

برخی اثرهای مصرف زیاد نانو مواد در تغذیه گیاهان

محمد رضا مقصودی^۱ و نصرت‌اله نجفی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. mr.maqsoodi@tabrizu.ac.ir

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. n-najafi@tabrizu.ac.ir

دریافت: آذر ۱۳۹۶ و پذیرش: تیر ۱۳۹۷

چکیده

ورود نانوفناوری به عرصه‌های مختلف علمی و صنعتی، دستاوردهای نوینی را ایجاد کرده است. این فناوری با کوچک کردن اندازه مواد موجب بروز ویژگی‌هایی از آنها می‌شود که قبلاً وجود نداشت یا محسوس نبود. هرچند نانوفناوری موجب بهبود برخی ویژگی‌های کودها شده است و بررسی‌های متعددی اثرهای مثبت آنها را در گیاهان مختلف گزارش کرده‌اند اما باید متذکر شد که اکثر این بررسی‌ها آزمایشگاهی بوده و مدت رشد گیاهان بسیار کوتاه در نظر گرفته شده و در بسیاری از موارد نیز تنها به جوانه‌زنی بذرها اکتفا شده است. به علاوه، گزارش‌های زیادی نیز وجود دارند که پی‌آمدهای مصرف نانومواد را در گیاهان نشان می‌دهند. برای مثال، نانوذرات عناصری همچون آلومینیم، آهن، روی، تیتانیوم، نیکل و نقره، نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و نانو لوله‌های کربنی در گیاهان پیاز، ماش، چچم، برنج، لوبیا، ذرت، خیار، سورگوم و گوجه-فرنگی موجب کاهش رشد شده است. بنابراین، لازم است قبل از استفاده از نانومواد به‌عنوان کود، پژوهش‌های کاملی از تعامل آنها با گیاهان و سرنوشت نهایی این مواد در گیاه و زنجیره غذایی انجام شود. از طرف دیگر، چون گیاهان در ابتدای زنجیره غذایی قرار دارند ورود و تجمع نانومواد به داخل آنها، می‌تواند موجب ورود نانومواد به زنجیره غذایی شده و نانومواد را به سطوح بالاتر این زنجیره و به‌ویژه انسان‌ها انتقال دهد. این مقاله به بررسی اثر غلظت‌های زیاد نانومواد بر رشد برخی گیاهان، آسیب‌های ناشی از آنها و نیز توان جذب و انباشتگی نانوذرات توسط گیاهان می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه گیاه، زنجیره غذایی، نانوفناوری، نانوکود

مقدمه

نانوفناوری شامل طیف وسیعی از فناوری‌های مربوط به ساخت مواد در مقیاس طولی یک تا ۱۰۰ نانومتر است که می‌تواند به تغییرات چشمگیر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد منجر شود. نانوفناوری در کشاورزی به‌عنوان یکی از روش‌های نویدبخش برای افزایش قابل توجه تولید محصول و تغذیه جمعیت به‌سرعت در حال رشد جهان در نظر گرفته شده است. با توجه به زمین‌های قابل کشت محدود و کمبود منابع آب در جهان، افزایش قابل توجه مصرف کودهای کشاورزی یکی از روش‌های تأمین غذای مورد نیاز مردم جهان می‌باشد. کارایی کم عناصر غذایی، کوددهی نامتعادل و پاسخ کم به کود، نهایتاً منجر به رکود در تولید محصولات کشاورزی در کشورهای شده است که با کمبود مواد آلی روبه‌رو هستند. برای حفظ سطح فعلی تولید محصولات کشاورزی، کاربرد کودهای متنوع مرسوم به مقدار زیاد و برای مدت طولانی در بخش کشاورزی باعث ایجاد مسائل جدی زیست محیطی در سطح جهانی شده است. نانوکودها می‌توانند یک نوآوری بزرگ برای کشاورزی باشند. اثرهای مثبت این نانوکودها در بررسی‌های زیادی گزارش شده است. برای مثال نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید روی، اکسید تیتانیم، مگنتیت و نانوذرات فلزی منگنز موجب بهبود رشد گیاهانی همچون گوجه-فرنگی، تنباکو، ارزن، لوبیا، نخود، سورگوم، اسفناج و گندم شده است (سروین و همکاران، ۲۰۱۵). این تحقیقات در مراحل ابتدایی بوده و هنوز پیشنهادی برای مصرف کلان از طرف نویسندگان نشده است. همچنین اقتصادی بودن این نانوکودها و برتری آنها نسبت به کودهای مرسوم مورد سؤال است. آمتا و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند در رابطه با مصرف نانومواد در محیط زیست و از جمله خاک قانون مشخصی تدوین نشده است و هنوز در رابطه با مقدار و نحوه مصرف آنها برای تغذیه گیاهان اظهار نظر قطعی وجود ندارد و تمام مطالعات در مرحله بررسی‌های اولیه هستند زیرا تغذیه

گیاهان با نانومواد نه تنها بر محیط زیست و جانداران مرتبط با آن اثر خواهد داشت بلکه خطرات احتمالی ناشی از ورود آنها به چرخه غذایی نیز یکی از نگرانی‌های اصلی مصرف اینگونه مواد در بخش کشاورزی است.

علل نگرانی در رابطه با ورود نانوفناوری به بخش کودها

درحالی‌که نانوفناوری ممکن است به‌عنوان یک فرصت برای بهبود کودها باشد، همچنین ممکن است به یک منبع نگرانی نیز تبدیل شود. افزایش سطح در نانومواد می‌تواند به افزایش واکنش‌پذیری و سریع‌تر شدن سینتیک انحلال منجر شود (چاهال و همکاران، ۲۰۱۲). اگر نانوکودها به‌راحتی حل شده و آبشویی یافته و به محیط زیست وارد شوند، ممکن است مشکلاتی ایجاد نمایند. استفاده از نانومواد در کودها منجر به ورود عمده این مواد به محیط زیست شده و می‌تواند به‌طور چشمگیری انسان و محیط زیست را تحت تأثیر قرار دهد. گیاهان، به‌ویژه محصولات کشاورزی، می‌توانند به‌عنوان یک مسیر بالقوه تجمع نانوذرات در زنجیره غذایی باشند؛ بنابراین، ضروری است که خطرهای فایده‌های نانوفناوری در کودها ارزیابی شده و نقد شود (ماستروناردی و همکاران، ۲۰۱۵). نانوفناوری یکی از تکنولوژی‌هایی است که در دنیای امروزی به‌سرعت در حال پیشرفت بوده و انتظار می‌رود در آینده نزدیک به یک صنعت بزرگ تبدیل شود (گائو و همکاران، ۲۰۱۳؛ گاردیا-تورسیدی و همکاران، ۲۰۱۴). همزمان با این رشد، نگرانی‌ها در مورد سرنوشت و رفتار نانوذرات در محیط زیست نیز افزایش یافته است (باکشی و همکاران، ۲۰۱۴). به‌علت ادامه تولید نانوذرات طی دهه اخیر، نانوذرات به‌طور اجتناب‌ناپذیری در محیط زیست رها شده‌اند (گاردیا-تورسیدی و همکاران، ۲۰۱۴).

لزوم بررسی همه‌جانبه نانومواد و نانوکودها قبل از مصرف

اگر چه نانوفناوری برای ایجاد تغییرات اساسی در بسیاری از جنبه‌های زندگی انسان توان زیادی دارد، اما

نانوفناوری در کشاورزی بسیار مهم است زیرا به‌طور مستقیم انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (بوومیستر و همکاران، ۲۰۰۹). نانوکودها، نانوذرات را قادر به ورود در زنجیره مواد غذایی کرده‌اند که به آنها اجازه می‌دهد خود را در هر جانداري که با زنجیره غذایی در رابطه است، توزیع کنند. به دلیل گسترش بیش از پیش نانوفناوری، سمیت و اثرهای محیطی این مواد جدید باید مشخص شود. در مکان‌هایی که نانومواد مانند نانوکودها عمداً مورد استفاده قرار می‌گیرند، درک سرنوشت و تأثیر آنها بیش‌تر اهمیت می‌یابد. چون محصولات کشاورزی به‌عنوان یک مسیر بالقوه برای انتقال نانوذرات و یک مسیر برای تجمع زیستی در زنجیره غذایی عمل می‌کنند، انجام بررسی‌ها در مورد اثر نانوذرات بر گیاهان ضروری است. اطلاعات در مورد اینکه آیا نانوذرات در گیاهان و در نهایت در جانداران سطح بالاتر از طریق زنجیره غذایی تجمع خواهند کرد یا نه محدود است (ژو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ماستروناردی و همکاران، ۲۰۱۵). بازرگان و همکاران (۱۳۹۱) بیان داشتند که قانون جامع کود، ساختار تشکیلاتی متولی و پاسخگو در رابطه با کود و استانداردهای ملی کیفیت انواع کودها حلقه‌های گم شده مدیریت امور کود در ایران هستند.

گزارش تأثیر مثبت و منفی نانوذرات بر گیاهان متداول است و پژوهشگران بررسی‌هایی در مورد تأثیر نانوذرات بر جوانه‌زنی گیاه و رشد آن با هدف ترویج نانوذرات برای استفاده در کاربردهای کشاورزی انجام داده‌اند (خوت و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، بررسی‌ها تأیید کرده‌اند که نانوذرات می‌توانند در گیاهان سمیت ایجاد کنند و تأثیر منفی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه داشته باشند اما در عین حال ویژگی‌های انحصاری نانوذرات می‌توانند موجب بهبود جوانه‌زنی بذر و عملکرد محصول شوند (خوت و همکاران، ۲۰۱۲).

مسمومیت گیاهان با جذب نانومواد

بررسی‌های بسیار زیادی در مورد نانوذرات و

مزایای آن ممکن است هزینه‌هایی تحمیل کند. یکی از سؤالات مهم قبل از پذیرش نانوفناوری که جهان با آن روبه‌رو شده این است که آیا خطرهای ناشناخته نانوذرات شامل اثر بر محیط زیست و سلامتی بشر بر فایده‌های بالقوه آنها غلبه دارد. خطرهای مرتبط با استفاده از نانوذرات هنوز به‌طور کامل قبل از کاربرد این تکنولوژی مورد ارزیابی قرار نگرفته است (سولانکی و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی کامل در مورد اثرهای بالقوه بر سلامت، محیط زیست و دفع ایمن نانوذرات می‌تواند به بهبود طراحی و برنامه‌های کاربردی نانوفناوری منجر شود (منگ و همکاران، ۲۰۰۹). اگر چه تا کنون هیچ بیماری انسانی مستقیماً به نانوذرات مرتبط نشده است اما بررسی‌های آزمایشگاهی اولیه نشان می‌دهد که نانوذرات می‌توانند موجب پاسخ‌های بیولوژیکی مضر شوند که می‌تواند پیامد سمیت آنها باشد (آندر نل و همکاران، ۲۰۰۶). نانوذرات که قسمت بسیار ریز ذرات هستند، می‌توانند از طریق دهان، تنفس و یا پوست وارد بدن انسان یا حیوانات شوند. اندازه کوچک نانوذرات اجازه می‌دهد تا آنها به راحتی وارد بافت‌ها، سلول‌ها و اندامک‌ها شود و با ساختارهای بیومولکولی کاربردی (به‌عنوان مثال، DNA، ریبوزوم) تعامل دارند، زیرا اندازه فیزیکی واقعی یک نانو ساختار تولید شده شبیه به بسیاری از مولکول‌ها (به عنوان مثال، آنتی‌بادی‌ها، پروتئین‌ها) و ساختارهای زیستی (مثل ویروس‌ها) است. یکی از نتایج این است که نانوذرات به سیستم‌های بیولوژیکی حیاتی وارد شده و می‌توانند موجب آسیب دیدن آنها شوند و سپس به سلامتی انسان نیز آسیب رسانند (ایکسا و همکاران، ۲۰۰۹)؛ هرچند سازوکارهای تعامل بین نانوذرات و سیستم‌های زیستی روشن نیست (بارینا و همکاران، ۲۰۰۹؛ خوت و همکاران، ۲۰۱۲). ویژگی‌های مهم نانوذرات از جمله سطح ویژه بالا و فعالیت بسیار زیاد آن سؤالات نگران کننده زیادی در مورد تأثیر مضر آن بر سلامتی محیط زیست و انسان ایجاد کرده است (آندر نل و همکاران، ۲۰۰۶؛ ماینارد و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده از

شدن بیش‌تر در خاک نسبت داده شود و ۳- آگار و خاک سازوکارهای متفاوتی برای جذب یون نقره محلول و نانوذرات فلزی نقره دارند. نتایج این مطالعه اهمیت تأثیر بستر کشت در سمیت نانوذرات بر گیاهان را نشان داد، بنابراین، استفاده از نانوذرات در خاک واقعی باید مورد مطالعه قرار گیرد که می‌تواند برای درک سمیت نانوذرات در خاک مهم باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۲). در یک مطالعه هیدروپونیک تأثیر نانوذرات TiO_2 و فلزی نقره بر گوجه‌فرنگی توسط سانگ و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه شد. گیاهان تیمار شده با نانوذرات فلزی نقره کاهش قابل توجهی در رشد ریشه حتی در کم‌ترین غلظت (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) نشان دادند.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمار با هر دو نانوذره تغییر کرد که نشان می‌دهد نانوذرات تنش فیزیولوژیکی ایجاد می‌کنند. تعیین مسمومیت گیاه با نانوذرات فلزی و اکسید آنها اولاً به علت پتانسیل انحلال یون‌های فلزی آزاد شده از نانوذرات و ثانیاً پتانسیل سمیت و جذب یون‌های فلزی پیچیده است (ما و همکاران، ۲۰۱۰). این پیچیدگی هنگام مطالعه بر روی مسمومیت گیاه چمن یارندی^۱ با نانوذرات ZnO توسط لین و ایکسینگ (۲۰۰۸)، روشن شد؛ آنان نشان دادند که مسمومیت گیاه نمی‌تواند به تنهایی و با انحلال نانوذرات ZnO توضیح داده شود. لین و ایکسینگ (۲۰۰۷) پژوهشی در مورد مسمومیت گیاه^۲ با پنج نوع نانوذره (نانولوله‌های کربنی چند جداره، آلومینیم فلزی، آلومینا (اکسید آلومینیم)، روی فلزی و اکسید روی) از نظر جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه چچم و ذرت انجام دادند. رشد طولی ریشه تمام گیاهان هنگامی که غلظت نانوذرات فلزی روی و نانوذرات اکسید روی در سوسپانسیون ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود، تحت تأثیر قرار گرفت. کوماری و همکاران (۲۰۱۱) مسمومیت گیاه با نانوذرات ZnO را در سطح تشکیل و رشد سلول و با تجزیه و تحلیل اثرهای ژنتیکی

گیاهان وجود دارد که هشدار از تأثیرات مضر فعالیت این مواد را هنگامی که به اندامی خاص در یک جاندار (آکرمن و همکاران، ۲۰۰۲) یا به اندامک‌های خاصی در داخل یک سلول (هاشینو و همکاران، ۲۰۰۴) می‌رسند و یا به پروتئین‌ها یا مولکول‌های RNA در سلول متصل می‌شوند (سوزوکی و همکاران، ۲۰۰۷)، ارائه می‌دهند. تأثیر منفی برخی نانومواد در جدول ۱ آمده است. به علت نسبت سطح به حجم بالا، نانوذرات به شدت فعال و کاتالیزی بوده و ممکن است از غشای سلولی عبور کنند (اینگ، ۲۰۰۱). با این حال اثر متقابل نانوذرات با این سیستم‌ها به خوبی مشخص نیست. اولین گزارش اثرهای منفی نانوذرات فلزی آلومینیم بر چندین گیاه (ذرت، خیار، سورگوم، کلم و هویج) با غلظت نسبتاً کم (۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) توسط یانگ و واتس (۲۰۰۵) ارائه شده است. با این حال Al^{3+} محلول نیز می‌تواند به عنوان عنصر سمی برای ریشه عمل کند و می‌تواند جلوی رشد ریشه را بگیرد (ژوو و همکاران، ۲۰۱۴). در آزمایش‌های سمیت نانوذرات باید دقت کرد که تأثیر ممکن است در رابطه با قابلیت انحلال آسان بوده و سمیت ناشی از افزایش یون‌های حاصل از انحلال نانوذرات باشد. میرزاجانی و همکاران (۲۰۱۳) تأثیرات نانوذرات فلزی نقره در برنج را ارزیابی کردند. گیاهان در معرض غلظت‌های پایین نانوذرات فلزی نقره رشد بیش‌تری از گیاهان شاهد داشتند ولی در غلظت‌های بالای نانوذرات فلزی نقره، رشد کمی به علت تغییر در ریخت‌شناسی سلول و ویژگی‌های ساختاری آن مشاهده شد. لی و همکاران (۲۰۱۲) مسمومیت گیاه را بر اثر نانوذرات فلزی نقره در بستر رشد آگار یا در خاک مصنوعی مطالعه کردند. در کشت خاکی گیاه لوبیا تحت تأثیر غلظت‌های مورد آزمایش قرار نگرفت و سورگوم دو رنگ کاهش رشد کمی نشان داد که می‌توان آن را با سه دلیل اولیه زیر که توسط نویسندگان ارائه شده است، توضیح داد: ۱- سمیت مشاهده شده در کشت خاکی می‌تواند مربوط به سمیت نانوذرات باشد، ۲- انحلال کم‌تر نانوذرات می‌تواند به کاهش سطح و توده‌ای

^۱ *Lolium perenne*

^۲ Phytotoxicity

غلظت‌های بالا سمیت داشت و به علت خاصیت ضد میکروبی آنها رشد قابل توجه ریشه‌ها در غلظت‌های کم‌تر مشاهده شد. پیشنهاد شد که چون روتیل خاصیت چربی دوستی^۷ دارد، نانوذرات TiO_2 می‌توانند توده‌های بزرگی در محیط آبی ایجاد کند که موجب کاهش تأثیر بر جانداران و کاهش سمیت در مقایسه با آناتاز می‌شود. اخیراً تأثیرات نانوذرات اکسید تیتانیم بر جوانه‌های ذرت در شرایط هیدروپونیک مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد تجمع نانوذرات در سطح ریشه موجب انسداد آرام منافذ دیواره سلولی و کاهش رشد برگ‌ها، انتقال آب و تعرق شد (آسلی و نئومان ۲۰۰۹). هو و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر نانوذرات اکسید آهن ($\gamma-Fe_2O_3$) و یون‌های آهن (Fe^{3+}) را بر رشد گیاهان پومیلو یا دارابی^۸ بررسی و نشان دادند که غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اکسید آهن سبب افزایش قابل توجه غلظت کلروفیل (۲۳/۸ درصد) و فعالیت آنزیم دهیدروژناز (۲۳/۲ درصد) نسبت به تیمار شاهد داشت اما در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تولید مالون‌دی‌آلدهید^۹ را افزایش داد که موجب کاهش غلظت کلروفیل و فعالیت آنزیم دهیدروژناز شد. آنان دلیل این اثرهای منفی نانوذرات اکسید آهن را انبوهه شده و تجمع آنها در سطح ریشه اعلام و بیان کردند که تجمع نانوذرات در سطح ریشه از انتقال آب به برگ‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین آسیب‌های اکسایشی که بر اثر حضور نانوذرات در سلول ایجاد می‌شود (شکل ۳)، می‌تواند موجب تخریب کلروپلاست و کاهش غلظت کلروفیل در برگ‌ها شود.

نانوذرات ZnO با استفاده از سلول‌های ریشه پیاز^۱ بررسی کردند. نتایج نشان داد که قرار گرفتن ریشه در معرض نانوذرات ZnO باعث سلول‌سم^۲ و ژن‌سم^۳ شد (شکل ۱). بررسی ریخت‌شناسی کروموزم نشان داد بین افزایش شمار کروموزم‌های معیوب و افزایش غلظت نانوذرات رابطه‌ای مستقیم وجود داشت. رایج‌ترین نوع اختلال، کروموزوم-های چسبیده بود (پی و منگ ۲۰۰۳) که اغلب در مرحله آنافاز-تروفاز مشاهده شد. یک نتیجه مهم این بود که مسمومیت گیاه در سطح مولکولی و هسته سلول مشاهده شد، دلیل وقوع چسبندگی کروموزوم‌ها ممکن است به علت تخریب و یا پلی‌مرزدایی^۴ کروموزومی DNA باشد. با مقایسه سمیت نانوذرات ZnO و ZnO معمولی، آنان نتیجه گرفتند که سمیت نانوذرات ZnO بیش‌تر از ZnO معمولی بود. آنان نشان دادند که سمیت نانوذرات ZnO تنها به دلیل انحلال یون‌های روی نبود.

نویسندگان همچنین این موضوع را بر اساس فعال شدن گونه‌های فعال اکسیژن توضیح دادند. با تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن و رهاسازی آنها، اسیدهای چرب به پراکسید لیپید سمی تبدیل می‌شوند که موجب پارگی غشای بیولوژیکی می‌شود (گراتائو و همکاران، ۲۰۰۵). لین و ایکسینگ (۲۰۰۸) کاهش قابل توجهی در زیست-توده، کوچک شدن نوک ریشه، ریزش اپیدرم ریشه و سلول‌های پوستی گیاه چچم را در حضور نانوذرات اکسید روی نشان داد (شکل ۲). کلیمنت و همکاران (۲۰۱۳) نیز مسمومیت گیاه با نانوذرات اکسید تیتانیم را در دافنیا^۵، جلبک، روتیفرها^۶ و گیاه بذرک ارزیابی و مشاهده کردند که چون تیتانیم در ساختارهای متفاوت شیمیایی کریستال آناتاز یا روتیل وجود دارد، پاسخ‌های مربوط به سمیت آن نیز بستگی به نوع ساختار تیتانیم دارد. نتایج نشان داد که نانوذرات TiO_2 در کریستال آناتاز در تمام آزمون‌ها و در

^۱ *Allium cepa*

^۲ Cytotoxicity

^۳ Genotoxicity

^۴ Depolymerization

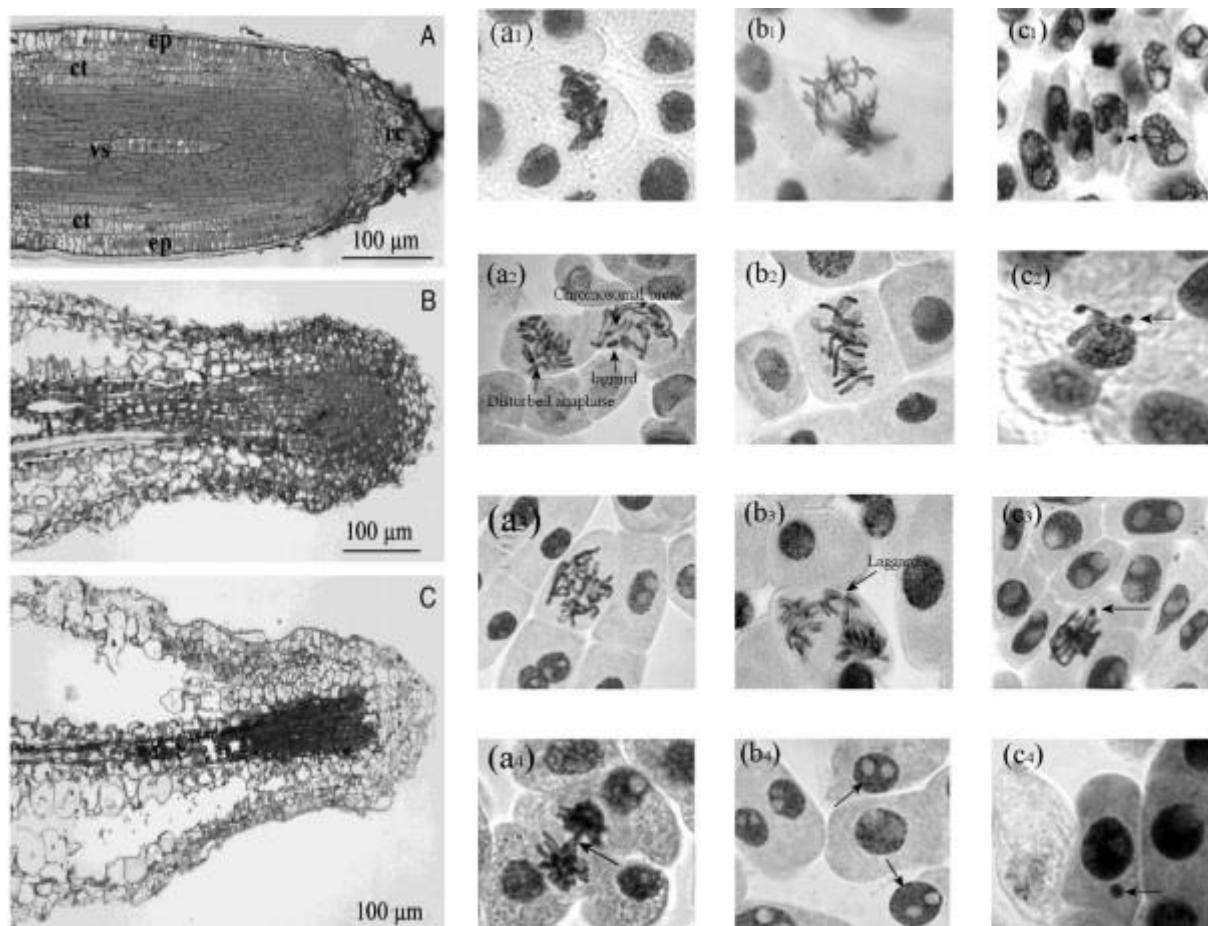
^۵ *Daphnia*

^۶ *Rotifers*

^۷ Lipophilicity

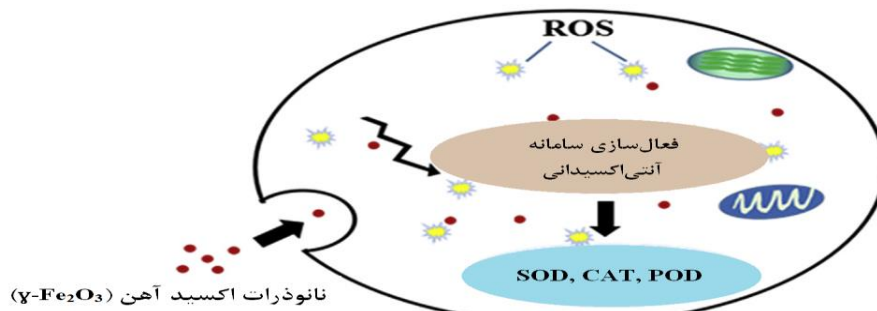
^۸ *Citrus maxima*

^۹ Malondialdehyde (MDA)



شکل ۲- تصویر نوک ریشه چچم در زیر میکروسکوپ نوری تغییر شکل مورفولوژی ریشه را توسط نانوذرات ZnO یا یون روی نشان داد. A: شاهد، B: تیمار ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات ZnO و C: تیمار ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر یون روی. RC: کلاهک ریشه، EP: اپیدرم، CT: پوست و VS: آوندها (لین و ایکسینگ، ۲۰۰۸).

شکل ۱- ناهنجاری‌های کروموزومی مشاهده شده در سلول‌های مریستمی پیاز در معرض نانوذرات اکسید روی (A1) کروموزوم چسبیده در مرحله متافاز (A2) مرحله آنافاز آشفته با کروموزوم‌های شکسته و معیوب (A3) متافاز آشفته (A4) کروموزوم‌های چسبیده در مرحله آنافاز (B1) آنافاز چند قطبی (B2) C- میتوزی سلول (B3) کروموزوم‌های رها شده و معیوب در آنافاز (B4) سلول دو هسته‌ای در مرحله اولیه تقسیم سلولی (C1 و C4) هسته مرحله اولیه تقسیم سلولی با خرد هسته (میکرونوکلئوس) در اینترفاز (C2) سلول در اوایل مرحله آنافاز با کروموزوم‌های چسبیده و جوانه‌زدن خرد هسته (C3) سلول دو هسته‌ای در تلوفاز اولیه با خرد هسته در متافاز. بزرگ‌نمایی برای همه تصاویر ۱۰۰۰ برابر است (کوماری و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۳- شمای از فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) در گیاهان برای از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) تولید شده توسط نانوذرات اکسید آهن (γ-Fe₂O₃) (هو و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۱- تأثیر منفی برخی نانومواد بر گیاهان

منبع	اثرات مشاهده شده	نوع گیاه	غلظت	اندازه نانوذرات (نانومتر)	نوع ترکیب نانومواد
یانگ و واتس (۲۰۰۵)	جلوگیری از رشد ریشه	ذرت، خیار، سورگم، کلم و هویج	۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۱۳	نانوذرات فلزی آلومینیوم
لین و ایکسینگ (۲۰۰۷)	مانع جوانه زنی بذر	چچم ذرت	۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۲۰	نانوذرات فلزی روی و اکسید روی
لین و ایکسینگ (۲۰۰۸)	کاهش زیست توده و کوچک شدن ریشه	چچم	۱۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۲۰	نانوذرات اکسید روی
کوماری و همکاران (۲۰۱۱)	سلول سم و ژن سم کروموزوم های چسبیده	پیاز	۲ تا ۸ میلی گرم در لیتر	> ۱۰۰	نانوذرات اکسید روی
گاریسا-گومز و همکاران (۲۰۱۵)	کاهش جوانه زنی	ترپچه	۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	کوچکتر از ۱۰۰	نانوذرات اکسید روی
واتسون و همکاران (۲۰۱۵)	کاهش طول ریشه	گندم	۱۲۵ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر	۱۰۰	نانوذرات اکسید روی
رالبا و همکاران (۲۰۱۵)	کاهش جوانه زنی	گوجه فرنگی	۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۲۵	نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم
یانگ و همکاران (۲۰۱۵)	کاهش طول ریشه	ذرت و برنج	۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر	کوچکتر از ۵۰	نانوذرات اکسید روی
ونگ و همکاران (۲۰۱۶)	کاهش کلروفیل a و b	ذرت	۳۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم	۹۰	نانوذرات اکسید روی
ابس و همکاران (۲۰۱۶)	کاهش زیست توده	هویج	۱ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۲۵ تا ۵۵	نانوذرات اکسید روی و اکسید مس
اندرسون و همکاران (۲۰۱۷)	کاهش رشد	گندم	۳۷۵ میلی گرم در کیلوگرم		نانوذرات اکسید روی و اکسید مس
جاین و همکاران (۲۰۱۷)	جلوگیری از جوانه زنی	گندم	۲۵۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	کوچکتر از ۵۰	نانوذرات اکسید روی
کاناس و همکاران (۲۰۰۸)	جلوگیری از رشد ریشه	کاهو و گوجه-فرنگی	۵۶ تا ۱۷۵۰ میلی گرم در لیتر	۸	نانولوله های تک جداره کربنی عاملدار و غیر عاملدار
لی و همکاران (۲۰۱۲)	کاهش ۵۰ درصدی رشد	لوبیا و سورگوم	۱۳ و ۲۶ میلی گرم در لیتر	۲ تا ۲۵	نانوذرات فلزی نقره
گوبینس و همکاران (۲۰۱۱)	جلوگیری از رشد	گیاه عدسک آبی	۵ میلی گرم در لیتر	۲۰ تا ۱۰۰	نانوذرات فلزی نقره

نانونذرات فلزی نقره	۸۰ تا ۲۰	یک میلی گرم در لیتر	ارابیدوپسیس تالیانا ^۱	جلوگیری از رشد ریشه	ما و همکاران (۲۰۱۰)
ادامه جدول ۱					
نانونذرات فلزی نقره (پوشانده شده با سیترات)	۱۱	۷۳/۴ میلی گرم در لیتر	ذرت	تأخیر در جوانه زنی	پوخرل و دویی (۲۰۱۳)
نانونذرات فلزی نقره (پوشانده شده با سیترات)	۸۰، ۴۰ و ۲۰	۵۳۴/۷۲ تا ۶۶/۸۴ میلی گرم در لیتر	آرابیدوپسیس	ایجاد سمیت در ریشه ها	جیسرلی و همکاران (۲۰۱۳)
نانوکریستال های هیدروکسی آپاتیت	۳۲/۶ تا ۱۸/۹	۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر	ماش	جلوگیری از جوانه زنی	جیانگ و همکاران (۲۰۱۴)
نانونذرات اکسید نیکل	۵۰ >	۲۵ تا ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر	گوجه فرنگی	کاهش رشد ریشه	فایسال و همکاران (۲۰۱۳)
نانونذرات اکسید نیکل	۱۰۰	۱۲۰ میلی گرم در کیلوگرم	جو	تنش اکسایشی و کاهش رشد	سوارز و همکاران (۲۰۱۸)
نانونذرات اکسید تیتانیوم	۳	۳۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	ذرت	کاهش رشد برگ ها، انتقال آب و تعرق	آسلی و نئومان (۲۰۰۹)
نانونذرات اکسید سربوم	۲۳	۲۵ تا ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر	گوجه فرنگی	تنش اکسایشی و بافت مردگی	ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)
نانونذرات اکسید سربوم	۸	۶۲/۵ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر	برنج	تنش اکسایشی و آسیب به بافت و پراکسیدی شدن چربی	ریکو و همکاران (۲۰۱۳)
نانونذرات اکسید نودیوم	۴۵ تا ۳۰	۱۰۰ میلی گرم در لیتر	کدو	تنش اکسایشی و جلوگیری از رشد و جذب عناصر غذایی ضروری	چن و همکاران (۲۰۱۶)
نانونذرات اکسید آهن	۱۰/۲	۳/۲ و ۰/۳۲/، ۰/۰۳۲ میلی گرم در کیلوگرم	شیدر	کاهش زیست توده	فنگ و همکاران (۲۰۱۳)
نانونذرات اکسید آهن	-	۲۰۰ میلی گرم در لیتر	اسفناج	کاهش وزن تر و خشک	جیاسوبرامانیان و همکاران (۲۰۱۶)
نانونذرات اکسید مس	کوچکتر از ۱۰۰	۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	ترب ژاپنی و چچم	کاهش و جلوگیری از رشد ریشه	آئا و همکاران (۲۰۱۲)
نانونذرات اکسید مس	کوچکتر از ۵۰	۵ میلی گرم در لیتر	برنج	کاهش طول و زیست توده ریشه	ونگ و همکاران (۲۰۱۵)
نانونذرات اکسید مس	کوچکتر از ۵۰	۲۰ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر	خردل هندی	کاهش رشد بخش هوایی و ریشه	نایر و چونگ (۲۰۱۵)
نانونذرات اکسید مس	کوچکتر از ۵۰	۲/۵ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	برنج	کاهش جوانه زنی، کاهش فتوستنز	دا کاستا و شارما (۲۰۱۶)

^۱ *Arabidopsis thaliana*

لی ون و همکاران (۲۰۱۶)	کاهش جذب عناصر بر، مولیبدم، منگنز، منیزیم، روی و آهن	پنبه	۱۰ تا ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۳۰	نانوذرات اکسید مس
------------------------	---	------	--------------------------------	----	-------------------

ادامه جدول ۱

سلومبرگ و سچونفیسج (۲۰۱۲)	کاهش طول ساقه و زیست توده	آرابیدوپسیس	۲۵۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۵۰	نانوذرات سیلیسیم
ستامپولیس و همکاران (۲۰۰۹)	جلوگیری از جوانه زنی	کدو	۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر	۱۰	نانوذرات سیلیسیم

اطلاعات توضیح داده شده می شود. برای مثال در گیاهان کشت شده در معرض نانوذرات افزایش یا کاهش مشاهده شده در رشد، توسعه یا کارایی، انحصاراً به علت تأثیرات نانوذرات نبوده و ممکن است یون مربوطه نیز دخالت داشته باشد. اساساً نانوذرات، یون یا هر دوی آنها در نتایج آزمایش مؤثر هستند. همچنین آنان گزارش کردند یک فرضیه می تواند این باشد که نانوذرات با گیاهان دارای برهمکنش بوده و این برهمکنشها (مانند جذب و تجمع در زیست توده گیاه) بر سرنوشت و انتقال آنها در محیط اثر خواهد داشت. نانوذرات همچنین می توانند به ریشه های گیاه چسبیده و باعث سمیت فیزیکی یا شیمیایی در گیاه شوند (کاپالدی آرودا و همکاران، ۲۰۱۵). اثر متقابل با ریزجانداران در خاک را نیز نمی توان نادیده گرفت زیرا آنها اثر متقابل مثبتی با گیاهان دارند (آندراد و همکاران، ۲۰۱۰). در این مورد می توان به قارچ های میکوریزا آربوسکولار^۱ که می تواند یک رابطه همزیستی با ریشه های اکثر گونه های گیاهی تشکیل دهد، اشاره کرد (آندراد و همکاران، ۲۰۰۹). جنبه دیگری که باید به آن توجه کرد خاک است، زیرا زیست فراهمی عناصر به خاک بستگی داشته و می تواند تغییر کند (ملو و همکاران، ۲۰۱۱). دو نکته مهم در مورد پژوهش های نانوسم^۲ عبارت است از: (۱) انواع مختلفی از نانوذرات در اکوسیستم ها به طور طبیعی وجود دارد؛ گیاهان باید سازوکارهای خاصی در تعدیل این ذرات کوچک داشته باشند؛ (۲) گیاهان به مقدار ناچیزی از عناصر غذایی کم مصرف برای فعالیت های فیزیولوژی معمول خود نیاز دارند در حالی که غلظت های

جیانگ و همکاران (۲۰۱۴) سمیت هیدروکسی آپاتیت در گیاه ماش را در رابطه با غلظت نانوذرات هیدروکسی آپاتیت، ساختار نانو و غلظت زیاد Ca^{2+} درون سلولی باشد. فایسال و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند سمیت نانوذرات NiO در ریشه گوجه فرنگی به علت اکسایش نامتعادل بود که با افزایش در سطوح آنزیم های آنتی اکسیدانی مشاهده شد. غلظت بیش از ۰/۱ میلی گرم در لیتر نانوذرات اکسید آهن با اندازه هشت نانومتر که به صورت سوسپانسیون برای آبیاری جوانه های ذرت که در میان کاغذهای صافی رشد یافته بودند، مورد استفاده قرار گرفته بود، مانع رشد ذرت شد (راکوکو و کریانگا، ۲۰۰۷). رابطه آشکاری بین ترکیب های شیمیایی، ساختار شیمیایی، اندازه ذرات و سطح ویژه نانوذرات با سمیت ناشی از آنها وجود دارد. سمیت نانوذرات ممکن است به علت دو موضوع متفاوت باشد: ۱- سمیت شیمیایی به- علت ترکیب های شیمیایی سمی و رهاسازی یون های سمی و ۲- ایجاد تنش یا تحریک به علت سطح، اندازه و یا شکل نانوذرات (کاپالدی آرودا و همکاران، ۲۰۱۵). این موضوع تأیید شده است که قابلیت انحلال نانوذرات اکسیدی به طور قابل توجهی بر سلول کشت شده در آزمایشگاه اثر داشته است و مدارک جدید دیگر نشان داده است که علت سمیت نانوذرات نمی تواند تنها با رهاسازی ترکیب های محلول از نانوذره توضیح داده شود (برونر و همکاران، ۲۰۰۶ و گاگی و همکاران، ۲۰۱۲). کاپالدی آرودا و همکاران (۲۰۱۵) اذعان داشتند تحلیل نوشته ها نشان داد که هیچ یک از بررسی های انجام شده تأثیرات یون های آزاد شده از نانوذرات و تأثیرات نانوذرات را بر گیاهان ارزیابی نکرده اند که موجب ایجاد شبهه در مورد

^۱ Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

^۲ Nanotoxicity

بیسترزجوسکا-پیوترووسکا و همکاران (۲۰۱۲) ظرفیت تجمع نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) با میانگین اندازه ۵۰ نانومتر را در گیاهان شاهی^۱ و نخود فرنگی^۲ مورد ارزیابی قرار دادند. این دو گونه گیاهی ظرفیت تجمع نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) را با بیش از ۹۰ درصد در ریشه‌ها به‌علت جذب قوی در سطح ریشه نشان دادند (تقریباً ۳۹/۵ گرم بر کیلوگرم در نخود فرنگی و ۷/۸ گرم بر کیلوگرم در شاهی). ژائو و همکاران (۲۰۱۳) که مطالعه‌ای در کشت خیار^۳ داشتند، مشاهده کردند که گیاهان هنگام رشد در سطوح ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوذرات CeO_2 یا اکسید روی زنده ماندند. مطالعه در رابطه با گیاه‌پالایی نبود ولی نشان داده شد که این گونه‌های گیاهی ظرفیت تجمع روی و سربوم را دارند و روی حتی در میوه هم شناسایی شد. با این حال درصد تجمع کم بود و در هیچ موردی بیش از پنج درصد نبود. با استفاده از رشد ذرت در خاک‌هایی با گستره غلظت صفر تا ۸۰۰ میلی‌گرم نانوذرات اکسید روی در کیلوگرم خاک در حضور و عدم حضور سدیم آلجینات^۴، تغییری در زیست‌توده گیاه در حضور سدیم آلجینات حتی در مقادیر بالای نانوذرات اکسید روی در خاک ایجاد نشد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۳). حضور آلجینات موجب افزایش قابلیت دسترسی روی در خاک شد. رشد گیاهان ذرت در بالاترین مقدار روی در ریشه‌ها و بخش‌هوایی بعد از ۳۰ روز تجمع روی در بالاترین سطح اعمال شده (۸۰۰ میلی‌گرم نانوذرات اکسید روی در کیلوگرم خاک در حضور سدیم آلجینات) متوقف شد که ۷۶۹ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در ریشه‌ها و ۴۹۵ میلی‌گرم روی در کیلوگرم در بخش‌هوایی تجمع یافت (ژائو و همکاران، ۲۰۱۳). این نتایج قبلاً توسط لین و ایکسینگ (۲۰۰۸) گزارش شده بود. این مطالعه همچنین نشان داد که مقدار روی جذب شده توسط گیاه ممکن است همبستگی مستقیمی با مقدار

بسیار زیاد هر عنصر غذایی کم مصرف موجب مسمومیت گیاه می‌شود؛ به عبارت دیگر، مشاهده نانوسم در غلظت‌های بسیار بالای نانوذرات قابل استناد نبوده و در غلظت کم‌تر نانوسم انتظار مسمومیت گیاه نمی‌رود اما در غلظت‌های بیش از حد معقول احتمال مسمومیت گیاه وجود دارد (لیو و لال، ۲۰۱۴). چون گیاهان اولین تولیدکنندگان هستند، سمیت یک آلاینده در گیاه می‌تواند به‌عنوان یک معرف برای پیش‌بینی تأثیرات مضر آلاینده نگران‌کننده بر تمام اکوسیستم، مورد توجه واقع شود (سیدیکویی و همکاران، ۲۰۱۵).

گیاه‌پالایی نانوذرات

به‌علت توسعه زیاد نانوفناوری در سال‌های اخیر و کاربرد وسیع نانوذرات در بخش‌های مختلف، خطر آلوده کردن محیط در آینده نزدیک بسیار زیاد خواهد بود. در این میان آب و خاک از جمله محیط‌های آلوده شده خواهند بود. محیط آلوده شده با عناصر سمی (شامل فلزات) یا ترکیب‌های (مانند آفت‌کش‌ها)، واقعیتی است که در حال حاضر و متأسفانه وجود دارد و فعالیت‌های انسانی وضعیت را وخیم‌تر کرده است (گراتائو و همکاران، ۲۰۱۲). اگرچه فایده‌های استفاده نانوذرات از بسیار زیاد است اما استفاده از آنها موجب بدتر شدن مشکل می‌شود که بیانگر این واقعیت است که هر فرآیندی باید به‌دقت مورد نظارت واقع شود تا از آلودگی محیط در آینده جلوگیری شود. رفع آلودگی از خاک‌ها و محیط‌های آبی آلوده شده به فلزات با استفاده از گیاهان به‌طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است که به این فرآیند گیاه‌پالایی گفته می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۱۳، سوزا و همکاران، ۲۰۱۳). برخی بررسی‌ها امکان گیاه‌پالایی محیط‌های آلوده به نانوذرات را ارزیابی کرده‌اند. این موضوع تأیید شده که نانوذرات ZnO , CuO , Ag , Au و $C60$ هم به شکل نانوذره و هم به شکل یون توسط گیاهان به‌سرعت جذب و به بخش‌های هوایی گیاهان انتقال می‌یابند (گاردییا-تورسیدی و همکاران، ۲۰۱۴).

^۱ *Lepidium sativum*

^۲ *Pisum sativum L.*

^۳ *Cucumis sativus*

^۴ *Sodium alginate*

گستره صفر تا ۷۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از نانوذرات TiO_2 (با اندازه ۲۷ نانومتر) کشت شدند. حضور نانوذرات در میوه نشان داد که نانوذرات ممکن است از خاک به میوه انتقال یابند بدون اینکه دستخوش تغییری به‌علت فرآیندهای زیست‌شیمیایی^۷ شوند. لارو و همکاران (۲۰۱۲) تجمع، جذب و تأثیر نانوذرات تیتانیم را در گندم بررسی کردند. بذرها برای ۱۵ روز در بستر شن با محلول هوگلند خیسانده و بعد از جوانه‌زنی هر گیاه‌چه به‌دقت به شیشه‌های انفرادی حاوی سوسپانسیون نانوذرات اکسید تیتانیم (TiO_2) (با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) انتقال داده شد. گیاهان به مدت هفت روز در معرض نانوذرات اکسید تیتانیم برای بررسی تجمع و انتقال و پژوهش درباره تأثیر نانوذرات اکسید تیتانیم بر گیاه قرار گرفت. تجمع نانوذرات تیتانیم در ریشه‌های گیاه مشاهده شد که نشان داد نانوذرات در ریشه‌ها گندم تجمع می‌یابند. در رابطه با جذب تنها کوچک‌ترین نانوذرات تیتانیم در برگ-های گندم تشخیص داده شدند.

نتیجه‌گیری کلی

افزایش استفاده از نانومواد در صنعت و کشاورزی به‌ویژه نانوکودها موجب ورود این مواد به محیط زیست شده است. از جمله نگرانی‌های ورود این مواد به محیط زیست عدم اطلاعات کافی از تأثیر این مواد در غلظت‌های مختلف بر گیاهان در دوره‌های مختلف رشد آنها است. همچنین، در مورد چگونگی تأثیر نانومواد بر ریزجانداران خاکری اطلاعات کافی وجود ندارد. نانومواد به‌علت ابعاد بسیار کوچک ویژگی‌هایی دارند که می‌تواند موجب آسیب به گیاهان و ریزجانداران شوند. از طرف دیگر، مدارکی وجود دارند که نشان می‌دهند برخی گیاهان می‌توانند نانوذرات را در خود تجمع دهند که می‌توان از این توانایی برای گیاه‌پالایی استفاده کرد اما جنبه منفی آن ورود نانوذرات به زنجیره غذایی است که در رأس آن انسان‌ها قرار دارند؛ بنابراین، استفاده از نانومواد

ماده آلی در خاک داشته باشد.

در یک مطالعه دیگر که توسط دیمکپا و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد، عملکرد گندم در حضور نانوذرات CuO و نانوذرات اکسید روی با عملکرد آن در حضور CuO و اکسید روی با اندازه نانو-نانومتری^۱ در خاک شنی مقایسه شد. یون‌های مس و روی در قسمت-های بالایی گندم تجمع یافتند که نشان می‌دهد که جذب این فلزات در رابطه با حضور این عناصر در خاک است. اختلاف مشاهده شده بین انتقال شکل‌های مختلف CuO و اکسید روی نشان داد فرآیند جذب و انتقال به شکل فلز در خاک بستگی ندارد. جاکوب و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه‌ای در رابطه با نانوذرات TiO_2 و چهار گونه گیاهی انجام دادند که دو گونه از این گیاهان مربوط به خاک‌ها خشک (لوبیا^۲ و گندم^۳) و دو گونه دیگر گیاهان اراضی مرطوب (ترشک^۴ و الودئا^۵) بودند. کشت با نانوذرات TiO_2 (با میانگین اندازه کوچک‌تر از ۲۵ نانومتر) در غلظت‌های صفر تا ۳۰ میلی‌گرم در لیتر به جز برای گیاه الودئا که بیش‌ترین غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بود، انجام شد. در هیچ یک از تیمارهای مورد آزمایش تغییری در زیست‌توده گیاهان مشاهده نشد. ریشه‌های گیاهان مقدار بالایی (۴۰۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) تیتانیم داشتند خصوصاً در گندم و تمام گیاهان مورد مطالعه انتقال تیتانیم را نشان دادند. دیگر عناصر غذایی مانند فسفر می‌تواند برای جذب با تیتانیم در محیط‌های آبی بر اساس اطاعات به‌دست آمده از گیاه الودئا رقابت کند؛ بنابراین، گیاهان مورد آزمایش توان خود را برای استخراج گیاهی^۶ تیتانیم از نانوذره TiO_2 را نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر که با نانوذرات TiO_2 و گیاه خیار انجام شد نانوذرات در میوه‌ها تشخیص داده شدند (سروین و همکاران، ۲۰۱۳). گیاهان در یک خاک شنی به مدت ۱۵۰ روز با غلظت‌هایی در

^۱ Non-nanometric

^۲ *Phaseolus vulgaris*

^۳ *Triticum aestivum*

^۴ *Rumex crispus*

^۵ *Elodea canadiana L*

^۶ Phytoextraction

تا خطرها و فایده‌های نانوفناوری در کشاورزی ارزیابی شود. جنبه‌ای که به نظر می‌رسد نادیده گرفته شده است، گیاهان تراریخت و جهش‌یافته است؛ به عبارت دیگر، لازم است جنبه‌های ایجاد تغییرپذیری ژنتیکی در گیاهان و حتی ریزجانداران خاک بررسی شود. ژنوتیپ‌های مختلف گونه‌های گیاهی (مانند لاین‌ها، ارقام، دورگه‌ها و غیره) ممکن است پاسخ‌های کاملاً متفاوتی به یک نوع نانوذره نشان دهند. پژوهش‌ها باید به سمت بررسی‌های پروتئومی، ژنتیکی و متابولیسمی برای درک بهتر سازوکارهای درگیر در اثرهای متقابل نانوذرات و گیاهان سوق داده شوند. یکی از جنبه‌هایی که نمی‌توان آن را نادیده گرفت جذب فلزات و تجمع آنها در گیاهانی است که مورد استفاده حیوانات و انسان هستند. در این موارد نگرانی‌ها به علت احتمال ورود این فلزات و نانوذرات به چرخه غذایی انسان و تهدید سلامتی بشر، افزایش یافته است. این نوع مطالعه مفید و ضروری خواهد بود، به طوری که بررسی‌های دقیق‌تری در مورد سینتیک جذب، تجمع و انتقال نانوذرات در گیاهان انجام شود و آگاهی‌های جدیدی در مورد استفاده از نانوذرات و اثرها و سمیت آنها در گیاهان ارائه شود.

به‌عنوان کود و پاسخ گیاهان به این مواد جدید در مراحل مختلف رشد باید مورد بررسی دقیق قرار گیرد. پیشنهادها زیر برای بهبود و تکمیل دانش جامعه علمی در مورد نانومواد و تغذیه گیاهان ارائه شده است.

پیشنهادات ترویجی

شاید اولویت اول برای پژوهش در مورد سمیت (نانوسم) و تنش حاصل از نانومواد باشد که به‌عنوان کود معرفی و یا مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. لازم است پژوهش‌های پیش‌تری در مورد بررسی تأثیر تجمع یا رسوب نانوذرات در اندامک‌های سلول‌های گیاهی مانند میتوکندری یا کلروپلاست انجام شود. به‌علاوه، از جنبه‌های دیگری که در پژوهش‌های آتی باید مورد توجه قرار گیرد تأثیر نانوذرات بر اثر متقابل گیاه-خاک-ریزجانداران است، شاید بررسی‌ها در شرایط واقعی خاک که در آن گیاهان کشت شده و ریزجانداران حضور دارند به آنهایی که مخصوص بررسی اثرهای سودمند هستند، اولویت داشته باشد، زیرا ممکن است خطرهای دیگری توسعه و عملکرد نهایی گیاه را تهدید کند. پیشنهاد می‌شود پتانسیل‌های تأثیر نانوکودها و نانومواد افزوده شده به گیاهان بر سلامت محیط‌های میکروبی خاک، بررسی گردد

فهرست منابع

۱. بازرگان، ک؛ م، متین‌فر؛ ح ع، حسین‌زاده؛ م ح، داودی. ۱۳۹۱. ضرورت تدوین «قانون کود» و «استانداردهای ملی» در راستای ساماندهی مدیریت امر و کود در ایران. مجله پژوهش‌های خاک، شماره ۲۶: ۲۲۵-۲۱۹.
۲. Akerman, M.E., W.C. Chan, P. Laakkonen, S.N. Bhatia, E. Ruoslahti. 2002. Nanocrystal targeting in vivo. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 20:12617-12621.
۳. Ali, H., E. Khan, M.A. Sajad. 2013. Phytoremediation of heavy metals--concepts and applications. Chemosphere. 7: 869-881.
۴. Amenta, V., K. Aschberger, M. Arena, H. Bouwmeester, F. B. Moniz, P. Brandhoff, S. Gottardo, H. J. P. Marvin, A. Mech, L. Q. Pseudo, H. Rauscher, R. Schoonjans, M. V. Vettori, S. Weigel, and R. J. Peters. 2015. Regulatory aspects of nanotechnology in the agri/feed/food sector in EU and non-EU countries. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 73:463-476.
۵. Anderson, A., J. McLean, P. McManus, and D. Britt. 2017. Soil chemistry influences the phytotoxicity of metal oxide nanoparticles. International Journal of Nanotechnology. 14:15-21.
۶. Andrade, S.A.L., P.L. Gratao, M.A. Schiavinato, A.P.D. Silveira, R.A. Azevedo, P. Maz-

- zafera. 2009. Zn uptake, physiological response and stress attenuation in mycorrhizal jack bean growing in soil with increasing Zn concentrations. *Chemosphere*. 10:1363–1370.
7. Andrade, S.A.L., P.L. Gratao, R.A. Azevedo, A.P.D. Silveira, M.A. Schiavinato, P. Mazzafera. 2010. Biochemical and physiological changes in jack bean under mycorrhizal symbiosis growing in soil with increasing Cu concentrations. *Environmental and Experimental Botany*. 68:198–207.
 8. Andre Nel, T., L. Madler, L. Ning. 2006. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science*. 5761:622–627.
 9. Asli, S., P.M. Neumann. 2009. Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant Cell Environment*. 32:577–584
 10. Atha, D.H., H. Wang, E.J. Petersen, D. Cleveland, R.D. Holbrook, P. Jaruga, M. Dizdaroğlu, B. Xing, and B.C. Nelson. 2012. Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environmental Science & Technology*. 46:1819-1827.
 11. Bakshi, M., H.B. Singh, P.C. Abhilash. 2014. Unseen impact of nanoparticles: more or less? *Current Science*. 106:350-352.
 12. Barrera, R., E. Casals, J. Colon, X. Font, A. Sanchez, V. Puentes. 2009. Evaluation of the ecotoxicity of model nanoparticles. *Chemosphere*. 75:850–857.
 13. Bouwmeester, H., S. Dekkers, M.Y. Noordam, W.I. Hagens, A.S. Bulder, C. de Heer, S.E. ten Voorde, S.W. Wijnhoven, H.J. Marvin, A.J. Sips. 2009. Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 53:52–62.
 14. Brunner, T.J., P. Wick, P. Manser, P. Spohn, R.N. Grass, L.K. Limbach, A. Bruinink, W.J. Stark. 2006. In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. *Environmental Science & Technology*. 40: 4374–4381.
 15. Bystrzejewska-Piotrowska, G., M. Asztemborska, R. Stęborowski, H. Polkowska-Motrenko, B. Danko, J. Ryniewicz. 2012. Application of neutron activation for investigation of Fe₃O₄ nanoparticles accumulation by plants. *Nukleonika* 57:427–430.
 16. Canas, J.E., M. Long, S. Nations, R. Vadan, L. Dai, M. Luo, R. Ambikapathi E.H. Lee, D. Olszyk. 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 27:1922–1931.
 17. Capaldi Arruda, S. C., A. L. Diniz Silva, R. M. Galazzi, R. Antunes Azevedo, M. A. Zezzi Arruda. 2015. Nanoparticles applied to plant science: A review. *Talanta*. 131: 693–705.
 18. Chahal, A.S., A.R. Madgulkar, S.J. Kshirsagar, M.R. Bhalekar, A. Dikpati, P. Gawli. 2012. Amorphous nanoparticles for solubility enhancement. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology and Research*. 2:167–178.
 19. Chen, G., C. Ma, A. Mukherjee, C. Musante, J. Zhang, J.C. White, D. O.P., and B. Xing. 2016. Tannic acid alleviates bulk and nanoparticle Nd₂O₃ toxicity in pumpkin: a physiological and molecular response. *Nanotoxicology*. 10:1243-1253.
 20. Clement, L., C. Hure, N. Marmier. 2013. Toxicity of TiO₂ nanoparticles to cladocerans, algae, rotifers and plants - effects of size and crystalline structure. *Chemosphere*. 90:1083–1090.
 21. Da Costa, M.V.J., and P.K. Sharma. 2016. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*. 54:110-119.
 22. Dimkpa, C.O., J.E. McLean, D.E. Latta, E. Manangon, D.W. Britt, W.P. Johnson, M.I. Boyanov, A.J. Anderson. 2012. CuO and ZnO nanoparticles: Phytotoxicity, metalspeciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *Journal of Nanoparticle Research*. 14:1125–1139.
 23. Ebbs, S.D., S.J. Bradfield, P. Kumar, J.C. White, C. Musante, and X. Ma. 2016. Accumulation of zinc, copper, or cerium in carrot (*Daucus carota*) exposed to metal oxide nano-

- particles and metal ions. *Environmental Science: Nano*. 3:114-126.
24. Faisal, M., Q. Saquib, A.A. Alatar, A.A. Al-Khedhairi, A.K. Hegazy, J. Musarrat. 2013. Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: a study on mechanism of cell death. *Journal of Hazardous Materials*. 250:318–332.
 25. Feng, Y., X. Cui, S. He, G. Dong, M. Chen, J. Wang, and X. Lin. 2013. The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth. *Environmental Science & Technology*. 47:9496-9504.
 26. Gagne, F., C. Andre, R. Skirrow, M. Gelinas, J. Auclair, G. van Aggelen, P. Turcotte, C. Gagnon. 2012. Toxicity of silver nanoparticles to rainbow trout: a toxicogenomic approach. *Chemosphere*. 89:615–622.
 27. Gao, J., G. Xu, H. Qian, P. Liu, P. Zhao, Y. Hu. 2013. Effects of nano-TiO₂ on photosynthetic characteristics of *Ulmus elongata* seedlings. *Environmental Pollution*. 176:63-70.
 28. Garcia-Gomez, C., M. Babin, A. Obrador, J. Alvarez, and M. Fernandez. 2015. Integrating ecotoxicity and chemical approaches to compare the effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk, and ZnCl₂ on plants and microorganisms in a natural soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 22:16803-16813.
 29. Gardea-Torresdey, J.L., C.M. Rico, J.C. White. 2014. Trophic transfer, transformation, and impact of engineered nanomaterials in terrestrial environments. *Environmental Science & Technology*. 48:2526–2540.
 30. Geisler-Lee, J., Q. Wang, Y. Yao, W. Zhang, M. Geisler, K. Li, Y. Huang, Y. Chen, A. Kolmakov, and X. Ma. 2013. Phytotoxicity, accumulation and transport of silver nanoparticles by *Arabidopsis thaliana*. *Nanotoxicology*. 7:323-337.
 31. Gratao, P.L., A. Polle, P.J. Lea, R.A. Azevedo. 2005. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*. 32:481–494.
 32. Gratao, P.L., C.C. Monteiro, R.F. Carvalho, T. Tezotto, F.A. Piotto, L.E.P. Peres R.A. Azevedo. 2012. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 56:79–96.
 33. Gubbins, E.J., L.C. Batty, J.R. Lead. 2011. Phytotoxicity of silver nanoparticles to *Lemna minor* L. *Environmental Pollution*. 159:1551–1559.
 34. Hoshino, A., K. Fujioka, T. Oku, S. Nakamura, M. Suga, Y. Yamaguchi, K. Suzuki, M. Yasuhara. 2004. Quantum Dots Targeted to the Assigned Organelle in Living Cells. *Microbiology and Immunology*. 48:985–994.
 35. Jacob, D.L., J.D. Borchardt, L. Navaratnam, M.L. Otte, A.N. Bezbaruah. 2013. Uptake and translocation of Ti from nanoparticles in crops and wetland plants. *International Journal of Phytoremediation*. 15:142–153.
 36. Jain, N., A. Bhargava, V. Pareek, M.S. Akhtar, and J. Panwar. 2017. Does seed size and surface anatomy play role in combating phytotoxicity of nanoparticles? *Ecotoxicology*. 26:238–249.
 37. Jeyasubramanian, K., U.U.G. Thoppey, G.S. Hikku, N. Selvakumar, A. Subramania, and K. Krishnamoorthy. 2016. Enhancement in growth rate and productivity of spinach grown in hydroponics with iron oxide nanoparticles. *RSC Advances*. 6:15451-15459.
 38. Jiang, H., J.K. Liu, J.D. Wang, Y. Lu, M. Zhang, X.H. Yang, D.J. Hong. 2014. The biotoxicity of hydroxyapatite nanoparticles to the plant growth. *Journal of Hazardous Materials*. 270:71–81.
 39. Khot, L.R., S. Sankaran, J.M. Maja, R. Ehsani, E.W. Schuster. 2012. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop Protection*. 35:64–70.
 40. Kumari, M., S.S. Khan, S. Pakrashi, A. Mukherjee, N. Chandrasekaran. 2011. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*. *Journal of Hazardous Materials*. 190:613–621.
 41. Larue, C., J. Laurette, N. Herlin-Boime, H. Khodja, B. Fayard, A.M. Flank, F. Brisset, M. Carriere. 2012. Accumulation, translocation and impact of TiO₂ nanoparticles in wheat (*Triticum aestivum* spp.): influence of diameter and crystal phase. *Science of the Total Environment*. 431:197–208.
 42. Le Van, N., C.X. Ma, J.Y. Shang, Y.K. Rui, S.T. Liu, and B.S. Xing. 2016. Effects of

- CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere*. 144:661-670.
43. Lee, W.M., J.I. Kwak, Y.J. An. 2012. Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: Media effect on phytotoxicity. *Chemosphere*. 86:491-499.
 44. Lin, D., B. Xing. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*. 150:243-250.
 45. Lin, D., B. Xing. 2008. Root Uptake and Phytotoxicity of ZnO Nanoparticles. *Environmental Science & Technology*. 42:5580-5585.
 46. Liu, R., R. Lal. 2014. Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports*. 4:5686-5691.
 47. Ma, X., J.G. Lee, Y. Deng, A. Kolmakov. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*. 408:3053-3061.
 48. Mastronardi, E., P. Tsae, X. Zhang, C. Monreal, M. C. DeRosa. 2015. Strategic Role of Nanotechnology in Fertilizers: Potential and Limitations. *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Rai, M., N. Duran, C. Ribeiro, L. Mattoso. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. Springer International Publishing Switzerland.
 49. Maynard, A.D., R.J. Aitken, T. Butz, V. Colvin, K. Donaldson, G. Oberdorster M.A. Philbert, J. Ryan, A. Seaton, V. Stone, S.S. Tinkle, L. Tran, N.J. Walker D.B. Warheit. 2006. Safe handling of nanotechnology. *Nature* 444:267-269.
 50. Melo, L.C.A., L.R.F. Alleoni, G. Carvalho, R.A. Azevedo. 2011. Cadmium- and barium-toxicity effects on growth and antioxidant capacity of soybean (*Glycine max* L.) plants, grown in two soil types with different physicochemical properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 174:847-859.
 51. Meng, H., T. Xia, S. George, A.E. Nel. 2009. A predictive toxicological paradigm for the safety assessment of nanomaterials. *ACS Nano*. 3:1620-1627.
 52. Mirzajani, F., H. Askari, S. Hamzelou, M. Farzaneh, A. Ghassempour. 2013. Effect of silver nanoparticles on *Oryza sativa* L. and its rhizosphere bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 88: 48-54.
 53. Nair, P.M.G., and I.M. Chung. 2015. Study on the correlation between copper oxide nanoparticles induced growth suppression and enhanced lignification in Indian mustard (*Brassica juncea* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 113:302-313.
 54. Pokhrel, L.R., and B. Dubey. 2013. Evaluation of developmental responses of two crop plants exposed to silver and zinc oxide nanoparticles. *Science of the Total Environment*. 452:321-332.
 55. Racuciu, M., D.E. Creanga. 2007. TMA-OH coated magnetic nanoparticles internalized in vegetal tissue. *Romanian Journal of Physics*. 52:395-402.
 56. Raliya, R., R. Nair, S. Chavalmane, W.N. Wang, and P. Biswas. 2015. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*. 7:1584-1594.
 57. Rico, C.M., J. Hong, M.I. Morales, L. Zhao, A.C. Barrios, J.Y. Zhang, J.R. Peralta-Videa, and J.L. Gardea-Torresdey. 2013. Effect of cerium oxide nanoparticles on rice: a study involving the antioxidant defense system and in vivo fluorescence imaging. *Environmental Science & Technology*. 47:5635-5642.
 58. Servin, A., W. Elmer, A. Mukherjee, R. De la Torre-Roche, H. Hamdi, J. C. White, P. Bindraban, C. Dimkpa. 2015. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*. 17:1-21.
 59. Servin, A.D., M.I. Morales, H. Castillo-Michel, J.A. Hernandez-Viezcas, B. Munoz, L. Zhao, J.E. Nunez, J.R. Peralta-Videa, J.L. Gardea-Torresdey. 2013. Synchrotron verification of TiO₂ accumulation in cucumber fruit: a possible pathway of TiO₂ nanoparticle transfer from soil into the food chain. *Environmental Science & Technology*. 47: 11592-11598.
 60. Slomberg, D.L., and M.H. Schoenfisch. 2012. Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Science & Technology*. 46:10247-10254.

61. Soares, C., S. Branco-Neves, A.d. Sousa, M. Azenha, A. Cunha, R. Pereira, and F. Fidalgo. 2018. SiO₂ nanomaterial as a tool to improve *Hordeum vulgare* L. tolerance to nano-NiO stress. *Science of the Total Environment*. 622:517–525.
62. Solanki P., A. Bhargava, H. Chhipa, N. Jain, J. Panwar. 2015. Nano-fertilizers and Their Smart Delivery System. *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Rai, M., N. Duran, C. Ribeiro, L. Mattoso. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. Springer International Publishing Switzerland.
63. Song, U., H. Jun, B. Waldman, J. Roh, Y. Kim, J. Yi, E.J. Lee. 2013. Functional analyses of nanoparticle toxicity: A comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 93:60–67.
64. Souza, L.A., F.A. Piotto, R.C. Nogueirol, R.A. Azevedo. 2013. Use of non-hyperaccumulator plant species for the phytoextraction of heavy metals using chelating agents. *Scientia Agricola*. 70:290–295.
65. Stampoulis, D., S.K. Sinha, and J.C. White. 2009. Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environmental Science & Technology*. 43:9473-9479.
66. Suzuki, K.G.N., T.K. Fujiwara, M. Edidin, A. Kusumi. 2007. Dynamic recruitment of phospholipase C γ at transiently immobilized GPI-anchored receptor clusters induces IP₃-Ca²⁺ signaling: single-molecule tracking study 2. *Journal of Cell Biology*. 177:731–742.
67. Wang, F.Y., X.Q. Liu, Z.Y. Shi, R.J. Tong, C.A. Adams, and X.J. Shi. 2016. Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants - a soil microcosm experiment. *Chemosphere*. 147:88-97.
68. Wang, S.L., H.Z. Liu, Y.X. Zhang, and H. Xin. 2015. The effect of CuO NPs on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 34:554-561.
69. Watson, J.L., T. Fang, C.O. Dimkpa, D.W. Britt, J.E. McLean, A. Jacobson, and A.J. Anderson. 2015. The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties. *Biomaterials*. 28:101-112.
70. Xia, T., N. Li, A.E. Nel. 2009. Potential health impact of nanoparticles. *Annual Review of Public Health*. 30:137–150.
71. Yang, J., W. Caob, and Y. Rui. 2017. Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms. *Journal of Plant Interactions*. 12:158–169.
72. Yang, L., D.J. Watts. 2005. Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. *Toxicology Letters*. 158:122–132.
73. Yang, Z., J. Chen, R.Z. Dou, X. Gao, C.B. Mao, and L. Wang. 2015. Assessment of the phytotoxicity of metal oxide nanoparticles on two crop plants, maize (*Zea mays* L.) and rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12:15100-15109.
74. Yi, H., Z. Meng. 2003. Genotoxicity of hydrated sulfur dioxide on root tips of *Allium sativum* and *Vicia faba*. *Mutation Research*. 537:109–114.
75. Ying, J. 2001. *Nanostructured Materials*, Elsevier, California.
76. Zhao, L., J.A. Hernandez-Viezcas, J.R. Peralta-Videa, S. Bandyopadhyay, B. Peng, B. Munoz, A.A. Kellercer, J.L. Gardea-Torresdey. 2013. ZnO nanoparticle fate in soil and zinc bioaccumulation in corn plants (*Zea mays*) influenced by alginate. *Environmental Science*. 15:260–266.
77. Zhou, G., J.F. Pereira, E. Delhaize, M. Zhou, J.V. Magalhaes, P.R. Ryan. 2014. Enhancing the aluminium tolerance of barley by expressing the citrate transporter genes SbMATE and FRD3. *Journal of Experimental Botany*. 65:2381-2390.
78. Zhu, H., J. Han, J.Q. Xiao, Y. Jin. 2008. Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*. 10:713–717.

Effects of Nanomaterial Overdose in Plant Nutrition

M. R. Maghsoodi ¹ and N. Najafi

PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
mr.maqsoodi@tabrizu.ac.ir

Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
n-najafi@tabrizu.ac.ir

Received: November 2017, Accepted: July 2018

Abstract

The advent of nanotechnology has led to new achievements in the different fields of science and technology. The minified size of materials under this technology discloses certain novel or hitherto ignored features and properties of these materials. It is true that nanotechnology has helped enhance certain features of fertilizers as evidenced by a number of studies reporting their positive effects on different plants. However, it should be noted that most of these studies were performed under laboratory conditions and considered only short periods of plant life, in many cases only up to germination. This is while there are many reports showing the adverse consequences of using nano-materials. For example, nanoparticles of aluminum, iron, zinc, titanium, nickel, and silver or hydroxyapatite nanoparticles and carbon nanotubes have caused reduced growth in onions, vetch, rye, rice, beans, corn, cucumber, sorghum, and tomato plants. These inconsistent reports call for exhaustive investigations to determine the interactions between nano-materials and plants and their final fate in the plant and food chain before they can be used as fertilizers. Since plants stand at the beginning of the food chain, introduction and accumulation of nano-materials inside them might help transfer these materials to higher levels of the chain to end up in the human body. This paper studies the effects of high concentrations of nano-materials on plant growth in certain species, the associated damages, and the uptake and accumulation of nanoparticles in plant.

Keywords: Food chain, Nano-fertilizer, Nanotechnology, Plant nutrition

¹- Corresponding author: Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.