پژوهش های شیمیایی و نانومواد
Chemical Research & Nanomaterials(CRN)
crn.shiraz.iau.ir

مروری کوتاه بر نانومواد شیمیایی کشاورزی

عبدالمنان ناروئی*، میلاد ناروئی

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده: در سال‌های اخیر، نانوتکنولوژی به دلیل کاربردهای گسترده آن در زمینه‌های مختلف مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. با افزایش مساحت سطح نانوساختارها، کارایی کاربردی این ساختارها نیز افزایش می‌یابد. امروزه کاربرد بالقوه نانوتکنولوژی در زمینه کشاورزی منجر به تحقیقات گسترده‌ای شده است. ترکیب نانوتکنولوژی و کشاورزی ابزار جدیدی است و منجر به تولید نانو کودها، نانو علف‌کش‌ها، نانو قارچ‌کش‌ها، نانو آفت‌کش‌ها و نانو حشره‌کش‌ها می‌شود که معمولاً به عنوان نانومواد شیمیایی کشاورزی از آن ها نام برده می شود. این نانومواد شیمیایی کشاورزی به دلیل طبیعت مقرون به صرفه و همچنین سازگاری با محیط زیست، توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده‌اند. علاوه بر مزایای بسیار زیاد در کشاورزی، نانو–مواد شیمیایی کشاورزی همچنین به جایگزینی کودهای مصنوعی و آفت‌کش‌ها کمک می‌کنند که منجر به افزایش بازدهی محصولات می‌شود. با این حال، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است. برخی از چالش های پیش رو شامل قابلیت دسترسی برای کشاورزان، هزینه تولید ، عدم آگاهی، تأثیر نامناسب بر محیط زیست، انسان و غیره است. این مقاله به بررسی تأثیرات فعلی نانوفناوری در کشاورزی، مواد شیمیایی کشاورزی و خصوصیات آنها و همچنین به اهمیت نانوفناوری در توسعه پایدار کشاورزی می‌پردازد.

واژگان کلیدی: نانوفناوری، نانوساختار، نانوآفت‌کش

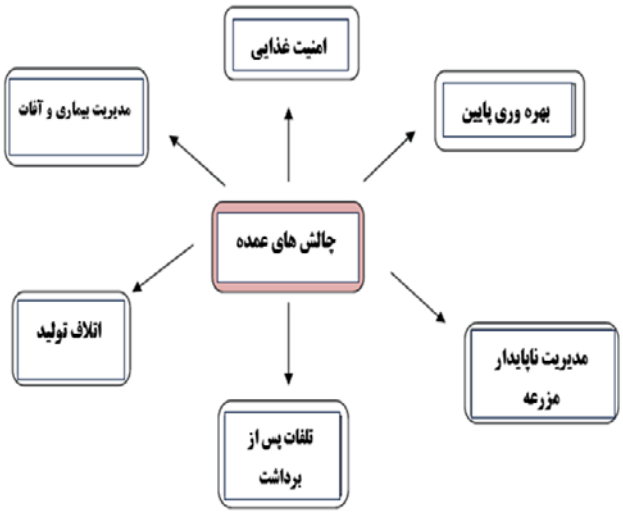
mannan.narouei@pgs.usb.ac.ir

۱- مقدمه

در حال حاضر تولید و توزیع جهانی به دلیل افزایش جمعیت، تغییرات آب و هوایی، آلودگی محیط زیست و افزایش تقاضای آب و انرژی با حساسیت زیادی مواجه است[۱]. بر اساس بررسی فعلی، جمعیت جهان روزانه در حال افزایش است و در عین حال نیازها نیز ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. در سال های اخیر، حوزه کشاورزی تحت تأثیر مسائل متعددی از جمله کاهش سود کشاورزی، کاهش منابع طبیعی، بیماری‌ها، گرم شدن زمین و تغییرات آب و هوایی قرار گرفته است. در عین حال، پاسخگویی به تقاضای رو به رشد غذا با افزایش جمعیت بسیار دشوار است و همچنین یکی از زمینه‌های غیرقابل پیش‌بینی است که به متغیرهای زیادی مانند آب و هوا، فصل، آب، وضعیت خاک و غیره بستگی دارد[۲]، بنابراین سنجش، ثبت، بررسی و ذخیره داده‌های قابل اعتماد و دقیق همه اجزای زنده و غیر زنده برای رفع چالش‌های کیفی و کمی تقاضای مواد غذایی بسیار حیاتی است[۳]. اگرچه داده‌های تحقیقاتی زیادی در این زمینه وجود دارد، اما یک دیدگاه کارشناسانه حول اهمیت نانوفناوری در کشاورزی، به‌عنوان نانو–مواد شیمیایی کشاورزی، متمرکز است. در این راستا، هدف اصلی، به حداکثر رساندن بازده (بازده محصول)، به حداقل رساندن ورودی (کودها، آفت کش‌ها و علف‌کش‌ها) و نظارت بر عوامل محیطی و اعمال اقدامات هدفمند است[۴]. در حال حاضر به دلیل پتانسیل بالای فناوری نانو برای بهبود جوانه‌زنی بذر، رشد و حفاظت از گیاهان از طریق انتشار کنترل شده مواد شیمیایی کشاورزی، با کاهش مقدار مواد شیمیایی مورد

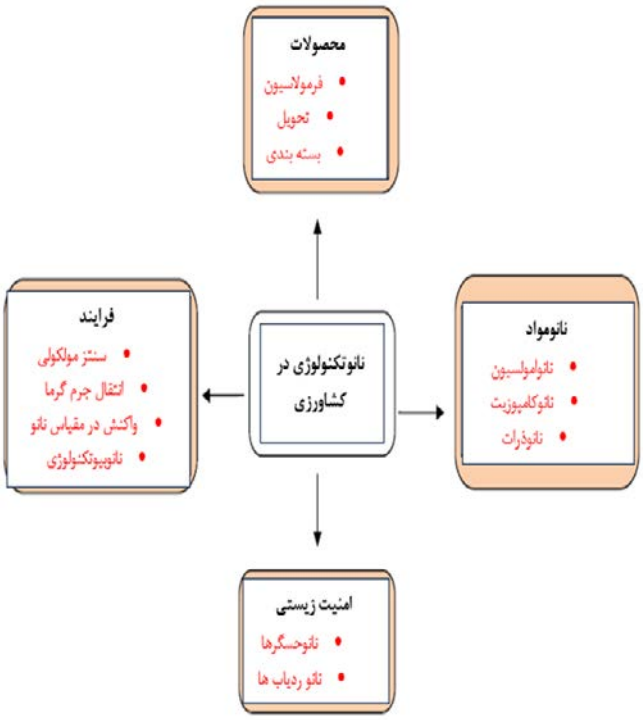
تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۵/۲۹
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۶/۲۱

استفاده و به حداقل رساندن تلفات مواد مغذی در کوددهی، علاقه زیادی به تحقیقات در این زمینه وجود دارد[۵]. تأثیر فناوری نانو به کاهش چالش‌های عمده کشاورزی کمک می‌کند(شکل ۱).



شکل ۱. چالش های عمده ای که حوزه کشاورزی با آن مواجه است.

اکثر فاکتورهای اصلی مواد شیمیایی کشاورزی به طور چشمگیری مورد کاوش قرار گرفته‌اند تا کاربردهای ارزشمند آن‌ها در فناوری نانو و تجارت کشاورزی بدست آیند. اکثریت قریب به اتفاق سازمان‌ها به تازگی مجوزهایی را داده‌اند که دامنه وسیعی از روش‌ها را برای ترکیب و کاربرد نانو آفت‌کش‌ها افزایش داده‌اند[۶]. اکنون سازمان ایمنی غذای اروپا اعلام کرد که در حال حاضر مقدار کمی از آفت‌کش‌های نانو مشخص شده در دسترس است[۷]. در کشاورزی، نانوفناوری برای تمامی فعالیت‌ها مانند تولید، فرآوری، ذخیره‌سازی و توزیع به کار می‌رود(شکل ۲).برای توسعه کشاورزی، روش‌های مختلفی از فناوری نانو در حوزه‌های مختلف در سیستم به کار می‌رود تا رویه‌های مفید برای انسان و سلامت محیط را گسترش دهد. هنگامی استفاده از نانو ذرات در کشاورزی یک مزیت به شمار می‌رود که ظرفیت انجام فعالیت‌های کشاورزی را داشته و منجر به پیامدهایی ناخواسته برای ضرر به سلامتی نشوند[۸]. در مورد فوق، قرار گرفتن محیط زیست و انسان با بقایای نانومواد موجود در خاک و گونه‌های گیاهی باعث تجمع زیستی در زنجیره غذایی و محیط مربوط به آن می‌شود که می‌تواند فواید و اثرات مضر جدیدی را در سلامت محیط زیست و انسان ایجاد کند. در



شکل ۲. بخش کاربردی نانوفناوری در کشاورزی

این رویکرد مفهوم جدیدی به نام فناوری نانو سبز برای بهبود کشاورزی ایجاد شده است[۹].

با گذشت زمان نانوذراتی که در کشاورزی رها می‌شوند، تأثیر بد و مضری بر کارگرانی می‌گذارد که در تماس با این زیست‌بیگانه‌هایی[1] که هنوز به طور کامل کشف نشده‌اند، می‌گذارند و مشکلات زیادی برای سلامتی ایجاد می‌کنند[۱۰, ۱۱]. با توجه به این بیان، استفاده زیاد از فناوری نانو در محیط زیست، خطرات شغلی را افزایش می‌دهد[۱۲].

اولویت‌های تحقیقات سم‌شناسی بر اساس موضوعات ارزیابی اثرات مضر نانومواد بنا نهاده شده‌اند[۱۳–۱۵]. در این دسته از تحقیقات برخی از مسائل محوری برای توصیف خطرات نشان داده شده و مقرراتی برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی، این موضوعات مهم باید برای گسترش یک توافق مورد قبول و آگاهانه در مورد فناوری نانو در تجارت کشاورزی [۱۶] هدایت شوند. بنابراین علاوه بر اینکه از مزایای استفاده از نانومواد شیمیایی–کشاورزی بهره برده می شود، بایستی مضرات آن نیز بررسی شده و برای حل این مشکلات راهکارهایی ارائه شده و مقرراتی وضع شود.

[1] Xenobiotic

اصطلاح نانوفناوری ابتدا در سال ۱۹۷۴ معرفی شد. نامی که توسط نوریو ابداع شد. نانوفناوری که با تولید نانوذرات سر و کار دارد و به افزایش بهره‌وری در کشاورزی کمک می‌کند، در سال‌های اخیر گسترش یافته و مطالعه در این زمینه در حال توسعه است[۱۷]. در سال‌های اخیر مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات اندازه و شکل متفاوتی دارند و همچنین دارای ویژگی‌های بالینی واقعی نیز هستند. در اطراف ما گیاهان به دلیل تنش‌های زیستی و غیرزیستی با مشکلات زیادی مانند کاهش عملکرد محصول، در دسترس نبودن مواد مغذی و آلودگی محیطی مواجه هستند که کاربردهای ویژه‌ای با معرفی فناوری نانو به دست می آورند[۱۸].

برای حفاظت از محصول، به ویژه حفاظت از محصول در محل، طیف وسیعی از اجزای تولیدی، قبل و بعد از کاشت، از گونه‌های گیاهی باغبانی تا گونه‌های گیاهی مزرعه مورد بررسی قرار می‌گیرند[۱۹]. برای توسعه محصولات تراریخته، فناوری سنتز نانوذرات نقش حیاتی ایفا می‌کند[۲۰]. علاوه بر این، فناوری نانو پاسخ‌های درخشانی را برای موقعیت‌های فزاینده محیطی ارائه می‌دهد. به عنوان مثال، نانوحسگرها برای نشان دادن فشار محیطی و بهبود پتانسیل‌های حفاظت محصولات کشاورزی در برابر بیماری و آفت تکامل یافته‌اند[۲۱]. بنابراین، چنین پیشرفت بی‌وقفه‌ای در فناوری نانو با ویژگی‌های منحصر به فرد آن در شناخت موضوع و بهبود روش برای توسعه در حوزه کشاورزی ظرفیت مهمی را برای رضایتمندی کامل در جامعه در بردارد.

۲- انواع نانومواد شیمیایی کشاورزی

نانو آفت‌کش و نانو کود دو واژه پرکاربرد هستند که بر اساس موضوعات دارای مفهوم واقعی هستند. طبق نظر آژانس فدرال ایالات متحده امریکا، توسعه نانومواد شیمیایی کشاورزی می‌تواند به عنوان یک عامل امیدوارکننده برای رشد گیاهان و کنترل آفات عمل کند. به طور کلی، کودها برای رشد گیاه بسیار مهم هستند و از نانومواد می‌توان به عنوان کود استفاده کرد که با سمیت زیست محیطی کم به بهبود محصول کمک می‌کنند[۲۲]. به عنوان مثال، پژمردگی فوزاریوم[1] که در اکثر کشورها به دلیل تولید زیاد، بقای طولانی مدت قارچ در خاک و تولید نژادهای مقاوم دیده می شود، به عنوان بیماری گوجه فرنگی و کاهو محسوب می‌شود. این بیماری را می‌توان با کمک مواد شیمیایی تا حدودی کاهش داد. اما استفاده از مواد شیمیایی گران است و همیشه موثر نیست. استفاده از نانومواد به عنوان راه‌حلی جایگزین برای کنترل عوامل بیماری‌زای گیاهی این بیماری در نظر گرفته شده است. در این راستا، سنتز نانومواد اکسید منیزیم(MgO)، اکسید مس(CuO)، اکسید روی(ZnO)، هیدروکسید منیزیم(MgOH) و اکسید منیزیم(MgO) با استفاده از عصاره‌های آبی پوست پونیکا گراناتوم[2] برگ های الیا اروپا[3] شته سبز هلو و گل‌های بابونه رومی به عنوان نانو کودهای موثر با موفقیت انجام شده است[۲۳].

تأثیر واقعی نانومواد بر گیاهان به اندازه، ترکیب، بار سطحی، غلظت و تغییرات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بستگی دارد. روش‌های تجزیه‌ای مختلف مانند میکروسکوپ، تصویربرداری تشدید مغناطیسی و طیف‌سنجی فلورسانس به درک بهتر برهم‌کنش‌های بین گیاهان و نانومواد کمک می‌کنند[۲۴].

نانوذرات دارای مزایای بسیاری هستند و در فعالیت‌های رایج حفاظت از محصولات کشاورزی نیز در مقیاس بزرگ عمل می‌کنند[۲۵]. تقریباً اکثر آفت‌کش‌ها به درستی عمل نمی‌کنند. گفته می شود که بیش از ۹۰ درصد از آفت‌کش‌ها مورد استفاده به شکل نادرست بکار گرفته می‌شوند و در محیط از بین رفته و به محل مورد نظر نمی‌رسند و به طور مؤثر علف‌های هرز را در برابر محصولات کاهش نمی‌دهند[۲۶]. این رویکرد در حال حاضر دیگر موثر نیست و تنها ارزش تولید گونه‌های گیاهی را افزایش می‌دهد. همچنین سیستم کشاورزی را از بین می‌برد. کنترل آفات و بهره‌وری محصول را می‌توان با معرفی مواد فعال خاص در حداقل غلظت‌های ویژه نانومواد در محل مورد نظر افزایش داد. بر این اساس، فناوری جدید برای حفاظت از گیاهان ایجاد شد که در زمینه تحقیقات کشاورزی مهم بود. این فناوری به نام نانوفرمولاسیون یا نانوکپسوله‌سازی آفت‌کش‌ها توسعه یافت که نقش مهمی در حفاظت از گیاهان دارد[۲۷].

فناوری توسعه‌یافته به نام نانوکپسوله‌سازی آفت‌کش‌ها، در واقع ماده فعالی است که با مواد مختلف با اندازه‌های گوناگون در محدوده نانو پوشانده می‌شود. در این صورت می‌توان مواد

[1] Fusarium
[2] Punica granatum
[3] Olea europaea

کپسوله‌شده را فاز داخلی ماده هسته (آفت‌کش) و ماده مورد استفاده برای کپسول‌سازی را فاز خارجی نامید[۲۶]. به عبارت دیگر، افزایش تدریجی آفت‌کش‌ها یا علف‌کش‌ها نه تنها حلالیت آفت‌کش‌ها را در آب کاهش می‌دهد و اثرات نامناسبی بر موجودات زنده نمی‌گذارد، بلکه منجر به افزایش مهار میکروارگانیسم‌های هدف می‌شود.

توسعه روش نانو فرمولاسیون به کاهش عوامل نامناسب کمک می‌کند[۱۹]. به عنوان مثال، پتوسا و همکاران [۲۸] نشان می‌دهند که تنظیم پتانسیل انتقال آفت‌کش‌ها عملکرد محصول را افزایش می‌دهد. نانوکپسول‌های پلیمری و پیرتروئیدبیفنترین [1] با هم مخلوط شدند تا فرمول به شکل نانو را تشکیل دهند که با گذشت زمان، شویش بالایی را نشان می‌دهد. نانومواد مورد استفاده در فرمولاسیون آفت‌کش دارای ویژگی‌های مفیدی مانند استحکام خوب، نفوذپذیری، پایداری حرارتی و همچنین زیست تخریب‌پذیری می شوند[۲۷]. در جدول ۱ تعدادی از نانوکپسول های حمل کننده آفت کش ها به همراه مشخصات آنها که سنتز شده اند جمع آوری شده است.

با توجه به خصوصیات مدیریت تلفیقی آفات[2] تولید کنترل شده مواد فعال باعث کاهش کل محتوای آفت‌کش‌های ضروری برای کنترل آفات و بیماری‌ها می‌شود. محیط زیست به آفت‌کش‌های طبیعی و سازگار با محیط زیست و حداقل استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی نیاز دارد که محیط‌زیست را از اثرات مضر محافظت می‌کند و از گونه‌های غیر هدف دور می‌کند[۳۹]. در چنین شرایطی استفاده از نانوذراتی که در کنترل آفات مؤثر بوده و اثرات مضر ناشی از موجودات را مهار می‌کند، مورد نیاز است. نانوذرات مواد فعال را به صورت کنترل شده آزاد می‌کنند که اطمینان از تماس کارآمد با حداقل اثرات بر محصولات کشاورزی را فراهم می‌کند[۱۹]. دی خورخه مثالی برای این کار ارائه کرد و آن نانوسیلیس بود که در آب محلول نبود و می‌توانست از طریق لایه کوتیکول آفت وارد آن شود و آفت را از بین ببرد[۴۰]. دی خورخه و همکاران همچنین کشف کردند که نانوفیبر حاوی فرمون و حشره کش سیپرمترین برای جذب و از بین بردن کرم هلو به خوبی عمل می کند[۴۱].

جدول ۱. فهرست مطالعات انجام شده در نانو کشاورزی شیمیایی و روش تهیه آن.

ردیف	حامل استفاده شده	عناصر فعال	فرآیند درگیر
۱	کیتوزان	ایمازاپیک و ایمازاپیر	کپسوله سازی [۲۹]
۲	سیلیس	پیراستام، پنتوکسی فیلین و پیریدوکسین ایمیداکلوپرید	سوسپانسیون [۳۰]
۳	آلژینات	ایمیداکلوپرید	امولسیون [۳۱]
۴	پلی استیک اسید–پلی اتیلن گلیکول–پلی استیک اسید	ایمیداکلوپرید	کپسوله سازی [۳۲]
۵	کربوکسی متیل کیتوزان	متومیل	کپسوله سازی [۳۳]
۶	کیتوزان/تری پلی فسفات	پاراکوات	کپسوله سازی [۳۴]
۷	آلژینات	آزادی اختین	کپسوله سازی [۳۵]
۸	گلوتن گندم	اتوفومزات	گیر افتادن/ اکستروژن [۳۶]
۹	پلی هیدروکسی بوتیرات–کو هیدروکسی والرات	آترازین	کپسوله سازی [۳۷]
۱۰	کیتوزان/تری پلی فسفات	کیتوزان، ساپونین، CuSO	اتصال عرضی [۳۸]

مطالعات بیشتر بر روی نانوفرمولاسیون آفت‌کش‌ها، اطلاعاتی را در مورد توسعه مقاومت اکتسابی سیستمی محصول در برابر علف‌های هرز ارائه می‌دهد. لی محتمل‌ترین مثال این امر را، فرمولاسیون نانوکره سیلیس معرفی کرد که ظرفیت ارتقای کارایی باکتری‌کش را برای انتقال به گیاه، سپس ورود به شیره سلولی گیاه و درنهایت مهار رشد آفاتی مانند شته‌ها را دارد[۴۲].

[1] Pyrethroid bifenthrin
[2] Integrated pest management

مطالعه دیگری نشان می‌دهد که نانو فرمولاسیون ، ویژگی‌های غیر سیستمی حشره‌کش‌ها را تغییر می‌دهد[۴۳]. هنگامی که برگ‌های چای با نانوذرات فلزی(AuNPs) تهیه شدند، فعالیت‌های غیرسیستمیک فربام[1]می‌تواند تغییر کند و ظرفیت نفوذ را افزایش دهد. این تحقیقات مرز جدیدی از فرمول‌های حشره‌کش تقویت‌کننده را ارائه می‌کند تا بتواند مقاومت سیستمی گیاه را تقویت کند. تحقیق در مورد این موضوع مستلزم کسب جزئیات بیشتر در مورد خصوصیات منحصربفرد و عملکرد حشره‌کش‌ها و واکنش آن‌ها با درشت مولکول‌های بیولوژیکی در محیط یا در محصولات گیاهی است. در همین حال، پاتیل و همکاران توضیح دادند که نانوذرات نقره زیست فعال می توانند فعالیت کاتالیزوری تریپسین را کاهش داده و آفت را از بین ببرند[۴۴].

برهمکنش‌های متنوع نانوذرات فلزی با پروتئین‌ها مانند برهمکنش کووالانسی، برهمکنش‌های الکترواستاتیکی و اتصال به گروه پیوند SH اسید آمینه ممکن است دلایل مهار فعالیت آنزیم ها باشد[۴۴]. نانوذرات سنتز شده کاربردهای زیادی در محیط دارند و همچنین نقش حیاتی در کنترل آفات دارند[۴۵]. مشخص شده است که عملکرد نانوذرات مس در برابر فیتوفتورا اینفنتنس[2]گوجه فرنگی نسبت به محصولات تجاری برپایه مس موثرتر است[۴۶]. مقدار بالای آفات در کشاورزی باعث کاهش بهره‌وری محصولات در جهان می‌شود، در حالی که محصولات کشاورزی علاوه بر فائق آمدن بر این آفات باید عناصر ضروری نظیر نور و آب را نیز دریافت کنند[۴۷].

به طور مشابه، کومار و همکاران[۴۵] نشان دادند که نانوذرات پکتین (پلی‌ساکارید) حاوی علف‌کش(متسولفورون متیل) بر روی گیاه سلمک[3]برای کاهش استفاده از علف کش ها با بهبود کارایی و ایمنی محیطی می تواند مورد استفاده قرار بگیرد[۱۹]. پاتیل توضیح داد که برای توسعه اسیدهای آمینه در محیط، نانوذرات ترکیب شده با حشره‌کش‌هایی مانند علف‌کش‌ها، باکتری‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها نقش مهمی دارند[۳۷]. اکسید منیزیم(MgO) ماده معدنی مهمی است که کاربردهای زیادی مانند جاذب‌ها، بازدارنده‌های آتش، سرامیک‌های پیشرفته، پاکسازی زباله‌های سمی و مواد الکترونیکی نور دارد. بنابراین، تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی برای سنتز این دسته از نانوذرات از جمله روش‌های سبز با استفاده از عصاره غیرسمی برگ چریش[۴۸]، عصاره برگ لیمو و صمغ اقاقیا[۴۹] گزارش شده است. عنصر روی به عنوان یک ریزمغذی ضروری برای فعالیت‌های متابولیک در گیاهان در نظر گرفته شده است، اگرچه به مقدار کمی در گیاهان مورد نیاز است. مشخص شده است که روی نقش مهمی در مدیریت گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت از سلول‌های گیاهی در برابر تنش‌های اکسیداتیو دارد[۵۰]. روی عملکردهای مهمی در سنتز اکسین یا ایندول استیک اسید از تریپتوفان و همچنین در واکنش‌های بیوشیمیایی مورد نیاز برای تشکیل کلروفیل و کربوهیدرات‌ها دارد. عملکرد و کیفیت محصول می تواند تحت تأثیر کمبود روی باشد[۵۱]. نانوذرات اکسید روی به عنوان یکی از آفت‌کش‌های همه‌کاره مطرح می شوند که توانایی مسدود کردن فوزاریوم گرامینارو[4]، پنی سیلیوم اکسپانسوم[5]، آلترناریا آلترنیت[6]، اف. اکسی اسپوروم[7]، ریزوپوس استولونیفر[8]، موکورپلومبئوس[9]، آسپرژیلوس فلاووس[10]و همچنین بیماری‌های پسوینودوماوس[11]را دارد[۱۹, ۴۵]. نانولوله‌های کربنی نیز می‌توانند با افزایش جذب عناصر و استفاده از مواد مغذی به بهبود رشد گیاهان کمک کنند[۵۲]. در نانوفرمولاسیون می توان از ویروس های گیاهی کروی شکل که به عنوان نانومواد طبیعی شناخته می شوند استفاده کرد. کوچک‌ترین ویروس گیاهی شناخته شده، ویروس نکروز تنباکو انگلی است که قطر آن تنها ۱۸ نانومتر است. توانایی آن‌ها برای رساندن ژنوم اسید نوکلئیک به یک مکان خاص در سلول میزبان، تکثیر، بسته شدن اسید نوکلئیک و خارج شدن از سلول میزبان شیوه کاملا منظم، استفاده از آن‌ها در فناوری نانو را ضروری کرده است. مروری کامل بر روی استفاده از ویروس‌های گیاهی به‌عنوان الگوهای زیستی برای نانومواد و کاربردهای آن‌ها اخیراً توسط یانگ و همکاران انجام شده است[۵۳, ۵۴].

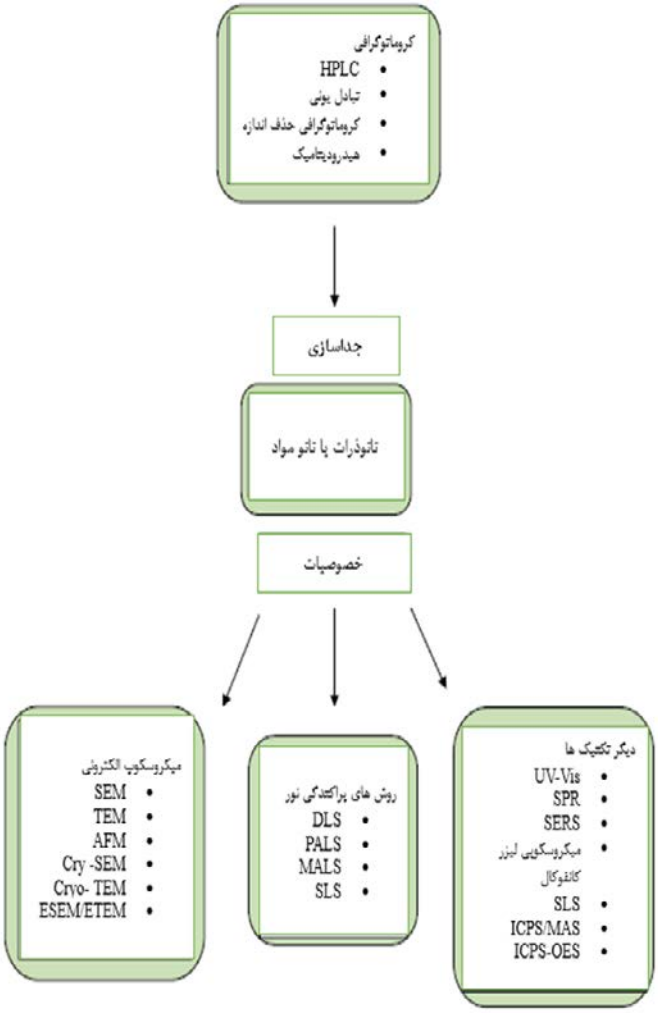
[1] Ferbam
[2] Phytophthora Infestans
[3] Chenopodium Album
[4] Fusarium Graminearum
[5] Penicillium Expansum
[6] Alternaria Alternate
[7] F. Oxysporum
[8] Rhizopus Stolonifer
[9] Mucorplumbeus
[10] Aspergillus flavus
[11] Pseuinodomaus

از طرف دیگر، نانوحسگرهای زیستی یکی از فناوری‌هایی است که با مدیریت مناسب آب، زمین، کودها و آفت‌کش‌ها به افزایش عملکرد محصول کمک می‌کند. نسبت سطح به حجم بالا، سینتیک انتقال سریع الکترون، حساسیت و پایداری بالا با عمر طولانی‌تر مزیت اصلی آن نسبت به حسگرهای معمولی است[۵۲, ۵۳]. به عنوان مثال، نانوحسگر زیستی بر مبنای فلوئوروسانس و طیف سنجی رامان بهبود یافته سطحی[1](SERS)، دو حسگر نوری رایج با استفاده از درشت مولکول‌های زیستی/اکسید فلز هستند که به شناسایی یون‌های فلزی در آب رودخانه یا خاک کمک می کند. در بین آفت‌کش‌ها، ارگانوفسفات‌ها، نئونیکوتینوئیدها، کاربامات‌ها و آترازین‌ها به‌عنوان دسته‌های غالب در نظر گرفته می‌شوند و بقایای آن‌ها به دلیل همگنی کم، در غلظت‌های پایین‌تری برای مدت طولانی‌تری در خاک یافت می‌شوند که به کمک نانوحسگرهای زیستی اندازه گیری می شوند[۵۵]. اندازه گیری برخی از آفت‌کش‌هایی با استفاده از نانوحسگرها نیز با کمک برهمکنش آنتی‌ژن–آنتی‌بادی انجام می شود. اوره پرکاربردترین کود برای تولید محصولات زراعی است. این آلاینده هم در آب و هم در خاک می تواند با استفاده از رنگ‌سنجی میکروسیال شناسایی شود[۵۶, ۵۷].

۳- روش‌های تشخیص و تعیین نانومواد شیمیایی کشاورزی

تشخیص و تعیین کمی نانوذرات/نانومواد موجود در محیط به دلیل اندازه کوچک و غلظت کم آن‌ها و همچنین به دلیل وجود نانوذرات طبیعی که با ترکیب عنصری مشابه است، بسیار دشوار است[۵۸]. به طور کلی نمونه‌های کشاورزی از نظر طبیعت ناهمگن هستند چون حاوی مخلوطی از نانوذرات طبیعی و مهندسی‌شده در ترکیبات مختلف هستند. در برخی موارد لازم است نمونه‌ها قبل از شناسایی جدا شوند، که به کاهش پیچیدگی ماتریس‌های نمونه کمک می‌کند. چندین روش جداسازی و مشخصه یابی را می‌توان برای تشخیص نانومواد یا نانوذرات در نمونه های کشاورزی استفاده کرد(شکل ۳) [۵۹, ۶۰].

کروماتوگرافی به طور معمول به جداسازی ترکیبات بر اساس پارامترهای مختلف مانند بار(کروماتوگرافی تبادل کاتیونی ضعیف/قوی یا آنیونی)، جرم مولکولی(کروماتوگرافی حذف اندازه)، آبگریزی/قطبیت(HPLC فاز معکوس، کروماتوگرافی برهمکنش



شکل ۳. مروری بر روش جداسازی و خصوصیات مورد استفاده برای شناسایی نانوذرات/نانومواد در صنعت کشاورزی. HPLC: کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا؛ SEM: میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ TEM: میکروسکوپ الکترونی عبوری؛ AFM: میکروسکوپ نیروی اتمی ؛ ETEM/ESEM، TEM یا SEM محیطی؛ DLS: پراکندگی نور پویا؛ MALS: پراکندگی نور چند زاویه ای؛ PALS: تجزیه فاز پراکندگی نور؛ SLS: پراکندگی نور ساکن؛ UV-Vis: ماوراء بنفش–مرئی؛ SPR: رزونانس پلاسمون سطحی؛ SERS: سطح پراکندگی رامان افزایش یافته؛ ICP: پلاسمای جفت شده القایی؛ MS: طیف سنجی جرمی؛ OES: طیف سنجی نشر نوری.

آبگریز) و ویژگی‌های خاص(کروماتوگرافی میل ترکیبی)، بسته به نوع مواد در فاز ساکن کمک می‌کند[۶۱]. کروماتوگرافی هیدرودینامیکی نیز یک روش بسیار کارآمد برای جداسازی

[1] Surface Enhanced Raman Scattering

نانوذرات یا نانومواد از نمونه‌های کشاورزی بر اساس شعاع هیدرودینامیکی آن‌ها است[۶۲].

پرکاربردترین روش های تشخیص نانوذرات/نانومواد در نمونه‌های کشاورزی عبارتند از: پراکندگی نور دینامیکی(DLS)، روش های میکروسکوپی و طیف‌سنجی، تشدید پلاسمون سطحی(SPR) و خودفلورسانس. یکی از روش‌هایی که برای ارائه اطلاعات ساختاری استفاده می‌شود، روش کلاسیک پراکندگی نور است[۶۳]. DLS همچنین به عنوان طیف‌سنجی همبستگی فوتون شناخته می‌شود که از نور پراکنده برای اندازه‌گیری سرعت انتشار نانوذرات/نانومواد استفاده می‌کند و توزیع اندازه را ارائه می‌دهد. در برخی از مطالعات گذشته از این روش به منظور سنجش و تعیین پروتئین‌های انباشته، تعیین و مشخص کردن اندازه نانوکپسول‌های لیپیدی، اندازه‌گیری اندازه ذرات طبیعی موجود در شیر استفاده شده است[۶۴]. اما تعیین کمی وجود هر گونه تجمعی با استفاده از DLS بسیار دشوار است. این مشکل را می توان با استفاده از روش تجزیه فاز پراکندگی نور (PALS) حل کرد که به تعیین نقطه ایزوالکتریک و محلول تحرک الکتروفورتیک کمک می‌کند. پراکندگی نور استاتیک نیز یکی دیگر از روش‌های پراکندگی نور، سریع، تکرارپذیر و پرکاربرد است[۶۵]. در میان تمام روش های میکروسکوپی، روش های میکروسکوپ الکترونی به طور گسترده‌ای برای تعیین اندازه، شکل و سایر خواص عنصری نانوذرات/نانومواد استفاده می‌شود. میکروسکوپ الکترونی عبوری(TEM) یکی از روش های تصویربرداری در مقیاس نانو ضروری برای توصیف نانوذرات کمتر از ۲۰۰ نانومتر در نمونه‌های کشاورزی است. در TEM، الکترون‌ها از طریق نمونه منتقل می‌شوند (از نمونه عبور می کنند) تا تصویری با وضوح ۰/۵ نانومتر به دست آورند[۶۶]. TEM همراه با یک آشکارساز طیف‌سنج پراکندگی انرژی (EDS یا EDX) برای بدست آوردن ترکیبات عنصری نانوذرات/نانومواد استفاده می‌شود و همچنین می‌تواند اندازه، شکل هندسی و توزیع اندازه نانوذرات را با دقت بالایی ارائه دهد[۶۷]. از این روش می‌توان برای متمرکزسازی و شناسایی ذرات معدنی استفاده کرد. میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM) نیز ابزاری قدرتمند برای بررسی اطلاعات دقیق ساختاری در نظر گرفته می‌شود. AFM می‌تواند بی‌نظمی‌هایی را در ساختار پلیمری که معمولاً مانع از تشخیص در کل آنالیزهای مبتنی بر نمونه می‌شود، تشخیص دهد. بنابراین، تصویربرداری AFM پتانسیل مشخص نمودن مجموعه‌های ناهمگن یکپارچه درشتمولکول‌های مواد غذایی را فراهم می‌کند[۶۸]. Cryo-TEM/Cryo-SEM را نیز می توان برای به دست آوردن تصاویر با وضوح بالا از نمونه های بیولوژیکی تحت خلاء بالا و دمای کمتر از محیط (بین ۱۰۰- درجه سانتیگراد و ۱۷۵- درجه سانتیگراد) استفاده کرد. تصاویر میکروسکوپ کانفوکال تجمعات نانوذرات را در اپیدرم ریشه، قشر و برخی از دانه‌های نانوذرات در آوندهای چوبی نشان می دهد[۶۹]. SPR یا رویکردهای مبتنی بر طیف‌سنجی رامان تقویت‌شده سطحی نیز برای اندازه‌گیری نانوذرات استفاده می‌شوند[۷۰]. همچنین می توان از خودفلورسانس برای آنالیز نمونه‌های کشاورزی استفاده کرد. علاوه بر این، جذب نانوذرات و شرایط درون سلولی با تجزیه میکروسکوپ نوار یونی، TEM، تجزیه رامان و میکروسکوپ اسکن لیزری کانفوکال دنبال می‌شود.

٤- اهمیت نانوفناوری در توسعه پایدار کشاورزی

نانوفناوری با کنترل تولید مواد مغذی، جایگاه مهمی در توسعه کشاورزی دارد و این گامی حیاتی برای افزایش بهره‌وری محصول است[۷۱]. مشاهدات کیفیت آب و استفاده صحیح از آفت‌کش‌ها نقش عمده‌ای در حفظ و مدیریت کشاورزی دارد[۷۲]. مطالعه روی نانوذرات توضیح می‌دهد که نانوذرات دارای ترکیب شیمیایی یکسانی هستند که شکل یا اندازه‌ای متغیر و همچنین سمیت مختلفی را نشان می‌دهند. محققان با مطالعه روی نانو آفت‌کش‌ها در کشاورزی به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از نانوآفت کش ها برای توسعه پایدار مهم هستند. ظهور فناوری نانو در مدیریت منابع، حفظ حاصل‌خیزی خاک و تکنیک انتقال دارو، در توسعه پایدار مفید و کاربردی است. همچنین استفاده از نانوفناوری برای بررسی توسعه پایدار ضایعات طبیعی و توده مواد غذایی به عنوان ابزار شناسایی مفید است. نانوحسگرها به دلیل قدرت و ظرفیت نظارت سریع برای تشخیص حضور میکروارگانیسم‌های موجود در آب یا خاک به طور گسترده در محیط زیست استفاده می‌شوند. بسیاری از تجهیزات مانند حسگرهای زیستی، حسگرهای نوری، حسگرهای الکتروشیمیایی برای تشخیص نانوذرات استفاده می‌شوند[۷۳].

نانوذرات کاربردهای بسیاری در فعالیت‌های کشاورزی دارند و باعث بهبود کاتالیز، تخریب ضایعات و نابودی مواد سمی مضر می‌شوند. علاوه بر این، مواد مضر و بدون مصرف را توسط میکروارگانیسم‌ها تخریب می‌کنند. تخلیه سموم و مواد خطرناک از خاک و آب باغبانی باید با پاک‌سازی زیستی توسط میکروارگانیسم‌ها امکان‌پذیر باشد. به طور خاص، برخی از روش‌های مختلف مانند زیست پالایی[1] (جانداران سودآور)، گیاه پالایی[2] و مایکورپالایی[3] معمولاً برای این امر مورد استفاده قرار می گیرند[۷۴–۷۶]. درنتیجه، با پیش‌فرآوری محیط‌های آلوده با ترکیبات به طور قابل توجهی می‌توان منابع طبیعی را حفظ کرده و و به طور حرفه‌ای میکروب‌ها را دفع کرد[۷۷]. بنابراین، روند پیش‌فرآوری واسطه‌های آلوده به ایجاد نوآوری‌هایی برای جداسازی و تشخیص آلودگی‌ها کمک می‌کند. در این بین، استفاده از نانوفناوری برای از بین بردن اجزای سمی خاک کشاورزی و اقتصادی کردن آن بسیار قابل توجه است[۷۸].

نانوکودها ممکن است حاوی نانو ذرات روی، سیلیس، آهن، دی اکسید تیتانیوم، نقاط کوانتومی پوسته هسته ZnCdSe/ZnS، نقاط کوانتومی پوسته هسته InP/ZnS، نانومیله‌های منگنز/ZnSe و یا نانومیله های طلا و غیره باشند که باید از تحویل، کنترل و بهبود کیفیت آن پشتیبانی کند. بررسی میزان جذب، فرایند آلی و مضر بودن چندین نانوذره مانند اکسید فلزی، اکسید آلومینیوم، دی اکسید تیتانیوم، اکسید سریم، اکسید آهن و نانوذرات اکسید روی در سالیان اخیر برای کاربرد کشاورزی به طور جدی مورد مطالعه قرار گرفته اند[۷۸]. کمبود روی به عنوان یکی از مشکلات اساسی خاک در محدود کردن کارایی باغبانی گزارش می‌شود[۷۸, ۷۹]. در طول این قرن، تجارت زیرکانه کشاورزی رویکردی برای بهبود عملکرد پاسخ کوتاه مدت و بلندمدت در مواجهه با تغییرات محیطی است و به عنوان یک عامل موثر در در دنیای امروزی تلقی می شود[۸۰]. به نظر می‌رسد که این دیدگاه به کشورها و سایر دیدگاه‌های مفید در حصول اطمینان از کاربردهای مهم کشاورزی کمک کند[۸۱].

در چند سال گذشته، تحقیقات کشاورزی در درجه اول بر روی شناخت و توسعه مواد مهم و ویژگی‌های آن‌ها هدایت و متمرکز شده است. یک دسته مهم از این مواد، نانوساختارها هستند. مواد نانوساختار هنگامی که به عنوان مبدل یا به عنوان بخشی در گجت تشخیص تخمینی در مقیاس کامل مورد استفاده قرار می‌گیرند، نکات جالبی را در علوم کشاورزی ثابت کردند. به عنوان مثال، نانوذرات طلا ممکن است به عنوان مبدل برای پیشرفت کاربردهای کشاورزی استفاده شود. نانوذرات طلا پلاسمای سطح قابل توجهی در حدود ۵۲۰ نانومتر دارد. برای بهبود گجت‌های حسگر زیستی، نانوذرات طلا می‌توانند به دلیل خواص بی‌شماری مانند مساحت بالای سطح و خواص فیزیکوشیمیایی استفاده شوند. همچنین، این نانوذرات به دلیل سمیت کم، زیست‌سازگاری و ویژگی‌های نوری خارق‌العاده در بررسی‌های آلی حائز اهمیت می باشند[۸۱, ۸۲]. به این ترتیب، استفاده از ذرات در مقیاس نانو، نکات مورد توجه متعددی را نسبت به سیستم‌های معمولی ایجاد می‌کند. همچنین، نانومواد نقش مهمی در حفاظت از محصولات کشاورزی دارند. نانوذرات دارای عملکردهای بسیار زیادی هستند که یکی از عملکردهای اصلی آن کنترل آفات حشرات است که با افزایش بهره‌وری باعث افزایش عملکرد در کشاورزی می‌شود[۸۳, ۸۴]. نانو آفت‌کش‌های سنتز شده که سازگار با محیط زیست می باشند، کم‌تر مضر بوده و به طور موثر از محصولات در محیط محافظت می‌کنند[۲۶, ۸۲]. سنتز نانو آفت‌کش‌های غیر سمی و سازگار با محیط زیست، بهره‌وری جهانی غذا را بدون ایجاد هیچ گونه اثرات مضر برای محیط زیست افزایش می دهد[۸۵].

۵- نتیجه‌گیری

کاربردهای نانوفناوری اکنون در مرحله تحقیق، آزمایش و استفاده در طیف‌های مختلف فناوری مواد غذایی، از کشاورزی گرفته تا فرآوری مواد غذایی، بسته‌بندی و مکمل‌های غذایی است. دامنه وسیع کاربرد نانومواد به دلیل خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد این ساختارها است. در سال‌های اخیر، کاربرد نانوفناوری در زمینه کشاورزی به دلیل سطح بزرگ ذرات آن که به افزایش واکنش‌پذیری کمک می‌کند، مورد توجه قرار گرفته است. نانومواد تهیه شده توسط پیش‌سازهای سبز و دوست‌دار محیط زیست به افزایش پتانسیل کشاورزی کمک می‌کنند که باعث بهبود فرآیند کوددهی، تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه، تحویل سموم جزء فعال به مکان‌های هدف، تصفیه فاضلاب و همچنین افزایش جذب

[1] Bioremediation
[2] Phytoremediation
[3] Mycoremediation

مواد مغذی در گیاه می‌شود. همچنین، این ساختارها باعث به حداقل رساندن میزان مواد شیمیایی مضر که محیط را آلوده می‌کنند، می‌شوند. به عنوان بخشی از ایمنی زیستی، نانوحسگرهای زیستی به دلیل سیستم‌های سریع، حساس و مقرون به صرفه با کاربرد گسترده در فعالیت‌های مختلف انسانی مانند مراقبت‌های بهداشتی، کشاورزی، تجزیه ژنوم، غذا و نوشیدنی، صنایع فرآیندی، نظارت بر محیط زیست و ...، تقاضای زیادی دارند. فناوری نانو در کشاورزی ممکن است چند دهه طول بکشد تا از تحقیقات آزمایشگاهی به کاربرد میدانی برسد. برای دستیابی به آن نیاز به سرمایه‌گذاری و درک پایدار از سوی برنامه‌ریزان و مدیران علمی همراه با انتظارات معقول است.

مراجع

1. Y. Shang, M.K. Hasan, G.J. Ahammed, M. Li, H. Yin, J. Zhou, Molecules. 24, 14 (2019).

2. M. Usman, M. Farooq, A. Wakeel, A. Nawaz, S.A. Cheema, H. ur Rehman, I. Ashraf, M. Sanaullah, Sci. Total Environ. 721, 137778 (2020).

3. P. Zhang, Z. Guo, S. Ullah, G. Melagraki, A. Afantitis, I. Lynch, Nat. Plants. 7, 7 (2021).

4. A. Acharya, P.K. Pal, NanoImpact. 19, 100232 (2020).

5. A. Malakar, S.R. Kanel, C. Ray, D.D. Snow, M.N. Nadagouda, Sci. Total Environ.. 759, 143470 (2021).

6. R.J. Peters, H. Bouwmeester, S. Gottardo, V. Amenta, M. Arena, P. Brandhoff, H.J. Marvin, A. Mech, F.B. Moniz, L.Q. Pesudo, Trends in Food Sci. Technol.. 54, 155(2016).

7. N. Omerović, M. Djisalov, K. Živojević, M. Mladenović, J. Vunduk, I. Milenković, N.Ž. Knežević, I. Gadjanski, J. Vidić, Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 20, 3 (2021).

8. P. Pramanik, P. Krishnan, A. Maity, N. Mridha, A. Mukherjee, V. Rai, Environmental Nanotechnology Volume 4. 317(2020).

9. A. Sridhar, M. Ponnuchamy, P.S. Kumar, A. Kapoor, Environ. Chem. Lett.. 19, 2 (2021).

10. Z. Iqbal, M.I. Ansari, A.G. Memon, G. Gupta, M.S. Iqbal, Nanomaterials in Combating Plant Stress: An Approach for Future Applications, in: J.M. Al-Khayri, M.I. Ansari, A.K. Singh (Eds.), Nanobiotechnology : Mitigation of Abiotic Stress in Plants, (Springer International Publishing, Cham, 2021), pp. 561-576.

11. A. Kumar, A. Choudhary, H. Kaur, S. Guha, S. Mehta, A. Husen, Chemosphere. 295, 133798 (2022).

12. S.S. Salem, A. Fouda, Biol. Trace Elem. Res. 199, 1 (2021).

13. N. Mitter, K. Hussey, Nature Nanotech. 14, 6 (2019).

14. K. Jabeen, F. Anum, Myco-nanotechnology in Agriculture, in: S. Javad (Ed.), Nanoagronomy, (Springer International Publishing, Cham, 2020), pp. 53-68.

15. L. Castillo-Henríquez, K. Alfaro-Aguilar, J. Ugalde-Álvarez, L. Vega-Fernández, G. Montes de Oca-Vásquez, J.R. Vega-Baudrit, Nanomaterials. 10, 9 (2020).

16. N. Kučuk, M. Primožič, Ž. Knez, M. Leitgeb, Int. J. Mol. Sci. 24, 4 (2023).

17. D. Wang, N.B. Saleh, A. Byro, R. Zepp, E. Sahle-Demessie, T.P. Luxton, K.T. Ho, R.M. Burgess, M. Flury, J.C. White, C. Su, Nature Nanotech. 17, 4 (2022).

18. Y.W. Chen, H.V. Lee, J.C. Juan, S.-M. Phang, Carbohydr. Polym. 151, 1210(2016).

19. S.A. Younis, K.-H. Kim, S.M. Shaheen, V. Antoniadis, Y.F. Tsang, J. Rinklebe, A. Deep, R.J.C. Brown, Renew. sustain. energy rev. 152, 111686 (2021).

20. K. Paunovska, D. Loughrey, J.E. Dahlman, Nat. Rev. Genet. 23, 5 (2022).

21. S.-Y. Kwak, M.H. Wong, T.T.S. Lew, G. Bisker, M.A. Lee, A. Kaplan, J. Dong, A.T. Liu, V.B. Koman, R. Sinclair, C. Hamann, M.S. Strano, Annu. Rev. Anal. Chem. 10, 1 (2017).

22. C. An, C. Sun, N. Li, B. Huang, J. Jiang, Y. Shen, C. Wang, X. Zhao, B. Cui, C. Wang, X. Li, S. Zhan, F. Gao, Z. Zeng, H. Cui, Y. Wang, J. Nanobiotechnology. 20, 1 (2022).

23. R. Grillo, L.F. Fraceto, M.J.B. Amorim, J.J. Scott-Fordsmand, R. Schoonjans, Q. Chaudhry, J. Hazard. Mater. 404, 124148 (2021).

24. H. Chhipa, Chapter 6 - Applications of nanotechnology in agriculture, in: V. Gurtler, A.S. Ball, S. Soni (Eds.), Methods in Microbiology, (Academic Press 2019), pp. 115-142.

25. H. Singh, A. Sharma, S.K. Bhardwaj, S.K. Arya, N. Bhardwaj, M. Khatri, Environ. Sci, Process Impacts 23, 2 (2021).

26. M. Nuruzzaman, M.M. Rahman, Y. Liu, R. Naidu, J. Agric. Food Chem. 64, 7 (2016).

27. I. Ul Haq, S. Ijaz, Use of Metallic Nanoparticles and Nanoformulations as Nanofungicides for Sustainable Disease Management in Plants, in: R. Prasad, V. Kumar, M. Kumar, D. Choudhary (Eds.), Nanobiotechnology in Bioformulations, (Springer International Publishing, Cham, 2019), pp. 289-316.

28. A.R. Petosa, F. Rajput, O. Selvam, C. Öhl, N. Tufenkji, Water Res. 111, 10(2017).

29. C.R. Maruyama, M. Guilger, M. Pascoli, N. Bileshy-José, P.C. Abhilash, L.F. Fraceto, R. de Lima, Sci. Rep.. 6, 1 (2016).

30. J. Jampilek, K. Zaruba, M. Oravec, M. Kunes, P. Babula, P. Ulbrich, I. Brezaniova, R. Opatrilova, J. Triska, P. Suchy, Biomed Res. Int. 2015, (2015).

31. S. Kumar, G. Bhanjana, A. Sharma, M.C. Sidhu, N. Dilbaghi, Carbohydr. Polym. 101, 1061(2014).

32. N. Memarizadeh, M. Ghadamyari, M. Adeli, K. Talebi, Ecotoxicol. Environ. Saf.. 107, 77(2014).

33. C. Sun, K. Shu, W. Wang, Z. Ye, T. Liu, Y. Gao, H. Zheng, G. He, Y. Yin, Int. J. Pharm.. 463, 1 (2014).

34. R. Grillo, A.E.S. Pereira, C.S. Nishisaka, R. de Lima, K. Oehlke, R. Greiner, L.F. Fraceto, J. Hazard. Mater.. 278, (2014).

35. J. Jerobin, R.S. Sureshkumar, C.H. Anjali, A. Mukherjee, N. Chandrasekaran, Carbohydr. Polym.. 90, 4 (2012).

36. A. Chevillard, H. Angellier-Coussy, V. Guillard, N. Gontard, E. Gastaldi, Journal of Hazardous Materials. 205, 32(2012).

37. V. Saharan, A. Mehrotra, R. Khatik, P. Rawal, S.S. Sharma, A. Pal, Int. J. Biol. Macromol. 62, 677(2013).

38. R. Grillo, N.F.S. de Melo, R. de Lima, R.W. Lourenço, A.H. Rosa, L.F. Fraceto, J. Polym. Environ. 18, 1 (2010).

39. A. Rastogi, D.K. Tripathi, S. Yadav, D.K. Chauhan, M. Živčák, M. Ghorbanpour, N.I. El-Sheery, M. Brestic, 3 Biotech. 9, 3 (2019).

40. R. Liu, R. Lal, Science of The Total Environment. 514, 131(2015).

41. B. Czarnobai De Jorge, R. Bisotto-de-Oliveira, C.N. Pereira, J. Sant'Ana, Pest Manag. Sci. 73, 9 (2017).

42. A. do Espirito Santo Pereira, H. Caixeta Oliveira, L. Fernandes Fraceto, C. Santaella, Nanomaterials. 11, 2 (2021).

43. R. Hou, Z. Zhang, S. Pang, T. Yang, J.M. Clark, L. He, Environ. Sci. Technol.. 50, 12 (2016).

44. C.D. Patil, H.P. Borase, R.K. Suryawanshi, S.V. Patil, Enzyme Microb. Technol. 92, 18(2016).

45. S. Kumar, G. Bhanjana, A. Sharma, N. Dilbaghi, M.C. Sidhu, K.-H. Kim, Sci. Total Environ. 586, 1272(2017).

46. W. Elmer, J.C. White, Annu. Rev. Phytopathol. 56, 1 (2018).

47. Z. Xiao, N. Fan, W. Zhu, H. Qian, X. Yan, Z. Wang, S. Rasmann, ACS Nano. 17, 3107(2023).

48. S.K. Moorthy, C.H. Ashok, K.V. Rao, C. Viswanathan, Mater. Today: Proc. 2, 9, Part A (2015).

49. S. Abinaya, H.P. Kavitha, M. Prakash, A. Muthukrishnaraj, Sustain. Chem. Pharm. 19, 100368 (2021).

50. S. Husain, A. Nandi, F.Z. Simnani, U. Saha, A. Ghosh, A. Sinha, A. Sahay, S.K. Samal, P.K. Panda, S.K. Verma, J. Funct. Biomater. 14, 1 (2023).

51. H. Chhipa, Environ. Chem. Lett. 15, 1 (2017).

52. H.S. Bindra, B. Singh, 3 - Nanofertilizers and nanopesticides: Future of plant protection, in: S. Jogaiah, H.B. Singh, L.F. Fraceto, R.d. Lima (Eds.), Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture, (Woodhead Publishing 2021), pp. 57-84.

53. N. Joudeh, D. Linke, J. Nanobiotech. 20, 1 (2022).

54. M. Young, D. Willits, M. Uchida, T. Douglas, Annu. Rev. Phytopathol.. 46, 1 (2008).

55. O. Delgadillo-Vargas, R. Garcia-Ruiz, J. Forero-Álvarez, Agric. Ecosyst. Environ. 218, 150(2016).

56. A.K. Srivastava, A. Dev, S. Karmakar, Environ. Chem. Lett. 16, 1 (2018).

57. M. Kaushal, S.P. Wani, Nanosensors: Frontiers in Precision Agriculture, in: R. Prasad, M. Kumar, V. Kumar (Eds.), Nanotechnology: An Agricultural Paradigm, (Springer Singapore, Singapore, 2017), pp. 279-291.

58. T.A. Saleh, Trends Environ. Anal. Chem.. 28, e00101 (2020).

59. R.P. Singh, R. Handa, G. Manchanda, J. Controlled Release. 329, 1234(2021).

60. B. Bocca, F. Barone, F. Petrucci, F. Benetti, V. Picardo, V. Prota, G. Amendola, Food Chem. Toxicol.. 146, 111816 (2020).

61. W. Fu, J. Min, W. Jiang, Y. Li, W. Zhang, Sci. Total Environ. 721, 137561 (2020).

62. A.S. Tsagkaris, S.G. Tzegkas, G.P. Danezis, J. Food Sci. Technol.. 55, 8 (2018).

63. R. Singh, N. Kumar, R. Mehra, H. Kumar, V.P. Singh, Trends Environ. Anal. Chem. 26, e00086(2020).

64. M. Sajid, J. Płotka-Wasylka, Microchem. J. 154, 104623 (2020).

65. H. Cai, E.G. Xu, F. Du, R. Li, J. Liu, H. Shi, J. Chem. Eng. 410, 128208(2021).

66. S. Shakiba, C.E. Astete, S. Paudel, C.M. Sabliov, D.F. Rodrigues, S.M. Louie, Environ. Sci.: Nano. 7, 1 (2020).

67. Y. Picó, TrAC Trends Anal. Chem. 84, 149(2016).

68. A. Samsidar, S. Siddiquee, S.M. Shaarani, Trends Food Sci. Technol. 71, 188(2018).

69. T. Rasheed, M. Bilal, F. Nabeel, M. Adeel, H.M.N. Iqbal, Environ. Int. 122, 52(2019).

70. R. Jackson, B.A. Logue, Anal. Chim. Acta. 960, 18(2017).

71. N. Dasgupta, S. Ranjan, C. Ramalingam, Environ. Chem. Lett. 15, 4 (2017).

72. R. Prasad, A. Bhattacharyya, Q.D. Nguyen, Front. Microbiol.. 8, 1014 (2017).

73. A. Syafiuddin, Salmiati, M.R. Salim, A. Beng Hong Kueh, T. Hadibarata, H. Nur, J. Chin. Chem. Soc. 64, 7 (2017).

74. A. Shafi, J. Qadir, S. Sabir, M. Zain Khan, M.M. Rahman, Nanoagriculture: A Holistic Approach for Sustainable Development of Agriculture, in: O.V. Kharissova, L.M.T. Martínez, B.I. Kharisov (Eds.), Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, (Springer International Publishing, Cham, 2020), pp. 1-16.

75. S.A. Ashraf, A.J. Siddiqui, A.E.O. Elkhalifa, M.I. Khan, M. Patel, M. Alreshidi, A. Moin, R. Singh, M. Snoussi, M. Adnan, Sci. Total Environ. 768, 144990(2021).

76. D.J. McClements, ACS Omega. 5, 46 (2020).

77. R. Dixit, Wasiullah, D. Malaviya, K. Pandiyan, U.B. Singh, A. Sahu, R. Shukla, B.P. Singh, J.P. Rai, P.K. Sharma, H. Lade, D. Paul, Sustainability. 7, 2 (2015).

78. P. Marzbani, Y.M. Afrouzi, A. Omidvar, Maderas. Ciencia y tecnología. 17, 1 (2015).

79. A. Sahoo, J. Sethi, K.B. Satapathy, S.K. Sahoo, G.K. Panigrahi, Nanotech. Environ. Engin. 1(2022).

80. A. Solomon, Res. J. Nanosci. Eng. 2, (2018).

81. A. Bhattacharyya, P. Duraisamy, M. Govindarajan, A.A. Buhroo, R. Prasad, Nano-Biofungicides: Emerging Trend in Insect Pest Control, in: R. Prasad (Ed.), Advances and Applications Through Fungal Nanobiotechnology, (Springer International Publishing, Cham, 2016), pp. 307-319.

82. S. Gottardo, A. Mech, J. Drbohlavová, A. Małyska, S. Bøwadt, J. Riego Sintes, H. Rauscher, NanoImpact. 21, 100297(2021).

83. J.L. de Oliveira, E.V.R. Campos, M. Bakshi, P.C. Abhilash, L.F. Fraceto, Biotech. Adv. 32, 8 (2014).

84. W. Nilmini, J. Res. Tech. Engin. 2, 1 (2021).

85. C. Bartolucci, A. Antonacci, F. Arduini, D. Moscone, L. Fraceto, E. Campos, R. Attaallah, A. Amine, C. Zanardi, L.M. Cubillana-Aguilera, J.M. Palacios Santander, V. Scognamiglio, TrAC Trends Anal. Chem.. 125, 115840(2020).

پژوهش های شیمیایی و نانومواد
Chemical Research & Nanomaterials(CRN)
crn.shiraz.iau.ir

A brief overview on nano-agrochemicals

A. Narouei*, M. Narouei

Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract: In recent years, nanotechnology has received much attention due to its wide applications in various fields. As the surface area increases, the functional efficiency of the nanostructure also increases. Today, the potential application of nanotechnology in the field of agriculture has led to extensive research. The combination of nanotechnology and agriculture is a new tool and leads to the production of nano-fertilizers, nano-herbicides, nano-fungicides, nano-pesticides and nano-insecticides, commonly referred to as nano-agrochemicals. These nano agrochemical have gained a lot of research interest due to their cost-effective and environmentally friendly nature. In addition to the many benefits of nano-agrochemicals in agriculture, they help to replace synthetic fertilizers and pesticides, leading to increased yields of production. However, extensive research is being done in this field. Some of the challenges include accessibility for farmers, cost of production, lack of awareness, impact on the environment, humans, etc. This article reviews the current impacts of nanotechnology in agriculture, agrochemicals and their characterizations and also importance of nanotechnology on sustainable development of agriculture.

Keywords: Nanotechnology, Nanostructure, Nano-pesticide

*Correspondent Author Email: *mannan.narouei@pgs.usb.ac.ir*