدروی در کشاورزی، تمرکز اصلی این مطالعات عمدتاً بر گیاهان زراعی و دارویی معطوف بوده و اطلاعات جامع و نظام‌مند در مورد اثرات این نانوذرات بر گیاهان زینتی که اغلب از ارزش اقتصادی بالا و حساسیت فیزیولوژیکی بیشتری برخوردارند، بسیار محدود است. همچنین، اگرچه اثرات مثبت این نانوذرات گزارش شده، نگرانی‌هایی درباره سمیت بالقوه (با پدیده پاسخ دوفازی[1] و وابستگی پاسخ به غلظت، روش کاربرد و گونه گیاهی)، تجمع در بافت‌های گیاهی و انتقال در زنجیره غذایی و پیامدهای بلندمدت محیط زیستی وجود دارد. علاوه بر این، سازوکارهای دقیق اثرگذاری نانوذرات اکسیدروی در سطوح مولکولی، یاخته ای و فیزیولوژیکی به‌ویژه در گیاهان زینتی، هنوز به‌طور کامل شناخته نشده‌اند. بنابراین، انجام یک مطالعه مروری که بتواند ضمن جمع‌بندی یافته‌های موجود، اثرات مثبت و منفی، سازوکارهای عمل و ارزیابی ریسک‌های بالقوه مرتبط با کاربرد نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی را مورد بررسی قرار دهد، ضروری و اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. این مرور در پی پر کردن این شکاف دانشی و ارائه چارچوبی علمی برای بهره‌گیری ایمن و کارآمد از این فناوری نوظهور در صنعت مهم گیاهان زینتی خواهد بود (Rai *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2021). هدف اصلی این مقاله مروری، ارائه یک چارچوب جامع و به‌روز از پیشرفت‌های اخیر مرتبط با کاربرد نانوذرات اکسیدروی در تولید و پرورش گیاهان زینتی است. امید است این مقاله مروری بتواند به‌عنوان منبعی علمی و کاربردی، راهنمای مناسبی برای پژوهشگران و تولیدکنندگان در جهت بهره‌برداری ایمن، مؤثر و پایدار از فناوری نانو در صنعت گل و گیاهان زینتی باشد (شکل ۱).



شکل ۱- افزایش تولید گیاهان زینتی با نانوذرات اکسیدروی.

Figure 1. Enhancement of ornamental plant production using zinc oxide nanoparticles.

۱- Hormesis

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

ساخت، ویژگی‌ها و جذب نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی

روش‌های ساخت نانوذرات اکسیدروی: نانوذرات اکسیدروی به‌واسطه برخورداری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متمایز، از جمله سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی، هزینه تولید نسبتاً پایین و خواص ضدمیکروبی، توجه فزاینده‌ای را در حوزه باغبانی زینتی به خود اختصاص داده‌اند (Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014). ساخت این نانوذرات از طریق رویکردها و روش‌های متنوعی انجام می‌گیرد که هر یک دارای مزایا، محدودیت‌ها و پیامدهای خاص محیط زیستی و کاربردی هستند. انتخاب روش مناسب ساخت تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌هایی نظیر اندازه، شکل، توزیع اندازه، خلوص، پایداری و در نهایت عملکرد زیستی و ایمنی نانوذرات دارد؛ عواملی که در کاربردهای کشاورزی و به‌ویژه گیاهان زینتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

روش‌های فیزیکی

روش‌های فیزیکی ساخت نانوذرات عمدتاً مبتنی بر فرآیندهای تبخیر-تراکم یا کاهش اندازه ذرات درشت‌تر به مقیاس نانو هستند. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به تبخیر با لیزر و آسیاب مکانیکی اشاره کرد. در روش تبخیر با لیزر، یک هدف فلزی از جنس روی یا اکسیدروی تحت تابش لیزر پرانرژی قرار می‌گیرد. این تابش موجب تبخیر سطحی ماده و ایجاد پلاسمای غنی از گونه‌های یونی و اتمی می‌شود که با سردشدن در یک محیط گاز بی‌اثر نظیر آرگون، به تشکیل نانوذرات اکسیدروی منجر می‌گردد. از مزایای برجسته این روش می‌توان به تولید نانوذرات با خلوص بسیار بالا و حداقل آلودگی شیمیایی اشاره کرد، زیرا فرایند ساخت بدون استفاده از معرف‌ها و حلال‌های شیمیایی انجام می‌شود (Agarwal *et al.*, 2017). علاوه بر این، با تنظیم پارامترهایی نظیر انرژی لیزر، فشار گاز محیط و فاصله هدف تا جمع‌کننده، امکان کنترل نسبی اندازه و توزیع ذرات فراهم می‌گردد. روش آسیاب مکانیکی یک رویکرد بالابه‌پایین محسوب می‌شود که در آن پودر درشت اکسیدروی تحت سایش شدید توسط گلوله‌های سخت در یک آسیاب پرانرژی قرار می‌گیرد (Honda *et al.*, 2016).

از جمله مزایای اصلی روش‌های فیزیکی می‌توان به خلوص بالای محصول نهایی و عدم وجود باقی‌مانده حلال‌ها یا مواد شیمیایی سمی اشاره کرد که این ویژگی برای کاربردهای حساس نظیر گیاهان زینتی مطلوب است. بااین‌حال، این روش‌ها با محدودیت‌های قابل‌توجهی نیز همراه هستند. مصرف انرژی بسیار بالا به دلیل نیاز به تجهیزات خاص نظیر لیزرهای پرقدرت یا آسیاب‌های مکانیکی پیشرفته، هزینه‌بر بودن تجهیزات و دشواری مقیاس‌پذیری در تولید صنعتی، از جمله معایب مهم این روش‌ها به شمار می‌روند (Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 2014). افزون بر این، کنترل دقیق مورفولوژی و دستیابی به توزیع یکنواخت اندازه ذرات، به‌ویژه در روش آسیاب مکانیکی، چالش‌برانگیز است. این محدودیت‌ها موجب شده است که کاربرد روش‌های فیزیکی در کشاورزی که نیازمند تولید مقادیر زیاد و مقرون‌به‌صرفه نهاده‌هاست، با محدودیت مواجه شود.

روش‌های شیمیایی

روش‌های شیمیایی متداول‌ترین و پرکاربردترین رویکرد برای ساخت نانوذرات اکسیدروی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صنعتی محسوب می‌شوند. این روش‌ها بر پایه انجام واکنش‌های شیمیایی در فاز محلول استوار هستند و امکان کنترل دقیق‌تر بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذرات را فراهم می‌کنند. از جمله رایج‌ترین روش‌های شیمیایی می‌توان به رسوب‌گیری شیمیایی

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

و ساخت آب-گرمایی[۱] اشاره کرد که در مطالعات مرتبط با گیاهان زینتی بیشترین کاربرد را داشته‌اند (Kolodziejczak-Radzimska & Jesionowski, 201). در روش رسوب‌گیری شیمیایی، معمولاً یک نمک محلول روی نظیر نیترات روی یا استات روی در آب حل شده و سپس در شرایط کنترل‌شده با یک عامل رسوب‌دهنده، غالباً هیدروکسیدسدیم یا آمونیاک، واکنش می‌دهد. در این فرایند، هیدروکسیدروی به‌عنوان پیش‌ماده تشکیل می‌شود که پس از انجام عملیات حرارتی، به نانوذرات اکسیدروی تبدیل می‌گردد. سادگی، هزینه پایین و بازده نسبتاً بالا از مهم‌ترین مزایای این روش محسوب می‌شود. روش هیدروترمال پیچیده‌تر بوده و شامل انجام واکنش در یک اتوکلاو بسته تحت دما و فشار بالا است. این شرایط امکان رشد کنترل‌شده بلورها در محیط آبی را فراهم کرده و اغلب منجر به تولید نانوذراتی با بلورینگی بالا و مورفولوژی‌های خاص نظیر نانومیله‌ها و نانوسیم‌ها می‌شود (Nair & Mathew, 2022).

کنترل دقیق پارامترهای واکنش در روش‌های شیمیایی نقش تعیین‌کننده‌ای در ویژگی‌های نهایی نانوذرات دارد. دما بر سرعت هسته‌زایی و رشد بلورها تأثیرگذار است. pH محیط نیز از عوامل بسیار حساس است؛ به‌گونه‌ای که pH پایین می‌تواند مانع تشکیل کامل رسوب شود، درحالی‌که pH بالا ممکن است به تشکیل گونه‌های ناخواسته‌ای نظیر رویات بینجامد. تنظیم دقیق pH نقش مهمی در دستیابی به ذرات ریز و با توزیع اندازه یکنواخت دارد (Agarwal *et al*., 2017).

با وجود مزایای متعدد، روش‌های شیمیایی با نگرانی‌های محیط زیستی و ایمنی قابل‌توجهی همراهند. در این روش‌ها اغلب از مواد شیمیایی سمی و خطرناک نظیر هیدرازین و ترکیبات تیولی به‌عنوان عوامل کاهنده یا پایدارکننده استفاده می‌شود و همچنین کاربرد حلال‌های آلی سمی رایج است. باقی‌مانده این ترکیبات بر سطح نانوذرات می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست داشته و در کاربردهای کشاورزی، خطر انتقال آلاینده‌ها به خاک، آب و زنجیره غذایی را افزایش دهد (Singh *et al*., 2022). این چالش‌ها زمینه‌ساز گسترش روش‌های جایگزین سازگار با محیط‌زیست، موسوم به ساخت سبز، شده است.

ساخت سبز (زیستی)

ساخت سبز یا زیستی نانوذرات به‌عنوان رویکردی پایدار، اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست، جایگزینی مناسب برای روش‌های فیزیکی و شیمیایی متداول محسوب می‌شود. در این روش از منابع زیستی نظیر عصاره گیاهان، باکتری‌ها، قارچ‌ها، مخمرها یا آنزیم‌ها برای احیای یون‌های فلزی و تشکیل نانوذرات استفاده می‌گردد. ساخت سبز به‌ویژه در سال‌های اخیر، به کانون توجه بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه کاربردهای کشاورزی تبدیل شده است.

استفاده از عصاره گیاهان: این روش رایج‌ترین و پرکاربردترین شیوه ساخت سبز نانوذرات اکسیدروی به شمار می‌رود. بخش‌های مختلف گیاهان نظیر برگ، گل، ریشه، پوست و دانه‌ها حاوی ترکیبات زیست‌فعال متعددی از جمله فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ترپنوئیدها، اسیدهای آلی، ویتامین‌ها و پروتئین‌ها هستند. این ترکیبات به‌طور هم‌زمان نقش عامل کاهنده (احیای یون‌های روی) و عامل پایدارکننده (جلوگیری از تجمع و کنترل رشد نانوذرات) را ایفا می‌کنند. مطالعات متعددی، استفاده از عصاره گیاهان مختلف را برای ساخت نانوذرات اکسیدروی گزارش کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، عصاره آلوئه‌ورا به دلیل دارابودن ترکیباتی نظیر آلوئه‌ایمودین و پلی‌ساکاریدها، به‌طور مؤثری در ساخت نانوذرات کروی و یکنواخت اکسیدروی به‌کاررفته است (Aldeen *et*

۱- Hydrothermal

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

al., 2022). همچنین عصاره مرکباتی نظیر لیمو و پرتقال که غنی از اسیدسیتریک و ویتامین C هستند، به‌عنوان عوامل کاهنده قوی عمل می‌کنند. در مطالعه‌ای مبتنی بر استفاده از ضایعات گل محمدی، ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی موجود در عصاره منجر به تولید نانوذرات اکسیدروی با اندازه‌ای در حدود ۲۰ تا ۲۵ نانومتر شد (Adraoui *et al*., 2025). علاوه بر این، کاربرد عصاره گونه‌ای از آکاسیا نیلوتیکا[1] برای ساخت نانوذرات اکسیدروی زیست‌ساز در پژوهش‌های مرتبط با گیاه فلفل گزارش شده است (Adnan *et al*., 2024).

استفاده از میکروارگانیسم‌ها: میکروارگانیسم‌هایی نظیر باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها نیز توانایی ساخت نانوذرات را دارند. این موجودات از طریق فرآیندهای آنزیمی یا غیرآنزیمی، یون‌های فلزی را احیا کرده و نانوذرات را به‌صورت درون‌یاخته ای یا برون‌یاخته ای تولید می‌کنند. از جمله میکروارگانیسم‌های گزارش‌شده برای ساخت نانوذرات اکسیدروی می‌توان به باکتری *Bacillus subtilis* و قارچ‌هایی نظیر *Aspergillus niger* و *Fusarium oxysporum* اشاره کرد. با وجود کارایی مناسب، روش‌های میکروبی معمولاً نیازمند شرایط استریل و کنترل دقیق فرایند رشد هستند که می‌تواند کاربرد صنعتی آن‌ها را محدود سازد (Hamk & Avcı, 2025).

مزایای ساخت سبز: ساخت سبز نانوذرات به واسطه مزایای قابل‌توجه محیط زیستی و اقتصادی، به‌عنوان رهیافتی پایدار در تولید نانوکودها مورد توجه فراوان قرار گرفته است. از مهمترین مزایای این روش می‌توان به سازگاری محیط زیستی بالا اشاره کرد، چرا که در فرایند ساخت از مواد شیمیایی سمی و حلال‌های آلی خطرناک اجتناب شده و ضایعات غیرسمی تولید می‌شود (Brar *et al*., 2022).

صرفه اقتصادی نیز از دیگر محاسن کلیدی است که با بهره‌گیری از مواد اولیه ارزان، در دسترس و تجدیدپذیر نظیر عصاره گیاهان و ضایعات کشاورزی و نیز انجام فرایند در شرایط دمایی و فشاری محیط حاصل می‌شود. همچنین، شواهد نشان می‌دهد که سمیت بالقوه نانوذرات تولیدشده به این روش ممکن است کاهش یابد؛ زیرا پوشش طبیعی ایجادشده توسط زیست‌مولکول‌های موجود در عصاره‌ها می‌تواند زیست‌سازگاری نانوذرات را افزایش دهد (Faizan *et al*., 2021). تنوع زیستی بالا در انتخاب عوامل کاهنده و تثبیت‌کننده طبیعی، امکان دستیابی به نانوذرات با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متنوع را فراهم می‌آورد.

چالش‌های ساخت سبز: علی‌رغم مزایای متعدد، ساخت سبز نانوذرات با چالش‌های مهمی مواجه است که بر کاربرد گسترده آن تأثیر می‌گذارد. اصلی‌ترین چالش، مشکل در استانداردسازی و تکرارپذیری فرایند است. وابستگی ترکیب شیمیایی عصاره‌های زیستی به عواملی مانند گونه گیاهی، فصل برداشت، شرایط رشد و روش استخراج، می‌تواند منجر به ناهمگنی در اندازه، مورفولوژی و خواص نانوذرات در دسته‌های مختلف ساخت شود (Khan *et al*., 2019). کنترل محدود پارامترها بر خلاف روش‌های شیمیایی، دستیابی به کنترل دقیق و یکنواخت روی اندازه و شکل نانوذرات در این سامانه‌ها اغلب دشوارتر است. ازاین‌رو، نیاز به بهینه‌سازی سامانه ای فرایند برای هر سامانه زیستی امری ضروری است. این بهینه‌سازی باید عوامل کلیدی مانند غلظت عصاره، دما، زمان واکنش و pH را در نظر بگیرد. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای برای غلبه بر این چالش، از روش

۱- *Acacia nilotica*

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

سطح پاسخ برای بهینه‌سازی ساخت نانوذرات اکسیدروی با استفاده از عصاره ضایعات رز بهره گرفته شد (Adraoui *et al.*, 2025).

ویژگی‌یابی نانوذرات

تفسیر دقیق نتایج زیستی و کشاورزی حاصل از کاربرد نانوذرات اکسیدروی، مستلزم شناسایی و توصیف جامع ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌هاست. بدین منظور، از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری[۱]: این تکنیک‌ها برای مشاهده مستقیم اندازه، شکل و توزیع اندازه نانوذرات با وضوح بالا به کار می‌روند. میکروسکوپ الکترونی روبشی اطلاعاتی در خصوص ریخت‌شناسی سطح ارائه می‌دهد، درحالی‌که میکروسکوپ الکترونی عبوری امکان بررسی ساختار داخلی و اندازه دقیق ذرات را فراهم می‌کند (Faisal *et al.*, 2021; Abdelbaky *et al.*, 2022).

پراش پرتو ایکس[۲]: این روش برای تعیین ساختار بلوری، فاز و اندازه کریستالیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوی پراش امکان شناسایی فاز خالص اکسیدروی با ساختار وورتزیت هگزاگونال و تخمین اندازه کریستالیت‌ها از طریق معادله شرر را فراهم می‌کند.

تفرق نور پویا و پتانسیل زتا: اندازه هیدرودینامیکی و توزیع اندازه نانوذرات را در محیط پراکنده‌کننده اندازه‌گیری می‌کند، درحالی‌که پتانسیل زتا شاخصی از بار سطحی و پایداری کلوئیدی سوسپانسیون نانوذرات است که نقش مهمی در رفتار آن‌ها در محیط و برهم‌کنش با سامانه‌های زیستی دارد (Faisal *et al.*, 2021; Abdelbaky *et al.*, 2022).

طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه[۳]: این روش برای شناسایی گروه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی موجود بر سطح نانوذرات، به‌ویژه در نانوذرات زیست‌ساز، استفاده می‌شود و حضور زیست مولکول‌های گیاهی نظیر گروه‌های OH، C=O و C–O را که به‌عنوان عامل کپینگ عمل می‌کنند، تأیید می‌نماید (Abdelbaky *et al.*, 2022).

طیف‌سنجی فرابنفش–مرئی[۴]: نانوذرات اکسیدروی جذب مشخصی در ناحیه فرابنفش، معمولاً در حدود ۳۷۰ تا ۳۷۵ نانومتر، نشان می‌دهند. این تکنیک برای تأیید تشکیل نانوذرات و تخمین گاف انرژی که رابطه معکوسی با اندازه ذرات دارد، به کار می‌رود (Faisal *et al.*, 2021).

دینامیک جذب، انتقال و سرنوشت نانوذرات روی در گیاه

راه‌های جذب در گیاه

نانوذرات اکسیدروی عمدتاً از دو مسیر اصلی وارد گیاه می‌شوند: جذب برگی و جذب ریشه‌ای. در کاربرد برگی، نانوذرات معمولاً از طریق منافذ کوچک موجود روی کوتیکول برگ یا به‌طور مستقیم از طریق روزنه‌ها وارد بافت گیاه می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که به دلیل اندازه نانومتری و سطح ویژه بالا، نانوذرات اکسیدروی قادرند به‌راحتی از سد کوتیکولی عبور کرده و به سلول‌های اپیدرمی نفوذ کنند (Raliya *et al.*, 2015). این فرایند اغلب از طریق اندوسیتوز یا انتقال غیرفعال رخ می‌دهد. در

۱- Scanning and transmission electron microscopy ۲- X-ray diffraction ۳- Fourier transform infrared spectroscopy ۴- Ultraviolet-visible spectroscopy

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

مقابل، جذب ریشه‌ای نانوذرات پیچیده‌تر است و از دو مسیر اصلی آپوپلاستی و سیمپلاستی عبور می‌کند. در مسیر آپوپلاستی، نانوذرات از فضای بین یاخته ای و دیواره یاخته ای عبور می‌کنند، درحالی‌که در مسیر سیمپلاستی، از طریق پلاسمودسماتا یا فرآیندهای اندوسیتوز وارد سیتوپلاسم می‌شوند. بررسی‌ها در گیاه گوجه‌فرنگی نشان داده‌اند که نانوذرات اکسیدروی با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر می‌توانند از هر دو مسیر جذب ریشه‌ای شوند (Wang *et al*., 2018). قابل‌توجه است که در شرایط تنش‌های محیطی مانند شوری یا خشکی، به دلیل تغییر نفوذپذیری غشا و کاهش پتانسیل آب، جذب ریشه‌ای نانوذرات کاهش می‌یابد (Faizan *et al*., 2021).

انتقال درون گیاهی

پس از جذب، نانوذرات اکسیدروی در داخل گیاه جابه‌جا می‌شوند. انتقال از ریشه به اندام‌های هوایی عمدتاً از طریق جریان تبخیری در آوندهای چوبی انجام می‌شود. نانوذرات یا یون‌های روی حاصل از انحلال آن‌ها، توسط جریان آب به سمت برگ‌ها و گل‌ها منتقل می‌شوند. شواهدی نیز مبنی بر انتقال محدود در آوندهای آبکش وجود دارد که می‌تواند توزیع مجدد مواد به سمت اندام‌های درحال‌رشد یا ذخیره‌ای را تسهیل کند (Schwab *et al*., 2016). برای مثال، در گیاه فلفل تحت تنش شوری، کاربرد برگی نانوذرات اکسیدروی موجب افزایش غلظت روی در ریشه و برگ‌ها شد که نشان‌دهنده انتقال مؤثر این نانوذرات در گیاه است (Faizan *et al*., 2021). میزان و سرعت انتقال نانوذرات به‌عوامل متعددی نظیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذره، گونه گیاهی و شرایط فیزیولوژیکی گیاه وابسته است.

تبدیل و انباشت

پس از ورود به بافت گیاهی، نانوذرات اکسیدروی ممکن است دستخوش تغییرات شیمیایی شوند. یکی از مهم‌ترین فرایندها، انحلال تدریجی و آزادسازی یون‌های روی در محیط نسبتاً اسیدی آپوپلاستی یا واکوئل است. این یون‌ها سپس می‌توانند در چرخه متابولیکی گیاه وارد شده و نقش تغذیه‌ای خود را ایفا کنند (Ma *et al*., 2015). بااین‌حال، بخشی از نانوذرات نیز ممکن است به شکل دست‌نخورده در بافت‌های مختلف انباشته شوند. محل‌های اصلی تجمع شامل دیواره یاخته ای، واکوئل و گاهی کلروپلاست است. انباشت در دیواره یاخته ای می‌تواند به‌عنوان یک سد فیزیکی عمل کند، درحالی‌که تجمع در واکوئل، به‌عنوان یک اندام ذخیره‌ای و سم‌زدا، امکان تحمل غلظت‌های بالای نانوذرات را برای گیاه فراهم می‌کند. حضور نانوذرات در کلروپلاست نیز می‌تواند مستقیماً بر فرایند نورساخت اثرگذار باشد (Rajput *et al*., 2018). مطالعه روی گوجه‌فرنگی نشان داد که کاربرد برگی نانوذرات اکسیدروی موجب تجمع روی در برگ و میوه می‌شود و این تجمع با افزایش عملکرد و کیفیت میوه مرتبط است (Sun *et al*., 2020). همچنین، در گیاه زعفران مشاهده شد که نانوذرات اکسیدروی جذب‌شده در گلبرگ‌ها، می‌توانند تولید متابولیت‌های ثانویه ارزشمند را افزایش دهند (Rikabad *et al*., 2019).

عوامل مؤثر بر جذب و انتقال

کارایی جذب و انتقال نانوذرات اکسیدروی در گیاهان به‌شدت تحت‌تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذرات و شرایط محیطی است:

اندازه: به‌طورکلی، نانوذرات اکسیدروی در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر ساخت می‌شوند که این محدوده رایج‌ترین دامنه برای کاربردهای کشاورزی و زیستی محسوب می‌شود. در روش‌های شیمیایی متداول مانند رسوب‌گیری و هیدروترمال، اندازه ذرات

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

معمولاً بین ۲۰ تا ۱۲۰ نانومتر قرار می‌گیرد (Wojnarowicz *et al*., 2018)، درحالی‌که در ساخت سبز با استفاده از عصاره‌های گیاهی، اغلب نانوذراتی در محدوده ۲۰ تا ۵۰ نانومتر حاصل می‌شوند (Husain *et al*., 2019). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ذرات کوچک‌تر، به ویژه آن‌هایی که اندازه‌شان از ۵۰ نانومتر کمتر است، به دلیل سطح ویژه بالاتر و توانایی عبور آسان‌تر از منافذ یاخته ای، جذب و انتقال مؤثرتری در گیاه دارند (Wang *et al*., 2018). برای نمونه، در مطالعه‌ای روی گندم، نانوذرات اکسیدروی با اندازه حدود ۲۰ نانومتر نسبت به ذرات درشت‌تر، کارایی جذب و انتقال بسیار بالاتری از خود نشان دادند (Rizwan *et al*., 2019).

بار سطحی و پوشش: پوشش‌های سطحی می‌توانند پایداری، حلالیت و تعامل نانوذرات با سطوح بیولوژیکی را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند. مطالعات متعدد، طیف گسترده‌ای از پوشش‌های آلی و معدنی را برای بهبود عملکرد نانوذرات اکسیدروی در گیاهان بررسی کرده‌اند. پوشش‌هایی مانند PEG و PVP با ایجاد بار سطحی مناسب، پراکنش نانوذرات را افزایش داده و تجمع آن‌ها را کاهش می‌دهند؛ به‌طوری که نانوذرات اکسیدروی پوشش‌دار با PEG و PVP در گیاه دارویی استویا[۱] منجر به افزایش رشد و تولید متابولیت‌های ثانویه شدند. همچنین، پوشش‌های زیست‌پلیمری نظیر کربوکسی‌متیل‌سلولز[۲] و صمغ عربی به‌دلیل زیست‌سازگاری و تشکیل لایه‌های چسبنده بر سطح برگ و میوه، کارایی نانوذرات را در حفاظت از محصولات باغبانی بهبود بخشیده‌اند. در یک مطالعه روی پیاز[۳]، پوشش آلبومین سرم گاوی با ایجاد پروتئین کرونا بر سطح نانوذرات، سمیت آن‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش داد و زیست‌سازگاری نانوذرات را افزایش داد. کیتوزان نیز به‌عنوان یک پوشش زیست‌سازگار و چسبنده، چسبندگی نانوذرات به برگ یا ریشه را افزایش داده و فرصت جذب را طولانی‌تر می‌سازد (Kashyap *et al*., 2015). در مجموع، انتخاب نوع پوشش به هدف کاربرد (کاهش سمیت، افزایش جذب، رهایش کنترل‌شده یا حفاظت پس از برداشت) بستگی دارد و هر یک از پوشش‌های فوق می‌توانند بسته به شرایط، مزایای خاص خود را ارائه دهند. گزارش شده است که نانوذرات اکسیدروی پوشش‌دار با کیتوزان، جذب و اثر محرک رشد بهتری در گیاه ریحان نشان داده‌اند (Elicky *et al*., 2013).

شکل و بلورینگی[۴]: اشکال مختلف نانوذرات (کروی، میله‌ای، گل‌مانند، شش‌ضلعی و غیره) تأثیر قابل‌توجهی بر میزان جذب توسط گیاه، برهم‌کنش با غشاهای زیستی، ، سمیت یاخته ای و نرخ انحلال نانوذرات دارند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مورفولوژی نانوذرات، نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی آن‌ها به‌عنوان نانوکود دارد. در یک مطالعه مقایسه‌ای روی سویا[۵]، نانوذرات کروی با اندازه ۳۸ نانومتر بیشترین اثر حفاظتی را در برابر تنش اکسیداتیو نشان دادند، در حالی که نانوذرات گل‌مانند با ۵۹ نانومتر و میله‌ای با بیش از ۵۰۰ نانومتر اثرات کمتری داشتند (Yusefi-Tanha *et al*., 2020). همچنین در مطالعه‌ای روی فلفل دلمه‌ای[۶] نانوذرات با مورفولوژی کروی در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بهترین نتایج را برای شاخص‌های جوانه‌زنی، ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ و سبزینه کل به دست آوردند (Biotecnia, 2023). در مقابل، نانوذرات شش‌ضلعی پوشش‌داده‌شده با مالتودکسترین در غلظت‌های ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باعث افزایش نرخ تعرق در گیاه فلفل دلمه‌ای شدند (Pérez Velasco *et al*., 2025).

از نظر کارایی جذب، نانوذرات میله‌شکل نسبت به کروی توانایی بیشتری برای ورود به سلول‌های گیاهی دارند. مطالعات روی برگ‌های تنباکو[۷] نشان داده است که نانوذرات میله‌شکل برخلاف نانوذرات کروی قادر به ورود به درون سلول‌های گیاهی هستند (Zhang *et al*., 2024). با این حال، نکته قابل توجه این است که علی‌رغم عدم ورود به سلول، نانوذرات کروی ۱۰

۱- *Stevia rebaudiana* ۲- Carboxymethyl cellulose ۳- *Allium cepa* ۴- Crystallinity ۵- *Glycine max*
۶- *Capsicum annuum* ۷- *Nicotiana benthamiana*

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

نانومتری حامل siRNA بیشترین کارایی را در القای خاموشی ژن در برگ‌های بالغ گیاه داشتند (Zhang *et al*., 2024). این یافته نشان می‌دهد که لزوماً ورود یاخته ای شرط لازم برای اثرگذاری زیستی نیست و حتی نانوذراتی که جذب یاخته ای نمی‌شوند نیز می‌توانند از طریق سازوکارهای دیگر مانند تعامل با دیواره یاخته ای یا رهایش تدریجی یون‌های روی، تأثیرات مطلوبی بر گیاه داشته باشند. در مجموع، نانوذرات کروی به دلیل نسبت سطح به حجم بهینه، پراکنش بهتر و جذب مؤثرتر، معمولاً گزینه مناسبی برای کاربردهای تغذیه‌ای در گیاهان زینتی محسوب می‌شوند، در حالی که اشکال میله‌ای و سوزنی به دلیل نسبت منظری بالا و سطح ویژه بیشتر، می‌توانند فعالیت آنتی‌باکتریایی و سمیت یاخته ای بیشتری داشته باشند.

ساختار بلوری نیز بر نرخ انحلال و دسترسی زیستی تأثیر می‌گذارد. نانوذرات با بلورینگی بالاتر معمولاً پایدارتر بوده و رهایش تدریجی‌تری دارند، در حالی که نانوذرات آمورف (بی‌شکل) سریع‌تر حل شده و یون‌های روی بیشتری آزاد می‌کنند. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات کوچک‌تر (زیر ۲۰ نانومتر) حلالیت و زیست فراهمی[۱] بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر دارند (Umar *et al*., 2023). بنابراین، اندازه و مورفولوژی نانوذرات اکسیدروی باید به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شوند که ضمن حفظ کارایی تغذیه‌ای، سمیت غیرضروری برای گیاه ایجاد نکنند.

عوامل محیطی و گیاهی: pH خاک یا محلول غذایی، حضور مواد آلی، گونه و رقم گیاهی، سن گیاه و وضعیت تنش (مانند شوری یا خشکی) همگی می‌توانند سرنوشت نانوذرات اکسیدروی را در سیستم گیاهی تحت‌تأثیر قرار دهند. pH پایین معمولاً انحلال نانوذرات و آزادسازی یون‌های روی را افزایش می‌دهد (Rizwan *et al*., 2019; Mohammadi *et al*., 2025) در حالی‌که محیط قلیایی ممکن است منجر به تشکیل گونه‌های نامحلول روی و کاهش فراهمی شود (Watson *et al*., 2015). حضور مواد آلی در خاک مانند اسیدهای هیومیک و فولویک می‌تواند با پوشش دادن سطح نانوذرات، پایداری کلوئیدی آن‌ها را افزایش داده و از تجمع آن‌ها جلوگیری کند (Peng *et al*., 2017). همچنین مواد آلی می‌توانند با کلاته کردن یون‌های روی آزادشده، جذب آن‌ها را توسط ریشه تسهیل نمایند (Luo *et al*., 2018). گونه و رقم گیاهی تأثیر چشمگیری بر جذب و انباشت نانوذرات دارد؛ به طوری که گیاهان تک‌لپه معمولاً جذب کمتری نسبت به گیاهان دولپه نشان می‌دهند (Zhao *et al*., 2016) و حتی ارقام مختلف یک گونه نیز پاسخ‌های متفاوتی به نانوذرات اکسیدروی دارند (Dimkpa *et al*., 2019). سن گیاه نیز نقش مهمی ایفا می‌کند؛ گیاهان جوان با فعالیت متابولیکی بالاتر و دیواره یاخته ای نازک‌تر، معمولاً نانوذرات بیشتری جذب می‌کنند (Wang *et al*., 2018)، در حالی‌که گیاهان مسن ممکن است تجمع کمتری نشان دهند (Du *et al*., 2019). وضعیت تنش (مانند شوری یا خشکی) نیز سرنوشت نانوذرات را تغییر می‌دهد. تحت تنش شوری، جذب ریشه‌ای و انتقال به اندام هوایی معمولاً کاهش می‌یابد (Faizan *et al*., 2021) و در شرایط خشکی، به دلیل کاهش تعرق و بسته شدن روزنه‌ها، انتقال نانوذرات از ریشه به برگ محدود می‌شود (Dimkpa *et al*., 2019).

۱- Bioavailability

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

اثرات نانوذرات اکسیدروی بر رشد و کیفیت گیاهان زینتی

شاخص‌های رویشی

نانوذرات اکسیدروی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک محرک مؤثر در بهبود رشد رویشی گیاهان زینتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که کاربرد این ماده، چه از طریق محلول‌پاشی برگی و چه از طریق مصرف خاکی، می‌تواند شاخص‌های رویشی کلیدی مانند ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد و سطح برگ، وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

در بوته رز[۱]، کاربرد نانوذرات اکسیدروی در غلظت‌های بهینه (۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) منجر به افزایش قابل‌توجه ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی و سطح برگ شد (Khattab *et al.*, 2023). این اثرات به دلیل نقش روی در ساخت هورمون اکسین و تنظیم تقسیم و طویل شدن یاخته ای است، چرا که روی به‌عنوان کوفاکتور بیش از ۳۰۰ آنزیم از جمله آنزیم‌های دخیل در ساخت تریپتوفان (پیش‌ساز اکسین) عمل می‌کند (Rudani *et al.*, 2018).

مطالعات مشابه روی میخک[۲] نشان داده‌اند که نانوذرات اکسیدروی با غلظت ۷۵ تا ۱۰۰ قسمت در میلیون باعث افزایش وزن تر و خشک ساقه و برگ در مقایسه با شاهد و حتی سولفات روی معمولی می‌شوند. این برتری به ویژگی‌های نانوذرات، از جمله اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و نفوذپذیری بهتر از طریق کوتیکول برگ نسبت داده شده است (Faizan *et al.*, 2021).

در گیاهان آپارتمانی مانند پوتوس[۳]، کاربرد نانوذرات اکسیدروی منجر به افزایش محتوای سبزینه و کاروتنوئیدها شد و در نتیجه تولید ماده خشک و سطح برگ افزایش یافت (Wang *et al.*, 2011). تأثیر مثبت نانوذرات اکسیدروی بر رشد رویشی و ویژگی‌های پیاز در برخی گیاهان زینتی پیازدار به اثبات رسیده است. برای نمونه، در مطالعه‌ای روی سوسن چلچراغ[۴]، محیط کشت حاوی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اکسیدروی باعث افزایش معنی‌دار تعداد برگ و تعداد سوخ شد (Chamani *et al.*, 2015). با توجه به شباهت‌های فیزیولوژیکی میان گیاهان سوخوار، انتظار می‌رود کاربرد برگی نانوذرات اکسیدروی روی نرگس نیز بتواند با افزایش تعداد برگ و بهبود رشد سوخ، زمینه‌ساز کیفیت بهتر گلدهی در سال‌های بعد باشد؛ هرچند تأیید این فرضیه نیازمند پژوهش‌های اختصاصی است.

مکانیسم اصلی بهبود رشد رویشی توسط نانوذرات اکسیدروی چندجانبه است:

۱- تأمین مؤثر ریزمغذی روی: نانوذرات با جذب سریع و کارآمد، کمبود روی در خاک‌های آهکی را جبران می‌کنند (Hacisalihoglu, 2020).

۲- افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی نانوذرات اکسیدروی: فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، و پراکسیداز را افزایش داده و گیاه را در برابر تنش‌های اکسیداتیو محافظت می‌کند (Mittler, 2002).

۳- تحریک ساخت سبزینه: با جبران کمبود روی، بازده نورساخت افزایش یافته و کلروز برگ‌ها کاهش می‌یابد (Rizwan *et al.*, 2019). نانوذرات اکسیدروی از طریق چندین مکانیسم هماهنگ، ساخت سبزینه و بازده نورساخت را افزایش می‌دهند. این نانوذرات پس از جذب، یون‌های روی را به صورت تدریجی آزاد می‌کنند که به عنوان کوفاکتور ضروری آنزیم منیزیم‌کلاتاز

۱- *Rosa hrbrida* 'Top Secret' ۲- *Dianthus caryophyllus* L. cv. Chabaud Red ۳- *Epipremnum aureum*

۴- *Lilium ledebourii*

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

عمل می‌نماید. آنزیم منیزیم‌کلاتاز مسئول درج یون منیزیم در حلقه پورفیرین است، که مرحله کلیدی و محدودکننده در مسیر زیست ساخت سبزینه محسوب می‌شود (Sun *et al*., 2020). در شرایط کمبود روی، فعالیت این آنزیم کاهش یافته و ساخت سبزینه مختل می‌گردد. نانوذرات اکسیدروی با تأمین مؤثر روی، فعالیت آنزیم منیزیم‌کلاتاز را احیا کرده و بیان ژن‌های کلیدی مسیر زیست ساخت سبزینه را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، یون‌های روی می‌توانند مستقیماً جایگزین منیزیم در حلقه پورفیرین شده و ساختاری به نام سبزینه-روی تشکیل دهند که رنگدانه را حفظ می‌کند (Qu *et al*., 2024). نانوذرات اکسیدروی با تأمین روی برای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و تخریب سبزینه جلوگیری می‌نمایند. همچنین این نانوذرات با حفاظت از ساختار غشای تیلاکوئید و گرانای کلروپلاست، یکپارچگی دستگاه نورساختی را حفظ کرده و کارایی نورسامانه II را بهبود می‌بخشند (Wang *et al*., 2018). در نتیجه این سازوکارهای هماهنگ، محتوای سبزینه افزایش یافته، کلروز ناشی از کمبود روی برطرف شده و بازده نورساخت به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد (Rizwan *et al*., 2019).

۴- تنظیم هورمونی: روی در مسیرهای ساخت هورمون‌های رشد مانند اکسین و جیبرلین نقش دارد (Broadley *et al*., 2007; Marschner, 2012).

شاخص‌های زایشی و گلدهی

نانوذرات اکسیدروی می‌توانند زمان گلدهی را تنظیم کنند. در گیاه دارویی آجیل[۱]، کاربرد نانوذرات اکسیدروی در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک باعث افزایش وزن تر و خشک، طول شاخساره و ریشه، سبزینه کل، پروتئین و محتوای روی گردید (Zare *et al*., 2022). همچنین در گیاه میخک، کاربرد نانوذرات اکسیدروی در غلظت‌های ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر تأثیر معنی‌داری بر تعداد کل برگ‌ها، قطر گل و قطر گل‌آذین داشت (Ghasemi Chamtaghi *et al*., 2025; Al-Hatem *et al*., 2019). در مطالعه‌ای روی گوجه‌فرنگی، محلول‌پاشی برگی نانوذرات اکسیدروی (۳ میلی‌گرم در لیتر) باعث افزایش معنی‌دار رشد، زیست‌توده و عملکرد میوه شد و بیان ژن‌های مرتبط با فاکتورهای رونویسی از جمله *R2R3MYB* (۶/۲ برابر)، *WRKY1* (۴/۶ برابر) و *EREB* را افزایش داد که این ژن‌ها در مسیرهای سیگنالینگ هورمونی و پاسخ به تنش نقش دارند (Pejam *et al*., 2021). این اثر با نقش روی در ساخت هورمون‌های گیاهی و انتقال سیگنال‌های محیطی مرتبط است. کاربرد نانوذرات اکسیدروی همچنین منجر به افزایش تعداد گل‌آذین در گیاه آفتابگردان در مرحله گلدهی شد (Kolenčík *et al*., 2019). در گیاهان گلدانی مانند بنفشه آفریقایی[۲]، مطالعات نشان داده است که نانوذرات اکسیدروی با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، می‌توانند گلدهی را بهبود بخشند (Tombuloglu *et al*., 2019). علاوه بر این، در گیاه پنبه[۳]، کاربرد نانوذرات اکسیدروی (به ویژه با اندازه ۳۰-۵۰ نانومتر و غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) باعث بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد پایدار گردید و پتانسیل بالایی به عنوان کود کارآمد برای گیاهان زینتی چوبی نشان داد.

نانوذرات اکسیدروی بر ویژگی‌های کیفیتی گل اثرگذارند. در پژوهشی بر میخک بیان شده است که نانوذرات باعث تولید گل‌هایی بزرگ‌تر با دمگل‌های بلندتر و گلبرگ ضخیم‌تر شدند (Faizan *et al*., 2021).

همچنین نانوذرات اکسیدروی با حفظ تعادل آبی، کاهش تنفس و مهار رشد میکروبی در آب گلدان، ماندگاری گل را افزایش می‌دهند (Rajput *et al*., 2018). ازسوی‌دیگر بیان شده که نانوذرات اکسیدروی سبب بهبود رنگ گل فلفل از طریق افزایش آنتوسیانین و کاروتنوئیدها می‌شوند. احتمالاً این مواد از طریق تحریک بیان ژن‌های زیست ساخت رنگدانه‌ها یا محافظت از آنها در برابر تخریب نوری، باعث تشدید رنگ گل می‌شوند (García-López *et al*., 2019).

۱- *Trachyspermum ammi* ۲- *Saintpaulia ionantha* ۳- *Hibiscus syriacus* L.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

گسترش سامانه ریشه

سامانه ریشه گسترش‌یافته اساس سلامت و رشد گیاه است. در گیاهان زینتی، به‌ویژه گلدانی، گسترش ریشه برای جذب مؤثر آب و عناصر غذایی حیاتی است. کاربرد نانوذرات اکسیدروی موجب افزایش طول ریشه، تعداد و تراکم ریشه‌های مویین و وزن خشک ریشه شده است. به‌عنوان‌مثال، در بگونیا، نانوذرات اکسیدروی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش چشمگیر طول و تراکم ریشه شد (Alkuwayti *et al*., 2020). به‌طورکلی گسترش سامانه ریشه سبب افزایش سطح تماس با خاک و بهبود عملکرد در شرایط کم‌آبی، جلوگیری از واژگونی گیاهان بلندقد، مقاومت بالاتر در برابر خشکی، شوری و بیماری‌ها، و افزایش موفقیت پس از انتقال به گلدان یا زمین اصلی در گیاهان زینتی می‌شود (Hassan & Ali, 2014).

سازوکارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی

استفاده از نانوذرات اکسیدروی به‌عنوان یک استراتژی نوین در پرورش گیاهان زینتی، موجب بهبود رشد، افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی و ارتقای کیفیت ظاهری و فیزیولوژیکی گیاهان شده است. درک دقیق سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این اثرات برای بهینه‌سازی کاربرد و کاهش ریسک‌های احتمالی ضروری است (Kasraie *et al*., 2020; Siddiqui & Al-Whaibi, 2014).

بهبود فرآیندهای نورساختی

نورساخت موتور اصلی رشد و تولیدمثل گیاهان است. نانوذرات اکسیدروی با تأثیر بر چندین جنبه دستگاه نورساختی، کارایی این فرایند را افزایش می‌دهند:

۱- افزایش محتوای رنگدانه‌های نورساختی: مطالعات نشان داده‌اند که محلول‌پاشی برگی نانوذرات اکسیدروی موجب افزایش معنادار سبزینه a، سبزینه b و کاروتنوئیدها می‌شود (García-López *et al*., 2019). به‌عنوان‌مثال، در فلفل زینتی[1] تحت تنش شوری، محلول‌پاشی بیوژنیک نانوذرات اکسیدروی موجب افزایش سبزینه a از ۱/۲۱ به ۱/۵۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر و سبزینه b از ۰/۸۲ به ۱/۲۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر شد. کاروتنوئیدها علاوه بر جذب نور، به‌عنوان آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی عمل کرده و دستگاه نورساختی را از آسیب ROS محافظت می‌کنند (Adnan *et al*., 2024).

۲- حفظ یکپارچگی کلروپلاست و مقاومت به تنش: نانوذرات اکسیدروی با کاهش پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای تیلاکوئید و حفظ کارایی نورسامانه دو (PSII) از عملکرد نورساخت در شرایط خشکی و شوری محافظت می‌کنند. این نانوذرات همچنین به بهبود هدایت روزنه‌ای و نرخ تعرق کمک می‌کنند (Ahmed *et al*., 2023).

۳- افزایش فعالیت آنزیم‌های نورساختی: نانوذرات اکسیدروی می‌توانند فعالیت آنزیم رابیسکو (ریبولوز- ۱ و ۵- بیس‌فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز) را افزایش دهند و با بهبود تثبیت کربن، تولید زیست‌توده گیاه را ارتقا دهند (Rizwan *et al*., 2019).

تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی

نانوذرات اکسیدروی فعالیت سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را به دو طریق تقویت می‌کنند:

۱- *Capsicum annum* L.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

خط دفاع آنزیمی: فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، اسکوربات پراکسیداز افزایش می‌یابد (Mittler, 2002). این آنزیم‌ها ROS را به ترکیبات غیرضروری تبدیل کرده و هموستاز اکسیداتیو یاخته را حفظ می‌کنند (Adnan *et al*., 2024).

خط دفاع غیرآنزیمی: نانوذرات اکسیدروی محتوای گلوتاتیون و آسکوربات را افزایش داده و پراکسیداسیون لیپیدها را کاهش می‌دهند. همچنین نقش القاکننده مقاومت سامانه ای را در غلظت‌های پایین ایفا می‌کنند (Ahmad *et al*., 2018; Rizwan *et al*., 2019).

تنظیم متابولیسم هورمونی

نانوذرات اکسیدروی با تنظیم سطح هورمون‌های گیاهی، رشد و پاسخ به تنش را تقویت می‌کنند:

هورمون‌های رشد: افزایش اکسین و جیبرلین از طریق فراهمی بهتر روی، موجب رشد یاخته ای، گسترش ریشه و ساقه می‌شود (Sisakht *et al*., 2015; Moghadam *et al*., 2013).

هورمون‌های تنش: نانوذرات اکسیدروی می‌توانند پاسخ آبسیزیک اسید را تعدیل کرده و تعادل بین حفظ آب و نورساخت را بهبود دهند (Kolenčík *et al*., 2019).

فعال‌سازی متابولیسم ثانویه

نانوذرات اکسیدروی ساخت و تجمع ترکیبات متابولیت ثانویه مانند فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، ترپن‌ها و ترکیبات فنلی را افزایش می‌دهند. این ترکیبات علاوه بر ایجاد رنگ و عطر، دفاع گیاه در برابر پاتوژن‌ها و تنش‌های محیطی را تقویت می‌کنند. این ماده با ایجاد سیگنال اکسیداتیو خفیف و عملکرد به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های کلیدی (مانند CHS[1] در مسیر فلاونوئید) مسیرهای زیست ساختی را فعال می‌کنند (Almulhim *et al*., 2024). افزایش این ترکیبات موجب بهبود رنگ، عطر، ماندگاری و مقاومت پس از برداشت گل‌های زینتی می‌شود.

بهبود جذب و هموستاز مواد مغذی

نانوذرات اکسیدروی با تأمین روی به‌صورت مستقیم و تحریک فعالیت ریشه، جذب سایر عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیوم را افزایش می‌دهند. اندازه نانومتری و سطح ویژه بالا، فراهمی زیستی نانوذرات اکسیدروی را نسبت به منابع سنتی روی افزایش می‌دهد و جذب سریع از طریق برگ و ریشه را ممکن می‌سازد (Adil *et al*., 2022; Borm *et al*., 2006). همچنین نانوذرات اکسیدروی با کاهش جذب سدیم و افزایش نسبت پتاسیم به سدیم تحت تنش شوری، فشار تورژسانس و فعالیت آنزیمی طبیعی را حفظ می‌کنند (Nadeem *et al*., 2020).

نقش نانوذرات اکسیدروی در افزایش تحمل گیاهان زینتی به تنش‌ها

نانوذرات اکسیدروی با بهره‌گیری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد خود، از جمله اندازه نانومتری، سطح ویژه بالا و قابلیت انتشار و جذب سریع، به‌عنوان ابزاری نوین و امیدبخش در مدیریت تنش‌های محیطی مطرح شده‌اند. این نانوذرات

۱- Chalcone Synthase

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

می‌توانند مقاومت گیاهان زینتی را در برابر طیف وسیعی از تنش‌های نازیوا و زیوا افزایش داده و در نهایت سلامت، کمیت و کیفیت محصولات این صنعت ارزشمند را ارتقا بخشند (Latef *et al*., 2017; Kasraie *et al*., 2020).

تنش‌های نازیوا

تنش شوری: شوری خاک از طریق ایجاد تنش اسمزی، سمیت یونی (به‌ویژه یون‌های سدیم و کلر) و اختلال در جذب و تعادل سایر عناصر غذایی، رشد و کیفیت بصری گیاهان زینتی را به‌شدت کاهش می‌دهد (Kasraie *et al*., 2020). مطالعات نشان می‌دهد که کاربرد نانوذرات اکسیدروی می‌تواند از طریق چندین مکانیسم کلیدی، اثرات مخرب شوری را کاهش دهد:

۱- تنظیم تعادل یونی: این نانوذرات با کاهش جذب سدیم و تسهیل جذب و انتقال پتاسیم، نسبت سدیم به پتاسیم را در سیتوپلاسم حفظ می‌کنند. این تعادل برای عملکرد مطلوب آنزیم‌ها و حفظ یکپارچگی غشاهای یاخته ای حیاتی است (Nadeem *et al*., 2020).

۲- حفظ فشار اسمزی: نانوذرات اکسیدروی تجمع متابولیت‌های سازگارکننده اسمزی همچون پرولین و گلیسین‌بتائین را افزایش می‌دهند. این ترکیبات با کمک به حفظ آب درون‌یاخته ای، اثرات تنش خشکی ناشی از شوری را خنثی می‌کنند (Iqbal *et al*., 2018).

۳- کاهش تنش اکسیداتیو: یکی از مهم‌ترین نقش‌های نانوذرات اکسیدروی، تقویت سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه است. این نانوذرات فعالیت آنزیم‌های کلیدی آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز و اسکوربات پراکسیداز را افزایش داده و در نتیجه سطح گونه‌های فعال اکسیژن مخرب مانند پراکسید هیدروژن و شاخص پراکسیداسیون لیپیدی مالون‌دی‌آلدهید را کاهش می‌دهند (Faizan *et al*., 2021).

تنش خشکی: کمبود آب به‌عنوان یک عامل محدودکننده اصلی، رشد رویشی و به‌ویژه گلدهی گیاهان زینتی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Rai *et al*., 2018). نانوذرات اکسیدروی با سازوکارهای زیر می‌توانند تحمل به خشکی را در این گیاهان افزایش دهند:

۱- بهبود وضعیت آب گیاه: این نانوذرات می‌توانند با تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها، از اتلاف آب غیرضروری جلوگیری کنند. همچنین، با تحریک رشد و گسترش سامانه ریشه، سطح جذب آب و مواد مغذی از خاک خشک را افزایش می‌دهند (Movahhedy-Dehnavy *et al*., 2009).

۲- حفظ رنگدانه‌های نورساختی: تحت شرایط کم‌آبی، ساخت سبزینه اغلب کاهش می‌یابد. نانوذرات اکسیدروی با تأمین روی به‌عنوان یک کوفاکتور ضروری، ساخت سبزینه و کارایی دستگاه نورساخت را حتی در شرایط تنش حفظ می‌کنند (Ma *et al*., 2017).

۳- تنظیم هورمون‌های گیاهی: نانوذرات اکسیدروی می‌توانند بر سطوح و سیگنالینگ هورمون‌های مرتبط با پاسخ به خشکی، مانند اسید آبسیزیک و اکسین، تأثیر گذاشته و تعادل بین رشد و پاسخ دفاعی گیاه را بهبود بخشند (Faizan *et al*., 2021).

تنش دمایی: دمای بسیار بالا (تنش گرمایی) یا بسیار پایین (تنش سرمایی) می‌تواند به ساختارهای یاخته ای و عملکردهای فیزیولوژیکی گیاهان حساس زینتی آسیب جدی وارد کند. نانوذرات اکسیدروی با سازوکارهای محافظتی چندگانه از جمله افزایش فعالیت سامانه آنتی‌اکسیدانی، کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، القای بیان پروتئین‌های شوک حرارتی و تنظیم تجمع

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

اسمولیت‌ها، از گیاهان در برابر آسیب‌های ناشی از حرارت شدید و سرمازدگی محافظت می‌کنند (Sharma *et al*., 2021; Mohammadi *et al*., 2025).

تنش‌های زیوا

گیاهان زینتی به دلیل شرایط رشد مطلوب (مانند رطوبت نسبی بالا در گلخانه‌ها)، اغلب مستعد حمله عوامل بیماری‌زای قارچی و باکتریایی هستند. نانوذرات اکسیدروی می‌توانند از طریق سازوکارهای مستقیم و غیرمستقیم (القایی)، مقاومت گیاه را در برابر این بیمارگرها افزایش دهند.

مکانیسم مستقیم (اثر ضدمیکروبی)

۱- تولید گونه‌های فعال اکسیژن: نانوذرات می‌توانند بر سطح یاخته بیمارگر تولید ROS القا کنند که به غشاءها، پروتئین‌ها و DNA عامل بیماری‌زا آسیب می‌رساند (Rasmussen *et al*., 2010).

۲- نشت یونی و تخریب غشاء: اتصال فیزیکی نانوذرات به دیواره یاخته ای بیمارگر می‌تواند منجر به ایجاد حفره، نشت محتویات درون‌یاخته ای و در نهایت لیز یاخته ای شود.

۳- تداخل با فرآیندهای درون‌یاخته ای: نفوذ نانوذرات اکسیدروی به درون یاخته‌های بیمارگر ممکن است فرآیندهای حیاتی مانند تنفس، تقسیم یاخته ای و بیان ژن را مختل کند.

مکانیسم غیرمستقیم (القای مقاومت سامانه ای در گیاه):

۱- فعال‌سازی مسیرهای سیگنالینگ دفاعی: کاربرد نانوذرات اکسیدروی می‌تواند منجر به افزایش یا تغییر در مسیرهای پیام رسان هورمون‌های دفاعی مانند اسید سالیسیلیک، اسید جاسمونیک و اتیلن شود (Rai *et al*., 2018; Sharma *et al*., 2021).

۲- تجمع ترکیبات دفاعی: این نانوذرات ساخت و تجمع ترکیبات دفاعی ثانویه مانند فنولیک‌ها، فلاونوئیدها و فیتوآلکسین‌ها و نیز افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با مقاومت مانند پراکسیداز، فنیلآلانین آمونیالیاز و بتا-۱ و۳- گلوکاناز را تحریک می‌کنند. به‌عنوان‌مثال قارچ *Botrytis cinerea* که عامل پوسیدگی خاکستری در بسیاری از گل‌های شاخه‌بریده و گیاهان گلدانی است، می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم توسط نانوذرات اکسیدروی مهار شود: تولید ROS توسط نانوذرات، رشد میسلیوم و جوانه‌زنی کنیدی‌های قارچ را مهار می‌کند. همچنین القای مقاومت سامانه ای در گیاه میزبان، دیواره یاخته ای را تقویت و تجمع ترکیبات ضدقارچی را افزایش می‌دهد (El-Meraghy *et al*., 2019; Sharma *et al*., 2021).

۳- خاصیت ضد اتیلن: برخی گزارش‌ها حاکی از آن است که نانوذرات اکسیدروی ممکن است تولید یا اثر اتیلن را کاهش دهند. از آنجا که اتیلن پیری گل را تسریع می‌کند و گیاه را مستعد ابتلا به بیماری‌هایی مانند *Botrytis* می‌سازد، این ویژگی می‌تواند به طور غیرمستقیم با به تأخیر انداختن پیری، فرصت فعالیت قارچ را محدود کند (El-Meraghy *et al*., 2019).

جنبه‌های سمیت و ارزیابی ریسک نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی

با وجود پتانسیل قابل‌توجه نانوذرات اکسیدروی در بهبود رشد و تحمل تنش، ارزیابی جامع جنبه‌های ایمنی و ریسک‌های احتمالی آن‌ها برای گسترش پایدار این فناوری در صنعت گیاهان زینتی ضروری است. این ارزیابی باید اثرات دوگانه این نانوذرات و پیامدهای بلندمدت محیط زیستی آن‌ها را در نظر گیرد.

پارادوکس غلظت-پاسخ و پدیده پاسخ دوفازی

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

رفتار نانوذرات اکسیدروی در گیاهان اغلب از پارادوکس غلظت-پاسخ و پدیده پاسخ دوفازی تبعیت می‌کند. بر اساس این مفهوم، قرارگیری در معرض غلظت‌های کم یک عامل بالقوه سمی می‌تواند پاسخ‌های سازگاری و محرک رشد را القا کند، درحالی‌که غلظت‌های بالا اثرات بازدارنده و سمی آشکاری دارند (Calabrese & Baldwin, 2003). برای هر گونه گیاهی، غلظت بهینه منحصربه‌فردی از نانوذرات اکسیدروی وجود دارد که حداکثر مزایا (بهبود رشد، افزایش سبزینه، تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی و تولید متابولیت‌های ثانویه) در آن مشاهده می‌شود. پدیده پاسخ دوفازی ناشی از پاسخ دو فازی گیاهان به غلظت‌های مختلف نانوذرات است (Calabrese & Baldwin, 2003). مطالعات مروری نشان داده‌اند که در غلظت‌های پایین (حدود ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، نانوذرات اکسیدروی اثرات مفید بر گیاهان دارند، در حالی که در غلظت‌های بالا (بیش از ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اثرات سمی و بازدارنده ظاهر می‌شوند (Rizwan *et al*., 2017; Iavicoli *et al*., 2021). برای مثال، در گیاهان زینتی چوبی، غلظت‌های ۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اکسیدروی (با اندازه ۳۰ نانومتر) باعث افزایش معنی‌دار محتوای سبزینه شدند، در حالی که غلظت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر اثرات بازدارنده نشان دادند (Scientific Reports, 2025). همچنین در گیاهان زینتی دیگر مانند فیکوس بنجامین[۱]، سمیت وابسته به غلظت نانوذرات اکسیدروی گزارش شده است (SETAC, 2021). این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تعیین غلظت بهینه برای هر گونه گیاهی، پیش‌نیاز کاربرد ایمن و مؤثر نانوذرات اکسیدروی است. (Wang *et al*., 2021)؛ بنابراین، تعیین دقیق پنجره غلظتی بهینه برای هر گونه و رقم، گام نخست در کاربرد ایمن این نانوذرات است.

نشانه‌های سمیت و اثرات فیزیولوژیکی

سمیت ناشی از غلظت‌های بالای نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی با علائم و نشانه‌های واضح فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی همراه است:

- آسیب‌های برگ: بروز کلروز و نکروز در برگ‌ها
- مهار جوانه‌زنی: کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر و تأخیر در ظهور و رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه
- اختلال در رشد ریشه: کاهش طول، حجم و تراکم ریشه، همراه با ناهنجاری‌هایی مانند ضخیم‌شدن غیرطبیعی ریشه‌های اصلی و کاهش گسترش ریشه‌های مویین
- کاهش عمومی رشد: ظهور پدیده کوتولگی، کاهش تعداد شاخه و برگ، و کاهش قابل‌توجه وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و زیرزمینی (Hatami *et al*., 2016; Rizwan *et al*., 2019).

سازوکارهای سمیت در سطح یاخته ای و مولکولی

علائم سمیت در سطح کل گیاه، ریشه در سازوکارهای آسیبی در سطح یاخته ای دارد:

۱- تولید بیش‌ازحد گونه‌های فعال اکسیژن: تجمع نانوذرات اکسیدروی درون یاخته می‌تواند باعث تولید بیش از حد ROSهایی مانند آنیون سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروکسیل شود. این ROS ها با القای پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، تخریب پروتئین‌ها و آسیب به DNA و RNA، اختلال اساسی در عملکرد یاخته ایجاد می‌کنند (Rajput *et al*., 2018).

۱- *Ficus benjamina*

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

۲- آسیب فیزیکی به غشاها و اندامک‌های یاخته ای: نانوذرات یا یون‌های رهاشده از آن‌ها می‌توانند مستقیماً به ساختار غشای پلاسمایی و اندامک‌های حیاتی مانند کلروپلاست و میتوکندری آسیب زده، منجر به نشت یون‌ها و از دست رفتن یکپارچگی و عملکرد این اندامک‌ها شوند (Sharma *et al*., 2021).

۳- اختلال در تقسیم یاخته ای و یکپارچگی ژنتیکی: نانوذرات اکسیدروی می‌توانند به هسته یاخته نفوذ کرده و با ایجاد شکستگی در رشته‌های DNA، القای ناهنجاری‌های کروموزومی و مختل کردن چرخه یاخته ای، تقسیم و رشد طبیعی یاخته را متوقف کنند (Raskar & Laware, 2014).

ارزیابی ریسک محیط زیستی و نیاز به مطالعات آینده

کاربرد گسترده نانوذرات اکسیدروی در کشاورزی مستلزم ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی مرتبط است:

۱- انتقال در زنجیره غذایی: تجمع زیستی[۱] این نانوذرات در بافت‌های گیاهان زینتی می‌تواند مسیری برای ورود آن‌ها به زنجیره غذایی باشد و اثرات بالقوه‌ای بر گرده‌افشانان، پرندگان و در نهایت سلامت انسان داشته باشد.

۲- تأثیر بر سلامت خاک: نانوذرات می‌توانند بر میکروبیوتای مفید خاک (باکتری‌ها و قارچ‌ها) تأثیر منفی گذاشته و فرآیندهای حیاتی مانند چرخه عناصر غذایی و ساختار خاک را مختل کنند.

۳- سمیت برای بی‌مهرگان خاکزی: موجودات مهمی مانند کرم‌های خاکی ممکن است تحت‌تأثیر سمیت این نانوذرات قرار گرفته، شاهد کاهش وزن، تغییر رفتار و افزایش مرگ و میر باشند.

۴- نیاز به مطالعات بلندمدت: ارزیابی اثرات تجمعی، پایداری نانوذرات در خاک و آب‌های زیرزمینی، و سرنوشت نهایی آن‌ها در اکوسیستم، نیازمند مطالعات اکوتوکسیکولوژیک[۲] بلندمدت است (Kang *et al*., 2024).

راهبردهای کاهش سمیت و افزایش ایمنی

برای بهره‌گیری ایمن از مزایای نانوذرات اکسیدروی راهبردهای متعددی جهت کاهش سمیت بالقوه آن‌ها پیشنهاد شده است:

۱- استفاده از پوشش‌های زیست‌سازگار: پوشاندن نانوذرات با موادی مانند سیلیکا، کیتوسان یا پلی‌ساکاریدهای طبیعی می‌تواند رهایش کنترل‌شده و تدریجی یون‌های روی را امکان‌پذیر کرده و تماس مستقیم و آسیب‌رسان نانوذرات با بافت گیاهی را کاهش دهد (Arshad *et al*. 2024).

۲- کاربرد همزمان با محرک‌های دفاعی گیاه: استفاده همزمان از نانوذرات اکسیدروی با تنظیم‌کننده‌های رشد یا آنتی‌اکسیدان‌های خارجی مانند اسید سالیسیلیک، جاسمونات یا اسید آسکوربیک می‌تواند سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را پیش‌فعال کرده و آن را در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از نانوذرات مقاوم‌تر کند (Faizan *et al*., 2021).

۳- به‌کارگیری غلظت‌های پایین و کاربرد هدفمند: استفاده از غلظت‌های بسیار پایین (حتی در حد نانومولار) که اثر پاسخ دوفازی دارند، همراه با کاربرد هدفمند (مثلاً محلول‌پاشی برگی در مرحله خاصی از رشد به جای کاربرد خاکی گسترده) می‌تواند رویارویی کلی و خطر سمیت را به حداقل برساند (Kasraie *et al*., 2020).

۱- Bioaccumulation

۲- Ecotoxicological

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

۴- بهینه‌سازی ویژگی‌های نانوذرات: مهندسی اندازه، شکل و درجه کریستالینیته نانوذرات می‌تواند سمیت آن‌ها را تعدیل کند. به عنوان مثال، نانوذرات کروی معمولاً سمیت یاخته ای کمتری نسبت به نانوذرات با شکل سوزنی یا میله‌ای نشان می‌دهند (Kasraie *et al*., 2020).

نتیجه‌گیری و چشم‌اندازهای آینده

نانوذرات اکسیدروی به‌عنوان یک نانوکود پیشرفته و القاءکننده مقاومت، پتانسیل قابل‌توجهی در ارتقای رشد، کیفیت و تاب‌آوری گیاهان زینتی از خود نشان داده‌اند. مطالعات متعدد تأیید می‌کنند که کاربرد برگی این نانوذرات در غلظت‌های بهینه (عموماً در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ قسمت در میلیون) می‌تواند منجر به بروز مجموعه‌ای از پاسخ‌های مطلوب فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شود. این پاسخ‌ها شامل افزایش محتوای رنگ‌دانه‌های نورساختی و بهبود بازده فرایند نورساخت، تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی، افزایش تولید و تجمع متابولیت‌های ثانویه ارزشمند (مانند فلاونوئیدها و آلکالوئیدها)، کاهش چشم‌گیر شاخص‌های تنش اکسیداتیو و بهبود جذب و تعادل عناصر غذایی به‌ویژه تحت شرایط تنش‌زا نظیر شوری و خشکی است. بااین‌حال، ماهیت دوگانه این نانوذرات در قالب پدیده پاسخ دوفازی به‌وضوح مشاهده می‌شود، به‌طوری که غلظت‌های فراتر از حد بهینه، اثرات سمی و بازدارنده رشد ایجاد می‌کنند. ازاین‌رو، مدیریت دقیق غلظت، روش و زمان کاربرد نقشی کلیدی در بهره‌گیری حداکثری از مزایا و هم‌زمان کاهش ریسک‌های بالقوه دارد. در صورت رعایت این اصول، نانوذرات اکسیدروی می‌توانند گامی به‌سوی جایگزینی نسبی و سازگارتر با محیط‌زیست برای کودهای شیمیایی مرسوم در این صنعت باشند.

علی‌رغم پتانسیل اثبات‌شده، مسیر تجاری‌سازی و کاربرد گسترده نانوذرات اکسیدروی در گیاهان زینتی با چالش‌های مهمی روبروست که رفع آن‌ها مستلزم تمرکز پژوهش‌های آتی بر محورهای زیر است:

۱- استانداردسازی ساخت و پروتکل‌های کاربرد: تنوع در روش‌های ساخت و منابع گیاهی مورد استفاده، منجر به تولید نانوذراتی با اندازه، شکل، بار سطحی و در نتیجه خواص بیولوژیک متفاوت می‌شود. تدوین پروتکل‌های استاندارد و قابل تکرار برای تولید و کاربرد بهینه برای هر گونه گیاهی ضروری است.

۲- کاوش عمیق سازوکارها با رویکرد اومیکس: به‌کارگیری تکنیک‌های ترانسکریپتومیکس[۱]، پروتئومیکس[۲] و متابولومیکس[۳] برای شناسایی مسیرهای سیگنالینگ، شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنی و تغییرات متابولیتی که تحت‌تأثیر نانوذرات اکسیدروی قرار می‌گیرند، می‌تواند درک ما را از سازوکارهای مولکولی عمل این نانوذرات به طور کیفی متحول کند.

۳- ارزیابی جامع ریسک چرخه کامل زندگی: انجام مطالعات اکوتوکسیکولوژیک بلندمدت برای بررسی سرنوشت نانوذرات در محیط، اثرات تجمعی بر سلامت خاک، میکروارگانیسم‌های سودمند، بی‌مهرگان خاکزی و انتقال در زنجیره غذایی یک ضرورت غیرقابل انکار است.

۴- گسترش سامانه‌های هوشمند رهایش هدفمند: طراحی و ساخت حامل‌های نانومقیاس یا پوشش‌های پاسخ‌گو به محرک (مانند pH یا آنزیم) برای رهایش کنترل‌شده و مکانی‌یافته یون‌های روی می‌تواند کارایی مصرف را به حداکثر و نشت محیطی و سمیت را به حداقل برساند.

۱- Transcriptomics ۲- Proteomics ۳- Metabolomics

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

۵- تحلیل‌های جامع اقتصادی و قانون‌گذاری: انجام تحلیل‌های هزینه-فایده دقیق برای تولید و کاربرد این نانوذرات در مقیاس تجاری، همراه با تدوین چارچوب‌های قانونی و دستورالعمل‌های ایمنی ویژه نانوکودها در کشاورزی، بسترساز پذیرش گسترده این فناوری خواهد بود.

نانوذرات اکسیدروی، در صورت به‌کارگیری مسئولانه، مبتنی بر دانش و با رویکرد احتیاطی، می‌توانند به یکی از ابزارهای تحول‌آفرین در مسیر پایدارسازی و افزایش بهره‌وری صنعت گیاهان زینتی تبدیل شوند. پیش‌بینی می‌شود این فناوری نوظهور با افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها، کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی متعارف، کاهش ردپای اکولوژیک تولید و سرانجام تولید محصولی باکیفیت، سلامت و ارزش افزوده بالاتر، منافع اقتصادی و محیط زیستی را هم‌سو کند. سرنوشت این چشم‌انداز روشن وابسته به سرمایه‌گذاری مستمر در پژوهش‌های بین‌رشته‌ای بنیادی و کاربردی، رفع فعالانه چالش‌های فنی و ایمنی، و مهم‌تر از همه، تعامل سازنده بین جامعه علمی، سیاست‌گزاران و بخش خصوصی است. با تحقق این شرایط، آینده‌ای متعالی برای نقش‌آفرینی نانوتکنولوژی در پرورش گیاهان زینتی قابل‌تصور خواهد بود.

منابع

Abdelbaky, A. S., El-Sayed, A. A., El-Naggar, M. E. (2022). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using plant extracts and their biological applications. *Nanomaterials*, *12*(13), 2157. DOI: https://doi.org/10.3390/nano12132157.

Adil, M., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Elshikh, M. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles as potential fertilizer for improving crop production: A review. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 880032.

Adnan, M., Mahmood, F., Zhao, Z., Khaliq, H., Usman, M., Muhammad, T., Ashraf, G. A. (2024). Effect of the foliar application of biogenic-ZnO nanoparticles on physio-chemical analysis of chilli (*Capsicum annum* L.) in a salt stress environment. *Environmental Science: Advances*, *4*(2):306-317. DOI: https://doi.org/10.1039/d4va00167b.

Adraoui, I., Saffaj, N., Mamouni, R., Jadoualia, S. M., Jadoualia, S. M. (2025). Optimization of green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Rosa damascena residue via Box–Behnken design and assessment of their environmental activity. *Letters in Applied NanoBioScience*, *14*(3), 174. DOI: https://doi.org/10.33263/LIANBS143.174.

Agarwal, H., Venkat Kumar, S., Rajeshkumar, S. (2017). A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles – An eco-friendly approach. *Resource-Efficient Technologies*, *3*(4), 406–413.

Ahmad, P., Alyemeni, M. N., Al-Huqail, A. A., Alqahtani, M. A., Wijaya, L., Ashraf, M. (2018). Zinc oxide nanoparticles application alleviates abiotic stress and improves antioxidant enzyme activities in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *130*, 395–403. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.013.

Ahmed, R., Uddin, M. K., Quddus, M. A., Samad, M. Y. A., Hossain, M. A. M., Haque, A. N. A. (2023). Impact of foliar application of zinc and zinc oxide nanoparticles on growth, yield, nutrient uptake and quality of tomato. *Horticulturae*, *9*, 162. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae9020162.

AIPH. (2024). International statistics flowers & plants 2024: Trusted resource for the global horticulture industry. URL: https://aiph.org/latest-news/international-statistics-flowers-plants-2024-trusted-resource-for-the-global-horticulture-industry/

Aldeen, T. S., Mohamed, H. E. A., Maaza, M. (2022). ZnO nanoparticles prepared via a green synthesis approach: Physical properties, photocatalytic and antibacterial activity. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, *160*, 110313.

Al-Hatem, J. Y., Yahya, A., Kallel, B. (2019). Effect of zinc oxide molecules and zinc sulfate on some vegetative growth and flowering in carnation (*Dianthus caryophyllus* L.). Department of Biology, College of Education for Girls, University of Mosul.

Alkuwayti, M., El-Sherif, F., Yap, Y. K., Khattab, S. (2020). Foliar application of *Moringa oleifera* leaves extract altered stress-responsive gene expression and enhanced bioactive compounds composition in *Ocimum basilicum*. *South African Journal of Botany*, *129*, 291–298.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

Almulhim, B. F., Sherif, F. E., Younis, N. S., Safwat, Y., Khattab, S. (2024). Foliar spraying with zinc oxide nanoparticles enhances the anti-osteoporotic efficacy of the fruit extracts of *Silybum marianum* L. by stimulating silybin production. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1421485. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1421485.

Arshad, M., Minkina, T., Sushkova, S., Yu, F., Hassan, S. (2024). Chitosan/ZnO nanocomposites for improving the growth and reducing the toxicity of Zn in *Sorghum bicolor* (L.) Moench plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, *46*, 67. DOI: https://doi.org/10.1007/s11738-024-03693-1.

Borm, P., Kaessig, F. C., Landry, T. D., Moudgil, B., Pauluhn, J., Thomas, K., Wood, S. (2006). Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part V: role of dissolution in biological fate and effects of nanoscale particles. *Toxicological Sciences*, *90*(1), 23-32. DOI: https://doi.org/10.1093/toxsci/kfj135.

Brar, K. K., Magdouli, S., Othmani, A., Ghanei, J., Narisetty, V., Sindhu, R., Binod, P., Pugazhendhi, A., Awasthi, M. K., Pandey, A. (2022). Green route for recycling of low-cost waste resources for the biosynthesis of nanoparticles (NPs) and nanomaterials (NMs)-A review. *Environmental Research*, *207*, 112202.

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, *173*(4), 677–702. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x.

Calabrese, E. J., Baldwin, L. A. (2003). Hormesis: The dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, *43*, 175–197. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223.

Chamani, E., Karimi Gharehgeshagh, H., Moghaddam, M. (2015). The effect of zinc oxide nano particles and humic acid on morphological characters and secondary metabolite production in Lilium ledebourii Bioss. *International Journal of Genetics and Plant Breeding*, *1*(2), 45-51.

Elicky, S. A., Mohammed, M. A., Khater, M. S., Osman, Y. A., Elsherbini, E. (2013). Effect of magnetite nano-fertilizer on growth and yield of *Ocimum basilicum* L. *International Journal of Indigenous Medicinal Plants*, *46*(4), 1286–1293.

El-Meraghy, H. A., Abdelghany, T. M., Al-Rajhi, A. M. (2019). Zinc oxide nanoparticles suppress fungal pathogens and induce systemic resistance in ornamental plants. *Journal of Plant Diseases and Protection*, *126*(2), 145–156. DOI: https://doi.org/10.1007/s41348-018-0209-5.

Faisal, S., Jan, H., Shah, S. A., Shah, S., Khan, A., Akbar, M. T., Rizwan, M., Jan, F., Wajidullah, Akhtar, N., Khattak, A., Syed, S. (2021). Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using aqueous fruit extracts of *Myristica fragrans*: Their characterizations and biological and environmental applications. *ACS Omega*, *6*(14), 9709–9722. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00310.

Faizan, M., Hayat, S., Pichtel, J., Yu, F. (2021). Zinc oxide nanoparticles and their effect on plants: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 5670–5697. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-020-10989-8.

García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., Rodríguez-Salinaset, P., Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, *8*(8), 254. DOI: https://doi.org/10.3390/plants8080254.

Ghasemi Chamtaghi R, Salehi Salmi M, Abdolinejad R, Nour-Bakhsh S H. (2025). Regulation of antioxidant defense and hormonal systems in two cut-flower rose cultivars in response to different levels of zinc nanoparticles and their implications for growth and flower quality. *IJHST*, *26*(4), 343-362.

Hacisalihoglu, G. (2020). Zinc (Zn): The last nutrient in the alphabet and shedding light on Zn efficiency for the future of crop production under suboptimal Zn. *Plants*, *9*(11), 1471. DOI: https://doi.org/10.3390/plants9111471.

Hamk, M., Avcı, A. (2025). One-pot approach biosynthesis of nisin-conjugated zinc oxide nanoparticles using Bacillus subtilis ZBP4 with improved antibacterial activity. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*, 9941–9949. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-024-05780-2.

Hassan, F. A. S., Ali, E. F. (2014). Impact of zinc oxide nanoparticles on growth, flowering and bulb production of Lilium plants. *Scientia Horticulturae*, *172*, 137–144. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.032.

Hatami, M., Hadian, J., Ghorbanpour, M. (2016). Mechanisms underlying toxicity and stimulatory role of zinc oxide nanoparticles in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 448–462. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-015-5351-4.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

Honda, M., Goto, T., Owashi, T., Rozhin, A. G., Yamaguchi, S., Ito, T., Kulinich, S. A. (2016). ZnO nanorods prepared via ablation of Zn with millisecond laser in liquid media. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *18*(34), 23628–23637. DOI: https://doi.org/10.1039/C6CP04556A.

Husain, W. M., et al. (2019). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from pomegranate aqueous peel extract. *The Iraqi Journal of Veterinary Medicine*, *43*(2), 6-14.

Iqbal, M. N., Rasheed, R., Ashraf, M. Y., Ashraf, M. A., Hussain, I. (2018). Exogenously applied zinc mitigates salt-induced oxidative damage in wheat (*Triticum aestivum* L.) by enhancing antioxidant activities. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(24), 23883-23896.

Kang, Y., Park, J., Lee, S. (2024). Transport, toxicity, and ecological risk of zinc oxide nanoparticles in plants: A systematic review. *Environmental Science: Nano*, *11*(3), 892–912. DOI: https://doi.org/10.1039/D3EN00845A.

Kashyap, P. L., Xiang, X., Heiden, P. (2015). Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. *International Journal of Biological Macromolecules*, *77*, 36–51.

Kasraie, P., Ghasemi, S., Moghaddam, M. (2020). Effects of zinc oxide nanoparticles on growth and physiological traits of Gerbera jamesonii. *Journal of Plant Nutrition*, *43*(17), 2602–2614. DOI: https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1798993.

Khan, I., Saeed, K., Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(7), 908-931.

Khattab, S., Alkuwayti, M. A., Yap, Y. K., Meligy, A. M., Bani Ismail, M., El Sherif, F. (2023). Foliar spraying of ZnO nanoparticles on *Curcuma longa* had increased growth, yield, expression of curcuminoid synthesis genes, and curcuminoid accumulation. *Horticulturae*, *9*(3), 355. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae9030355.

Kolenčík, M., Ernst, D., Komár, M., Urík, M., Šebesta, M., Dobročka, E., Černý, I., Illa, R., Kanike, R., Qian, Y., Feng, H., Orlová, D., Kratošová, G. (2019). Effect of foliar spray application of zinc oxide nanoparticles on quantitative, nutritional, and physiological parameters of foxtail millet (*Setaria italica* L.) under field conditions. *Nanomaterials*, *9*, 1559. DOI: https://doi.org/10.3390/nano9111559.

Kolodziejczak-Radzimska, A., Jesionowski, T. (2014). Zinc Oxide—From Synthesis to Application: A Review. *Materials*, *7*(4), 2833–2881. DOI: https://doi.org/10.3390/ma7042833.

Latef, A. A. H. A., Alhmad, M. F. A., Abdelfattah, K. E. (2017). Mitigation of salt stress by zinc oxide nanoparticles in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 16620–16630. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-017-9285-6.

Ma, C., Liu, H., Guo, H., Musante, C., Coskun, S. H., Nelson, B. C., Xing, B. (2015). Defense mechanisms and nutrient displacement in *Arabidopsis thaliana* upon exposure to CeO_2 and In_2O_3 nanoparticles. *Environmental Science: Nano*, *3*(6), 1369–1379.

Ma, D., Sun, D., Wang, C., Ding, H., Qin, H., Hou, J., Huang, X., Xie, Y., Guo, T. (2017). Physiological Responses and Yield of Wheat Plants in Zinc-Mediated Alleviation of Drought Stress. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 860.

Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press. 649 Pages.

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, *7*(9), 405-410.

Moghadam, H. R. T., Zahedi, H., Ashkiani, A. (2013). Effect of zinc foliar application on auxin and gibberellin hormones and catalase and superoxide dismutase enzyme activity of corn (*Zea mays* L) under water stress. *Maydica*, *58*(3-4), 218-223.

Movahhedy-Dehnavy, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mokhtassi-Bidgoli, A. (2009). Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Industrial Crops and Products*, *30*(1), 82-92.

Nadeem, F., Azhar, M., Anwar-ul-Haq, M., Sabir, M., Sanreen, T., Tufail, A., Juan, W. (2020). Zinc application mitigates the adverse effects of salt stress on wheat by modulating photosynthetic efficiency, ionic homeostasis, and biochemical activities. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*(4), 2059-2072.

Nair, S. S., Mathew, J. (2022). ZnO nanostructured materials and their potential applications: Progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Advances*, *4*(8), 1868–1925. DOI: https://doi.org/10.1039/d1na00880c.

Pejam, F., Ardebili, Z. O., Ladan-Moghadam, A., Danaee, E. (2021). Zinc oxide nanoparticles mediated substantial physiological and molecular changes in tomato. *PLoS ONE*, *16*(3), e0248778. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248778.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

Pérez Velasco, E. A., Valdez-Aguilar, L. A., Betancourt Galindo, R., Baylon Palomino, A., & Puente Urbina, B. A. (2025). Morphology and coating of ZnO nanoparticles affect growth and gas exchange parameters of bell pepper seedlings. *Agronomy*, *15*(7), 1545. https://doi.org/10.3390/agronomy15071545

Qu, R., He, Z., Wang, L., Zhang, Y. (2024). Molecular mechanism of dissolvable metal nanoparticles-enhanced CO_2 fixation by algae: Metal-chlorophyll synthesis. *Environmental Pollution*, *349*, 123987. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123987.

Rai, M., Deshmukh, S. D., Ingle, A. P., Gade, A. K. (2018). Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *102*(5), 1931–1949.

Rajput, V. D., Minkina, T., Ahmed, B. (2018). Interaction of zinc oxide nanoparticles with plants: Uptake, accumulation, and physiological effects. *Environmental Pollution*, *239*, 829–841. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.061.

Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, *7*(12), 1584-1594.

Raskar, S. V., Laware, S. L. (2014). Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *3*(9), 467-473.

Rasmussen, J. W., Martinez, E., Louka, P., Wingett, D. G. (2010). Zinc oxide nanoparticles for selective destruction of tumor cells and potential for drug delivery applications. *Expert Opinion on Drug Delivery*, *7*(9), 1063-1077.

Rikabad, M. M., Pourakbar, L., Moghaddam, S. S., Popovic-Djordjevic, J. (2019). Agrobiological, chemical and antioxidant properties of saffron (*Crocus sativus* L.) exposed to TiO_2 nanoparticles and ultraviolet-B stress. *Industrial Crops and Products*, *137*, 137–143.

Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., Zia ur Rehman, M., Waris, A. A. (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, *214*, 269–277.

Rudani, K., Vishal, P., Kalavati, P. (2018). The importance of zinc in plant growth-A review. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, *5*(5), 38–48.

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–Critical review. *Nanotoxicology*, *10*(3), 257–278.

Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M. G. H., Saradhi, P. P., Khanna, P. K., Arora, S. (2021). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of plants. *Chemosphere*, *264*, 128502. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128502.

Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H. (2014). Role of nano-SiO_2 and nano-ZnO in improving growth and photosynthetic efficiency in plants under stress. *Photosynthetica*, *52*(1), 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/s11099-013-0050-6.

Singh, P., Kaur, N., Khunger, A., Kaur, G., Kumar, S., Kaushik, A., Chaudhary, G. R. (2022). Green-monodispersed Pd-nanoparticles for improved mitigation of pathogens and environmental pollutant. *Materials Today Communications*, *30*, 103106.

Sisakht, S. N. E., KordLaghari, K. P., Keshavarz, K. (2015). Influence of Zn and ferrous sulfate on yield and yield component of *Phaseolus vulgaris*. *International Journal of Biosciences*, *6*(2), 123-129.

Sun, L., Song, F., Guo, J., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Li, X. (2020). Transcriptomic and proteomic analyses reveal new insight into chlorophyll synthesis and chloroplast structure of maize leaves under zinc deficiency stress. *Journal of Proteomics*, *199*, 123–134. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jprot.2019.02.010.

Sun, L., Wang, Y., Wang, R., Zhang, P., Ju, Q., Xu, J. (2020). Physiological, transcriptomic and metabolomic analyses Reveal zinc oxide nanoparticles modulate plant growth in tomato. *Environmental Science: Nano*, *7*(11), 3587-3604.

Tombuloglu, H., Slimani, Y., Tombuloglu, G., Almessiere, M., Baykal, A. (2019). Uptake and translocation of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles and its impact on the growth of Saintpaulia ionantha. *Plant Physiology and Biochemistry*, *139*, 643–654.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

Umar, W., Czinkota, I., Gulyas, M., Ayub, M. A., Sebok, A., Nadeem, M. Y., Zulfiqar, M. (2023). Effect of soil texture, nanoparticle size, and incubation period on the dissolution of ZnO nanoparticles. *Pollutants*, *3*(2), 258–272. DOI: https://doi.org/10.3390/pollutants3020019.

Wang, Q., Xu, S., Zhong, L., Zhao, X., Wang, L. (2021). Effects of zinc oxide nanoparticles on growth, development, and flavonoid synthesis in *Ginkgo biloba*. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(21), 15775.

Wang, S. J., Liu, Q., Song, H. X. (2011). Effects of nano-preparation on growth and nitrogen fertilizer use efficiency on cabbage. *Journal of Chinese Agricultural Science Bulletin*, *27*(4), 264-267.

Wang, X. P., Li, Q. Q., Pei, Z. M., Wang, S. C. (2018). Effects of zinc oxide nanoparticles on the growth, photosynthetic traits, and antioxidative enzymes in tomato plants. *Biologia Plantarum*, *62*(4), 801–808.

Wojnarowicz, J., Chudoba, T., Gierlotka, S., Lojkowski, W. (2018). Size control mechanism of ZnO nanoparticles obtained in microwave solvothermal synthesis. *Nanotechnology*, *29*(6), 065601.

Yusefi-Tanha, E., Fallah, S., Rostamnejadi, A., Pokhrel, L. R. (2020). Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as a novel nanofertilizer: Influence on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (Glycine max cv. Kowsar). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(45), 12514–12525. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04836.

Zare, M., Afshar, R. K., Khorasaninejad, S. (2022). Growth, flowering and physiological response of Trachyspermum ammi L. to zinc oxide micro- and nanoparticles. *Russian Journal of Plant Physiology*, *69*, 14. DOI: https://doi.org/10.1134/S1021443722010125.

Zhang, H., Goh, N. S., Wang, J. W., Pinals, R. L., González-Grandío, E., Demirer, G. S., Butrus, S., Park, S. J., Landry, M. P. (2024). Nanoparticle cellular internalization is not required for RNA delivery to mature plant leaves. *Nature Nanotechnology*, *19*, 245–254. DOI: https://doi.org/10.1038/s41565-023-01547-6.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]

Flower and Ornamental Plants (2026), 11(1): 125-148
Review article

Zinc oxide nanoparticles: Role in enhancing growth, quality and environmental stress tolerance in ornamental plants

Mohamadreza Salehi Salmi* and Mozhgan Zangeneh

Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resource University of Khuzestan, Mollasani

✉ salehi@asnrukh.ac.ir; mrsalehisalmi@gmail.com

Received: 2026/01/20, Revised: 2026/09/13, Accepted: 2026/09/14

Abstract

Ornamental plants occupy a distinctive position in modern horticultural systems due to their high economic value, significant physiological sensitivity, and fundamental role in enhancing human quality of life. However, commercial production of these plants faces substantial challenges, primarily due to heavy reliance on chemical inputs, high water consumption, and pronounced susceptibility to biotic and abiotic stresses. Zinc, an essential micronutrient, plays a pivotal role in numerous plant physiological processes, including enzyme activation, growth hormone synthesis, maintenance of cellular membrane integrity, and regulation of the antioxidant defense system. Nevertheless, the low efficiency and adverse environmental implications of conventional zinc fertilizers in calcareous and greenhouse soils underscore the urgent need for innovative nutritional strategies. This review aims to provide a comprehensive analysis of the role of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) in enhancing growth, quality, physiological processes, and stress resilience in ornamental plants, while also examining the associated challenges and future prospects of this technology. This article systematically reviewed and analyzed published studies on the synthesis, uptake, translocation, and biological effects of ZnO NPs in ornamental plants. The article investigated various synthesis methods (physical, chemical, and biological), uptake pathways (root and foliar), and the underlying physiological and biochemical mechanisms of action of these nanoparticles. Characteristics such as nanoscale size, high specific surface area, effective penetration, and sustained release of zinc ions make ZnO NPs a promising alternative. Research findings indicate that applying ZnO NPs at optimal concentrations can significantly improve vegetative growth, increase chlorophyll content, enhance aesthetic and flowering quality, strengthen antioxidant systems, and increase ornamental plants' tolerance to abiotic stresses such as salinity, drought, and temperature extremes. These effects are primarily attributed to increased zinc bioavailability, regulation of pigment metabolism, reduction in reactive oxygen species (ROS) accumulation, and modulation of hormonal pathways. However, ornamental plants' response to ZnO NPs depends on concentration, application method, nanoparticle physicochemical properties, and plant species. Excessive application may induce phytotoxicity, bioaccumulation, and metabolic disorders. Therefore, while ZnO NPs hold considerable potential as a novel and efficient zinc source for the sustainable production of ornamental plants, determining optimal concentrations, elucidating the molecular mechanisms of action, and evaluating long-term environmental impacts are essential prerequisites for the safe and widespread commercial adoption of this technology.

Keywords: Biotic stress, Growth regulators, Nano-fertilizer, Sustainable horticulture.

[Downloaded from flowerjournal.ir on 2026-11-13]