دوره چهارم/ شماره اول/ تابستان ۱۴۰۳/ مقاله مروری/صفحات: ۵۱-۳۳ https://www.qafj.iauk.ac.ir

استفاده از پیشرفت‌های جدید فناوری نانو در کشاورزی

طاهره نوایی دیوا*

استادیار، گروه شیمی، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

*نویسنده مسئول: taherehnavaie@gmail.com

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳، پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۴/۱۷

چکیده

کشاورزی، موادغذایی و مواد خام را برای صنایع ساختمانی، انرژی، نساجی و داروسازی فراهم می‌کند. اخیراً کشاورزی با نگرانی‌های زیادی ازجمله تغییرات آب و هوایی، تخریب خاک، کاهش دسترسی به زمین، شهرنشینی، استفاده ناپایدار از منابع طبیعی، استفاده بیش‌ازحد از مواد شیمیایی کشاورزی، از دست دادن تنوع زیستی و آلودگی هوا مواجه بوده است. این مسائل هشداردهنده نیاز به مداخلات قوی دارد. شیوه‌های کشاورزی مرسوم نمی‌توانند این چالش‌ها را مدیریت کنند، زیرا پیچیده، نیازمند به کار فشرده، زمان‌بر، کم بازده، نیازهای زیاد به مواد مغذی محصول و غیر هدفمند هستند. علاوه بر این، استفاده ناکارآمد از مواد شیمیایی کشاورزی تهدیدی جدی برای اکوسیستم است؛ بنابراین دانشمندان، کشاورزان و سیاست‌گذاران، به‌طور دائم، در جستجوی تکنیک‌های جدید برای مبارزه با چالش‌های موجود هستند. نانوتکنولوژی به‌عنوان ناجی جدید کشاورزی پایدار در حال ظهور است. علاوه بر کشاورزی دقیق، از نانوحسگرها، برای تشخیص پاتوژن‌های گیاهی و آنالیت‌های مضر شیمیایی در مزارع کشاورزی استفاده شده است. علاوه بر این، نانو رباتیک‌ها و نانو بارکدها نیز تأثیر عمیقی بر شیوه‌های کشاورزی برای افزایش بازده نشان داده‌اند. کاربردهای عظیم نانوابزارها در کشاورزی به‌طور گسترده در تصویربرداری زیستی، سنجش، فوتوکاتالیز و تحویل مواد شیمیایی کشاورزی نقش دارد. این بررسی به‌طور جامع کاربردهای متنوع و عظیم نانوتکنولوژی در غلبه بر چالش‌های شیوه‌های متداول زراعی و چشم‌انداز آینده نانوتکنولوژی در کشاورزی را مورد بحث قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کشاورزی، نانوتکنولوژی، بیوسنسورها، نانوکودها، نانو علف‌کش‌ها

مقدمه

افزایش جمعیت انسانی و ماهیت مصرف‌گرایانه انسان، منابع طبیعی را با سرعت بسیار سریعی از بین می‌برد که چالشی برای توسعه پایدار است. چندین مشکل دیگر کشاورزی مدرن، شامل: وابستگی بیش‌ازحد به آبیاری تکمیلی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، تخریب خاک، آلودگی آفت‌کش‌ها و کودها، علاقه کمتر جوانان به کشاورزی، تکنیک‌های کشاورزی ناکارآمد موجود و ... است (۱ و ۲). سازمان خواربار و کشاورزی (فائو) گزارش داده است که تا سال ۲۰۵۰ پس از میلاد، جمعیت جهان به ۱۰ میلیارد نفر خواهد رسید که باعث افزایش ۵۰ درصدی تقاضای غذا به ویژه در کشورهای در حال توسعه خواهد شد (۳). در حال حاضر، حدود ۸۱۵ میلیون نفر دچار سوءتغذیه هستند و این تعداد تا سال ۲۰۵۰ میلادی می‌تواند به ۲ میلیارد نفر برسد .این امر مستلزم تغییرات شدید در سیستم تولید موادغذایی در سطح جهانی است. برای افزایش بهره‌وری جهانی محصولات کشاورزی به میزان سه میلیارد تن، مقادیر زیادی مواد شیمیایی کشاورزی (۱۸۷ میلیون تن کود برای تأمین مواد مغذی کارآمد، ۴ میلیون تن آفت‌کش برای محافظت از محصولات در برابر حمله حشرات و آفات، ۲/۷ تریلیون مترمکعب آب) موردنیاز است (۴).

استفاده از این نهاده‌ها، باعث افزایش هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی و بدتر شدن بیشتر کیفیت زیست‌محیطی می‌شود. درنتیجه، بهره‌وری و پایداری کشاورزی نگرانی‌های جدی در سراسر جهان خواهد

بود. استفاده بیش‌ازحد از کودها و سموم دفع آفات خطر اتروفیکاسیون آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی را افزایش داده است و درنهایت یکپارچگی اساسی اکوسیستم به خطر افتاده است. علاوه بر این، چرخه‌های اکوسیستمی مختل شده بر چرخه زندگی موجودات زنده تأثیر گذاشته است. به دلیل اکوسیستم‌های تخریب‌شده، در زمان‌های اخیر مسائل جدی سلامت انسان، پدیدار شده است (۵). افزودن بیومس (بقایای گیاهی، کود سبز و ...) به مقدار زیاد، حاصلخیزی خاک را بهبود بخشیده و درنتیجه بهره‌وری محصولات را افزایش داده است، اما در حفظ ترکیبات کربن و مدیریت آلودگی ترکیبات نیتروژنی کارآمد نیست. درنتیجه، دمای کل اکوسیستم را افزایش می‌دهد (۶). تکنیک‌هایی مانند پالایش زیستی و گیاه‌پالایی عملاً قادر به تجزیه فلزات سنگین خاک نیستند، زیرا مستلزم جابجایی کشاورزان و کنار گذاشتن معیشت آن‌ها هستند (۷). به ویژه برای کشاورزان فقیر و حاشیه‌ای مواجه‌شدن با این چالش‌های نوظهور برای رسیدگی به این مسائل کشاورزی مدرن، دشوار شده است. محققان علاقه خود را به فناوری نانو برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار (گرسنگی صفر) با افزایش کارایی شیوه‌های کشاورزی برای حل چالش‌های ذکر شده بهره‌وری موادغذایی و امنیت غذایی، نشان داده‌اند. نانوتکنولوژی می‌تواند کاربردهای متعددی در سیستم‌های کشاورزی در طول رشد رویشی محصولات، تولید، فرآوری، ذخیره‌سازی، بسته‌بندی و حمل‌ونقل داشته باشد (۸). هدف اصلی کشاورزی مبتنی بر نانو، نسبت به سیستم‌های کشاورزی متعارف، توانایی گیاهان زراعی برای زنده ماندن در شرایط مختلف آب و هوایی، کمبود آب، شوری آب و افزایش سطح دی‌اکسید کربن و درنتیجه افزایش بهره‌وری محصول است (۹). در کشاورزی، از نانومواد در ساخت حسگرهای زیستی، فرمولاسیون نانو آفت‌کش‌ها، نانوکودها، تبدیل ژنتیکی گیاهان و جانوران با ویژگی‌های مطلوب و نانو تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه استفاده می‌شود (۱۰). نانودستگاه‌ها، توسعه داده شده‌اند و در زمینه‌هایی برای بهبود اصلاح نژاد گیاهان موجود و فناوری تحول ژنتیکی مورد استفاده، قرار گرفته‌اند (۱۱). محققان کاربردهای دلگرم‌کننده نانوحسگرها در کشاورزی دقیق را گزارش کرده‌اند (۱۲). نانو ابزارها همچنین برای اندازه‌گیری و ارزیابی رشد، بهره‌وری محصول، پارامترهای خاک، عفونت‌های حشرات و میکروب‌ها و انتشار کودها برای دستیابی به محیطی پایدار و سازگاربامحیط‌زیست استفاده شده‌اند (۱۳). نانو بارکدها برای نظارت بر کیفیت محصولات کشاورزی طراحی شده‌اند (۱۴). در این پژوهش، ساخت انواع نانو ابزار، نانو دستگاه‌ها و نقش آن‌ها در افزایش بهره‌وری کشاورزی در شرایط مختلف اقلیمی، جلوگیری از بیماری با دستکاری مواد ژنتیکی گیاهی و سیستم مدیریت صحیح حشرات و آفات و بهبود محتوای مواد مغذی، مورد بررسی قرار گرفته است (۱۵).

شیوه‌های زراعی مورد استفاده

کشاورزان در طول کشت محصولات زراعی از شیوه‌های متعارف و مدرن زراعی ازجمله کشاورزی مولکولی استفاده می‌کنند. در ادامه، شیوه‌های مرسوم و مدرن مورد استفاده کشاورزان آورده شده است.

شیوه‌های مرسوم

شیوه‌های مرسوم با افزایش محتوای مواد مغذی در خاک و محافظت از آن در برابر آفات حشرات با هزینه‌های مقرون‌به‌صرفه، عملکرد محصولات را افزایش می‌دهند. روش‌های متداول زراعی عمدتاً مبتنی بر استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی برای اهداف مختلف مانند کودها و آفت‌کش‌ها است. برخی از مواد شیمیایی برای جلوگیری از حملات میکروبی به محصولات استفاده می‌شود. این مواد شیمیایی زراعی، دارای کارایی و پایداری ضعیف، پرهزینه، در مقادیر زیاد موردنیاز و گاهی اوقات غیر هدفمند هستند. علاوه بر این، مواد شیمیایی کشاورزی معمولی برای همه موجودات زنده، خطرناک هستند زیرا ممکن است باعث ایجاد سمیت‌های مختلفی مانند سرطان‌زایی، جهش‌زایی و سمیت تولیدمثلی شوند. این مواد، به‌عنوان آلاینده نیز عمل می‌کنند و باعث آلودگی هوا، آلودگی آب و خاک می‌شوند. درنتیجه،

این مواد شیمیایی کشاورزی، با از بین بردن زنجیره‌های غذایی به‌هم‌پیوسته، کل اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ بنابراین، کشاورزان برای کاهش چالش‌های ذکر شده در روش‌های کشاورزی متعارف از شیوه‌های کشاورزی مدرن استفاده می‌کنند. علاوه بر این، این شیوه‌ها پر زحمت هستند، باعث مسمومیت می‌شوند و به مقدار زیادی مواد شیمیایی کشاورزی نیاز دارند.

شیوه‌های مدرن

شیوه‌های کشاورزی مدرن شامل تناوب زراعی، کشت مخلوط و کودهای طبیعی مانند کمپوست از حیوانات، گیاهان و پودر استخوان است. گاهی اوقات از شکارچیان طبیعی نیز برای کنترل آفات، استفاده می‌شود. این شیوه‌های مدرن باعث افزایش حاصلخیزی خاک و سازگاری با محیط‌زیست و استفاده از مواد طبیعی می‌شود. این شیوه‌ها بر محدودیت‌های روش‌های کشاورزی مرسوم، غلبه می‌کنند، زیرا کارآمدتر، مقرون‌به‌صرفه‌تر، غیرسمی‌تر هستند، حاصلخیزی خاک را با افزایش محتوای مواد مغذی بهبود می‌بخشند و برای استفاده مفید هستند. این تکنیک‌های مدرن، همچنین دارای مشکلاتی مانند غیر هدفمند بودن و نیاز به نیروی انسانی بیشتر و مقادیر زیادی از مواد فعال هستند. ازاین‌رو، این امر محققین و کشاورزان را به انجام برخی شیوه‌های نوآورانه برای حل مسائل فوق‌الذکر، می‌طلبد. محققان، نانوابزارها و دستگاه‌های مختلفی را توسعه داده‌اند که مزایای متعددی ازجمله کارایی منحصربه‌فرد، پایداری، هدفمندی، تجدیدپذیری، کاربرپسند و مقرون‌به‌صرفه بودن را نشان می‌دهند. شیوه‌های کشاورزی مرسوم و مدرن در استفاده مناسب از مواد شیمیایی کشاورزی کاربردی، ناکارآمد هستند (۱۶). درنتیجه، حشرات و علف‌های هرز به حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌های معمولی مقاوم هستند. مواد شیمیایی کشاورزی بر تنوع زیستی تأثیر گذاشته و عملکرد اکوسیستم‌های مختلف را مختل کرده است (۱۷). وجود مواد شیمیایی کشاورزی در آب آشامیدنی اثرات نامطلوب متعددی بر سلامت انسان‌ها دارد (۱۸ و ۱۹). حتی پس از استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی، عملکرد محصول به دلیل بیماری‌های میکروبی، فرسایش خاک و آسیب‌پذیری نسبت به پارامترهای اقلیمی مانند خشکی، تنش گرمایی، شوری و ... کاهش می‌یابد (۱۶). این شیوه‌های کشاورزی، انعطاف‌پذیری بسیار کمی را در برابر تک کشت، فرسایش خاک، کمبود آب و حمله مکرر میکروب‌ها نشان داده‌اند. ازاین‌رو، نیاز فوری به توسعه جایگزین‌های کارآمد برای حل چالش‌های شیوه‌های کشاورزی مرسوم و مدرن وجود دارد.

کشاورزی مولکولی

کشاورزی مولکولی برای تولید پروتئین‌های دستکاری شده ژنتیکی در گیاهان استفاده می‌شود که می‌توانند به صورت خالص یا عصاره خام بدون تغییر در فنولوژی، عملکرد و متابولیسم آن گیاه استفاده شوند. تولید آنتی‌بادی‌ها و آلبومین سرم انسانی در کشت‌های سوسپانسیون سلولی گیاهی و گیاهان تراریخته از نمونه‌های اولیه کشاورزی مولکولی هستند (۲۰). گونه‌های مختلف گیاهی به‌عنوان میزبان برای تولید داروهای زیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۱). محصولات دارویی به‌دست‌آمده توسط کشاورزی مولکولی ازنظر اقتصادی ارزان‌تر هستند، مقیاس‌پذیری بیشتری داشته و غیر سمی می‌باشند. برخی از پروتئین‌ها و فاکتورهای رشد که به‌عنوان معرف‌های شیمیایی در تحقیقات، ترکیبات زینتی، حسگرها و بیوکاتالیست‌ها و عوامل زیست پالایی استفاده می‌شوند، نیز با استفاده از کشاورزی مولکولی تولید شده‌اند. در حال حاضر، بسته به شرایط کشت، چندین محصول غیردارویی کشاورزی مولکولی در دسترس تجاری، در محدوده کوچک تا متوسط تولید می‌شوند. دانشمندان بر این باورند که کشاورزی مولکولی همراه با فناوری نانو می‌تواند برای تشخیص زودهنگام بیماری‌های گیاهی و افزایش بهره‌وری محصول مورد استفاده قرار گیرد.

نانوتکنولوژی: از مزایا تا اهمیت

نانوتکنولوژی شاخه‌ای از علوم متنوع شامل علوم زیستی، علوم مواد و فناوری اطلاعات است که مواد و

وسایلی را طراحی و مشخص می‌کند که کوچک‌ترین موجودیت عملکردی آن‌ها حداقل در یک بعد، در مقیاس نانومتر است (۲۲ و ۲۳). این یک رشته علمی امیدوارکننده است که مشکلاتی را حل می‌کند که در غیر این صورت توسط یک مهندس یا یک زیست‌شناس قابل‌حل نیستند. ترکیب علم و فناوری نانو شامل ساخت و کار مواد در مقیاس نانو است که به دستکاری و اختراع ابزارها، مواد و ساختارهای جدید در سطح مولکولی، با تنظیم مجدد توالی اتمی آن‌ها در ساختارهای عملکردی با اندازه در مقیاس نانو کمک می‌کند (۲۴). تقریباً هر موجودی، از میکروب‌ها گرفته تا انسان، از سیستم‌های ماشینی مولکولی و سلولی تشکیل شده است که در سطح نانو، عمل می‌کنند (۲۵). این یک زمینه تحقیقاتی چند رشته‌ای است که بر اساس تلاش‌های ترکیبی جوامع علمی از شاخه‌های مختلف ازجمله شیمی، فیزیک، زیست‌شناسی، علوم پزشکی و مهندسی است. اگرچه، محققان از رویکردهای مبتنی بر نانو در خود همانندسازی، نظارت، کنترل و تعمیر ابزارها یا دستگاه‌ها استفاده کرده‌اند، اما هنوز به مراحل توسعه خود، نرسیده‌اند (۲۶). نانوابزارها در بخش کشاورزی در فرآیند فرآوری موادغذایی، محافظت از موادغذایی در برابر عوامل مضر و در بسته‌بندی، حمل‌ونقل، افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت موادغذایی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۷).

اهمیت رویکردهای مبتنی بر نانو

نانوتکنولوژی، راه‌حل‌هایی برای کاهش چالش‌های شیوه‌های کشاورزی موجود ارائه کرده است. اجزای اساسی فناوری نانو، ابزارهای نانو و نانودستگاه‌ها هستند. نانوابزارها انواع مختلفی از مواد نانو هستند، به‌عنوان‌مثال، نانومواد مبتنی بر کربن، نانوذرات معدنی، نانوذرات فلزی و اکسید فلزی که سطح بسیار بالایی دارند (۱۶). از سوی دیگر، دستگاه‌های مبتنی بر نانو تکنولوژی، اصلاح و تحول ژنتیکی موجود را بهبود بخشیده‌اند. همچنین گزارش شده است که روش‌های کشاورزی مبتنی بر نانومواد مهندسی می‌توانند با شرایط آب و هوایی نوسانی محیطی سازگار شوند (۲۸). این نانومواد پوشش داده شده با عناصر شناسایی مولکولی مانند آپتامر یا آنتی‌بادی‌ها به تحویل هدفمند مواد مغذی کمک می‌کنند. این امر با به حداقل رساندن اثرات نامطلوب بر محیط‌زیست، عملکرد محصولات را افزایش می‌دهد و همچنین منجر به استفاده پایدار از مواد مغذی می‌شود. این نانومواد با افزایش تحویل هدفمند مواد شیمیایی کشاورزی و استفاده و مدیریت کارآمد آن‌ها در مزارع بر مسائل مربوط به شیوه‌های متعارف و مدرن کشاورزی غلبه کرده‌اند. نانو مواد مهندسی با طراحی مواد شیمیایی کشاورزی در مقیاس نانو، کاربردهای پایدار امیدوارکننده‌ای را در شیوه‌های کشاورزی نشان داده‌اند (۲۹). نانو مواد مهندسی شده می‌توانند پایداری کشاورزی را با توجه موارد زیر سبب شوند: (۱) بهبود بافت خاک با محدود کردن استفاده از کودهای نیتروژن، (۲) پوشش نهال‌ها با نانوذرات روی و مس، باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر در مقایسه با روش‌های مرسوم با کلرید پتاسیم، نیترات پتاسیم و پلی‌اتیلن گلیکول (۳) محلول‌پاشی با استفاده از نانو مواد مهندسی ازجمله روی، اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم، بهره‌وری محصول را با جذب هدفمند کارآمد مواد شیمیایی کشاورزی افزایش داده است. محلول‌پاشی مبتنی بر نانومواد مهندسی، با افزایش کارایی فتوسنتزی محصولات زراعی و با جلوگیری از تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر سرعت فتوسنتز، افزایش مقدار کلروفیل، افزایش راندمان جذب نور، حذف گونه‌های فعال اکسیژن و حمایت از سیستم انتقال الکترون مؤثر، بهره‌وری محصول را افزایش می‌دهد (۱۶). مشخص شده است که سرعت فتوسنتز بالا، گاهی ارزش غذایی موادغذایی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، پاشش ریزمغذی‌های آهن، روی و سیلیس در شکل نانومواد مهندسی، باعث حفظ محتوای بالای مواد مغذی در غذاها می‌شود. علاوه بر این، اصلاح در شیمی سطح این نانو مواد، سبب بهبود چسبندگی آن‌ها به برگ‌ها و درنتیجه افزایش کارایی جذب مواد مغذی توسط سلول‌های کوتیکول و مزوفیل می‌شود. نانومواد مهندسی در ساخت دستگاه‌های سنجش،

برای ارزیابی سلامت محصولات در وضوح مکانی و زمانی بالا استفاده شده‌اند (۳۰).

مزایای نانومواد نسبت به مواد حجیم مربوطه

نانومواد، دارای خواص منحصربه‌فردی ازجمله مساحت سطح بالاتر، ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر، جذب بهتر یون و تمایل به کمپلکس شدن هستند. تفاوت اصلی بین نانومواد و مواد حجیم این است که تعداد زیادی اتم در مورد نانومواد در معرض سطح قرار می‌گیرند که در مورد مواد حجیم، امکان‌پذیر نیست (۳۱). مواد شیمیایی کشاورزی مبتنی بر نانومواد مهندسی، به دلیل اندازه کوچک و خواص منحصربه‌فرد خود، بستر نوظهوری برای انقلاب سیستم‌های کشاورزی موجود هستند. این مورد، به دلیل توانایی آن‌ها در عبور از موانع بیولوژیکی، افزایش قابلیت انتشار در عروق گیاه پس از کاربردهای ریشه یا محلول‌پاشی و ایجاد مسیرهای کارآمد جدید برای تحویل مواد مغذی و آفت‌کش‌ها است. آن‌ها پایداری منحصربه‌فردی را درنتیجه آزادسازی کنترل‌شده مواد مغذی و آنتی‌بیوتیک‌ها نشان می‌دهند که باعث بهبود انعطاف‌پذیری محصولات در برابر بیماری‌های مختلف می‌شوند (۴). علاوه بر این، پیکربندی و اصلاح سطح با گروه‌های عملکردی متنوعی از نانومواد مهندسی نیز انتشار هدفمند و هوشمند مواد شیمیایی کشاورزی را تسهیل می‌کند.

اهمیت نانوذرات سبز در سیستم کشاورزی

روش‌های شیمیایی مختلفی برای سنتز نانوذرات گزارش شده است که به مواد شیمیایی خطرناکی که برای سیستم‌های زنده سمی هستند، نیاز دارند. مواد بیولوژیکی مانند باکتری‌های گیاهان عالی، قارچ‌ها و ویروس‌ها توسط بسیاری از دانشمندان برای سنتز نانوذرات استفاده شده است (۳۲). گیاهان، مخازن شیمیایی طبیعت بوده، مقرون‌به‌صرفه هستند و به حداقل حفاظت نیاز دارند. آن‌ها می‌توانند فلزات سنگین را سم‌زدایی و انباشته کنند (۳۳). نانوذرات گیاهی را می‌توان از میوه، برگ، ساقه و ریشه با شستن و جوشاندن قسمت‌های موردنیاز گیاه در آب مقطر و به دنبال آن فشردن، فیلتر کردن و افزودن محلول‌های مخصوص نانوذرات مانند میکرو امولسیون و ماکرو امولسیون به دست آورد. افزودن این محلول‌ها به‌عنوان‌مثال به محلول نیترات نقره رنگ محلول را تغییر می‌دهد و تشکیل نانوذرات را آشکار می‌کند. انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌ها مانند دیاتومه‌ها، *سودوموناس استوتزری*[1]، *دسولفوویبریو دسولفوریکانس*[2]، *کلستریدیوم ترمواستیکوم NCIMB 8307*[3] و *کلبسیلا آئروژنز*[4] به ترتیب برای سنتز سیلیسیم، طلا، روی سولفید و کادمیم سولفید گزارش شده‌اند. قارچ‌هایی مانند *ورتیسیلیوم* و *آسپرژیلوس*، نیز برای سنتز نانوذرات بیولوژیکی به کار گرفته شده‌اند. ماهاور و پراسانا[5]، نقش نانوذرات اکسید روی سنتز شده از قارچ‌های خاک را به‌عنوان نانو کود، مستند کرده‌اند (۳۴). این نانوذرات اکسید روی برای بهبود کارایی جذب مواد مغذی و انتقال آن‌ها به قسمت‌های مختلف گیاهان زراعی استفاده شده‌اند. نانوذرات سبز سنتز شده از منابع گیاهی مختلف در کاربردهای کشاورزی متمایز مانند نانو کودها، نانو آفت‌کش‌ها و فرآیندهای توسعه گیاهی استفاده شده است (۳۵).

کاربردهای نانوتکنولوژی در کشاورزی

نانوتکنولوژی، با افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی نقش بسزایی در کشاورزی، ایفا کرده است. استفاده از اصول نانو در کشاورزی می‌تواند با چندین چالش مرتبط با محیط‌زیست و پایداری، ایمنی و امنیت موادغذایی مقابله کند (۲۷). فناوری نانو، سیستم کشاورزی سنتی را ازنظر بهره‌وری اقتصادی، حداقل سمیت و استفاده کارآمد از محصولات نانو متحول کرده است. تعدادی از محصولات نانو ازجمله نانو کودها و نانو آفت‌کش‌ها به صورت تجاری در

[1] *Pseudomonas stutzeri*
[2] *Desulfovibrio desulfuricans*
[3] *NCIMB 8307 Clostridium thermoaceticum*
[4] *Klebsiella aerogenes*
[5] Mahawar and Prasanna

دسترس هستند و استفاده از آن‌ها در مزارع، مزایای زیادی برای کشاورزان دارد. علاوه بر این، آن‌ها کمترین سمیت را برای موجودات زنده در مقایسه با مواد شیمیایی سنتی کشاورزی نشان می‌دهند. دو بار اسپری نانو نیتروژن، کاهش ۵۰ درصدی استفاده سنتی از اوره را در مزارع نشان می‌دهد؛ بنابراین، این نانو محصولات نه‌تنها وضعیت اقتصادی کشاورزان را تقویت می‌کنند، بلکه از طریق تخریب آسان‌تر، از محیط‌زیست نیز محافظت می‌کنند. محققان نانو ربات‌هایی را برای کشاورزی مختلف بررسی دقیق مویرگ‌های گیاه با فرآیند اسکن، ساخته‌اند. نتایج تحلیلی منتقل شده توسط این نانو ربات‌ها، به کاربردهای تشخیصی در مزارع کشاورزی، کمک می‌کند (۲۷).

کاربرد حامل‌های با اندازه نانو در کشاورزی

نانوحامل‌های هوشمند برای مصرف مؤثر کودها، آفت‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه توسعه یافته‌اند. این نانوحامل‌های هوشمند در مجاورت ریشه‌های گیاهان زراعی که در خاک غنی از مواد آلی رشد می‌کنند، قرار می‌گیرند. نیترات پتاسیم محصورشده با اکسید گرافن باعث افزایش انتشار کود در سیستم خاک می‌شود (۳۵). علاوه بر این، کاربرد نانومواد مهندسی در سیستم‌های خاک، برهمکنش روغن و میکروبیوم ریشه‌های ریزوسفر را برای افزایش بهره‌وری محصول افزایش می‌دهد (۳۶). به‌عنوان‌مثال، معرفی نانومواد مهندسی فلزی در خاک چرخه‌های نیتروژن، فسفر و کربن را تغییر می‌دهد. این نانو مواد یا جمعیت اندوفیت‌های مفید گیاهی را افزایش می‌دهند یا کلونیزه شدن آن‌ها را با ریشه‌های گیاه توسط باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن افزایش می‌دهند. علاوه بر این، نانومواد روی اکسید، تیتانیوم دی‌اکسید، نانولوله‌های کربنی چند دیواره و آهن اکسید، باعث افزایش رشد چندین محصول ازجمله بادام‌زمینی، سویا، ماش، گندم، گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی شده است (۳۷)؛ بنابراین، این رویکرد پایداری گیاه را افزایش داده و تلاش‌ها برای کاهش تغییر شکل توسط عوامل جوی را به حداقل رسانده است (۳۸ و ۳۹).

کاربرد نانو کودها در کشاورزی

رشد و بقای محصولات به چندین ماده مغذی ضروری ازجمله نیتروژن، فسفات، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، گوگرد، آهن، منگنز، روی و ... نیاز دارد. با استفاده از نانوتکنولوژی، انواع مختلفی از کودها، توسعه داده شده است که عملکرد کشاورزی را تقویت کرده است (۴۰). نانو کودها در مقادیر کم مورد استفاده قرار می‌گیرند و ازاین‌رو اثرات نامطلوب کودهای معمولی بر محیط‌زیست کاهش می‌یابد. نانو کودها، آزادسازی کنترل شده مواد مغذی در خاک را تسهیل می‌کنند. نانو کودهای هوشمند سطح بسیار بالایی دارند که جذب آن‌ها توسط گیاهان را افزایش می‌دهد. استفاده از کودهای نانو، نیاز به کود و هزینه نیروی کار را کاهش می‌دهد. کاربرد نانو کودها، اتلاف مواد مؤثره کودها را از خاک به حداقل می‌رساند (۳۹). نانوکودها، می‌توانند به‌طور مؤثر از طریق دیواره سلولی وارد سلول‌های گیاهی شده و به‌عنوان غربال، عمل کنند، زیرا نانوذرات مورد استفاده برای این منظور، اندازه کوچکی نسبت به منافذ دیواره سلولی (۵ تا ۲۰ نانومتر)، دارند. نانومواد مورد استفاده در این کودها در محلول خاک حل شده و مواد مغذی محلول را به صورت یون آزاد می‌کنند. گیاهان می‌توانند به‌طور مؤثر این یون‌های مواد مغذی محلول را جذب کنند. نانوکودهای محصورشده با نانومواد از گیاهان زراعی در خاک‌های آلوده محافظت کرده و بقای آن‌ها را افزایش می‌دهند و سبب انتشار مداوم مواد مغذی در خاک می‌شوند. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد نانوکودها، محققان انواع مختلفی از نانوکودها را بر اساس دندریمرهای کربنی، مواد معدنی، فلزات و نانو کامپوزیت‌های زیستی، سنتز کرده‌اند (۴۱ و ۴۲). همچنین کاربردهای قابل‌توجه نانوذرات سیلیسیم سبز را در نانو کودها، نانو آفت‌کش‌ها برای کنترل بیماری‌زایی علف‌های هرز و مقاومت در برابر حرارت گزارش کرده‌اند. زئولیت‌های عامل دار شده با

سورفکتانت، آزادسازی تدریجی فسفات را برای مدت طولانی، تسهیل کرده‌اند. زئولیت‌های نانومتخلخل دارای راندمان بالا و همچنین رهاسازی تدریجی کودها، هستند (۴۳). مشاهده شده است که نانوذرات سیلیسیم دی‌اکسید، جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی[1] را افزایش داده است (۴۴). کوتگودا و همکارانش[2] نشان داده‌اند که نانوذرات هیدروکسی آپاتیت اصلاح شده باعث انتشار آهسته نانوکودها می‌شود (۴۵). تأثیر نانوذرات تیتانیم دی‌اکسید نیز در رشد گیاهان ذرت، مورد مطالعه قرار گرفته است. این نانوذرات، رشد گیاهان ذرت را افزایش داده و جذب و همچنین توانایی انتقال انرژی نوری گیاهان ذرت را تقویت کرده است. نانوذرات سیلیسیم دی‌اکسید و تیتانیم دی‌اکسید، فعالیت نیترات ردوکتاز را در گیاهان سویا، افزایش داده‌اند و همچنین ظرفیت جذب گیاه را بهبود بخشیده‌اند (۴۶). نانومواد تیتانیم دی‌اکسید، سرعت فتوسنتز را در اسفناج افزایش داد (۴۷). نانوذرات اکسید آهن (III) باعث افزایش محتوای کلروفیل، کربوهیدرات، سطح اسانس، میزان آهن، ارتفاع گیاه و تعداد شاخه/بوته، برگ/بوته در گیاه *اسیمم باسیلیکم*[3] شد (۴۸). گزارش شده است که نانومواد باعث افزایش سطح ریشه و برگ برای جذب مواد مغذی می‌شود. آن‌ها کارایی جذب مواد مغذی را با (۱) افزایش تشکیل نانوحفره‌ها (۲) افزایش سازگاری ناقل‌های مولکولی یا ترشحات ریشه با تشکیل منافذ جدید یا (۳) بهره‌برداری از اندوسیتوز یا کانال‌های یونی، بهبود می‌بخشند. درنتیجه، محصولات زراعی مقدار زیادی مواد مغذی را برای مدت طولانی جذب می‌کنند و بهره‌وری محصولات را افزایش می‌دهند و کشاورزان می‌توانند با استفاده از این نانوکودها سود بیشتری کسب کنند؛ بنابراین، کاربرد نانوکودها در فعالیت‌های کشاورزی، به‌ویژه مناطقی که به خشکسالی یا سیل ناگهانی غیرمنتظره تمایل دارند، قابل‌توجه است. چنین مناطقی نیاز به بلوغ زودرس محصولات ضروری برای بهره‌وری کشاورزی پایدار دارند.

کاربردهای نانوتکنولوژی در مدیریت آفات و حشرات

حشرات و آفات خسارت زیادی به محصول وارد می‌کنند؛ بنابراین، استفاده از آفت‌کش‌ها برای کنترل علف‌های هرز، حشرات، باکتری‌ها، قارچ‌ها، جوندگان، حلزون‌ها و چندین میکروارگانیسم دیگر مهم است (۴۹). برای حفظ بهره‌وری محصول، استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی به‌طور مداوم در سطح جهانی، در حال افزایش است (۵۰). آفت‌کش‌های معمولی سمی هستند و استفاده نادرست از آن‌ها می‌تواند باعث مرگ‌ومیر سیستم‌های زنده شود. چندین موضوع دیگر مرتبط با آفت‌کش‌های معمولی عبارتند از: مقاومت حشرات یا میکروب‌ها در برابر آفت‌کش‌ها، اثربخشی کمتر، هزینه و گاهی اوقات تأثیر بر ارگانیسم‌های غیر هدف. داده‌های ارائه شده توسط اتحادیه اروپا مقدار مجاز انواع متمایز آفت‌کش‌ها و اجزای مرتبط با آن‌ها را به ترتیب شامل ۰/۱ میکروگرم در لیتر و ۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در آب آشامیدنی و غذای به‌دست‌آمده از گیاهان تعیین کرده است (۵۱). مشخص شده است که مقدار بسیار کمی یعنی ۰/۱ درصد از آفت‌کش‌های مواجهه شده، به آفات موردنظر رسیده، درحالی‌که مقدار زیادی (۹۹/۹ درصد) به‌عنوان بقایای آفت‌کش در محیط باقی‌مانده است (۵۱)؛ بنابراین، نیاز فوری به توسعه برخی از رویکردهای نوآورانه برای غلبه بر مسائل فوق، وجود دارد. محققان نانو آفت‌کش‌ها را برای غلبه بر محدودیت‌های آفت‌کش‌های معمولی فرموله کرده‌اند. این نانو آفت‌کش‌ها با کپسوله کردن مواد شیمیایی با استفاده از نانومواد طراحی شده‌اند. نانوذرات فلزی در برابر پاتوژن‌های گیاهی، بسیار مؤثر بوده و برای فرمولاسیون آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و دفع حشرات استفاده می‌شوند (۵۲). به‌عنوان‌مثال، نانومواد سیلیس با کاهش لیپوپروتئین موجود در لارو کرم ابریشم، گیاه را در برابر حمله کرم ابریشم محافظت می‌کند. وو و لیو[4]، استفاده از نانوذرات سیلیسیم مملو از والیدامایسین را برای محافظت از گیاهان میزبان در

[1] *Lycopersicum esculentum*
[2] Kottegoda
[3] *Ocimum basilicum*
[4] Wu and Liu

برابر حشره‌کش‌های مختلف، گزارش کرده‌اند (۵۳). از نانو امولسیون روغن در آب، به صورت کنترل شده، برای تهیه آفت‌کش‌ها استفاده شده است (۵۴). در کنار این نانو امولسیون‌ها، آفت‌کش‌های نانو دیگری مانند نانوذرات لیپیدی جامد حاوی اسانس نیز در کشاورزی، استفاده شده است (۵۵). استفاده از نانوذرات نقره چربی‌دوست بر روی برنج باعث مرگ‌ومیر تقریباً ۷۰ درصدی می‌شود. تیمار نانوذرات اکسید آلومینیوم ۱۰۰ درصد مرگ‌ومیر را نشان داد. با استفاده از نانولوله‌های کربنی در دانه‌های گوجه‌فرنگی کاشته شده در خاک، رشد و راندمان جذب آب گیاهان بهبود یافت. این نشان می‌دهد که نانولوله‌ها به‌عنوان وسیله‌ای برای تحویل ترکیبات موردنظر به دانه‌ها در طول جوانه‌زنی عمل می‌کنند و از حمله عوامل بیماری‌زا به دانه‌های جوانه‌زن جلوگیری می‌کنند. نانولوله‌ها، محرک رشد هستند و برای گیاهان سمی نیستند (۵۶). نانوذرات نقره، دارای خواص بازدارندگی و باکتری‌کشی امیدوارکننده و فعالیت‌های ضدمیکروبی قوی هستند. فعالیت ضدویروسی نانوذرات نقره به عواملی مانند پیکربندی، بار سطحی و بار کریستالی بستگی دارد. اگرچه مکانیسم اثر ضدویروسی به‌خوبی شناخته نشده است. بااین‌حال، فعالیت ضدویروسی نانوذرات نقره ممکن است به دلیل اتصال نانوذرات در سطح ویروس برای تعامل بین گلیکوپروتئین‌های پوششی و پروتئین‌های پوششی برای مهار تکثیر ویروس باشد. نانوذرات نقره فعالیت ضدویروسی در برابر ویروس روزت[1]، ویروس موزاییک زرد لوبیا[2]، ویروس سیب‌زمینی[3]، ویروس پژمردگی خالدار گوجه‌فرنگی[4] و... نشان داده‌اند. قرار گرفتن در معرض سیلیسیم، باعث می‌شود گیاهان زراعی در برابر بیماری‌ها و استرس، مقاوم‌تر شوند (۵۷). چندین نانوآفت‌کش تجاری با استفاده از نانولوله‌های آلومینو سیلیکات، فرموله شده‌اند. این نانو آفت‌کش‌های آلومینیوم سیلیکات بسیار فعال و دوستدار محیط‌زیست هستند. از نانو علف‌کش‌ها، برای کنترل علف‌های هرز مزارع کشاورزی استفاده شده است. کپسوله‌سازی علف‌کش در نانوذرات پلیمری باعث کاهش سمیت و سازگاری با محیط‌زیست می‌شود. ابزارهای نانو تهیه شده از بیوچار، آتاپولژیت، آزوبنزن و آمینو سیلیکون در کپسوله‌سازی گلایفوسیت استفاده می‌شوند (۵۸). ساتاپاناجارو و همکاران[5]، انواع مختلفی از نانو علف‌کش‌ها را سنتز و اثرات آن‌ها را بر روی گیاهان ارزیابی کردند که ازجمله آن‌ها می‌توان به اثر نانو امولسیون کیتوزان و پاراکوات تری فسفات سدیم، نانومواد کلومازون/ آلژینات/ کیتوسان بر روی آلیوم سپا، اثر کمپلکس پاراکوات، فرمولاسیون نانوذرات نقره کیتوسان اشاره کرد (۵۹).

کاربردهای نانوتکنولوژی در سازگاری با اقلیم

توسعه محصولات با واسطه فناوری نانو مانند کودهای نانو باعث افزایش بهره‌وری کشاورزی در شرایط نامساعد محیطی نیز شده است. گزارش شده است که استرس ناشی از یک محیط شور باعث کاهش ۲۵ درصدی بهره‌وری محصول در سطح جهان می‌شود. دانشمندان تلاش‌هایی را برای حل این مشکل با کمک نانومواد، انجام داده‌اند. پایداری محصول به تنش‌های زیستی و غیرزیستی به استفاده از نانو مواد مهندسی نسبت داده می‌شود، زیرا آن‌ها توانایی بقای گیاهان را با مقاومت یا انعطاف‌پذیری در برابر طیف متفاوتی از تنش‌ها ازجمله دما، شوری، خشکی، سیل و عفونت‌های مختلف میکروبی/ویروسی، افزایش می‌دهند (۶۰). این نانو مواد مهندسی باعث می‌شوند محصولات در شرایط نامطلوب بدون کاهش عملکرد و ارزش غذایی با جذب مؤثر مواد شیمیایی کشاورزی مقاومت کنند. آن‌ها همچنین فراهمی زیستی درشت مغذی‌های نیتروژن و فسفر را از طریق اصلاح فعالیت میکروبی و افزایش فراوانی آن‌ها افزایش می‌دهند (۶۱). اگرچه، نانو مواد مهندسی کاربرد فوق‌العاده‌ای در افزایش بهره‌وری کشاورزی نشان داده‌اند، بااین‌حال، هنوز نیاز فوری به یافتن غلظت دقیق، قسمت دقیق

[1] Sun hemp rosette virus
[2] Bean yellow mosaic virus
[3] Potato virus
[4] Tomato spotted wilt virus
[5] Satapanajaru

گیاه و زمان کاربرد این نانو مواد وجود دارد (۶۲). علاوه بر این، تلاش‌هایی نیز برای درک مکانیسم عمل نانو مواد مهندسی با سیستم‌های گیاهی موردنیاز است. گزارش شده است که استفاده از نانوذرات سیلیسیم دی‌اکسید، باعث بهبود جوانه‌زنی بذر، افزایش ماده آلی گیاه و رنگدانه کلروفیل فتوسنتزی با تجمع پرولین تحت تنش سدیم کلرید، در گیاهان گوجه‌فرنگی و کدو شده است (۶۳). محلول‌پاشی نانوذرات سولفات آهن، سطح تحمل به شوری را در مزارع آفتابگردان افزایش داده است (۶۴). علاوه بر این، نانوذرات آهن سولفات باعث بزرگ شدن سطح برگ، افزایش ماده آلی اندام هوایی، سرعت جذب سریع کربن دی‌اکسید، سنتز رنگدانه کلروفیل بیشتر (۵۷-۳۶ درصد)، عملکرد مؤثر فتوسیستم II، مقدار آهن بیشتر و کاهش شدید (۱۵ درصد) در غلظت سدیم در برگ‌ها شده است. همچنین، در دمای بالا و محیط شور، معرفی نانوذرات سلنیم دی‌اکسید نرخ فتوسنتز را تا ۶۷ درصد افزایش داده و درنتیجه بهره‌وری کشاورزی را به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی آن‌ها افزایش داده است (۶۵). سم‌زدایی از اجزای خطرناک موجود در محیط نیز با استفاده از نانومواد انجام شده است. وانگ[1] و همکاران گزارش کردند که محلول‌پاشی نانوذرات سیلیسیم، گیاه برنج را قادر می‌سازد تحت محیط تنش کادمیوم رشد کند (۶۶). به‌طور مشابه، اثربخشی نانوذرات سیلیسیم در برابر سرب، مس و روی همراه با کادمیوم، گزارش شده است (۶۶). علاوه بر این، استفاده از نانوذرات سیلیسیم دی‌اکسید و روی اکسید، باعث افزایش غلظت اسیدآمینه پرولین آزاد، مواد مغذی، جذب مؤثر آب و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بهتر شد. اثرات مفید نانوذرات اکسید روی در گیاهانی که در شرایط محیطی نامطلوب رشد می‌کنند به دلیل فعالیت‌های عملکردی آنزیم‌های مختلف ازجمله سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، نیترات ردوکتاز و گلوتاتیون ردوکتاز، آشکار شد (۶۷). نانوذرات اکسید روی برای افزایش رشد، عملکرد با محتوای روی (۲۰-۷/۹ درصد) در محصولات گندم، استفاده شده است (۶۸).

[1] Wang

کاربردهای نانوتکنولوژی در اصلاح جهش

از فناوری نانو می‌توان برای اصلاح مواد ژنتیکی گیاهان زراعی، استفاده نموده و درنتیجه به بهره‌وری بهتر محصول کمک کرد. جهش‌ها، چه طبیعی و چه القایی، نقش مهمی در سیستم‌های کشاورزی دارند. جهش‌زاهای مرسوم مختلفی ازجمله اتیل متان سولفونات[2]، متیل متان سولفونات[3] و اشعه ایکس، اشعه گاما و ... نشان داده‌اند که نانوتکنولوژی می‌تواند بستر جدیدی برای القای صفات موردنظر جدید در گیاهان زراعی، فراهم کند. در تایلند، آزمایشگاه فیزیک هسته‌ای دانشگاه چیانگ مای با استفاده از یک رویکرد نانوفناوری، نوعی برنج دانه سفید جدید از نوع برنج معمولی بنفش رنگ به نام «خائو کام»[4] ایجاد کرده است. کلمه "کام" رنگ بنفش تیره را توصیف می‌کند و این نوع برنج به دلیل ویژگی‌های ساقه، برگ‌ها و دانه‌های آنکه به رنگ بنفش هستند، محبوبیت پیدا کرده است. دانشمندان با استفاده از فناوری نانو رنگ برگ و ساقه «خائو کام» را از بنفش به سبز تغییر داده‌اند و این نوع جدید برنج، دانه‌هایی به رنگ سفید تولید کرده است. در این روش، دیواره و غشای سلول برنج در مقیاس نانو، سوراخ می‌شود تا یک اتم نیتروژن شلیک شود. سوراخ توسط یک پرتو ذره تشکیل شد که جریانی از ذرات سریع در حال حرکت بود درحالی‌که اتم نیتروژن از طریق سوراخ تزریق می‌شد. اتم نیتروژن تزریقی، مواد ژنتیکی سلول هدف برنج را بازآرایی کرده است. گیاهان تولید شده توسط سلول‌های جدید برنج به‌عنوان "ارگانیسم‌های اصلاح شده اتمی شناخته می‌شوند. این گیاهان جدید در سطح اتمی اصلاح شدند. شناسایی پاتوژن‌های ویروسی با استفاده از نشانگرهای زیستی، شناسایی آسان ویروس‌ها را در مراحل دقیق بیماری تسهیل کرده است. شناسایی خصوصیات تشکیل پروتئین در هر دو حالت نرمال و آلوده به تشخیص پروتئین‌های تولید شده در چرخه آلوده کمک می‌کند (۶۹).

[2] Ethyl methane sulfonate (EMS)
[3] Methyl methane sulfonate (MMS)
[4] Khao Kam

کاربردهای نانوحسگرها/نانوبیوسنسورها در کشاورزی برای کشاورزی دقیق

از نانو بیوسنسورها در کودها، علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، پاتوژن‌ها، بافت خاک و افزایش عملکرد محصول استفاده شده است (۷۰ و ۷۱). تنظیم‌کننده‌های نانو هورمون گیاهی مانند اکسین به جوامع علمی در شناخت مکانیسم ریشه‌های گیاه برای تنظیم در محیط‌های سخت کمک می‌کنند؛ بنابراین، پیش‌بینی می‌شود که نانوحسگرها، بخش‌های کشاورزی، غذا و محیط‌زیست را بهبود بخشند. توسعه نانودستگاه‌های قابل‌حمل می‌تواند حشرات، بیماری‌ها، پاتوژن‌ها و آلاینده‌ها را تجزیه‌وتحلیل کند (۷۲ و ۷۳). کومار و آرورا[1] توسعه حسگرهای زیستی نوری، برای شناسایی گیاهان اصلاح شده ژنتیکی را گزارش کرده‌اند. آن‌ها شناسایی ژن *باسیلوس تورینجینسیس*[2] را در گیاهان برنج اصلاح شده ژنتیکی با استفاده از طیف‌سنجی رامان تقویت‌شده سطحی[3]، انجام دادند که با یک بارکد متشکل از توالی DNA کوچک باکتریایی و نانوذرات طلای سیلیکا به‌عنوان برچسب‌های طیف‌سنجی ادغام شده است (۷۴). علاوه بر این، بیوسنسورها دستگاه‌های تحلیلی جدیدی هستند که می‌توانند اطلاعات سازنده‌ای را برای نظارت بر میزان متابولیت‌های خاص تشکیل‌شده در طی واکنش‌های متابولیک متمایز یک گیاه ارائه دهند (۷۵). حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی برای تشخیص آنالیت‌های زیستی و غیرزیستی مؤثر بر محصولات کشاورزی، ساخته شده است. دستگاه‌های مینیاتوری شده الکتروشیمیایی با تجزیه‌وتحلیل سریع آنالیت‌های هدفمند، مزایای مستقیمی را برای کشاورزان به ارمغان آورده‌اند تا از کاهش عملکرد کشاورزی ناشی از آنالیت‌های مضر محصولات جلوگیری کنند (۷۶). اگرچه، حسگرهای زیستی نوری نانو، استفاده شده‌اند و سیستم‌های سنجش بر اساس واکنش‌های جذب، فلورسانس و رنگ سنجی هستند، گاهی اوقات عملکرد مثبت یا منفی کاذب نیز، نشان می‌دهند (۷۷). بیوسنسورهای نوری بیشتر مستعد تداخلات محیطی، آسیب فیزیکی و ازلحاظ استحکام، ضعیف هستند (۷۸). برای سیستم‌های سنجش بیشتر، جوامع علمی باید ابزارها و دستگاه‌های نانو الکتروشیمیایی نوآورانه، حساس‌تر، اقتصادی، سریع و کاربرپسند را برای تشخیص همزمان در محل و خودکار چندین آنالیت موجود در محیط یک محصول ارائه دهند. چندین روش مانند تصویربرداری، طیف‌سنجی و فلورسانس از مرئی به مادون‌قرمز برای پایش صفات فیزیکی مربوط به تنش و کمبود محصول استفاده شده است (۷۹). اگرچه این تکنیک‌ها، اطلاعات لازم ازجمله سطح برگ، محتوای کلروفیل و فلورسانس (۸۰)، هدایت روزنه‌ای، راندمان استفاده از تعرق (۸۱)، پتانسیل آب و دمای برگ را فراهم می‌کنند، اما در مراحل اولیه تشخیص تنش و کمبود عناصر غذایی، در گیاهان کارآمد نیستند (۸۲). فلورسانس کلروفیل مورد استفاده برای رشد ناقص گیاهان زراعی به دلیل کاهش مقدار کلروفیل و سطح برگ همیشه برای نشان دادن و تشخیص زودهنگام قابل اطمینان نیست. از سوی دیگر، طیف‌سنجی رامان و مادون‌قرمز حداقل نسبت سیگنال به نویز را نشان می‌دهد، اما به تجهیزات گران‌قیمت و روش‌های عملیاتی پیچیده نیاز دارد. این تکنیک به دلیل قابل‌حمل بودن برای بررسی پارامترهای برگ در مزارع، استفاده می‌شود. دستگاه‌های الکتریکی مختلف نظیر: موبایل، دوربین‌های فراطیفی و ماشین‌های خودکار را می‌توان با نانوحسگرها ترکیب کرد. محققان چندین حسگر برای نظارت بر رشد گیاه، سرعت تعرق، تنش گیاه ازجمله خشکی و شوری و پارامترهای ریز اقلیمی مانند رطوبت، دما و نور ایجاد کرده‌اند. علاوه بر این، از این سنسورها برای تشخیص آفت‌کش‌ها نیز استفاده شده است. حسگرهای چندگانه نیز، با استفاده از نانو صفحات گرافن اکسید احیا شده با نانوذرات طلا برای تشخیص فوری ترکیبات آلی فرار گیاهی مانند مواد فرار برگ سبز و فیتوهورمون‌ها در محیط‌زیست استفاده شدند. این سنسور در اثر اغتشاشات مکانیکی ناشی از وزش باد و لمس دست، پایدار بود. این سنسور

[1] Kumar and Arora
[2] *Bacillus thuringiensis* (Bt)
[3] Surface Enhanced Raman Spectroscopy (SERS)

همچنین برای بررسی دما و رطوبت، مورد استفاده قرار گرفت. کشاورزی دقیق، مبتنی بر حسگرهای هوشمند، به افزایش بهره‌وری کشاورزی از طریق استفاده مؤثر از مواد کشاورزی مانند آب، مواد مغذی و مواد شیمیایی به صورت سریع، ساده، حساس، خاص، قابل‌حمل و مقرون‌به‌صرفه کمک می‌کند. کشاورزی دقیق از سیستم اطلاعات جغرافیائی GIS و GPS برای شناسایی از راه دور آفات محصولات کشاورزی یا شناسایی استرس مانند خشکسالی، استفاده می‌کند. نانوحسگرها، قادر به تشخیص آلودگی ویروسی گیاهان، سایر آفات و سطوح مواد مغذی در خاک هستند (۸۳). کشاورزی دقیق، بر اساس نانومواد، هزینه، نیروی کار، بهبود اثربخشی و سازگاری با محیط‌زیست را کاهش داده است (۸۴). علاوه بر این، نانوحسگرهای ساخته شده برای اهداف کشاورزی مزایای متعددی مانند اندازه‌گیری و بررسی رشد گیاهان زراعی و پارامترهای ریزوسفر، مواد مغذی، اثرات خطرناک و عفونت میکروبی را به نمایش گذاشته‌اند. آن‌ها همچنین برای دسترسی به رهاسازی کودها و آفت‌کش‌ها در محیط که بر حیات خاک و محصول، بهره‌وری و ایمنی برای کشاورزی پایدار و سیستم زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد، استفاده شده‌اند. در طبیعت از موجودات زنده برای سنجش پارامترهای موجود در محیط، استفاده شده است؛ بنابراین حسگرهای ساخته شده با موجودات زنده مزدوج و نانومواد دارای چندین مزیت هستند، زیرا در حین سنجش هر گونه اختلال، آن‌ها خاص‌تر، حساس‌تر هستند و برای حس کردن آسیب‌ها پاسخ‌های سریعی می‌دهند (۸۵). به‌عنوان‌مثال، ارزیابی بلادرنگ محصولات توسط نانوحسگرهای ادغام شده با سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) انجام شده است. این نانوحسگرها، مکانیسم پراکندگی تنظیم‌شده را از طریق حامل‌های نانومقیاس شامل سیگنال‌های بی‌سیم توزیع‌شده در سراسر منطقه کشاورزی بررسی می‌کنند؛ بنابراین، بررسی دقیق و فراگیر رشد مزارع زیر کشت و اطلاعات ارزشمندی توسط این نانوحسگرها، ارائه شده است. سیستم‌های آبیاری مبتنی بر رایانه نیز با فناوری حسگر مرتبط هستند. نانوحسگرها، برای ارزیابی درون مزرعه‌ای، فشار اعمال شده توسط آب ساکن در سیستم خاک مرتبط با کنترل آبیاری مستقل در منطقه کم آب، استفاده شده است (۸۶). افشاری نژاد و همکاران یک نانوحسگر بی‌سیم را که برای تشخیص آلودگی آفات، استفاده می‌شود، ساختند (۸۷). نانو حسگرهای زیستی نیز برای تخمین سطح آب زیرزمینی در مزارع، کمیت رطوبت و مواد مغذی در سیستم خاک، به کار گرفته شده‌اند (۱۶). ژیرالدو[1] و همکاران، مستند کرده‌اند که نانولوله‌های کربنی تک جداره در گیاهان بیونیک با افزایش جذب نوری از محیط طبیعی، سرعت انتقال الکترون کلروپلاست‌های سازگار با نور را تسریع کرده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که قرار دادن این نانولوله‌ها تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال را سرکوب کرده و سرعت فتوسنتز را افزایش داده است (۸۸ و ۸۹). هورمون‌های استرس مختلفی مانند اسید جاسمونیک، متیل جاسمونات و اسید سالیسیلیک وجود دارد که گیاهان را قادر می‌سازد در شرایط استرس مقاومت کنند. وانگ[2] و همکاران نشان داده‌اند که حسگرهای زیستی مبتنی بر نانوذرات مس می‌توانند آلودگی قارچ‌های بیماری‌زا را با نظارت بر غلظت اسید سالیسیلیک در دانه‌های روغنی شناسایی کنند (۹۰). علاوه بر نانولوله‌های کربنی تک جداره، نانولوله‌های کربنی چند جداره نیز برای تنظیم رشد گیاه با بررسی سطح هورمون اکسین و ارائه اطلاعاتی در مورد چگونگی زنده ماندن ریشه‌های گیاه در خاک‌های حاشیه‌ای گزارش شده است (۹۱). این پیشرفت‌ها نشان می‌دهد که کشاورزی دقیق کاربردهای امیدوارکننده‌ای برای دستیابی به امنیت غذایی دارد (۹۲ و ۹۳). کشاورزی دقیق، شامل GPS ، به نظارت بر توپوگرافی مزارع کشاورزی کمک می‌کند. مزارع ناهموار را می‌توان به‌راحتی شناسایی کرد و ممکن است برای اهداف خاص استفاده شود. این رویکرد همچنین می‌تواند برای نظارت بر عملکرد و شرایط خاک در مزرعه استفاده شود؛ اما کشاورزی دقیق در مرحله توسعه است و به سال‌های زیادی برای

[1] Giraldo
[2] Wong

جمع‌آوری اطلاعات کافی برای اجرای آن نیاز دارد (۹۴)؛ بنابراین تحقیقات آتی باید بر روی بهبود بیشتر بر اساس ابزارها و دستگاه‌های جدیدی متمرکز شود که کاربرپسند، اقتصادی و سریع باشند.

کاربردهای متفرقه نانوتکنولوژی در سیستم کشاورزی

فناوری نانو زمینه‌های مختلف بخش کشاورزی را از طریق مواد و دستگاه‌های مختلف برای درمان بیماری‌ها، تشخیص سریع و بهبود ظرفیت جذب مواد مغذی گیاهان، اصلاح کرده است. این امر با توسعه حسگرهای هوشمند و تحویل هوشمند نانو آفت‌کش‌ها در محل آسیب‌دیده که می‌تواند با محصولات آلوده مبارزه کند به‌دست‌آمده است (۹۵). تحقیقات آینده بر روی کاتالیزورهای مبتنی بر نانو متمرکز است که کارایی حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌ها را افزایش داده و به آن‌ها در مقادیر بسیار کم نیاز دارد. نانوتکنولوژی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، فیلترها یا کاتالیزورها برای کاهش آلودگی از طریق جذب یا تخریب آلاینده‌های مختلف، به حفاظت از محیط‌زیست کمک کرده است (۹۶ و ۹۷).

نانوتکنولوژی DNA در سیستم‌های کشاورزی

محققان، توجه بیشتری به کاهش ابعاد اجزای بیولوژیکی به مقیاس نانو برای ساده‌سازی راهبردهای تشخیصی و درمانی دارند. در سال ۱۹۷۶، شرکت Genentechیک فرآیند خودکار برای سنتز DNA ایجاد کرد و یک ژن مصنوعی و DNA مصنوعی با عملکرد کامل را ساخت که مسیر جدیدی را در زمینه مهندسی ژنتیک در پزشکی و کشاورزی ایجاد کرد (۹۸). مولکول‌های بیولوژیکی و پدیده‌های سلولی ویژگی‌های منحصربه‌فردی را ارائه کرده‌اند که به نانو تکنولوژیست‌ها کمک می‌کند تا به اهداف خود دست یابند که با روش‌های دیگر امکان‌پذیر نیست. به‌عنوان‌مثال، ساخت داربست‌های سیلیکونی برای نانوساختارها ضروری نیست، زیرا ساختار مارپیچ DNAبه دانشمندان اسکلت واقعی برای مونتاژ نانوساختارها را به دلیل الگوی پیوندی خاص DNA که اتم‌ها را در یک الگوی قابل پیش‌بینی مرتب می‌کند، ارائه می‌دهد. DNA جزء مهمی از نانو ماشین‌ها برای ساخت نانوساختارها است. DNA اطلاعات ژنتیکی را ذخیره می‌کند و به‌عنوان پایه نسل پیشرو رایانه‌ها عمل می‌کند. ریزپردازنده‌ها و ریزمدارها با تثبیت مولکول‌های DNA بر روی تراشه‌های سیلیکونی، به ترتیب برای ایجاد نانوپردازنده‌ها و نانومدارها اصلاح شده‌اند. این تراشه‌های سیلیکونی اصلاح شده جایگزین میکروتراشه‌ها با کانال‌های جریان الکترونی موجود در سیلیکون شده‌اند. تراشه‌های زیستی از ویژگی‌هایDNA ، برای حل موانع محاسباتی با ساده‌سازی محاسبات ریاضی، استفاده می‌کنند. مولکول‌های بیولوژیکی دیگر نیز اطلاعات را در مکان‌های کوچک‌تر ذخیره و منتقل می‌کنند. چنین تراشه‌های زیستی پردازنده‌های مبتنی بر DNA هستند که قطعات استثنایی از اطلاعات DNAسوار شده را به نمایش گذاشته‌اند. محققان از مولکول‌های جذب‌کننده نور مانند شبکیه چشم انسان برای افزایش قابلیت ذخیره‌سازی سی‌دی‌ها تا حدود هزار برابر، استفاده می‌کنند (۹۹). نانوبیوتکنولوژی، حوزه امیدوارکننده‌ای است که فرصت‌های گسترده‌ای را برای نانو/ریزساخت در پیوند با بیوتکنولوژی باز کرده و برای مشکلات حل‌نشده موجود، راه‌حل‌هایی ارائه می‌دهد. تمام کاربردهای احتمالی ژنومیک ازجمله پستانداران، منابع گیاهی و میکروبی را جمع‌آوری می‌کند تا ابزارهای اساسی برای جمع‌آوری اطلاعات توالی مورد استفاده را فراهم کند. این دستگاه‌ها پرسش‌های مربوط به اطلاعات ژنومی را حل کرده و از این دستگاه‌ها در زمینه‌های مختلف، به‌ویژه در بخش‌های پزشکی و کشاورزی استفاده می‌کنند (۱۰۰).

چالش‌های مرتبط با مداخلات فناوری نانو در بخش کشاورزی

لوری[1] و همکاران موانع متعددی را برای گسترش سریع فناوری نانو در کشاورزی، گزارش کرده‌اند، ازجمله: عدم درک مکانیکی از فعل‌وانفعالات گیاه و نانو مواد مهندسی (این‌ها فعل‌وانفعالاتی هستند که به‌وسیله آن‌ها نانو مواد مهندسی مستقیماً گیاهان را در معرض خاک، آب و جو قرار می‌دهند)، مسیرهای محدود برای انتقال نانومواد به سیستم عروقی گیاه و اندامک‌ها و درک جزئی از اثرات خطرناک موجودات زنده ناشی از نانومواد قرار داده شده در زنجیره غذایی (۱۰۱). تجاری‌سازی نانومحصولات مورد استفاده در کشاورزی به دلیل اثرات سمی و عمدتاً اثرات جهش‌زایی برای سیستم‌های زنده، محدود شده است. استفاده ناکارآمد از نانومحصولات ممکن است باعث مشکلات سلامت مزمن مانند سرطان، کاهش باروری، اختلالات قلبی و سیستم عصبی مرکزی و ... شود. نانومواد سنتز شده شیمیایی دوستدار محیط‌زیست نیستند زیرا تجزیه کامل آن‌ها آسان نیست؛ بنابراین، میزان سمیت ایجاد شده برای سیستم‌های زنده به دوز و میزان قرار گرفتن در معرض نانو محصولات در محیط بستگی دارد؛ بنابراین برای غلبه بر اثرات سمی، تحقیقات کنونی عمدتاً بر روی گیاهان متمرکز شده است. علاوه بر این، آزادسازی و فعل‌وانفعالات نانومحصولات به شرایط آب و هوایی بستگی دارد. تحقیقات گسترده‌ای برای درک مکانیسم انتشار و فعل‌وانفعالات نانومحصولات با محصولات زراعی در حال انجام است. اجرای کارآمد این فناوری در محدوده کم سود کشاورزی، متکی بر توانایی آن‌ها برای تنظیم تعادل و هزینه‌های ساختار و بازپرداخت است.

نتیجه‌گیری

نانوتکنولوژی به دلیل کاربردهای متنوع آن در اصلاح نباتات، کنترل بیماری، کاربرد کود و کشاورزی دقیق، پتانسیل ایجاد انقلابی در سیستم کشاورزی را دارد. این مقاله روش‌های کشاورزی مرسوم، مدرن و مبتنی بر نانومواد را توضیح داده است. رویکردهای مبتنی بر نانو، می‌تواند کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی را با تحویل هدفمند مواد شیمیایی کشاورزی (کودها و آفت‌کش‌ها) بهبود بخشد و استفاده کارآمد و مناسب از آن‌ها را تبیین کند. از نانوذراتی مانند طلا، نقره، سیلیسیم، تیتانیوم دی‌اکسید و ... به‌عنوان عوامل ضدمیکروبی، استفاده شده است. حسگرهای زیستی یکپارچه با نانومواد برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصول با شناسایی پاتوژن‌های میکروبی مختلف که باعث بیماری می‌شوند، استفاده شده است. کشاورزی دقیق مبتنی بر حسگرها برای ارزیابی رشد گیاهان زراعی و پارامترهای ریزوسفر مانند سطح آب زیرزمینی، میزان رطوبت، مواد مغذی شامل تنظیم‌کننده‌ها/هورمون‌های رشد گیاه، اثرات خطرناک و عفونت میکروبی استفاده شده است. علاوه بر این، این فناوری مزایای بسیاری ازجمله ساده، سریع، مقرون‌به‌صرفه، حساس، خاص و قابل‌حمل را به نمایش گذاشته است. ازاین‌رو، نانوتکنولوژی، جایگزین‌های اکولوژیکی مؤثری برای مدیریت آفات حشرات بدون آسیب به گیاهان و جانوران فراهم می‌کند. تلاش‌های آینده برای توسعه دستگاه‌های مبتنی بر نانومواد بسیار نوآورانه موردنیاز است که باید کوچک، مقرون‌به‌صرفه، ایمن، سریع، کارآمد و کاربرپسند باشند تا چالش‌های نانوتکنیک‌های موجود در کشاورزی برای افزایش عملکرد محصولات را کاهش دهند. همچنین، تلاش‌هایی در جهت تجاری‌سازی کاربردهای مبتنی بر نانومواد موردنیاز است. این امر با غربالگری و بهینه‌سازی نانومواد برای محصولات مختلف قابل‌دستیابی است. کارایی چنین نانومواد بهینه‌شده‌ای را می‌توان با دستکاری خواص و پایداری آن‌ها افزایش داد. ازاین‌رو، نیاز به توسعه برخی از رویکردهای جدید نانویی وجود دارد که باید در جذب مواد فعال کشاورزی، پایداری بهتر و حمل‌ونقل هدفمند کودها، آفت‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها بسیار کارآمد باشند. علاوه بر این، کارایی تکنیک‌های زیست پالایی موجود نیز می‌تواند با ادغام آن‌ها با نانوابزارها و دستگاه‌های

[1] Lowry

نوآورانه بهبود یابد. در حال حاضر، بیشتر استفاده از نانومواد در کشاورزی در مقیاس آزمایشگاهی است، گزارش‌های بسیار کمی وجود دارد که استفاده در محل، از رویکردهای نانو را مستند کند؛ بنابراین، اگر از این فناوری در مقیاس مزرعه استفاده شود و نشان داده شود، برای کشاورزان سودمندتر خواهد بود. محققان، از طرفی نگران سمیت هستند زیرا سمیت ناشی از نانومواد ممکن است باعث ایجاد سایر مشکلات سلامتی مانند سرطان، مشکلات تنفسی، سمیت را می‌توان با سنتز نانومواد از منابع بیولوژیکی حل کرد. در آینده، فناوری نانو می‌تواند با نوسازی نیازهای غذایی و سیستم توزیع آن‌ها و با افزایش بهره‌وری محصول برای دستیابی به پایداری اکولوژیکی، محیط سبز و سازگاری اقتصادی، نقش مهمی در کشاورزی ایفا کند.

References

1. Haris M, Hussain T, Mohamed HI, Khan A, Ansari MS, Tauseef A, Khan AA, Akhtar N. Nanotechnology–A new frontier of nano-farming in agricultural and food production and its development. Science of The Total Environment. 2023; 857:159639.
2. Rodell M, Velicogna I, Famiglietti JS. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Nature. 2009; 460(7258):999-1002.
3. Usman M, Farooq M, Wakeel A, Nawaz A, Cheema SA, ur Rehman H, Ashraf I, Sanaullah M. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. Science of the Total Environment. 2020; 721: 137778.
4. Kah M, Kookana RS, Gogos A, Bucheli TD. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. Nature nanotechnology. 2018;13(8):677-84.
5. Mesnage R, Séralini GE. Toxicity of pesticides on health and environment. Frontiers in public health. 2018; 6: 268.
6. Roberts DP, Mattoo AK. Sustainable crop production systems and human nutrition. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2019; 3: 72.
7. Karn B, Kuiken T, Otto M. Nanotechnology and in situ remediation: a review of the benefits and potential risks. Environmental health perspectives. 2009; 117(12): 1813-31.
8. Joshi H, Choudhary P, Mundra SL. Future prospects of nanotechnology in agriculture. Int. J. Chem. Stud. 2019; 7(2): 957-63.
9. Vermeulen SJ, Aggarwal PK, Ainslie A, Angelone C, Campbell BM, Challinor AJ, Hansen JW, Ingram JS, Jarvis A, Kristjanson P, Lau C. Options for support to agriculture and food security under climate change. Environmental Science & Policy. 2012; 15(1): 136-44.
10. Singh D, Gurjar BR. Nanotechnology for agricultural applications: Facts, issues, knowledge gaps, and challenges in environmental risk assessment. Journal of Environmental Management. 2022; 322: 116033.
11. Mukhopadhyay SS, Sharma S. Nanoscience and nanotechnology: cracking prodigal farming. Journal of Bionanoscience. 2013; 7(5): 497-502.
12. Dasgupta N, Ranjan S, Ramalingam C. Applications of nanotechnology in agriculture and water quality management. Environmental Chemistry Letters. 2017; 15: 591-605.
13. Chen YW, Lee HV, Juan JC, Phang SM. Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass Gelidium elegans. Carbohydrate polymers. 2016; 151: 1210-9.
14. Li Y, Cu YT, Luo D. Multiplexed detection of pathogen DNA with DNA-based fluorescence nanobarcodes. Nature biotechnology. 2005; 23(7): 885-9.
15. Yadav N, Garg VK, Chhillar AK, Rana JS. Recent advances in nanotechnology for the improvement of conventional agricultural systems: A Review. Plant Nano Biology. 2023; 18:100032.
16. Lowry GV, Avellan A, Gilbertson LM. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 517-22.
17. Beketov MA, Kefford BJ, Schäfer RB, Liess M. Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013; 110(27): 11039-43.

18. Diaz RJ, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. science. 2008; 321(5891):926-9.
19. Klarich KL, Pflug NC, DeWald EM, Hladik ML, Kolpin DW, Cwiertny DM, LeFevre GH. Occurrence of neonicotinoid insecticides in finished drinking water and fate during drinking water treatment. Environmental Science & Technology Letters. 2017; 4(5): 168-73.
20. Schillberg S, Finnern R. Plant molecular farming for the production of valuable proteins–Critical evaluation of achievements and future challenges. Journal of plant physiology. 2021; 258: 153359.
21. Hirsch AM, Valdés M. Micromonospora: An important microbe for biomedicine and potentially for biocontrol and biofuels. Soil Biology and Biochemistry. 2010; 42(4): 536-42.
22. Joshi H, Choudhary P, Mundra SL. Future prospects of nanotechnology in agriculture. Int. J. Chem. Stud. 2019; 7(2): 957-63.
23. Silva GA. Introduction to nanotechnology and its applications to medicine. Surgical neurology. 2004; 61(3): 216-20.
24. Rai, V., Acharya, S., & Dey, N. Implications of nanobiosensors in agriculture. 2012.
25. Duhan JS, Kumar R, Kumar N, Kaur P, Nehra K, Duhan S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. Biotechnology Reports. 2017; 15: 11-23.
26. Scott NR. Nanotechnology and animal health. Revue Scientifique Et Technique-Office International Des Epizooties. 2005; 24(1): 425.
27. Pandey G. Challenges and future prospects of agri-nanotechnology for sustainable agriculture in India. Environmental Technology & Innovation. 2018; 11: 299-307.
28. Mittal D, Kaur G, Singh P, Yadav K, Ali SA. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. Frontiers in Nanotechnology. 2020; 2: 579954.
29. Gilbertson LM, Pourzahedi L, Laughton S, Gao X, Zimmerman JB, Theis TL, Westerhoff P, Lowry GV. Guiding the design space for nanotechnology to advance sustainable crop production. Nature nanotechnology. 2020; 15(9): 801-10.
30. Giraldo JP, Wu H, Newkirk GM, Kruss S. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 541-53.
31. Hochella Jr MF, Lower SK, Maurice PA, Penn RL, Sahai N, Sparks DL, Twining BS. Nanominerals, mineral nanoparticles, and earth systems. science. 2008; 319(5870): 1631-5.
32. Kuppusamy P, Yusoff MM, Maniam GP, Govindan N. Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications–An updated report. Saudi Pharmaceutical Journal. 2016; 24(4): 473-84.
33. Jadoun S, Arif R, Jangid NK, Meena RK. Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review. Environmental Chemistry Letters. 2021; 19: 355-74.
34. Mahawar H, Prasanna R. Prospecting the interactions of nanoparticles with beneficial microorganisms for developing green technologies for agriculture. Environmental nanotechnology, monitoring & management. 2018; 10: 477-85.
35. Shang Y, Hasan MK, Ahammed GJ, Li M, Yin H, Zhou J. Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. Molecules. 2019; 24(14): 2558.
36. Zhang R, Vivanco JM, Shen Q. The unseen rhizosphere root–soil–microbe interactions for crop production. Current opinion in microbiology. 2017; 37: 8-14.
37. Shojaei TR, Salleh MA, Tabatabaei M, Mobli H, Aghbashlo M, Rashid SA, Tan T. Applications of nanotechnology and carbon nanoparticles in agriculture. InSynthesis, technology and applications of carbon nanomaterials, Elsevier. 2019; 247-277.
38. Ditta A. How helpful is nanotechnology in agriculture? Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology. 2012; 3(3): 033002.
39. Ditta A, Arshad M. Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition. Nanotechnology Reviews. 2016; 5(2): 209-29.
40. Iavicoli I, Leso V, Beezhold DH, Shvedova AA. Nanotechnology in

agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. Toxicology and applied pharmacology. 2017; 329: 96-111.
41. Qureshi JA, Stansly PA. Exclusion techniques reveal significant biotic mortality suffered by Asian citrus psyllid Diaphorina citri (Hemiptera: Psyllidae) populations in Florida citrus. Biological Control. 2009; 50(2): 129-36.
42. Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, Chauhan DK, Živčák M, Ghorbanpour M, El-Sheery NI, Brestic M. Application of silicon nanoparticles in agriculture. 3 Biotech. 2019; 9: 1-1.
43. Chinnamuthu CR, Boopathi PM. Nanotechnology and agroecosystem. Madras Agricultural Journal. 2009; 96(jan-jun): 1
44. Siddiqui MH, Al-Whaibi MH. Role of nano-SiO2 in germination of tomato (Lycopersicum esculentum seeds Mill.). Saudi journal of biological sciences. 2014; 21(1): 13-7.
45. Kottegoda N, Munaweera I, Madusanka N, Karunaratne V. A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. Current science. 2011; 10: 73-8.
46. Changmei L, Chaoying Z, Junqiang W, Guorong W, Mingxuan T. Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism. Soybean Science. 2002; 21(3): 168-71.
47. Zhang G, Zhou L, Cai D, Wu Z. Anion-responsive carbon nanosystem for controlling selenium fertilizer release and improving selenium utilization efficiency in vegetables. Carbon. 2018; 129: 711-9.
48. Elfeky SA, Mohammed MA, Khater MS, Osman YA, Elsherbini E. Effect of magnetite nano-fertilizer on growth and yield of Ocimum basilicum L. Int. J. Indig. Med. Plants. 2013; 46(3): 1286-1293.
49. Prasad R, Bhattacharyya A, Nguyen QD. Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. Frontiers in microbiology. 2017; 8: 1014.
50. Singh R, Kumar N, Mehra R, Kumar H, Singh VP. Progress and challenges in the detection of residual pesticides using nanotechnology based colorimetric techniques. Trends in Environmental Analytical Chemistry. 2020; 26: e00086.
51. Khairy M, Ayoub HA, Banks CE. Non-enzymatic electrochemical platform for parathion pesticide sensing based on nanometer-sized nickel oxide modified screen-printed electrodes. Food Chemistry. 2018; 255: 104-11.
52. Barik TK, Sahu B, Swain V. Nanosilica—from medicine to pest control. Parasitology research. 2008; 103: 253-8.
53. Wu L, Liu M. Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention. Carbohydrate polymers. 2008; 72(2): 240-7.
54. Wang L, Li X, Zhang G, Dong J, Eastoe J. Oil-in-water nanoemulsions for pesticide formulations. Journal of colloid and interface science. 2007; 314(1): 230-5.
55. Shah MA, Wani SH, Khan AA. Nanotechnology and insecticidal formulations. Journal of Food Bioengineering and Nanoprocessing. 2016; 1(3): 285-310.
56. Duhan JS, Kumar R, Kumar N, Kaur P, Nehra K, Duhan S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. Biotechnology Reports. 2017; 15: 11-23.
57. Ma JF, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in plant science. 2006; 11(8): 392-7.
58. Camara MC, Campos EV, Monteiro RA, do Espirito Santo Pereira A, de Freitas Proença PL, Fraceto LF. Development of stimuli-responsive nano-based pesticides: emerging opportunities for agriculture. Journal of nanobiotechnology. 2019; 17(1): 1-9.
59. Satapanajaru T, Anurakpongsatorn P, Pengthamkeerati P, Boparai H. Remediation of atrazine-contaminated soil and water by nano zerovalent iron. Water, air, and soil pollution. 2008; 192: 349-59.
60. Lowry GV, Avellan A, Gilbertson LM. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 517-22.
61. Simonin M, Cantarel AA, Crouzet A, Gervaix J, Martins JM, Richaume A. Negative effects of copper oxide nanoparticles on carbon and nitrogen cycle

Journal of Agrometeorology. 2010;12(1): 99-101.
72. Farrell D, Alper J, Ptak K, Panaro NJ, Grodzinski P, Barker AD. Recent advances from the national cancer institute alliance for nanotechnology in cancer, 2010.
73. Razmi A, Golestanipour A, Nikkhah M, Bagheri A, Shamsbakhsh M, Malekzadeh-Shafaroudi S. Localized surface plasmon resonance biosensing of tomato yellow leaf curl virus. Journal of virological methods. 2019; 267: 1-7.
74. Kumar V, Arora K. Trends in nano-inspired biosensors for plants. Materials Science for Energy Technologies. 2020; 3: 255-73.
75. Singh R, Kumar N, Mehra R, Kumar H, Singh VP. Progress and challenges in the detection of residual pesticides using nanotechnology based colorimetric techniques. Trends in Environmental Analytical Chemistry. 2020; 26: e00086.
76. Li Z, Yu T, Paul R, Fan J, Yang Y, Wei Q. Agricultural nanodiagnostics for plant diseases: recent advances and challenges. Nanoscale Advances. 2020; 2(8): 3083-94.
77. Mahato K, Maurya PK, Chandra P. Fundamentals and commercial aspects of nanobiosensors in point-of-care clinical diagnostics. 3 Biotech. 2018; 8: 1-4.
78. Chen C, Wang J. Optical biosensors: An exhaustive and comprehensive review. Analyst. 2020; 145(5): 1605-28.
79. Giraldo JP, Wu H, Newkirk GM, Kruss S. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 541-53.
80. Gao C, Huang Q, Lan Q, Feng Y, Tang F, Hoi MP, Zhang J, Lee SM, Wang R. A user-friendly herbicide derived from photo-responsive supramolecular vesicles. Nature Communications. 2018; 9(1): 2967.
81. Al-Tamimi N, Brien C, Oakey H, Berger B, Saade S, Ho YS, Schmöckel SM, Tester M, Negrão S. Salinity tolerance loci revealed in rice using high-throughput non-invasive phenotyping. Nature communications. 2016; 7(1): 13342.
82. Giraldo JP, Wu H, Newkirk GM, Kruss S. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 541-53.
83. Brock DA, Douglas TE, Queller DC, Strassmann JE. Primitive agriculture in a microbial activities in contrasting agricultural soils and in presence of plants. Frontiers in microbiology. 2018; 9: 3102.
62. Lowry GV, Avellan A, Gilbertson LM. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 517-22.
63. Siddiqui MH, Al-Whaibi MH. Role of nano-SiO2 in germination of tomato (Lycopersicum esculentum seeds Mill.). Saudi journal of biological sciences. 2014; 21(1): 13-7.
64. Torabian N, Favier V, Dirrenberger J, Adamski F, Ziaei-Rad S, Ranc N. Correlation of the high and very high cycle fatigue response of ferrite-based steels with strain rate-temperature conditions. Acta Materialia. 2017; 134: 40-52.
65. Wu L, Liu M. Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention. Carbohydrate polymers. 2008; 72(2): 240-7.
66. Wang S, Wang F, Gao S, Wang X. Heavy metal accumulation in different rice cultivars as influenced by foliar application of nano-silicon. Water, Air, & Soil Pollution. 2016; 227: 1-3.
67. Shalaby TA, Bayoumi Y, Abdalla N, Taha H, Alshaal T, Shehata S, Amer M, Domokos-Szabolcsy É, El-Ramady H. Nanoparticles, soils, plants and sustainable agriculture. Nanoscience in food and agriculture 1. 2016: 283-312.
68. Singh K, Madhusudanan M, Verma AK, Kumar C, Ramawat N. Engineered zinc oxide nanoparticles: an alternative to conventional zinc sulphate in neutral and alkaline soils for sustainable wheat production. Biotech. 2021; 11(7): 322.
69. Usman M, Farooq M, Wakeel A, Nawaz A, Cheema SA, ur Rehman H, Ashraf I, Sanaullah M. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. Science of the Total Environment. 2020; 721: 137778.
70. Rai V, Acharya S, Dey N. Implications of nanobiosensors in agriculture, 2012.
71. Singh R, Singh R, Singh D, Mani JK, Karwasra SS, Beniwal MS. Effect of weather parameters on karnal bunt disease in wheat in Karnal region of Haryana.

social amoeba. Nature. 2011; 469(7330): 393-6.
84. Ali MA, Rehman I, Iqbal A, Din S, Rao AQ, Latif A, Samiullah TR, Azam S, Husnain T. Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. Adv life sci. 2014; 1(3): 129-38.
85. Dubey A, Mailapalli DR. Nanofertilisers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. Sustainable Agriculture Reviews.2016; 19: 307-30.
86. Hossain K, Abbas SZ, Ahmad A, Rafatullah M, Ismail N, Pant G, Avasn M. Nanotechnology: a boost for the urgently needed second green revolution in Indian agriculture. Nanobiotechnology in Agriculture: An Approach Towards Sustainability. 2020: 15-33.
87. Afsharinejad A, Davy A, Jennings B. Dynamic channel allocation in electromagnetic nanonetworks for high resolution monitoring of plants. Nano Communication Networks. 2016; 7: 2-16.
88. Giraldo JP, Landry MP, Faltermeier SM, McNicholas TP, Iverson NM, Boghossian AA, Reuel NF, Hilmer AJ, Sen F, Brew JA, Strano MS. Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing. Nature materials. 2014; 13(4): 400-8.
89. Wong MH, Giraldo JP, Kwak SY, Koman VB, Sinclair R, Lew TT, Bisker G, Liu P, Strano MS. Nitroaromatic detection and infrared communication from wild-type plants using plant nanobionics. Nature materials. 2017; 16(2): 264-72.
90. Wang Z, Wei F, Liu SY, Xu Q, Huang JY, Dong XY, Yu JH, Yang Q, Zhao YD, Chen H. Electrocatalytic oxidation of phytohormone salicylic acid at copper nanoparticles-modified gold electrode and its detection in oilseed rape infected with fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum*. Talanta. 2010; 80(3): 1277-81.
91. McLamore ES, Diggs A, Calvo Marzal P, Shi J, Blakeslee JJ, Peer WA, Murphy AS, Porterfield DM. Non-invasive quantification of endogenous root auxin transport using an integrated flux microsensor technique. The Plant Journal. 2010; 63(6): 1004-16.
92. Finger R, Swinton SM, El Benni N, Walter A. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. Annual Review of Resource Economics. 2019; 11: 313-35.
93. Roberts DP, Mattoo AK. Sustainable crop production systems and human nutrition. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2019; 3: 72.
94. Saiz-Rubio V, Rovira-Más F. From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. Agronomy. 2020; 10(2): 207.
95. Aune JB, Coulibaly A, Giller KE. Precision farming for increased land and labour productivity in semi-arid West Africa. A review. Agronomy for sustainable development. 2017; 37: 1-0.
96. Tungittiplakorn W, Cohen C, Lion LW. Engineered polymeric nanoparticles for bioremediation of hydrophobic contaminants. Environmental Science & Technology. 2005; 39(5): 1354-8.
97. Bhattacharyya A, Bhaumik A, Rani PU, Mandal S, Epidi TT. Nano-particles-A recent approach to insect pest control. African Journal of Biotechnology. 2010; 9(24): 3489-93.
98. Kumar V, Arora K. Trends in nano-inspired biosensors for plants. Materials Science for Energy Technologies. 2020; 3: 255-73.
99. Whitesides GM. The'right'size in nanobiotechnology. Nature biotechnology. 2003; 21(10): 1161-5.
100. Yasuda K. Biotechnology approach to determination of genetic and epigenetic control in cells. Journal of Nanobiotechnology. 2004; 2(1): 1-0.
101. Lowry GV, Avellan A, Gilbertson LM. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. Nature nanotechnology. 2019; 14(6): 517-22.

Vol.4/No.1/ Summer 2024/Pages: 33-51 https://www.qafj.iauk.ac.ir

The use of new advances in nanotechnology in agriculture

Tahereh Navaie Diva*
Assistant Professor, Department of Chemistry, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.
*Corresponding Author: taherehnavaie@gmail.com
Received: 03/01/2024, Accepted: 07/07/2024

Abstract
Industries such as building, energy, textiles, and pharmaceutical products rely on agriculture for food and raw materials. Recently, agriculture has been facing a multitude of concerns, such as climate change, soil degradation, decreasing land availability, urbanization, unsustainable use of natural resources, excessive use of agrochemicals, biodiversity loss, and air pollution. These alarming issues require immediate interventions. Conventional agricultural practices are unable to effectively address these challenges due to their complexity, labor-intensive nature, time-consuming processes, inefficiency, and high demand for crop nutrients. Additionally, the indiscriminate use of agrochemicals poses a significant threat to the ecosystem. In order to cope with current challenges, scientists, farmers and policymakers are therefore always looking for new techniques. Nanotechnology, as a new savior of sustainable agriculture, is emerging. In addition to precision agriculture, nanosensors have been used to detect crop pathogens and chemically harmful analytes in agricultural fields. Furthermore, the use of nanorobotics and nano-barcodes has a significant impact on agriculture, increasing crop yields. The applications of nanotools in agriculture are vast, including bioimaging, sensing, photocatalysis, and agrochemical delivery. This study comprehensively discusses diverse tremendous applications of nanotechnology in overcoming the challenges of conventional agronomic practices and future prospects of nanotechnology in agriculture.

Keywords: Agriculture, Nanotechnology, Biosensors, Nano-fertilizers, Nano-herbicides