نشریه علمی

تحقیقات در علوم مهندسی سطح و نانو مواد

سال ۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲

مروری بر نقش نانو مواد و نانو زیست مواد در فراوری منابع غذایی

سیامک حقی پور [۱]، سعیده ابراهیمی اصل [۲] ، عاطفه بدر [۳*]

[۱] گروه مهندسی پزشکی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

[۲] گروه شیمی، واحد اهر ، دانشگاه آزاد اسلامی ، اهر، ایران

[۳] دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

نانومواد به ذراتی با محدوده ابعاد ۱۰۰-۱ نانومترگفته می‌شود که نسبت سطح به حجم بالاتری نسبت به موارد حجیم دارند. با افزایش نسبت سطح به حجم، مواد می‌توانند واکنش پذیرتر شوند. به همین جهت نانو ذرات دارای خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی هستند که با خواص مواد حجیم متفاوت است. نانوتکنولوژی استفاده از ماده در مقیاس نزدیک به اتمی برای تولید ساختارها، مواد و وسایل جدید برای کاربرد در بسیاری از بخش‌ها مانند پزشکی، انرژی و ... است که در این میان وظیفه نانوتکنولوژی اینست که بتواند خواص فیزیکی و شیمیایی مواد را با خواص زیستی آن ترکیب کند تا در نهایت بتواند نانوذراتی با عملکردهای خاص تولید کند. از جمله این خواص می‌توان به بهبود مقاومت در برابر بیماری‌های گیاهی، افزایش رشد گیاهان و استفاده کارآمد از مواد مغذی اشاره کرد. مواد زیستی در مقیاس نانو در زمینه صنایع غذایی می‌توانند در تشخیص پاتوژن، در سیستم‌های تصفیه آب، تولید افزودنی‌های نانو در بسته‌بندی‌های هوشمند نانو، کنترل و تحویل مواد مغذی ، نانو کپسوله‌سازی و تحویل ماده هدف به کار می‌رود که رشد عوامل بیماری‌زای ذخیره شده در مواد غذایی را به حداقل می رسانند. نانوذرات فلزی به دلیل برهمکنش الکترواستاتیکی، می‌توانند فعالیت‌های ضد باکتریایی و ضد قارچی خوبی از خود نشان دهند. نانو کودها ممکن است حاوی روی، سیلیس، آهن، دی اکسید تیتانیوم، نانو میله‌های طلا و غیره باشند. نانولوله‌های کربنی و نانوذرات نقره و اکسید-روی می‌توانند در بهبود رشد گیاه به‌کار روند. در نهایت نانوتکنولوژی زیستی فرآیندی آینده نگر است و به عنوان یک امنیت زیستی کشاورزی عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: *نانو ذرات، نانو آفت‌کش‌ها ، نانو کود، نانو ذرات فلزی، نانوتکنولوژی*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

* نویسنده مسئول: عاطفه بدر

نشانی: تبریز، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

پست الکترونیکی: a_badr99@sut.ac.ir

An overview of the role of nanomaterials and nanobiomaterials in the processing of food resources

Siamak Haghipour [1], Saeideh Ebrahimi asl [2], Atefeh Badr[3*]

[1] Faculty of Medical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

[2] Faculty of Basic Sciences, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

[3]Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Abstract

Nanomaterials are particles with a size range of 1-100 nm, which have a higher surface-to-volume ratio than bulk ones. As the surface-to-volume ratio increases, materials can become more reactive. For this reason, nanoparticles have unique physical and chemical properties that are different from the properties of bulk materials. Nanotechnology is the use of matter on a near-atomic scale to produce new structures, materials, and devices for use in many sectors such as medicine, energy, etc., in the meantime, biological nanotechnology combines biological principles with the physical and chemical properties of materials to can produce nanoparticles with specific functions. Among these properties, we can mention improving resistance against plant diseases, increasing plant growth, and efficient use of nutrients. Nano-scale biological materials in the field of the food industry can be used in the detection of pathogens, in water purification systems, the production of nano additives in nano smart packaging, the control and delivery of nutrients, nanoencapsulation, and delivery of the target substance that the growth of pathogenic agents stored in Minimize food. Due to electrostatic interaction, metal nanoparticles can show good antibacterial and antifungal activities. Nanofertilizers may contain zinc, silica, iron, titanium dioxide, gold nanorods, etc. Carbon nanotubes and silver and zinc oxide nanoparticles can be used to improve plant growth. Finally, bio-nanotechnology is a futuristic process and acts as an agricultural bio-security.

Keywords: *Nano particles, Nano pesticides, Nano fertilizer, Metal nanoparticles, Nano technology.*

Received: 27/09/2023

Accepted: 05/12/2023

۱. مقدمه

نانوتکنولوژی به‌عنوان فناوری در حال رشد در مقیاس یک میلیاردم متر تعریف می‌شود که موانع بین فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی را ازبین می‌برد. همچنین یک فناوری جدید و امیدوارکننده است که در بسیاری از زمینه‌ها از جمله پزشکی، کشاورزی و صنایع غذایی استفاده شده است. به عنوان مثال فناوری نانو در پزشکی می‌تواند اجزای بیولوژیکی را در مقیاس نانو طراحی و بهینه‌سازی کند و در زمینه تشخیصی و درمانی، دارورسانی و مهندسی بافت و تحویل نانو دارو به کار ببرد. باتوجه به اینکه سیستم‌های بیولوژیکی متشکل از صدها هزار ژن و پروتئین است، شناسایی آنها بسیار سخت بوده و رفتار آنها به سختی قابل ارتباط، درک و پیشبینی است بنابراین درک مکانیسم های بیماری یک چالش مهم است. زیست‌شناسی مصنوعی، در ترکیب با روش‌های کلاسیک، اخیرا به عنوان یک روش جایگزین ظهور کرده است. عمدتا نانو ذرات (NPs)[1] از خواص نوری و حرارتی خود برای تصویر برداری و تشخیص انواع مختلف بیماری‌ها و درمان استفاده می‌کنند. این وضعیت با استفاده از هدف‌گیری مولکول‌های فعال اختصاصی سلول (پپتیدها، آنتی‌بادی ها) متصل به (NPs) و جفت شدن به گیرنده های همزاد در غشای سلول‌های هدف خاص (بیمار) موجب بهبود بیماری می‌شود[۱]. نانوتکنولوژی در زمینه مواد غذایی و کشاورزی برای افزایش کیفیت کلی غذا از جمله طعم، شناسایی عوامل بیماری‌زا و سموم در محصولات غذایی و جهت تقویت خواص استفاده می‌شود. با این حال، نانوذرات ممکن است خطر سمیت بالقوه ای برای سلامت انسان داشته باشند. بنابراین، ایجاد یک سیستم نظارتی برای مدیریت خطرات بالقوه مرتبط با کاربردهای فناوری نانو توصیه می‌شود[۲].

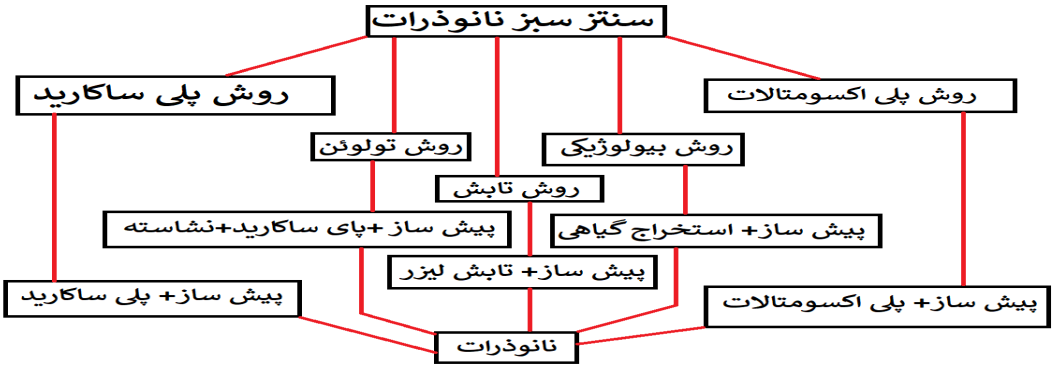
در کنار این‌ها نانومواد را می‌توان به چهار گروه دسته‌بندی کرد،: (۱) نانومواد بر پایه معدنی. (۲) نانومواد مبتنی بر کربن. (۳) نانومواد مبتنی بر آلی و (٤) نانومواد مبتنی بر کامپوزیت. به طورکلی، نانومواد مبتنی بر مواد معدنی شامل نانومواد مختلف فلزی و اکسید فلزی است[۳] . دانشمندان تلاش‌های قابل توجهی در جهت سنتز نانوذرات با روش های مختلف از جمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی انجام داده‌اند. این روش‌ها به دلیل دشواری مقیاس‌پذیری فرآیند، جداسازی و خالص‌سازی نانوذرات و مصرف مقدار زیادی سورفکتانت، معایب زیادی دارند. روش‌های سبز برای سنتز نانوذرات با عصاره‌های گیاهی سودمند هستند، زیرا ساده، راحت، سازگار با محیط زیست هستند و به زمان واکنش کمتری نیاز دارند و می‌توانند پتانسیل کشاورزی را برای بهبود فرآیند کوددهی، تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه و آفت‌کش‌ها افزایش دهند. علاوه براین، میزان مواد شیمیایی مضری که محیط زیست را آلوده می‌کند به حداقل می رساند[٤].

۲. انواع روشهای سنتز نانوذرات

محققان تلاش‌های قابل توجهی در جهت سنتز نانوذرات با روش های مختلف از جمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی انجام دادند[۵]. روش‌های سبز برای سنتز نانوذرات با عصاره‌های گیاهی سودمند هستند زیرا ساده، راحت، سازگار با محیط زیست هستند و به زمان واکنش کمتری نیاز دارند. نانومواد تهیه شده با روش‌های دوستدار محیط زیست و سبز ممکن است پتانسیل کشاورزی را برای بهبود فرآیند کود دهی، رشد گیاهان و آفت‌کش‌ها افزایش دهد. علاوه بر این، این فناوری میزان مواد شیمیایی مضر را که محیط زیست را آلوده می‌کند به حداقل می‌رساند[٤،٦]. انواع دسته‌بندی روش‌های تولید نانو ذرات به روش سبز در شکل ۱ آورده شده است. نانومواد‌ی مانند اکسیدمس (CuONPs)، اکسیدروی (ZnONPs)، هیدروکسیدمنیزیم (MgOHNPs) و اکسید منیزیم (MgONPs) با روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی سنتز می‌شوند. نانوذرات اکسید مس (CuONPs) از طریق روش‌های مختلف مانند رسوب و کاهش شیمیایی سنتز می‌شوند[۸]. کاربردهای نانو بیومواد بسیاری از محققین را بر آن داشت تا راه‌های مختلفی را برای سنتز ZnONP ها مانند مسیر شیمیایی ، روش رسوب [۲۸]، هیدرولیز کردن در حلال‌های آلی قطبی و سنتز مایکروویو

[1] Nanoparticles

توسعه دهند. روش‌های مختلفی برای سنتز MgOHNPs و MgONPs مانند مسیر هیدروترمال، میکروامولسیون آب در روغن و واکنش مایکروویو گزارش شده است[۹،۱۰]. MgOH با روش‌های سبز و با استفاده از روش‌های غیرسمی و سازگار با محیط زیست مانند عصاره برگ چریش، عصاره برگ لیمو مرکبات، صمغ اقاقیا، براسیکا اولراسه و پوسته سنتز شد [۱۱]. در ادامه برخی از روش‌های تولید بیو نانو مواد به اختصار آورده شده است.



شکل ۱ – روش‌های مختلف مورد استفاده برای سنتز نانوذرات[۷]

۲ .۱. روش تولوئن

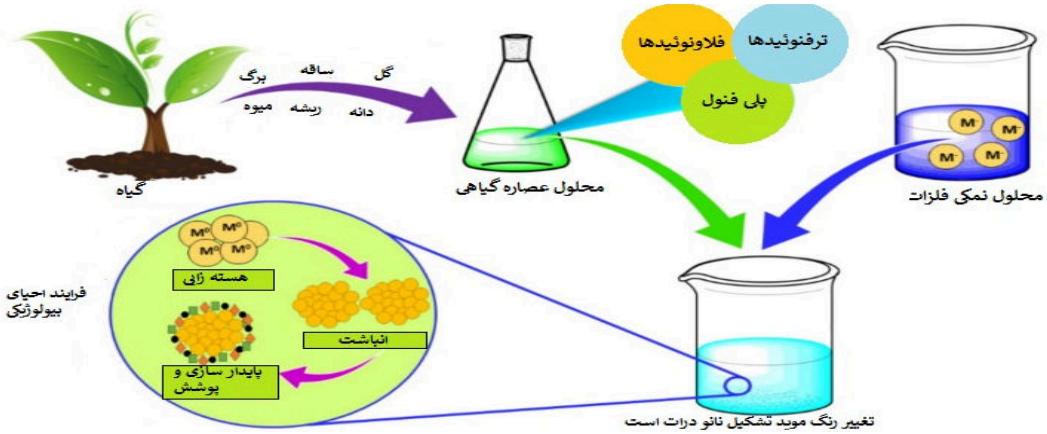
در روش سنتز تولوئن[۲] نانو ذرات با اندازه کنترل شده طی یک فرآیند تک مرحله‌ای تولید می‌شود. در روش اصلاح شده تولن، یون‌های فلزی توسط ساکاریدها در حضور آمونیاک احیا می‌شوند و لایه‌هایNP با اندازه ذرات ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر، هیدروسل های فلزی با ذرات ۲۰ تا ۵۰ نانومتر و نانو ذرات فلزی با اشکال مختلف تولید می‌شوند[۱۲].

۲ .۲. روش تابش

نانوذرات فلزی را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف تابش با موفقیت سنتز کرد. برای مثال، با تابش لیزر به محلول آبی نمک فلز و سورفکتانت می‌توان نانوذرات فلزی با توزیع شکل و اندازه مناسب، بدست آورد. در این روش به هیچ عامل کاهنده نیاز نیست[۱۳].

۲ .۳. روش بیولوژیکی

عصاره‌های موجودات زیستی ممکن است هم به عنوان عامل کاهنده و هم به‌عنوان عوامل پوشاننده در سنتز نانوذرات نقره عمل کنند. کاهش یون‌های فلزی با ترکیبی از مولکول‌های زیستی موجود در این عصاره ها مانند آنزیم‌ها / پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه، پلی‌ساکاریدها و ویتامین‌ها از نظر محیطی خوش خیم و در عین حال از نظر شیمیایی پیچیده است. حجم گسترده‌ای از نانوذرات فلزی با استفاده ازترکیبات آلی زیست تولید می‌شوند (شکل ۲) [۱۴].



شکل ۲– تصویر شماتیک استفاده از عصاره گیاهان در تولید نانو ذرات[۱۵]

[1] Punica granatum

[2] Tollens

٢ .٤. روش پلی اکسومتالات‌ها[1]

پلی اکسومتالات‌ها پتانسیل سنتز نانوذرات فلزی را دارند. زیرا آنها در آب محلول هستند و توانایی انجام واکنش‌های ردوکس چند الکترونی را بدون ایجاد اختلال در ساختار خود دارند[١٤].

٢ .٥. روش پلی ساکارید

در روش پلی ساکارید، نانو ذرات NPs توسط آب و پلی ساکارید ها به عنوان عامل پوشاننده سنتز می‌شوند. به عنوان مثال، سنتز نانوذرات نشاسته که نشاسته به عنوان یک عامل پوشش و D-β گلوکز به عنوان یک عامل کاهنده، در یک سیستم به آرامی گرم شده انجام می‌شود. چنین نانوذراتی را می‌توان به راحتی در سیستم‌هایی برای کاربردهای بیولوژیکی و دارویی ادغام کرد[١٦]

با معرفی نانوذرات بیوپلیمری، پروتئین‌ها و بیوپلیمرهای غذایی که مبتنی بر پلی‌ساکارید هستند می‌توانند به چهار روش مختلف از جمله امولسیون‌سازی، محلول‌زدایی[2]، کواسرواسیون[3] و خشک‌کردن با الکترواسپری تولید شوند.

روش کواسرواسیون مشابه روش حل زدایی است که مبتنی بر حل شدن جزئی است و با مخلوط کردن فاز مایع یک محلول پلیمری همگن با یک حلال آلی مانند استون برای به دست آوردن یک پلیمر غنی (کوآسروات) انجام می‌شود [١٧] رایج‌ترین کاربرد این نوع نانومواد برای کپسوله کردن و تحویل ریزمغذی‌ها است (به عنوان مثال، ویتامین‌ها، آهن، پروتئین‌ها و نانوذرات زیست تخریب‌پذیر تهیه شده از پلیمرهای مصنوعی مانند پلی لاکتیک اسید و پلی (لاکتیک-کو-گلیکولیک) (PLGA) و پلیمرهای طبیعی مانند آگارز، کیتوزان، کلاژن و فیبرین). نوع دیگری از مواد نانو، نانوامولسیون‌ها هستند که از مخلوط کردن دو یا چند مایع که به راحتی با هم ترکیب نمی‌شوند مانند روغن و آب در سیستم‌های غذایی برای تحویل مواد فعال آبگریز مانند مواد مغذی، رنگ‌ها و طعم‌دهنده‌ها و مواد ضدمیکروبی استفاده می‌شود. علاوه بر این، نانوامولسیون را می‌توان برای تولید پوشش‌های زیست تخریب‌پذیر و فیلم‌های بسته‌بندی به منظور بهبود کیفیت و ارزش غذایی و افزایش ماندگاری محصولات غذایی استفاده کرد[١٨]. نانو رس نوع دیگری از نانوذرات است که از سیلیکات‌های معدنی لایه‌ای با واحدهای ساختاری لایه‌ای تشکیل شده‌است که می‌توان از طریق انباشته کردن این لایه‌ها، بلورهای رس پیچیده را تشکیل داد. نانورس‌ها به طور گسترده در دسترس، ارزان و سازگار با محیط زیست هستند. بنابراین، کاربردهای آنها در بسیاری از زمینه‌ها مورد مطالعه و گسترش قرار گرفته است[١٩]. به عنوان مثال، در بخش مواد غذایی، نانورس به‌طور منظم در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود، زیرا دارای ساختار نانولایه طبیعی است که به عنوان مانعی در برابر گاز و رطوبت عمل می‌کند علاوه بر این برخی از پلیمرها مانند پلی‌استایرن، پلی‌آمیدها، پلی‌اولفین‌ها، پلی-اورتان، نایلون‌ها و رزین‌های اپوکسی با نانورس ترکیب می شوند تا کامپوزیت‌های نانورس-پلیمر ایجاد کنند که در بسته‌بندی مواد غذایی برای پنیرها، قنادی‌ها، گوشت‌های فرآوری شده، غلات و همچنین برای پوشش اکستروژن آب میوه‌ها و محصولات لبنی مایع به کار می‌روند [٢].

در نهایت، نانولوله‌ها و نانوالیاف دو کاربرد فناوری نانو هستند که در صنایع غذایی کاربرد دارند. نانولوله‌ها از چندین پروتئین مانند آلفا لاکتالبومین[4] ، یک پروتئین کروی از شیر تشکیل شده‌اند و پتانسیل استفاده در فرآیندهای بی‌حرکتی آنزیم را دارند. علاوه بر این، نانولوله‌ها به دلیل توانایی آنها در تحمل شرایط پاستوریزاسیون ٧٢ درجه سانتیگراد به مدت ٤٠ ثانیه می‌توانند به‌عنوان عوامل کپسوله کننده استفاده شوند[٢٠]. نانوالیاف نانو موادی هستند که قطر آنها بین ١٠ تا ١٠٠٠ نانومتر است. نانوالیاف با فناوری الکتروریسی شبیه‌سازی می‌شوند، که در آن یک محلول از یک اسپینر با دهانه مویین کوچک عبور داده می‌شود، پس از آن یک میدان الکتریکی قوی برای تولید نانوالیاف پلیمری نازک و جامد اعمال می‌شود[٢١]. کاربرد نانوالیاف در بسته‌بندی موادغذایی و غذاهای مصنوعی مناسب‌تر است و همچنین

[1] Method of polyoxometalates
[2] De -solubilization
[3] Coacervation
[4] A-Lactalbumin

می‌تواند به عنوان بستری برای کشت باکتری‌ها استفاده شود. با رشد کاربردهای نانوتکنولوژی در بخش مواد غذایی، کاربرد سایر نانو مواد احتمالاً در صنایع غذایی به گسترش خود ادامه خواهد داد[۲].

۳. کشاورزی و محیط‌زیست

کشاورزی بزرگترین رابط بین انسان و محیط‌زیست است و عامل اصلی تغییرات آب و هوایی و تخریب اکوسیستم است. در این میان، استفاده از کود منجر به تغییرات اساسی در استخرها و سدهای آب می‌شود. در نتیجه، تولید محصول و امنیت غذایی جهانی به شدت به ورودی کود به زمین‌های کشاورزی وابسته است. استفاده از آفت‌کش‌ها پیامدهای چشمگیری هم در کشورهای توسعه یافته و هم در کشورهای در حال توسعه دارد[۲۲]. در کشاورزی پایدار هدف حفظ بلند مدت منابع طبیعی و بهره‌وری کشاورزی با حداقل تأثیر نامطلوب بر محیط زیست است[۲۳]. آفت‌کش های حاوی مواد شیمیایی ممکن است استرس اکسیداتیو[1] ایجاد کنند که منجربه تولید رادیکال‌های آزاد و تغییر در آنتی اکسیدان‌ها یا آنزیم‌های مهارکننده رادیکال آزاد اکسیژن[2] (OFR) می‌شود[۲٤]. علاوه بر این آفت‌کش‌های مصنوعی که برای محافظت از گیاهان و کنترل آفات استفاده می‌شوند، معمولاً در نهایت باعث ایجاد مقاومت در این آفات می‌شوند[۲۵].

امروزه نانوتکنولوژی توانسته عوامل کشاورزی شیمیایی جدید و مکانیزم‌های انتقال جدیدی را برای بهبود بهره‌وری محصول فراهم کند و منجربه کاهش کاربرد آفت‌کش‌ها و افزایش تولیدات کشاورزی شود. از جمله کاربردهای نانو در کشاورزی عبارتنداز: (۱) فرمولاسیون نانو مواد شیمیایی کشاورزی برای استفاده از آفت‌کش‌ها و کودها در جهت بهبود محصول، (۲) استفاده از نانوحسگرها در حفاظت از محصولات برای شناسایی بیماری‌ها و بقایای مواد شیمیایی کشاورزی، (۳) نانو دستگاه‌ها برای مهندسی ژنتیک گیاهان؛ (٤) تشخیص بیماری‌های گیاهی؛ (۵) بهداشت حیوانات، پرورش حیوانات، تولید طیور و (٦) مدیریت پس از برداشت محصولات کشاورزی. در سال‌های اخیر، ضایعات کشاورزی نیز به‌عنوان منبعی از مواد خام تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند[٤].

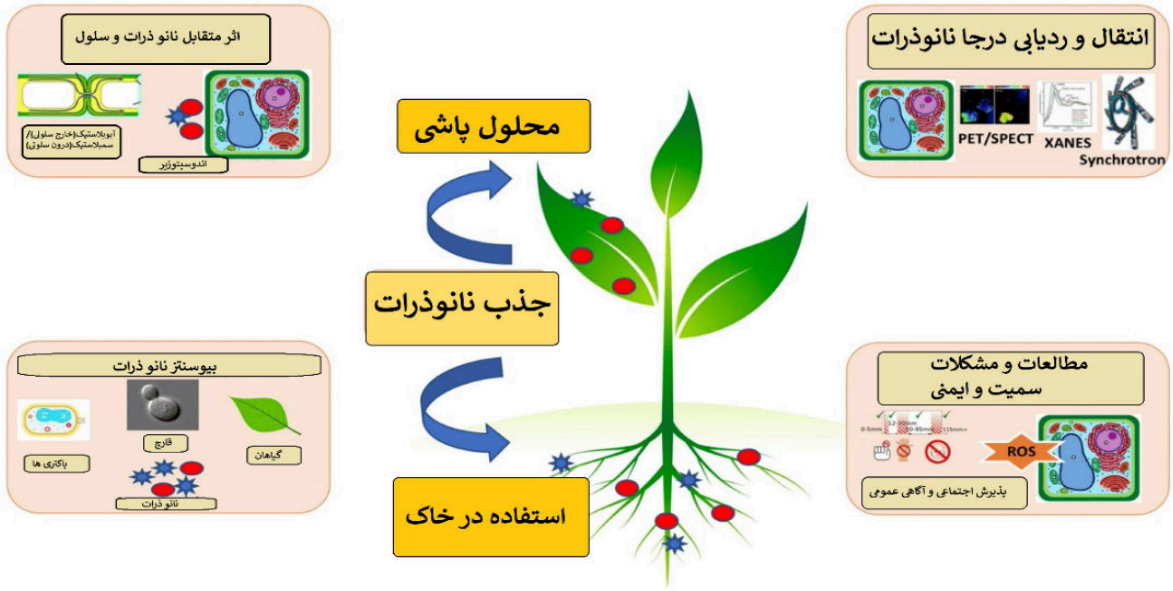
۳. ۱. نانوتکنولوژی در تولید سموم دفع آفات و آفت-کش‌ها

در حال حاضر، جدا از آفت‌کش‌های مصنوعی موجود در بازار، آفت‌کش‌های زیستی جایگاه منحصر به فردی را در کنترل بیماری‌های هدف آفات و منشاء حشرات به خود اختصاص داده‌اند. یک فناوری نوآورانه در زمینه آفت‌کش-های زیستی، استفاده از نانو مواد مهندسی شده یا نانو تکنولوژی زیستی است از انواع افت‌کش‌ها می‌توان به آزادیراکتین نانو امولسیون شده[۲٦][3]، نانوبلورهایBt [۲۷][4] و نانوذرات کیتوزان[۲۸][5] اشاره کرد [۲۹،۳۰]. استفاده از نانو کودها و نانو آفت‌کش‌ها مستلزم ٤ مرحله مطالعه مشکلات گیاه، سنتز نانو ماده، انتقال و دریابی درجا نانو ذرات و اثر متقابل نانو ذرات و سلول است که در شکل ۳ نشان داده شده است.

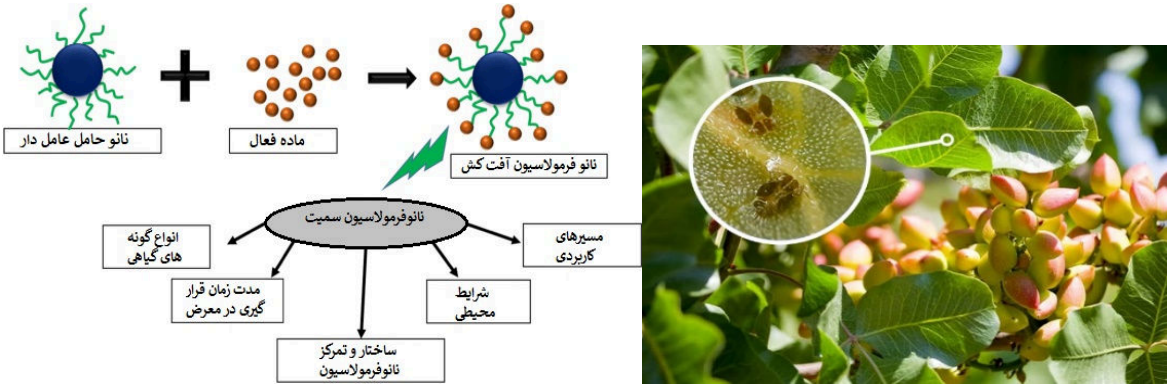
نانو آفت‌کش‌ها به دلیل خواصی مانند حلالیت، ویژگی نفوذ پذیری و پایداری افزایش یافته، نقش کلیدی در کنترل آفات و پاتوژن‌های[6] حشرات و میزبان دارد. بنابراین، سنتز سیستم های انتقال آفت‌کش های غیرسمی و سازگار با محیط زیست برای افزایش تولیدات کشاورزی الزامی است. نانو ذرات فلزی به دلیل برهم‌کنش الکترواستاتیکی نانو ذرات با غشای سلولی باکتری و تجمع آنها در سیتوپلاسم، فعالیت های ضدایجاد بیماری[7]، ضد باکتریایی و ضد قارچی خوبی از خود نشان می‌دهند. میکرو ارگانیسم ها نقش مهمی در حفظ سلامت خاک، اکوسیستم و بهره وری محصول در کشاورزی از خود نشان می‌دهند، بنابر این شناخت جنبه های اکوتوکسیکولوژیک[8] نانوذرات در نظر گرفته شده در زمینه

[1] Oxidative stress
[2] Oxygen free radical
[3] Nanoemulsified Azadirachtin
[4] Bacillus thuringiensis (Bt)
[5] Chitosan Nanoparticles
[6] Pathogen
[7] Antipathogenic activities
[8] Ecotoxicological

کشاورزی بسیار ضروری است در شکل ٤ عوامل موثر بر نانو فرمولاسین سمیت آفت‌کش‌ها و اجزای نانو آفت‌کش‌ها آورده شده است [۳۵-۳۲].



شکل۳- مراحل مختلف استفاده از نانو مواد در گیاهان و عوامل موثر در سنتز نانوماده مورد نیاز گیاه[۳۱]



شکل ٤- تصویر طبیعی آفت زدن گیاهان و شماتیک نانو فرمولاسیون آفت‌کش‌ها [٣٦]

۳.۲. نانو کودها

کودها نیز در رشد گیاهان مورد نیاز هستند و به عنوان موادی عمل می‌کنند که ممکن است خواصی مانند بهبود کیفیت محصول و سمیت کمتری برای محیط زیست داشته باشند یکی از دلایل شیمیایی کلیدی برای سمیت کمتر نانوکودها، توانایی آنها در عدم حذف یا کاهش شستشوی مواد مغذی است. نانوکودها می توانند مواد مغذی را در نانومواد محصور کنند و از انتشار فوری آنها در محیط جلوگیری کنند. این مکانیسم آزادسازی کنترل شده تضمین می‌کند که مواد مغذی به تدریج در گیاهان رها می‌شوند و رواناب اضافی و آلودگی محیطی را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، نانوکودها می‌توانند کارایی جذب مواد مغذی توسط گیاهان را افزایش داده و مقدار مواد مغذی استفاده نشده را که ممکن است به اکوسیستم‌های اطراف نفوذ کنند، کاهش دهند [٤]. در چندسال گذشته نانو کود ها به صورت محدود در دسترس بازار بوده‌اند، اما به طور گسترده سنتز نشده‌اند. نانو کودها عمدتا حاوی روی، سیلیس، آهن و دی اکسید تیتانیوم، نانو میله‌های طلا و غیره هستند. مطالعات بر روی جذب و سمیت چندین نانو ذرات اکسید فلزی به طور منظم برای بهبود تولید محصولات کشاورزی انجام شده است. نانولوله-های کربنی، نانوذرات نقره، اکسید روی و غیره می‌توانند با استفاده بهینه از مواد مغذی گیاهان در بهبود رشد آنها بسیار

مفید باشند[۳۹-۳۷]. با این حال، موفقیت این مواد به عوامل زیادی مانند حساسیت گونه‌های گیاهی، غلظت، ترکیب، اندازه و خواص شیمیایی نانو مواد بستگی دارد. همچنین، جذب نانو ذرات و مطالعات درون سلولی، می‌تواند توسط طیف سنجی تصویر برداری شیمیایی رامان، میکروسکوپ الکترونی عبوری، میکروسکوپ اسکن لیزری و محاسبه پتانسیل زتا تأیید شود. در قرن حاضر، کشاورزی هوشمند راهی برای دست یابی به اهمیت بهبود حفظ بلند مدت محیط زیست است و به عنوان پیوندی با سایر اکوسیستم‌ها عمل می‌کند. بنابراین، استفاده از ذرات در مقیاس نانو مزایای فراوانی نسبت به روش‌های مرسوم دارد[۴۲-۴۰] .

پیشرفت‌های اخیر در کشاورزی کاربردهای NPs برای استفاده مؤثرتر و ایمن‌تر گیاهان را پوشش می‌دهد. اثرات نانوذرات مختلف بر رشد و سمیت گیاهی بررسی شده‌است از جمله نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) در رشد گیاهان[۴۳]، آلومینا، روی و اکسید روی بر روی جوانه‌زنی بذر و رشد ریشه پنج گونه گیاهی، نانوذرات نقره، CuO، FeO، MnO، NiO و ZnO بر رشد و عملکرد نهال گندم[۴۴]، نانوذرات گوگرد روی گوجه فرنگی، گزارش شده‌است. در بررسی مفصل‌تر روی به عنوان یک ریزمغذی ضروری برای فعالیت‌های متابولیکی در گیاهان در نظر گرفته شده است، اگرچه به مقدار کمی در گیاهان مورد نیاز است اما نقش مهمی در مدیریت گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت از سلول‌های گیاهی در برابر تنش‌های اکسیداتیو دارد. اکسید-منیزیم (MgO) جز مواد معدنی مهمی است که کاربردهای زیادی مانند جاذب‌ها، بازدارنده‌های آتش، سرامیک‌های پیشرفته، پاکسازی زباله‌های سمی و مواد الکترونیکی عکاسی[1] دارد[٤].

پژمردگی فوزاریوم[2] یک بیماری مخرب گوجه فرنگی و کاهو است که با استفاده از مواد شیمیایی می‌توان این بیماری را تا حدودی کاهش داد[٤٥]. با این حال، وقوع و توسعه نژادهای بیماری‌زا جدید یک مشکل مداوم است و استفاده از مواد شیمیایی هزینه زیادی دارد و همیشه موثر نیست. در سال‌های اخیر استفاده از نانومواد به عنوان راه حلی جایگزین برای کنترل پاتوژن های گیاهی مورد توجه قرار گرفته است. پس از آزمایش‌های گلخانه‌ای، تجمع نانوذرات اکسید فلزی در میوه‌ها و برگ‌های فلفل شیرین سبز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هیچ یک از میوه های گیاه تجمع فلزی وجود ندارد. محلول پاشی با سنتز نانوذرات MgOH برای برگ‌های فلفل سبز نشان داد که محلول‌پاشی برگ‌ها با نانوذرات فلزی ppm ۱۰۰ تا ۸۰۰ برای رشد گیاه بسیار مفید است و می‌توان گیاهانی سالم با برگ‌های سبزتر و کیفیت میوه بالا در مقایسه با نمونه شاهد تولید کرد[٤].

۳.۳. فعالیت ضد میکروبی و ضد قارچی

چندین نانوماده به عنوان عوامل ضد میکروبی در بسته بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در میان آنها نانوذرات نقره بسیار مورد توجه هستند. برخی دیگر از نانوذرات مورد استفاده عبارتند از: دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO)، اکسید سیلیکون (SiO_2)، اکسید منیزیم (MgO)، طلا و نقره که همه آنها ویژگی ها و عملکردهای خاصی دارند. نانو نقره یک ماده ضدعفونی کننده است که توسط ناسا و ایستگاه فضایی روسیه برای تصفیه آب استفاده می‌شد. نانو ذرات نقره پوشش داده شده با سلولز استات فتالات نیز نتایج مشابهی ارائه کردند. نانو طلا دارای پایداری دمایی بالا و فراریت کم و اثرات ضد قارچی و ضد میکروبی خوبی در برابر ۱۵۰ نوع باکتری مختلف است. برخی از نانوذرات فعالیت ضد قارچی خوبی از خود نشان داده‌اند. این قارچ ها عبارتند از کاندیدا آلبیکنس، آسپرژیلوس نایجر و مخمر[٤٦][3]. AgNP ها همچنین در برابر استافیلوکوکوس اورئوس[4] مقاوم به متی سیلین[5] موثر هستند. سایر نانوذرات به جز نقره مانند اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسیدروی نیز دارای ویژگی های ضد میکروبی هستند. که فعالیت ضد میکروبی آن در نور UV آشکار بوده‌است و به عنوان مواد بسته‌بندی استفاده می‌شوند[٤].

[1] Photo electronic materials
[2] Fusarium wilt
[3] Candida albicans, Aspergillus niger and yeast
[4] Staphylococcus aureus
[5] Methicillin

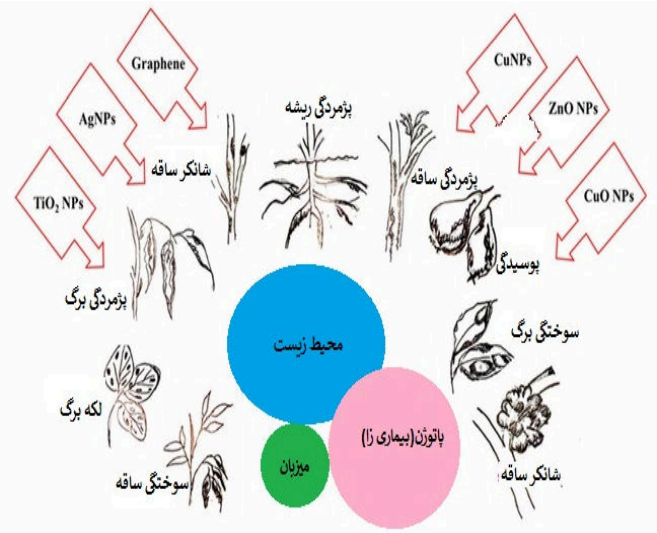
طبق گزارشات سایر نانوذرات (Fe، Cu، Si، Al، Zn، ZnO، TiO_2، CeO_2، Al_2O_3 و نانولوله های کربنی) جدا از خواص ضد میکروبی، برخی اثرات نامطلوب بر رشد گیاه دارند و بر رشد باکتری‌های مفید خاک نیز تأثیر می‌گذارند[۴۷،۴۸]. گروه‌های تحقیقاتی مختلف علاقه خود را بر مطالعه و استفاده از آفت‌کش‌های سازگار با محیط زیست متمرکز کردند. مشابه آفت‌کش‌های شیمیایی، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌های مبتنی بر نانوذرات برای استفاده از عوامل ضد میکروبی برای محافظت از محصولات در برابر بیماری‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. خواص ضد قارچی نانوذرات می‌تواند به فرمولاسیون آفت‌کش های مبتنی بر نانوذرات کمک کند. در میان عوامل مختلف ضد میکروبی مبتنی بر نانوذرات معدنی، نقره به دلیل مزایای متعددی که نسبت به سایر نانوذرات مانند مس، روی، طلا، ZnO، Al_2O_3 و TiO_2 دارد، به طور گسترده توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است[٤].

۴. ۳. کاربرد نانو ذرات در کنترل بیماری های گیاهی

امروزه کاربرد کودهای کشاورزی، آفت‌کش‌ها، آنتی‌بیوتیک-ها و مواد مغذی معمولاً با استفاده از اسپری یا خیس کردن در خاک یا گیاهان، یا از طریق سیستم‌های خوراکی و تزریق به حیوانات انجام می‌شود. آفت‌کش‌ها و داروها معمولا به عنوان درمان «پیشگیرانه» ارائه می‌شود، یا زمانی که عامل بیماری تکثیر شده و علائم در گیاه آشکار شد، استفاده می‌شوند[٤٩]. در این زمینه، فناوری نانو فرصتی عالی برای توسعه محصولات جدید دربرابر آفات ارائه می‌دهد و با افزایش اثر بخشی و ایمنی بیشتر و هزینه‌های مراقبت‌های بهداشتی را کاهش می‌دهد[۵۰،۵۱]. امروزه یک سری دستگاه‌هایی در مقیاس نانو ساخته شده‌اند که مدت ها قبل از آشکار شدن علائم در مقیاس کلان، قابلیت تشخیص و درمان عفونت، بیماری، آفت، قارچ، کمبود مواد مغذی یا سایر مشکلات سلامتی گیاهان را دارند(شکل۵) [٤٩].

شکل ۵- نمونه‌ای از بیماری‌های گیاهی (نقش نانو ذرات در بیماری گیاهان)

ویروس‌های گیاهی به ویژه ویروس‌های کروی به عنوان نانومواد طبیعی در نظر گرفته می‌شود و کوچکترین ویروس های گیاهی شناخته شده تا به امروز، ویروس نکروز تنباکو ماهواره‌ای[1] با قطر تنها ۱۸ نانومتر است[۵۲]. ویروس‌های گیاهی از RNA/DNA تک یا دو رشته‌ای به عنوان ژنوم ساخته شده‌اند که توسط یک پوشش پروتئینی محصور شده است. توانایی آنها برای آلوده کردن، رساندن ژنوم اسید نوکلئیک به یک مکان خاص در سلول میزبان، تکثیر، بسته بندی اسید نوکلئیک و خروج دقیق از سلول میزبان، استفاده از آنها در فناوری نانو را ضروری کرده است[٤]. در شکل ٦ بیماری بخش‌های مختلف گیاهان و نانو ذرات موثر آورده شده‌است.



شکل ٦- شماتیک مثلث بیماری، علائم رایج بیماری در گیاهان و نمونه‌هایی از نانومواد ضد میکروبی جهت کنترل بیماری[۵۳]

۳. ۵. فناوری نانو در صنایع غذایی

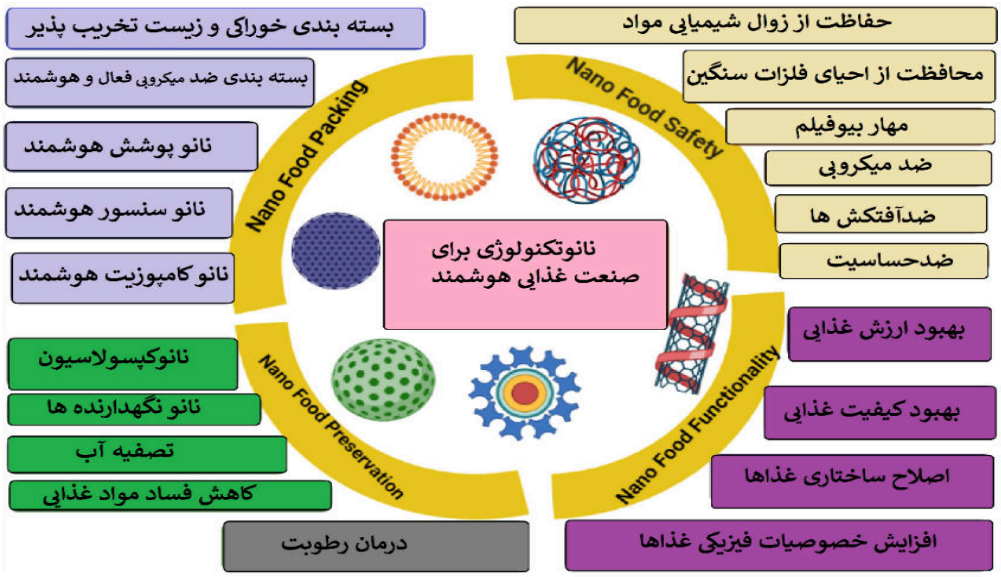
نانوتکنولوژی زیستی به دلیل توانایی ضد بیماری زایی و افزایش خواص نانو ذرات، توانایی تامین و بهبود ترکیبات

[1] Satellite tobacco necrosis virus

زیست فعال در مواد غذایی را دارد. مواد زیستی در مقیاس نانو می‌توانند در تشخیص پاتوژن شرکت کنند و همچنین علاوه بر سیستم های تصفیه می‌توانند در انواع افزودنی های نانو، بسته‌بندی هوشمند، کنترل و تحویل مواد غذایی، نانو پلاستیک کدگذاری، مواد کاغذی و نانو ویتامین‌های کپسوله شده در جهت ورود به جریان خون و تحویل به ماده هدف به کار روند [۵۶-۵۴].

کاربرد فناوری نانو می‌تواند بسته‌بندی مواد غذایی را بهبود بخشد همچنین مواد غذایی ایمن‌تر، سالم‌تر و باکیفیت‌تر را با افزایش ماندگاری بدون تأثیر بر ویژگی‌های حسی و فیزیکی محصولات غذایی فراهم کند. به عنوان مثال، نانوکپسوله سازی به‌عنوان نانو افزودنی‌های غذایی یا مکمل‌های غذایی برای بهبود طعم غذا، نانوذرات به عنوان عوامل ژل کننده و ویسکوزیزه کننده، نانوامولسیون‌ها برای بهبود پراکندگی مواد مغذی استفاده می‌شوند[۲]. برخی از غذاها و نوشیدنی‌ها با نانو ذرات بدون تأثیر بر طعم یا ظاهر، استفاده می‌شوند. امولسیون های نانو ذرات در بستنی استفاده می‌شود و پخش این نانو امولسیون می‌تواند بافت و یک نواختی بستنی را بهبود بخشد. نانوذرات در حوزه نانوحسگرهای زیستی نیز کاربرد دارد که سطح بزرگی برای اتصال آنزیم‌ها و اندازه کوچک‌تر در مقایسه با ذرات حجیم فراهم می‌کنند و کارایی آنزیم‌های تثبیت‌شده را بهبود می‌بخشد. نانوحسگرها یکی دیگر از کاربردهای بخش غذا هستند. نانوحسگرها مقادیر فیزیکی را به سیگنال تبدیل می کنند که به راحتی قابل شناسایی و تجزیه و تحلیل هستند . این رویکرد برای شناسایی عوامل بیماری‌زای مواد غذایی، فساد مواد غذایی، سموم، ویتامین‌ها، آفت‌کش‌ها، هر گونه طعم یا بوی ناخواسته و همچنین برای نظارت بر شاخص‌های زمان-دما و اکسیژن استفاده می‌شود[۲] .

به عنوان مثال زمانی که اکسیداسیون در مواد غذایی اتفاق می‌افتد، نانوحسگر ها تغییر رنگ را نشان می‌دهند و از آلودگی مواد غذایی مانند شیر و گوشت خبر می‌دهند. به طور دقیق، نانو ذرات دارای خواص ضد بیماری زایی و ضد میکروبی طیف وسیعی در برابر عوامل بیماری‌زایی مختلف عوامل بیماری زایی غذایی هستند [۵۷،۵۸].



شکل ۷- کاربرد فناوری نانو در حوزه‌های مختلف صنایع غذایی[۵۹].

٤. نتیجه‌گیری

مواد در مقیاس نانو می‌توانند به شکل پودر یا مایع باشند که خواص فیزیکی و شیمیایی قابل توجه متفاوتی در مقایسه با همان مواد با اندازه میکرو که دارای ترکیب شیمیایی یکسانی هستند، نشان می‌دهند. نانومواد بر اساس اندازه ذرات، ساختار و ویژگی‌هایشان به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند . بر این اساس، طبقه‌بندی‌های نانومواد شامل نانوذرات، نانوکپسول‌ها، نانورس‌ها، نانوامولسیون‌ها، نانولوله‌ها،

نانوالیاف و نانوولامینت‌ها می‌شود هر یک از این نانومواد کاربردهای بالقوه‌ای در صنایع غذایی دارند و می‌توانند به روش‌های مختلف ساخته شوند نانوتکنولوژی زیستی یک حوزه نو ظهور است که چشم‌انداز بسیار زیادی برای تأثیر گذاری بر کشاورزی و صنایع غذایی دارد. بنابراین، آگاهی از فناوری نانو زیستی هوشمند در کشاورزی ضروری است. هدف از کاربرد نانومواد در کشاورزی کاهش سمپاشی و حفاظت از محصولات گیاهی و افزایش عملکرد گیاه است. فناوری نانو به طور گسترده در بسته بندی مواد غذایی به عنوان یک ضد میکروب و برای تولید بسته بندی هوشمند استفاده می‌شود و با قابلیت کنترل یا تأخیر در تحویل و جذب مؤثرتر مواد و سازگاری با محیط‌زیست، به علوم کشاورزی کمک می‌کند علی رغم اطلاعات زیادی که در مورد مواد نانویی در دسترس است، اما سطح سمیت بسیاری از نانوذرات هنوز نامحسوس است بنابراین کاربرد این نانو مواد برای ارزیابی ریسک و اثرات آن برسلامت انسان محدود است.

داده‌های علمی اخیر نشان داده‌است که فناوری نانو دارای پتانسیل تأثیرگذاری مثبت بر بخش کشاورزی با به حداقل رساندن مشکلات نامطلوب شیوه‌های کشاورزی بر محیط زیست و سلامت انسان، بهبود امنیت غذایی و بهره‌وری (براساس افزایش پیش‌بینی‌شده جمعیت جهانی) و در عین حال ترویج اجتماعی است.

مرجع‌ها

[1] E. Y. Lukianova-Hleb *et al.*, Rainbow plasmonic nanobubbles: synergistic activation of gold nanoparticle clusters, *J. nanomedicine \& Nanotechnol.*, **2**(104)(2011)1.

[2] Z. H. Mohammad, F. Ahmad, S. A. Ibrahim, and S. Zaidi, Application of nanotechnology in different aspects of the food industry, *Discov. Food*, **2** (1)(2022)12.

[3] W. L. F. Armarego, Chapter 5 - Nanomaterials, in *Purification of Laboratory Chemicals (Ninth Edition)*, Ninth Edit., W. L. F. Armarego, Ed. Butterworth-Heinemann, (**2022**)586–630.

[4] H. Chhipa, Applications of nanotechnology in agriculture, in *Methods in microbiology*, 46, Elsevier, (**2019**)115–142.

[5] A. V. A. Mariadoss *et al.*, Green synthesis, characterization and antibacterial activity of silver nanoparticles by Malus domestica and its cytotoxic effect on (MCF-7) cell line, *Microb. Pathog.*, **135**(2019)103609.

[6] F. M. P. Tonelli and F. C. P. Tonelli, Chapter 10 - Biocompatibility of green synthesized nanomaterials, in *Synthesis of Bionanomaterials for Biomedical Applications*, M. Ozturk, A. Roy, R. A. Bhat, F. Vardar-Sukan, and F. M. Policarpo Tonelli, Eds. Elsevier, (**2023**)209–223.

[7] C. O. Adetunji *et al.*, Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, *Handb. Nanomater. Nanocomposites Energy Environ. Appl.*)November, **2020**.

[8] A. Y. Ghidan, T. M. Al-Antary, and A. M. Awwad, Green synthesis of copper oxide nanoparticles using Punica granatum peels extract: Effect on green peach Aphid, *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, **6**(2016)95–98.

[9] D. An, Y. Li, X. Lian, Y. Zou, and G. Deng, Synthesis of porous ZnO structure for gas sensor and photocatalytic applications, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, **447**(2014)81–87, 2014.

[10] M. Ramesh, M. Anbuvannan, and G. Viruthagiri, Green synthesis of ZnO nanoparticles using Solanum nigrum leaf extract and their antibacterial activity, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **136**(2015)864–870, 201.

[11] C. R. Chinnamuthu and P. M. Boopathi, Nanotechnology and Agroecosystem, *Madras Agric. Journa*, **96** (June)(2009)17–31.

[12] A. G. Ingale and A. N. Chaudhari, Biogenic synthesis of nanoparticles and potential applications: an eco-friendly approach, *J Nanomed Nanotechol*, **4** (165)(2013)1–7.

[13] V. K. Sharma, R. A. Yngard, and Y. Lin, Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **145**(1–2)(2009)83–96.

[14] M. Amil Usmani *et al.*, Current trend in the application of nanoparticles for waste water treatment and purification: a review, *Curr. Org. Synth.*, **14** (2)(2017)206–226.

[15] C. Pandit *et al.*, Biological agents for synthesis of nanoparticles and their applications, *J. King Saud Univ. - Sci.*, **34** (3)(2022)101869.

[16] A. Ahmad, S. Senapati, M. I. Khan, R. Kumar, and M. Sastry, Extra-/intracellular biosynthesis of gold nanoparticles by an alkalotolerant fungus, Trichothecium sp., *J. Biomed. Nanotechnol.*, **1** (1)(2005)47–53.

[17] H. Yu, J.-Y. Park, C. W. Kwon, S.-C. Hong, K.-M. Park, and P.-S. Chang, An Overview of Nanotechnology in Food Science: Preparative Methods, Practical Applications, and Safety, *J. Chem.*, **2018**(2018)5427978.

[18] B. Pérez-López and A. Merkoçi, Nanomaterials based biosensors for food analysis applications, *Trends Food Sci. Technol.*, **22** (11))(2011)625–639.

[19] F. Guo, S. Aryana, Y. Han, and Y. Jiao, A Review of the Synthesis and Applications of Polymer–Nanoclay Composites, *Appl. Sci.*, **8** (9)(2018).

[20] C. Curuțiu, L. M. Dițu, A. M. Grumezescu, and A. M. Holban, Polyphenols of Honeybee Origin with Applications in Dental Medicine, *Antibiotics*, **9** (12)(2020).

[21] M. Ghorbanpour, P. Bhargava, A. Varma, and D. K. Choudhary, *Biogenic nano-particles and their use in agro-ecosystems*. **2020**.

[22] K. Touré *et al.*, Investigation of death cases by pesticides poisonning in a rural community, Bignona, Senegal, *Epidemiol*, **1** (105)(2011)1165–2161.

[23] D. M. Densilin, S. Srinivasan, P. Manju, and S. Sudha, Effect of individual and combined application of biofertilizers, inorganic fertilizer and vermicompost on the biochemical constituents of chilli (Ns-1701), *J Biofertil Biopestici*, **2** (106)(2011)2.

[24] N. S. El-Shenawy, B. El-Ahmary, and R. A. Al-Eisa, Mitigating effect of ginger against oxidative stress induced by atrazine herbicides in mice liver and kidney, *J Biofertil Biopestici*, **2** (2)(2011).

[25] S. Zamani, J. J. Sendi, and M. Ghadamyari, Effect of Artemisia Annua L, *Asterales Asteraceae) Essent. Oil Mortality, Dev. Reprod. Energy Reserv. Plodia Interpunctella*, (**2011**)2.

[26] Suryani AI, Daud ID, Dewi VS, Sari DE, Putri SE. Harnessing The Potential Of Nanobiopesticides With Plant Extracts: A Review. *InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing* **1272**(1)(2023) 012042.

[27] S. Manna, S. Roy, A. Dolai, A.R. Ravula, V. Perumal, and A. Das,. Current and future prospects of “all-organic” nanoinsecticides for agricultural insect pest management. *Frontiers in Nanotechnology*, **4** (2023)1082128.

[28] M.P. Pham, L.Q. Tran, C.Y. Le, V.T. Tran, N.H. Do, P.K. Le. Ultrasound-assisted ionic gelation of neem oil-encapsulated chitosan nanoparticles as a promising biopesticide. *Chemical Papers*. **78**(3)(2024)1825-32.

[29] S. S. Patil, U. U. Shedbalkar, A. Truskewycz, B. A. Chopade, and A. S. Ball, Nanoparticles for environmental clean-up: a review of potential risks and emerging solutions, *Environ. Technol. \& Innov.*, **5**(2016)10–21.

[30] M. Kah and T. Hofmann, Nanopesticide research: current trends and future priorities, *Environ. Int.*, **63**(2014)224–235.

[31] G. Chugh, K. H. M. Siddique, and Z. M. Solaiman, Nanobiotechnology for Agriculture: Smart Technology for Combating Nutrient Deficiencies with Nanotoxicity Challenges, *Sustainability*, **13** (4)(2021).

[32] L. R. Khot, S. Sankaran, J. M. Maja, R. Ehsani, and E. W. Schuster, Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review, *Crop Prot.*, **35**(2012) 64–70.

[33] A. Bhattacharyya, P. Duraisamy, M. Govindarajan, A. A. Buhroo, and R. Prasad, Nano-biofungicides: emerging trend in insect pest control, *Adv. Appl. through fungal nanobiotechnology*, (**2016**)307–319.

[34] M. N. A. Hasaneen and A. M. Omer, Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil, **2016**.

[35] J. S. Duhan, R. Kumar, N. Kumar, P. Kaur, K. Nehra, and S. Duhan, Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture, *Biotechnol. reports*, **15**(2017)11–23.

[36] S. Kumar, M. Nehra, N. Dilbaghi, G. Marrazza, A. A. Hassan, and K.-H. Kim, Nano-based smart pesticide formulations: Emerging opportunities for agriculture, *J. Control. Release*, **294**(2019)131–153.

[37] N. Dey, D. Bhagat, D. Cherukaraveedu, and S. Bhattacharya, Utilization of red-light-emitting CdTe nanoparticles for the trace-level detection of harmful herbicides in adulterated food and agricultural crops, *Chem. Asian J.*, **12**(1)(2017) 76–85.

[38] C. O. Dimkpa, Can nanotechnology deliver the promised benefits without negatively impacting soil microbial life, *J. Basic Microbiol.*, **54** (9)(2014)889–904.

[39] P. Singh, Y.-J. Kim, D. Zhang, and D.-C. Yang, Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms, *Trends Biotechnol.*, **34** (7)(2016)588–599.

[40] P. Marzbani, Y. M. Afrouzi, and A. Omidvar, The effect of nano-zinc oxide on particleboard decay resistance, *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, **17** (1)(2015)63–68.

[41] S. P. Rajendran and K. Sengodan, Synthesis and characterization of zinc oxide and iron oxide nanoparticles using Sesbania grandiflora leaf extract as reducing agent, *J. Nanosci.*, (**2017**)2017.

[42] Y. M. Afrouzi, P. Marzbani, and A. Omidvar, The effect of moisture content on the retention and distribution of nano-titanium dioxide in the wood, *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, **17** (2)(2015)385–390.

[43] K. Shankramma, S. Yallappa, M. B. Shivanna, and J. Manjanna, Fe 2 O 3 magnetic nanoparticles to enhance S. lycopersicum (tomato) plant growth and their biomineralization, *Appl. Nanosci.*, **6**(2016)983–990.

[44] D. Lin and B. Xing, Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth, *Environ. Pollut.*, **150** (2)(2007)243–250.

[45] A. I. Ahmed, D. R. Yadav, and Y. S. Lee, Applications of nickel nanoparticles for control of Fusarium wilt on lettuce and tomato, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol*, **5**(5)(2016)7378–7385.

[46] B. Kim, D. Kim, D. Cho, and S. Cho, Bactericidal effect of TiO2 photocatalyst on selected food-borne pathogenic bacteria, *Chemosphere*, **52** (1)(2003)277–281.

[47] H. R. Madan *et al.*, Facile green fabrication of nanostructure ZnO plates, bullets, flower, prismatic tip, closed pine cone: their antibacterial, antioxidant, photoluminescent and photocatalytic properties, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **152**(2016)404–416.

[48] P. Gajjar, B. Pettee, D. W. Britt, W. Huang, W. P. Johnson, and A. J. Anderson, Antimicrobial activities of commercial nanoparticles against an environmental soil microbe, Pseudomonas putida KT2440, *J. Biol. Eng.*, **3**(2009)1–13.

[49] N. Begum, B. Sharma, and R. S. Pandey, Evaluation of insecticidal efficacy of Calotropis procera and Annona squamosa ethanol extracts against Musca domestica, *J. Biofertilizers \& Biopestic.*, **1** (1)(2010) 2–6.

[50] A. P. Anwunobi and M. O. Emeje, Recent applications of natural polymers in nanodrug delivery, *J Nanomedic Nanotechnol S*, **4** (002)(2011).

[51] M. Caraglia, G. DE ROSA, A. Abbruzzese, C. Leonetti, and others, Nanotechnologies: new opportunities for old drugs. The case of Aminobisphosphonates, *J. Nanomedicine \& Biother. Discov.*, **1**(1)(2011)1–2.

[52] S. Höglund, Some electron microscopic studies on the satellite tobacco necrosis virus and its IgG-antibody, *J. Gen. Virol.*, **2** (3) (1968)427–436.

[53] J. M. Rajwade, R. G. Chikte, and K. M. Paknikar, Nanomaterials: new weapons in a crusade against phytopathogens, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **104**(4)(2020)1437–1461.

[54] M. Eleftheriadou, G. Pyrgiotakis, and P. Demokritou, Nanotechnology to the rescue: using nano-enabled approaches in microbiological food safety and quality, *Curr. Opin. Biotechnol.*, **44** (2017)87–93.

[55] A. Martirosyan and Y.-J. Schneider, Engineered nanomaterials in food: implications for food safety and consumer health, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **11**(6)(2014)5720–5750.

[56] M. Ghaani, N. Nasirizadeh, S. A. Y. Ardakani, F. Z. Mehrjardi, M. Scampicchio, and S. Farris, Development of an electrochemical nanosensor for the determination of gallic acid in food, *Anal. Methods*, **8**(5)(2016)1103–1110.

[57] M. Ghaani, C. A. Cozzolino, G. Castelli, and S. Farris, An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector, *Trends Food Sci. & Technol.*, **51**(2016)1–11.

[58] I. Katouzian and S. M. Jafari, Nano-encapsulation as a promising approach for targeted delivery and controlled release of vitamins, *Trends Food Sci. & Technol.*, **53**(2016)34–48.

[59] M. A. Ansari, Nanotechnology in Food and Plant Science: Challenges and Future Prospects, *Plants*, **12**(13)(2023).