



چشم اندازهای کاربردی استفاده از فناوری نانو

در کشاورزی

سال اول ■ شماره ۵

www.icanano.ir



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فهرست مطالب

۴	مقدمه
۵	روند توسعه فناوری در بخش کشاورزی
۷	دستیابی به پایداری در کشاورزی از طریق فناوری نانو
۸	چالش‌های استفاده از فناوری نانو در سال‌های آینده
۹	آینده فناوری نانو در کشاورزی
۱۰	انتشارات مربوط به فناوری نانو در کشاورزی
۱۱	انواع محصولات نانوفناورانه مورد استفاده در کشاورزی
۱۵	نقش فناوری نانو در پیش تیمار بذر
۱۸	نتیجه‌گیری

گردآورنده

آزاده بشری؛ مدیر توسعه محصول مرکز صنعتی سازی نانوفناوری کاربردی (ICAN)،

دکتری شیمی نساجی و علوم الیاف

ایمیل: bashari@aut.ac.ir

لینکدین: <https://www.linkedin.com/in/azadeh-bashari/>





۱. مقدمه

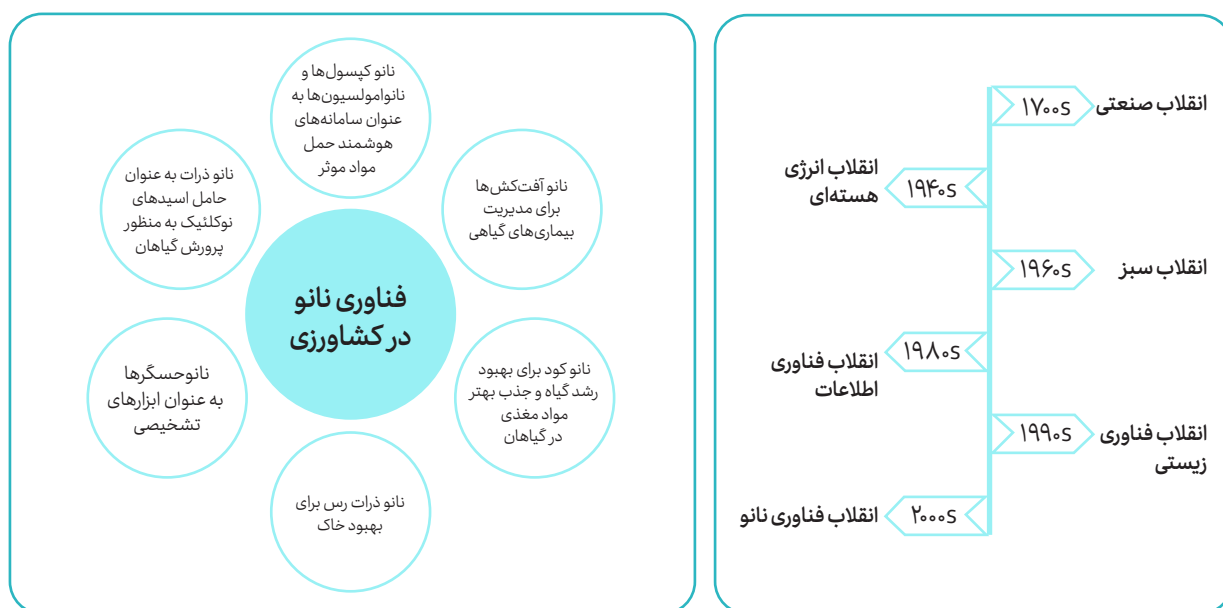
هم‌زمان با درک امکان تغییر یا کنترل خواص مواد با استفاده از کاهش ابعاد تا رسیدن به ابعاد نانومتری، دریچه‌ای برای کاربردهای جدید و متنوع فناوری نانو در صنایع مختلف گشوده شد. در این بین بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین و قدیمی‌ترین صنعت در زندگی بشر نیز به استفاده از فرایندها، مواد و محصولات نوین حاصل از فناوری نانو روی آورده است. ماهیت چندوجهی بخش کشاورزی منجر به تحقیق و توسعه نانومواد در حوزه‌های کلیدی این صنعت شامل پردازش و بهبود بذر، کودها و مکمل‌های رشد گیاه، آفت‌کش‌ها، پادزیست‌ها، داروهای دامپزشکی، آبی‌پروری، شیلات و همچنین نانوحسگرها به منظور پایش شرایط محیطی و آفت‌های محیطی، بیماری‌ها و آلاینده‌های محیط کشت شده است. مهم‌ترین رویکرد در صنعت کشاورزی، افزایش میزان تولید پایدار با هدف تأمین نیاز رو به رشد جمعیت است که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۹٫۳ میلیارد نفر برسد. در این راستا، محققان در تلاش‌اند تا تغییرات اساسی در فناوری کشاورزی ایجاد کرده و به این ترتیب زیرساخت‌هایی برای کشاورزی مدرن فراهم آورند.

انقلاب سبز^۱ (GR) که با توسعه گونه‌های پرمحصول و افزایش بازده تولید محصولات شناخته می‌شود، با استفاده بی‌رویه از کودهای مصنوعی و آفت‌کش‌ها منجر به تغییر روش‌های مدیریتی در کشاورزی شده است. با وجود نتایج بسیار مطلوب ناشی از انقلاب سبز، لیکن نباید از اثرات نامطلوب استفاده از مواد مصنوعی بر زیست‌بوم، همچون کاهش قدرت باروری خاک و آلودگی آب‌های زیرزمینی چشم‌پوشی کرد. به این منظور تحقیقات برای دستیابی به روش‌های زیستی ایمن، توسعه پایدار و کشاورزی ارگانیک به سمت کودها و سموم زیستی هدایت شد. با این وجود نگرانی‌های عمده در خصوص طول عمر مفید و عملکرد غیرقابل پیش‌بینی این مواد در اثر تنش‌های محیطی، اثربخشی کامل این مواد در کشاورزی واقعی را همچنان در حاله‌ای از ابهام فرو برده است؛ بنابراین، تغییر فناوری در کشاورزی به منظور مقابله با محدودیت‌های موجود به شدت موردنیاز است. از این رو فناوری نانو به‌عنوان یک راه‌حل پیشرفته مطرح شده است، زیرا این فناوری انقلابی می‌تواند فرصتی را برای کشاورزی مدرن فراهم نماید.



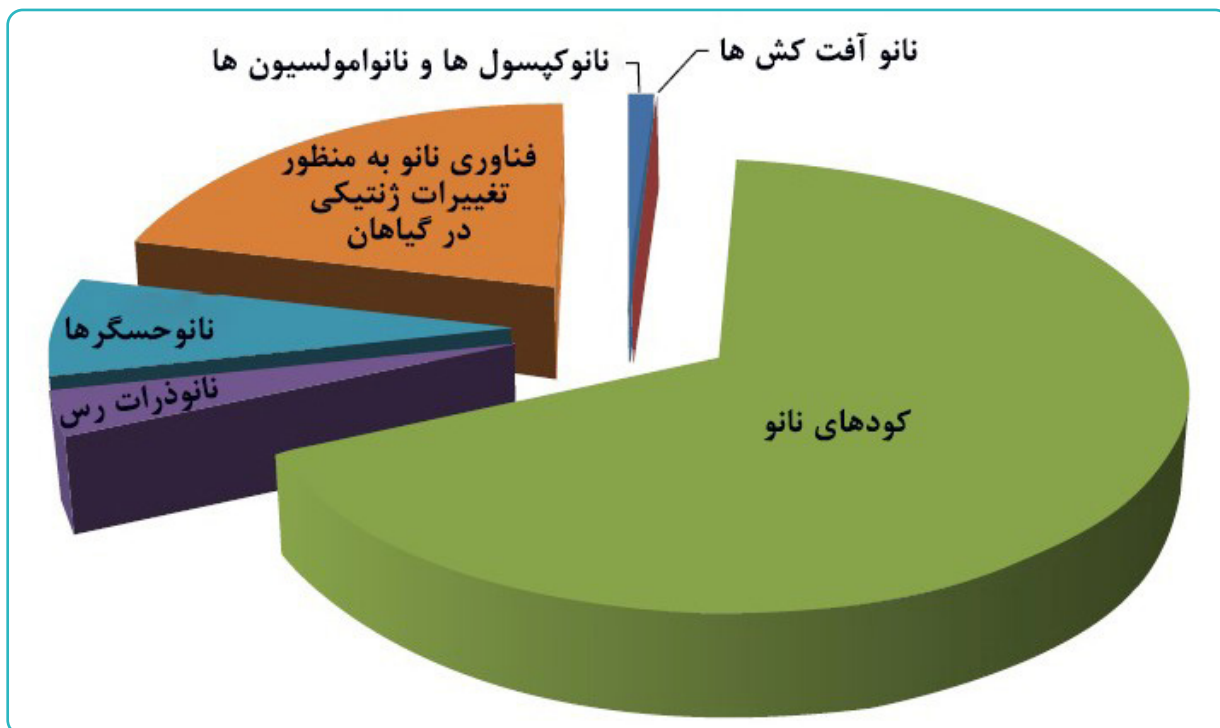
۲- روند توسعه فناوری در بخش کشاورزی

در سال‌های اخیر، فناوری نانو به عنوان ششمین فناوری انقلابی پس از انقلاب صنعتی در اواسط دهه ۱۷۰۰ و انقلاب سبز در دهه ۱۹۶۰ میلادی ظهور کرده است. بخش کشاورزی به دلیل استفاده از فناوری نانو شاهد پیشرفت‌های شگرفی بوده است. نوآوری در زمینه نانوفناوری کشاورزی در مواردی چون ژنتیک، اصلاح نباتات، تصفیه پسماندها، پردازشگرهای نانوفناورانه، مدیریت بیماری‌های گیاهان و افزایش بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی تأثیرگذار بوده است. افزایش تدریجی در تعداد نشریات علمی و ثبت اختراعات، مزایای بالقوه کاربردهای فناوری نانو در کشاورزی را آشکار می‌سازد. در شکل ۲ زمینه‌های مختلف انتشار مقالات علمی و تحقیقاتی در حوزه کشاورزی معرفی شده است. در حال حاضر بیشترین تحقیقات در زمینه توسعه کودهای نانوفناورانه انجام شده است، در حالی که تعداد محدودی از مطالعات در زمینه آفت‌کش‌ها انجام شده است. انتظار می‌رود روند تحقیقات در جهان در حوزه نانوفناوری در کشاورزی دارای تأثیرات چشم‌گیری بر جامعه و بخش کشاورزی باشد.



شکل ۲- کاربردهای بالقوه فناوری نانو در کشاورزی

شکل ۱- فناوری‌های انقلابی در حوزه کشاورزی

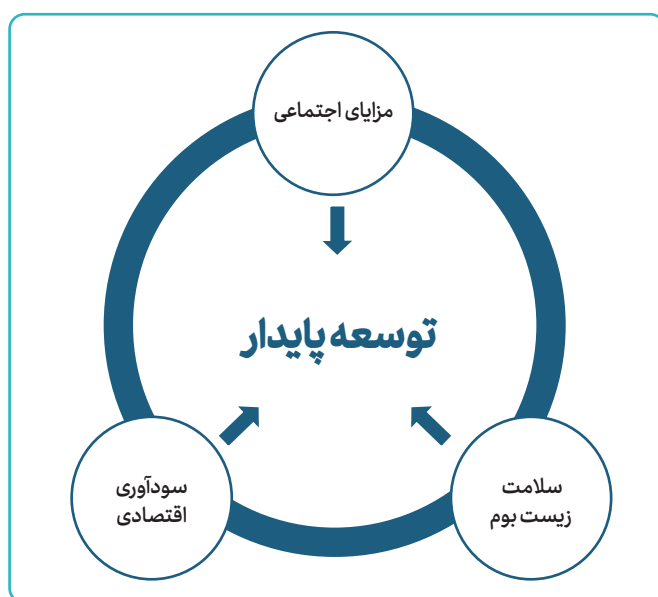


شکل ۳- نمودار براساس نتایج جستجو در Google برای حوزه‌های مربوطه رسم شده است



۳. دستیابی به پایداری^۳ در کشاورزی از طریق فناوری نانو

پایداری هدف اصلی در تحقیقات کشاورزی بوده است و به دلیل حفظ محیط‌زیست همواره در اولویت قرار دارد. تلفیق مفهوم پایداری با هر نوع فناوری و طرح تحقیقاتی به منظور مقابله با چالش جهانی امنیت محیط‌زیست و مزایای اجتماعی ضروری است. با این حال در نظر گرفتن مفهوم پایداری به دلیل تعامل پیچیده میان زیست‌بوم و جامعه کار بسیار دشواری است. در سال ۲۰۰۰ و با آغاز تحقیقات در حوزه فناوری نانو، هدف اصلی از به‌کارگیری فناوری، کشف، سنتز، مشخصه‌یابی و مدل‌سازی مواد نانومقیاس بود که در میان مردم به‌عنوان نانوذرات شناخته می‌شد. با پیشرفت‌های مستمر در مطالعات مبتنی بر فناوری نانو، توجه بیشتری به مفهوم پایداری متمرکز شد. مفهوم اصلی پایداری در هر فناوری به طور عمده بر سه جزء اصلی استوار است: سلامت زیست‌بوم، مزایای اجتماعی و سودآوری اقتصادی (شکل ۴). دستیابی به پایداری در کشاورزی برای برآوردن نیازهای فعلی و آینده جامعه و محیط‌زیست بدون تأثیر منفی بر زیست‌بوم ضروری است. برخی از اهداف توسعه هزاره^۴ (MDG) که توسط سازمان ملل متحد تعیین شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان پایداری فناوری را شناسایی کرد. با در نظر گرفتن این اهداف، می‌توان رویکرد فناوری نانو در توسعه پایدار را به روش‌های زیر پیش‌بینی کرد.



شکل ۴- مؤلفه‌های کلیدی پایداری در کشاورزی

● فناوری نانو از توانایی ایجاد پیشرفت در سامانه‌های کشاورزی پیشرفته با هدف ایجاد تأثیرات قابل توجه بر جامعه برخوردار است. همچنین، بخش ایمنی مواد غذایی نیز از تلفیق این فناوری با کشاورزی سود خواهد برد؛

● با در نظر گرفتن مسائل بهداشتی در جامعه، فناوری نانو راهکارهای امیدوارکننده‌ای در حوزه فناوری تصفیه پساب و از بین بردن بیماری‌های قابل انتقال از طریق آب ارائه کرده است. از سوی دیگر مسئله آلودگی آب‌های زیرزمینی یکی دیگر از موضوعاتی است که به نظر می‌رسد با فناوری نانو قابل حل باشد؛

● روش‌های پیشرفته مبتنی بر فناوری نانو برای تشخیص، پایش و پیشگیری از بیماری در گیاهان؛

● حفظ و احیای حاصل‌خیزی خاک‌های کشاورزی از طریق استفاده از کودهای نانوفناورانه.



۴. چالش‌های استفاده از فناوری نانو در سال‌های آینده

هرچند کاربردهای بالقوه استفاده از فناوری نانو در کشاورزی زیاد است، با این وجود برخی از نکات کلیدی باید مورد توجه قرار گیرد:

- **نانومواد مورد استفاده برای کاربردهای میدانی:** در حال حاضر شرکت‌های تولیدکننده مواد شیمیایی کشاورزی نیازمند همکاری با دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی هستند تا بتوانند انتقال فناوری را با هدف تولید محصولات جدید و کارآمدتر و افزایش تولید محصولات کشاورزی عملی کنند.

- **توسعه فرایند و محصولات با استفاده از اصول پایداری:** محققان درگیر در توسعه محصولات جدید نانوفناورانه باید در جستجوی راه‌هایی برای فناوری پاک باشند. برای مثال، استفاده از ترکیبات طبیعی برای کنترل آفات همچون حشره‌کش‌ها و دفع‌کننده‌های حشرات مبتنی بر شیمی سبز. رویکرد دیگر مربوط به توسعه سامانه‌هایی است که می‌توانند به حفظ ریز جانداران خاک^۵ کمک کرده و بنابراین منجر به حاصل خیزتر شدن خاک در طول سال‌های آتی شوند.

- **کاهش هزینه‌های فرایند و نانومحصولات مورد استفاده:** از آنجایی که بسیاری از فرایندهای مربوط به فناوری نانو همچنان گران‌بها هستند، در این راستا باید از هزینه افزایش مقیاس تولید نیز همچون هزینه مواد اولیه برای تولید محصولات نانوفناورانه با اولویت مواد تجزیه‌پذیر با منشأ زیستی کاسته شود.

- **سرنوشت محصولات نانو:** توجه به سرنوشت محصولات نانو در محیط‌زیست برای تضمین استفاده از آن‌ها در کشاورزی بسیار حائز اهمیت است. در این راستا محققان باید سازوکار برهم‌کنش این مواد با خاک، آب‌وهوا را در نظر گرفته و مدل‌های جدیدی را برای پیش‌بینی رفتار محصولات نانوفناورانه ارائه کنند.

- **ارزیابی خطرات محصولات نانوفناورانه:** جامعه علمی درگیر در توسعه محصولات نانوفناورانه باید در خصوص خطرات احتمالی ناشی از استفاده از نانومحصولات در کشاورزی توجیه شده باشند. مطالعه در خصوص تأثیر محصولات نانو بر زنجیره غذایی و همچنین تعیین حدود مجاز استفاده از این مواد باید در دستورکار محققان قرار گیرد.

- **جنبه‌های نظارتی استفاده از محصولات نانوفناورانه:** سازمان‌های نظارتی، محققان و شرکت‌ها باید ضامن اجرای چارچوب‌های نظارتی برای استفاده از فناوری نانو در کشاورزی و همچنین توجه به حدود مجاز برای اطمینان از امنیت غذایی جامعه باشند.

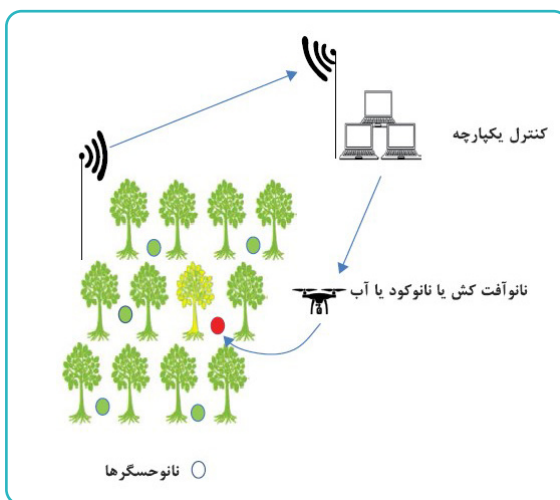
- **بررسی جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی استفاده از فناوری نانو در کشاورزی:** محققان، شرکت‌ها و دولت‌ها مسئولیت این بخش را بر عهده دارند.



۵. آینده فناوری نانودر کشاورزی

در خصوص آینده صنعت کشاورزی به نظر می‌رسد می‌توان از فناوری نانو همراه با فناوری شبکه هوشمند بهره برد. به این ترتیب می‌توان مشکلات محصولات را با استفاده از نانوآفت کش‌های مؤثر برای هر منطقه، براساس تقاضای محلی رفع کرد. در این زمینه، ارتباط روش‌های مؤثر همچون استفاده از نانوآفت کش‌ها، نانوکودها و سامانه‌های نگهداری آب در خاک را می‌توان با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین انجام داد تا عیوب موجود در گیاهان به صورت محلی اصلاح شود. شایان ذکر است که در آینده نزدیک همه این اقدامات را می‌توان با سامانه‌های تصمیم‌گیری هوشمند متصل به نانو حسگرهای بسیار حساس و ویژه کنترل کرد.

این اقدامات می‌تواند کنترل بهتری در برابر آفات موجود در محصولات کشاورزی به وجود آورده و مشکلات مقاومت موجودات زنده در برابر نانوآفت کش‌ها را به حداقل برساند. از سوی دیگر نقش فناوری نانو می‌تواند فراتر از این موارد بوده و به عنوان یک سامانه مدیریتی در کشاورزی به منظور افزایش بهره‌وری و کاهش تأثیرات بر محیط زیست و سلامت انسان به کار برده شود.

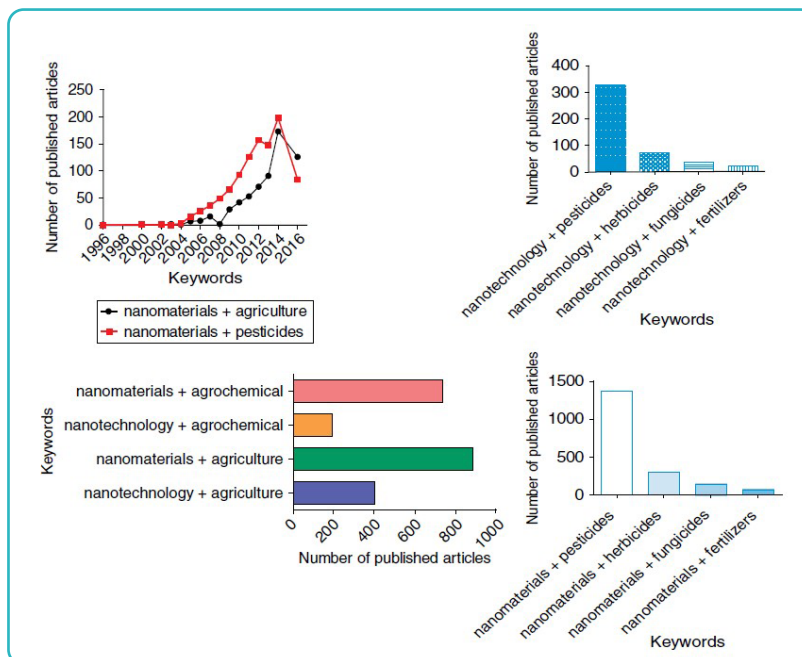


شکل ۵- سیستم یکپارچه برای حفاظت از محصول



۶. انتشارات مربوط به فناوری نانو در کشاورزی

در دهه گذشته، حوزه فناوری نانو در زمینه ثبت اختراعات تا نشریات علمی در زمینه‌های مختلف همچون تولید انرژی، الکترونیک، پزشکی و کشاورزی شاهد رشد چشم‌گیری بوده است. در زمینه کشاورزی تولید علمی آشکاری با تمرکز بر تولید نانومواد شیمیایی نظیر آفت‌کش‌ها یا نانوکودها صورت گرفته است. در پایان سال ۲۰۱۱، در بخش مواد شیمیایی در کشاورزی بیش از ۳۰۰۰ ثبت اختراع و ۶۰ مقاله منتشر شده است.



شکل ۶- فعالیت علمی مربوط به مواد شیمیایی نانو در تعداد. انواع مختلف محصولات ارائه شده در مقالات در دهه گذشته افزایش یافته است.



۷. انواع محصولات نانوفناورانه مورد استفاده در کشاورزی

● **نانوکودها:** از کودهای نانو می‌توان برای کاهش اتلاف نیتروژن خاک که در اثر وجود طولانی مدت میکروارگانیسم‌ها در خاک و شستشوی خاک حاصل شده است، استفاده کرد. این نانوکودها می‌توانند مواد مؤثر را در زمان و شرایط محیطی ویژه رها کنند. بهترین روش برای بهبود کیفیت خاک و کاهش اثرات مواد سمی ناشی از به‌کارگیری بیش از حد این مواد، استفاده از کودهایی با قابلیت رهایش آهسته است. استفاده از نانوکودها می‌تواند منجر به جذب و غنی‌سازی مواد معدنی در خاک شود. در انواع گندم، ۹۹ درصد افزایش عملکرد دانه و ۳۲٫۴ درصد افزایش سطح آهن دانه در مقایسه با نمونه‌های شاهد دیده شده است.

● **نانوالیاف:** استفاده از حلال‌های نوین و روش الکتروریسی منجر به تولید الیافی از ضایعات پنبه با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر شده است که به‌عنوان جاذب کود یا آفت‌کش عمل می‌کند. از نانوالیاف برای محصور کردن سموم شیمیایی استفاده می‌شود تا مانع پراکندگی مواد شیمیایی در محیط و آلودگی آب یا خاک شود. در نتیجه پایداری و ایمنی سموم شیمیایی افزایش می‌یابد. هنگامی که الیاف به روش‌های زیستی تجزیه می‌شوند، مواد شیمیایی به آرامی در خاک آزاد می‌شوند. زمانی که آلاینده‌های آلی آب‌گریز از طریق آب وارد خاک شوند، به راحتی توسط مواد جامد انحلال‌ناپذیر در آب جذب می‌شوند. نانوپلیمرهای متخلخل تمایل مشابهی به مولکول‌های مواد آلاینده دارند و از این ویژگی آن‌ها می‌توان برای جدا کردن مواد آلی از خاک و آب استفاده کرد. به طور مشابه، از منسوجات نانولیفی می‌توان به‌عنوان روشی برای جذب و جداسازی عوامل بیماری‌زا استفاده کرد. در نانوالیاف موجود در این منسوجات، پادتن‌های خاصی برای عوامل بیماری‌زا و ویژه تعبیه شده‌اند. این پارچه را می‌توان روی یک سطح کشید تا از طریق تغییر رنگ بیانگر وجود عوامل بیماری‌زا باشد.

● **نانوآفت‌کش‌ها و نانوعلف‌کش‌ها:** نانوذرات حاوی آفت‌کش‌ها را می‌توان بر اثر یک محرک محیطی یا براساس یک الگوی زمانی برای رهاسازی تنظیم کرد. در صورت استفاده از یک سامانه تحویل هوشمند، علف‌کش را می‌توان تنها در مواقع ضروری آزاد کرد که این امر منجر به تولید بیشتر محصولات و آسیب کمتر به کشاورزان می‌شود. مواد شیمیایی کشاورزی معمولاً با سم‌پاشی و/یا پخش روی محصولات به کار می‌روند. به منظور جلوگیری از مشکلاتی مانند شستشوی مواد شیمیایی، تجزیه به‌وسیله انرژی تابشی، آبکافت و تخریب میکروبی، می‌توان از نانوحامل‌ها استفاده کرد که معمولاً غلظت مواد شیمیایی کمتر از حداقل غلظت مؤثر برای استفاده در محل موردنظر محصولات است. مواد شیمیایی زراعی نانوکپسوله شده به گونه‌ای طراحی شده‌اند که تمام ویژگی‌های ضروری مانند غلظت مؤثر، رهاسازی کنترل شده با زمان در پاسخ به محرک‌های خاص، افزایش فعالیت هدفمند و سمیت زیست‌محیطی کمتر را با روش تحویل ایمن و آسان حفظ می‌کنند، بنابراین از کاربرد مکرر جلوگیری می‌کنند. به‌عنوان بهترین مثال از کاهش سمیت گیاهی علف‌کش‌ها، می‌توان به کنترل علف‌های هرز انگلی با علف‌کش‌های نانوکپسوله شده اشاره کرد.



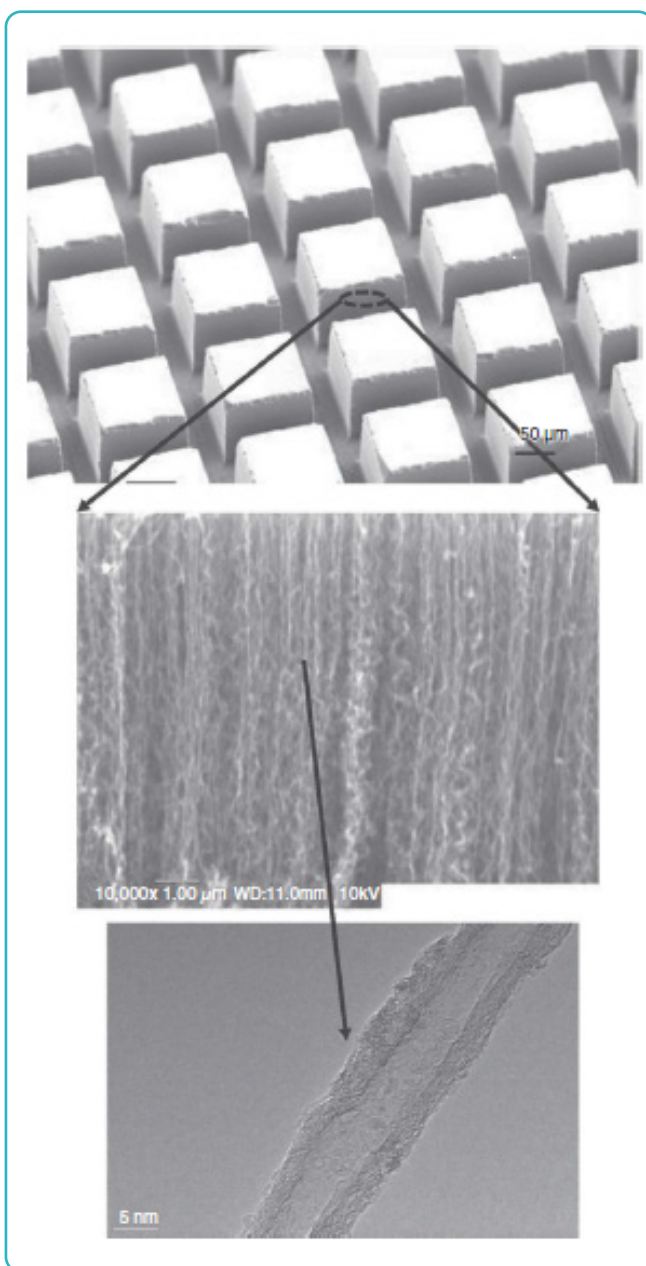
شکل ۷- نانوکودها در کشاورزی

جدول ۱- انواع نانوأفت‌کش‌ها با ماده مؤثره، فواید و نمونه‌های آن‌ها

نوع	ارتباط با فناوری نانو	مزایا	نمونه‌ای از مواد مؤثره
نانوآمولسیون	ماده مؤثره در قطرات روغنی نانومقیاسی قرار دارند که در محیط آبی غوطه‌ور است	بهبود توزیع و افزایش جذب توسط ارگانیسم	روغن چریش (کرم‌ها و حشرات انگلی) Permethrin (کنه، پشه)
نانوکپسول	ماده فعال در یک کپسول نانومتری قرار گرفته است	بهبود کارایی و افزایش تأثیر بر آفت	لانسیم آمید B (ضدباکتری برای درمان پژمردگی باکتریایی تنباکو)
نانوزل	ماده فعال در یک ژل نانوساختار توزیع شده است	سهولت استفاده، کاهش میزان تبخیر ماده فعال	مس (خاصیت ضدقارچ)، روغن‌های معطر (انواع آفات)
نانوالیاف	ماده فعال در نانوالیاف توزیع شده است	توزیع بهتر، رهایش آهسته‌تر ماده مؤثره	Thiametoxam (ماده ضدحشره)
لیپوزوم	لیپوزوم‌ها ذراتی با ابعاد نانومتری هستند	رهایش آهسته ماده مؤثر	Etofenprox و Pyrifluquinazon (ضدحشره)

● **سامانه‌های هوشمند رسانش دارو:** همان‌طور که پیش از این اشاره شد، سیستم‌های تحویل هوشمند می‌توانند کمبود مواد مغذی را در گیاه شناسایی و درمان کرده و داروها یا ریزمغذی‌های را به صورت زمان‌بندی شده منتشر کنند. برای مثال از جمله مزایای کپسوله کردن مواد شیمیایی کشاورزی و مواد ژنتیکی در ماتریس کیتوسان ایجاد یک مخزن محافظ برای مواد فعال و آزادسازی کنترل شده مواد است. در حالی که علاقه تحقیقاتی به سیستم‌های تحویل مبتنی بر نانوذرات کیتوزان در حال افزایش است، لیکن سطح دانش کنونی هنوز امکان ارزیابی منصفانه از مزایا و معایب ناشی از استفاده از نانوأفت‌کش‌های مبتنی بر کیتوسان در کشاورزی را نمی‌دهد.

● **نانوحسگرها:** از نانوحسگرها می‌توان برای شناسایی آلاینده‌ها، آفات، میزان مواد مغذی و تنش‌های گیاه به دلیل خشکی، دما یا فشار استفاده کرد. از نانوحسگرها همچنین می‌توان برای کمک به کشاورزان در جهت شناسایی میزان مواد مغذی موردنیاز گیاه با توجه به اختلاف موجود بین حالت استاندارد و داده‌های شناسایی شده از حسگر استفاده کرد. نانوحسگرهای ساخته شده با نانولوله‌های کربنی (CNTs) برای شناسایی آلاینده‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نانوحسگرهای متشکل از نانولوله‌های کربنی

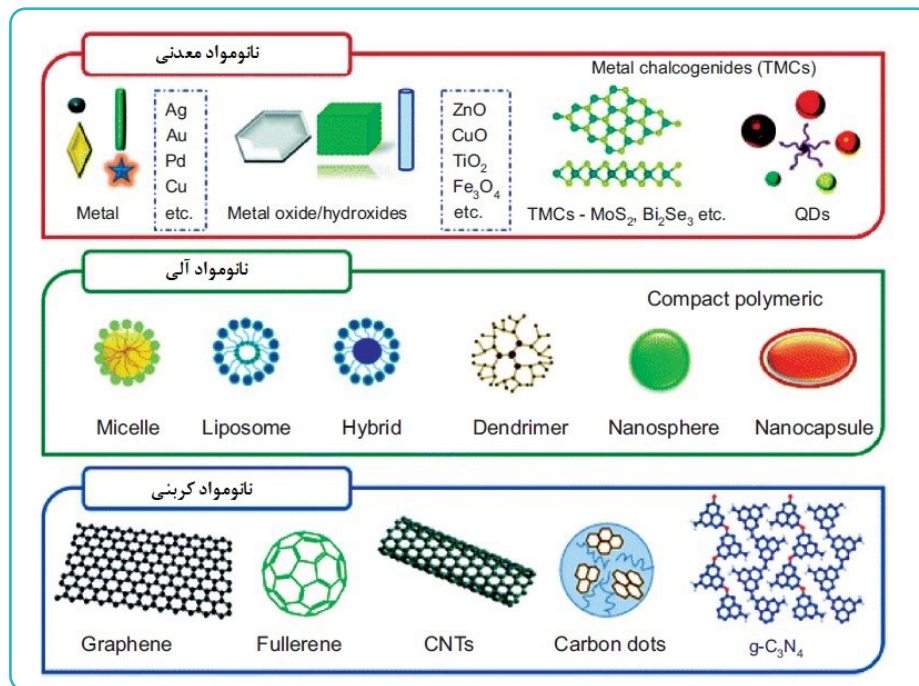
یکی از مشکلات عمده مرتبط با مدیریت بیماری‌های گیاه، تشخیص مرحله صحیح بیماری است. عمدتاً مواد شیمیایی حفاظت از گیاهان (مانند قارچ‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها) تنها پس از ظهور علائم استفاده می‌شوند و در نتیجه منجر به از بین رفتن قابل توجه محصول می‌شود؛ بنابراین، تشخیص و درمان بیماری‌های گیاهی در مراحل اولیه ضروری است، با استفاده از سامانه‌های هوشمند می‌توان مواد شیمیایی محافظ گیاه را با مقدار صحیح و در زمان مناسب به کار برد و به این ترتیب از بروز سمیت در اثر باقی ماندن مواد اضافه و ایجاد خطرات زیست‌محیطی اجتناب کرد. اکثر سامانه‌های مولکولی که برای تشخیص میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شوند، اساساً مبتنی بر تشخیص پروب نوکلئوتیدی یا بر اساس آنتی‌بادی‌های ویژه‌ای هستند و چنین سامانه‌هایی بسیار حساس و انتخابی بوده و بیشتر برای استفاده‌های آزمایشگاهی مناسب هستند.

از سوی دیگر سامانه‌های مناسبی هم وجود دارند که می‌توانند عوامل بیماری‌زا را در موقعیت‌های تعریف شده مزرعه شناسایی و کمی‌سازی کنند و به تولیدکنندگان در کاربرد هدفمند و بهینه مواد شیمیایی کشاورزی با حداقل خطرات زیست‌محیطی کمک می‌کنند. در این روش، نانوحسگرهای زیستی، پس از نصب در محل، می‌توانند عوامل بیماری‌زا را با حساسیت و ویژگی بالا شناسایی کنند. چنین نانوحسگرهایی سیستم‌های قابل‌حمل با پایش فوری نتایج هستند. آن‌ها به آماده‌سازی نمونه نیاز ندارند.

● **نانولوله‌های کربنی (CNT):** کاناس و همکاران اثرات نانولوله‌های کربنی تک‌جداره عامل‌دار (SWCNTs) و غیرعامل‌دار را بر رشد ریشه شش گونه مختلف محصولات زراعی مانند کلم (*Brassica oleracea*)، خیار (*Cucumis sativus*)، هویج (*Daucus carota*)، پیاز (*Allium cepa*)، کاهو (*Lactuca sativa*) و گوجه‌فرنگی

(*Solanum lycopersicum*) بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ازدیاد طول ریشه در پیاز و خیار توسط SWCNT‌های غیرعامل‌دار افزایش یافته است و برهمکنش SWCNT‌های عامل‌دار و SWCNT‌های غیرعامل‌دار با سطح ریشه منجر به تشکیل صفحات نانولوله بر روی سطح ریشه خیار بدون وارد شدن به ریشه شده است. با این حال، کلم و هویج تحت تأثیر هر دو شکل نانولوله قرار نگرفتند.

حضور MWCNT‌ها باعث افزایش جذب آب توسط بذرها شد که به نوبه خود فرایند جوانه‌زنی را افزایش داد. اثرات مثبت مشابه MWCNTs بر روی جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه شش گونه محصول زراعی- تربچه (*Raphanus sativus*)، علف چاودار (*Lolium perenne*)، کلزا (*Brassica napus*)، کاهو (*Lactuca sativa*)، ذرت (*Zea mays*) و خیار (*Cucumis sati-* *vus*) نیز گزارش شده است.



شکل ۹- انواع نانوساختارها

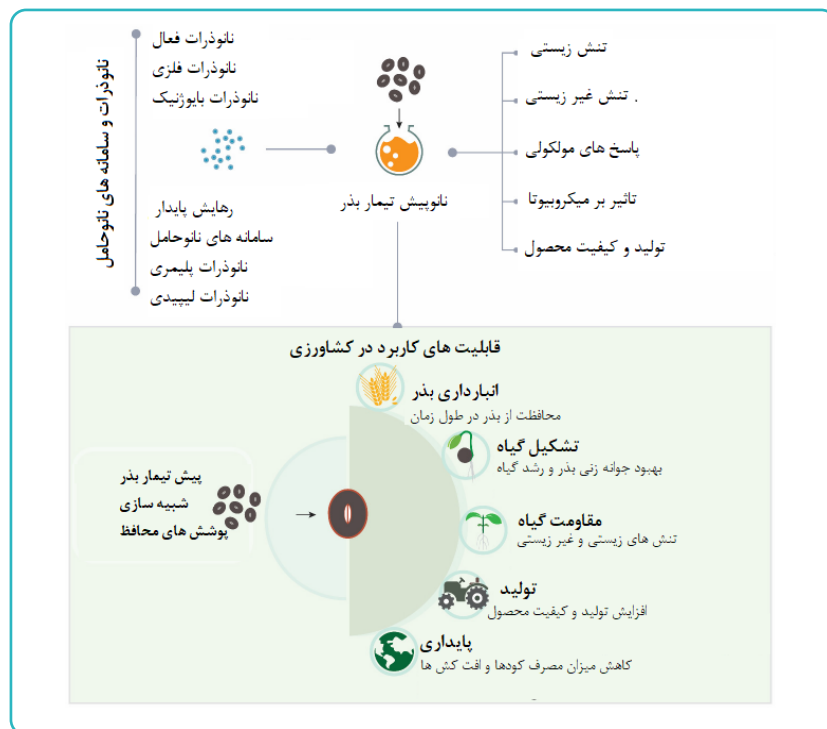
● **نانوذرات:** فوتوکاتالیز یکی از فرایندهای استفاده از نانوذرات است. این بدان معنی است که یک واکنش شیمیایی توسط نور و حضور یک کاتالیزور (در اینجا نانوکاتالیزور) تسریع و تقویت می‌شود. مکانیسم پیشنهادی این واکنش به این شکل است که وقتی نانوذرات ترکیباتی خاص در معرض نور فرابنفش قرار می‌گیرند، الکترون‌های بیرونی‌ترین لایه (الکترون‌های ظرفیت) برانگیخته شده و در نتیجه جفت حفره‌های الکترونی، یعنی الکترون‌های منفی و حفره‌های مثبت تشکیل می‌شوند. این‌ها عوامل اکسیدکننده عالی و شامل اکسیدهای فلزی مانند Al_2O_3 ، CsO_2 ، Fe_3O_4 ، SnO ، TiO_2 و سولفیدهایی مانند ZnS هستند. نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، کارایی بالایی از نظر نرخ واکنش تخریب و فرایند ضد عفونی در کشاورزی دارند. با کاهش اندازه ذرات، اتم‌های سطح افزایش می‌یابد که منجر به افزایش فوق‌العاده واکنش‌پذیری شیمیایی و سایر خواص فیزیکی و شیمیایی مانند فوتوکاتالیز، فوتولومینسانس و... می‌شود. از این رو می‌توان از این فرایند برای تجزیه بسیاری از ترکیبات سمی مانند آفت‌کش‌ها استفاده کرد که تجزیه آن‌ها در شرایط عادی زمان زیادی طول می‌کشد.



۸. نقش فناوری نانودر پیش تیمار^{۱۰} بذر

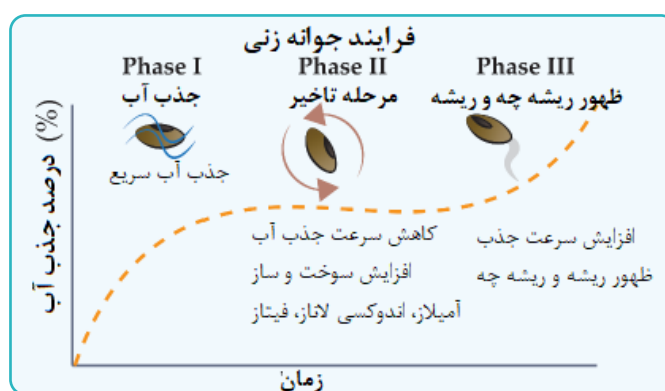
تحقیقات نشان می‌دهند که نانوذرات اثرات مختلفی بر دانه‌ها و گیاهان دارند. برخی از نانوذرات دارای اثرات منفی بر گیاهان از جمله مهار جوانه‌زنی یا سمیت گیاهی در نهال‌ها دارند. با این حال، برخی از نانوذرات می‌توانند به عنوان محرک عمل کرده، متابولیسم بذر، توان گیاهچه و رشد گیاه را بهبود بخشند. این اثرات به خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات مانند اندازه، پتانسیل زتا

و غلظت بستگی دارد که عواملی هستند که پاسخ‌های زیستی را تعیین می‌کنند. پیش تیمار را می‌توان برای محافظت از بذر در طول ذخیره‌سازی، بهبود جوانه‌زنی، هماهنگ‌سازی جوانه‌زنی و رشد گیاه و همچنین برای افزایش مقاومت محصولات کشاورزی به شرایط تنش غیرزیستی یا زیستی استفاده کرد که می‌تواند به کاهش میزان رطوبت و مقادیر موردنیاز آفت‌کش‌ها و کودها کمک کند. همچنین می‌توان از نانو پیش تیمار بذر برای محافظت از بذر در برابر عوامل میکروبی و به عنوان عامل ضد میکروبی و یا تقویت زیستی بذر برای ارتقای کیفیت و تولید مواد غذایی استفاده کرد. خلاصه‌ای از کاربردهای بالقوه نانوپیش تیمار بذر در کشاورزی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



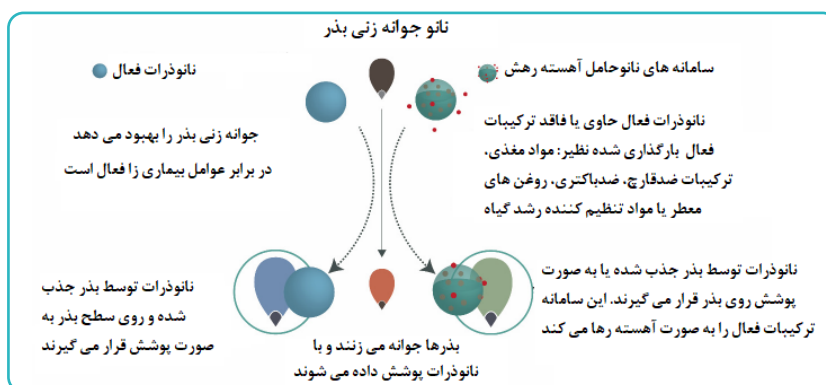
شکل ۱۰- پیش تیمار بذر با استفاده از فناوری نانو

● **کاربرد نانوذرات در جوانه زنی بذر:** جوانه زنی یکی از مهم ترین مراحل پرورش گیاهان در کشاورزی و تضمین کننده کیفیت محصول نهایی است. این مرحله رشد سریع نهال، گسترش سریع برگ ها و طویل شدن ریشه ها را تضمین می کند که به جذب مواد مغذی، انتقال آن ها از طریق جریان تعرق و تولید زیست توده کمک می کند. جوانه زنی آهسته می تواند نهال جوان را که یکی از آسیب پذیرترین مراحل چرخه زندگی گیاه است، در معرض بسیاری از شرایط تنش محیطی یا عوامل بیماری زا قرار دهد و در نتیجه باعث کاهش بنیه و بهره وری محصول شود که منجر به زیان اقتصادی برای کشاورزان می شود. فرایند جوانه زنی بذر معمولاً به سه مرحله تقسیم می شود که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این فرایند با جذب آب (فاز اول) آغاز می شود و در این مرحله جذب آب سریع، سوخت و ساز پایه شامل رونویسی ژنی، سنتز پروتئین و فعالیت میتوکندری در دانه را تحریک می کند و پوشش بذر متورم و نرم می شود، در فاز دوم (فعال سازی و تأخیر)، جذب آب محدودتر می شود اما سوخت و ساز با تولید آنزیم های آمیلاز، اندوکسی لاناز و فیتاز سرعت می گیرد. طی این مرحله فرایندهای فیزیولوژیکی داخلی بذر شروع به فعالیت می کند. سلول ها تنفس می کنند و دانه شروع به ساخت پروتئین ها و سوخت ذخیره مواد غذایی خود می کند. در فاز سوم، مجدد جذب آب در دانه ها سرعت می گیرد و رشد ریشه چه و ریشه افزایش می یابد.



شکل ۱۱- فرایند جوانه زنی بذر

با ورود فناوری نانو به این حوزه، اغلب از نانوذرات برای بهبود جوانه زنی بذر استفاده می شود. تفاوت مهمی بین جوانه زنی بذر و نانوجوانه زنی بذر وجود دارد. در جوانه زنی بذر معمولاً از آب (hydro priming) یا محلول های حاوی مواد (مواد مغذی، هورمون ها، پلیمرهای زیستی) استفاده می شود که روی دانه جذب شده یا منجر به ایجاد یک پوشش روی بذر می شوند. در نانوجوانه زنی بذر، محیط مورد استفاده سوسپانسیون ها یا نانوفرمولاسیون های هستند که در آن ها نانوذرات می توانند توسط بذر جذب شوند یا جذب نشوند. حتی زمانی که نانوذرات جذب هم می شوند، بخش قابل توجهی روی سطح بذر باقی می ماند. از چنین پوشش بذری می توان به عنوان عامل ضدباکتری، ضدقارچ به منظور محافظت در طول نگهداری یا کاشت استفاده کرد. کاربردهای بالقوه نانوذرات به دو گروه اصلی تقسیم می شوند. (۱) نانوذرات فعال و (۲) سامانه های نانوحامل آهسته رهش (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- فرایند نانوجوانه زنی بذر

در جدول ۲ سامانه‌هایی که به منظور جوانه‌زنی بذر یا پوشش‌دهی بذر استفاده می‌شوند همراه با اثرات بالقوه هریک، به عنوان حامل محرک یا در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی نشان داده شده است.

جدول ۲- نمونه‌هایی از نانوساختارهای مورد استفاده برای فرایند جوانه‌زنی یا پوشش‌دهی بذر

اثرات اصلی	خصوصیات	سامانه نانوذره
غلظت: ۱۰ تا ۲۰ میلی‌گرم / میلی‌لیتر بر روی دانه برنج	نانوذرات کروی با ابعاد ۲۶-۶ نانومتر	نانوذرات نقره بیوژنیک تهیه شده با استفاده از عصاره برگ
غلظت: ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم / لیتر. بر روی بذر گندم	اندازه ذرات کمتر از ۵۰ نانومتر با مساحت جانبی ۱۸۰ مترمربع بر گرم	نانوذرات اکسید آهن
غلظت: ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلی‌گرم / لیتر بر روی هندوانه	اندازه ذرات ۳-۱۹ نانومتر با اکسید آهن آمورف یا تبلور اندک	نانوذرات آهن بیوژنیک تولید شده با استفاده از عصاره پیاز
غلظت: ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ از نانوذرات روی و ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌گرم / لیتر از نانوذرات آهن بر روی گندم	اکسیدروی با ابعاد ۲۰ تا ۳۰ نانومتر و اکسید آهن (III) با ابعاد ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر	نانوذرات اکسیدروی و اکسید آهن
غلظت: ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌گرم / لیتر بر روی گندم	نانوذرات کروی با اندازه ۹۰ نانومتر	نانوذرات سیلیس
غلظت: ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم / لیتر بر روی برنج	نانوذرات کروی و ۶ وجهی با میانگین اندازه ۵۲-۱۵ نانومتر	نانوذرات روی بیوژنیک تهیه شده با عصاره جلبک دریایی قهوه‌ای
غلظت: ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ میلی‌گرم / کیلوگرم بر روی فلفل چیلی	نانوذرات اکسیدروی (۴۰-۳۵ نانومتر)، اکسیدتیتانیوم (۱۰۰ نانومتر) و نانوذرات نقره (۸۵ نانومتر)، به ترتیب با شکل‌های کروی، استوانه‌ای و سوزنی	نانوذرات روی، تیتانیوم و نقره
غلظت: ۱۰۰-۱ میکروگرم / میلی‌لیتر بر روی گندم	نانوذرات با ابعاد تقریبی ۲۶ نانومتر	نانوذرات کیتوسان / تری پلی فسفات
بر روی ذرات ۵، ۱۰، ۱۵ ppm : غلظت	نانوذرات کروی با ابعاد ۳۰-۱۰ نانومتر	نانوذرات طلای بیوژنیک سنتز شده با استفاده از عصاره ریزوم گالانگال (خسرودار)
غلظت: ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ mg/ml بر روی فلفل هالوپینو	نانوذرات کروی با ابعاد ۵۰ نانومتر	نانوذرات اکسید منگنز (۳)
غلظت: ۳۰ میکروگرم / میلی‌لیتر بر روی برنج	نانوذرات کروی با ابعاد ۲۰-۶ نانومتر	نانوذرات سولفید آهن (۲)
غلظت: ۱، ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم / لیتر بر روی لوبیای معمولی	نانوذرات با ابعاد ۲۵، ۴۰ و ۸۰ نانومتر	نانوذرات مس
غلظت: ۱۰٪ از هریک از نانومواد با غلظت ۲ میکروگرم / لیتر بر روی لوبیای معمولی	نانوذرات کیتوسان با اندازه تقریبی ۹۵ نانومتر و نانولوله کربن با ابعاد ۴۰ نانومتر	نانوذرات کیتوسان و نانولوله‌های کربن



۸. نتیجه گیری

فناوری نانو نویدبخش تحویل کنترل شده مواد شیمیایی کشاورزی به منظور بهبود مقاومت در برابر بیماری، افزایش رشد گیاه و استفاده از مواد مغذی است. در نانوفناوری سبز، تحقیق و توسعه باید به منظور استفاده کارآمدتر و هدفمندتر از آفت کش ها، علف کش ها و حشره کش ها به روشی سبزتر و سازگارتر با محیط زیست انجام شود تا در نهایت بهره وری به روشی ایمن تر افزایش یابد. از سوی دیگر با پیشرفت فناوری نانو، استفاده از شیمی سبز در سنتز نانومواد با استفاده از عصاره های گیاهی و سلول های زنده، منجر به کاهش استفاده از حلال های سمی و ضامن حفاظت از محیط زیست خواهد شد. اگرچه سمیت نانومواد هنوز به وضوح مشخص نشده است، لیکن این گروه از مواد به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه فرد نقش مهمی در کشاورزی ایفا می کنند.



پی‌نوشت

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Biocide | 5. Soil microbiota |
| 2. Green revolution | 6. Smart grid technology |
| 3. Sustainability | 7. priming |
| 4. Millennium development goals | |

منابع

1. Do Espirito Santo Pereira, Anderson, Halley Caixeta Oliveira, Leonardo Fernandes Fraceto, and Catherine Santaella. "Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture." *Nanomaterials* 11, no. 2 (2021): 267.
2. Singh, Harikesh Bahadur, Sandhya Mishra, Leonardo Fernandes Fraceto, and Renata De Lima, eds. *Emerging trends in agri-nanotechnology: fundamental and applied aspects*. CABI, 2018.
3. Chugh, Priya, and Saleem Jahangir Dar. "Nanotechnology: Applications, Opportunities, and Constraints in Agriculture." In *Nanotechnology*, pp. 125–148. Jenny Stanford Publishing, 2021.

