فناوری نانو و زمینه‌های کاربرد آن در علوم خاک

محمود فاضلی سنگانی[1*]، داوود نامدار خجسته[2]

۱- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، ۲- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد تهران

(Email: mfazeli@guilan.ac.ir)

چکیده

فناوری نانو در علوم خاک به منظور مدیریت موثر تغذیه گیاه در خاک با بهره‌گیری از نانوکودها، کنترل بیماری‌های خاکزاد با استفاده از نانوآفت‌کش‌ها، اصلاح شوری و حذف آلاینده‌ها از خاک با استفاده از نانوذرات و نانوجاذب‌های متخلخل، افزایش قابلیت نگهداری رطوبت خاک با استفاده از فوق جاذب‌های نانو، تثبیت خاک‌های فرسایش‌پذیر با به کارگیری نانورس-ها و نانوپلیمرها و ارائه انواع مختلف سنسورهای شیمیایی و زیستی برای سنجش دقیق در خاک، می‌تواند به کار گرفته شود. علی‌رغم همه‌ی این قابلیت‌ها، عدم قطعیت و کمبود دانش در زمینه مخاطرات زیست محیطی، رفتار پیچیده در محیط نامتجانس خاک و روش‌های سنتز و تجزیه ای گران قیمت نانو مواد، کاربرد این فناوری در خاک را با چالش‌هایی مواجه ساخته است.

واژه های کلیدی: نانوکود، نانوآفت‌کش، نانورس، نانوجاذب، نانوحسگر.

مقدمه

فناوری نانو مجموعه‌ای از تکنیک‌ها، فرایندهای توصیف‌کننده و کاربرد مواد در مقیاس نانومتر در سه شاخه اصلی نانو مواد، نانوابزارها و نانوحسگرها را در بر می‌گیرد. یک نانومتر معادل $۱۰^{-۹}$ متر است و اصولاً کنترل ماده در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در فناوری نانو مد نظر می‌باشد (Tarafdar and Raliya, 2011). بسیاری از خصوصیات مواد در مقیاس نانو متفاوت از ویژگی‌های آن‌ها در مقیاس میکرو و ماکرو است. این تفاوت را می‌توان در واکنش‌پذیری شیمیایی، قدرت فیزیکی، هدایت الکتریکی، خاصیت مغناطیسی و ویژگی‌های نوری مواد به وضوح مشاهده نمود. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از نسبت سطح به حجم بسیار بیشتر مواد نانومقیاس نسبت به همین مواد در مقیاس بزرگتر است که امکان واکنش‌پذیری بیشتر این مواد را با سایر مواد فراهم می‌آورد و موجب تمایل آن‌ها به بروز صفات منحصر به فرد می‌شود (Adhikari, 2013).

خصوصیات ویژه مواد در مقیاس نانو امکان بهره‌گیری از کاربردهای بالقوه فناوری نانو در عرصه‌های مختلف همچون فیزیک، شیمی، زیست شناسی، علم مواد، مهندسی، پزشکی، انرژی، محیط زیست و کشاورزی را فراهم آورده است (Tarafdar and Raliya, 2011). کاربرد فناوری نانو در در علوم کشاورزی در زمینه‌هایی چون کشاورزی دقیق، اصلاح نباتات، تولید سموم، کودهای موثر و کم خطر، گیاه پزشکی، علوم دامی، ماشین آلات کشاورزی، صنایع غذایی، مهندسی آب، علوم خاک، شیلات و صنعت چوب، می‌تواند زمینه ایجاد تحولی اساسی در راستای رسیدن به کشاورزی پایدار را فراهم آورد (Rai et al., 2015).

اخیراً قابلیت‌های فناوری نانو در علوم خاک مورد توجه متخصصین این رشته قرار گرفته است (Wilson et al., 2008)؛ لذا در این پژوهش پس از معرفی انواع مختلف مواد نانو و روش‌های سنتز و مشخصه‌یابی آن‌ها، قابلیت‌ها و پتانسیل‌های فناوری نانو در زمینه‌های مختلف علوم خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان نیز به برخی از چالش ها و محدودیت‌هایی که کاربرد این فناوری در محیط خاک دارد نیز اشاره می‌شود.

مواد و روش‌ها

اطلاعات این تحقیق با استفاده از روش مطالعه کتابخانه‌ای و کاوش‌های اینترنتی در پایگاه‌های اطلاعاتی گردآوری شده است. در این تحقیق ابتدا انواع نانومواد، روش‌های سنتز و مشخصه‌یابی آن‌ها معرفی می‌گردد؛ سپس زمینه‌های مختلف کاربرد

فناوری نانو در علوم خاک شامل، کاربرد در تغذیه گیاه، مبارزه با آفات و بیماری‌های خاکزاد، پالایش خاک و آب، مدیریت آب در خاک، اصلاح خصوصیات فیزیکی و حفاظت خاک و سنجش و نظارت دقیق در خاک مورد بحث قرار می‌گیرد. در پایان به برخی از چالش‌های موجود در زمینه کاربرد این فناوری در علوم خاک نیز اشاره می‌شود.

انواع نانومواد

با توجه توسعه‌ی فناوری نانو، انواع موادی که با استفاده از این فناوری تولید می‌شوند، بسیار متنوع می‌باشد و ممکن است بر مبنای جنس و ترکیب شیمیایی، ابعاد، شکل یا روش ساخت نیز طبقه‌بندی شوند. یکی از روش‌های معمول، طبقه‌بندی نانو مواد از نظر ابعاد است. چهار گروه مختلف مواد نانو از نظر ابعاد به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده شده است که شامل موارد زیر می‌باشد (Tarafdar and Raliya, 2011):

نانومواد صفر بعدی: منظور از نانومواد صفربعدی موادی هستند که هر سه مولفه اندازه آن‌ها (طول، عرض و ارتفاع) کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشند. نانوذرات معروف‌ترین نانومواد صفربعدی هستند.

نانومواد یک‌بعدی: هرگاه اندازه فقط یک بعد از ماده (مثلاً طول آن) از ۱۰۰ نانومتر بیشتر شود، ولی همچنان دو بعد دیگر آن زیر ۱۰۰ نانومتر باشد، نانوماده یک‌بعدی بدست می‌آید. نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها، نانوالیاف و نانولوله‌ها همگی از نانومواد یک‌بعدی به شمار می‌روند.

نانومواد دوبعدی: اگر یک بعد دیگر از اندازه ماده نیز از ۱۰۰ نانومتر بیشتر شود و تنها یک بعد از سه بعد، اندازه‌ای کمتر از حد تعریف داشته باشد، به آن نانوماده دوبعدی می‌گویند که معادل صفحه در هندسه است. لایه‌های نازک و نانوپوشش‌ها از دسته نانومواد دو بعدی محسوب می‌شوند که امروزه کاربردهای وسیعی دارند.

نانومواد سه‌بعدی: موادی هستند که اگر چه هیچ یک از ابعاد آنها در محدوده نانو نیست، ولی وجود یکی از نانومواد صفر، یک یا دوبعدی در ساختار آن وجود دارد. نانوکامپوزیت ها و نانومواد متخلخل از مهمترین مواد نانو سه بعدی هستند.

شکل ۱- انواع مختلف مواد نانو از نظر ابعاد

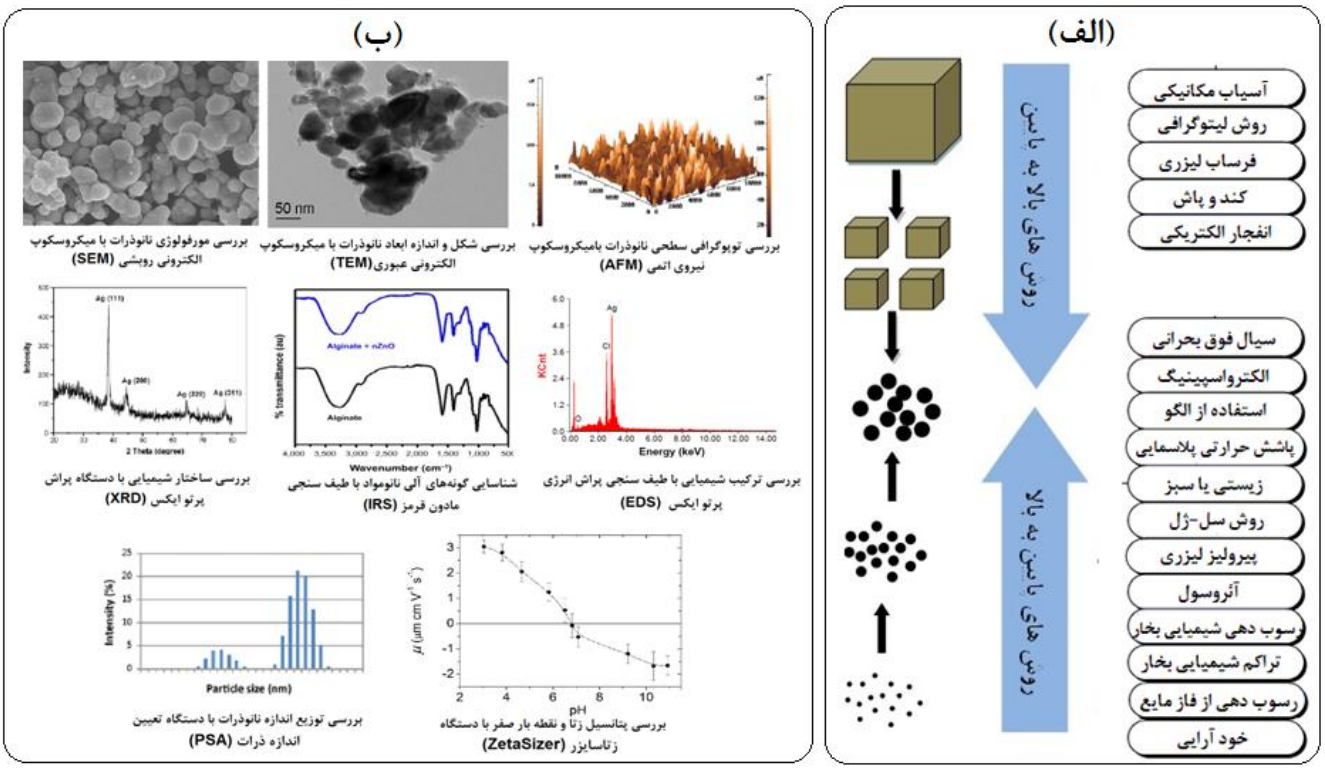
روش‌های سنتز و مشخصه‌یابی نانومواد

به‌طورکلی روش‌های سنتز نانو مواد را می‌توان به دو دسته بالا به پایین[1] و پایین به بالا[2] تقسیم بندی کرد؛ در روش بالا به پایین یک ماده توده‌ای به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شوند تا اینکه مواد به ابعاد نانو می‌رسد. بر عکس، در روش پایین به بالا اتمها و مولکولها کنار هم چیدمان می شوند و ذرات بزرگتر در ابعاد نانو ساخته می‌شود. طیف وسیعی از روش‌های فیزیکی، شیمیایی، فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی در قالب این دو رویکرد اصلی برای سنتز ذرات نانو به کار گرفته می شوند (Tarafdar and Raliya, 2011). برخی از مهمترین روش‌های سنتز نانومواد در شکل (الف-۲) نشان داده شده است.

پس از سنتز نانومواد ویژگی‌های مختلف این مواد که بر روی رفتار محیطی آن‌ها تأثیر زیادی دارد تعیین می‌گردد. مهمترین مشخصه‌هایی که در این رابطه تعیین می‌شوند عبارتند از شکل، ترکیب شیمیایی، توزیع اندازه ذرات، مورفولوژی

[1] - Top-Down
[2] - Bottom-Up

سطحی، پتانسیل زتا و نقطه بار صفر[1] که با استفاده از تکنیک های مختلفی مورد سنجش قرار می‌گیرد (Adhikari, 2013). برخی از رایج‌ترین تکنیک ها مورد استفاده برای مشخصه یابی در شکل (ب-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- روش‌های معمول سنتز نانومواد (الف) و تکنیک های مختلف مشخصه یابی این مواد (ب).

زمینه‌های کاربرد فناوری نانو در علوم خاک

۱- تغذیه گیاه

تأمین میزان دقیق عنصر غذایی مورد نیاز گیاه، افزایش راندمان استفاده از کود، قابل دسترس نمودن عناصر غذایی موجود ولی غیر قابل دسترس در ریزوسفر و همچنین در اختیار قرار دادن کود در زمان مناسب برای گیاه از طریق ریشه یا تغذیه برگی به‌منظور کاهش اثرات زیست محیطی استفاده از کود در کشاورزی همواره مورد توجه بوده است (Rai et al., 2015).

به کارگیری خلاقانه پتانسیل‌های موجود در نانوتکنولوژی برای حل این چالش‌ها می‌تواند چشم‌انداز وسیعی برای فرمولاسیون نانوساختار کودها و ارائه نانوکودها[2] با هدف افزایش حلالیت‌پذیری، انتشارپذیری، انتقال هدفمند[3]، رهایش کنترل شده[4] و رهایش شرطی[5] عنصر غذایی موجود در کود در پاسخ به نیاز گیاه و یا به عبارتی دستیابی به کودهای هوشمند[6] در کشاورزی را فراهم آورد (Mastronardi et al., 2015).

نانوکودها با داشتن قطر کم می‌توانند از طریق برگ یا ریشه وارد گیاه شوند. در این راستا اندازه قطر نانوذرات اهمیت ویژه ای دارد. ذرات با قطر کمتر از ۲۰ نانومتر به منظور محلول‌پاشی برای ورود به گیاه از طریق اندام هوایی پیشنهاد شده است (Adhikari, 2013). برخی مطالعات همچنین اثر ترغیبی نانوذرات را بر آزادسازی بیشتر آنزیم‌هایی چون اسید فسفاتاز، فیتاز،

[1] - Point of zero charge
[2] - Nano-fertilizers
[3] - Targeted delivery
[4] - Controlled release
[5] - Conditional release
[6] - Smart fertilize

آریل سولفاتاز، اوره آز، سلولاز و لیگناز را گزارش کرده‌اند (Monreal et al., 2015). کودهای کپسوله شده با استفاده از نانوپوشش‌ها، مواد نانو متخلخل و همچنین نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به منظور رهایش کنترل شده و هدفمند کود مورد استفاده قرار گیرد (Mastronardi et al., 2015). به علاوه به کارگیری نانو ابزارها در ترکیب با نانوکودها می‌توانند زمینه کنترل رهایش و فراهمی و همچنین هدفمندی جذب عنصر غذایی کود که مانع از هدررفت آن می‌گردد را فراهم آورند (Wu et al., 2008). نتایج اولیه برخی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از نانوکودها برای تغذیه گیاه نشان می‌دهد که استفاده از این نوع کودها باعث افزایش راندمان کودی، کاهش قابل توجه در مقدار و تناوب کود مصرفی و در نتیجه کاهش هزینه ها می‌گردد (Mastronardi et al., 2015).

۲- مبارزه با آفات و بیماری های خاکزاد

مطابق با اهداف کشاورزی پایدار استفاده حداقلی از آفت‌کش‌ها، اختصاصی کردن اثر آن‌ها بر روی گونه هدف و کاهش اثرات جانبی آن ها بر روی گونه های غیر هدف مورد نظر است. در این راستا می‌توان از پتانسیل‌های فناوری نانو به‌منظور ارائه گزینه‌های جایگزین آفت‌کش‌ها مرسوم بهره برد. استفاده از نانوفرمولاسیون برای افزایش کارآیی انواع مختلف آفت‌کش‌ها شامل علف‌کشها، قارچ کش‌ها و حشره‌کش‌ها، لاروکش ها و ... مورد توجه قرار گرفته است (Tsuji, 2001).

به کارگیری ذرات مس، روی و جیوه در مقیاس نانو کارآیی آن‌ها را در از بین بردن آفت های مختلف در مقایسه با شکل-های محلول و یا ذرات میکرو و ماکرو نشان داده است (Adhikari, 2013). نانو ذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم نیز اثرات ضد قارچی بر روی پاتوژنهای خاکزاد گیاهان روغنی از خود نشان داده است (Jampilek and Kralova, 2015). گزارش-هایی از کاربرد نانوذرات اکسید آلومینیوم به عنوان حشره کش و نانوذرات صفر ظرفیتی آهن به عنوان لاروکش برای برخی از آفت ها در کشاورزی وجود دارد (Rai et al., 2015).

رویکردهای کلی به کار گرفته شده در استفاده از فناوری نانو برای کاهش اثرات سوء آفت کش‌هادر کشاورزی عمدتاً شامل جایگزین کردن آفت کش های خطرناک و آلاینده با نانوذرات فلزی و غیرسمی، افزایش کارایی و کاهش دز مصرفی آفت‌کش های مرسوم با ترکیب آن با نانوذرات، اختصاصی کردن اثر آفت‌کش بر روی گونه هدف و کنترل رهایش آن با به‌کارگیری نانوذرات، نانوامولسیونها، نانوپوشش‌ها و نانو مواد متخلخل بوده است (Adhikari, 2013).

۳- پالایش خاک و آب

فناوری نانو روش‌های جدید، مؤثر، دقیق و مقرون به صرفه‌ای برای تشخیص و رفع آلودگی منابع آب و خاک ارائه می-نماید. نانوحسگرها[1] تشخیص سریع و بهنگام حتی غلظت کمی از یک آلاینده را امکان‌پذیر می‌سازند. نانوفیلتراسیون، نانوفتوکاتالیست‌ها، نانوذرات مغناطیسی، نانوجاذب‌ها و نانوسنسورها از جمله روش‌هایی هستند که با استفاده از فناوری نانو جهت پالایش و تشخیص آلاینده‌ها در محیط آب، فاضلاب، رسوبات و خاک‌ها به کارگرفته شده‌اند (Wilson et al., 2008). مواد نانو در تصفیه آب و فاضلاب، حذف نمک از آب و حذف شوری آن، حذف فلزات سنگین از پساب‌های کارخانجات صنعتی و حذف انواع آلاینده های آلی و میکروبی به طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است (Joo and Cheng, 2006). نانوذرات با دارا بودن سطح قابل دسترس بیشتری برای واکنش با آلاینده‌ها و قابلیت تحرک بیشتر به دلیل اندازه کوچک این قابلیت را دارا هستند تا بتوانند برای پالایش درجا خاک، رسوبات و منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند. یکی از مصادیق کاربرد این مواد استفاده از نانوذرات آهن به منظور حذف، تثبیت و یا تغییر شکل طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های زیست‌محیطی، نظیر حلال‌های آلی کلردار، آفت‌کش‌های آلی کلردار و بی‌فنیل‌های چندکلره و آلاینده های معدنی و فلزات سنگین است (Jampilek and Kralova, 2015). نتایج مثبت استفاده از نانوذرات هیدروکسی آپاتایت، دی‌اکسید تیتانیوم، نانورس‌ها و نانوسیلیکا در رفع آلودگی از محیط های آب و خاک نیز گزارش شده است (Jatav and De, 2013). با تصفیه پساب‌های شهری با استفاده از خاصیت فوتوکاتالیستی نانو ذرات دی اکسیدد تیتانیوم و نانوکامپوزیت‌ها می‌توان آب مورد نیاز برای آبیاری اراضی کشاورزی، عرصه‌های منابع طبیعی و احیای مناطق بیابانی را فراهم نمود (Rai et al., 2015).

[1] - Nanosensors

۴- اصلاح خصوصیات فیزیکی و حفاظت خاک

قابلیت‌های موجود در فناوری نانو برای اصلاح خصوصیات فیزیکی و کاهش فرسایش‌پذیری خاک با به کارگیری انواع مختلف اصلاح کننده‌ها در مقیاس نانو مورد توجه قرار گرفته است. اصلاح خصوصیات خاک از جمله ظرفیت نگهداری آب در خاک به کمک نانو زئولیت‌ها، مواد نانومتخلخل طبیعی و مصنوعی گزارش شده است (Jatav and De, 2013). استفاده از این مواد در خاک و مخصوصاً در خاک‌های شنی می‌تواند با افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، کاهش هزینه‌های آبیاری و کوددهی، باعث احیاء بیولوژیک مناطق بیابانی و موفقیت برنامه‌های آبیاری و نهال کاری در مناطق خشک و نیمه خشک و کاهش اثرات تنش خشکی گردد (Karimi et. al., 2009)

اتصال ذرات خاک به یکدیگر به منظور تشکیل و استحکام بخشی به ساختمان خاک باعث جلوگیری از فرسایش خاک، پراکنش ریزگردها و جلوگیری از بیابانزایی می‌شود. نانوذرات به دلیل سطح ویژه و فعال قابل توجه و همچنین دارا بودن اندازه کوچک گزینه مناسبی برای پیوند دادن ذرات خاک به همدیگر و در نتیجه جلوگیری از فرسایش این خاک ها می‌باشند (Hatefi et al., 2016). نانوذرات اکسید فلزی، نانوساختارهای متخلخل، نانورس‌ها و نانوحلقه‌های بیوپلیمری از جمله موادی هستند که تا کنون به‌منظور ایجاد و استحکام بخشی به ساختمان خاک و همچنین تثبیت ماسه‌های روان برای کنترل فرسایش پذیری خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Hatefi et al., 2016).

۵- سنجش و مدیریت دقیق خاک:

نانو حسگرها، حسگرهایی در ابعاد نانومتری هستند که به خاطر کوچک بودن ابعادشان از دقت و واکنش پذیری بسیار بالایی برخوردارند به طوری که حتی نسبت به حضور چند اتم از یک عنصر هم عکس‌العمل نشان می‌دهند (Adhikari, 2013). نانوذرات فلزی، نقاط کوانتومی، نانولوله‌های کربنی و نانوابزارها از جمله مهمترین شکل‌های نانوحسگرها می‌باشند که قادرند تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بسیار کوچک را اندازه‌گیری کنند (Rai et al., 2015). علاوه بر این نانو حسگرهای زیستی[1] با تلفیق فناوری‌های زیستی، نانو و الکترونیک می‌توانند به گونه ای طراحی شوند که با واکنش اختصاصی با یک ماده ی خاص ابزار ردیابی و تحلیل‌گر دقیقی را در ریزترین ابعاد ارایه دهند. این حسگرها ابزارهای مفیدی در تشخیص و کنترل آلاینده های مخاطره آمیز و تشخیص باکتری ها و پاتوژن در محیط خاک به شمار می‌روند (Priester et al., 2012). نانوحسگرها به عنوان روشی حساس و سریع برای تشخیص و اندازه‌گیری بقایای آفت‌کش‌های ارگانوفسفره گونه‌های مختلفی از آلاینده‌های آلی در نمونه‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته اند (Jatav and De, 2013). نانوحسگرها می‌توانند گزینه مناسبی برای مطالعه و ردیابی فعالیت‌های میکروبی و ترشحات ریشه در ناحیه ریزوسفر نیز باشد (Jampilek and Kralova, 2015). با استفاده نانوحسگرها شناسایی مقادیر بسیار کم ترکیبات مختلف شیمیایی، ویروس ها و باکتریها در سامانه خاک میسر شده و باعث ایجاد تحولی شگرف در افزایش حد آشکارسازی و مدیریت عناصر شیمیایی و عوامل بیولوژیکی در خاک خواهد شد. نانوحسگرهای مرتبط با سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS)، جهت ردیابی که قادر به ردیابی و کنترل شرایط خاک و رشد گیاه هستند، امکان مدیریت دقیق فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را در محیط خاک فراهم می آورد (Priester et al., 2012).

چالش‌ها و محدودیت های استفاده فناوری نانو در خاک

به‌رغم ظرفیت‌های زیادی که فناوری نانو برای کاربرد در علوم خاک دارد، استفاده از این فناوری با چالش‌هایی نیز روبرو است. یکی از مهمترین این چالش‌ها، عدم آگاهی از اثرات ناشناخته و محتمل این مواد واکنش پذیر با سیستم های زنده مرتبط با محیط خاک است (Jampilek and Kralova, 2015). اثرات سمیت برخی از نانومواد بر روی مجودات زنده در پژوهش‌ها تأیید شده است که این امر لزوم بررسی‌های بیشتر در مورد اثرات احتمالی این مواد بر موجودات زنده را نشان می‌دهد (Handy et al., 2008). پیچیدگی محیط خاک و عدم قطعیت نیز یکی دیگر از چالش‌هایی است که کاربرد فناوری نانو در خاک با آن مواجه است. بسیاری از مطالعاتی که تا کنون در زمینه کاربرد فناوری نانو انجام شده است عمدتاً در محیط‌های ایده آل و یا یکنواخت به لحاظ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بوده است. این در حالی است که پیش بینی رفتار این مواد در

[1] - Nanobiosensors

محیط نامتجانس و پیچیده خاک مستلزم بررسی رفتار و سرنوشت این مواد در خاک در شرایط واقعی است (Wilson et al., 2008). علاوه بر این انجام پژوهش هایی که می‌تواند منجر به ارائه کاربردهای جدید این علم در شاخه های مختلف علوم خاک گردد، مستلزم دسترسی به دستگاه‌های گران قیمت و صرف هزینه های قابل توجهی است که نیازمند حمایت و تأمین از جانب سرمایه گذران برای توسعه این فناوری است.

فناوری نانو از پتانسیل بالایی برای استفاده در زمینه های مختلف علوم خاک شامل استفاده از نانودکودها در تغذیه گیاه، استفاده از نانوآفت‌کش ها برای مبارزه با آفات و بیماری های گیاهی، استفاده از نانوجاذب ها برای پالایش آب و خاک، نانومواد متخلخل در مدیریت آب خاک، اطلاح کننده های مختلف نانو برای حفاظت خاک و همچنین نانوحسگر ها برای سنجش دقیق متغیرهای شیمیایی و بیولوژیکی در خاک است که با در نظر گرفتن جنبه های ریسک و سمیت و تقابل آن با سیستم های زنده می‌توان به نتایج مطلوبی ازجمله ارتقای بهره‌وری عملیات‌های مختلف زراعی، تضمین امنیت غذایی و توسعه کشاورزی پایدار و سازگار با محیط زیست در کشورها و نواحی در حال توسعه جهان دست یافت.

منابع

Adhikari T. 2013. Nanotechnology in Soil Science and Plant Nutrition, New India Publishing Agency.

Handy, R.D., R. Owen and E. Valsami-Jones, 2008. The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: Current status, knowledge gaps, challenges and future needs. Ecotoxicology 17: 315-325.

Hatefi O, Jalalian A., Padidar M., and Fallahzade J. 2016. Effect of Nanoclay on Wind Erosion a Sandy Loam Soil in Segzi Region (Isfahan, Iran). Journal of Environmental Science and Technology, 9(3): 296-300.

Jampílek, J. and Kráľová, K. 2015. Application of Nanotechnology in Agriculture and Food Industry, Its Prospects And Risks. Ecological Chemistry and Engineering, 22(3): 321-361.

Jatav G. K. and De N. 2013. Application of nano-technology in soil-plant system. An Asian Journal of Soil Science. 8(1): 176-184.

Joo S. H. and Cheng, I.F. 2006. Nanotechnology for environmental remediation. USA: Springer.

Karimi, A., Noshadi, M. and Ahmadzadeh, M. (2009). Effects of superabsorbent polymer (igeta) on crop, soil water and irrigation interval. J. Sci. Technol. Agric. Nat. Res., 12: 415-420.

Mastronardi E., Tsae P., Zhang X., Monreal C., and DeRosa M.C. 2015. Strategic role of nanotechnology in fertilizers: potential and limitations. In: M. Rai (ed), Emerging nanotechnologies in agriculture, Verlag, NY.

Monreal C.M., DeRosa M., Mallubhotla S.C., Bindraban P.S., and Dimkpa C. 2015. The Application of Nanotechnology for Micronutrients in Soil-Plant Systems. Virtual Fertilizer Research Center Report. Washington, D.C., USA.

Priester J.H., Ge Y., Mielke R.E., Horst A.M., Moritz, S.C., Espinosa K. Gelb J., Walker S.L., Nisbet R.M., An Y. J., Schimel J.P., Palmer R.G., Hernandez-Viezcas J.A., Zhao L., Rai V., Acharya S. and Dey N. 2012. Implications of nanobiosensors in agriculture. J. Biomat. Nanobiotech. 3:315-324.

Rai M., Ribeiro C., Mattoso L. and Duran N. 2015. Nanotechnologies in Food and Agriculture, Verlag, NY.

Tarafdar J.C. and Raliya R. 2011. The Nanotechnology. Scientific Publisher (India).

Tsuji K. (2001). Microencapsulation of pesticides and their improved handling safety. J. Microencapsul., 18:137–47.

Wilson M.A., Tran N.H., Milev A.S., Kannangara G.S.K., Volk H. and Lu G.H.M. (2008). Nanomaterials in Soils. Geoderma, 146:291–302.

Wu L., Liu M. and Liang R. (2008). Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. Bioresource Technol., 99: 547–554.

Nanotechnology and Its Potential Applications in Soil Science

Abstract

Applications of nanotechnology in soil science include: effective plant nutrient management in soil by developing nanofertilizers, soil born disease control using nanomaterials-based pesticides, reclamation of salt-affected soils and removal of contaminants from soil by using nanoporous and nanoparticles absorbents, higher retention of soil moisture by use of superabsorbent, stabilization of erosionprone soils by employing nanoclay and nanopolymers and preparation of different kind of chemical and biological nanosensors. Besides all its advantages, uncertainty and knowledge gaps related to environmental risk assessment, complex behavior in soil as a heterogeneous media and expensive synthetic and analytical methods of nanomaterials are some of the challenges facing application of nanotechnology in soil science.

Keywords: Nanofertilizer, Nanopesticid, Nanoclay, Nanoabsorbent, Nanosensors.