

بررسی تأثیر کاربرد نانوکودهای عناصر غذایی کم مصرف در تغذیه گیاهان

محمد رضا مقصودی^۱ و نصرت الله نجفی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران. mr_maqsoodi@yahoo.com

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران. nanajafi@yahoo.com

دریافت: خرداد ۱۳۹۵ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۵

چکیده

افزایش روزافزون جمعیت انسانی و نیاز به غذای بیش تر از یک سو و کاهش وسعت خاک‌های قابل کشت و حاصلخیزی آنها از سوی دیگر بشر را به کاربرد کودهای شیمیایی بیش تر سوق داده است. فراهمی عناصر غذایی کم مصرف در برخی خاک‌های آهکی دنیا با pH قلیایی، مقدار ماده آلی کم (شرایط بیش تر خاک‌های ایران) و یا درشت بافت، کم است. محققان تلاش می‌کنند تا با استفاده از فناوری‌های نوین موجب افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی کم مصرف و کاهش مقدار مصرف کودهای آنها برای کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی محیط زیست شوند. در این راستا نانوفناوری توانسته با تغییر ویژگی‌های کودها، محققان را برای رسیدن به کودهایی با کارایی مصرف بیش تر و در نتیجه کاهش مقدار مصرف آنها و کاهش خطرات زیست محیطی، امیدوار کند. نانومواد شامل موادی است که حداقل در یک بعد اندازه‌ای کوچک تر ۱۰۰ نانومتر داشته باشند. نانومواد مختلفی به عنوان کود برای گیاهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند که بیش تر آنها در گلخانه و در بسترهای کشت مصنوعی بوده است. اثرات مثبت نانوکودهای آهن، روی، منگنز، مس و مولیبدن بر شاخص‌های رشد گیاهان گندم، کلزا، سورگوم، انواع لوبیا، خیار، گوجه فرنگی، بادام زمینی، برخی گیاهان دارویی و غیره گزارش شده است. با این حال، عدم تأثیر و یا اثرات منفی نانوکودها نیز در گزارش‌ها کم نبوده و نباید نادیده گرفته شود. همچنین عواقب ورود حجم عظیمی از این مواد به محیط زیست از طریق کوددهی مبهم بوده و نتیجه ورود آنها به زنجیره غذایی مورد بحث است. بنابراین، به نظر می‌رسد دستیابی به یک کود مطلوب نیازمند انجام تحقیقات بیش تری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه گیاهان، عناصر غذایی کم مصرف، نانوکودها.

مقدمه

با توجه به رشد سریع جمعیت جهان، پیش‌بینی شده است که در سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به ۹/۶ میلیارد نفر برسد (سازمان ملل متحد ۲۰۱۳). فائو (۲۰۰۹) اعلام کرده است که تولید جهانی محصولات کشاورزی در سال ۲۰۵۰ باید ۷۰ درصد افزایش یابد تا نیازهای بشر به غذا را تأمین کند. بنابراین، کشاورزی امروز نیاز به بهره‌وری بیش‌تر در تولید مواد غذایی دارد. با توجه به زمین‌های قابل‌کشت محدود و کمبود منابع آب در جهان، افزایش قابل‌توجه مصرف کودهای کشاورزی یکی از روش‌های تأمین غذای مورد نیاز مردم جهان می‌باشد. استفاده از کودها برای بهبود حاصلخیزی خاک و تولیدات گیاهی صرف‌نظر از نوع کشت یا شرایط محیطی اجتناب‌ناپذیر است. گزارش شده است که حدود ۵۰ درصد افزایش تولیدات گیاهی بر اثر کاربرد کودها در کشاورزی بوده است. در چهار دهه گذشته، با وجود تلاش‌های بسیار، کارایی استفاده عناصر غذایی^۱ محصولات کشاورزی که نسبت کیلوگرم ماده خشک گیاه بر کیلوگرم عنصر غذایی مصرف شده است، ثابت باقی‌مانده است (سوبرامانیان و همکاران ۲۰۱۵). کارایی کم عناصر غذایی، کوددهی نامتعادل و پاسخ کم گیاه به کود، نهایتاً منجر به رکود در تولید محصولات کشاورزی در کشورهایی شده است که با کمبود مواد آلی خاک روبه‌رو هستند (بیسواس و شمارما ۲۰۰۸).

برای حفظ سطح فعلی تولید محصولات کشاورزی، کاربرد کودهای متنوع مرسوم در سطح زیاد و برای مدت طولانی در بخش کشاورزی باعث ایجاد مسائل جدی زیست محیطی در سطح جهانی شده است (لیو و لال ۲۰۱۵). بازرگان و همکاران (۱۳۹۱) اذعان داشتند که در نظام مدیریت کود ایران 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 کشور هستند. آمتا و همکاران

(۲۰۱۵) گزارش کردند که کشورهای اتحادیه اروپا و خارج از اتحادیه اروپا به دنبال روش‌های مختلف برای قانون‌گذاری تمام محصولات نانوفناوری و نیز محصولات مربوط به کشاورزی و مواد غذا هستند. اتحادیه اروپا و سوئیس، تنها مناطق جهان هستند که در آنها مقررات خاص مربوط به نانوفناوری در قانون مواد غذایی گنجانده شده است ولی هنوز در رابطه با مصرف نانو مواد در محیط زیست و از جمله خاک قانون مشخصی تدوین نشده است. در مناطق دیگر مقررات خاص مربوط به نانوفناوری بیشتر تلویحی بوده و به‌طور عمده برای صنعت مطرح شده است.

نانوفناوری شامل طیف وسیعی از فن‌آوری‌های مربوط به ساخت مواد در مقیاس ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است که می‌تواند به تغییرات چشمگیر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد منجر شود. نانوفناوری در حال حاضر در زمینه‌های متفاوت مانند دارو، علم مواد و الکترونیک کاربرد دارد. علاوه بر این، نانوفناوری در همه جا در محصولات مصرفی ما از منسوجات تا تجهیزات ورزشی و الکترونیکی وجود دارد. چشم‌انداز تأثیر نانوفناوری بر تولیدات کشاورزی نیز روشن است. نانو کودها می‌توانند یک نوآوری بزرگ برای کشاورزی باشند. در زمینه کشاورزی پایدار (تولید محصولات کشاورزی با کیفیت و کمیت مناسب بدون آسیب زدن به محیط زیست برای همیشه)، کاربرد نانوفناوری به‌عنوان یکی از روش‌های نویدبخش برای افزایش قابل‌توجه تولید غذای مورد نیاز جمعیت به‌سرعت در حال رشد جهان می‌باشد (لال ۲۰۰۸). نگرانی‌های مربوط به کارایی کم کودهای مرسوم (حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد) و گزینه‌های مدیریتی کم برای بهبود آن، ضرورت کاربرد نانوفناوری برای تحقیقات و توسعه کودها را آشکار می‌کند (دروسا و همکاران ۲۰۱۰).

ورود نانو کودها به داخل گیاهان

نانوکودها حامل‌های عناصر غذایی در ابعاد ۳۰

^۱ Nutrient use efficiency (NUE)

قهوه از ۲۱/۷ تا ۱۰۰ نانومتر بود (ایچرت و گولدباک ۲۰۰۸). یکی دیگر از این منافذ پلاسمودسماتاها^۴ هستند که موجب تسهیل نقل و انتقالات بین سلولی می‌شوند (زامبریسکی ۲۰۰۴). پلاسمودسماتاها کانال‌هایی نانو-مقیاس هستند که قطر متوسط آنها ۵۰ تا ۶۰ نانومتر است که در دیواره سلولی گیاهان وجود دارد و موجب انتقال و ارتباط بین دو سلول می‌شوند. نانوکودها به علت اندازه کوچک شاید بتوانند عناصر غذایی را به طور مؤثرتری به گیاهان عرضه کنند چون ممکن است دسترسی آن‌ها به سطوح گیاهی و کانال‌های حمل و نقل بیش تر باشد (ماستروناردی و همکاران ۲۰۱۵). نانوکودها همچنین می‌توانند حلالیت بیش تری نسبت به دیگر کودها داشته باشند که این ویژگی در نانوذرات بی‌شکل در انحلال ترکیبات کم محلول مشاهده شده است. این نانوذرات بی‌شکل سینتیک انحلال سریع‌تری نسبت به ذرات در ابعاد معمولی نشان می‌دهند و زیست‌فراهمی^۵ را بر اثر افزایش نقطه اشباع (غلظتی از ماده در فاز محلول که با فاز جامد آن در تعادل است) افزایش می‌دهند (چاهال و همکاران ۲۰۱۲). در نتیجه، انتظار می‌رود تولید نهاده‌های کودی با اندازه نانو اثری مفید بر کارایی کودها داشته باشد (ماستروناردی و همکاران ۲۰۱۵).

اثر برخی نانوکودهای عناصر غذایی کم‌مصرف بر رشد و تغذیه گیاهان

عناصر غذایی کم‌مصرف اغلب در مقادیر کم به کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم (که به مجموعه آنها کودهای مرکب گفته می‌شود) به‌عنوان نمک‌های محلول برای جذب توسط گیاهان افزوده می‌شود. در کودهای مرکب معمولاً مقدار عناصر غذایی کم‌مصرف کافی بوده و موجب کاهش خطرات محیطی می‌شود. با این حال، فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف بکار رفته و کارایی آنها در بعضی خاک‌های با pH قلیایی، درشت بافت یا با ماده

تا ۴۰ نانومتر (۱۰^{-۹} متر) هستند و توانایی حمل مناسب یون‌های عناصر غذایی را به‌علت سطح ویژه زیاد دارند (سوبرامانیان و همکاران ۲۰۱۵؛ دروسا و همکاران ۲۰۱۰). استفاده از نانوفناوری در تولید کودها ممکن است موجب رهایش بهینه و افزایش کارایی جذب عناصر غذایی موجود در کود شود که منجر به فواید اقتصادی و زیست-محیطی قابل توجهی می‌گردد (لیو و لال ۲۰۱۵). ساختارهای در اندازه نانومتر در بسیاری از جنبه‌های زیست‌شناسی گیاهی مهم هستند.

قطر منافذ دیواره سلول‌های گیاهی در محدوده ۵ تا ۲۰ نانومتر است (فلریچر و همکاران ۱۹۹۹). ریشه‌های گیاه که دروازه عناصر غذایی به گیاه هستند، در اندازه نانومتر بسیار متخلخل می‌باشند. منافذ موجود بر روی ریشه‌ها با چند ده نانومتر قطر، برای فرآیندهای انتقال یونی و مولکولی، مهم تشخیص داده شده است (کارپیتا و همکاران ۱۹۷۹). ممکن است نانوکودها از طریق این منافذ و یا توسط ترکیب با مولکول‌های انتقال-دهنده یا ترشحات ریشه و یا با استفاده از اندوسیتوز و یا کانال یون، جذب شوند (ریکو و همکاران ۲۰۱۱). سطح برگ نیز شامل منافذ و روزنه‌های کوتیکولی نانومقیاس و میکرو می‌باشد. یک مطالعه در رابطه با نفوذ ذرات پلی-استیرن فلورئورسنت با سطوح اصلاح شده با کربوکسیلات با دو اندازه مختلف (۴۳ نانومتر و قطر ۱/۱ میکرومتر) به‌صورت سوسپانسیون آب به برگ باقلا نشان داد که نانوذرات (و نه ذرات بزرگ‌تر) می‌تواند از طریق منافذ روزنه، به داخل برگ نفوذ کنند (ایچرت و همکاران ۲۰۰۸). در مطالعه‌ای دیگر زامبریسکی (۲۰۰۴) قطر منافذ در برگ گیاهان را بررسی و مشاهده کردند که منافذ روزنه‌ها و همین‌طور منافذ سطح برگ در ابعاد نانو هستند، اگرچه قطر آن‌ها دارای محدوده وسیعی بود. برای مثال شعاع منافذ مؤثر روزنه‌های سطح برگ (پوستک) گیاه قهوه^۱ در محدوده ۲ تا ۲/۴ نانومتر بود. متوسط شعاع منافذ روزنه‌های سطح برگ گیاه گیلاس^۲، باقلا^۳ و گیاه

³ *Vicia faba*

⁴ Plasmodesmatas

⁵ Bioavailability

¹ *Coffea arabica* L.

² *Prunus avium*

غلظت‌های مشابه (۲۵/۰ و ۵/۰ گرم بر لیتر) شد. به‌علاوه، نانوذرات آهن اثر مفید دیگر نانوکودها (نانوذرات منیزیم) بر لویبا چشم بلبلی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید. یک مطالعه جالب در مورد نانوذرات مغناطیسی آهن پوشانده شده با کربن توسط گونزالس و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده است که پتانسیل قابل‌توجه نانوذرات را برای کاربرد در گیاهان نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه امکان کاربرد طیف گسترده‌ای از نانوذرات مغناطیسی را در تحقیقات گیاهی و زراعت نشان داد و دلیل آن اینگونه بیان شد که نانوذرات می‌توانند با مواد مختلف (در ابتدای ورود به درون گیاهان) باردار شده و در صورت لزوم، در مناطق خاصی با استفاده از آهن ربا متمرکز شوند.

خاتر (۲۰۱۵) اثر محلول‌پاشی نانوذرات مگنتیت

بر رشد و ترکیب اسانس نعناع^۳ را مطالعه کرد. نتایج نشان داد که کاربرد نانوذرات مگنتیت رشد گیاه و اسانس گیاهان نعناع را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد که در غلظت ۱۵ میلی‌گرم در لیتر بیش‌ترین بود. ایشان بیان داشتند که بر اساس نظر دویی و همکاران (۲۰۰۳) هر افزایشی در کل کربوهیدرات‌های گیاه موجب افزایش زیست‌ساخت ترکیب اسانس می‌شود. هارسینی و همکاران (۲۰۱۴) اثرات محلول‌پاشی کلات نانوذرات آهن بر گندم را در شرایط مزرعه و در یک خاک با pH برابر ۷/۶ در کرمانشاه مطالعه کردند. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی کلات نانوذرات آهن اثرات قابل‌توجه و معنادار در سطح احتمال پنج درصد بر ارتفاع بوته، تعداد سنبل، وزن ۱۰۰۰ دانه، تعداد دانه در سنبل، شاخص برداشت، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه داشت. جوادی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۵) برای بررسی اثر محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف نانوکود کلات آهن و روی بر رشد و عملکرد گیاه خیار^۴، یک آزمایش گلخانه‌ای انجام دادند. بالاترین تعداد میوه و گل، کلروفیل و غلظت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در غلظت‌های دو میلی‌گرم در لیتر آهن و ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر روی به دست آمد. این

آلی کم ممکن است کم باشد (فاجریا ۲۰۰۹). برای مثال توفیقی و نجفی (۱۳۸۰) گزارش کردند که بازیابی روی با عصاره‌گیر DTPA پس از یک ماه مصرف سولفات روی در خاک‌های آهکی کمتر از پنج درصد بود. براساس برخی مطالعات، احتمالاً نانوکودهای عناصر غذایی کم مصرف زیست‌فراهمی این عناصر غذایی را برای گیاهان حتی در بدترین شرایط افزایش می‌دهند. توسعه علم و کاربرد نانوکودها هنوز در مراحل اولیه بوده و تعداد کمی از محققان برتری کاربرد نانوکودهای عناصر غذایی کم مصرف در شرایط مزرعه را گزارش کرده‌اند (لیو و لال ۲۰۱۵).

آهن

غفاریان و همکاران (۲۰۱۳) در آزمایشی گلخانه‌ای گزارش کردند که غلظت کم (۲/۰ تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر) نانوذرات آهن سوپرپارامغناطیسی در شرایط هیدروپونیک مقدار کلروفیل در برگ‌های زیررأسی^۱ سورگوم را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داد که نشان می‌دهد که این نوع نانوذرات آهن می‌تواند به‌عنوان کود آهن برای سورگوم استفاده شده و نشانه‌های زردی ناشی از کمبود آهن را کاهش دهد. تأثیر کاربرد نانوذرات آهن بر گیاهان مشابه تأثیر آهن از منبع Fe-EDTA با غلظت ۳۰ تا ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر بود. خاصیت سوپرپارامغناطیسی مربوط به نانوذرات بوده و به موادی اتلاق می‌شود که در حضور میدان مغناطیسی خارجی خاصیت مغناطیسی دارند و در نبود میدان مغناطیسی خارجی خاصیت مغناطیسی ندارند. دلفانی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که محلول‌پاشی نانوذرات آهن با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برای لویبا چشم سیاه^۲ تعداد غلاف (۴۷ درصد)، وزن هزار دانه (هفت درصد)، مقدار آهن برگ‌ها (۳۴ درصد) و مقدار کلروفیل (۱۰ درصد) را به‌طور قابل‌توجهی نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین، کاربرد نانوذرات آهن موجب عملکرد بیش‌تر محصول نسبت به کاربرد آهن معمولی با

^۳ *Mentha piperita L.*

^۴ *Cucumis sativus L.*

^۱ Sub-apical leaves

^۲ *Hassk vigna sinensis (L.) savi. Ex*

تجمع داده و نگه می‌دارند و تنها درصد کمی را به قسمت‌های بالایی گیاه انتقال می‌دهند (ویتوریا و همکاران ۲۰۰۱؛ پیرا و همکاران ۲۰۰۲).

بقایبی و ملکی‌فراهانی (۱۳۹۲) برای بررسی اثر کود آهن با بنیان‌های متفاوت نانو و میکرو بر عملکرد کمی و تخصیص مواد فتوسنتزی زعفران زراعی^۴ آزمایشی در مزرعه انجام دادند. فاکتورهای آزمایش شامل دو نوع کود نانوکلات آهن و کلات معمولی^۵ بود. نتایج نشان داد که کود آهن با بنیان نانو نسبت به میکرو مؤثرتر بود؛ به نحوی که در بیش‌تر صفات تیمار پنج کیلوگرم نانوکلات معادل ۱۰ کیلوگرم کود کلات معمولی بود که علت آن را کارایی بیش‌تر نانوکلات آهن دانستند. از طرفی فقیر بودن مزرعه از نظر محتوی آهن (۰/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) از یک طرف و کارایی نانوکلات در رهایش تدریجی از طرف دیگر به احتمال زیاد منجر به افزایش عملکرد گردید. بهبود عملکرد توسط نانوکلات نسبت به کلات معمولی می‌تواند ناشی از کارایی کلات با ساختار نانو در رسانش و فراهمی بهینه عنصر آهن در فرآیندهای فیزیولوژیکی باشد. احتمالاً با فعال شدن فرآیندهای فیزیولوژیکی تشکیل کلروفیل افزایش یافته که در پی آن بهبود فرآیند فتوسنتز اتفاق می‌افتد و نهایتاً منجر به افزایش تعداد برگ زعفران‌های تیمار شده با نانوکلات می‌شود. این نتایج با تحقیقات حکم‌آبادی و همکاران (۲۰۰۶) و ملکی‌فراهانی و عقیقی‌شاهوردی (۱۳۹۴) مطابقت داشت. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بالاترین عملکرد کالاه خشک و پدازه^۶ تولیدی با کاربرد ۱۰ کیلوگرم نانوکلات آهن به دست آمد. این کود نانوکلات ضمن حصول عملکرد بالا احتمالاً به‌علت افزایش شدت فتوسنتز ناشی از جذب بیش‌تر آهن منجر به تولید پدازه با وزن بالا شده است. بیاتی و همکاران (۱۳۹۳) برای بررسی تأثیر محلول‌پاشی کود آهن نانو بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کلزا^۷ آزمایشی مزرعه‌ای در

مطالعه نشان داد که محلول‌پاشی نانوکود کلات آهن و روی می‌تواند رشد و عملکرد این گیاه را بهبود بخشد.

مطالعاتی در رابطه با زیست‌فراهمی نانوذرات همانیت بر روی گیاه آرابیدوپسیس تالیانا^۱ توسط ماروسنکو و همکاران (۲۰۱۳) در ایالت آریزونا، آمریکا در گلخانه انجام شده است. در این مطالعه گیاه آرابیدوپسیس تالیانا در بستر آگار با سه تیمار مختلف آهن کشت شد که این تیمارها شامل تیمار نانوذرات Fe_2O_3 ، آهن کلات شده با اتیلن‌دی‌آمین‌تترا استیک اسید (EDTA-Fe) و شاهد (بدون آهن) بود. تیمار EDTA-Fe بالاترین غلظت کلروفیل را در گیاهان نسبت به دو تیمار دیگر داشت و تیمارهای نانوذرات Fe_2O_3 و شاهد از این نظر مشابه بودند. با توجه به این نتایج پیشنهاد شد که نانوذرات Fe_2O_3 برای تولید کلروفیل بکار نمی‌روند. غلظت مشابه آهن در دو تیمار نانوذرات Fe_2O_3 و شاهد نشان داد که گیاه آرابیدوپسیس تالیانا قادر به جذب EDTA-Fe بوده ولی نانوذرات Fe_2O_3 را جذب نمی‌کند. بنابراین، نویسندگان پیشنهاد کردند که نانوذرات فاقد زیست‌فراهمی بودند.

بیسترزجوسکا-پیوتروسکا و همکاران (۲۰۱۲) ظرفیت تجمع نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) را در دو گیاه شاهی^۲ و نخود فرنگی^۳ مورد ارزیابی قرار دادند. نانوذرات حاوی ^{59}Fe بود که به‌عنوان یک ردیاب برای تعیین مسیر نانوذره در جاندار بکار رفت و توسط اسپکترومتری گاما اندازه‌گیری شد. این دو گونه گیاهی ظرفیت تجمع نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) را با بیش از ۹۰ درصد در ریشه‌ها به علت جذب سطحی قوی نشان دادند (تقریباً ۳۹/۵ گرم نانوذرات اکسید آهن بر کیلوگرم وزن خشک ریشه در گیاه نخودفرنگی و ۷/۸ گرم بر کیلوگرم در گیاه شاهی). این نتایج جالب هستند چون هنگامی که به تجمع فلزات سنگین در گیاهان توجه شود، گونه‌های گیاهی بسیار زیادی فلزات را در سیستم ریشه

^۴ *Crocus sativus L.*

^۵ EDDHSA

^۶ Corm

^۷ *Brassica napus L.*

^۱ *Arabidopsis thaliana*

^۲ *Lepidium sativum*

^۳ *Pisum sativum L.*

نانو و معمولی آزمایشی مزرعه‌ای اجرا کردند. نتایج نشان داد که اثر غلظت‌های مختلف نانو اکسید آهن بر میزان سدیم، آهن برگ، فسفر غده و عملکرد در هکتار، اثر مراحل محلول‌پاشی بر میزان پتاسیم و عملکرد غده در هکتار و اثر متقابل این عوامل بر غلظت آهن غده سیب زمینی معنادار بود. ضمن آنکه اثر عامل‌های فوق روی غلظت کلسیم غده غیر معنادار بود. نتایج مقایسه میانگین اثر غلظت نانو اکسید آهن نشان داد که بیشترین مقادیر سدیم و فسفر غده در تیمار شاهد بدون مصرف کود آهن، بیشترین آهن برگ در تیمار شاهد با مصرف کود آهن معمولی و بیشترین عملکرد غده در هکتار در غلظت دو درصد نانو اکسید آهن حاصل شد.

مقایسه میانگین اثر متقابل عوامل فوق نیز نشان داد که ترکیب تیماری غلظت دو درصد نانو اکسید آهن با محلول‌پاشی در زمان پر شدن غده بیشترین غلظت آهن غده را به خود اختصاص داد. آنان بیان داشتند با توجه به اینکه خاک محل آزمایش دارای pH بالایی بود و در چنین وضعیتی گیاه از نظر عناصر غذایی در تعادل نمی‌باشد و کمبود عناصر ضروری نظیر آهن مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد گیاهان تیمار شده با نانو اکسید آهن وضعیت تغذیه‌ای متعادلی داشته‌اند. این امر سبب بهبود سیستم فتوسنتزی گیاه شده که نتیجه آن تولید انرژی بیشتر می‌باشد و از این طریق غلظت عناصری مانند پتاسیم را که به صورت فعال و با صرف انرژی جذب گیاه می‌شوند را افزایش داده است و چون در جذب پتاسیم و سدیم در گیاه رقابت وجود دارد با مهیا بودن انرژی کافی در گیاه جذب پتاسیم افزایش یافته و موجب کاهش سدیم در غده گردیده است. مظاهری‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی با هدف بررسی تأثیر و مقایسه اکسید آهن دو و سه ظرفیتی با کانی غالب هماتیت در دو نوع نانو (شکل ۱) و معمولی همراه با کود کمپوست زباله شهری گرانوله گوگردی بر مقدار منگنز و روی و مس گیاه گندم، آزمایشی در گلخانه اجرا کردند. با افزایش مقادیر اکسید آهن مقدار منگنز گیاه روند کاهشی داشت که این کاهش

در اهواز در یک خاک لومی رسی با pH برابر با ۷/۴ انجام دادند. در بین تیمارهای کود آهن، بیش‌ترین عملکرد دانه (۴/۱۳ تن در هکتار) با کاربرد آهن نانو با غلظت شش گرم در لیتر به دست آمد که بهبود عملکرد دانه، نتیجه بهبود تعداد خورجین و وزن هزار دانه بود. در مجموع نتایج این آزمایش نشان داد که کلزا گیاهی است که به کمبود آهن حساس بوده و کاربرد آهن به شکل نانو حتی در غلظت‌های بالا اثر مثبتی بر عملکرد دانه و درصد روغن خواهد داشت.

پیوندی و همکاران (۱۳۹۰) تحقیقی برای بررسی و مقایسه اثر نانوکود کلات آهن و کود کلات آهن معمولی بر عملکرد و رشد گیاه دارویی مرزه^۱ آزمایشی در مزرعه انجام دادند. فعالیت کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در تیمار نانو آهن (۴/۵ کیلوگرم بر هکتار) افزایش معناداری را نشان داد. کاربرد کلات آهن در غلظت ۱/۵ کیلوگرم بر هکتار و همه غلظت‌های نانو آهن موجب افزایش معنادار غلظت کلروفیل a شد. کاربرد نانوکود آهن در افزایش میزان کلروفیل b مؤثرتر از همه غلظت‌های کلات آهن بود. کلات آهن، موجب کاهش و نانوکود کلات آهن موجب افزایش میزان مجموع کلروفیل‌های a و b شد. نتایج فوق در این بررسی به نقش آهن در گیاهان نسبت داده شد. پیوندی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای دیگر با همین شرایط کمیت و کیفیت اسانس گیاه ریحان^۲ را در مزرعه مورد بررسی قرار دادند. به‌طور کلی آنان بیش‌ترین وزن تر و خشک و تعداد برگ‌ها را در تیمار یک کیلوگرم بر هکتار نانوکود کلات آهن و ۷/۵ کیلوگرم در هکتار کود کلات آهن گزارش کردند که از لحاظ آماری تفاوت معناداری بین آنها نبود. همچنین بیش‌ترین میانگین محتوای اسانس و بازده اسانس نیز در این تیمارها بود. بنابراین شاید بتوان از این نانوکلات‌های آهن در غلظت‌های بسیار کمتر (۷/۵ برابر کمتر) برای رسیدن به عملکرد مطلوب استفاده کرد. برقی و همکاران (۱۳۹۳) برای بررسی محلول پاشی اکسید آهن

^۱ *Satureja hortensis*

^۲ *Ocimum basilicum L.*

بیشتر آنها می‌باشد.

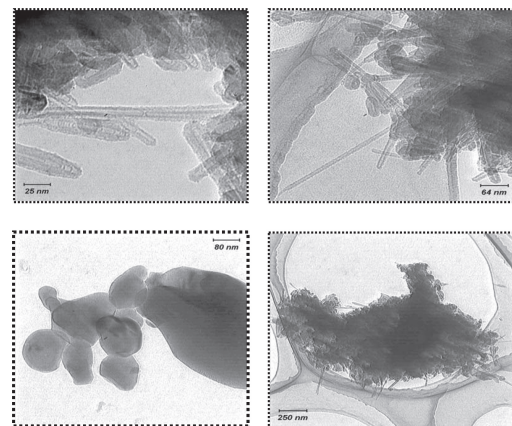
منگنز

پرادهن و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که نانوذرات منگنز فلزی منبع بهتری از منگنز نسبت به نمک سولفات منگنز ($MnSO_4$) که عموماً در دسترس است، بود. آنان مشاهده کردند که نانوذرات منگنز رشد نوعی لوبیا^۱ را افزایش داد و فتوسنتز را بهبود بخشید. دانه‌های لوبیا به مدت ۱۵ روز در بستر پرلیت در اتاق رشد پرورش یافته و با محلول غذایی هوگلند^۲ (هوگلند و آرنون ۱۹۵۰) تغذیه شدند. تیمار نانوذرات منگنز با غلظت ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین رشد را نشان داد و موجب افزایش طول ریشه (۷۱ درصد)، طول بخش هوایی (۳۸ درصد)، تعداد ریشه‌چه‌ها (۷۱ درصد)، زیست‌توده تر (۳۸ درصد) و زیست‌توده خشک (۱۰۰ درصد) نسبت به شاهد (بدون منگنز) شد. در مقایسه با دانه‌های تیمار سولفات منگنز این پارامترها در تیمار نانوذرات منگنز به ترتیب ۲، ۱۰، ۲۸، ۸ و ۱۰۰ درصد افزایش داشتند. به‌طور قابل‌توجهی کاربرد سولفات منگنز اثر بازدارندگی بر رشد گیاه در غلظت یک میلی‌گرم بر لیتر نشان داد در حالی‌که در این غلظت از نانوذرات پاسخ گیاه هنوز مثبت بود.

روی

نانوذرات اکسید روی (ZnO) یکی از پرکاربردترین نانوذرات اکسید فلزی است که در صنعت برای چندین دهه استفاده شده است. بنابراین، تأثیر نانوذرات روی بر گیاهان و دیگر جانداران بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است (لیو و لال ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی با تابش لیزر با نور قرمز منجر به افزایش عملکرد نسبت به کاربرد نانوذرات اکسید روی (ZnO) شد (ایلکرتی و همکاران ۲۰۱۴). این نشان می‌دهد که استفاده از ویژگی‌های الکترونیکی

در نانو اکسید آهن نسبت به اکسید آهن معمولی بیشتر بود. این احتمالاً به دلیل حلالیت بیشتر آهن نانو اکسید آهن نسبت به اکسید آهن معمولی بود که باعث ایجاد رقابت بین جذب آهن و منگنز توسط گیاه شد. در حالی‌که مقدار روی و مس گیاه روند افزایشی نشان داد که احتمالاً به دلیل اسیدی بودن پودر اکسید آهن و ایجاد شرایط اسیدی در خاک توسط پودرهای اسیدی و افزایش جذب آنها در خاک می‌باشد. اثر متقابل کود کمپوست و دو نوع اکسید آهن بر غلظت این عنصر نشان داد غلظت آنها در تیمار حاوی اکسید آهن نانو و کود کمپوست نسبت به اکسید آهن معمولی و کود کمپوست کمتر است که احتمالاً به دلیل حلالیت بیشتر آهن در تیمار حاوی نانو اکسید آهن و اشغال سایت‌های عمومی ریشه و رقابت آنها با آهن برای جذب این عناصر می‌باشد (مظاهری‌نیا و همکاران ۱۳۹۱).



شکل ۱- بزرگنمایی ذرات نانو اکسید آهن با میکروسکوپ TEM (با بزرگنمایی ۸۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر) (مظاهری‌نیا و همکاران ۱۳۹۱)

مظاهری‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. گیاهان تیمار شده با نانو اکسید آهن دو و سه ظرفیتی با کانی غالب هماتیت حاوی آهن دو و سه ظرفیتی بودند که این احتمالاً به این دلیل بود که نانو اکسید آهن بر اثر کوچک بودن ذرات کمپلکس‌های بیش‌تری نسبت به اکسید آهن معمولی با کود کمپوست تشکیل می‌شود و در نتیجه حلالیت آهن و جذب نیز بیش‌تر می‌شود. این احتمالاً به دلیل خاصیت نانوذرات و حلالیت

¹ *Vigna radiata*

² Hoagland solution

منحصر به فرد فرمول کودی نانوذرات می‌تواند یک استراتژی مؤثر باشد. بررسی دیگری بر روی کلم، کلم گل، گوجه فرنگی نشان داد که نانو اکسید روی باعث افزایش جوانه‌زنی بذر شد در حالی که اکسید روی معمولی مورد استفاده تأثیر منفی بر جوانه‌زنی داشت. تیمارهای نانو موجب افزایش رنگدانه‌ها، مقدار پروتئین و قند و فعالیت‌های نیترات ریداکتاز و دیگر آنزیم‌های آنتی اکسیدانت شد (سینگ و همکاران ۲۰۱۳). در یک مطالعه، قرار دادن نخود در معرض نانو اکسید روی، علاوه بر افزایش جوانه‌زنی و رشد ریشه، سطوح بالاتری از هورمون رشد گیاه (ایندول استیک اسید (IAA)) را به دنبال داشت (پندی و همکاران ۲۰۱۰). در حالی که مطالعات مختلف اثرات مثبت نانو اکسید روی بر عملکرد دانه را نشان داده است، از دیگر مزیت‌های مورد انتظار از اندازه نانو این عنصر غذایی غفلت شده است. به عنوان مثال، در بررسی جذب روی توسط گیاه با استفاده از انواع مواد حاوی روی، از جمله اکسید روی با ابعاد ۴۰ نانومتر، اشاره شد که استفاده از شکل نانو در مقایسه با تیمار روی معمولی، منجر به افزایش مقدار روی در ریشه نمی‌شود (واتس-ویلیامس ۲۰۱۴). نتایجی که در رابطه با سطوح و فعالیت آنزیم IAA پس از کاربرد نانو اکسید روی گزارش شده است، نشان می‌دهد که عناصر غذایی و فاکتورهای فیزیولوژیکی (به تنهایی یا ترکیبی از آنها) می‌توانند به توضیح اثرات آن بر رشد گیاه کمک کنند. تحقیقات بیش تر برای تعیین سازوکارهای دقیقی که توسط آن کودهای عناصر غذایی کم مصرف رشد گیاه و سوخت و ساز آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند، لازم است (ماستروناردی و همکاران ۲۰۱۵).

ژائو و همکاران (۲۰۱۳) در یک بررسی گلخانه-ای گزارش کردند که کاربرد ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نانوذرات اکسید روی (ZnO) در خاک رشد خیار را افزایش داد. نتایج نشان داد که وزن خشک ریشه گیاه ۱۱ و ۱۶ درصد نسبت به شاهد بیش تر بود؛ اگرچه وزن خشک میوه‌ها افزایش کمی (۰/۶ و ۶ درصد) در

مقایسه با شاهد داشتند. همچنین کاربرد نانوذرات اکسید روی مقدار نشاسته، گلوکلین و روی در میوه‌های خیار برداشت شده را افزایش داد. به علاوه، تأثیر مضر از نانوذرات اکسید روی در رابطه با هیچ یک از پارامترهای رشد مشاهده نشد (ژائو و همکاران ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴). لین و ایکسینگ (۲۰۰۷) گزارش کردند که کاربرد دو میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات ZnO موجب افزایش طول جوانه‌های بذرهای تربچه^۱ و گیاه راپ^۲ در مقایسه با شاهد (که تنها با آب دیونیزه آبیاری شده بودند) شد و تیمار دو میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات فلزی روی، رشد دانه‌های علف چاودار^۳ را بهبود بخشید. استفاده از نانوذرات روی در غلظت‌های بیش از حد بهینه اثر سمیت بر دانه‌ها داشت. با این حال سمیت نانوذرات اکسید روی در بسیاری از مطالعات در غلظت‌های بسیار بالای نانوذرات روی (۴۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) در گیاهان مشاهده شده است (لی و همکاران ۲۰۱۰؛ لین و ایکسینگ ۲۰۰۷؛ لویز-مورنو و همکاران ۲۰۱۰؛ ژائو و همکاران ۲۰۱۴). حتی کاربرد ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات روی نیز برای نشان دادن اثرهای مفید بر رشد گیاهان بسیار زیاد است (لین و ایکسینگ ۲۰۰۸). چون بیش تر گیاهان فقط به ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر روی در محلول خاک برای رشد معمولی نیاز دارند، بنابراین، کاربرد سطوح بالای روی ممکن است منجر به سمیت در گیاه شود (لیو و لال ۲۰۱۵).

هرناندز-ویزکاس و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی اثرات نانوذرات اکسید روی (ZnO) بر کهور مخملی^۴ در ۱۵ روز کشت هیدروپونیک با استفاده از نانوذرات اکسید روی نشان دادند که گیاهان روی را از نانوذرات جذب کرده و آزمایشات بیوشیمیایی نشان داد که حضور ZnO موجب افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز (در ریشه، ساقه و برگ‌ها) و کاتالاز (تنها در برگ‌ها) شد. هیچ مدرکی از کلروز، نکروز، کوتولگی یا پژمردگی، حتی پس از ۳۰ روز از شروع آزمایش، مشاهده نشد که نشان می‌-

¹ *Raphanus sativus*

² *Brassica napus*

³ *Lolium perenne*

⁴ *Prosopis juliflora velutina*

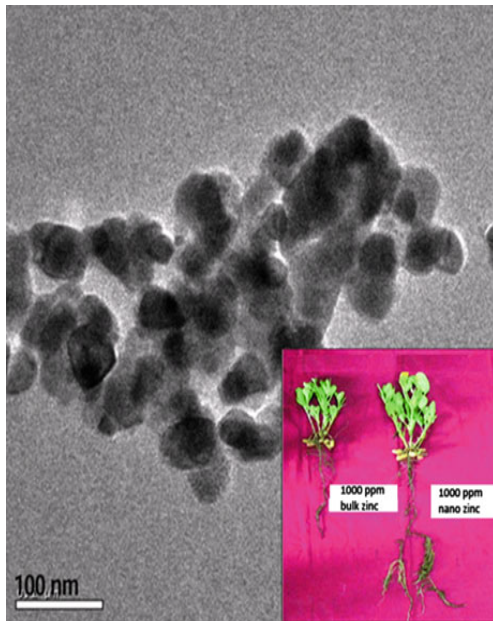
بذر، افزایش قدرت بوته، و مقدار کلروفیل و همچنین رشد ساقه و ریشه شد (پراسادا و همکاران ۲۰۱۲). همچنین نانوذرات ZnO موجب افزایش طول ریشه گیاه سویا^۲ در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر شدند اما در غلظت‌های بیش‌تر موجب کاهش اندازه آن شد (لوپز-مورنو و همکاران ۲۰۱۰). در یک مطالعه تأثیر نانوذرات ZnO با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر بر روی کیفیت میوه گیاه خیار بررسی و مشاهده شد که این نانوذره موجب افزایش مقدار نشاسته شد (ژائو و همکاران ۲۰۱۴). آزادزاده و همکاران (۲۰۱۵) در یک بررسی اثر محلول‌پاشی کودهای معمولی و نانوی ZnO و SiO₂ را بر شاخص‌های رشد گیاه آفتابگردان تحت تنش کمبود آب در شرایط مزرعه در بیرجند مطالعه کردند. در نهایت آنان محلول‌پاشی ZnO معمولی را توصیه کردند زیرا محلول-پاشی کود معمولی ZnO موجب افزایش قطر طبق، عملکرد دانه و شاخص برداشت دانه در طبق آن به ترتیب به میزان ۱۰/۲، ۵۹/۷، ۳۶/۵ و ۲۳/۴ درصد شد. در ضمن آنان تفاوت معناداری در شاخص‌های رشد گیاه آفتابگردان با استفاده از تیمار کودهای نانو و معمولی مشاهده نکردند. کمری و سیدشرفی (۱۳۹۴) برای بررسی تأثیر نانو اکسید روی و تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد گیاه بر عملکرد و سرعت و طول دوره پر شدن دانه تریتیکاله، آزمایشی در گلخانه اجرا کردند.

نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد، اجزای عملکرد و سرعت و طول دوره پر شدن دانه با کاربرد یک گرم در لیتر نانو اکسید روی در تلقیح بذر با ازتوباکتر و کمترین آنها در عدم تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد و عدم محلول‌پاشی با نانو اکسید روی به دست آمد. آنان اذعان داشتند که استفاده از کودهای بیولوژیک و روی، روشی بسیار مناسب و ارزان برای افزایش عملکرد تریتیکاله است. از این رو، پیشنهاد کردند که برای افزایش عملکرد دانه و طول دوره پر شدن دانه، تلقیح بذر تریتیکاله با ازتوباکتر به همراه محلول‌پاشی یک گرم در

دهد که این گیاه نسبت به سطح معینی از نانوذرات اکسید روی و روی آزاد شده از نانوذرات متحمل است. عدم حضور نانوذرات اکسید روی در بافت گیاه تأیید شد ولی روی به شکل Zn²⁺ حضور داشت که نشان دهنده تغییر شکل نانو اکسید روی پس از جذب توسط گیاه بود. مهاجان و همکاران (۲۰۱۱) از بستر رشد آگار برای بررسی تأثیر نانوذرات ZnO بر رشد نوعی لوبیا و نخود استفاده و گزارش کردند که نانوذرات ZnO بر سطح ریشه جذب سطحی شدند و جوانه‌ها نیز آنها را جذب کردند. همچنین آنان نشان دادند که گیاهان در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اکسید روی بیش‌ترین رشد را داشتند اما بعد از این غلظت رشد گیاهان کاهش یافت. بورمن و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از محلول‌پاشی تأثیر نانوذرات ZnO را بر رشد و سیستم آنتی‌اکسیدانی جوانه‌های نخود مطالعه کردند. آنان دریافتند که غلظت‌های کمتر نانوذرات ZnO (۱/۵ میلی‌گرم در لیتر) تأثیر مثبتی بر رشد جوانه‌های نخود داشت. به علاوه، در جوانه‌ها تیمار شده با نانوذرات ZnO زیست توده افزایش یافت که ممکن است به علت سطوح کمتر گونه‌های فعال اکسیژن به‌عنوان مثال مقدار کمتر مالون‌دی‌آلدئید باشد. پراسادا و همکاران (۲۰۱۲) نیز مشاهده کردند که رفتار نانوذرات روی در غلظت‌های کمتر (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) تأثیر مثبت بر گیاه بادام زمینی^۱ داشته است اما نشانه‌های سمیت را در غلظت‌های بالاتر (۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) نشان داد که به معنی استفاده خیلی دقیق از آن است.

به‌علاوه، آنان گزارش کردند طی آزمایشات مزرعه‌ای استفاده از نانوذرات ZnO با غلظت ۱۵ برابر کمتر از ZnSO₄ ۲۹/۵ درصد عملکرد غلاف‌ها را افزایش داد. تأثیر نانوذرات اکسید روی (ZnO) بر جوانه‌زنی، رشد و عملکرد بادام‌زمینی توسط پراسادا و همکاران (۲۰۱۲) ارزیابی شد. شکل ۲ یک تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانو اکسید روی اعمال شده به بذر بادام زمینی را نشان می‌دهد که استفاده از آن موجب جوانه‌زنی بیش‌تر

² *Glycine max L.*¹ *Arachis hypogaea*



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نانوذرات ZnO که در مطالعه گیاه بادام زمینی استفاده شده است

براساس نتایج این پژوهش، محلول پاشی روی به صورت نانوذرات نسبت به اکسید روی معمولی تأثیر بیشتری بر کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه ماش نشان داد. آنان اذعان داشتند که نانوذره اکسید روی نسبت به اکسید روی معمولی، به دلیل ثبات و پایداری بالا، بیش تر در اختیار گیاه قرار گرفته و در تشکیل دانه بیشتر از غلاف مؤثر بوده است. در توجیه کارایی بهتر ذرات نانواکسید روی نسبت به اکسید معمولی باید به ساختار نانوذرات اشاره کرد، از آنجایی که ذرات نانو دارای ابعاد بسیار ریزی هستند لذا سطح ویژه بالایی دارند که این امر واکنش پذیری و تحرک بالاتری در گیاه ایجاد می کند و باعث می شود محلول کود روی با سرعت و همگنی بالاتر در گیاه توزیع شود، مجموعه این دلایل افزایش پارامترهای مؤثر در اجزای عملکرد را به دنبال دارد و به طور ویژه در شرایط وقوع تنش از گیاه در برابر آسیب های جدی محافظت می کند (علی نژاد ۱۳۸۴؛ نایر و همکاران ۲۰۱۰).

پندی و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که مصرف نانوذرات اکسید روی از طریق افزایش سطح ایندول استیک اسید در ریشه نخود موجب افزایش رشد

لیتر نانو اکسید روی به کار برده شود. سید شریفی و همکاران (۱۳۹۴) برای بررسی تأثیر تنش شوری و محلول پاشی با نانو اکسید روی بر عملکرد تک بوته و برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک جو^۱، آزمایشی گلخانه ای اجرا دادند. نتایج نشان داد که بالاترین عملکرد تک بوته (۱/۲۲ گرم)، طول دوره پر شدن دانه (۳۰/۶۷ روز)، حداکثر وزن دانه (۰/۰۲۴۴)، محتوای کلروفیل (۵۳/۲) و هدایت روزنه ای (۲۳/۷ میلی مولار در متر مربع در ثانیه) در محلول پاشی ۰/۷۵ گرم در لیتر نانو اکسید روی و عدم اعمال شوری و کمترین آنها در عدم محلول پاشی و بالاترین سطح شوری بود. نتایج آنان نشان داد که برای افزایش عملکرد در شرایط شور محلول پاشی ۰/۷۵ گرم در لیتر نانو اکسید روی مفید است. محلولی و همکاران (۱۳۹۳) برای بررسی تأثیر شوری آب آبیاری و محلول پاشی کودهای نانو و کلات روی بر مؤلفه های فتوسنتزی ژنوتیپ های جو، آزمایشی مزرعه ای انجام دادند. تیمار نانوکود روی حداکثر و کلات روی حداقل هدایت روزنه ای را داشتند. هدایت مزوفیلی با سرعت فتوسنتزی همبستگی مثبت و معنادار و با صفت میزان کربن دی اکسید زیر روزنه ای، همبستگی منفی و معناداری داشت. آنان مزیتی برای نانوکود اکسید روی بیان نکردند و نتایج فوق را به علت تغذیه گیاه با روی دانستند و تنها حسن این کود شاید استفاده از مقدار کمتر کود در مقایسه با شکل کلات روی بود.

افزایش نمادین رشد ریشه گیاه بادام زمینی بعد از تیمار با نانو اکسید روی (در سمت راست تصویر: ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر) بعد از ۱۱۰ روز در مقایسه با روی معمولی (در سمت چپ تصویر: ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر) در همان دوره زمانی (پراساد و همکاران ۲۰۱۲).

شجاعی و مکاریان (۱۳۹۳) برای بررسی اثرات محلول پاشی اکسید روی در دو اندازه نانو و غیر نانو بر عملکرد و اجزای عملکرد ماش^۲ تحت تأثیر کمبود آب آزمایشی انجام دادند.

^۱ *Hordeum vulgare L.*

^۲ *Vigna radiata L.*

نشان داد گونه‌های نانو موجب کاهش شدت فتوستنز خالص (۲۲ و ۳۰ درصد) و کاهش شدت تعرق (۱۱ و ۱۷ درصد) در برگ دانه‌هایی که با نانوذرات CuO و CeO_2 با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تیمار شده بودند، در مقایسه با تیمار شاهد شد که می‌تواند به علت مسدود کردن روزنه توسط این ترکیبات باشد. نانوذرات CuO با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، CeO_2 در اندازه میکرو با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و تمام تیمارهای مس به جز تیمار نانوذرات CuO با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر موجب کاهش قابل‌ملاحظه استحکام میوه در مقایسه با شاهد شد. با این حال تیمارهای نانوذرات CeO_2 با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و CuO میکرومقیاس با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌طور قابل‌توجهی وزن تر میوه را افزایش دادند. در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تیمارهای CeO_2 نانومقیاس و CeO_2 میکرومقیاس موجب کاهش ۲۵ درصدی مقدار روی در میوه، تیمارهای CuO نانومقیاس و CuO میکرومقیاس موجب کاهش به ترتیب ۵۱ و ۴۴ درصدی مقدار مولیبدن در میوه در مقایسه با شاهد شدند. این مطالعه نشان داد هنگامی که روش محلول‌پاشی بکار رود تأثیر تفاوت اندازه ذرات کمتر از زمانی است که این مواد بر پایه جذب از طریق ریشه بکار می‌روند. آنان بیان داشتند که برای توجیه این تأثیرات به مطالعات بیشتری نیاز است.

مولیبدن

تاران و همکاران (۲۰۱۴) رفتار نانوذرات مولیبدن را به‌عنوان منبع عنصر غذایی کم‌مصرف مولیبدن برای نخود مورد بررسی قرار دادند. بررسی میکروبیولوژی ریزوسفر نخود نشان داد که ترکیب باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن و نانوذرات مولیبدن موجب بیش‌ترین توسعه در تمام گروه‌های ریزجانداران با ارزش کشاورزی با دو تا سه برابر افزایش نسبت به شاهد و دیگر تیمارها شد. این نتیجه نشان داد که این ترکیب تیماری بهینه برای تغذیه ریشه گیاه برای تأمین مولیبدن و بهبود حاصلخیزی

این گیاه گردید. با توجه به قطر نانوذرات انتظار می‌رود سرعت جذب، انتقال و تجمع ذرات نانو بسیار بیش‌تر از ذرات معمول باشد (ترابیان و زاهدی ۱۳۹۲). بالا بودن کارایی جذب و سطح مخصوص ذرات نانو در مقایسه با ذرات معمول، اثرگذاری بیش‌تر این ذرات را می‌تواند توجیه کند (مونیکا و کرمونین ۲۰۰۹). لذا، افزایش عملکرد تحت تأثیر محلول‌پاشی روی بخصوص از نوع نانوذرات اکسید روی در شرایط تنش و عدم تنش دور از انتظار نبود (شجاعی و مکاریان ۱۳۹۳).

مس

در یک مطالعه، نوعی گیاه آبی^۱ در غلظت ۰/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات مس رشد یافت و شدت فتوستنز گیاهان ۳۵ درصد نسبت به شاهد (بدون مس) افزایش یافت (نکراسوا و همکاران ۲۰۱۱). شاه و بلوزروا (۲۰۰۹) گزارش کردند که تیمار خاک با نانوذرات فلزی مس با غلظت ۱۳۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم موجب افزایش قابل‌توجه رشد دانه‌های کاهو در کشت ۱۵ روزه به‌ترتیب ۴۰ درصد و ۹۱ درصد شد اما در غلظت-های بیش‌تر (۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، نانوذرات فلزی مس اثرات سمی بر رشد دانه‌های لوبیا، گندم و کدوی زرد^۲ داشت (لی و همکاران ۲۰۰۸، مونسات و وایت ۲۰۱۲). ستمپولیس و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که کاربرد ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات فلزی مس، زیست‌توده کدوی سبز^۳ را ۹۰ درصد نسبت به شاهد (بدون مس) بعد از ۱۴ روز رشد در محلول هوگلند، کاهش داد. به هر حال غلظت بهینه مس برای رشد گیاه تنها ۰/۰۲ میلی‌گرم بر لیتر بوده و می‌تواند در غلظت‌های بالاتر مس برای گیاه سمی باشد (لیو و لال ۲۰۱۵).

هانگ و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر محلول‌پاشی ذرات میکرو و نانو مقیاس CuO و CeO_2 را بر کیفیت میوه خیار در یک آزمایش گلخانه‌ای بررسی کردند. نتایج

¹ *Elodea Densa planch*

² *Cucurbita pepo subspecies ovifera cv yellow crookneck*

³ *Cucurbita pepo cv costata romanesco*

تا ۲۰۰۸ از ۱/۹ شخص بر هکتار به ۴/۳ شخص بر هکتار افزایش یافته است. این افزایش ابتدا به علت اختراع و کاربرد کودهای معدنی ساخته شده خصوصاً کودهای نیتروژن بود (ارسیمن و همکاران ۲۰۰۸). این روند افزایشی نشان می‌دهد که توسعه و استفاده از نوع جدیدی از کود یکی از محدود گزینه‌های عملی تغذیه جمعیت ۹/۶ میلیاردی یا بیش‌تر جهان در سال ۲۰۵۰ بدون خطر جدی برای اکوسیستم و محیط‌زیست است. بنابراین، شناسایی و کاربرد فناوری‌های نوین در دسترس در پژوهش و توسعه کود ضروری است.

نانوفناوری توانسته است تحولی در صنعت کودها ایجاد کند که هنوز در مراحل اولیه و آزمایشگاهی است. محققان زیادی اثرات مثبت در رشد گیاهان مختلف با استفاده از این کودها را گزارش کرده‌اند. همچنین نمی‌توان مزایای نانوکودها و اثرات مثبت آنها در کاهش مصرف کودهای مرسوم و افزایش کارایی مصرف کودها را نادیده گرفت. بنابراین، ضروری است برای آگاهی بیش‌تر از مزایای استفاده از نانوکودها در مقایسه با کودهای مرسوم، شناخت سازوکارهای نانوکودها در محیط زیست و موجودات زنده و گیاهان و سرنوشت مصرف نانوکودها پژوهش‌ها ادامه یابد.

رهیافت‌های ترویجی

به نظر می‌رسد توصیه این نوع کودها برای استفاده کلان عجلولانه بوده و هنوز نیاز به تحقیقات بیش‌تر برای اطمینان از چگونگی اثرات آنها بر محیط زیست و در نهایت گیاهان و انسان دارد. از طرف دیگر هنوز بسیاری از جنبه‌های احتمالی ورود این کودها به محیط زیست و سازوکار اثر آنها بررسی نشده و نگرانی‌هایی در رابطه با آنها وجود دارد. همکاری میان کشورها در سراسر جهان به منظور تبادل اطلاعات و برای بالا بردن سطح حفاظت از انسان و محیط زیست در حالی که مانع توسعه محصولات جدید و مفید به بازار جهانی نباشد، مورد نیاز است.

خاک می‌باشد. همچنین در رابطه با تعداد ریشه‌ها و وزن گره‌های هر گیاه تحت این تیمار ۲۰ تا هشت برابر بیش‌تر از تیمار شاهد بود. کاربرد نانوذرات مولیبدن به‌تنهایی اثر مستقیم بر توسعه ریزجانداران و رشد نخود داشت. برای مثال تعداد و وزن گره‌های هر گیاه تحت این تیمار به‌ترتیب ۱۰ و ۶ برابر بیش‌تر از شاهد بود. به‌علاوه، در مقایسه با شاهد (بدون مولیبدن)، تمام تیمارهای نانوذرات مولیبدن با غلظت‌هایی در گستره ۰/۰۰۰۰۱ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان را در نخود دو تا سه برابر افزایش داد که موجب افزایش مقاومت گیاه به عوامل بیماری‌زا شد.

بنابراین، کاربرد تنها نانوذرات مولیبدن یا ترکیب آن با تیمار میکروبی می‌تواند موجب افزایش کارایی و عملکرد شده و مقاومت گونه‌های لگوم و گونه‌های دیگر زراعی را به بیماری‌ها افزایش دهد. منجیلی و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر محلول‌پاشی نانوکلات مولیبدن و کود نیتروژن (از منبع اوره) بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه بادام زمینی را در شرایط مزرعه بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوکلات مولیبدن تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌هایی همچون ارتفاع گیاه، تعداد نیام هر گیاه، تعداد نیام‌های رسیده در هر گیاه، وزن هزار دانه، تعداد دانه هر گیاه، طول دانه، عملکرد دانه و نیام، تعداد شاخه‌های جانبی و کارایی بیولوژیکی^۱ داشت. همچنین نتایج مقایسه میانگین‌های غلظت‌های مختلف کود نانوکلات مولیبدن نشان داد که عملکرد طول دانه و نیام‌ها در تیمار سه گرم بر لیتر نانوکلات مولیبدن به‌ترتیب ۲۳۲۰ و ۳۷۱۵ کیلوگرم بر هکتار بود. بنابراین، مصرف سه گرم بر لیتر مولیبدن را برای مدیریت کودی این گیاه پیشنهاد کردند زیرا جذب مولیبدن موجب افزایش جذب نیتروژن شده و در نتیجه کارایی مصرف نیتروژن را افزایش داد.

نتیجه‌گیری کلی

زمین زراعی به ازای هر فرد در سال‌های ۱۹۰۸

^۱ biological performance

نانوسم^۱ نگرانی دیگری است که در رابطه با استفاده از نانومواد به عنوان کود مطرح است. تحقیقات بیش تر بر روی سمیت نانوکودهای توسعه یافته اخیر باید به سمت تعدیل نگرانی عمومی در رابطه با نانوسم انجام شود. پاسخ به تنش نانوذرات نیز زمینه‌ای است که با گسترش سریع نانوفناوری بوجود آمده است. جنبه‌های دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد تأثیر نانوذرات بر ریزجانداران خاک است؛ زیرا ریزجانداران می توانند با گیاهان مختلف رابطه همزیستی داشته و در فراهمی عناصر غذایی گیاهان نقش مهمی داشته باشند

تحقیق در مورد عناصر غذایی کم مصرف باید بر روی افزایش زیست‌فراهمی این کودها برای مدیریت آبشویی یا کاهش تثبیت در خاک که مربوط به کودهای مرسوم می‌شود، متمرکز شود. مهم تر از آن تحقیق در رابطه با مقایسه اثرات مفید این نانوکودهای عناصر غذایی کم مصرف با همتایان مرسوم و در دسترس آنها در شرایط مزرعه است. تاکنون افزایش رشد گیاهان به مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای محدود بوده و مدارک بیشتری مخصوصاً مدارک مزرعه‌ای برای تأیید این افزایش در تولید محصولات زراعی نیاز است. به علاوه، تا حالا این نانومواد به عنوان منبع عنصر غذایی برای گیاه نبوده است بنابراین، جزئیات سازوکار افزایش رشد نیاز به توضیح و شفاف سازی دارد.

^۱ Nanotoxicity

فهرست منابع

۱. بازرگان ک، متین فر م، حسین زاده ح، داودی م ح. ۱۳۹۱. ضرورت تدوین «قانون کود» و «استانداردهای ملی» در راستای ساماندهی مدیریت امر و کود در ایران. مجله پژوهش‌های خاک ۲۶ (۳): ۲۲۵-۲۱۹.
۲. برقی ع، قلیپوری ع، توبه ا، جهان‌بخش س و جماعتی ش (۱۳۹۳) بررسی اثر محلولپاشی نانو اکسید آهن بر جذب عناصر غذایی در غده سبب زمینی. مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی. جلد ۱۶: ۱-۱۲.
۳. بقایی م و ملکی‌فراهانی س (۱۳۹۲) ارزیابی مقایسه کود کلات آهن با بنیان‌های نانو و میکرو بر عملکرد کمی و تخصیص مواد فتوسنتزی زعفران زراعی (*Crocus sativus L.*). نشریه پژوهش‌های زعفران. جلد ۲: ۱۶۹-۱۵۶.
۴. بیاتی ف، آینه‌بند ا و فاتح ا (۱۳۹۳) بررسی تأثیر مقادیر و زمان‌های کاربرد کود آهن نانو بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا (*Brassica napus L.*). نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. جلد ۱۲، شماره ۴: ۸۰۵-۸۱۲.
۵. پیوندی م، کمالی‌جامکانی ز و میرزا م (۱۳۹۰) تأثیر نانوکلات آهن با کلات آهن بر رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان مرزه (*Satureja hortensis*). مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی-مولکولی. جلد ۲، شماره ۵: ۲۵-۳۲.
۶. پیوندی م، پرنده ه و میرزا م (۱۳۹۴) مقایسه اثر نانوکود و کود کلات آهن بر کمیت و کیفیت اسانس ریحان (*Ocimum basilicum L.*). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. جلد ۳۱، شماره ۲: ۱۹۳-۱۸۵.
۷. توفیقی ح و نجفی ن (۱۳۸۰) بررسی تغییرات بازیافت و قابلیت استفاده روی خاک و روی اضافه شده به خاک در شرایط غرقابی و غیرغرقابی در خاک‌های شالیزاری شمال ایران. مجموعه مقالات هفتمین کنگره علوم خاک ایران، ۷-۴ شهریور ماه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۸. سیدشریفی ر، کمری ح و نجفی ق (۱۳۹۴) تأثیر تنش شوری و تغذیه برگی با نانو اکسید روی بر عملکرد و برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی جو (*Hordeum vulgare L.*). نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. جلد ۱۳، شماره ۲: ۴۱۰-۳۹۹.
۹. شجاعی ح و مکاریان ح (۱۳۹۳) تأثیر محلول‌پاشی اکسید روی نانو و غیر نانو بر عملکرد و اجزای عملکرد ماش (*Vigna radiata L.*) در شرایط تنش خشکی. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. جلد ۱۲، شماره ۴: ۷۳۷-۷۲۷.
۱۰. کمری ح و سیدشریفی ر (۱۳۹۴) تأثیر تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد و محلول‌پاشی با نانو اکسید روی بر عملکرد و سرعت و دوره پر شدن دانه تریتیکاله. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. جلد ۲۴: ۱۵۳-۱۴۱.
۱۱. محلوچی م، سیدشریفی ر، صدقی م، سبزه‌علیان م و کمالی م (۱۳۹۳) تأثیر شوری آب آبیاری و محلول‌پاشی کودهای نانو و کلات روی بر مؤلفه‌های فتوسنتزی ژنوتیپ‌های جو. نشریه تولید گیاهان زراعی. جلد ۷، شماره ۴: ۶۰-۴۱.
۱۲. مظاهری‌نیا س، آستارایی ع، منشی ا و فتوت ا (۱۳۹۰) مقایسه مقدار جذب و تجمع آهن درگندم (*Triticum aestivum L.*) با کاربرد اکسیدهای آهن معمولی و نانو همراه با کود کمپوست زباله شهری گرانوله گوگردی. نشریه زراعت. جلد ۹۲: ۱۱۱-۱۰۳.
۱۳. مظاهری‌نیا س، آستارایی ع، منشی ا و فتوت ا (۱۳۹۱) مقایسه اثر اکسیدهای آهن (نانو و معمولی) همراه با کمپوست زباله شهری بر تغذیه گیاه گندم. نشریه زراعت. جلد ۹۶: ۹۷۴-۹۶۰.

۱۴. ملکی‌فراهانی س و عقیقی‌شاهوردی م (۱۳۹۴) بررسی تأثیر کاربرد نانوکود آهن در مقایسه با کلات آن بر عملکرد کمی و کیفی زعفران زراعی (*Crocus sati*). به زراعی کشاورزی. جلد ۱۷، شماره ۱: ۱۶۸-۱۵۵.

15. Valeria A, Karin A, Maria A, Hans B, Filipa BM, Puck B, Stefania G, Hans JPM, Agnieszka M, Laia QP, Hubert R, Reinhilde S, Maria VV, Stefan W, Ruud JP (2015) Regulatory aspects of nanotechnology in the agri/feed/food sector in EU and non-EU countries. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 73: 463-476.
- Asadzade N, Moosavi SG, Seghatoleslam MJ (2015) Effect of low irrigation and Zn and SiO₂ Nano-fertilizers and Conventional Fertilizers on Morphophysiological traits and seed yield of Sunflower. *Biological Forum – An International Journal*. 7(1): 357-364.
16. Biswas PP, Sharma SP (2008) Nutrient management – challenges and options. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 56:22–25.
17. Burman U, Saini M, Kumar P (2013) Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry* 95:605–616
18. Bystrzejewska-Piotrowska G, Asztemborska M, Steborowski R, Polkowska-Motrenko H, Danko B, Ryniewicz J (2012) Application of neutron activation for investigation of Fe₃O₄ nanoparticles accumulation by plants. *Nukleonika* 57 (3): 427–430.
19. Carpita, N, Sabulase D, Montezinos D, Delmer DP (1979) Determination of the pore size of cell walls of living plant cells. *Science* 205:144–147.
20. Chahal, AS, Madgulkar AR, Kshirsagar SJ, Bhalekar MR, Dikpati A, Gawli P (2012) Amorphous nanoparticles for solubility enhancement. *Journal of Advanced Pharmaceutical Science* 2:167–178.
21. Delfani M, Firouzabadi MB, Farrokhi N, Makarian H (2014) Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45: 530–540.
22. DeRosa MC, Monreal C, Schnitzer M, Walsh R, Sultan Y (2010) Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology* 5:91.
23. Dourado MN, Martins PF, Quecine MC, Piotto FA, Souza LA, Franco MR, Tezotto T, Azevedo RA (2013) Burkholderia sp. SCMS54 reduces cadmium toxicity and promotes growth in tomato. *Annals of Applied Biology* 163 (3): 494–507.
24. Dubey VS, Bhalla R, Luthra R (2003) Sucrose mobilization in relation to essential oil biogenesis during palmarosa (*Cymbopogon martinii* Roxb. Wats. var. motia) inflorescence development. *Journal of Biosciences* 28(4):479-487.
25. Eichert T, Kurtz A, Steiner U, Goldbach HE (2008) Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Plant physiology* 134:151–160.
26. Eichert T, Goldbach HE (2008) Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces – further evidence for a stomatal pathway. *Plant physiology* 132:491–502.
27. El-Kereti MA, El-Feky SA, Khater MS, Osman YA, El-Sherbini SA (2014) ZnO nanofertilizer and He Ne laser irradiation for promoting growth and yield of sweet basil plant. *Recent patents on food, nutrition & agriculture* 5:69–81.
28. Erisman JW, Sutton MA, Galloway J, Klimont Z, Winiwarter W (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636–639.
29. Fageria NK (2009) *Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press, Boca Raton, Florida.

30. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2009) How to feed the world in 2050. Proceedings of the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. 24–26 June 2009. FAO Headquarters, Rome.
31. Fleischer A, O'Neill MA, Ehwald R (1999) The pore size of non-graminaceous plant cell walls is rapidly decreased by borate ester cross-linking of the pectic polysaccharide rhamnogalacturonan II. *Plant physiology* 121:829–838
32. Ghafariyan MH, Malakouti MJ, Dadpour MR, Stroeve P, Mahmoudi M (2013) Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. *Environmental Science and Technology* 47, 10645–10652.
33. Gonzalez-Melendi P, Fernandez-Pacheco R, Coronado MJ, Corredor E, Testillano PS, Risueno MC, Marquina C, Ibarra MR, Rubiales D, Perezde- Luque A (2008) Nanoparticles as smart treatment-delivery systems in plants: assessment of different techniques of microscopy for their visualization in plant tissues. *Annals of Botany* 101 (1): 187–195.
34. Harsinia MG, Habibib H, Talaei GH (2014) Study the effects of iron nano chelated fertilizers foliar application on yield and yield components of new line of wheat cold region of kermanshah provence. *Agricultural Advances* 3(4): 95-102.
35. Hernandez-Viezcas JA, Castillo-Michel H, Servin AD, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2011) Spectroscopic verification of zinc absorption and distribution in the desert plant *Prosopis juliflora-velutina* (velvet mesquite) treated with ZnO nanoparticles. *Chemical Engineering Journal* 170 (1-3): 346–352.
36. Hoagland DR, Arnon DI (1950) The water-culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experiment Station Publications*. 347, 1–32.
37. Hokmabadi H, Haidarinezad A, Barfeie R, Nazaran M, Ashtian M, Abotalebi A (2006) A new iron chelate introduction and their effects on photosynthesis activity, chlorophyll content and nutrients uptake of pistachio (*Pistacia vera* L.). 27th International Horticultural Congress and Exhibition. Seoul, Korea. August, 13-19.
38. Hong J, Wang L, Sun Y, Zhao L, Niu G, Tan W, Ricod CM, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2015) Foliar applied nanoscale and microscale CeO₂ and CuO alter cucumber (*Cucumis sativus*) fruit quality. *Science of the Total Environment* (in press).
39. Javadimoghadam A, Ladan Moghadam A, Danaee E (2015) Response of Growth and Yield of Cucumber Plants (*Cucumis sativus* L.) to Different Foliar Applications of Nano- Iron and Zinc. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* 9 (9): 1477-1478.
40. Khater MS (2015) Magnetite- Nanoparticles Effects on Growth and essential oil of Peppermint. *Current Science International* 4(2): 2077-4435.
41. Lal R (2008) Soils and India's food security. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 56:129–138.
42. Lee W, An YJ, Yoon H, Kweon HS (2008) Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry* 27:1915–1921.
43. Li F, Pham H, Anderson DJ (2010) Methods to produce polymer nanoparticles and formulations of agricultural active ingredients. WO 2010035118.
44. Lin D, Xing B (2007) Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution* 150 (2): 243–250.
45. Lin D, Xing B (2008) Root Uptake and Phytotoxicity of ZnO Nanoparticles. *Environmental Science and Technology* 42 (15): 5580–5585.

46. Liu R, Lal R (2014) Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). *Scientific Reports* 4, 5686–5691.
47. Liu R, Lal R (2015) Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment* 514: 131–139.
48. Lopez-Moreno ML, de la Rosa G, Hernandez-Viezcas JA, Castillo-Michel H, Botez CE, Peralta- Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2010) Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO₂ nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants. *Environmental Science and Technology* 44:7315–7320.
49. Mahajan P, Dhoke SK, Khanna AS (2011) Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *Journal of Nanotechnology* 2011:1–7.
50. Manjili MJ, Bidarigh S, Amiri E (2014) Study the Effect of Foliar Application of Nano Chelate Molybdenum Fertilizer on the Yield and Yield Components of Peanut. *Biological Forum – An International Journal* 6(2): 37-40.
51. Marusenko Y, Shipp J, Hamilton GA, Morgan JLL, Keebaugh M, Hill H, Dutta A, Zhuo X, Upadhyay N, Hutchings J, Herckes P, Anbar AD, Shock E, Hartnett HE (2013) Bioavailability of nanoparticulate hematite to *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution* 174: 150–156.
52. Mastronardi E, Tsae P, Zhang X, Monreal C, DeRosa MC (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.
53. Monica RC, Cremonini R (2009) Nanoparticles and higher plants. *Caryologia*, 62: 161-165.
54. Musante C, White JC (2012) Toxicity of silver and copper to *Cucurbita pepo*: differential effects of nano and bulk-size particles. *Environmental Toxicology* 27, 510–517.
55. Nair R, Varghese SH, Nair BG, Maekawa T, Yoshida Y, Kumar DS (2010) Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science* 179:154–163
56. Nekrasova GF, Ushakova OS, Ermakov AE, Uimin MA, Byzov IV (2011) Effects of copper(II) ions and copper oxide nanoparticles on *Elodea densa* Planch. *Russian Journal of Ecology* 42, 458–463.
57. Pandey AC, Sanjay SS, Yadav RS (2010) Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience* 5:488–497.
58. Pandey N, Pathak GC, Sharma CP (2006) Zinc is critically required for pollen function and fertilization in lentil. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 20: 89-96.
59. Pereira GJG, Molina SMG, Lea PJ, Azevedo RA (2002) Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. *Plant and Soil* 239 (1): 123–132.
60. Pradhan S, Patra P, Das S, Chandra S, Mitra S, Dey KK (2013) Photochemical modulation of biosafe manganese nanoparticles on *Vigna radiata*: a detailed molecular, biochemical, and biophysical study. *Environmental Science and Technology* 47: 13122–13131.
61. Prasad TNKV, Sudhakar P, Sreenivasulu Y, Latha P, Munaswamy V, Reddy KR, Sreepasad TS, Sajanlal PR, Pradeep T (2012) Effect of nanoscale zinc oxide

- particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition* 35 (6): 905–927.
62. Rico CM, Majumdar S, Duarte-Gardea M, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2011) Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59(8): 3485–3498.
 63. Shah V, Belozeroval I (2009) Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water, Air, & Soil Pollution* 197:143–148.
 64. Singh NB, Amist N, Yadav K, Singh D, Pandey JK, Singh SC (2013) Zinc oxide nanoparticles as fertilizer for the germination, growth and metabolism of vegetable crops. *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing* 3:353–364.
 65. Stampoulis D, Sinha SK, White JC (2009) Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environmental Science and Technology* 43, 9473–9479.
 66. Subramanian KS, Manikandan A, Thirunavukkarasu M, Sharmila Rahale C (2015) Nano-fertilizers for Balanced Crop Nutrition. *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Rai M, Duran N, Ribeiro C, Mattoso L. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. Springer International Publishing Switzerland.
 67. Taran NY, Gonchar OM, Lopatko KG, Batsmanova LM, M Patyka V, Volkogon MV (2014) The effect of colloidal solution of molybdenum nanoparticles on the microbial composition in rhizosphere of *Cicer arietinum* L. *Nanoscale Research Letters* 9, 289.
 68. UN (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division) (2013) *World Population Prospects: the 2012 Revision*.
 69. Vitoria AP, Lea PJ, Azevedo RA (2001) Antioxidant enzymes responses to cadmium in radish tissues. *Phytochemistry* 57 (5): 701–710.
 70. Watts-Williams SJ, Turney TW, Patti AF, Cavagnaro TR (2014) Uptake of zinc and phosphorus by plants is affected by zinc fertiliser material and arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil* 376:165–175.
 71. Zambryski P (2004) Cell-to-cell transport of proteins and fluorescent tracers via plasmodesmata during plant development. *Journal of Cell Biology* 162:165–168.
 72. Zhao L, Peralta-Videa JR, Rico CM, Hernandez-Viezcas JA, Sun Y, Niu G, Servin A, Nunez JE, Duarte-Gardea M, Gardea-Torresdey JL (2014) CeO₂ and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62:2752–2759.
 73. Zhao L, Sun Y, Hernandez-Viezcas JA, Servin AD, Hong J, Niu G, Peralta-Videa JR, Duarte-Gardea M, Gardea-Torresdey JL (2013) Influence of CeO₂ and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: a life cycle study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61 (49): 11945–11951.