مجله علمی ـ پژوهشی زیست‌فناوری گیاهان زراعی
سال یازدهم، شماره چهارم، پیاپی سی‌وهشتم، تابستان ۱۴۰۱ (۶۰-۳۵)

Crop Biotech.
Summer (2022) 11(4): 35-60 DOI: 10.30473/cb.2023.42669.1888

«مقاله مروری»

مروری بر کاربرد نانو زیست فناوری در کشاورزی

محمدعلی ابراهیمی[۱]، نسرین قوامی[۲]، مهدی دادمهر[۳]، هادی کلانتری[٤]، جواد شقاقی[٥]، اردشیر قادری[۲]، نسیم زرین‌پنجه[۲*]

۱. استاد، گروه بیوتکنولوژی کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

۲. استادیار، مرکز تحقیقات گیاهان دارویی، پژوهشکده گیاهان دارویی، جهاد دانشگاهی، کرج، ایران.

۳. دانشیار، گروه زیست‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

٤. دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات گیاهان دارویی، پژوهشکده گیاهان دارویی، جهاد دانشگاهی، کرج، ایران.

۵. دانشجوی دکتری، بانک گیاهی، مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران، جهاد دانشگاهی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰۱/۱۸- تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۵/۲۰)

A review of Nano-biotechnology in Agriculture

Mohammad Ali Ebrahimi[1], Nassrin Qavami[2], Mehdi Dadmehr[3], Hadi Kalantari[4], Javad Shaghaghi[5], Ardeshir Qaderi[2], Nasim Zarinpanjeh[2*]

1. Professor, Department of Biotechnology, Payame Noor University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Medicinal plants Research Center, Institute of Medicinal Plants, ACECR, Karaj, Iran.
3. Associate Professor, Department of Biology, Payame Noor University, Tehran, Iran.
4. Ph.D. Student, Medicinal Plants Research Center, Institute of Medicinal Plants, ACECR, Karaj, Iran.
5. Ph.D. Student, Plant Bank, Iranian Biological Resource Center (IBRC), ACECR, Karaj, Iran.

(Received: Apr. 5, 2022 -Accepted: Aug.11, 2022)

چکیده

انواع تنش‌های زیستی و غیر زیستی مانند عوامل بیماری‌زا، آفت‌ها، علف‌های‌هرز، دما، رطوبت نامناسب و بسیاری عوامل دیگر، دستیابی به عملکرد مطلوب محصولات کشاورزی را با مشکلات و معضلات متعددی روبه‌رو ساخته‌است. پیش بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ میلادی جمعیت جهان به حدود ۹/٦ میلیارد نفر برسد که در این صورت، بایستی تولیدات کشاورزی بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش یابد تا بتوان از عهده تأمین نیاز به مواد خوراکی بشر بر آمد. عواملی چون کوچک‌تر شدن زمین‌های قابل کشت، کمبود منابع آبی، تغییر اقلیم و کاهش کارایی نهاده‌های شیمیایی کشاورزی، مشکلات ناشی از تنش‌های زیستی و غیر زیستی را برای انواع محصولات تشدید کرده است. بدین ترتیب، دستیابی به فناوری‌های مدرن و ره‌یافت هایی نوین برای حفاظت گیاهان در برابر تنش‌ها و بهبود کارایی مصرف نهاده‌های شیمیایی با هدف تأمین امنیت غذایی به‌گونه‌ای سالم و پایدار، امری کاملاً حیاتی است. نانو زیست‌فناوری که شامل استفاده از نانوساختارها (مواد کوچک‌تر از صد نانومتر) در کاربردهای زیستی است، ابزاری نویدبخش برای محقق شدن کشاورزی پایدار است که عامل کلیدی برای تأمین نیاز روزافزون به غذا در سطح جهان می‌باشد. در مقاله حاضر کلیات نقش فناوری نانو در صنعت کشاورزی به‌عنوان نانو کودها، نانو آفت‌کش‌ها، نانو تنظیم کننده های رشد، نانو اصلاح کننده های آب و خاک و غیره مرور شده‌است.

واژه‌های کلیدی: فناوری پیشرفته، محصولات کشاورزی، نانو ساختار.

Abstract

Agriculture is facing many problems and dilemmas on the way to achieving the optimal performance of its products in terms of quantity and quality, due to the presence of various biotic and abiotic stresses such as pathogens, pests, weeds, inappropriate temperature and humidity, and many other factors. It is predicted that by 2050, the world's population will reach about 9.6 billion people, in this way, agricultural production should increase between 70 and 100 percent in order to fulfill the responsibility of providing human food. Factors such as the shrinking of arable land, lack of water resources, climate change, and the reduction of the effectiveness of agricultural chemical inputs have intensified the problems caused by biotic and abiotic stresses for all types of crops. In this way, obtaining modern technologies and new findings to protect plants against stresses and improve the efficiency of using chemical inputs with the aim of ensuring food security in a healthy and sustainable manner is absolutely vital. Nano-biotechnology, which includes using nanostructures (substances smaller than one hundred nanometers) in biological applications, is a promising tool for realizing sustainable agriculture, which is a crucial factor in meeting the growing need for food in the world. In this paper, the general role of nanotechnology in the agricultural industry is reviewed as nano fertilizers, nano pesticides, nano growth regulators, nano water and soil remediators, etc.

Keywords: Crops, High-Technology, Nano-Structure.

* نویسنده مسئول: نسیم زرین‌پنجه
E-mail: zarinpanjeh@imp.ac.ir

مقدمه

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ میلادی جمعیت جهان به حدود ۹/۶ میلیارد نفر برسد که در این صورت، باید میزان تولیدات کشاورزی ۷۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش یابد تا بتوان از عهده تأمین نیاز غذایی جامعه بشری برآمد (Mueller *et al*., 2012; Rodrigues *et al*., 2017). از سوی دیگر، عواملی چون کاهش سطح زمین‌های قابل کشت، کمبود منابع آبی، تغییرات اقلیمی و کاهش کارایی نهاده‌های شیمیایی کشاورزی، غلبه بر تنش‌های زیستی و غیرزیستی منجر به کاهش عملکرد محصولات کشاورزی شده‌است. ازاین‌رو، تلاش برای بهبود روند تولید غذا چالشی مهم و ضروری است. به‌نژادی و تولید واریته‌های زراعی مقاوم در برابر تنش‌ها، پیشرفتی آهسته داشته و هنوز برای دست‌یافتن به واریته‌های متحمل شوری، تحقیقات همچنان ادامه دارد (Genc *et al*., 2019). بدین ترتیب، استفاده از فناوری‌های مدرن و یافتن راه‌کارهایی برای حفاظت گیاهان در برابر تنش‌ها و همچنین بهبود کارایی مصرف نهاده‌های شیمیایی با هدف تأمین امنیت غذایی سالم و پایدار، امری کاملاً حیاتی است. عرصه نانو فناوری[1] به بررسی نانو مواد کوچک‌تر از صد نانومتر می‌پردازد. با کمک این شاخه از علم، می‌توان مواد مختلف را در مقیاس اتمی یا مولکولی دست‌کاری کرد. در میان کاربردهای مختلف آن، راه‌کارهایی که امروزه در حوزه نانو زیست فناوری کشاورزی به‌طور گسترده‌ای در حال مطالعه هستند، می‌توانند دستاوردهای ارزشمندی را برای ارتقای عملکرد کمی و کیفی محصولات نوید دهند (Gogos *et al*., 2012; Raliya *et al*., 2017; Kah *et al*., 2019; Lowry *et al*., 2019; Giraldo *et al*., 2019). نانو زیست‌فناوری[2] که امروزه کم و بیش در تمام عرصه‌های زندگی روزانه ما حضور دارد، علمی جدید، نوآورانه و میان‌رشته‌ای است که شامل طراحی، تولید و کاربرد زیستی مواد و ادوات در سطح مولکولی و در مقیاس نانومتر می‌باشد (Ali *et al*., 2014; Parisi *et al*., 2015). به‌عبارت دیگر، نانو زیست‌فناوری، تلفیقی است از نانوفناوری و زیست‌فناوری و همچنین، پردازش شیمیایی و فیزیکی، علم مواد و مهندسی سیستم با هدف به‌دست‌آوردن محصولات جدید که پیشتر در مقیاس نانو تعدیل و اصلاح شده‌اند (Rai & Ingle, 2012). به‌واسطه خواص شیمیایی، فیزیکی و فیزیولوژیکی جدید نانو مواد[3] و نانوذرات[4]، آنها در بسیاری از عرصه‌ها مانند کشاورزی، صنایع‌غذایی، دارو و درمان، الکترونیک، علم مواد، بخش‌های مختلف تولید نیرو و عرصه‌های دیگر، به‌سرعت مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند (Parisi *et al*., 2015; Rai & Ingle, 2012; Alvarado *et al*., 2019). این فناوری پیشرفته در علوم غذایی، سیستم پردازش، بسته‌بندی، ذخیره‌سازی، حمل و نقل و عملیات بیشتر سرمایه‌گذاری و ارزش بازار را بهبود می‌بخشد. نانوفناوری در علوم غذایی نسبت به روش‌های مرسوم و سایر روش‌های فرآوری مواد غذایی برتری دارد. ذرات و مواد بر پایه نانو باعث افزایش استحکام مکانیکی، خواص بازدارنده، کمک به شناسایی عوامل بیماری‌زا در غذا و تعیین کیفیت غذایی می‌شوند و سهم آنها در صنایع‌غذایی در سطح جهانی در حال گسترش است. نقش اصلی نانوساختارها در صنایع‌غذایی نیز شامل افزایش ماندگاری، کاهش زوال، حفظ کیفیت و بهبود ارزش‌افزوده مواد غذایی است. با این فناوری جدید، پیش‌بینی می‌شود که نیازهای غذایی که به‌دلیل افزایش جمعیت ایجاد می‌شود، تأمین و برآورده شود.

1. Nanotechnology
2. Nanobiotechnology
3. Nanomaterials
4. Nanoparticles

این امر هدر رفت محصولات کشاورزی و باغبانی پس از برداشت را کاهش می‌دهد. در آینده با توسعه سریع این فناوری، حفاظت از مواد غذایی انجام خواهد گرفت و نقشی محوری در توسعه علوم غذایی و زمینه‌های مرتبط با آن ایفا خواهد کرد (Ningthoujam *et al*., 2021).

نانو کودها[1]

کودها، مواد شیمیایی مانند اوره، آمونیوم، نمک فسفات‌ها و نظیر این‌ها هستند که برای افزایش عملکرد محصولات زراعی به‌واسطه نقش آنها در تسهیل دسترسی به مواد مغذی ضروری برای رشد گیاه، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chhipa 2017; Khot *et al*., 2012). کشاورزان برای رسیدن به محصول بیشتر به مصرف کودهای متعارف در طولانی مدت متوسل شده‌اند که این عامل مهم انسانی باعث بروز برانگیختگی[2] اکوسیستم‌های ساحلی و آب‌های شیرین شده‌است. ازاین‌رو، رویکردهای مختلفی برای مقابله با این مشکل ارائه شده‌است. یکی از این رویکردها، ساخت و توسعه نانو کودها است که یا به‌صورت نانوذرات هستند که می‌توانند مواد مغذی را در اختیار گیاه قرار دهند و یا در قالب موادی که عملکرد کودهای سنتی را بهبود می‌بخشند اما خود به‌طور مستقیم مواد مغذی نیستند (Liu and Lal, 2015). همه ما می‌دانیم که استفاده بیش از اندازه از مواد شیمیایی چون کودها برای سلامت انسان، حیوانات، گیاهان، محصولات کشاورزی و محیطزیست زیان‌آور می‌باشد. بنابراین، استفاده از نانو کودها به‌دلیل دارا بودن قابلیت جذب بیشتر توسط گیاهان، نیاز به استفاده از کودها را کاهش می‌دهد. همچنین کاربرد این مواد می‌تواند یک راه‌حل امیدوارکننده و ثمربخش در حوزه کشاورزی و امنیت غذایی باشد (Verma, 2022).

درباره مکانیسم جذب به‌وسیله گیاهان، دو سازوکار اصلی وجود دارد. سازوکار اول، به‌کارگیری نانوذرات است که از طریق منافذ موجود در دیواره سلولی مستقیم وارد سلول می‌شوند که در این صورت، اندازه نانوذرات باید کوچک‌تر از قطر منفذ باشد (۵ تا ۲۰ نانومتر). مکانیسم دوم، شامل انحلال نانوذرات است که از طریق ریشه گیاه جذب و مواد غذایی را به‌صورت یون‌های محلول رها می‌کنند. در ادامه به بررسی نتایج کاربرد برخی از نانو کودها با پایه عناصر فلزی مختلف پرداخته می‌شود. همچنین نانو ذرات قادرند که اثر سمیت سایر عناصر سمی در گیاهان را کاهش دهند. به‌عنوان‌مثال، تأثیر دو مقیاس از SiO_2 (۳۰ نانومتر و ۵۰ نانومتر) بر تجمع و توزیع جیوه در بافت‌های گیاهی، میزان کلروفیل و همین طور میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه سویا بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات SiO_2 در هر دو مقیاس توانستند ضمن کاهش تجمع جیوه در گیاه، کاهش رشد گیاه سویا ناشی از اثرات سمی جیوه را نیز بهبود بخشند (Li *et al*., 2020).

Palchoudhury *et al*. (2018)، تأثیر نانو ذرات آهن[3] (α-Fe_2O_3NP) را بر رشد ریشه جنینی بقولات مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که خیساندن بذر با ذرات در دوز پایین $۵/۵۴\times۱۰۰^{-۳}$ میلی‌گرم در لیتر، به‌طور معناداری طول ریشه را بین ۸۸ تا ۳۶۶ درصد افزایش داده است. مطالعات نشان داده است که نانو ذرات اکسید روی علاوه بر داشتن نقش سودمند برای رشد گیاهان در شرایط بدون تنش، رفتار گیاه

1. Nanofertilizer
2. Eutrophication
3. Fe-based-NP

در شرایط شوری، خشکی و تنش کادمیوم[1] را بهبود بخشیدند (Sathiyanarayanan 2018; Dimkpa *et al*., 2019; Rizwan *et al*., 2019; Zhao *et al*., 2020). تأثیر نانوذرات کیتوزان مس[2] را بر رشد ذرت مورد مطالعه قرار داده و تغییرات فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی آن را بررسی کردند. استفاده از نانوذرات Cu-chitosan (۰/۰-۰۴/۱۲ درصد)، هم‌گام با بالارفتن فعالیت آنزیم آمیلاز آلفا و محتویات نشاسته، باعث افزایش رشد بذر ذرت شد. همچنین آن‌ها دریافتند که کنترل معنادار بیماری لکه برگی ذرت با نانوذرات کیتوزان مس با دوزهای ۰/۰۲ تا ۰/۱۶ درصد و ۰/۱۲ تا ۰/۱۶ درصد در شرایط کشت مزرعه‌ای میسر شده‌است. Avestan *et al*. (2019) نیز پی بردند که کاربرد نانوذرات اکسید سیلسیوم[3] (۱۰ تا ۲۰ نانومتر، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) باعث بهبود نرخ رشد و تولید و بهره‌وری در توت‌فرنگی (کشت شده در مخلوط پرلیت و کوکوپیت) تحت تنش شوری می‌شود. Elsayed *et al*. (2022) از نانوذرات HAP[4] به‌عنوان یک نانو کود فسفر جدید برای بررسی ویژگی‌های رشدی، محتوای اسانس و تغییرات بافت‌شناسی در گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) استفاده کردند. همچنین از کود NPK به‌عنوان شاهد استفاده شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با شکل سنتی NPK، نانوذرات HAP در غلظت‌های ۰.۵ و ۱.۰ گرم در لیتر، ویژگی‌های رشدی و تولید اسانس را در گیاه رزماری افزایش داده است. سطوح ترکیبات روغن رزماری شامل α-پینن، اکالیپتوس، کافور، اندو بورنئول و وربنون در گروه نانو کود بیشتر از گروه شاهد بود. همچنین بیشترین مقادیر قطر ساقه، ضخامت الیاف، ضخامت بافت آبکش، ضخامت بافت آوند چوبی، قطر مغز ساقه و ضخامت رگبرگ میانی و ضخامت لایه برگ با نانو کود به‌دست آمد. در نتیجه، داده‌ها نشان‌می‌دهد که نانوذرات هیدروکسی آپاتیت به‌عنوان یک نانو کود، پتانسیل زیادی برای بهبود بهره وری گیاه رزماری را نشان‌می‌دهد. این رویکرد راه جدیدی را برای کاوش نانومواد به‌عنوان فناوری جایگزین برای کودهای سنتی مورد استفاده در کشت گیاهان دارویی و معطر باز می‌کند. Nasrallah *et al*. (2022) تأثیر نانوذرات کلسیم فسفات (CaP-NPs) را به‌عنوان کود بر تولید و ترکیبات زیست‌فعال گیاه لوبیا در شرایط تنش شوری، مورد ارزیابی و مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که کاربرد CaP-NPs عملکرد گیاه را در مقایسه با کود معمولی تحت تنش شوری تا ۳۰ درصد بهبود بخشیده‌است. این بهبود را می‌توان به افزایش قابل‌توجه در کل قندهای محلول، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، محتوای پرولین و فنل کل در نتیجه‌ی استفاده از نانو کود در مقایسه با استفاده از کود معمولی تحت تنش شوری نسبت داد. افزون بر این، نانو کود اثرات بهتری بر پارامترهای رشد گیاه، رنگدانه‌های فتوسنتزی و شاخص‌های تنش اکسیداتیو (MDA و H_2O_2) نشان داد. بنابراین، نتایج این تحقیق بر جایگزینی کودهای سنتی حاوی Ca^{2+} یا P با کودهای CaP-nano برای بهره وری بالاتر گیاه و پایداری تحت تنش شوری دلالت می‌کند.

نانو آفت‌کش‌ها[5]

رشد سریع جمعیت انسانی باعث افزایش تقاضا برای تأمین غذا شده‌است و این به نوبه خود باعث استفاده بیشتر از مواد شیمیایی کشاورزی همچون آفت‌کش‌ها شده‌است (Zobir *et al*., 2021). تنش‌های زیستی از قبیل عوامل بیماری‌زا و آفات، از جمله عوامل مهمی هستند که بر تولید محصول اثر سوء می‌گذارند. اگر چه مصرف آفت‌کش‌ها در افزایش

1. Cadmium
2. Cu-Chitosan NPs
3. SiO_2 NPs
4. Hydroxyapatite
5. Nanopesticides

محصول کشاورزی و بهره‌وری تولید تأثیر داشته‌است، اما استفاده از آفت‌کش‌های سنتی خطراتی برای سلامتی و محیطزیست دارد. برخی از مواد، حاوی عناصری در مقیاس نانومتر بوده و ادعا می‌کنند که قابلیت‌های نوینی به سبب اندازه‌های بسیار کوچک خود دارند. با این تعریف، می‌توان گفت که نانو آفت‌کش‌ها شامل فرمولاسیونی هستند که این نوع مواد اصلاح‌شده نوین را در خود جای داده و به‌واسطه آن‌ها، می‌توانند برای ساخت و تولید محصولات با کارایی و اثربخشی بیشتر مؤثر استفاده قرار گیرند. "نانو آفت‌کش‌ها" را می‌توان به‌عنوان یک فرمولاسیون یا محصول آفت‌کش تعریف کرد که دارای نانوذرات مهندسی‌شده در قالب اجزای فعال بوده و از خواص کشندگی چه به‌صورت کلی و یا به‌صورت واجد ساختار مهندسی‌شده برخوردار هستند (Adisa *et al*., 2019). از آنجا که خواص و قابلیت‌های مواد، بسته به اندازه‌های آن‌ها متفاوت است، دامنه وسیعی از نانو آفت‌کش‌ها را در بر می‌گیرد که نمی‌توان همه آنها را در یک طبقه‌بندی تعریف کرد. به‌عنوان‌مثال، تعدادی از آن‌ها از مواد ارگانیک یا آلی مانند پلیمرها ساخته می‌شوند و از سوی دیگر، برخی نانو آفت‌کش‌ها نیز ممکن است اجزای غیر آلی مانند اکسیدهای فلزی داشته‌باشند. شایان توجه است که نانومواد، به اشکال مختلف و متنوعی در ترکیبات آفت‌کش‌ها وارد می‌شوند. مواد نانومتری با هدف رهاسازی آهسته‌تر و گزینشی‌تر، برای افزایش قابلیت انحلال‌پذیری اجزای فعال با توان انحلال ضعیف، به ترکیب آفت‌کش‌ها اضافه می‌شوند تا اجزای به کار رفته در ترکیب را در برابر تجزیه سریع حفاظت کنند. به‌لحاظ اقتصادی، استفاده از نانوذرات در ساخت آفت‌کش‌ها، مزایای قابل‌توجهی در رابطه با میزان و نحوه‌ی استفاده از آن‌ها فراهم می‌کند. نانومواد می‌توانند برای تهیه آفت‌کش‌های شیمیایی سالم‌تر و ایمن‌تر به کار روند (Khot *et al*., 2012). نانوذرات مورد استفاده به‌عنوان آفت کش دو نوع می‌باشند. بعضی نانوذرات به‌طور مستقیم به‌عنوان آفت‌کش استفاده می‌شوند و شامل نانوذرات آفت‌کش آلی / غیرآلی می‌باشند که به‌طور گسترده برای مدیریت آفات، حشرات، باکتری‌ها، قارچ‌ها و بیماری‌های گیاهان مورد بررسی قرار می‌گیرند. به‌عنوان‌مثال، برخی از مقالات فعالیت حشره کشی نانوذرات سیلیس را گزارش کردند. نانوذرات نیکل و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در برابر کنترل سرخرطومی‌ها، کنه گاو، پشه آنوفل مؤثر واقع شدند. بسیاری از متالوئیدها (طلا، نقره، مس، پلاتین، و غیره)، اکسیدهای فلزی (اکسید نقره، اکسید روی، مس اکسید، دی‌اکسید تیتانیوم و غیره) و نانوذرات غیرفلزی (مانند گوگرد کاهش اکسید گرافن و کیتوزان و غیره)، به‌دلیل دارا بودن خاصیت ضد قارچی به‌عنوان نانو آفت‌کش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین به‌دلیل فعالیت ضد باکتریایی برخی نانوذرات، در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری نانو برای فرموله کردن آفت‌کش‌ها به‌صورت ذرات نانوکریستالی بسیار مورد توجه بوده است (Abdollahdokht *et al*., 2022). به‌دلیل حلالیت و پراکندگی ضعیف آفت‌کش‌های محلول در آب، می‌توان پس از نانوذره کردن آفت‌کش‌ها، حلالیت، نفوذپذیری، پراکندگی و زیست فعالی را تا حد زیادی بهبود بخشید. مطالعات نشان داده که در مقایسه با امولسیون‌های تجاری در آب، نانو سوسپانسیون ها باعث افزایش ماندگاری روی برگ می‌شوند. همچنین میزان فتولیز روی سطوح کاهش‌یافته و فراهمی زیستی افزایش یافته‌است. در مطالعه‌ای توسط Wang et al. (2019)، امولسیون حاوی

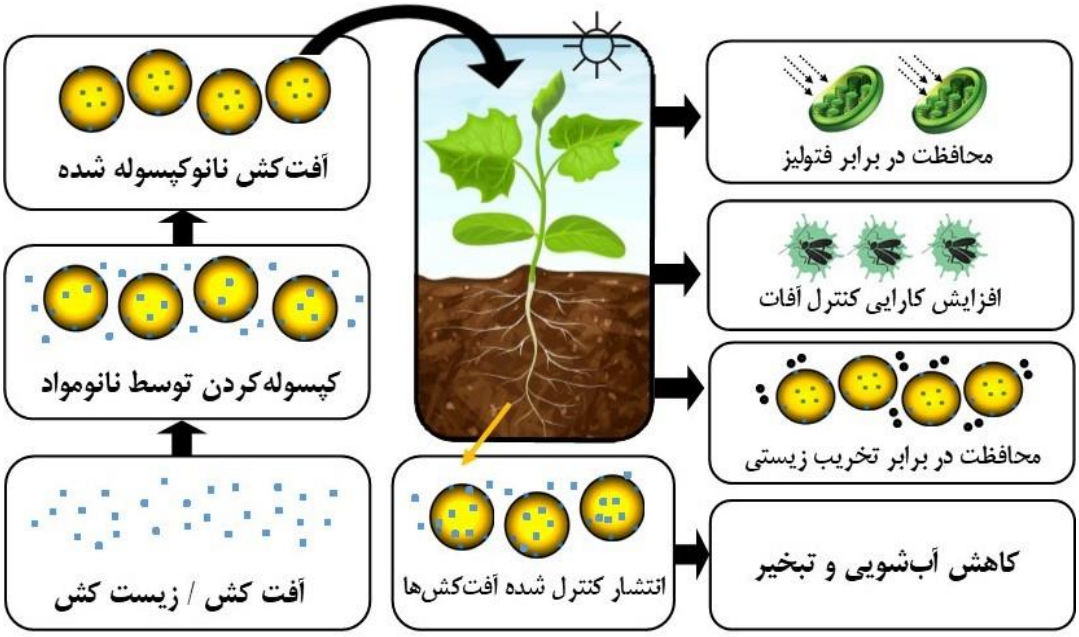
نانوذرات پیراکلوستروبین[1] با اندازه متوسط ذرات ۲۰ نانومتر از طریق روش خود امولسیون کننده تهیه شد که نسبت به‌حالت توده‌ای، ترشوندگی، ماندگاری و پایداری برتری را نشان دادند. در ادامه به نتایج کاربرد برخی از نانوکودها با پایه عناصر فلزی مختلف پرداخته می‌شود. Borgatta *et al*. (2018)، توانایی نانوذرات اکسید مس[2] و نانوصفحه‌های $Cu_3(PO_4)_2.3H_2O$ در کنترل بیماری قارچی ریشه ناشی از فوزاریوم اکسی‌پروم[3] در هندوانه را مقایسه کردند. در یک مطالعه گلخانه‌ای، کاربرد نانو صفحه‌های $Cu_3(PO4)_2.3H_2O$ به میزان ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به‌طور معناداری بیماری قارچی را سرکوب کرد که نتیجه خود را در مقدار عملکرد محصول و نیز کاهش ۵۸ درصدی در شیوع بیماری نشان داد.

در پژوهشی دیگر، Huang *et al*. (2018)، فعالیت ضدباکتریایی $Mg(OH)_2NP$ با آفت‌کش تجاری کساید ۳۰۰۰[4] که بخش فعال آن هیدروکسید مس[5] است مقایسه کردند. نتایج نشان داد که نانوذرات $Mg(OH)_2NP$ نسبت به آفت‌کش تجاری کساید ۳۰۰۰ قدرت مهار بیشتری بر رشد زدوموناس سینجیا[6] و اشرشیا کلی[7] داشتند.

Bhattacharyya *et al*. (2016) نانوقارچ‌کش‌ها و روند نوظهور در کنترل آفات و حشرات را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق به این نکته اشاره دارد که نانو فرمولاسیون‌ها، گزینه‌ای امن‌تر و سازگارتر با محیطزیست برای مدیریت بیماری‌های گیاهی هستند. نانوبیو قارچ‌کش به‌دلیل خواصی مانند اثربخشی بالا، دوام و دوز کمتر ماده فعال مورد نیاز ممکن است به‌عنوان آفت‌کش نسل بعدی تکامل یابند. نانو بیو قارچ‌کش‌ها را می‌توان با یک روش ساده و مقرون‌به‌صرفه برای فرمولاسیون نانوسیدهای[8] هیبریدی مورد استفاده قرار داد. با توجه به ایمنی نانوبیو قارچ‌کش‌ها برای سلامت عمومی و محیطزیست، امید می‌رود استفاده از این گزینه در آینده گسترش یابد. در زیر نانو فرمولاسیون آفت‌کش‌ها به‌صورت شماتیک نشان داده‌شده‌است (شکل ۱).

Madhuban *et al*. (2012) از فناوری نانو برای توسعه نانو آفت‌کش‌ها با خواص قارچ‌کشی و ضد میکروبی قوی استفاده کردند. در همین راستا نانو سولفور و نانو هگزاکونازول با استفاده از روش کپسوله‌سازی تهیه شد. مطالعات پراکندگی نور پویا (DLS)[9]، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[10] و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)[11] ساختار نانو نانو آفت‌کش‌ها را تایید کردند. تأثیر نانوذرات گوگرد و هگزاکونازول روی میزان ماده فعال در فرمولاسیون با اتخاذ تکنیک‌های تحلیلی مانند کروماتوگرافی گازی[12]/ کروماتوگرافی مایع با فشار بالا (HPLC)[13] برآورد شدند. مطالعات زیست‌سنجی نشان داد که نانو آفت‌کش‌ها در مقایسه با گوگرد تجاری، رشد قارچ‌ها و کنه‌ها را چندین برابر بیشتر مهار کرده‌اند. Gahukar *et al*. (2020) نانو آفت‌کش‌های مشتق شده از گیاه برای کنترل آفات کشاورزی را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که نانو آفت‌کش‌های مشتق شده از گیاه نسبت به فرمول‌های تجاری آفت‌کش‌های مصنوعی کارایی بیشتری نشان داده‌اند. نانوذرات، پایداری محصولات را در برابر تابش اشعه ماورای بنفش و افزایش پراکندگی در فاز آبی بهبود بخشیده‌اند.

1. Piraclostrobin
2. CuONP
3. *Fusarium oxysporum*
4. Kocide 3000
5. Copper hydroxide
6. *Pseudomonas syingea*,
7. *Escherichia coli*
8. Nanocides
9. Dynamic Light Scattering
10. Scanning Electron Microscopy
11. Transmission Electron microscopy
12. Gas Chromatography
13. High Pressure Liqiud Chromatography



شکل ۱. نمودار شماتیک نانو فرمولاسیون در کاربردهای آفت‌کش (Bhattacharyya *et al*., 2016)

به نظر می‌رسد با توجه به ویژگی و طول عمر فرمولاسیون‌های موجود، نانو کپسول‌ها مناسب‌ترین کاربرد را در خاک برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی داشته‌باشند. شناخت خواص و رفتار نانو آفت‌کش‌ها می‌تواند مبنایی را برای توسعه فرمول‌های جدید بدون هیچ‌گونه تأثیر مخربی بر محیط، ارگانیسم‌های غیر هدف و انسان فراهم کند.

نانو گندزداها در کشت‌های درون شیشه‌ای[1]

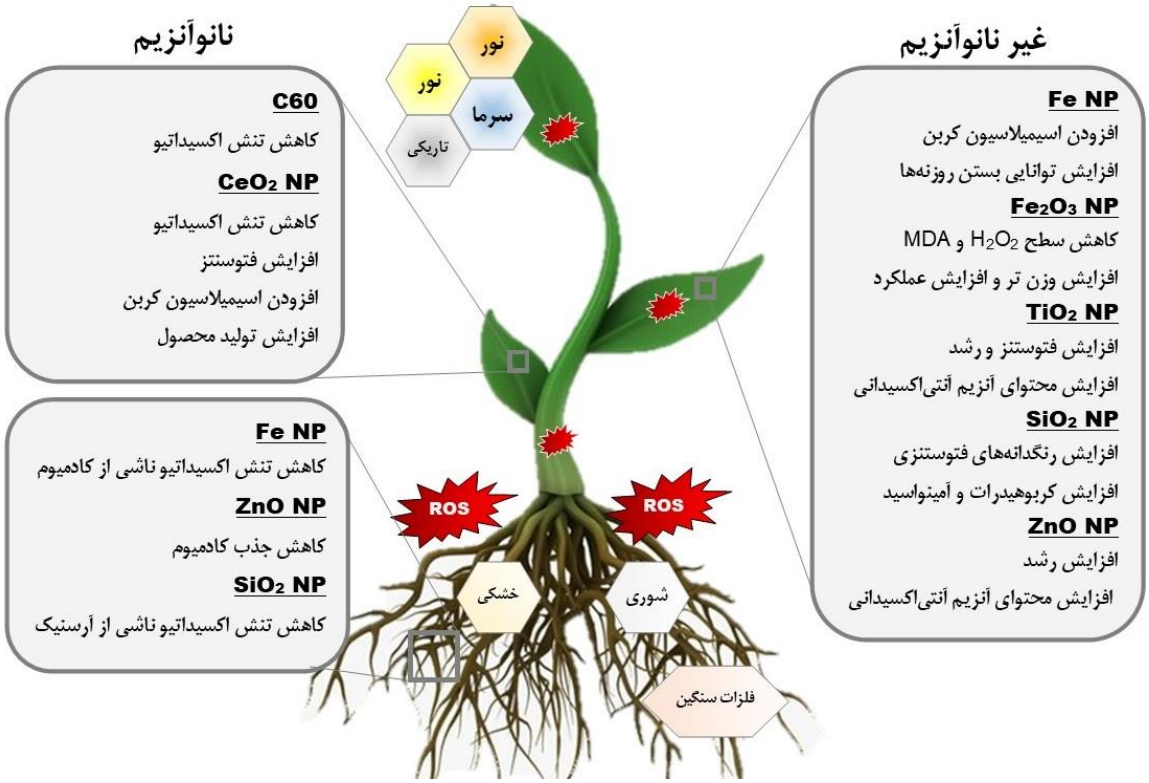
از میان بردن آلودگی‌ها (ویروس‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌ها)، نخستین گام در انجام هر فعالیت موفق در فرآیند کشت درون شیشه‌ای گیاهان است. یکی از مشکلات عمده در فنون کشت درون شیشه‌ای گیاه، بروز آلودگی قارچی و باکتریایی است. استفاده مکرر از آنتی‌بیوتیک‌های متعارف ممکن است مسمومیت‌زا باشد و یا باعث کند شدن رشد بافت‌های گیاهی شود. در این رابطه، استفاده از محلول نانوذرات نقره (با اندازه حدود ۳۵ نانومتر) جهت ضد عفونی کردن سطحی ریز نمونه، تأثیر قابل‌قبولی را در کنترل آلودگی باکتریایی بدون داشتن عوارض مخرب بر رشد گیاهچه باززا شده گیاه سنبل‌الطیب از خود نشان داده‌است. همچنین مشخص شده‌است که فعالیت ضد قارچی نانو ذرات نقره، به‌اندازه آن بستگی دارد و هرچه این ذرات کوچک‌تر باشند، بهتر عمل می‌کنند (Sarmast *et al*., 2016). سازوکار عمل نانو ذرات نقره مربوط به تولید الکترون‌هایی با بار منفی است که با برانگیخته شدن نانوذرات ایجاد می‌شوند. از این خاصیت می‌توان برای گندزدایی باکتری‌های موجود در بسته‌بندی محصولات کشاورزی نیز استفاده‌کرد. به‌محض تماس باکتری‌های موجود در بسته‌بندی با نانوذرات نقره، الکترون‌های تحریک‌شده به درون باکتری‌ها جابه‌جا می‌شوند که نتیجه آن خارج‌شدن باکتری‌ها از هدف مورد نظر خواهد بود. بنابراین این روش در بسته‌بندی‌های میوه و مهندسی مواد غذایی بسیار مفید و مؤثر عمل می‌کند (Dasgupta *et al*., 2017).

1. Nanodisinfactant

نانو تنظیم‌کننده‌ها[1]

تنش غیرزیستی باعث تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، زیست‌شیمیایی و مولکولی در گیاهان شده و به‌طور نامطلوبی رشد، تمایز و عملکرد آن‌ها را تحت‌تأثیر خود قرار می‌دهد. گیاهان معمولاً برای بالابردن سطح آستانه تحمل خود در برابر تنش‌ها از روش‌هایی چون افزایش سطح تنظیم عوامل حفاظت‌کننده عملکرد و ساختاری مانند اسمولیت‌ها[2] و آنتی اکسیدان‌های استفاده می‌کنند (Wang *et al*., 2003). مشخص شده‌است که گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)ها[3]، به‌طور معمول، به‌وسیله گیاهان، به‌دنبال واکنش‌های زیست‌شیمیایی تولید می‌شوند. گیاه به‌طور دائم ROS را در کلروپلاست‌ها، میتوکندری، پراکسی زوم و سایر قسمت‌های سلول، طی دوران انجام فرایندهای متابولیک مانند تنفس و فتوسنتز تولید می‌کند. ROS در مقدار پایین، به‌عنوان مولکول‌های سیگنال دهنده‌ی درگیر در رشد، نمو و دفاع عمل می‌کند. در صورتی‌که افزایش و انباشته‌شدن ROS در گیاهان تحت شرایط تنش‌زا، منجر به آسیب‌دیدن دیواره سلولی، پروتئین، دی ان ای و سایر اجزا و ترکیب‌های سلول شده و در پی آن، باعث مهار و توقف رشد گیاه می‌گردد. عمل پالایش‌کردن ROS در گیاهان، به‌طور عمده به‌وسیله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از قبیل دیسموتاز سوپراکسید (SOD)، کاتالاز (CAT)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، گلوتاتیون ردوکتاز (GR)، گلوتاتیون پراکسیداز (GPX) و پراکسید از (POD) و همین‌طور، به‌وسیله متابولیت‌های غیر آنزیمی با وزن مولکولی پایین (ویتامین ث، ویتامین ایی، پلی‌فنل‌ها) انجام‌می‌شود (Tripathy *et al*., 2012). در همین راستا، افزایش توان گیاه در پالایش ROSها از طریق کاربرد نانو مواد دارای فعالیت آنتی‌اکسیدان، ممکن است تحمل گیاه را در برابر تنش‌های غیرزیستی بالا برده و خسارات وارده بر عملکرد کاهش دهد. نانو تنظیم‌کننده‌ها براساس نوع فعالیت به دو بخش آنزیمی و غیر آنزیمی تقسیم می‌شوند (شکل ۲). در پژوهشی Maduraimuthu *et al*. (2018) دریافتند که برگ‌پاشی نانو ذرات اکسید سریم[4] با اندازه ۱۵ نانومتر به میزان ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، خسارت ناشی از اکسیدان گیاه سورگوم را تحت تنش خشکی کاهش می‌دهد. دلیل آن نیز، مشاهده کاهش در مقدار رادیکال سوپراکساید[5] (۴۱ درصد) و هیدروژن پراکسید[6] (۳۶ درصد) و همین‌طور در پراکسیداسیون لیپید (۳۷ درصد) غشای سلول بوده‌است. همچنین افزایش در آسیمیلاسیون کربن[7] در برگ (۳۸ درصد، جوانه‌زنی دانه گرده (۳۱ درصد)، و عملکرد بذر (۳۱ درصد) نیز مشاهده شد. برخی از نانوذرات بدون فعالیت‌های آنزیمی نیز آستانه تحمل تنش غیرزیستی گیاهان را افزایش می‌دهند. به‌عنوان‌مثال، Abdel Latef *et al*. (2018) افزایش رشد معنادار گیاهان را که با ۰/۰۱ درصد از نانو ذرات اکسید تیتانیوم TiO_2NPها تیمار شده‌بودند گزارش کردند. مدرک مورد استناد آن‌ها، مشاهده افزایش در محتویات زیست توده و کلروفیل بوده است. در پژوهشی دیگر نقش نانوذرات TiO_2 به فعالیت‌های آنزیم آنتی‌اکسیدان، و به‌دنبال آن افزایش پالایش ROS و هم‌چنین به محتویات سلولی پرولین و قندهای محلول که به سهم خود باعث بهبود تعادل اسمی در سلول‌های گیاه شد، نسبت داده شدند (Zhao *et al*., 2020).

1. Nanoregulators
2. Osmolytes
3. Relative Oxygen Species
4. Ce_2ONP
5. Superoxide radical
6. Hydrogen peroxide
7. Carbon assimilation



شکل ۲. نانو تنظیم‌کننده‌های آنزیمی و غیر آنزیمی (Zhao *et al*., 2020)

آلودگی خاک به فلزات سنگین یک نگرانی جهانی است که پیامدهای ناشی از آن بر کاهش عملکرد محصولات زراعی و به خطر افتادن امنیت غذایی انسان فاجعه‌بار خواهد بود. به‌تازگی، مطالعاتی درباره اثرات مثبت نانوذرات در کاهش تنش ناشی از فلزات سنگین بر گیاهان ارائه شده است. Rizwan *et al*. (2019)، اثرات نانو ذرات آهن‌بر رشد گندم و بهبود تنش اکسیداتیو القا شده توسط کادمیوم (Cd) را گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که نانو ذرات آهن در غلظت‌های کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در برگ‌های گندم تحت تنش کادمیوم افزودند. پوشش برخی نانوذرات ZnONP (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) نیز در گیاه ذرت به‌طور معناداری جذب کادمیوم را کم کرده و تنش اکسیداتیو ناشی از آن را کاهش داده‌است.

بدین‌ترتیب، نانوذرات اکسید روی ممکن است که در حفاظت از گیاهان در برابر خشکی و شوری بالا، ارزش و جایگاه خاصی را در کاربردهای کشاورزی به خود اختصاص دهند. در گزارش اخیر Cui *et al*. (2020) آمده است که SiO_2NP (۰/۱، ۱ و ۱۰ mM) تنش اکسیداتیو ناشی از قرارگیری لاین‌های سلولی گیاه برنج در معرض آرسنیک را کاهش داده‌است .طبق نتایج تحقیقات Khan *et al*. (2017) استفاده از مواد نانو (طراحی‌شده برای تولید محصولات پایدار) تلفات مواد مغذی را کاهش داده بیماری‌ها را نابود کرده و عملکرد را افزایش می‌دهد. نانومواد (NMs)[1]، با اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر، روی فعالیت‌های حیاتی گیاهان تأثیر می‌گذارند که

1. Nano Materials

شامل جوانه‌زنی بذر، قدرت گیاهچه، ریشه‌زایی، رشد و فتوسنتز تا گل‌دهی می‌شود. افزون بر این، نانومواد در محافظت از گیاهان در برابر استرس اکسیداتیو نقش دارند زیرا نقش آنزیم‌های آنتی اکسیداتیو مانند سوپراکسیددیسموتاز (SOD)[1]، کاتالاز (CAT)[2] و پراکسیداز (POX)[3] را ایفا می‌کنند. Hussain *et al*. (2019) تأثیر پرایمینگ بذر گندم را با استفاده از نانوذرات سیلیکون[4] (Si)، بر پاسخ‌های ناشی از کادمیوم از نظر رشد، عملکرد، فتوسنتز، تنش اکسیداتیو و تجمع سیلیکون و کادمیوم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نانوذرات Si به‌طور مثبت بر رشد گندم و محتوای کلروفیل بیش از شاهد تأثیر داشتند. نانوذرات Si استرس اکسیداتیو را کاهش داده و بر فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان تأثیر مثبت گذاشتند. نانوذرات سیلیکون در مقایسه با گروه شاهد، محتوای کادمیوم در اندام هوایی (۱۰ تا ۵۲ درصد)، در ریشه (۱۱ تا ۶۰ درصد) و در دانه گندم (۱۲ تا ۷۵ درصد) را کاهش داده است.

نانو حسگرها[5]

حسگر[6] در اصل یک نوع مبدل انرژی است که می‌تواند برخی تغییرات و ویژگی‌های مربوط به محیط اطرافش را تشخیص دهد. حسگرها تغییرات در کمیت‌های مختلف را تشخیص داده و نتیجه را به‌صورت یک سیگنال خروجی متناظر با تغییرات حاصل‌شده که عموماً یک سیگنال الکتریکی یا نوری است، نمایش می‌دهند. در واقع حسگرها تغییرات عوامل فیزیکی و شیمیایی را به عوامل الکترونیکی تبدیل می‌کنند. نانو حسگرها، حسگرهایی در ابعاد نانومتری هستند که به‌خاطر کوچکی و نانومتری بودن ابعاد آنها از دقت و واکنش‌پذیری بسیار بالایی برخوردارند به‌طوری‌که حتی نسبت به حضور چند اتم از یک گاز هم عکس‌العمل نشان می‌دهند. با استفاده از این حسگرها شناسایی مقادیر بسیار کم آلودگی شیمیایی یا ویروس و باکتری در سامانه‌ی کشاورزی و غذایی ممکن است (Prasad *et al*., 2014). تا چند سال پیش، کشاورزان و دیگر کاربران، به‌جای نانو حسگر، از روش‌ها و ابزار سنتی مانند کروماتوگرافی گازی و مایع[7] و طیف نگاری جرمی[8] استفاده می‌کردند. مزایای نانو حسگرها عبارت از کوچکی، قابل‌حمل بودن، سیستم تشخیصی کم‌هزینه و دقیق، پایش در لحظه و کنترل از راه دور می‌باشد. امکان پایش در لحظه (زمان واقعی)، به کشاورز اجازه می‌دهد تا از نزدیک، شرایط زیست‌محیطی برای رشد گیاه و حفاظت از محصول را نظارت کند. این حسگرها، هم‌چنین می‌توانند به افزایش بهره‌وری کمک کرده و از مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، آفت‌کش‌ها، کودهای مغذی بکاهند. علاوه بر این، کشاورزان می‌توانند با دریافت اطلاعات ورودی مانند مواد مغذی یا آبیاری و برنامه‌ریزی محصولات مورد کشت خود در بهترین مقیاس‌های زمانی و مکانی، بهترین کارایی و بهره‌وری را به‌دست آورند و در عمل، از مواد مغذی، آب، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و یا علف‌کش‌ها فقط در زمان و مکان مناسب استفاده‌کنند (Bardos *et al*., 2018; Seok *et al*., 2016). بر پایه نظر Chugh *et al*. (2022) محققان توجه اصلی را به پیشرفت حسگرهای نوآورانه مبتنی بر نانومواد با کاربردهای بالقوه در زمینه کشاورزی دارند. نقش اصلی چنین حسگرهایی تعیین و تشخیص سطح غلظت سموم/ مواد شیمیایی ناخواسته یا ترکیباتی مانند آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، فلزات سنگین و بقایای کودها است. با توجه به این موضوع، نقش انواع مختلف حسگرهای بر پایه

1. Superoxidase dismutase
2. Catalyzes
3. Peroxidase
4. Silicon
5. Nanosensors
6. Sensor
7. Gas or liqiuld chromatography
8. Mass spectroscopy

نانومواد در کشاورزی برجسته به نظر می‌رسد.

نانوحسگرهای زیستی[1]

نانو حسگرهای زیستی معمولاً از سه جز اصلی تشکیل می‌شوند (شکل ۳). پروب‌ها[2] یا عناصری که به‌طور زیستی سنتز شده‌اند. مانند آنزیم‌ها، پادتن‌ها، بافت‌ها، میکروارگانیسم‌ها (عوامل بیماری‌زا)[3]، اسیدهای نوکلئیک و غیره که نقش آنها در دریافت سیگنال‌ها از نمونه و انتقال آن به یک وارسان[4] است.

شکل ۳. اجزای اصلی نانو حسگرها (Alvarado *et al*., 2019)

وارسان، تغییرات فیزیکی، شیمیایی یا الکتریکی را که در گیرنده بیولوژیک رخ می‌دهد اندازه‌گیری می‌کند. ردیاب[5]، سیگنال را از وارسان گرفته سپس آن‌را از یک ریزپردازشگر[6] عبور می‌دهد که در آن سیگنال‌ها تقویت‌شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در آخر، داده‌ها به صفحه‌نمایش آمده و کاربر می‌تواند نتایج کار را مشاهده کند (شکل ۳). مبنای تشخیص آنالیزهای بیولوژیکی مختلف در نانو زیست حسگرها بر اساس نوع سیگنال‌های ایجاد شده متفاوت می‌باشد و بسته به نوع استراتژی تعیین‌شده دارای حساسیت‌های متفاوتی می‌باشند. در بین انواع روش‌های تشخیص، پلتفرم‌های مبتنی بر تکنیک‌های فلورسانس، کمی لومینسانس، الکتروشیمیایی و رنگ‌سنجی به‌ترتیب دارای بالاترین میزان حساسیت می‌باشند (Rai *et al*., 2012; Alvarado *et al*., 2019).

Su *et al*. (2022) به یک نانوحسگر پلاسمونیک با الهام از حسگر زیستی برای آنزیم مبدل آنژیوتانسین از طریق مونتاژ با واسطه پپتید از نانوذرات طلا دست یافتند. آنزیم مبدل آنژیوتانسین (ACE)[7] می‌تواند نشان دهنده فشار خونی باشد که با سلامت انسان‌مانند بیماری قلبی عروقی مرتبط است. با این حال، روش‌های فعلی برای تشخیص فعالیت ACE، روشی سریع، ساده و مناسب نیستند. بیوسنسورهای پلاسمونیک ساخته‌شده بر روی مدلاسیون نانومواد فلزی به‌عنوان ابزار جدیدی برای تشخیص نشانگرهای زیستی پدید آمده‌است. در این‌کار، یک استراتژی الهام‌گرفته از زیستی برای تشخیص پلاسمونیک ACE به روشی سریع، حساس و انتخابی از طریق مونتاژ نانوذرات طلا (AuNP) با واسطه پپتید گزارش‌شده است. در این حسگر زیستی، سیستئین–آنژیوتانسین-I سیستئین

1. Nanobiosensors
2. Prob
3. Microorganisms
4. Transducer
5. Detector
6. Microprocessor
7. Angiotensin-converting enzyme

می‌تواندAuNP ها را به‌دلیل پیوند Au-S جمع‌آوری کند. حضور ACE می‌تواند به‌طور خاص هیدرولیز آنژیوتانسینI را کاتالیز کند، بنابراین ساختار سیستئین–سیستئین پپتید را جدا می‌کند که منجر به جداسازی و پراکندگی AuNPs می‌شود. این نانو حسگر پلاسمونیک الهام‌گرفته از حسگر زیستی، بازخوانی تشخیص ACE را با چشم غیر مسلح با گزینش‌پذیری و حساسیت بالا امکان‌پذیر می‌کند. همچنین امکان غربالگری مهارکننده‌های ACE و پپتیدهای بازدارنده را برای تولید داروهای ضد فشار خون یا غذا را فراهم می‌کند.

انتقال مواد ژنتیکی[1]

انتقال مواد ژنتیکی، شاخه‌ای مهم و اصلی در زیست‌فناوری گیاهی است (Sarmast & Salehi, 2016). انتقال مواد ژنتیکی مانند DNA و RNA برای ایجاد ژنوتیپ‌های متحمل در برابر آفات، عوامل بیماری‌زا و نیز تنش‌های زیستی و غیرزیستی در گیاهان زراعی توسط تغییر در بیان ژن‌ها بسیار مهم است. سامانه‌های انتقال ژن برای تبدیل و تغییر شکل گیاه، با موانعی چون نشانه‌گیری سامانه تحویل و انتقال[2] از میان غشای سلول، جذب و تجزیه در لیزوزوم‌های پایانی و تبادل سلولی بین DNA و هسته روبه‌رو هستند (Khot *et al*., 2012). نانو زیست‌فناوری، مجموعه جدیدی از ابزار و ادوات را برای مهندسی ژن‌ها با استفاده از نانو ذرات[3]، نانوالیاف[4] و نانو کپسول‌ها[5] ارائه می‌دهد (Agrawal and Rathore, 2014). به‌عنوان‌مثال، مهندسی ژنتیک کنترل‌شده در سلول‌ها، به‌وسیله تلفیق نانو الیاف کربن که به‌وسیله DNA پلاسمید، اصلاح شده‌اند، انجام‌می‌شود. نانولوله‌های کربنی[6] (CNTs) را همچنین می‌توان به‌عنوان یک وکتور[7] بالقوه تحویل ژن به سلول‌های گیاهی در نظر گرفت. DNA تک‌رشته‌ای پیچیده‌شده پیرامون نانولوله‌هایی با پوشش کربن، قادر هستند که به سیتوپلاسم سلول‌های گیاهی دسترسی داشته‌باشد. این روش برای انتقال قطعات کوتاه و کوچک dsRNA به داخل هسته سلول گیاهی برای فعال‌سازی آنها بسیار مؤثر می‌باشد (Serag *et al*., 2013; Alvarado *et al*., 2019). همچنین استفاده از نانوذرات نشاسته نشان‌دار شده با فلورسنت به‌عنوان وسیله انتقال تراژن گیاهی گزارش شده‌است که در آن نانوذرات از طریق منافذ ایجاد شده با فراصوت، ژن‌ها را انتقال می‌دهند (Liu *et al*., 2008). در این تحقیق، ژن گزارشگر بتاگلوکورونیداز (GUS)[8] به‌همراه نانوذرات مغناطیسی به دانه‌های گرده گیاه پنبه منتقل شد. در مرحله بعد از طریق گرده‌افشانی با گرده‌های مغناطیسی تراریخته، گیاهان تراریخته پنبه تولید شدند و DNA اگزوژن با موفقیت در ژنوم ادغام شده و به‌طور پایدار در نتایج به‌دست آمده از طریق خود گرده افشانی به ارث رسید (Zhao *et al*., 2017). در تحقیق دیگری از نانو تیوب‌های کرین جهت انتقال DNA خطی و پلاسمیدی به گیاهان *Nicotiana benthamiana*، *Eruca sativa*، *Triticum aestivum* و *Gossypium hirsutum* استفاده شده‌است. در این تحقیق، ژن گزارشگر، ژن تولید کنند پروتئین فلورسنت سبز (GEP)[9] بوده است. نتایج حاکی از انتقال و بیان موفق تراژن بوده است (Demirer *et al*., 2018). بر اساس نظر Kavanagh *et al*. (2022) ساختارهای مهندسی‌شده نانوذرات، به‌اندازه ویروس‌های طبیعی،

1. Genetic material delivery
2. Transportation
3. Nanoparticles
4. Nanofibers
5. Nanocapsules
6. Carbon nanotubes
7. Vector
8. ß-glucuronidase
9. Green Fluorescent Protein

برای راندمان دقیق‌تر و بالاتر در انتقال ویروس‌ها طراحی می‌شوند. همچنین مزایایی مانند افزایش ایمنی، انعطاف‌پذیری حمل بار و سهولت در ساخت را ممکن می‌سازد. توسعه قابل‌توجهی در استفاده از سایر نانومواد برای انتقال ژن با ویژگی‌های مطلوب‌تر مانند زیست تخریب‌پذیر، مقیاس‌پذیری و هدف گیری سلولی در حال انجام است که می‌تواند چالش‌های فعلی مانند ژن‌درمانی را مورد بررسی قرار داده و فناوری جدید استفاده از انواع مختلف نانومواد و حامل‌های مختلف برای انتقال ژن (DNA، mRNA و ریبونوکلئوپروتئین‌ها) را مورد بحث قرار دهد. محققین توانستند با کاربرد نانوذرات مغناطیسی (MNPs)[1]، تغییر ژنتیکی پایدار و موفق در گیاه پنبه ایجاد کنند.

نانو اصلاح‌کننده‌ها[2]

آفت‌کش‌ها (حشره‌کش‌ها، باکتری‌کش‌ها و قارچ‌کش‌ها)، بخشی مهم و کلیدی را در کشاورزی تشکیل می‌دهند. آن‌ها با حضور و حمایت خود از مزارع و باغات چون سپری محکم در برابر هجوم انواع آفات دفاع کرده و از وارد شدن زیان‌های عمده بر عملکرد محصولات جلوگیری می‌کنند (Sun *et al*., 2018). متأسفانه، بیشتر آفت‌کش‌هایی که امروزه در کشاورزی به‌کار می‌روند، وظیفه خود را به‌طور کامل انجام نمی‌دهند و بقایای آنها در طبیعت به آلوده‌شدن منابع خاک، آب و هوای اطراف می‌انجامد که سایر موجودات زنده مانند حیوانات، گیاهان و انسان‌ها را نیز تحت‌تأثیر نامطلوب خود قرار می‌دهند. به‌عنوان‌مثال، ترکیباتی چون آرسنیک، کلروپیریفوس[3] و بنفیوراکراب[4] از جمله آفت‌کش‌های متداول هستند که آثار سوء و مخرب فراوانی به‌واسطه ایجاد مسمومیت عصبی، مسمومیت سمی و سرطان‌زایی بر سلامت انسان‌ها دارند (Gomes *et al*., 2014; Gil-Díaz *et al*., 2016; Sun *et al*., 2018). بر این اساس، چالش عظیمی که امروزه انسان با آن روبه‌روست، حفظ و احیای آب، خاک و رسیدن به سطحی مطلوب از کیفیت است که دیگر، خطری برای سلامت محیط‌زیست و انسان‌ها نباشد. با این وجود، روش‌های سنتی احیا و ترمیم چندان مؤثر نبوده، سخت و هزینه‌بر است و ممکن است آلودگی‌های خاص خود را نیز در پی داشته‌باشد. روش پاک‌سازی محیط‌زیست با استفاده از نانو ذرات، به‌عنوان یک جایگزین امیدبخش، مورد مطالعه فراگیر بوده و در مقایسه با شیوه متعارف و متداول، کم‌هزینه‌تر و با کارایی بیشتر است. چراکه مبنای آن بر پایه نانوذرات است که از ظرفیت واکنش با آلاینده‌ها برخوردار بوده و قادر است در قالب ترکیبات کمتر سمی و یا با جذب مولکول‌های آلاینده، آن‌ها را ناتوان و بی‌اثر کند. فرآیند پاک‌سازی توسط نانوذرات، در مقایسه با روش‌های سنتی، از برخی مزایا مانند زمان کوتاه‌تر برای تکمیل فرایند پاک‌سازی برخوردار است. علت آن است که نانوذرات به کار برده شده در این فرآیند، گستره سطحی بیشتری داشته و در نتیجه، واکنش بیشتری از خود نشان می‌دهند. پاک‌سازی و احیای غیر زیستی خاک‌های آلوده به‌کمک فناوری نانو، به‌واسطه اندازه بسیار کوچک ذرات، توجه روزافزون را جهت ترمیم خاک‌های آلوده به خود جلب کرده‌است (Mueller & Nowack, 2010; Adeleye *et al*., 2013; Gil-Díaz *et al*., 2016). ادغام دو شیوه پاک‌سازی مؤثر و بسیار کارآمد یعنی (نانو–بیو)، کشف غیرمنتظره بسیار بزرگی در مقوله آلودگی‌زدایی خاک می‌باشد. این بدان معناست که استفاده از نانو مواد می‌تواند سمیت آلاینده‌های خاک و گیاه را به‌طور هم‌زمان، کاهش

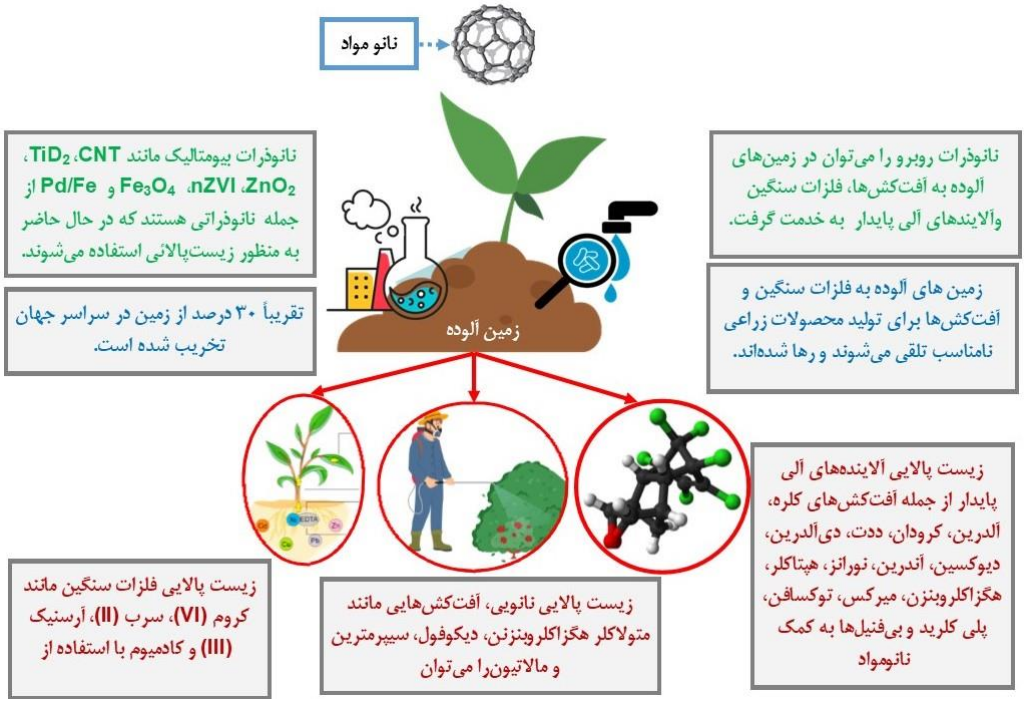
1. Magnetic nanoparticles
2. Nanoremediation
3. Chloropyrifos
4. Benfuracarb

دهد. نانو مواد می‌توانند کارایی آلودگی‌زدایی فلزات سنگین در خاک‌های آلوده و گیاه را به‌طور معناداری بهبود بخشند. علاوه بر مزایای متعدد کاربرد فناوری نانو به‌عنوان اصلاح‌کننده، محققان بر این باورند که مشکلات و محدودیت‌های زیادی در کاربرد این مواد وجود دارد. Sun *et al*. (2021) پیشرفت کاربرد نانو مواد برای اصلاح در خاک آلوده را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه ضمن برشمردن مزایای بسیار مواد نانو مانند نرخ اصلاح بسیار بالا بیان می‌گردد که هنوز مشکلات و محدودیت‌های زیادی در کاربرد این مواد وجود دارد. از جمله اینکه بیشتر تحقیقات روی نانو مواد برای اصلاح در خاک آلوده هنوز در مراحل آزمایشگاهی متوقف است. نتایج مطالعات در زمینه کاربرد میدانی مواد نانو در سایت‌های آلوده و خاک‌های آلوده، تحقیقات در مورد ایمنی زیست‌محیطی فناوری نانو به‌کاررفته در اصلاح خاک‌های آلوده مشخص نیست .بنابراین، هنوز مشخص نیست که آیا استفاده در مقیاس وسیع از مواد نانو اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست خواهد داشت یا خیر و کاربرد مواد نانو در اصلاح خاک و آب نیازمند تحقیقات گسترده‌تر با نتایج شفاف می‌باشد.

Singh & Lee (2016)، تأثیر نانو دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) را بر انباشتگی کادمیوم توسط گیاه سویا در خاک بررسی کرده و نتیجه گرفتند که افزودن TiO_2 میزان جذب کادمیوم در گیاهان را بهبود داده و مقدار سمیت کادمیوم وارد شده به گیاه سویا و همچنین آسیب اکسیداتیو و رادیکال‌های آزاد ناشی از سمیت کادمیوم را کاهش داده‌است. آلاینده‌های چسبیده به نانوذرات می‌توانند به‌طور هم‌زمان، با نانو ذرات بسیار کوچک، به‌وسیله گیاهان جمع و انباشته شوند. Liang *et al*. (2017) تأثیر هم‌افزایی نانو- هیدروکسی اپتیت (NHAP) و نانو- کربن سیاه (NCB)[1] بر فرآیند سمیت زدایی خاک تحت کشت چاودار (*Lolium temulentum* L.) از خاک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که به کار بردن NHAP و یا NCB، به‌طور معناداری شدت اثرات سمی سرب در چاودار را کاهش داده است.

Bakshi *et al*. (2020) بیان می‌کنند که بیشترین کاربردهای مورد انتظار نانوتکنولوژی برای اصلاح بخش‌های محیطی مانند آب و خاک بوده‌است. این‌ها شامل تصفیه فاضلاب، پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی و اصلاح خاک‌های آلوده به آلاینده‌ها است. افزایش استفاده و کاربرد روش‌ها، دستگاه‌ها یا مواد مبتنی بر نانو برای پاک‌سازی محیط‌زیست احتمالاً ناشی از نیاز فوری به فناوری پاک‌تر، مقرون‌به‌صرفه تر، آسان‌تر و در دسترس و مقرون‌به‌صرفه است و در حین حال سریع‌تر در ارائه نتایج بدون بار اضافی به فرآیند پاک‌سازی در قالب پسماندها و پایداری محیطی است. بنابراین استفاده از نانوذرات (NPs) یا نانومواد حاوی نانوذرات برای اصلاح خاک آلوده به مواد شیمیایی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و POPها[2] که عمدتاً در چرخه طبیعت غیرقابل تجزیه زیستی هستند، به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته‌است (شکل ۴). کاربردهای مختلف بر پایه فناوری نانو که برای اصلاح خاک استفاده می‌شوند عبارتند از نانوتکنولوژی برای اصلاح خاک ۱- مواد بر پایه نانو برای تبدیل فلزات سنگین به اشکال کمتر سمی آنها، ۲- نانومواد برای استفاده در آفت‌کش‌ها، ۳- حسگرهای بر پایه نانو برای شناسایی بقایای آفت‌کش در خاک و ۴- گیاه پالایی یا زیست‌پالایی خاک آلوده به‌کمک نانومواد.

1. Nano-Carbon Black
2. Persistnt Organic Pollutant



شکل ۴. استفاده از نانوذرات برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و آلاینده‌های آلی پایدار (Bakshi *et al.*, 2020)

نانوذرات که بیشترین استفاده را برای اصلاح خاک دارند شامل آهن صفر ظرفیتی در مقیاس نانو (nZVI)، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO)، نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs)، فولرن‌ها، نانوذرات دو فلزی و نانوذرات تثبیت‌شده می‌باشند. نانومواد به‌دلیل اندازه و خواص خود دارای سطح بسیار بزرگ‌تری هستند و در نتیجه مکان‌های جذب بالاتری دارند که آنها را به‌عنوان جاذب بسیار خوبی معرفی می‌کند. از دیگر خواص مفید آنها می‌توان به تغییر دمای پایین‌تر، فاصله انتشار کوتاه‌تر بین ذرات[1]، اندازه قابل تنظیم‌تر منافذ[2] و شیمی سطح متفاوت[3] اشاره کرد. این خصوصیات آنها را قادر می‌سازد تا کاتالیزورهای قابل‌توجهی باشند که می‌توانند احیای شیمیایی و همچنین کاتالیزور برای کاهش آلاینده‌های مربوطه را ممکن سازند. بنابراین نانومواد توجه زیادی را به خود جلب کرده و به‌طور گسترده برای اصلاح محیط‌های خاک آلوده به شدیدترین آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین، حلال‌های آلی کلردار، آفت‌کش‌های آلی کلر، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) و بی‌فنیل‌های پلی‌کلر (PCBs) مورد توجه قرار می‌گیرند.

در میان کاربردهای مختلف نانوتکنولوژی، تصفیه آب یکی از آینده‌نگرترین کاربردهای فناوری نانو در نظر گرفته‌می‌شود، که در آن تعداد زیادی از مواد نانو ساختار می‌توانند آب را با استفاده از چندین روش مکانیکی مختلف اصلاح کنند. بر همین اساس Hussain *et al.* (2022) نانو مواد بر پایه کربن با ویژگی‌های چند منظوره برای تصفیه آب را مورد بررسی قرار دادند. برای دستیابی به این امر، نانومواد را می‌توان با اجزای فعال ترکیب و اصلاح کرد تا نانوکامپوزیت‌های مختلف با تنوع ساختاری و

1. Shorter interparticle diffusion distance
2. More tunable pore size
3. Different surface chemistry

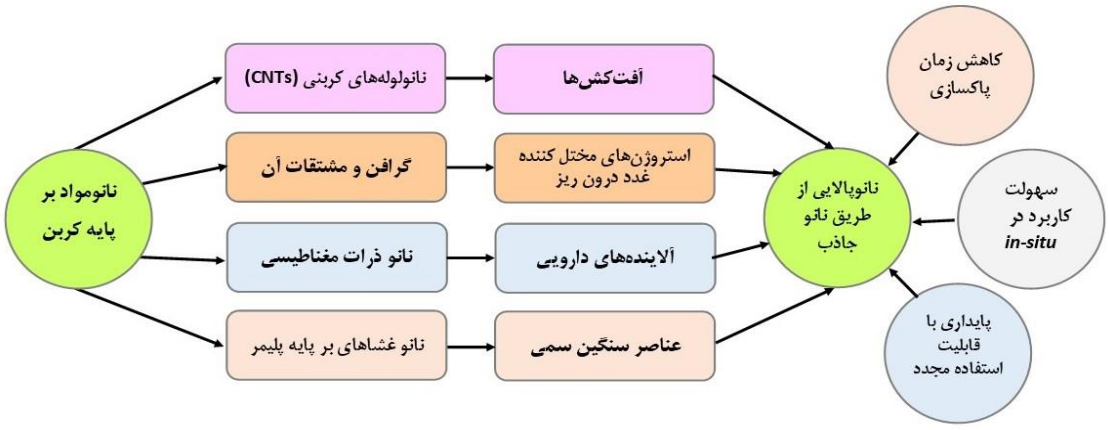
ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فرد ایجاد شود. در این بررسی، یک نمای کلی به‌روز از مواد نانو ساختار مختلف به‌عنوان نانوجاذب‌ها، مانند نانومواد بر پایه کربن، نانوکامپوزیت‌ها و نانوغشاها برای پاک‌سازی آلاینده‌های بر پایه آفت‌کش‌ها از سیستم‌های آبی با استفاده از CNT ارائه شد (شکل ۵). قابل‌ذکر است که نانومواد با توجه به مساحت سطح قابل‌توجه، توانایی جذب بالا و انتخاب پذیری و سازگاری محیطی عالی، قادر به حذف مؤثر آلاینده‌های محیطی هستند.

Mohanty *et al.* (2022) بیان کردند که نانوتکنولوژی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد واکنش‌پذیری بالا، انتخاب‌پذیری و تطبیق‌پذیری، پتانسیل زیادی در پرداختن به مشکلات پیچیده و ایجاد رویکردهای نوآورانه در اصلاح خاک نشان داده‌است. نانو گیاه پالایی (نانومواد به کار رفته همراه با گیاه پالایی) یک فناوری سبز است که شامل مواد نانو مقیاس مورد استفاده برای جذب آلاینده‌ها می‌شود، دسترسی گیاهی آن را افزایش می‌دهد و باعث رشد گیاه می‌شود. به‌عنوان‌مثال آهن صفر ظرفیتی در مقیاس نانو به‌دلیل کاربردهای مهندسی موفق آن در تصفیه خاک و آب‌های زیرزمینی آلوده، نانوذره پرکاربرد برای تسهیل گیاه پالایی است.

Roy *et al.* (2021) در یک مطالعه مروری، نقش نانومواد برای پاک‌سازی آلاینده‌های محیطی را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله ضمن برشمردن خطرات مختلف زیستی آلاینده‌ها، مانند عدم رشد و فرسایش ژنتیکی بر موجودات زنده (گیاهی و جانوری)، روش‌های سنتی حذف آلاینده‌ها و عوارض جانبی آنها را مورد بررسی قرار داده و سپس نقش نانوتکنولوژی و نانومواد در پاک‌سازی آلاینده‌ها را مطالعه کردند. در ادامه ضمن بر شمردن محدودیت‌های روش‌های سنتی، نانو مواد در حوزه اصلاح آب و خاک مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه‌گیری کردند که نانومواد به‌دلیل سطح وسیع و واکنش‌پذیری بالا، در پاک‌سازی محیطی بهتر از سایر روش‌های مرسوم عمل می‌کنند. به‌دلیل قابلیت‌های متفاوت نانوذرات در ابعاد مختلف، آنها را می‌توان برای استفاده‌های خاص تغییر داد تا ویژگی‌های جدید ارائه دهد. با توجه به نسبت بزرگ سطح به حجم و وجود تعداد بیشتری از مکان‌های واکنش‌پذیر، مواد نانو مقیاس می‌توانند بسیار واکنش‌پذیر باشند. این ویژگی‌ها امکان تعامل بیشتر با آلاینده‌ها را فراهم می‌کند و منجر به کاهش سریع غلظت آلاینده‌ای موجود در آب و خاک می‌شود.

سمیت‌شناسی نانوذرات

با وجود نتایج امیدوارکننده استفاده و کاربردهای نانوذرات در کشاورزی نگرانی‌هایی نیز در زمینه استفاده از آنها در بخش‌های مختلف وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۵. نانومواد مبتنی بر کربن با ویژگی‌های چند منظوره برای نانوپالایی (Hussain *et al.*, 2022)

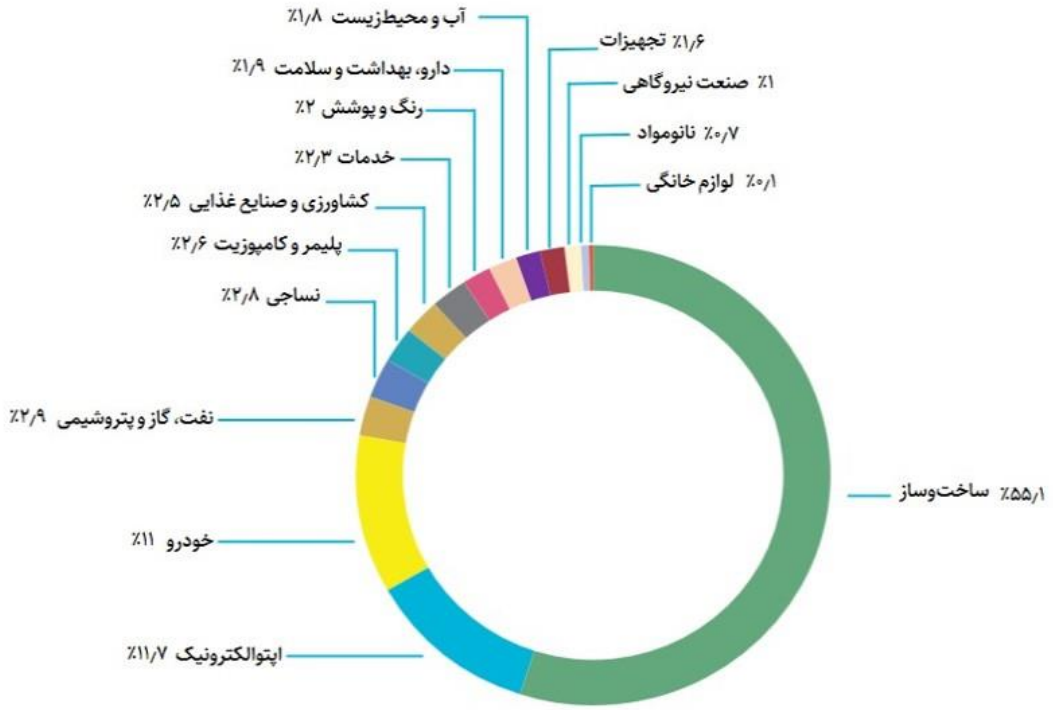
سمیت نانومواد مورد استفاده در اکوسیستم کشاورزی یکی از نگرانی‌های کلیدی است. بنابراین، سمیت و تأثیر نانوذرات آزادشده بر محیط و گیاهان باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از این موارد برهمکنش نانوذرات آزادشده در خاک می‌باشد که منجر به تغییر خواص فیزیکی شیمیایی خاک می‌شود. گزارش‌های کمی در مورد تغییر در pH خاک، محتوای خاک آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی در تعامل با نانوذرات نقره (AgNPs) وجود دارد. افزون بر این، گزارش شده‌است که استفاده از TiO_2 و نانوذرات ZnO فلورو پوشش باکتریایی موجود در محیط را تغییر داد. افزون بر این، گیاهان به‌دلیل سطح زیاد سیستم برگ و ریشه، مستقیماً با نانوذرات تعامل دارند و در نتیجه تجمع آنها سمیت گیاهی را ایجاد می‌کنند. نانوذرات با اندازه کوچک از طریق جذب وارد بافت گیاه می‌شوند و تأثیر منفی بر سیستم گیاه دارند. سمیت گیاهی نانوذرات به‌اندازه و غلظت آنها بستگی دارد. مشاهده شده‌است که نانوذرات در محدوده ۵ تا ۱۰ نانومتر دارای بیشترین میزان سمیت هستند (Mishra *et al*., 2017). گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) معمولاً در سیستم‌های بیولوژیکی در پاسخ به نفوذ نانوذرات تولید می‌شوند، که می‌تواند عملکردهای معمول بیوفیزیکوشیمیایی و مرتبط با تنش غیرزیستی (Radhakrishnan *et al*., 2018) و تنظیم ژن‌های مرتبط با مبارزه با استرس را مختل کند و منجر به اثرات آسیب ژنتیکی خاص نانوذرات شود (Ma *et al*., 2015; Mirzajani *et al*., 2013). در پاسخ به نفوذ نانوذرات، ROS باعث بروز دیگر اثرات سمی مانند نشت یون و مرگ سلولی می‌شود که به‌دلیل تنش اکسیداتیو و ناهنجاری در غشای سلولی است که ناشی از تغییر ماهیت لیپیدهای غشای سلولی است. واکنش گیاه و نانوذرات می‌تواند بر متابولیسم ثانویه گیاه، هموستاز هورمونی و رشدونمو گیاه تأثیر منفی بگذارد. تجزیه و تحلیل اخیر ترانسکریپتوم‌ها در گیاه آرابیدوپسیس نشان داد که قرار گرفتن در معرض نانوذرات، بیان ژن‌های خاص مرتبط با کمبود فسفات، عوامل بیماری‌زا و پاسخ به تنش را سرکوب می‌کند و اثرات منفی احتمالی بر مکانیسم‌های دفاعی گیاه و رشد ریشه دارد (Sanzari *et al*., 2019). نانوذرات همچنین می‌توانند توزیع مواد مغذی را مختل کنند که بر رشد و نمو مطلوب تأثیر می‌گذارد. استفاده از نانوذرات CeO_2 باعث اختلال در توانایی تثبیت N_2 توسط گیاه سویا شد (Priester *et al*., 2012)، که در نتیجه دسترسی نیتروژن را در گیاه کاهش داد و بر رشد و عملکرد طبیعی آن تأثیر گذاشت (Schwabe *et al*., 2013). علاوه بر این، بعضی از نانومواد مانند TiO_2 بسیار مقاوم هستند و با استفاده طولانی مدت از آنها، باعث تجمع فلز در محیط می‌شود. مکانیسم‌های بالقوه برای کاهش تنش ناشی از نانوذرات عبارتند از افزایش استفاده از ترکیبات آنتی‌اکسیدان و کاهش بیان ژن‌های مسئول انتقال فلز برای جلوگیری از جذب بیشتر فلز (Taylor *et al*., 2014). بنابراین قبل از بررسی تأثیر نانوذرات در سیستم گیاه، تعیین خصوصیات نانوذرات سنتزشده برای جلوگیری از هرگونه خطر (انسانی و محیطی) مرتبط با استفاده و کاربرد این نانوذرات مهم است. شناسایی نشانگرهای پروتئینی از طریق تحقیقات پروتئومیکس، اطلاعات بیشتری در مورد سمیت‌های ناشی از نانوذرات در سطح پروتئوم فراهم می‌کند. همچنین آزمایش‌های گیاه‌شناسی کامل در محیط درون شیشه و خارج از آن[1] برای اطمینان از استفاده

1. *In vitro* and *In vivo*

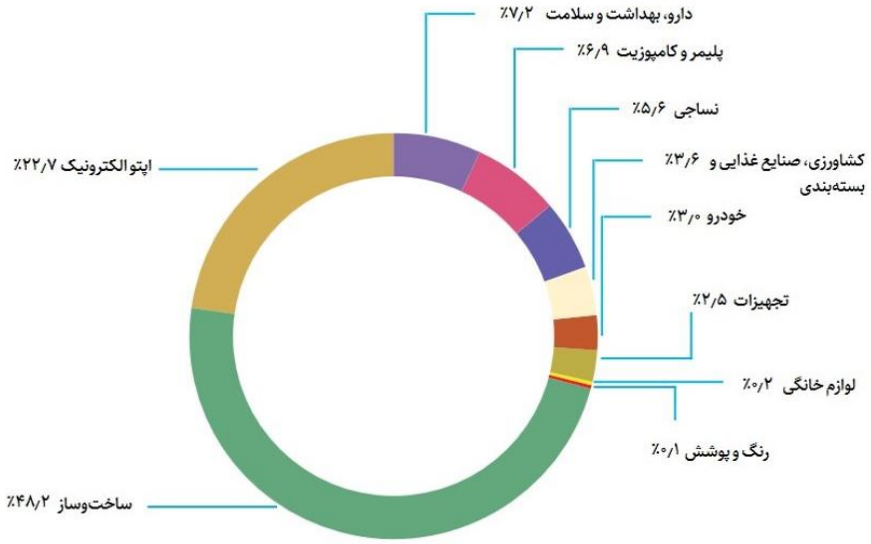
کارآمد از مواد مغذی نانویی با حداقل یا بدون سمیت قبل از تجاری‌سازی هر گونه محصولات کشاورزی نانویی مورد نیاز است (Pradhan *et al.*, 2013). در نهایت، تعامل سه‌جانبه نانوذرات با گیاهان، خاک و فلور میکروبی خاک باید قبل از استفاده تجاری از نانوذرات مرتبط با کشاورزی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و تأکید بیشتری بر ساخت و کاربرد نانوذرات سنتز شده بیولوژیکی برای فرآیندهای کشاورزی شود (Chen & Yada, 2011).

نانو زیست‌فناوری کشاورزی در ایران

براساس سند گسترش کاربرد فناوری نانو در افق ۱۴۰۴ (ستاد توسعه فناوری نانو، ۱۳۹۶) به‌منظور گسترش کاربرد فناوری نانو در صنایع کشاورزی (زراعت، باغبانی، دام، آب و خاک) دو مأموریت ویژه محول شده‌است که شامل ۱- ا فزایش ارزش‌افزوده در محصولات کشاورزی و غذایی، کاهش ضایعات، افزایش تولید و افزایش سهم یک تا دو درصدی سهم بازار محصولات نانوفناوری و به‌کارگیری آنها با استفاده از دانش فنی و نانومواد افزودنی تولید داخل با فناوری بومی و ۲- ارائه دستورالعمل‌ها و مجوزهای لازم به محصولات نانو ساخت داخل با فناوری بومی با انجام آزمون‌های عملکرد و میدانی می‌باشد. طبق آخرین آمار ارائه‌شده توسط ستاد نانو کشور در سال ۱۳۹۸ حجم بازار نانو ایران ۷۴ درصد نسبت به سال قبل آن رشد داشته‌است. در پایان سال ۱۳۹۸ در مجموع ۲۳۴ شرکت در زمینه تولید محصولات، تجهیزات و خدمات این حوزه فعال بوده و رقم کلی‌فروش محصولات و خدمات آنها معادل ۴۵ هزار میلیارد ریال بوده‌است که شش درصد آن مربوط به صادرات کالا و خدمات به خارج از کشور بوده‌است. بیش از ۵۵ درصد از حجم بازار کالای نانو کشور مربوط به حوزه ساخت و ساز بوده و بخش کشاورزی و صنایع‌غذایی تنها ۲/۵ درصد از این بازار را به‌به خود اختصاص داده‌است (شکل ۶). همچنین حوزه کشاورزی ۳/۶ درصد بخش صادرات کالا، تجهیزات و خدمات فناوری کشور را به خود اختصاص داده‌است (شکل ۷).



شکل ۶. آمار فروش کلی شرکت‌های نانو داخلی در سال ۱۴۰۰ به تفکیک حوزه‌های صنعتی در تولید کالا



شکل ۷. سهم حوزه‌های مختلف از صادرات کالا، تجهیزات و خدمات فناوری نانو ایران در سال ۱۳۹۸ (گزارش سالانه ستاد توسعه فناوری نانو)

Rezaei *et al.* (2009) موانع توسعه فنّاوری نانو در بخش کشاورزی ایران از دیدگاه محققان را مورد بررسی قرار دادند بر اساس این تحقیق، توجه به زیرساخت‌ها و امکانات سخت‌افزاری برای توسعه این فناوری ضروری است که باید مورد شناسایی، تقویت و استفاده بهینه قرار گیرند؛ بی‌گمان، هرگونه کوتاهی در این زمینه فرایند توسعه فناوری نانو را به تأخیر خواهد انداخت. همچنین، درک عمومی و نگرش به یک فنّاوری در حال ظهور می‌تواند تأثیر عمیقی بر دامنه استفاده و کاربرد آن فناوری داشته‌باشد. نگرش و درک اشتباه و حتی نبود یک درک عمومی از یک فنّاوری خاص، به واکنش منفی افراد درباره آن فنّاوری می‌انجامد. این موضوع بر اهمیت و ضرورت برنامه‌های اطلاع رسانی و آگاهی سازی تأکید دارد که همواره به‌منزله یکی ازمؤلفه های اصلی فرایندتوسعهٔ فنّاوری نانو در کشورهای پیشرو مورد توجه برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران قرار گرفته‌است، به‌گونه‌ای که از آن به دروازه‌های طلایی ورود به عرصه فناوری نانو یاد می‌کنند. با توجه به یافته‌های تحقیق، یکی دیگر از موانع و مشکلات اصلی توسعه فنّاوری نانو در بخش کشاورزی ایران، موارد قانونی اند که فرایند توسعه فنّاوری نانو را با دشواری مواجه ساخته‌اند. Soleimanipour *et al.* (2011) چالش‌های تجاری‌سازی فناوری نانو در بخش کشاورزی ایران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان‌می‌دهد که چالش‌ها در شش گروه چالش‌های زیرساختی، دانشی، ساختاری، اقتصادی، سیاست‌گذاری و زیست‌محیطی به‌ترتیب بر اساس میزان تأثیر آن‌ها دسته‌بندی می‌شوند. چالش‌های زیرساختی مهم‌ترین چالش‌های تأثیرگذار بر تجاری‌سازی فناوری‌نانو در بخش کشاورزی هستند، چالش‌های دانش به‌عنوان دومین چالش مهم نانوتکنولوژی تجاری‌سازی در بخش کشاورزی ایران قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان‌می‌دهد که چالش‌های سیاست‌گذاری نیز بر تجاری‌سازی فناوری نانو در بخش کشاورزی ایران تأثیرگذار است. به‌طور فزاینده‌ای آشکار می‌شود که تجاری‌سازی فناوری‌های مدرن مانند نانو به یک چهارچوب نظارتی جامع و کاملاً یکپارچه برای رسیدگی به مسائل محدوده نیاز دارد. سیاست‌های حمایتی مانند

حقوق مالکیت معنوی قطعاً بر تشویق مشارکت بخش خصوصی در توسعه فناوری‌های نانو تأثیر خواهد داشت .چالش‌های اقتصادی نیز بر فرآیند تجاری‌سازی تأثیر می‌گذارند، زیرا فناوری‌های نانو حوزه‌های تحقیقاتی فشرده‌ای هستند که برای دستیابی به منافع قابل‌توجه به منابع مالی مناسب نیاز دارند. بر اساس گزارش ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، در سال ۱۳۹۵ تنها شش محصول فناوری نانو در حوزه کشاورزی و صنایع‌غذایی معرفی شد. این محصولات شامل پوشش‌های نانو ساختار سخت و مقاوم با اعمال بر روی سطوح قطعات صنعتی، ابزارها و قالب‌ها که تحت خوردگی، سایش و فرسایش هستند، نایلون زیست تخریب‌پذیر، پوشش گلخانه، نانو آفت‌کش گیاهی، دستگاه نانوکویتاسیون صنعتی، دستگاه مولد پلاسمای سرد برای افزایش زمان ماندگاری و استریلیزاسیون در صنایع‌غذایی و افزایش جوانه‌زنی بذر هستند. اما در سال ۱۴۰۰ بیش از ۵۰ محصول پرکاربرد نانویی در حوزه کشاورزی توسط شرکت‌های داخلی روانه بازار شده‌است که این نشان از گسترش فناوری نانو در صنعت کشاورزی دارد. بر اساس نتایج تحقیق Dddehvari & Hosseini (۲۰۱۳) با عنوان بررسی تأثیر تولید و پذیرش محصولات نانو فناوری بر کشاورزی پایدار از دیدگاه محققان کشاورزی در ایران، کاربردهای نانو تکنولوژی اولین متغیر از مجموعه تأثیرات و عوامل مؤثر و یا تاثیرپذیر از نانو محصولات است که در پیش‌بینی سطح پایداری کشاورزی بیشترین تأثیر را به خود اختصاص داده‌است. هر کدام از کاربردهای محصولات نانو به‌تنهایی و در مجموع هم‌بستگی بالایی را با پایداری کشاورزی دارند. به این ترتیب از دید محققان، عاملی مانند افزایش تولیدات کشاورزی که از کاربردهای نانو می‌باشد به‌نوعی توسعه دهنده‌ی زیرساخت‌های لازم برای پایداری کشاورزی می‌باشد. در واقع استفاده از فناوری نانو باعث ایجاد استانداردهایی برای گسترش و توسعه هرچه بیشتر عوامل مؤثر در پایداری کشاورزی می‌شود. فناوری نانو چه در بعد سخت‌افزاری و چه در بعد نرم‌افزاری، حرکت به‌سوی پایداری کشور را هموارتر می‌کند، که در اینجا می‌توان به این نکته اشاره کرد که از دید محققان، ریسک‌ها و خطرات احتمالی در مقابل محدودیت هایی‌که ممکن است در آینده برای تولید غذای مورد نیاز جمعیت کشور ایجاد شود، بسیار ناچیز و قابل‌اغماض می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن گسترش عرضه فعالیت‌های نانو در بیشتر حوزه‌های کشاورزی شامل گیاهان دارویی، جنگل و مرتع، خاک، آب، باغبانی و گیاه‌پزشکی، صنایع‌غذایی و دیگر حوزه‌ها، توجه به توانمندسازی نیروی‌انسانی لازم به‌عنوان زیرساخت برای ارائه خدمات علمی را محرز می‌کند. در این موقعیت فعالیت‌هایی مانند ترویج و آموزش کشاورزی با فلسفه و وظیفه‌های که در ذات آن وجود دارد وارد عرصه می‌شود و می‌تواند نقش به سزایی داشته‌باشد .در معرفی نانو به‌عنوان عامل پایدار سازنده کشاورزی و ارائه دادن آموزش‌های لازم به‌تمامی اقشار درگیر در این فناوری، محققان و دست اندرکاران در این امر نیز با اشراف بر این مسئله دومین عامل مؤثر و پیش‌بینی برای پایداری کشاورزی را ترویج و آموزش فناوری نانو دانسته‌اند.

نتیجه‌گیری

فعالیت کشاورزی برای اقتصاد خیلی از کشورها، امری حیاتی و بسیار مهم است. بیش از ۶۰ درصد از جمعیت جهان برای ادامه زندگی و تأمین معاش، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به کشاورزی وابسته‌اند (Ali *et al.*, 2014). محدودیت‌های منابع‌طبیعی (زمین‌های قابل کشت، آب، خاک)، رشد فزاینده جمعیت در سطح جهان، لزوم افزایش امنیت جهانی غذا و تغییر اقلیم، رشد و توسعه کشاورزی را بر آن می‌دارد تا هرچه بیشتر اقتصادی‌تر و به‌لحاظ زیست‌محیطی و کارایی، پایدارتر باشد (Parisi *et*

al., 2015; Prasad *et al*., 2014). بنابراین برای اجرای تغییر در افزایش قابلیت‌ها در کشاورزی، تغییر و کاهش اندازه اتمی و مولکولی باعث می‌شود تا تبادل بین مولکول‌ها امکان‌پذیر شده و در پی آن به مواد جدید دست یافته شود. فناوری نانو با ارائه روش‌های نوین، صنعت کشاورزی را متحول ساخته‌است. افزایش توانایی گیاهان در جذب مواد مغذی، استفاده مؤثرتر و هدفمندتر از نهاده‌های کشاورزی، تشخیص و کنترل سریع بیماری‌ها، افزایش مقاومت در برابر تنش‌های محیطی از جمله توانایی‌های بوده است که با ورود نانو زیست‌فناوری به عرصه کشاورزی تحقق یافته‌است.

REFRRANCES

Abdel Latef, A. A. H., Srivastava, A. K., El-sadek, M. S. A., Kordrostami, M., & Tran, L. S. P. (2018). Titanium dioxide nanoparticles improve growth and enhance tolerance of broad bean plants under saline soil conditions. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1065-1073.

Abdollahdokht, D., Gao, Y., Faramarz, S., Poustforoosh, A., Abbasi, M., Asadikaram, G., & Nematollahi, M. H. (2022). Conventional agrochemicals towards nano-biopesticides, An overview on recent advances. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1),1-19.

Adeleye, A. S., Keller, A. A., Miller, R. J., & Lenihan, H. S. (2013). Persistence of commercial nanoscaled zero-valent iron (nZVI) and by-products. *Journal of Nanoparticle Research*, 15(1), 1-18.

Adisa, I. O., Pullagurala, V. L. R., Peralta-Videa, J. R., Dimkpa, C. O., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L., & White, J. C. (2019). Recent advances in nano-enabled fertilizers and pesticides, a critical review of mechanisms of action. *Environmental Science, Nano*, 6(7), 2002-2030.

Agrawal, S., & Rathore, P. (2014). Nanotechnology pros and cons to agriculture, a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied sciences*, 3(3), 43-55.

Ali, M. A., Rehman, I., Iqbal, A., Din, S., Rao, A. Q., Latif, A., Samiullah, T.R., Azam, S., & Husnain, T. (2014). Nanotechnology, a new frontier in Agriculture. *Advances in Life sciences*, 1(3), 129-138.

Alvarado, K., Bolaños, M., Camacho, C., Quesada, E., & Vega-Baudrit, J. (2019). Nanobiotechnology in agricultural sector, Overview and novel applications. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 10(02), 120.

Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M., & Byrt, C. S. (2019). Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy*, 9(5), 246.

Bakshi, M., & Abhilash, P. C. (2020). Nanotechnology for soil remediation, Revitalizing the tarnished resource. *In Nano-materials as photocatalysts for degradation of environmental pollutants* (pp. 345-370). Elsevier.

Bardos, P., Merly, C., Kvapil, P., & Koschitzky, H. P. (2018). Status of nanoremediation and its potential for future deployment, Risk-benefit and benchmarking appraisals. *Remediation Journal*, 28(3), 43-56.

Bhattacharyya, A., Duraisamy, P., Govindarajan, M., Buhroo, A. A., & Prasad, R. (2016). Nano-biofungicides, emerging trend in insect pest control. *Advances and applications through fungal nanobiotechnology*, 307-319.

Borgatta, J., Ma, C., Hudson-Smith, N., Elmer, W., Plaza Perez, C. D., De La Torre-Roche, R., Zuverza-Mena, N., Hynes, C.L., White, J.C., & Hamers, R.J. (2018). Copper based nanomaterials suppress root fungal disease in watermelon (*Citrullus lanatus*), role of particle morphology, composition and dissolution behavior. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 14847-14856.

Chen, H., & Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture, new tools for sustainable development. *Trends in Food Science & Technology*, 22(11), 585-594.

Chhipa, H. (2017). Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental chemistry letters*, 15(1), 15-22.

Chugh, B., Poddar, D., Singh, A., Yadav, P., Thakur, S., Nguyen, T. A., & Rajendran, S. (2022). Nanoparticles-based sensors for agricultural application. *In Nanosensors for Smart Agriculture* (pp. 117-146). Elsevier.

Chugh, B., Poddar, D., Singh, A., Yadav, P., Thakur, S., Nguyen, T. A., & Rajendran, S. (2022). Nanoparticles-based sensors for agricultural application. *In Nanosensors for Smart Agriculture* (pp. 117-146). Elsevier.

Cui, J., Li, Y., Jin, Q., & Li, F. (2020). Silica nanoparticles inhibit arsenic uptake into rice suspension cells via improving pectin synthesis and the mechanical force of the cell wall. *Environmental Science, Nano*, 7(1), 162-171.

Dasgupta, N., Ranjan, S., & Ramalingam, C. (2017). Applications of nanotechnology in agriculture and water quality management. *Environmental Chemistry Letters*, 15(4), 591-605.

Demirer, G. S., Zhang, H., Matos, J., Goh, N., Cunningham, F. J., Sung, Y., Chang, R., Aditham, A.J., Chio, L., Cho, M.J., Staskawicz, B., & Landry, M.P. (2019). High aspect ratio nanomaterials enable delivery of functional genetic material without DNA integration in mature plants. *Nature nonotechnology*,14, 456-464.

Didehvari, S., & Hosseini FSJ, (2013) Investigating the effect of production and acceptance of nanotechnology products on sustainable agriculture from the perspective of agricultural researchers. *Agricultural Extension and Education Research*, 2, 3 (In Persian)

Dimkpa, C. O., White, J. C., Elmer, W. H., & Gardea-Torresdey, J. (2017). Nanoparticle and ionic Zn promote nutrient loading of sorghum grain under low NPK fertilization. *Journal of agricultural and food chemistry*, 65(39), 8552-8559.

Elsayed, A. A., Ahmed, E. G., Taha, Z. K., Farag, H. M., Hussein, M. S., & AbouAitah, K. (2022). Hydroxyapatite nanoparticles as novel nano-fertilizer for production of rosemary plants. *Scientia Horticulturae*, 295, 110851.

Gahukar, R. T., & Das, R. K. (2020). Plant-derived nanopesticides for agricultural pest control, challenges and prospects. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(1), 1-9.

Genc, Y., Taylor, J., Lyons, G., Li, Y., Cheong, J., Appelbee, M., K., Oldach, & Sutton, T. (2019). Bread wheat with high salinity and sodicity tolerance. *Frontiers in plant science*, 10, 1280.

Gil-Díaz, M., Diez-Pascual, S., González, A., Alonso, J., Rodríguez-Valdés, E., Gallego, J. R., & Lobo, M. C. (2016). A nanoremediation strategy for the recovery of an As-polluted soil. *Chemosphere*, 149, 137-145.

Gil-Díaz, M., González, A., Alonso, J., & Lobo, M. C. (2016). Evaluation of the stability of a nanoremediation strategy using barley plants. *Journal of environmental management*, 165, 150-158.

Giraldo, J. P., Wu, H., Newkirk, G. M., & Kruss, S. (2019). Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. *Nature nanotechnology*, 14(6), 541-553.

Gogos, A., Knauer, K., & Bucheli, T. D. (2012). Nanomaterials in plant protection and fertilization, current state, foreseen applications, and research priorities. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(39), 9781-9792.

Gomes, H. I., Fan, G., Mateus, E. P., Dias-Ferreira, C., & Ribeiro, A. B. (2014). Assessment of combined electro–nanoremediation of molinate contaminated soil. *Science of the total environment*, 493,178-184.

Huang, Z., Rajasekaran, P., Ozcan, A., & Santra, S. (2018). Antimicrobial magnesium hydroxide nanoparticles as an alternative to Cu biocide for crop protection. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(33), 8679-8686.

Hussain, A., Rizwan, M., Ali, Q., & Ali, S. (2019). Seed priming with silicon nanoparticles improved the biomass and yield while reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat grains. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(8), 7579-7588.

Hussain, N., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2022). Carbon-based nanomaterials with multipurpose attributes for water treatment, Greening the 21st-century nanostructure materials deployment. *Biomaterials and Polymers Horizen*, 1(1),1-11.

Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature nanotechnology*, 14(6), 532-540.

Kavanagh, E. W., & Green, J. J. (2022). Toward gene transfer nanoparticles as therapeutics. *Advanced Healthcare Materials*, 11(7), 2102145.

Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., AlMutairi, K. A., & Siddiqui, Z. H. (2017). Role of nanomaterials in plants under challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 194-209.

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

Li, Y., Zhu, N., Liang, X., Bai, X., Zheng, L., Zhao, J., Li, Y., Zhang, Z., & Gao, Y. (2020). Silica nanoparticles alleviate mercury toxicity via immobilization and inactivation of Hg (ii) in soybean (*Glycine max*). *Environmental Science, Nano*, 7(6), 1807-1817.

Liang, L., Zhang, Z., Li, J., Wu, J., Wang, L., Huang, W., & Gao, S. (2017). Direct binding of RNF8 to SUMO2/3 promotes cell survival following DNA damage. *Molecular Medicin Reports*, 16(6), 8385-8391.

Liu, R., & Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environmen*, 514, 131-139.

Liu, J., Wang, F.H., Wang, L.L., Xiao, S.Y., Tong, C.Y., & Liu, X.M. (2008). Preparation of fluorescence starch-nanoparticle and its application as plant transgenic vehicle. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 768-773.

Lowry, G. V., Avellan, A., & Gilbertson, L. M. (2019). Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 517-522.

Ma, C., White, J. C., Dhankher, O. P., & Xing, B. (2015). Metal-based nanotoxicity and detoxification pathways in higher plants. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7109-7122.

Madhuban, G., Rajesh, K., & Arunava, G. (2012). Nano-pesticides-A recent approach for pest control. *The Journal of Plant Protection Sciences*, 4(2), 1-7.

Mirzajani, F., Askari, H., Hamzelou, S., Farzaneh, M., & Ghassempour, A. (2013). Effect of silver nanoparticles on *Oryza sativa* L. and its rhizosphere bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 88, 48-54.

Mishra, S., Keswani, C., Abhilash, P. C., Fraceto, L. F., & Singh, H. B. (2017). Integrated approach of agri-nanotechnology, challenges and future trends. *Frontiers in Plant Science*, 8, 471.

Mohanty, S., Chakraborty, S., Das, M., & Paul, S. (2022). Role of nanomaterials in phytoremediation of tainted soil. *In Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water* (pp. 329-353). Elsevier.

Mueller, N. C., & Nowack, B. (2010). Nanoparticles for remediation, solving big problems with little particles. *Elements*, 6(6), 395-400.

Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490 (7419), 254-257.

Nasrallah, A. K., Kheder, A. A., Kord, M. A., Fouad, A. S., El-Mogy, M. M., & Atia, M. A. (2022). Mitigation of Salinity Stress Effects on Broad Bean Productivity Using Calcium Phosphate Nanoparticles Application. *Horticulturae*, 8(1), 75.

Ningthoujam, R., Jena, B., Pattanayak, S., Dash, S., Panda, M. K., Behera, R. K., Dhal, N.K., & Singh, Y. D. (2022). Nanotechnology in food science. *In Bio-Nano Interface* (pp. 59-73). Springer, Singapore.

Palchoudhury, S., Jungjohann, K. L., Weerasena, L., Arabshahi, A., Gharge, U., Albattah, A., Miller, J., Patel, K., & Holler, R. A. (2018). Enhanced legume root growth with pre-soaking in α-Fe_2O_3 nanoparticle fertilizer *RSC advances*, 8(43), 24075-24083.

Parisi, C., Vigani, M., & Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural nanotechnologies, what are the current possibilities? *Nano Today*, 10(2), 124-127.

Parzymies, M. (2021). Nano-silver particles reduce contaminations in tissue culture but decrease regeneration rate and slows down growth and development of Aldrovanda vesiculosa Explants. *Applied Sciences*, 11(8), 3653.

Pradhan, S., & Mailapalli, D. R. (2017). Interaction of engineered nanoparticles with the agri-environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(38), 8279-8294.

Prasad, R., Kumar, V., & Prasad, K. S. (2014). Nanotechnology in sustainable agriculture, present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(6), 705-713.

Priester, J. H., Ge, Y., Mielke, R. E., Horst, A. M., Moritz, S. C., Espinosa, K., Gelb, J., Walker, S.L., Nisbet, R.M., An, Y., Schimel, J.P., Palmer, R.G., Hernandez-Viezcas, J.A., Zhao, L., Garrdea-Torresdey, J.L., & Holden, P. A. (2012). Soybean susceptibility to manufactured nanomaterials with evidence for food quality and soil fertility interruption. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37), E2451-E2456.

Radhakrishnan, V. S., Dwivedi, S. P., Siddiqui, M. H., & Prasad, T. (2018). In vitro studies on oxidative stress-independent, Ag nanoparticles-induced cell toxicity of Candida albicans, an opportunistic pathogen. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 91-96.

Rai, M., & Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 287-293.

Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2017). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture, current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26), 6487-6503.

Rezaei, R., Hosseini, M., Shabanali Fami, H., & Safa, L. (2009). Identification and Analysis of the Barriers of Nanotechnology Development in the Iranian Agricultural Sector from the Viewpoint of the Researchers. *Journal of Science and Technology Policy*, 2(1), 16-28.

Rizwan, M., Ali, S., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., ur Rehman, M.Z., & Waris, A. A. (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214, 269-277.

Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M. Z., Adrees, M., Arshad, M., Qayyum, M. F., Ali, L., Hussain, A., Shahid Chatha, S.A., & Imran, M. (2019). Alleviation of cadmium accumulation in maize (*Zea mays* L.) by foliar spray of zinc oxide nanoparticles and biochar to contaminated soil. *Environmental Pollution*, 248, 358-367.

Rodrigues, S. M., Demokritou, P., Dokoozlian, N., Hendren, C. O., Karn, B., Mauter, M. S., & Lowry, G. V. (2017). Nanotechnology for sustainable food production, promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science, Nano*, 4(4), 767-781.

Roy, A., Sharma, A., Yadav, S., Jule, L. T., & Krishnaraj, R. (2021). Nanomaterials for remediation of environmental pollutants. *Bioinorganic Chemistry and Applications*.

Saharan, V., Kumaraswamy, R.V., Choudhary, R. C., Kumari, S., Pal, A., Raliya, R., & Biswas, P. (2016). Cu-chitosan nanoparticle mediated sustainable approach to enhance seedling growth in maize by mobilizing reserved food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(31), 6148-6155.

Sanzari, I., Leone, A., & Ambrosone, A. (2019). Nanotechnology in plant science, to make a long story short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 120.

Sarmast, M. K., & Salehi, H. (2016). Silver nanoparticles, an influential element in plant nanobiotechnology. *Molecular Biotechnology*, 58(7), 441-449.

Schwabe, F., Schulin, R., Limbach, L. K., Stark, W., Bürge, D., & Nowack, B. (2013). Influence of two types of organic matter on interaction of CeO_2 nanoparticles with plants in hydroponic culture. *Chemosphere*, 91(4), 512-520.

Serag, M. F., Kaji, N., Habuchi, S., Bianco, A., & Baba, Y. (2013). Nanobiotechnology meets plant cell biology, carbon nanotubes as organelle targeting nanocarriers. *RSC Advances*, 3(15), 4856-4862.

Singh, J., & Lee, B. K. (2016). Influence of nano-TiO2 particles on the bioaccumulation of Cd in soybean plants (*Glycine max*), A possible mechanism for the removal of Cd from the contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 170, 88-96.

Soleimanpour M R, Hosseini S J F, Mirdamadi S M, Sarafrazi A (2011) Challenges in commercialization of nanotechnology in agriculture sector of Iran. *Annals of Biological Research*, 2(4), 68-75.

Su, S., Yu, T., Hu, J., & Xianyu, Y. (2022). A bio-inspired plasmonic nanosensor for angiotensin-converting enzyme through peptide-mediated assembly of gold nanoparticles. *Biosensors and Bioelectronics*, 195, 113621.

Sun, P., Sun, Y., Luo, Y., & Hu, Y. (2021, March). The Application Progress of Nano Materials for Remediation in Contaminated Soil. *In IOP Conference Series, Earth and Environmental Science*, 692(3), 032035. IOP Publishing.

Taylor, A. F., Rylott, E. L., Anderson, C. W., & Bruce, N. C. (2014). Investigating the toxicity, uptake, nanoparticle formation and genetic response of plants to gold. PLOS one, 9(4), e93793.

Tripathy, B. C., & Oelmüller, R. (2012). Reactive oxygen species generation and signaling in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 7(12), 1621-1633.

Verma, K. K., Song, X. P., Joshi, A., Tian, D. D., Rajput, V. D., Singh, M., Arora, J., Minkina, T., & Li, Y. R. (2022). Recent Trends in Nano-Fertilizers for Sustainable Agriculture under Climate Change for Global Food Security. *Nanomaterials*, 12(1), 173.

Wang, C., Guo, L., Yao, J., Wang, A., Gao, F., Zhao, X., Zeng, Z., Wang, Y., Sun, C., Cui, H., & Cui, B. (2019). Preparation, characterization and antifungal activity of pyraclostrobin solid nanodispersion by self-emulsifying technique. *Pest Management Science*, 75(10), 2785-2793.

Wang, W., Vinocur, B., & Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures, towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218(1), 1-14.

Zhao, X., Meng, Z., Wang, Y., Chen, W., Sun, C., Cui, B., Cui, J., Yu, M., Zeng, Z., Guo, S., Luo, D., Cheng, J.Q., Zhang, R., & Cui, H. (2017). Pollen magnetofection for genetic modification with magnetic nanoparticles as gene carriers. *Nature Plants*, 3, 956-964.

Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., Xing, B., Wang, Z., & Ji, R. (2020). Nano-biotechnology in agriculture, use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(7), 1935-1947.

Zobir, S. A. M., Ali, A., Adzmi, F., Sulaiman, M. R., & Ahmad, K. (2021). A review on nanopesticides for plant protection synthesized using the supramolecular chemistry of layered hydroxide hosts. *Biology*, 10(11), 1077.