کاربرد نانوذرات در کنترل قارچ‌های بیمارگر گیاهی و بهبود عملکرد قارچکش‌ها

Application of nanoparticles in controlling the phytopathogenic fungi and improving fungicide's performances

محمدرضا اصلاحی[1*]، رقیه اسدبلند[2]

دریافت: ۹۹/۲/۲ پذیرش: ۹۹/۵/۵

چکیده

سالانه ۴۰-۲۰ درصد محصولات کشاورزی بر اثر آفات و بیمارگرهای گیاهی از بین می‌روند. بخش مهمی از مدیریت آفات و بیماری‌های گیاهی به آفت کش‌ها و سموم شیمیایی زیان آور برای انسان‌ها و محیط زیست زیان‌آور وابسته است. نانوذرات و فن‌آوری نانو می‌تواند سازوکارهای بسیاری از جمله کاهش سمیت، بهبود پایایی و دوام، افزایش انحلال در آفت کش‌هایی که به میزان کم در آب حل می‌شوند را ایجاد کند. در این مقاله دو روند در ارتباط با کاربرد نانوذره‌ها در کنترل قارچ‌های بیمارگر گیاهی بررسی می‌شود: نانو ذره‌ها به عنوان محافظ و به عنوان حامل‌هایی برای قارچ کش‌ها. با وجود فواید بالقوه فراوان نانوذره‌ها، تعداد کمی از محصولات بر پایه نانوذره‌ها برای کاربردهای کشاورزی تجاری سازی شده‌اند. چندین عامل از جمله ناکافی بودن تعداد مطالعات پایه‌ای و کم توجهی به سیستم آفت- میزبان در کند بودن روند استفاده از نانوذرات در کشاورزی موثر هستند. در صنایع دیگر فن‌آوری نانو به سرعت پیشرفت کرده و تنها راه تداوم پیشرفت در زمینه کاربردهای فن‌آوری نانو در کشاورزی، فهم سوالات بنیادی تحقیقات و یافتن شکاف‌های علمی برای توسعه منطقی و آسان نانو تولیدات تجاری می‌باشد.

کلمات کلیدی: فن‌آوری نانو، کشاورزی، نانو آفت کش‌ها، نانو حامل‌ها، مدیریت بیماری‌های گیاهی.

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات گیاه‌پزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی اهواز، ایران

۱- دانشجوی دکتری زیست شناسی گیاهی،گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

نویسنده مسئول مکاتبات: mr_eslahi@yahoo.com

مقدمه

آفـات گیاهی و عوامل بیماری‌زا موجب کاهش تولیـد محصولات کشـاورزی و خسارت سالانه ۴۰-۲۰ درصد در سطـح جهان می‌شونـد (Flood, 2010). امروزه مدیریت آفات وابستگـی زیادی به کاربرد آفت‌کش‌ها از جملـه حشـره‌کش‌ها، قـارچ‌کش‌ها و علف‌کش‌ها دارد؛ و این روش باوجود فواید فراوان از جمله دسترسی آسان، سرعت عمل و قابلیت اطمینان، به دلیل عوارض جانبی روی موجودات غیر هدف، باعث طغیان مجدد آفات و گسترش مقاومت در برابر آفات می‌گردد (Stephenson, 2003). علاوه‌بر این تخمین زده می‌شود که ۹۰ درصد آفت‌کش‌ها در حین یا بعد از بکارگیری از بین می‌روند (Ghormade *et al.,* 2011). در نتیجه، یک جریان فزاینده در جهت گسترش آفت کش‌های با قیمت مناسب و کارایی بالا با مضرات کمتری برای محیط زیست در حال حرکت است. فن‌آوری نانو[1] موجب گسترش مفاهیم جدید شده و پتانسیـل قابـل توجهـی برای مدیـریت مشکلات فـوق الذکـر در تولیدات کشاورزی دارد. فـن‌آوری نانو در زمینه پزشکی و داروسازی پیشرفت اساسی کرده است اما در زمینه کاربردهای کشاورزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Sinha *et al*., 2017 و Balaure *et al*., 2017). در حال حاضر کاربرد فن‌آوری نانو در کشاورزی در زمینه انتقال هورمون‌های گیاهی، جوانه زنی بذر، مدیریت آب، انتقال ژن‌های هدف، نانو بارکدینگ، نانوسنسورها و کنترل رها سازی مواد شیمیایی در دست بررسی است (Hayles *et al.,* 2017). دانشمندان علم مواد، نانوذراتی[2] با خصوصیات دلخواه از جمله شکل، اندازه منفذ و ویژگی‌های سطح طراحی کرده‌اند که می‌توانند به عنوان محافظ برای تحویل دقیق و هدفمند از طریق جذب سطحی یا با دربرگیری یک ماده فعال به عنوان آفت کش مورد استفاده قرار گیرند (Khandelwal *et al*., 2016). استفاده از نانوذرات برای حفاظت از گیاهان می‌تواند با دو ساز و کار مختلف رخ دهد: الف) بکارگیری نانوذراتی که بالقوه از گیاهان حفـاظت می‌کنند. ب) بکارگیـری نانـوذرات به عنـوان حامل‌های آفت کـش‌ها یا دیگـر مواد فعال مانند RNA دورشته ای(ds RNA) که به صورت پاشش، خیساندن دانه‌ها، بافت‌های برگی یا ریشه‌ها بکار برده می‌شوند. نانوذرات حامل، چندین فایده از جمله افزایش پایایی و دوام، افزایش انحلال آفت کش‌های با انحلال ضعیف در آب، کاهش سمیت وتقویت جایگاه اختصاصی جذب برای یک آفت هدف دارند (Hayles *et al*., 2017). یکی دیگر از فواید نانو حامل‌ها، افزایش تاثیر فعالیت و پایداری نانوآفت‌کش‌ها تحت فشارهای محیطی (اشعه ماورا بنفش و باران) و کاهش چشمگیر تعداد دفعات مصرف است که منتج به کاهش آلودگی محیط‌زیست و کاهش هزینه می‌شود (شکل ۱).

در این مقاله، به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه مدیریت بیماری‌های گیاهی با استفاده از نانو ذرات به عنوان محافظ و همچنین نانوذرات به عنوان حامل‌هایی برای قارچ‌کش‌ها پرداخته شده است.

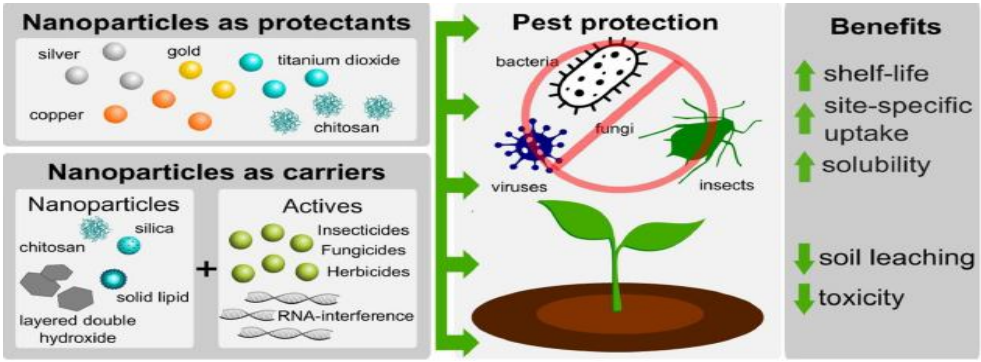
انواع نانوذرات برای مدیریت بیماری‌های گیاهی

نانوذرات به عنوان محافظ

نانوذرات موادی با قطر بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که به دلیل طراحی خاص، دارای خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی منحصر به فردی در مقایسه با همتایان مولکولی و بزرگ خود هستند. نانوذرات به تنهایی این

[1] Nanotechnology
[2] Nanoparticles

امکان را دارند که بطور مستقیم بر روی دانه‌های گیاهی، شاخ و برگ یا ریشه‌ها برای محافظت در برابر آفات و بیمارگرها مانند حشرات، باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌ها به کار برده شوند. نانوذرات فلزی مانند نقره، مس، اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم به دلیل خاصیت ضد باکتریایی و ضد قارچی آنها مورد بررسی قرار گرفته است (Kah and Hofmann, 2014).



شکل ۱- نانومواد به عنوان محافظ یا حامل برای محافظت از محصولات زراعی. این تصویر نانومواد مختلف را به عنوان محافظ یا حامل مواد موثره مانند حشره کش‌ها، قارچ کش‌ها، علف کش‌ها یا مولکول‌های RNA مداخله‌گر، طیف گسترده‌ای از آفات و عوامل بیماری‌زا را هدف قرار می‌دهند. همچنین، مزایای احتمالی کاربردهای نانومواد مانند بهبود ماندگاری، جذب خاص سایت‌ها و افزایش حلالیت را برجسته می‌کند، ضمن این‌که باعث کاهش شسته‌شدن خاک و سمیت می‌شود (Worrall *et al*., 2018).

Fig. 1. Nanomaterials as protectants or carriers to provide crop protection. This schematic shows different nanomaterials as either protectants or carriers for actives such as insecticides, fungicides, herbicides, or RNA-interference molecules, targeting a wide range of pests and pathogens. It also highlights the potential benefits of nanomaterial applications, such as improved shelf-life, target site-specific uptake, and increased solubility, while decreasing soil leaching and toxicity (Worrall *et al*., 2018).

در ادامه یک بررسی مختصر و به روزرسانی شده در مورد مطالعات فعلی مربوط به نانوذراتی که در حال حاضر وجود دارند، ارائه شده است.

اخیراً نانوذرات نقره به دلیل "سنتز سبز[1]" (تولید نانو ذرات در گیاهان، باکتری‌ها، قارچ‌ها یا مخمرها) محبوبیت بیشتری یافته‌اند (Rafique *et al*., 2017). نانوذرات نقره با استفاده از روش انتشار، خواص ضد قارچی علیه *Alternaria alternate* (Fr.) Keissl.، *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary ، *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid.، *Rhizoctonia solani* Kühn، *Botrytis cinerea* Pers. و *Curvularia lunata* (Wakker) Boedijn را نشان داده‌اند (Krishnaraj *et al*., 2012). همچنین سهرابی و همکاران (۲۰۱۶) اثرات ضد باکتریایی نانوذرات نقره تولید شده در دو

[1] Green synthesis

گلسنگ و بازیابی شده در عصاره آبی آنها را بر رشد چهار باکتری *Escherichia coli* Migula، *Pseudomonas aerugonosa* Schroter، *Bacillus subtilis* Ehrenberg و *Staphylococcus aureus* Rosenbach مورد تایید قرار دادند (Sohrabi *et al.*, 2016).

مطلبی و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی اثر نانوذرات نقره تولید شده از قارچ *Trichoderma viride* Pers. بر رشد قارچ *Rhizoctonia solani* عامل بیماری غلاف برنج و باکتری *Acidovorax avenae* عامل بیماری لکه راه راه باکتریایی برنج دریافتند که نانوذرات نقره تولید شده در غلظت‌های برابر، بر باکتری‌ها بیش از قارچ‌ها موثرند (Motallabi *et al.*, 2016).

سایر نانوذرات فلزی مورد استفاده معمول شامل مس، دی اکسید تیتانیم و طلا می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی اثر پنج نانوذره دارای خواص قارچ‌کشی شامل نانوذرات فلزی مس، نقره، اکسید نیکل، کربنات کلسیم، و سیلیسیم بر رشد قارچ *Calonectria pseudonaviculata* عامل بلایت ساقه و برگ شمشاد نشان داد که نانو اکسید مس دارای اثر کنترلی بر رشد قارچ بوده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای سموم شیمیایی باشد (Mahdian and Khaksari, 2016).

کاظمیان و همکاران (۲۰۱۹) نانوذرات اکسید مس حاصله از عصاره اکالیپتوس بر قارچ *B. cinerea* از قارچ‌های بیمارگر گوجه فرنگی و عامل بیماری کپک خاکستری را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس میزان رشد کلنی‌ها کمتر و میزان شدت بیماری کاهش می‌یابد (Kazemian *et al.*, 2019).

مصطفوی نیشابوری و نصراله نژاد (۲۰۱۴) اثر بازدارندگی نانو ذرات نقره و نانو ذرات مس روی رشد قارچ *Wilsonomyces carpophilus* (Léve.) Adask. عامل بیماری لکه غربالی درختان میوه هسته‌دار را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که نانوذرات نقره و مس در مقایسه با دو سم رایج مانکوزب و کاربندازیم در غلظت ppm ۸۰ اختلاف معنی داری نشان دادند(Mostafavi Nishabouri and Nasrollah Nezhad, 2014) .

کیتوزان یکی دیگر از نانوذرات محبوب است که دارای خواص بیولوژیکی مطلوب، مانند تجزیه پذیری، زیست پذیری، زیست سازگاری، عدم حساسیت زایی و فعالیت ضد میکروبی با سمیت کم برای حیوانات و انسان‌ها می‌باشد (Cota-Arriola *et al.*, 2013). نانوذرات کیتوزان با در برابر بیماری‌های ناشی از ویروس موزائیک یونجه، بادام زمینی، سیب زمینی و خیار، مقاومت ویروسی را در بافت‌های گیاهی ایجاد می‌کنند (Kochkina *et al.*, 1994; Pospieszny *et al.*, 1991; Chirkov, 2002). نانوذرات کیتوزان خواص ضد میکروبی از جمله کنترل پوسیدگی فوزاریومی ریشه و ساقه در گوجه فرنگی، پوسیدگی ساقه در انگور و *Phyricularia grisea* در برنج را نشان داده است، اما در مقابل باکتری‌ها اثر کمتری دارد (Kashyap *et al.*, 2015) .

مالربا و سرنا (Malerba and Cerana, 2016) سازوکارهای بالقوه‌ای که منجر به اثرات ضد میکروبی کیتوزان می‌شود، مانند آگلوتیناسیون، اختلال در غشای سلولی، مهار فعالیت H^+-ATPase، مهار سنتز RNA پیغام‌بر و پروتئین‌ها و انسداد جریان مواد مغذی را بطور خلاصه بررسی کردند. آنها همچنین اثرات ضد ویروسی کیتوزان را در لوبیا علیه ویروس موزائیک خفیف باقلا و در تنباکو، علیه ویروس موزائیک تنباکو و ویروس نکروز تنباکو مشاهده کرده و دریافتند کیتوزان هم به عنوان نانوذره محافظ و هم به عنوان نانوذره حامل، دارای پتانسیل قابل ملاحظه‌ای

در برابر شته زیتون (*Aphis nerii* Fansc.) ، کرم برگ پنبه‌ای (*Spodoptera littoralis* Bois.) ، نماتد گره ریشه (*Meloidogyne javanica*) و پسیل گلابی (*Cacopsylla pyricola* Foerster) است.

نانو ذرات حامل

نانوذرات همچنین به عنوان حامل برای به دام انداختن، محاصره کردن، جذب یا اتصال مولکول‌های فعال برای ایجاد فرمولاسیون‌های مؤثر کشاورزی استفاده می‌شوند. نانوذرات رایج که به عنوان حامل سموم دفع آفات، قارچ‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و ...، مورد استفاده قرار می‌گیرند، در زیر خلاصه شده است.

نانوذرات سیلیکا را می‌توان به راحتی با اندازه، شکل و ساختار کنترل شده سنتز کرد و آن‌ها را به وسیله نقلیه‌ای برای تحویل بسیار سودمند تبدیل کرد (Mody *et al*., 2014). نانوذرات سیلیکا معمولاً به شکل کروی با سوراخ‌های منافذ مانند در دو نوع نانوذرات سیلیس متخلخل توخالی (PHSNs[1]) و نانوذرات سیلیس مزوپور (MSN[2]) تولید می‌شوند. PHSN و MSN معمولاً برای محافظت از مولکول‌های فعال، سموم دفع آفات را درون هسته داخلی بارگیری می‌کنند که موجب ایجاد ترکیب پایدار می‌گردد. ساختار پوسته PHSN از مولکول‌های فعال موجود در نانوذرات در برابر تخریب توسط UV محافظت می‌کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که قبلاً از سیلیکون برای تقویت تحمل گیاهان در برابر تنش‌های مختلف غیر زنده و زنده استفاده می‌شده است، بنابراین به نظر می‌رسد نانوذرات سیلیکا یک انتخاب طبیعی برای توسعه تولیدات برعلیه آفات هستند (Barik *et al*., 2008).

نانوذرات کیتوزان به دلیل خاصیت آبگریز بودن، در محلول‌های آبی حلالیت کم دارند (Li *et al*., 2011). در نتیجه، کیتوزان معمولاً با یک کوپلیمر[3] (پلیمرهای دارای بیش از یک نوع مونومر) مخلوط می‌شود تا حلالیت آن بهبود یابد (Kashyap *et al*., 2015). کیتوزان دارای گروه‌های آمین و هیدروکسیل واکنش دهنده‌ای است که امکان ایجاد پیوند و فعل و انفعالات یونی را فراهم می‌کند و باعث بهبود خصوصیات کیتوزان می‌شود. کیتوزان به خوبی به اپیدرم برگ‌ها و ساقه ها می‌چسبد، زمان تماس را طولانی‌تر می‌کند و جذب مولکول‌های فعال زیستی را تسهیل می‌کند (Malerba and Cerana, 2016).

نانوذرات لیپید جامد (SLN[4]s) مشابه امولسیون‌ها هستند و از لیپیدهایی تشکیل شده‌اند که در دمای اتاق جامد هستند. مزیت SLN ها این است که آنها زمینه‌ای را فراهم می‌کنند تا بدون استفاده از حلال‌های آلی، مولکول‌های فعال چربی دوست را به دام بیندازند (Ekambaram *et al*., 2012). علاوه بر این، SLN ها همچنین به دلیل کاهش تحرک فعال در ماتریس جامد، می‌توانند رهاسازی کنترل شده اجزای مختلف را فراهم کنند (Borel and Sabliov, 2014). از سورفاکتانت‌ها (مواد فعال کاهش دهنده کشش سطحی آب) برای تثبیت SLN در صورت پراکنده شدن در آب ،استفاده می‌شود. اشکال اصلی این است که راندمان بارگذاری کمی دارند و ممکن است مواد فعال در حین ذخیره از ساختار خارج شود (Balaure *et al*., 2017).

[1] porous hollow silica nanoparticles
[2] mesoporous silica nanoparticles
[3] copolymer
[4] solid lipid nanoparticle

هیدروکسیدهای دو لایه‌ای (LDHs[1]) ترکیباتی هستند که به لایه‌های شش ضلعی حامل مولکول‌های فعال به دام افتاده در فضای بین لایه‌ای تبدیل می‌شوند و در شرایط اسیدی مانند افزایش رطوبت و دی اکسید کربن جو تجزیه می‌شوند (Mitter *et al.*, 2017). همچنین نانوذرات لاکتات LDH با بار مثبت می‌توانند انتقال مواد فعال بیولوژیکی در سد دیواره سلولی گیاه را تسهیل کنند (Bao *et al.*, 2016).

نانوذرات سیلیس، کیتوزان، SLN و LDH به عنوان حامل‌های متداول برای مدیریت بیماری‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه، مطالعاتی که بطور ویژه به نانوذرات به عنوان حامل قارچ‌کش‌ها پرداخته اند، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

نانوذرات به عنوان حامل قارچ کش‌ها

قارچ‌کش‌ها بطور غیرسیستمیک و یا سیستمیک (توسط گیاه در سطوح مختلف حرکتی جذب می شوند) بر رشد قارچ‌ها اثر می‌کنند. قارچ کش ها به ۴۹ کد کمیته مقاومت در برابر قارچ کش (FRAC[2]) با ۱۴ گروه مختلف حالت عملکرد (MoA[3]) تقسیم می‌شوند (Kuck *et al.*, 2012).

مطالعات اولیه در مورد نانوقارچ‌کش‌ها از سال ۱۹۹۷ انجام شد (Liu *et al.*, 2001, 2002a &bn). از آن زمان تا کنون، درباره قارچ‌کش‌های معمولی ۲۰ مطالعه و درباره مواد فعال زیستی با خواص ضد قارچی شش مطالعه با طیف گسترده‌ای از نانوذرات انجام شده است (جدول ۱). طی این مطالعات، ۹ گروه FRAC و طیف وسیعی از روغن‌های اساسی که در گروه‌های قارچ‌کش گنجانده نشده بودند، مورد بررسی قرار گرفت. شایع‌ترین نانوحامل های مورد بررسی مخلوط‌های پلیمری، سیلیس و کیتوزان بودند. از طیف گسترده‌ای از قارچ‌ها برای بررسی کارآیی این نانوقارچ‌کش‌ها استفاده شد. با این حال، تعداد کمی از گیاهان مورد آزمایش قرار گرفتند و همچنین مطالعات زیادی در مورد سمیت انجام نشده است.

طی مطالعات یاد شده، از نانوذرات برای بهبود مشکلات حلالیت در آب، کاهش تبخیر و بهبود پایداری در زمان رهاسازی، استفاده گردید. هاتفالودی و همکاران (Hatfaludi *et al.* 2004) برای بهبود انحلال تبوکونازول در آب و افزایش اتصال به سطح برگ از پوشش سلولی خالی دناتوره نشده باکتری‌های گرم منفی از جمله *Pectobacterium cypripedii* در ابعاد نانو استفاده کرد. بیشترین و کمترین میزان اتصال نانوحامل‌های باکتریایی دارای برچسب فلورسانس بدون بارگذاری قارچ کش روی شش گیاه مورد آزمایش (برنج، سویا، کلم، پنبه، جو و ذرت) تحت باران شدید شبیه‌سازی شده در گلخانه، بقایای مربوط به برگ‌های برنج (۵۵٪ باقیمانده) و سویا (۱۰٪ باقیمانده) بود. همه شش گیاه با توبوکونازول تبوکونازول بارگذاری شده در حامل‌های باکتریایی و دو تیمار تجاری تبوکونازول WP 25و EW 250 در برابر طیف گسترده‌ای از قارچ‌ها مقایسه شدند. در این مرحله تبوکونازول بارگذاری شده در حامل‌های باکتریایی، بطور مشابه یا بهتر از محصولات تجاری از گیاهانی که در معرض بارندگی قرار نگرفتند، محافظت کردند. اما هنگامی که گیاهان یک ساعت پس از تیمار، تحت باران شدید قرار گرفتند و سپس با قارچ

[1] Layered double hydroxides
[2] *Fungicide Resistance Action Committee*
[3] Mode of action

آلوده شدند، اکثر گروه‌ها و همچنین محصولات تجاری عملکرد خوبی نداشتند. با این حال، هنگامی که ۲۴ ساعت پس از تیمار، شستشو داده شدند، تبوکونازول بارگذاری شده در حامل‌های باکتریایی بطور برابر یا بیشتر از تیمار WP 25 موثر.بود، اما کنترل‌های تحت درمان با EW 250 عموما کارآمدتر بودند (Hatfaludi *et al.* 2004). پیراکلوستروبین، دیگر قارچ کش با حلالیت کمتر در آب، توسط ژو و همکاران (Xu *et al*., 2014) بر روی نانوذرات کوپلیمر کیتوزان- لاکتید در غلظت‌های مختلف بارگذاری شد. آنها دریافتند سه و پنج روز پس از کاربرد این نانوقارچکش در مقایسه با پیراکلوستروبین تجاری، به میزان مشابه یا کمتر در مهار *Corythucha. gossypii* ،موثر است. با این حال، افزایش مهار رشد در ۷ روز پس از تیمار، در مقایسه با قارچکش به تنهایی مشاهده شد (Xu *et al*., 2014). در یک آزمایش دیگر، کامپفرول (یکی دیگر از قارچ‌کش‌های کم محلول) که بر روی لسیتین / کیتوزان بار گذاری شده بود، ۶۷٪ از بازدارندگی را پس از ۶۰ روز ذخیره سازی روی یک ظرف پتری آلوده به *Fusarium oxysporum* نشان داد (Ilk *et al*., 2017).

لیو و همکاران (Liu *et al*., 2002b)، تبوکونازول و کلروتالونیل در طیف گسترده‌ای از نانوذرات بارگذاری نمودند تا حلالیت کم قارچ‌کش‌ها برای استقرار در چوب‌های سخت بهبود یابد. در این مطالعات، بافت از دست رفته به علت پوسیدگی ناشی از*Gloeophyllum trabeum* در چوب کاج زرد جنوبی را طی بیش از ۵۰ تا ۵۵ روز آزمایش کردند. آزمایش‌های بعدی همچنین شامل چوب توس، قارچ *Trametes versicolor*، قارچکش KATHON 930 و حشره کش کلروپایریفوس بود. کلروتالونیل آبگریز محصور شده در نانوذرات به دلیل اندازه و پایداری فرمولاسیون چندان کارآمد نبود، اما با افزایش غلظت، حداقل پوسیدگی چوب به دلیل عفونت قارچی حاصل شد. تبوکونازول بارگذاری شده در نانوذرات با تغییر ناچیز در میزان پوسیدگی توانست به میزان چشمگیری میزان قارچ‌کش استفاده شده (از حدود ۲ کیلوگرم فعال در متر مکعب به ۰/۲ کیلوگرم بر متر مکعب) را کاهش دهد. کلروتالونیل و تبوکونازول محصور با یک روش بدون سورفکتانت (مواد فعال سطحی)، ذرات با سایز کوچکتر و سوسپانسیون پایدارتر ایجاد کرد که در نهایت باعث افزایش جذب به چوب می‌شود. با کاهش چشمگیر غلظت‌ها در مقایسه با استانداردهای صنعتی، پوسیدگی ناچیز (۵٪ یا کمتر) برای هر دو قارچکش در کاج جنوبی آلوده با *G. trabeum* وچوب توس آلوده با *T. versicolor* ایجاد شد که به وضوح نشان می‌دهد که اندازه کوچکتر نانو ذرات بدون سورفاکتانت با پایداری بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر پوسیدگی قارچی حاصل می‌کند (Liu *et al*., 2002b).

روغن‌های فرار دارای ویژگی‌های ضد قارچی هستند اما سرعت بالای تبخیر، مصرف آنها در مقیاس وسیع را محدود کرده است.جاناتووا و همکاران (Janatova *et al*., 2015) جهت نشان دادن فعالیت ضد قارچی روغن‌های فرار علیه *Aspergillus niger* ۱۴ روز پس از آلودگی، ۵ترکیب مجزای روغن‌های فرار را با موفقیت در MSN محصور کرده و با ترکیبات روغن های فرار به تنهایی مقایسه کردند و دریافتند که روغن‌های محصورشده در MSN، فعالیت ضد قارچی طولانی مدت و رهاسازی کنترل شده مناسب‌تری نشان می‌دهند (Janatova *et al*., 2015). بطور مشابه SLN ها نیز جهت تثبیت روغن‌های فرار *Zataria multiflora* جهت مقابله با ۶ قارچ بیماری زا مورد استفاده قرار گرفتند (Nasseri *et al*., 2016).

آبشویی (حرکت آب و مواد شیمیایی از میان خاک) یک مشکل بزرگ آفت‌کش‌ها است اما مطالعات زیادی درباره خاک انجام نشده است. وانیکا (Wanyika, 2013) قارچکش متالاکسیل را روی MSN بارگذاری نموده و میزان آبشویی

متالاکسیل آزاد (۷۶٪) و متالاکسیل بارگذاری شده روی MSN (۱۱٪) در یک دوره ۳۰ روزه مشاهده کرد. درآزمایش انجام شده در آب، متالاکسیل محصور شده یک افزایش آزادسازی ۴۷ ٪ نسبت به ۱۱/۵٪ آزاد سازی در خاک داشته که بر اهمیت انجام آزمایش در محیط مزرعه تاکید دارد. کامپوس و همکاران (Campos *et al*., 2015) با استفاده از دو نوع نانوذرات لیپید جامد و پلی مریک، دو قارچکش کاربندازیم و تبوکونازول را بارگیری کرده و سمیت سلولی آنها را مورد بررسی قرار دادند. طی این پژوهش، یک کاهش در سمیت در تیمار با آفت کش های بارگیری شده روی نانوذرات در لاین سلول‌های فیبروبلاست و سلول‌های استخوان ساز اولیه موش مشاهده گردید. در آزمایش آبشویی از خاک، اضافه کردن نانوذرات در مقایسه با فرمولاسیون تجاری، سرعت آزادسازی در آزمایش‌های آزادسازی لایه‌ای را کاهش داد (Campos *et al*., 2015).

وانگ و همکاران (۲۰۱۸) ماهی زبرا را به مدت ۹۶ ساعت با آزوکسی‌استروبین و دیفنوکونازول بارگیری شده با پوسته‌های پلی مری بوتیلن سوکسینات - لاکتیک اسید مورد تیمار قرار دادند و کاهش سمیت را در مقایسه با فرمولاسیون تجاری مشاهده کردند (Wang *et al*., 2018b).

در پژوهشی دیگر، آزاد سازی آهسته مولکول‌های فعال والیدامایسین بارگیری شده با کربنات کلسیم مورد بررسی واقع شد. در این ارزیابی آزمایشگاهی، والیدامایسین محصور در نانوذرات نسبت به والیدامایسین آزاد روی *R. solani* در یک دوره ۷-۱ روزه اثر کمتری نشان داد. اگرچه دو هفته بعد، فرمولاسیون نانوذرات به تدریج نتیجه بهتری نسبت به ماده فعال آزاد نشان داد که اثر نانوفرمولاسیون در طولانی مدت را تایید می‌کند (Qian *et al*., 2011). همچنین Kumar و همکاران (Kumar *et al*., 2017) دریافتند که نرخ مهار رشد قارچ با استفاده از کاربندازیم بارگیری شده روی نانوذرات پلی مریک علیه *F. oxysporium* و *Aspergillus parasiticus* در مقایسه با کاربندازیم آزاد، افزایش می‌یابد. مطالعات فیتوتوکسی تاکید می‌کند که کاربندازیم نانو فرموله شده برای جوانه‌زنی و رشد دانه‌های *Cucumis sativa*، *Zea mays* و *Lycopersicum esculentum* بی‌خطر است (Kumar *et al*., 2017).

ژائو و همکاران (Zhao *et al*., 2017) از کروماتوگرافی مایع مداوم با اسپکترومتری توده‌ای برای مطالعه جذب پیریمتانیل بارگیری شده در MSN ها در گیاهان کدو در یک دوره ۴۸ روزه استفاده کردند. آنها دریافتند که جذب و دوز MSN حمل کننده آفت‌کش در توزیع و نرخ اتلاف پیریمتانیل در گیاهان تاثیر ندارد. مطالعات آنها نشان داد که MSN حمل‌کننده پیریمتانیل دارای حداقل ریسک تجمع در بخش‌های خوراکی گیاه کدو است این مطالعه اطلاعات محققان درباره توزیع و جابجایی MSN حمل کننده آفت‌کش کاربردی روی برگ را افزایش داد.

جدول ۱- خلاصه مطالعات انجام شده درباره نانوذرات بکار رفته به عنوان نانو قارچ‌کش یا حامل برای قارچ‌کش‌ها

Table 1. Summary of studies utilizing nanoparticles as nano fungicides or carriers of fungicides

نام قارچکش (کد) Fungicide (FRAC Code)	نانوذره Nanoparticle	محصول Crop	آفت هدف Target Pest	سمیت یا آبشویی از خاک Toxicity or Soil Leaching	منبع References
Tebuconazole (3) Chlorothalonil(M 05)	PVP and PVP copolymer	Southern pine sapwood	*G. trabeum*	–	(Liu *et al*., 2001)
Tebuconazole (3) Chlorothalonil(M 05)	PVP and PVP copolymer	Southern yellow pine	*G. trabeum*	–	(Liu *et al*., 2002a)
Chlorothalonil (M 05) KATHON 930 (32) Tebuconazole (3)	PVC	Birch and Southern yellow pine	Turkey tail (*T. versicolor*) *G. trabeum*	–	(Liu *et al*., 2002b)
Tebuconazole (3) Chlorothalonil(M 05)	PVP and PVP copolymer	Southern pine sapwood	Turkey tail (*T. versicolor*) *G. trabeum*	–	(Liu *et al*., 2002c)
Tebuconazole (3)	Bacterial ghosts	Barley, wheat, and cucumber	*E. graminis*, *L. nodorum*, *P. teres* and *S. fuliginea*	Barley (necrosis and yellowing)	(Hatfaludi *et al*., 2004)
Validamycin (26)	PHSN	–		-	(Liu *et al*., 2006)
Validamycin (26)	Calcium carbonate	–	*R. solani*	-	(Qian *et al*., 2011)
Tebuconazole (3)	PHSN	-	-	-	(Qian *et al*., 2013)
Bioactive compounds from Chaetomium spp	PLA	-	-	-	(Dar & Soytong 2014)
Metalaxyl (4)	MSN	-	-	Soil sorption	(Wanyika, 2013)
Pyraclostrobin (11)	Chitosan–PLA graft copolymer	-	*C. gossypii*	-	(Xu *et al*., 2014)
Flusilazole (3)	Chitosan–PLA graft copolymer	–	–	–	(Mei *et al*., 2014)

Bioactive compounds from Chaetomium spp	PLA	-	-	-	(Dar *et al*., 2014)
Carbendazim (1) Tebuconazole (3)	Polymeric and SLN	Bean seeds	–	Mouse fibroblast cells and soil sorption	(Campos *et al*., 2015)
7 different volatile essential oils	MSN	-	*A. niger*	-	(Janatova *et al*., 2015)
Kaempferol	Lecithin/Chitosan	–	*F. oxysporum A. ochraceus*, *A. niger*, *A. flavus*, *A. solani*,	–	(Ilk *et al*., 2017)
Zataria multiflora essential oil	SLN	-	*R. solani* and Black bread mold (*R. stolonifera*)		(Nassiri *et al*., 2016)
Ferbam (M 03)	Gold	Tea leaves	–	–	(Hou *et al*., 2016)
Pyraclostrobin (11)	MSN / Chitosan	-	*P. asparagi*	-	(Cao *et al*., 2016)
Carbendazim (1)	Chitosan/Pectin	Cucumber Maize Tomato	*A. &F. oxysporum parasiticus*	*S. aureus&E. coli*	(Kumar *et al*., 2017)
Pyrimethanil (9)Carbendazim (1)	MSN	Cucumber	–	–	(Zhao *et al*., 2017)
Metalaxyl (4) Myclobutanil (3) Tebuconazole (3)	Magnetic nanocomposites	–	–	–	(Wang *et al*., 2018a)
Prochloraz (3)	PHSN	Cucumber	*B. cinerea*	–	(Zhao *et al*. 2018)
Clove essential oil	Chitosan	–	*A. niger*		(Hasheminejad *et al*., 2019)
Tebuconazole (3) Propineb (M 03) Fludioxonil (12)	Silver	–	*B. maydis*	-	(Huang *et al*., 2018)
Cymbopogon martini essential oil	Chitosan	Maize grains	*F. graminearum*	–	(Kalagatur *et al*., 2018)
Azoxystrobin (11) Difenoconazole (3)	PBS/PLA	-	-	Zebrafish	(Wang *et al*., 2018b)
Pyraclostrobin (11)	MSN	–	*P. asparagi*		(Cao *et al*., 2018)

قارچکش‌های مورد بررسی و نانوحامل‌ها در این جدول فهرست شده اند.علاوه بر این، آزمایش‌های انجام شده بر محصولات کشاورزی، برعلیه آفات و یا فاکتورهای محیطی از قبیل سمیت غیرهدف و آبشویی از خاک هم تاکید شده است. نه گروه از ۴۹ گروه از کد مقاومت قارچکش‌ها در این جدول ارائه شده است. -: آزمایش نشده؛ *A. flavus*, *Aspergillus flavus; A. niger*, *Aspergillus niger*; *A. ochraceus*, *Aspergillus ochraceus*; *A. parasiticus*, *Aspergillus parasiticus*; *A. solani*, *Alternaria solani*; *B. maydis*, *Bipolaris maydis*; *B. cinerea*, *Botrytis cinerea*; *C. gossypii Southw.*, *Colletotrichum gossypii Southw.*; *E. coli*, *Escherichia coli*; *E. graminis*, *Erysiphe graminis*; *F. graminearum*, *Fusarium graminearum*; *F. oxysporum*, *Fusarium oxysporum*; *P. teres*, *Pyrenophora teres*; *R. solani*, *Rhizoctonia solani*; *R. stolonifera*, *Rhizopus stolonifera*; *S. aureus*, *Staphylococcus aureus ; G. trabeum*, *Gloeophyllum trabeum*; *L. nodorum*, *Leptosphaeria nodorum; S. fuliginea*, *Sphaerotheca fuliginea*; *T. versicolor*, *Trametes versicolor*; *Z. mays*, *Zea mays*; *FRAC, Fungicide Resistance Action Committee*; MSN, mesoporous silica nanoparticles; *P. asparagi, Phomopsis asparagi* (Sacc.) PBS, poly (butylene succinate); P. asparagi, Phomopsis asparagi; PHSN, porous hollow silica nanoparticles; PLA, polylactide; PVC, polyvinylchloride; PVP, polyvinylpyridine;; SLN, solid lipid nanoparticle; گروه‌های ۴و ۳۲ سنتز نوکلئیک اسید؛ گروه‌های۱و ۳ سیتواسکلتون و پروتئینهای محرک؛ گروه ۱۱: تنفسی؛ گروه ۹: سنتز پروتئین و آمینو اسید؛ گروه ۳: سنتز استرول در غشاها؛ گروه ۲۶: بیوسنتز دیواره سلولی؛ گروه M03 و M06 مواد شیمیایی با جایگاه‌های عمل متعدد.

In this table, the tested fungicide with the FRAC MoA group and nanocarrier are listed. Experiments conducted on crop plants, against targeted pests or exploring environmental factors such as off-target toxicity and soil leaching are specified. Of the 49 possible FRAC MoA codes, nine groups are represented; -, not tested; *A. flavus, Aspergillus flavus; A. niger, Aspergillus niger; A. ochraceus, Aspergillus ochraceus; A. parasiticus, Aspergillus parasiticus; A. solani, Alternaria solani; B. maydis, Bipolaris maydis; B. cinerea, Botrytis cinerea; C. gossypii Southw., Colletotrichum gossypii Southw.; E. coli, Escherichia coli; E. graminis, Erysiphe graminis; F. graminearum, Fusarium graminearum; F. oxysporum, Fusarium oxysporum; P. teres, Pyrenophora teres; R. solani, Rhizoctonia solani; R. stolonifera, Rhizopus stolonifera; S. aureus, Staphylococcus aureus G. trabeum, Gloeophyllum trabeum; L. nodorum, Leptosphaeria nodorum*; *S. fuliginea, Sphaerotheca fuliginea; T. versicolor, Trametes versicolor; Z. mays, Zea mays*; MSN, mesoporous silica nanoparticles; *P. asparagi, Phomopsis asparagi* (Sacc.) , *FRAC, Fungicide Resistance Action Committee*; PBS, poly (butylene succinate); P. asparagi, Phomopsis asparagi; PHSN, porous hollow silica nanoparticles; PLA, polylactide; PVC, polyvinylchloride; PVP, polyvinylpyridine;; SLN, solid lipid nanoparticle; a FRAC code key: Groups 4, 32, nucleic acids synthesis; Groups 1, 3, cytoskeleton and motor proteins; Group 11, respiration; Group 9, amino acids and protein synthesis; Group 3, sterol biosynthesis in membranes; Group 26 cell wall biosynthesis; Groups M 03, M 05, chemicals with multi-site activity.

نتیجه گیری

فن‌آوری نانو می‌تواند راه حل‌هایی را برای کاربردهای کشاورزی ارائه دهد و این پتانسیل را دارد که فن‌آوری‌های موجود در مدیریت آفات را متحول کند. توسعه نانوآفت‌کش‌ها می‌تواند مزایای بی سابقه‌ای از جمله بهبود انحلال سموم دفع آفات محلول در آب، افزایش دسترسی پذیری زیستی و کارآیی سموم دفع آفات هنگام بارگذاری بر روی نانوذرات و کاهش سمیت سموم دفع آفات، افزایش ماندگاری، تحویل کنترل شده و اختصاصی مواد فعال، رها سازی وابسته به pH، تحویل هوشمند مولکول‌های RNAi برای مدیریت بیماری، کاهش سرعت تخریب مولکول‌های فعال و بهبود پایداری فرمولاسیون در برابر اشعه ماوراء بنفش و باران، بهبود سمیت انتخابی و غلبه بر مقاومت در برابر سموم دفع آفات را ارائه دهد.

از مطالب فوق مشخص است که نانوآفت‌کش‌ها به دلیل مزایای بالقوه برای محیط زیست و سلامتی انسان، یک پیشرفت جذاب محسوب می‌شوند. با این حال ،محصولات فناوری نانو در بخش کشاورزی به بازار نمی‌رسد. بیشتر سموم دفع آفات مبتنی بر نانوذرات در مراحل اولیه رشد قرار دارند. از این رو، باید اثر و سمیت نانوآفت‌کش‌ها در خاک و محیط زیست با جزئیات بیش‌تری مورد بررسی قرار گیرد.

مسئله دیگرمرتبط با مراحل اولیه تحقیق در مورد نانوذرات در حفاظت از گیاهان، عدم وجود آزمایش‌های طولانی مدت است. فقط معدود مطالعات، شامل آزمایش‌های طولانی مدت در مطالعاتشان است. برای مثال میتر و همکاران برای محافظت از گیاهان در برابر ویروس‌ها، ۲۰ روز پس از اسپری، یک سکوی تحویل موضعی RNAi / nanoparticle با نام BioClay آزمایش کرد (Mitter *et al*., 2017) ژائو و همکاران (Zhao *et al*., 2017) سطوح آفت کش ها را ۴۸ روز بعد از کاربرد نانوفرمولاسیون توسعه یافته را آزمایش کردند. یانگ و همکاران (Yang *et al*., 2009) به مدت ۵ ماه کاربرد فرمولاسیون خود شامل نانوذرات پوشیده شده با پلی اتیلن گلیکول و روغن ضروری سیر روی دانه‌های ذخیره شده را بررسی کردند. Jenne و همکاران (Jenne *et al*., 2018) آزادیراختین بارگذاری شده در دو نانوذره کیتوزان و اکسید روی را به مدت ۱۸۰ روز بر روی دانه های بادام زمینی آلوده به حشره بروکید بادام زمینی را مورد مطالعه قرار دادند.

نانو آفت‌کش‌ها یک پیشرفت فن‌آوری نوظهور است که در رابطه با کاربرد سموم، هیچ تعریف مشخصی درباره آنچه نانوآفت کش هست یا نیست توسط نهاد های نظارتی وجود ندارد. کوکانا و همکاران (Kookana *et al*., 2014) در بررسی خود به این نتیجه رسیده‌اند که برخلاف سموم دفع آفات معمولی، اثرات نانوآفت‌کش‌ها ممکن است به جذب، دسترسی زیستی، غلظت و سمیت نانوذرات و همچنین نسبت مواد فعال متصل به آن بستگی داشته باشد.

همچنین، داده‌های محدودی در مورد مسئله مقاومت به سموم دفع آفات و چگونگی افزودن نانوذرات که به میزان قابل توجهی می‌تواند بروز آن را کاهش دهد، وجود دارد. درواقع بدون استفاده از ابزار جامع تحلیلی، الزامات نظارتی برای ارزیابی مخاطرات این مواد نمی‌تواند ایجاد شود. ادغام ابزارها و تکنیک‌های جدید برای تولید داده‌های قوی برای تجزیه و تحلیل، توصیف و ارزیابی خطرات ممکن است کلید تأیید از طرف نهادهای نظارتی باشد.

برای جلوگیری از ایجاد مقاومت در برابر سموم دفع آفات، باید استفاده چرخشی از سموم دفع آفات فعلی و دسترسی به طیف گسترده‌ای از نانوذرات در برنامه‌های تجاری آینده در نظر گرفته شود. عواملی که باید در مورد توسعه نانـو سموم دفـع آفات مورد توجه قرار گیرند شـامل اطلاعاتـی در مورد سرنوشت و جنبه‌های ایمنی

نانوآفت‌کش‌ها در آزمایشات میدانی و طولانی مدت، هزینه بالای تولید آنها، نیاز به حجم زیاد، عدم قطعیت قانون‌گذاری و افکار عمومی است (Mishra *et al*., 2015; Arts *et al*., 2014; Parisi *et al*., 2015).

در نهایت، دانشمندان مواد و زیست شناسان باید همکاری نزدیک و تخصص‌های مکمل در زمینه‌های مختلف را بکار گیرند تا درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های تعامل اساسی در یک سیستم پیچیده زیستی نانو داشته باشند. درک جامع در مورد خصوصیات ساختاری نانوذرات مانند مورفولوژی، اندازه، گروه‌های عملکردی و ظرفیت جذب / بارگیری فعال، می‌تواند به عنوان نقطه شروع برای انتخاب منطقی نانوذرات مناسب باشد. همچنین انتخاب یک سیستم قابل اعتماد و قابل تکرار برای انجام مطالعات زیست سازگاری و اثربخشی در سلول، ارگانیسم و سطوح اکوسیستم میزبان- آفات با هدف دستیابی به شرایط نزدیک به واقعیت تا حد امکان، مهم است.

چشم انداز تحقیق و توسعه برای فناوری نانو در کشاورزی بسیار امیدوار کننده است، زیرا امکاناتی که نانوذرات برای تولید محصولات کارآمد ارائه می‌دهند به طور جدی مورد بررسی قرار می‌گیرند. نویسندگان معتقدند که تحقیقات چند رشته‌ای و مشارکتی بستر مشخصی را فراهم می‌کند تا کاربردهای فناوری نانو برای حفاظت از گیاهان به واقعیت تبدیل شود.

References — منابع

Arts, J.H., Hadi, M., Keene, A.M., Kreiling, R., Lyon, D., Maier, M., Michel, K., Petry, T., Sauer, U.G. and Warheit, D. 2014. A critical appraisal of existing concepts for the grouping of nanomaterials. Regulatory Toxicology and Pharmacology 70: 492–506.

Balaure, P.C., Gudovan, D. and Gudovan, I. 2017. Nanopesticides: A new paradigm in crop protection. New pesticides and soil sensors, 129–192.

Bao, W., Wang, J., Wang, Q., O'Hare, D. and Wan, Y. 2016. Layered Double Hydroxide Nanotransporter for Molecule Delivery to Intact Plant Cells. Scientific Reports, 6 pp.

Barik, T., Sahu, B. and Swain, V. 2008. Nanosilica—from medicine to pest control. Parasitology Research 103:253–258.

Borel, T. and Sabliov, C. 2014. Nanodelivery of bioactive components for food applications: Types of delivery systems, properties, and their effect on ADME profiles and toxicity of nanoparticles. Annual Review of Food Science and Technology 5: 197–213.

Campos, E.V.R., De Oliveira, J.L., Da Silva, C.M.G., Pascoli, M., Pasquoto, T., Lima, R., Abhilash, P. and Fraceto, L.F. 2015. Polymeric and solid lipid nanoparticles for sustained release of carbendazim and tebuconazole in agricultural applications. Scientific Reports, 5: 1380.

Cao, L., Zhang, H., Cao, C., Zhang, J., Li, F. and Huang, Q. 2016. Quaternized chitosan-capped mesoporous silica nanoparticles as nanocarriers for controlled pesticide release. Nanomaterials 6: 126-129.

Cao, L., Zhang, H., Zhou, Z., Xu, C., Shan, Y., Lin, Y. and Huang, Q. 2018. Fluorophore-free luminescent double-shelled hollow mesoporous silica nanoparticles as pesticide delivery vehicles. Nanoscale 10: 20354–20365.

Chirkov, S. 2002. The antiviral activity of chitosan (review). Applied Biochemistry and Microbiology 38: 1–8.

Cota-Arriola, O., Onofre Cortez-Rocha, M., Burgos-Hernández, A., Marina Ezquerra-Brauer, J. and Plascencia-Jatomea, M. 2013. Controlled release matrices and micro/nanoparticles of chitosan with antimicrobial potential: Development of new strategies for microbial control in agriculture. Journal of the Science of Food and Agriculture 93: 1525–1536.

Dar, J. and Soytong, K. 2014. Construction and characterization of copolymer nanomaterials loaded with bioactive compounds from Chaetomium species. Journal of Agricultural Science and Technology 10: 823–831.

Ekambaram, P., Sathali, A.A.H. and Priyanka, K. 2012. Solid lipid nanoparticles: A review. Scientific Reviews and Chemical Communications 2: 80–102.

Flood, J. 2010. The importance of plant health to food security. Food Secure 2: 215–231.

Ghormade, V., Deshpande, M.V.and Paknikar, K.M. 2011. Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. Biotechnology Advantages 29: 792–803.

Hasheminejad, N., Khodaiyan, F. and Safari, M. 2019. Improving the antifungal activity of clove essential oil encapsulated by chitosan nanoparticles. Food Chemistry 275: 113–122.

Hatfaludi, T., Liska, M., Zellinger, D., Ousman, J.P., Szostak, M., Jalava, K. and Lubitz, W. 2004. Bacterial ghost technology for pesticide delivery. Journal of. Agricultural and Food Chemistry 52: 5627–5634.

Hayles, J.; Johnson, L., Worthley, C. and Losic, D. 2017. Nanopesticides: A review of current research and perspectives. New Pesticides and Soil Sensors 193–225.

Huang, W., Wang, C., Duan, H., Bi, Y., Wu, D., Du, J. and Yu, H. 2018. Synergistic Antifungal Effect of Biosynthesized Silver Nanoparticles Combined with Fungicides. International Journal of Agriculture and Biology 20: 1225–1229.

Hou, R., Zhang, Z., Pang, S., Yang, T., Clark, J.M., He, L. 2016. Alteration of the nonsystemic behavior of the pesticide ferbam on tea leaves by engineered gold nanoparticles. Environmental Science and Technology 50: 6216–6223.

Ilk, S., Saglam, N. and Özgen, M. 2017. Kaempferol loaded lecithin/chitosan nanoparticles: Preparation, characterization, and their potential applications as a sustainable antifungal agent. Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology 45: 907–916.

Janatova, A., Bernardos, A., Smid, J., Frankova, A., Lhotka, M., Kourimská, L., Pulkrabek, J. and Kloucek, P. 2015. Long-term antifungal activity of volatile essential oil components released from mesoporous silica materials. Indian Crop Production 67: 216–220.

Jenne, M., Kambham, M., Tollamadugu, N.P., Karanam, H.P., Tirupati, M.K., Balam, R.R., Shameer, S. and Yagireddy, M. 2018. The use of slow releasing nanoparticle encapsulated Azadirachtin formulations for the management ofCaryedon serratusO.(groundnut bruchid). IET Nanobiotechnol 12: 963–967.

Kah, M. and Hofmann, T. 2014. Nanopesticide research: Current trends and future priorities. Environment International 63: 224–235.

Kalagatur, N.K., Ghosh, O.S.N., Sundararaj, N. and Mudili, V. 2018. Antifungal activity of chitosan nanoparticles encapsulated with Cymbopogon martinii essential oil on plant pathogenic fungi Fusarium graminearum. Frontiers in. Pharmacology 9: 610-617.

Kashyap, P.L., Xiang, X. and Heiden, P. 2015. Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. International Journal of Biological Macromolecules 77: 36–51.

Kazemian, S., Zarin Nia, V., Khosroshahi, M. and Hasan Zadeh, N. 2019. Evaluation of the effect of green copper oxide (CuO) nanoparticles on inhibition of Botrytis cinerea. Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research 93: 54-67.

Khandelwal, N., Barbole, R.S.; Banerjee, S.S.; Chate, G.P.; Biradar, A.V.; Khandare, J.J. and Giri, A.P. 2016. Budding trends in integrated pest management using advanced micro-and nano-materials: Challenges and perspectives. Journal of Environment Managment 184: 157–169.

Kochkina, Z., Pospeshny, G. and Chirkov, S. 1994. Inhibition by chitosan of productive infection of T-series bacteriophages in the Escherichia coli culture. Mikrobiologiia 64: 211–215.

Kookana, R.S., Boxall, A.B.A., Reeves, P.T., Ashauer, R., Beulke, S., Chaudhry, Q., Cornelis, G., Fernandes, T.F., Gan, J. and Kah, M. 2014. Nanopesticides: Guiding Principles for Regulatory Evaluation of Environmental Risks. Journal of Agricultural and Food Chemistry 62: 4227–4240.

Krishnaraj, C., Ramachandran, R., Mohan, K. and Kalaichelvan, P. 2012. Optimization for rapid synthesis of silver nanoparticles and its effect on phytopathogenic fungi. Spectrochim. Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 93: 95–99.

Kuck, K.-H., Leadbeater, A. and Gisi, U. 2012. FRAC Mode of Action Classification and Resistance Risk of Fungicides. In Modern Crop Protection Compounds; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim; pp. 539–557.

Kumar, D.R., Kumar, P.S., Gandhi, M.R., Al-Dhabi, N.A., Paulraj, M.G. and Ignacimuthu, S. 2016. Delivery of chitosan/dsRNA nanoparticles for silencing of wing development vestigial (vg) gene in Aedes aegypti mosquitoes International Journal of Biological Macromolecules 86: 89–95.

Kumar, S., Bhanjana, G., Sharma, A., Sidhu, M. and Dilbaghi, N. 2014. Synthesis, characterization and on field evaluation of pesticide loaded sodium alginate nanoparticles. Carbohydrate Polymers 101: 1061–1067.

Kumar, S., Kumar, D. and Dilbaghi, N. 2017. Preparation, characterization, and bio-efficacy evaluation of controlled release carbendazim-loaded polymeric nanoparticles. Environmental Science and Pollution Research 24: 926–937.

Liu, Y., Yan, L., Heiden, P. and Laks, P. 2001. Use of nanoparticles for controlled release of biocides in solid wood. Journal of Applied Polymer Science 79: 458-465.

Liu, Y., Laks, P. and Heiden, P. 2002a. Controlled release of biocides in solid wood. I. Efficacy against brown rot wood decay fungus (*Gloeophyllum trabeum*). Journal of Applied Polymer Science 86: 596–607.

Liu, Y., Laks, P. and Heiden, P. 2002b. Controlled release of biocides in solid wood. II. Efficacy against *Trametes versicolor* and *Gloeophyllum trabeum* wood decay fungi. Journal of Applied Polymer Science 86: 608–614.

Liu, Y., Laks, P. and Heiden, P. 2002c. Controlled release of biocides in solid wood. III. Preparation and characterization of surfactant-free nanoparticles. Journal of Applied Polymer Science 86: 615–621.

Liu, F., Wen, L. X., Li, Z. Z., Yu, W., Sun, H. Y. and Chen, J. F. 2006. Porous hollow silica nanoparticles as controlled delivery system for water-soluble pesticide. Mater Res Bulltein 41: 2268-2275.

Mahdian S.A. and Khaksari, M. 2016. Control effect of some metal nanoparticle on boxwood blight fungus agent (*Calonectria pseudonaviculata*). Iranian Plant Protection Congress pages:317-325.

Malerba, M. and Cerana, R. 2016. Chitosan effects on plant systems. International Journal of Molecular Sciences 17: 996-999.

Mishra, S. and Singh, H. 2015. Biosynthesized silver nanoparticles as a nanoweapon against phytopathogens: Exploring their scope and potential in agriculture. Applied Microbiology and Biotechnology 99: 1097–1107.

Mitter, N., Worrall, E.A., Robinson, K.E., Li, P., Jain, R.G., Taochy, C., Fletcher, S.J., Carroll, B.J., Lu, G. and Xu, Z.P. 2017. Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses. Nature Plants 3: 16207- 16215.

Mei, X.D., Liang, Y.H., Zhang, T., Ning, J. and Wang, Z.Y. 2014. An amphiphilic chitosan-polylactide graft copolymer and its nanoparticles as fungicide carriers. Advanced Materials Proceedings 1051: 21–28.

Mody, V.V., Cox, A., Shah, S., Singh, A., Bevins, W. and Parihar, H. 2014. Magnetic nanoparticle drug delivery systems for targeting tumor. Applied Nanosciences 4: 385–392.

Mostafavi Nishabouri, F.S. and Nasrollah Nezhad, S. 2015. Comparison of the effect of two nano toxins with common toxins in the control of smear disease of stone fruit trees. Journal of Plant Production Research 21: 17-25.

Motalebi, A., Mahdian, S., Tajik Ghanbari, M.R. and Ghasemi Mir, S. 2016. Comparison of the effects of silver nanoparticles synthesized by the fungus Trichoderma viride against the fungus Rhizoctonia solani of rice sheath blight and bacterial spot of rice striped Acidovorax avenae. Iranian Plant Protection Congress page:340.

Nasseri, M., Golmohammadzadeh, S., Arouiee, H., Jaafari, M.R. and Neamati, H. 2016. Antifungal activity of Zataria multiflora essential oil-loaded solid lipid nanoparticles in-vitro condition. Iranian Journal of Basic Medical Sciences 19: 1231–1237.

Parisi, C., Vigani, M. and Rodríguez-Cerezo, E. 2015. Agricultural Nanotechnologies: What are the current possibilities. Nano Today 10: 124–127.

Pospieszny, H., Chirkov, S. and Atabekov, J. 1991. Induction of antiviral resistance in plants by chitosan. Plant Sciences 79: 63–68.

Qian, K., Shi, T., Tang, T., Zhang, S., Liu, X. and Cao, Y. 2011. Preparation and characterization of nano-sized calcium carbonate as controlled release pesticide carrier for validamycin against Rhizoctonia solani. Microchimica Acta 173: 51–57.

Qian, K., Shi, T., He, S., Luo, L. and Cao, Y. 2013. Release kinetics of tebuconazole from porous hollow silica nanospheres prepared by miniemulsion method. Microporous Mesoporous Mater 169: 1–6.

Rafique, M., Sadaf, I., Rafique, M.S. and Tahir, M.B. 2017. A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications. Artificial Cells Nanomedicine and Biotechnology 45: 1272–1291.

Sinha, K., Ghosh, J. and Sil, P.C. 2017. 2—New pesticides: A cutting-edge view of contributions from nanotechnology for the development of sustainable agricultural pest control A2—Grumezescu, Alexandru Mihai. In New Pesticides and Soil Sensors; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 300pp.

Sohrabi, M., Pour Ali, P. and Abdolmaleki, H. 2016. Bioproduction of silver nanoparticles by two species of lichens "Osena articulata" and "Ramalina sinensis" and study of their antibacterial properties against some pathogenic bacteria. Ibn-e Sina, 53: 4-12.

Stephenson, G.R. 2003. Pesticide Use and World Food Production: Risks and Benefits. ACS Publications, 1-19.

Wang, X., Ma, X., Huang, P., Wang, J., Du, T., Du, X. and Lu, X. 2018a. Magnetic Cu-MOFs embedded within graphene oxide nanocomposites for enhanced preconcentration of benzenoid-containing insecticides. Talanta 181:112–117.

Wang, Y., Li, C., Wang, Y., Zhang, Y. and Li, X. 2018b. Compound Pesticide Controlled Release System Based on the Mixture of poly (butylene succinate) and PLA. Journal of Microencapsulation paes:1–33.

Wanyika, H. 2013. Sustained release of fungicide metalaxyl by mesoporous silica nanospheres. Journal of Nanoparticle Research 15: 1831-1840.

Worrall, E.A., Hamid, A., Mody, K.T., Mitter, N. and Pappu, H.R. 2018. Nanotechnology for Plant Disease Management. Agronomy 8: 285-309.

Xu, L., Cao, L.-D., Li, F.-M., Wang, X.-J. and Huang, Q.-L. 2014. Utilization of chitosan-lactide copolymer nanoparticles as controlled release pesticide carrier for pyraclostrobin against *Colletotrichum gossypii* Southw. Journal of Dispersion Sciences and Technology 35: 544–550.

Yang, F.-L.; Li, X. G., Zhu, F. and Lei, C. L. 2009. Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* (Herbst)(Coleoptera: Tenebrionidae). Journal of Agricultural and Food Chemistry 57: 10156–10162.

Zhao, P., Cao, L., Ma, D., Zhou, Z., Huang, Q. and Pan, C. 2017.Synthesis of Pyrimethanil-Loaded Mesoporous Silica Nanoparticles and Its Distribution and Dissipation in Cucumber Plants. Molecules 22: 817-825.

Application of nanoparticles in controlling of phytopathogenic fungi and improving fungicide's performances

M.R. Eslahi*[1] and R. Asadboland[2]

Received: 21 Apr., 2020 **Accepted: 26 Jul., 2020**

ABSTRACT

Annually, 20-40% of agricultural products are destroyed by plant pests and pathogens. Plant disease management depends on pesticides and toxins that are potentially harmful to humans and the environment. Nanotechnology can offer benefits to pesticides, including reduced toxicity, improved reliability and durability and increased solubility in pesticides that are sparingly soluble in water. This paper examines two trends in the use of nanoparticles in controlling of phytopathogenic fungi: nanoparticles as protectors independently or as nanocarriers for fungicides. Despite the many potential benefits of nanoparticles, few nanoparticle-based products have been commercialized for agricultural applications. The lack of commercial applications can be explained by several factors, including the insufficient number of field studies and the lack of attention to the pest-host system. In other industries, nanotechnology has advanced rapidly, and it seems that the only way to continue advancing nanotechnology applications in agriculture is to understand the fundamental research questions and find scientific gaps for the rational and easy development of commercial nanoproducts.

Keyword: Nanotechnology, Agriculture, Nanopesticide, Nanocariers, Plant diseaes management

1. Assistant Professor, Department of Plant Protection, Khouzestan Agriculture and Natural Resource Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.
2. PhD Student, Department of Biology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Corresponding author: *mr_eslahi@yahoo.com*