

The Role of Chitosan in Management of Plant Viral Diseases

M. Salati^{1*}, A. Entezari²

1- Faculty of Plant Protection, Agricultural Research Center of Khorasan Razavi Province, Mashhad, Iran

2- Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding author's Email: m.salati@areeo.ir)

Received: 02-07-2025

Revised: 27-08-2025

Accepted: 30-08-2025

Available Online: 10-02-2026

How to cite this article:Salati, M., & Entezari, A. (2026). The role of chitosan in the management of plant viral diseases. *Iranian Plant Protection Research*, 39(4), 361-372. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jpp.2025.94223.1237>

Introduction

Chitosan is a natural polymer industrially derived from the deacetylation of chitin. Chitosan is recognized as a safe and biocompatible biological compound that acts by stimulating plant growth, inducing the plant's general defense response, and increasing plant resistance to pathogens, including bacteria, fungi, nematodes and especially viruses. This compound has demonstrated significant efficacy as an elicitor of plant resistance to viral infections. Unlike other plant pathogens, effective treatments for viral infections are currently lacking. Two main strategies in managing plant viral diseases are the use of resistant cultivars and induction of plant defense mechanisms using elicitors.

Elicitors are physical or chemical stimuli derived from biotic or abiotic sources that can induce physiological, morphological responses and the accumulation of phytoalexins in plant cells. Chitin is a linear polysaccharide that is known as the most abundant natural polymer after cellulose. Chitosan is obtained by removing the amide group from the chitin chain. The extraction of chitosan from natural sources containing chitin depends on various steps including deproteinization, deacetylation and demineralization. The chemical structure of chitosan depends on the molecular weight, deacetylation degree (DD) and its pattern. Unlike chitin, chitosan is a positively charged polymer and is very strongly cationic and readily soluble in acidic conditions. The higher degree of deacetylation of chitosan, the more positive charges is formed on its surface.

Chitosan contributes to the reduction of plant diseases through two primary mechanisms. The first is direct antimicrobial action against pathogens, such as damage to the plasma membrane, interaction with DNA and RNA (electrostatic interactions), and deposition on the microbial surface and the second is induction of plant defense responses resulting from downstream signaling, transcription factor activation gene transcription and ultimately cellular activation. Chitosan has the ability to inhibit viral infections both locally and systemically. Efficacy of chitosan depends on the dose and method of its application and the molecular structure of chitosan especially the molecular weight and degree of acetylation. However, the antiviral activity of chitosan decreases with increasing molecular weight. The possible reason for this may be the ability of small chitosan molecules to better penetrate into plant tissue. Chitosan also prevents the replication of viruses and viroids and enhances the host's hypersensitivity response during infection. Increasing plant cell resistance as a result of using chitosan in plants such as potatoes, tomatoes, and cucumbers has been proven by various researchers. Regarding the antiviral effect of chitosan, it should be noted that it is also able to suppress viral infections in many different

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons

Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/))<https://doi.org/10.22067/jpp.2025.94223.1237>

plant families which affects the occurrence of a hypersensitivity response (HR) to viral infections and prevents the systemic spread of viruses in the plant. Some reports indicate that it stimulates the plant's defense response and improves its general defense mechanisms. These results have been proven in mung bean, pea and peanut plants by foliar spraying against their viruses. Studies show that several pathways are activated after chitosan application, most of which are related to activation of the plant's innate immunity, for example accumulation of salicylic acid (SA) and activation of systemic acquired resistance (SAR) in the plant. The SA acts as a signaling molecule that activates multiple pathways and initiates various changes in plant cell physiology and gene expression. This phytohormone has a negative effect on viral replication. Translocation of the virus within the host plant plays a very important role in replication of the virus. This translocation may be local intercellular or systemic transmission in the host. Since chitosan also induces the formation of calloses, cell-to-cell movement of the virus is also reduced by deposition of calloses around the plasmodesmata and reduction of their permeability. One of the nanoparticles that has received great attention today is nanoparticles composed of chitosan. Due to the large positive charge on the surface of this molecule, it can target the virus coat protein and also increase growth parameters in the plant.

Conclusion

Chitosan and its derivatives are regarded as powerful tools for activating various plant defense pathways. Based on the results of research and extension experiments conducted on the farms, this compound showed high efficiency as an inducer of plant resistance against viral infections. In addition to reducing infection severity, it contributed to improved crop yield. Therefore, the use of this polymer and nanoparticle products based on it can be considered as suitable alternative to traditional chemical pesticides, which is an important step towards reducing the use of chemical pesticides and establishing sustainable agriculture.

Keywords: Chitin, Defense response, Elicitor, Viral agents

نقش کیتوزان در مدیریت بیماری‌های ویروسی گیاهی

منصور صلاتی^{۱*} - آزاده انتظاری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

چکیده

القای واکنش‌های دفاعی در گیاه، راهکاری مؤثر برای مهار بیماری‌ها، کاهش خسارات محصول و حفاظت از محیط زیست محسوب می‌شود. بنابراین، شناخت تعامل میان میزبان، بیمارگر و محرک‌های دفاعی اهمیت ویژه‌ای دارد. کیتوزان یک پلیمر طبیعی است که به‌صورت صنعتی از استیل زدایی کیتین تولید می‌شود. کتین بعد از سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی در طبیعت در جایگاه دوم قرار دارد که طی فرآیند شیمیایی به ترکیبی با ارزش افزوده بسیار بالاتری به‌نام کیتوزان تبدیل می‌گردد. کیتوزان به‌دلیل خواص منحصر به فردی نظیر غیرسمی بودن، تجزیه‌پذیری زیستی و خواص ضد میکروبی آن، در مهار آلودگی، تصفیه آب، تولید کاغذ و عکاسی در صنایع مختلفی مانند کشاورزی، پزشکی و صنایع غذایی استفاده می‌شود. این ترکیب به‌عنوان یک ترکیب زیستی ایمن و زیست‌سازگار شناخته شده است که با تحریک رشد گیاه، القای واکنش دفاعی عمومی گیاه، افزایش مقاومت گیاه در برابر عوامل بیماری‌زا از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها، نماتدها و به‌خصوص ویروس‌ها عمل می‌کند. همچنین کیتوزان به‌عنوان القاکنده مقاومت گیاه در برابر آلودگی‌های ویروسی کارایی بالایی را نشان داده است. کیتوزان قادر به سرکوب آلودگی‌های ویروسی در بسیاری از خانواده‌های گیاهی بوده، که بر وقوع واکنش فوق حساسیت (HR- hypersensitivity response) به آلودگی‌های ویروسی و جلوگیری از انتشار سیستمیک ویروس‌ها در گیاه تأثیرگذار می‌باشد. در این مطالعه، تلاش می‌گردد که ضمن معرفی این ترکیب و مشتقات آن به‌عنوان یک محرک زیستی طبیعی، با خواص و کاربردهای کیتوزان بیشتر آشنا شده و سازوکارهای عمل آن در طول فعل و انفعالات گیاه که منجر به القای واکنش دفاعی سلول در فرآیند آلودگی‌های ویروسی می‌شود، به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الیسیتور، پاسخ دفاعی، کیتین، عوامل ویروسی

مقدمه

قارچ‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها منشأ بیماری‌های مهم متعددی در محصولات کشاورزی و عامل خسارت‌های اقتصادی فراوانی در مراحل تولید تا برداشت محصول و کیفیت آن در سراسر جهان هستند. بنابراین برای حفظ کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی باید مدیریت عوامل خسارت‌زای گیاهی مورد توجه قرار گیرد. در طول صد سال گذشته، استفاده بیش از حد آفت‌کش‌ها باعث ایجاد جدایه‌های مقاوم عوامل بیماری‌زا شده و اثرات مخربی بر سلامت انسان و محیط زیست داشته است. به همین علت، امروزه شناخت و به‌کارگیری روش

های جایگزین نظیر القاء مقاومت به‌وسیله پلیمرهای طبیعی می‌تواند نقش مهمی در حل این مشکل ایفا کند. همچنین استفاده از دفاع طبیعی گیاه می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های شیمیایی، به‌عنوان روشی امن‌تر برای مهار عوامل خسارت‌زا باشد (Saber *et al.*, 2022). از طرف دیگر، محرک‌های زیستی یا الیسیتورهایی مانند اسید سالیسیلیک، الیگوساکاریدها و پلی ساکاریدهایی مانند کیتین و کیتوزان می‌توانند مقاومت میزبان در برابر بیمارگرها را افزایش دهند (Salati *et al.*, 2016; Saberi Riseh *et al.*, 2022). الیسیتورهای الیگوساکاریدی بیولوژیک به‌دنبال آسیب یا حمله بیمارگرهای گیاهی و تخریب دیواره‌های سلولی گیاهی ایجاد می‌شوند که منجر به بروز پاسخ دفاعی موضعی و سیستمیک گردیده و از رشد و تکثیر قارچ‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها جلوگیری می‌کنند. این خاصیت الیسیتورها ممکن است موجب القای مقاومت در برابر بیمارگرهای گیاهی شود. به‌عنوان مثال، درمان گیاهان با کیتوزان به‌عنوان یکی از مشتقات شناخته‌شده کیتین منجر به مهار انتشار

۱- بخش تحقیقات گیاهپزشکی، مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی، مشهد، ایران

گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.salati@areeo.ir)

<https://doi.org/10.22067/jpp.2025.94223.1237>

سیستمیک ویروس‌ها و ویروئیدها در گیاه میزبان و بروز پاسخ‌های فوق حساسیت گیاهان به آلودگی‌های ویروسی می‌شود (Salati & Bananej, 2021; Salati et al., 2021). برای بیمارگرهای ویروسی در مقایسه با سایر عوامل بیماری‌زا هیچ روش معالجه مؤثری در دسترس نیست. در نتیجه در مهار بیماری‌های ویروسی گیاهی، برنامه‌های پیشگیرانه از طریق شیوه‌های مدیریت یکپارچه به‌منظور کنترل منبع ویروس، مدیریت جمعیت ناقلین و اختلال در انتقال و جابه‌جایی ویروس درون میزبان مورد توجه قرار می‌گیرد (Salati & Bananej, 2021; Salati et al., 2021). همچنین استفاده از ارقام مقاوم و تحریک سازوکارهای دفاعی گیاه از طریق الیسیتورها به‌عنوان دو راهبرد مؤثر در مواجهه با ویروس‌های گیاهی اهمیت دارد (Salati et al., 2016). هدف این مقاله، بررسی نقش کیتوزان به‌عنوان القاکننده مقاومت ضدویروسی در گیاهان است.

الیسیتورها و معرفی کیتوزان

الیسیتورها^۱ به محرک‌هایی با منشأ زیستی یا غیرزیستی گفته می‌شود که می‌توانند باعث القای پاسخ‌های فیزیولوژیکی، ریخت‌شناختی و تجمع فیتوالکسین‌ها^۲ در سلول‌های گیاهی شوند. در طی پاسخ به سیگنال الیسیتور، سیستم دفاعی گیاه فعال و در نتیجه بیان ژن‌های دفاعی رخ داده و متابولیت‌های ثانویه تجمع می‌یابند. به‌طور کلی، الیسیتورها به دو دسته زیستی^۳ و غیرزیستی^۴ تقسیم‌بندی می‌شوند (Wong et al., 2014). کیتوزان^۵ به‌عنوان یک پلیمر طبیعی، ایمن و ارزان است که از کیتین، ماده اصلی تشکیل‌دهنده اسکلت بیرونی بندپایان، دیواره سلولی قارچ‌ها و پوسته سخت‌پوستانی نظیر خرچنگ و میگو تولید می‌شود. امروزه با توجه به فراوانی بالای آن در طبیعت، خاصیت قارچ‌کشی، غیرسمی بودن و توانایی القای مقاومت علیه بیمارگرها مورد توجه بیماری‌شناسان گیاهی قرار گرفته است (Malerba & Cerana, 2016).

ساختار کیتین و کیتوزان

کیتین با فرمول شیمیایی $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ، با نام علمی بتا ۱-۴، ۲- استامیدو-۲-داکسی-D-گلوکوپیرانوز، خانواده‌ای از پلی‌ساکاریدهای خطی بوده که بعد از سلولز، به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی شناخته می‌شود. سلولز و کیتین هر دو نقش حفاظتی دارند، به‌طوری‌که گیاهان سلولز را در دیواره سلولی و همچنین سخت پوستان، حشرات، جلبک‌ها و قارچ‌ها کیتین را در دیواره سلولی خود

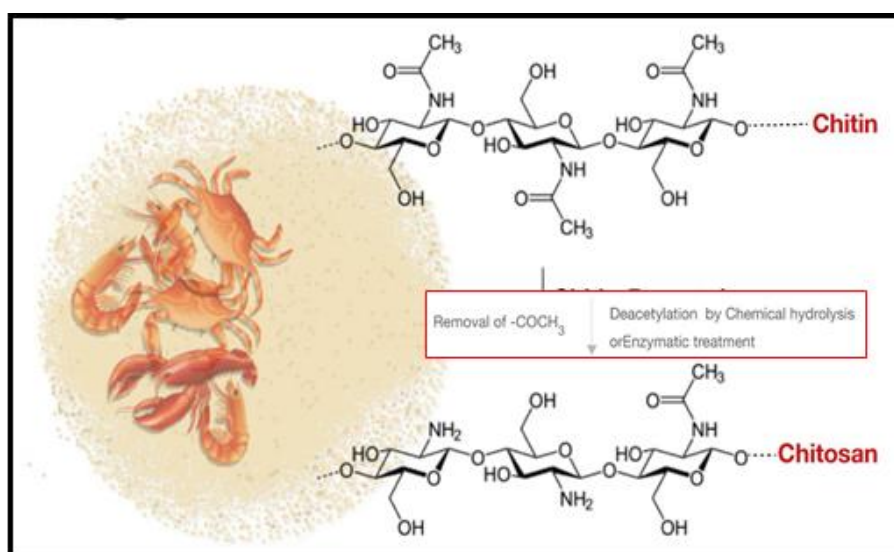
تولید می‌کنند. کیتین که عمدتاً از پوسته سخت‌پوستانی نظیر خرچنگ و میگو به دست می‌آید، با استخراج شیمیایی و بیولوژیکی، با حذف پروتئین و رسوبات کلسیم خالص می‌شود (Gangireddygar et al., 2021). از نظر شیمیایی، کیتوزان یک پلی‌ساکارید خطی با فرمول شیمیایی $(C_6H_{11}NO_4)_n$ و با نام علمی بتا ۱-۴، ۲- آمینو-۲-داکسی-D-گلوکوپیرانوز بوده که پیوندهای بتا ۴-۱ به‌صورت تصادفی بین دی‌گلوکزآمین و آن استیل دی‌گلوکز آمین^۶ توزیع شده‌اند (شکل ۱) و از دی‌استیلاسیون قلیایی نیتروژن کیتین، به دست می‌آید. تعداد گروه‌های استیل موجود بر روی زنجیره کیتین و کیتوزان، نشانگر تفاوت بین این دو پلی‌ساکارید بوده، به‌طوری‌که پلیمری که ۱۰۰ درصد گروه‌های آمین آن استیل‌دار شده باشد را کیتین و پلیمر بدون گروه‌های آمیدی (۱۰۰ درصد گروه آمین) را کیتوزان خالص با درجه داستیلاسیون ۱۰۰ درصد می‌نامند. طول زنجیره کیتوزان متغیر بوده و اکثر فرآورده‌ها برپایه کیتوزان دارای وزن مولکولی بین ۳۸۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ دالتون می‌باشند (Jaber et al., 2022). کیتوزان در طبیعت کمتر دیده می‌شود و اغلب نمونه‌های تجاری کیتوزان از طریق تیمار قلیایی (به‌عنوان مثال: NaOH) و استیل‌زدایی شیمیایی کیتین به‌دست‌آمده از اسکلت بیرونی سخت‌پوستان سنتز می‌شود (Iriti & Varoni, 2015; Jaber et al., 2022). هر چند که به‌طور فزاینده‌ای، کیتوزان را می‌توان از کیتین دیواره سلولی قارچی، که در مقادیر صنعتی رشد یافته‌اند نیز سنتز کرد (Iriti & Varoni, 2015). برخلاف سایر پلی‌ساکاریدهای موجود در طبیعت، کیتین و کیتوزان به‌صورت بازی در طبیعت یافت می‌شوند. به همین دلیل، قادر هستند که به‌صورت شیمیایی با DNA، RNA، چربی‌ها، پروتئین‌ها و یون‌های فلزی پیوند تشکیل دهند. کیتوزان تنها پلی‌کاتیون موجود در طبیعت است که چگالی آن به درجه استیل‌زدایی و pH محیط و حلالیت آن به درجه استیل‌زدایی و وزن مولکولی بستگی دارد. کیتوزان در محلول اسیدی رقیق با pH کمتر از شش قابل حل می‌باشد (Iriti & Varoni, 2015).

خصوصیات شیمیایی کیتین و کیتوزان و مشتقات آن

استخراج کیتوزان از منابع طبیعی حاوی کیتین به مراحل مختلفی از جمله پروتئین‌زدایی^۸، استیل‌زدایی^۹ و دمینرالیزیشن یا کاهش مواد معدنی^{۱۰} بستگی دارد. دمینرالیزیشن با اسیدهای قوی و پروتئین‌زدایی در شرایط قلیایی و با استفاده از آنزیم‌های پروتئولیتیک انجام می‌شود.

- 6- D-glucosamine
- 7- N-acetyl D-glucosamine
- 8- Deproteinization
- 9-Deacetylation
- 10- Demineralization

- 1- Elicitors
- 2- Phytoalexin
- 3- Biotic
- 4- Abiotic
- 5- Chitosan



شکل ۱- ساختار کیتین و کیتوزان

Figure 1- Structure of chitin and chitosan

استیل‌زدایی کیتین از طریق هیدرولیز قلیایی گروه‌های استامید ($-\text{NHCOCH}_3$)، که در مولکول کیتوزان دی‌استیل‌ه می‌شوند

Chitin N-deacetylation through alkaline hydrolysis acetamido ($-\text{NHCOCH}_3$) groups are deacetylated in chitosan molecule

(*al.*, 2019). ان- متیلن فسفونیک کیتوزان^۳، یک مشتق آنیونی بوده که تا حدی خاصیت آمفوتریک را نشان می‌دهد. این ترکیب در آب در محدوده وسیعی از pH محلول بوده و کارایی بالایی در تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین و فلزات واسطه را دارد. همچنین به‌عنوان یک حامل ژنی غیروبررسی عمل کرده و ظرفیت بالایی در کاربردهای بالینی دارد (*Mesas et al.*, 2021). کربوکسی متیل کیتوزان^۴، فراوان‌ترین مشتق کیتوزان بوده که به‌طور کامل شناسایی شده است. این ترکیب در واقع یک پلیمر آمفوتریک بوده که میزان حالیت آن بستگی به pH محیط داشته و به‌عنوان یک ماده زیستی همه‌کاره برای طیف گسترده‌ای از کاربردها نظیر مهندسی بافت، بهبود زخم و غیره مورد توجه قرار گرفته است (*Jain et al.*, 2013; *Shariatnia, 2018; Mesas et al.*, 2021). تری متیل کیتوزان^۵ یکی دیگر از مشتقات کیتوزان بوده که حالیت آن در آب از طریق متیلاسیون گروه آمین نوع اول و تبدیل آن به آمونیوم افزایش پیدا کرده است (*Jain et al.*, 2013). سنتز مشتق تری‌متیل کیتوزان دو مرحله‌ای بوده، به‌طوری‌که ابتدا دی متیل کیتوزان سنتز شده و سپس به تری متیل کیتوزان تبدیل می‌شود (*Jain et al.*, 2013). تیمار گیاه باقلا (*Vicia faba*) با مشتق تری متیل کیتوزان، با تحریک مقاومت میزبان علیه ویروس موزائیک زرد لوبیا (*Bean*

استیل‌زدایی آخرین مرحله در تبدیل کیتین به کیتوزان است که از طریق تیمار با سدیم هیدروکسید^۱ غلیظ انجام می‌شود. خواص و کیفیت کیتوزان حاصل، به زمان، غلظت و دما در هر مرحله بستگی دارد. مولکول‌های کیتوزان دارای وزن مولکولی متغیری هستند که به درجه پلیمریزاسیون آن بستگی دارد. طول هر پلیمر بیان‌کننده ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی کیتوزان بوده و زمینه کاربرد عملی آن را مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که فعالیت کیتوزان بسته به روش تولید آن می‌تواند متفاوت باشد (*Román-Doval et al.*, 2024; *al.*, 2023; *Komarova et al.*, 2024). ساختار شیمیایی کیتوزان علاوه بر وزن مولکولی به درجه استیل‌زدایی^۲ و الگوی آن بستگی دارد. برخلاف کیتین، کیتوزان پلیمری با بار مثبت است و کاتیونی بسیار قوی بوده و در شرایط اسیدی به‌راحتی حل می‌شود. هرچه درجه استیل‌زدایی کیتوزان بالاتر باشد، بارهای مثبت بیشتری بر روی سطح آن به‌وجود می‌آید (*Aranaz et al.*, 2021; *Boroumand et al.*, 2021; *Komarova et al.*, 2024). متأسفانه یکی از چالش‌های استفاده گسترده از کیتوزان در کشاورزی، حالیت ضعیف آن در آب است. به همین علت، مشتقات کیتوزان، در مقایسه با کیتوزان اصلاح نشده از نظر حالیت، افزایش زیست‌سازگاری و در کل بهبود خواص فیزیکوشیمیایی در آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند (*Shahid Ul et*

3-N-methylene phosphonic chitosans

4- Carboxymethyl chitosans- CM-chitosan

5- Trimethyl chitosan ammonium

1-NaOH

2- Deacetylation degree- DD

BYMVyellow mosaic virus-)، شدت بیماری را در مقایسه با گیاهان باقلا تیمار نشده به شدت کاهش داد (جدول ۱) (Sofy et al., 2020).

سازوکار عمل کیتوزان

کیتوزان به دلیل دارا بودن خواص باکتری‌کشی، قارچ‌کشی و نماتدکشی می‌تواند برخی از بیمارگرها را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد. همچنین کیتوزان سرعت رشد باکتریایی و قارچی را کاهش داده و باعث باروری کمتر و مرگومیر بیشتر آفات می‌شود. مطالعات متعددی در زمینه القای مقاومت در آلودگی‌های ویروسی گیاهان انجام شده است (Salati et al., 2023; Komarova et al., 2024). کیتوزان با به کارگیری دو سازوکار مهم شامل: (۱) عملکرد مستقیم ضد میکروبی در برابر عوامل بیماری‌زا، نظیر آسیب به غشاء پلاسمایی، برهم‌کنش با DNA و RNA (برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک) و رسوب بر روی سطح میکروبی و (۲) القای پاسخ‌های دفاعی گیاه ناشی از سیگنال‌دهی پایین‌دست، فعال‌سازی فاکتور رونویسی، ژن رونویسی و در نهایت فعال‌سازی سلولی پس از شناسایی و اتصال کیتین و کیتوزان توسط گیرنده‌های سطح سلولی، نقش مهمی در کاهش بیماری‌های گیاهی دارد (Saber Riseh et al., 2022). کیتوزان هم به صورت موضعی و هم سیستمیک قابلیت مهار آلودگی‌های ویروسی را دارد (Komarova et al., 2024). میزان کارایی کیتوزان به دوز کیتوزان، نحوه کاربرد آن و ساختار مولکولی کیتوزان به‌ویژه وزن مولکولی و درجه استیل‌اسیون بستگی داشته و علاوه بر این موارد، زمان، غلظت و نحوه تیمار گیاه نیز تأثیر قابل توجهی بر تجلی فعالیت ضد ویروسی CHT دارد، به طوری که فعالیت ضد ویروسی کیتوزان با افزایش وزن مولکولی آن کاهش می‌یابد. شاید بتوان دلیل این امر را توانایی نفوذ بهتر مولکول‌های کوچک کیتوزان در داخل پوشش گیاهی دانست (Komarova et al., 2024). توانایی کیتوزان در مقابله با ویروس‌های گیاهی به دلیل توانایی این پلیمر در تحریک پاسخ دفاعی گیاه میزبان است. کیتوزان قادر به القای مقاومت در برابر تعدادی از آلودگی‌های موضعی و سیستمیک ویروس در میزبان‌های مختلف از خانواده‌های مختلف گیاهی است. فعالیت کیتوزان در خانواده گیاهی Fabaceae بیشتر از سایر خانواده‌ها است (Pospieszny et al., 1991; Komarova et al., 2024). کیتوزان از تکثیر ویروس‌ها و ویروئیدها جلوگیری می‌کند و واکنش فوق حساسیت میزبان در زمان وقوع آلودگی را افزایش می‌دهد (Komarova et al., 2024). چیرکوف (Chirkov, 2002) مشاهده کرد که کاربرد کیتوزان بر روی گیاهان سیب‌زمینی مایه‌زنی‌شده با ویروس ایکس سیب‌زمینی (Potato virus X, PVX)، مقاومت این گیاهان در برابر ویروس را افزایش داد (جدول ۱). در گیاهان گوجه

فرنگی تیمار شده با کیتوزان، علاوه بر بروز مقاومت در برابر ویروس موزائیک گوجه‌فرنگی (Tomato mosaic virus- ToMV)، افزایش رشد رویشی گیاه نیز مشاهده شد (جدول ۱) (Chakraborty et al., 2020). همچنین نتایج مشابهی نیز در تیمار گیاه خیار با کیتوزان، در برابر ویروس موزائیک خیار (Cucumber mosaic virus- CMV) نیز مشاهده گردید (Salati et al., 2016).

کیتوزان به عنوان القاکننده واکنش دفاعی در گیاه

گمان بر این است که کیتوزان به گیرنده‌های غشایی سلول متصل شده و موجب تجمع فیتوالکسین‌ها و مواد آنتی‌بیوتیکی با وزن مولکولی کم در بافت‌های گیاهی می‌شود. در نتیجه این فرآیند، سنتز کالوز نیز القاء می‌شود که در دیواره سلولی رسوب کرده و به عنوان مانعی در مقابل نفوذ جانداران بیماری‌زا عمل می‌کند. سرکوب آنزیم‌های پروتئولیتیک آزاد شده توسط بیمارگرها برای نفوذ به بافت‌های گیاهی نیز تحت تأثیر کیتوزان افزایش می‌یابد. همچنین کیتوزان با هدف حفاظت از گیاهان، به صورت پوشش بر روی بذر، برگ و میوه، به عنوان کود در کنترل آزادسازی مواد شیمیایی، افزایش میزان محصول، تحریک جوانه‌زنی و رشد گیاه و کاهش‌دهنده تعرق با تأثیر بر روی روزنه‌ها و بسته شدن آن‌ها نیز کاربرد دارد (Chirkov, 2001; Iriti & Varoni, 2015; Ghasemi Nejad Rasyeni et al., 2025). کیتوزان به دلیل ماهیت پلی‌کاتیونی خود باعث تخریب ساختمان سلولی و تراوش الکترولیت‌ها و پروتئین‌ها شده و بدین ترتیب می‌تواند از رشد بیمارگر مانع نماید (Iriti & Chirkov, 2001; Iriti & Varoni, 2015). مجموع این ویژگی‌ها، کیتوزان را به ترکیبی مؤثر برای تقویت ایمنی گیاه و جایگزینی مناسب برای مواد شیمیایی مضر در مدیریت بیماری‌های گیاهی تبدیل کرده است.

فعالیت ضد ویروسی کیتوزان

مطالعات متعددی اثربخشی کیتوزان در مهار بیماری‌های ویروسی گیاهان را تأیید کرده‌اند. چیرکوف (Chirkov, 2001)، داویدوا و همکاران (Davydova et al., 2011) و هی و همکاران (He et al., 2019) گزارش کردند که کیتوزان با مهار انتشار سیستمیک ویروس‌ها و تحریک واکنش فوق حساسیت^۱، می‌تواند آلودگی‌های ویروسی را در خانواده‌های مختلف گیاهی سرکوب کند. برخی یافته‌ها نیز نشان دادند که کیتوزان اگرچه فاقد اثر مستقیم ضد ویروسی است، اما با تقویت پاسخ‌های ایمنی گیاه، مقاومت آن را در برابر عوامل ویروسی افزایش می‌دهد (Iriti & Varoni, 2015). برخی گزارش‌ها نشان دادند که کیتوزان هیچ‌گونه فعالیت ضد ویروسی مستقیمی ندارد، اما در

های گیاهی اعمال می‌شود، در هسته جایگزین شده و می‌تواند ژن‌های خاصی را در گیاهان فعال کند (Pospieszny et al., 1991). برخی از پلی‌ساکاریدها می‌توانند به‌طور مستقیم وارد سلول میزبان آلوده شده و ویروس‌ها را در همان‌جا از بین ببرند. همچنین برهم‌کنش الکترواستاتیکی بین بار مثبت پلی‌کاتیونی کیتوزان و بار منفی سطح ویروس می‌تواند توانایی آلوده‌کنندگی ویروس را مهار کرده و یا با مختل کردن پوشش پروتئینی^۲ ویروس به‌طور مستقیم آن را از بین ببرد. تشکیل کمپلکس میان کیتوزان و S-protein ویروس، مانع ورود ویروس به داخل سلول میزبان می‌شود (Rendina et al., 2019). نتایج حاصل از محلول‌پاشی نمونه‌های گوجه‌فرنگی با کیتوزان قبل از مایه‌زنی ویروس موزائیک خیار (Cucumber mosaic virus- CMV) به‌منظور بررسی اثربخشی آن به‌عنوان یک روش درمان پیشگیرانه قبل از تلقیح ویروس، نشانگر کاهش قابل توجه (تا ۱۰۰ درصد) تجمع CMV در گیاهان تیمارشده با کیتوزان در مقایسه با نمونه‌های تیمار نشده بود. همچنین عدم وجود علائم زیان‌آور در گیاهان آلوده به CMV، که به‌صورت متوالی تحت تیمار کیتوزان قرار گرفتند، نشان‌دهنده این است که کیتوزان می‌تواند به عنوان یک عامل مهار قوی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه‌بر آن، کاربرد پیشگیرانه کیتوزان در گوجه‌فرنگی‌ها قادر به برانگیختن پاسخ‌های دفاعی در میزبان با هدف مهار آلودگی CMV بود که چنین یافته‌ای ممکن است برای محافظت از عملکرد میوه گوجه‌فرنگی و همچنین سایر محصولات کشاورزی توصیه شود (Rendina et al., 2019).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کیتوزان پس از کاربرد، مسیرهای متعددی را در گیاه فعال می‌کند که عمدتاً با ایمنی ذاتی و مقاومت اکتسابی مرتبط هستند (Wong et al., 2014). یکی از اجزای مهم این پاسخ، تحریک تجمع اسید سالیسیلیک و فعال‌سازی مسیر مقاومت اکتسابی سیستمیک است. این پاسخ گیاه به‌طور قابل‌توجهی بین گونه‌های مختلف گیاهی متفاوت است. بنابراین، تشخیص اینکه کدام یک از این فرایندها به‌طور ویژه زمینه‌ساز مقاومت اکتسابی در برابر ویروس‌ها است، امری دشوار است. همچنین کیتوزان باعث تحریک تجمع اسید سالیسیلیک^۳ شده و مقاومت اکتسابی سیستمیک را در گیاه فعال می‌کند. میزان مقاومت ایجادشده بستگی به ترکیب میزبان و ویروس و نوع آلودگی دارد. به نظر می‌رسد که SAR در سیستم‌های ویروس-میزبان با آلودگی‌های موضعی، مؤثرتر از آلودگی‌های سیستمیک باشد (Komarova et al., 2024). نشان داده شده است که اسید سالیسیلیک نقش مهمی در دفاع ضدویروسی ایفا می‌کند (Salati et al., 2016). در واقع اسید سالیسیلیک یک

مقابل، پاسخ ایمنی گیاه را تحریک کرده و سازوکارهای دفاع عمومی آن را بهبود می‌بخشد (Iriti & Varoni, 2015). محلول‌پاشی گیاهان ماش (*Vigna radiata*) و نخود (*Pisum sativum*) با کیتوزان از سیستمیک شدن ویروس‌هایی نظیر موزائیک یونجه (*Alfalfa mosaic virus- AMV*)، موزائیک طلایی لوبیا (*Bean golden mosaic virus- BGMV*) و ویروس کوتولگی بادام زمینی (*Peanut stunt virus- PSV*) جلوگیری می‌کند (Pospieszny et al., 2001; Chirkov et al., 1991). درحالی که در گیاه گوجه فرنگی، مانع از توسعه آلودگی سیستمیک ناشی از ویروس موزائیک توتون (*Tobacco mosaic virus- TMV*) و ویروس ایکس سیب‌زمینی (*Potato virus X-PVX*) و ویروئید دوکی شدن غده سیب‌زمینی (*Potato spindle tuber viroid- PSTV*) می‌شود (جدول ۱) (Surguchova et al., 2000; Chirkov et al., 2001). تیمار گیاهان سیب‌زمینی با کیتوزان (یک میلی‌گرم در میلی‌لیتر)، از آلودگی آن‌ها با PVX و ویروس وی سیب‌زمینی (*Potato virus Y- PVY*) جلوگیری کرد، زیرا در اکثر گیاهان مورد بررسی، ویروس فراتر از برگ‌های تلقیح‌شده حرکت نکرد (جدول ۱) (Surguchova et al., 2000; Chirkov et al., 2001; Komarova et al., 2024). در بررسی کارایی کیتوزان در مهار بیمارگرهای ویروسی، تیمار برگ‌های لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) با پلیمر کیتوزان، تعداد لکه‌های موضعی نکروزه‌شده ناشی از ویروس موزائیک یونجه (*Alfalfa mosaic virus- AMV*) را با تحریک مقاومت اکتسابی سیستمیک^۱ کاهش داد (جدول ۱) (Iriti & Varoni, 2015). مطالعات متعددی در مورد القای مقاومت کیتوزان در آلودگی‌های موضعی و سیستمیک گیاهان مختلف به ویروس‌ها انجام شده است (Iriti & Varoni, 2015). لازم به ذکر است که کیتوزان از آلودگی‌های ناشی از ویروس‌ها با ساختارها و سازوکارهایی متفاوت، از طریق ممانعت از بیان ژنوم ویروسی، جلوگیری کرده که می‌تواند نشانگر این احتمال باشد که کیتوزان بدون توجه به نوع ویروس، آلودگی را با تحریک سیستم دفاعی گیاه سرکوب می‌کند (Chirkov, 2002). با وجود اینکه ابهاماتی پیرامون سازوکار اثر ضدویروسی کیتوزان و گلوکان بر آلودگی ویروس‌های گیاهی دیده می‌شود، اما این مشاهدات بر نقش گونه‌های میزبان در القای واکنش دفاعی ضدویروسی اشاره دارد. کیتوزان نه‌تنها در مراحل ابتدای آلودگی ویروسی اثرگذار هست، بلکه ممکن است یکی از مراحل تولیدمثلی ویروس را نیز مسدود کند (Pospieszny et al., 1991). همچنین کیتوزان می‌تواند از تکثیر RNA ویروس جلوگیری کرده، سنتز یک پروتئین خاص ویروسی را مهار کند یا با افزایش نفوذپذیری غشاء سلولی به پروتوپلاست آسیب رساند. هنگامی که کیتوزان روی سلول

2-Coat protein

3- Salicylic acid-SA

1- Systemic acquired resistance- SAR

مولکول سیگنال است که مسیرهای متعددی را فعال کرده و تغییرات مختلفی را در فیزیولوژی سلول‌های گیاهی و بیان ژن‌ها آغاز می‌کند. اسید سالیسیلیک تأثیر منفی روی تکثیر ویروسی، گسترش بین‌سلولی و حرکت سیستمیک دارد. این نوع تأثیر منفی به ترکیب ویروس-میزبان بستگی دارد. بنابراین، می‌توان میزان تفاوت در فعالیت کیتوزان در مقابل ترکیب‌های مختلف ویروس-میزبان را تا حدی با ویژگی دفاع ضد ویروسی با واسطه SA توضیح داد (Komarova et al., 2024). لازمه وقوع آلودگی‌های ویروسی سه مرحله اصلی، نفوذ به درون سلول میزبان، تکثیر و انتقال ویروس است، که کیتوزان می‌تواند با هر یک از این فرایندها تداخل داشته باشد (شکل ۲) (Komarova et al., 2024). کیتوزان در ابتدا می‌تواند از نفوذ به سلول جلوگیری کند، زیرا هنگامی که از کیتوزان به‌صورت محلول‌پاشی استفاده می‌شود، غشایی بر روی سطح برگ تشکیل می‌دهد و احتمالاً لایه تشکیل‌شده به‌صورت مکانیکی تا حدی از ورود ویروس به درون برگ جلوگیری می‌کند. در مرحله دوم، واکنش‌های ناشی از کیتوزان باعث اختلال در عملکرد ویروس در داخل سلول میزبان می‌شود. تکثیر ویروس شامل چندین رویداد است که کارایی آن به تکثیر RNA ویروسی، ثبات و در دسترس بودن فاکتورهای ضروری سلولی و شدت پاسخ‌های دفاع سلولی بستگی دارد. در نهایت، مرحله‌ای که برای تکثیر کارآمد ویروس بسیار مهم است، جابه‌جایی ویروس در داخل گیاه میزبان می‌باشد. این جابه‌جایی ممکن است به‌صورت گسترش موضعی بین سلولی یا انتقال سیستمیک در میزبان باشد. از آنجایی که کیتوزان سبب تشکیل کالوز نیز می‌شود، در نتیجه رسوب کالوزها در اطراف پلاسمودسما^۱ و کاهش نفوذپذیری آن‌ها، حرکت سلول به سلول ویروس نیز کاهش می‌یابد (Komarova et al., 2024). در مجموع، کیتوزان با تحریک ایمنی گیاه و مداخله در فرایندهای کلیدی چرخه ویروس، گزینه‌ای پایدار، زیست‌سازگار و مؤثر در مدیریت بیماری‌های ویروسی گیاهی محسوب می‌شود.

کاربرد نانوذرات کیتوزان در مدیریت بیمارگرهای

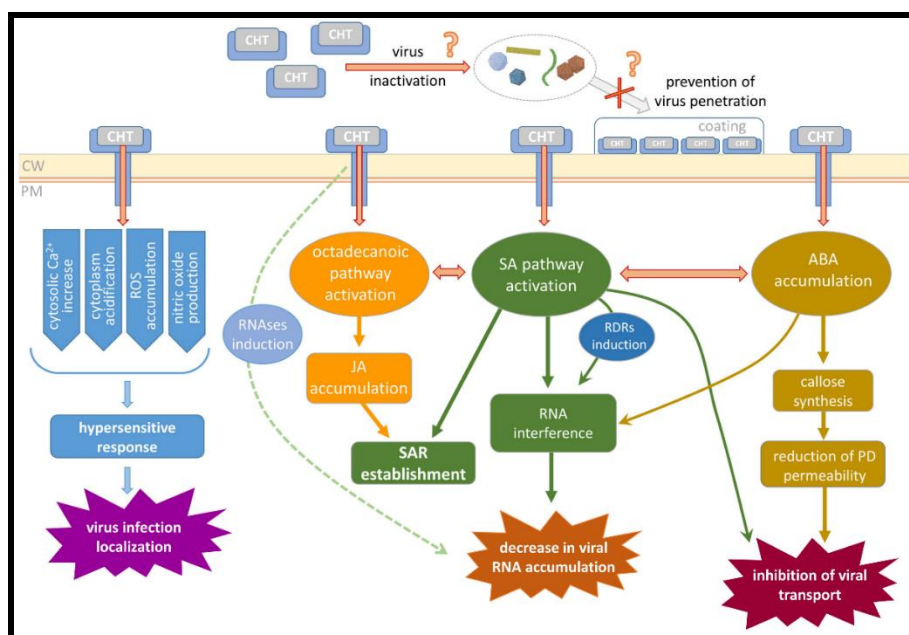
ویروسی گیاهی

نانوذرات کیتوزان^۲ به‌دلیل ساختار نانو و بار سطحی مثبت خود، توانایی بالایی در تقابل با ویروس‌های گیاهی دارند. این نانوذرات با ایجاد اختلال در چرخه تکثیر ویروس، افزایش ایمنی ذاتی گیاه و فعال‌سازی پاسخ‌های دفاعی، به‌عنوان یک ابزار نوین در مهار بیماری‌های ویروسی شناخته شده‌اند. مطالعات مربوط به استفاده از نانوذرات به‌عنوان مواد حامل برای dsRNAها به‌منظور القای مقاومت ویروس

نیز نتایج مثبتی به همراه داشته است (Warghane et al., 2024). اولین مطالعه جامع به‌منظور بررسی توانایی ضدویروسی نانوذرات کیتوزان در برابر ویروس‌های گیاهی توسط ال جمال و همکاران (El Gamal et al., 2022) انجام شد و این در حالی است که در گزارش‌های پیشین به نقش نانوذرات کیتوزان در افزایش قابلیت‌های ضدویروسی در برابر ویروس‌های انسانی مانند ویروس هپاتیت C (Hepatitis C virus) و HIV (Human immunodeficiency virus) اشاره شده است (El Gamal et al., 2022; Warghane et al., 2024). نانوذرات با اندازه‌های بین یک تا ۱۰۰ نانومتر، به‌دلیل نسبت سطح به حجم زیادشان ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی برتری را در مقایسه با مواد بزرگ‌تر از خود ایجاد می‌کنند. از آنجایی که همه ویروس‌های گیاهی ذرات بیولوژیکی در اندازه نانو هستند، منطقی است که استدلال کنیم کیتوزان در شکل مبتنی بر نانو می‌تواند فعالیت ضدویروسی را با هدف قرار دادن ذرات ویروس و متوقف کردن فرآیند تکثیر آن‌ها در بافت‌های میزبان باعث شود (El Gamal et al., 2022). علاوه بر این، نانوذرات کیتوزان یکپارچگی ویروس را با تولید ذرات ویروسی ناقص و معیوب تغییر می‌دهد. ممکن است نانوذرات کیتوزان سنتز شده دارای سطحی با بارهای مثبت باشد و باعث تجمع آمینوها با بار مثبت بر روی زنجیره‌های پلیمری کیتوزان گلوکزآمین شود. از آنجایی که همه پروتئین‌های ویروسی دارای دسته‌هایی از پروتئین‌های گلیکول با بار منفی هستند، فرض بر این است که نانوذرات با بار مثبت می‌توانند پروتئین پوشش ویروس را نیز هدف قرار دهند. این امر می‌تواند نشان‌دهنده نقش نانوذرات کیتوزان در مهار ویروس‌های گیاهی باشد (El Gamal et al., 2022). نتایج نشان می‌دهد که کاربرد این نانوذرات با کاهش بیماری‌زایی ویروس و افزایش مشخصه‌های رشدی در گیاه، مانع از وقوع کوتولگی می‌شود (El Gamal et al., 2022). همچنین نانوذرات کیتوزان به‌عنوان تقویت‌کننده رشد گیاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۳) (El Gamal et al., 2022).

1- Plasmodesmata

2- Chitosan Nanoparticles (ChiNPs)

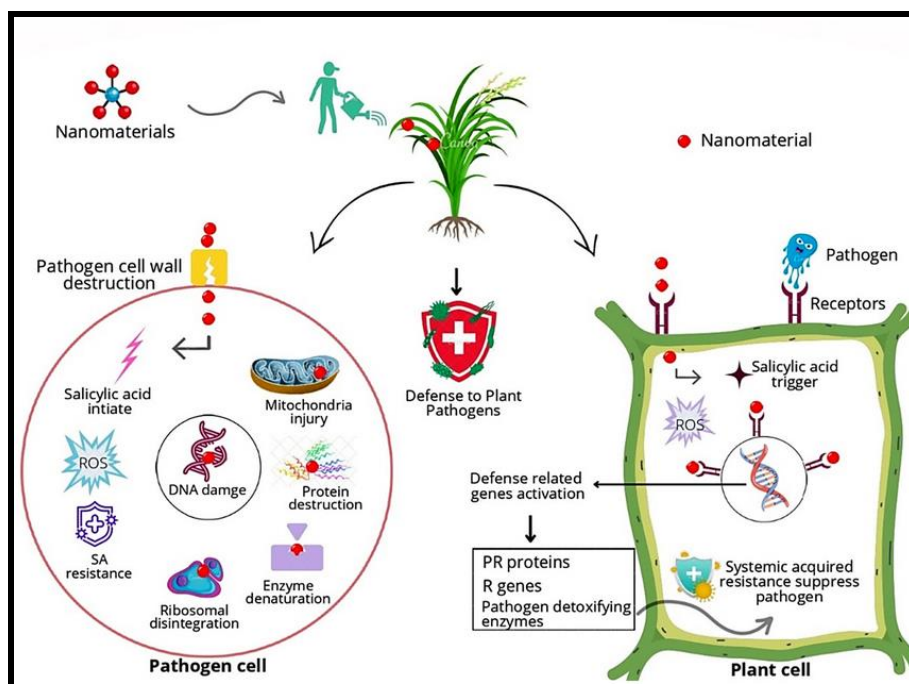


شکل ۲- نمایش شماتیک سازوکارهای احتمالی مربوط به مقاومت گیاه با واسطه کیتوزان در آلودگی‌های ویروسی

Figure 2- Schematic representation of the putative mechanisms related to CHT-mediated plant resistance to viral infection

CW: دیواره سلولی؛ PM: غشای پلاسمایی؛ ROS: گونه‌های فعال اکسیژن؛ RNA: ریبونوکلائزها؛ SA: اسید سالیسیلیک؛ RDRs: RNA وابسته به RNA پلیمرازها؛ SAR: مقاومت اکتسابی سیستمیک؛ PD: پلاسمودسماتا

CW, cell wall; PM, plasma membrane; ROS, reactive oxygen species; RNases, ribonucleases; SA, salicylic acid; RDRs, RNA-dependent RNA polymerases; SAR, systemic acquired resistance; PD, plasmodesmata



شکل ۳- نقش نانوذرات در فعال کردن پاسخ‌های ایمنی و سرکوب بیمارگرهای گیاهی

Figure 3- The role of nanoparticles in activating immune responses and suppressing plant pathogens

جدول ۱- کاربرد کیتوزان به منظور القای مقاومت گیاه در برابر آلودگی‌های ویروسی
Table 1- Chitosan application for induction of plant resistance to viral infections.

Plant	Virus	Type of chitosan	Effect	References
<i>Phaseolus vulgaris</i> (bean)	AMV	CHT from krill and crab	Treatment of Bean leaves with chitosan reduced the number of local necrotic spots caused by AMV by inducing systemic acquired resistance.	Iriti & Varoni, 2015
	BYMV	Nanochitosan	This formulation led to the stimulation of genes involved in resistance including PR-1	El Gamal <i>et al.</i> , 2022
<i>Vicia faba</i> (faba bean)	BYMV	CHT from krill and crab	By inducing host resistance against BYMV, disease severity was reduced compared to untreated plants.	Sofy <i>et al.</i> , 2020
<i>Solanum tuberosum</i> (potato)	PVX, PVY	CHT from krill and crab	Chitosan (1mg/ml) prevented infection with PVX and PVY as the virus did not move beyond the inoculated leaves in most of the plants tested.	Chirkov, 2002; Komarova <i>et al.</i> , 2024
	ToMV	CHT from krill and crab		Chakraborty <i>et al.</i> , 2020
	PVX	CHT from krill and crab	Inducing resistance against TOMV and increasing plant vegetative growth	Komarova <i>et al.</i> , 2024
			Reducing in the number of plants systemically infected with PVX.	
	PSTV	CHT from krill and crab	Prevents the development of systemic infection caused by PSTV	Komarova <i>et al.</i> , 2024
	CMV	CHT from krill and crab	The use of chitosan as a preventive treatment before CMV inoculation was able to prevent its accumulation in the plant by 100% and prevented the development of systemic infection.	
<i>Solanum lycopersicum</i> (tomato)			Prevents the development of systemic infection	Rendina <i>et al.</i> , 2019
		CHT from krill and crab		Komarova <i>et al.</i> , 2024
	TMV			
	CMV, CYSDV, CABYV	CHT from krill and crab	Development of resistance to viral infections and increased plant vegetative growth	Salati <i>et al.</i> , 2023
<i>Capsicum annuum</i> (pepper)	CMV, PMMV	Nanochitosan	Leads to increased expression of resistance causing genes NPR1 and cysteine protein inhibitor	Gangireddygar <i>et al.</i> , 2021
		Nanochitosan	The application of chitosan nanoparticles 24 hours after artificial infection with AMV had an inhibitory effect of up to 90%.	El-Ganainy <i>et al.</i> , 2023
	AMV			
<i>Nicotiana glutinosa</i>	AMV	Nanochitosan	In greenhouse conditions, it reduced disease severity and reduced virus accumulation. In addition, it induced general acquired resistance, increased total carbohydrates and total phenolic content.	Abdelkhalek <i>et al.</i> , 2021

CYSDV: ویروس کوتولگی زرد کدوئیان، CABYV: ویروس زردی شته‌زاد کدوئیان، PMMV: ویروس موزائیک خفیف فلفل (پیسک)

CYSDV: Cucurbit yellow stunting disorder virus, CABYV: Cucurbit Aphid-Borne Yellows Virus, PMMV: Pepper mild mottle virus

نتیجه‌گیری

مدنظر قرار گیرد. نکته مهم در به‌کارگیری این ترکیب توجه به وزن مولکولی کیتوزان اولیه می‌باشد و جنبه کاربردی دیگر آن حفظ شرایط استفاده پایدار آن در اختلاط با سایر مواد شیمیایی که باعث تغییر pH محلول می‌شوند، می‌باشد. از طرف دیگر به‌کارگیری این پلیمر و محصولات نانوذره مبتنی بر آن، جایگزین مناسبی برای آفت‌کش‌های شیمیایی سنتی بوده، که این امر گامی مهم در جهت کاهش مصرف سموم شیمیایی و برقراری کشاورزی پایدار می‌باشد. در نهایت، انجام تحقیقات بیشتر در زمینه تعیین دوز بهینه، زمان‌بندی مصرف، و هم‌افزایی با سایر ترکیبات زیستی، می‌تواند نقش کیتوزان را در سیستم‌های مدیریت تلفیقی بیماری تقویت کند.

کیتوزان و مشتقات آن، به‌عنوان ترکیبات زیستی فعال، توانایی چشم‌گیری را در تحریک مسیرهای دفاعی گیاه و افزایش مقاومت در برابر آلودگی‌های ویروسی نشان داده‌اند. بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی، به‌ویژه مطالعات اجراشده در مزارع کشاورزی استان خراسان رضوی، مؤید آن است که استفاده از کیتوزان می‌تواند شدت آلودگی‌های ویروسی را کاهش داده و هم‌زمان منجر به بهبود رشد و عملکرد گیاه شود. بنابراین، این پلیمر می‌تواند به‌عنوان یک عنصر مهم برای توسعه فرمولاسیون‌های فعال زیستی با هدف حفاظت از گیاهان در مقابل عوامل بیماری‌زای مختلف، به‌ویژه در برابر آلودگی‌های ویروسی

References

1. Abdelkhalek, A., Qari, S.H., Abu-Saied, M.A.A.R., Khalil, A.M., Younes, H.A., Nehela, Y., & Behiry, S.I. (2021). Chitosan nanoparticles inactivate alfalfa mosaic virus replication and boost innate immunity in *Nicotiana glutinosa* plants. *Plants*, 10(12), 2701. <https://doi.org/10.3390/plants10122701>
2. Aranaz, I., Alcántara, A.R., Civera, M.C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 13, 3256. <https://doi.org/10.3390/polym13193256>
3. Boroumand, H., Badie, F., Mazaheri, S., Seyedi, Z.S., Nahand, J.S., Nejati, M., Baghi, H.B., Abbasi-Kolli, M., Bاده‌نووش, B., Ghandali, M., Hamblin, M.R., & Mirzaei, H. (2021). Chitosan-based nanoparticles against viral infections. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 11, 643953. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.643953>
4. Chakraborty, M., Hasanuzzaman, M., Rahman, M., Khan, M.A., Bhowmik, P., Mahmud, N.U., Tanveer, M., & Islam, T. (2020). Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer. *Agriculture*, 10(12), 624. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120624>
5. Chirkov, S.N., Il'ina, A.V., Surgucheva, N.A., Letunova, E.V., Varitsev, Y.A., Tatarinova, N.Y., & Varlamov, V.P. (2001). Effect of chitosan on systemic viral infection and some defense responses in potato plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 48(6), 774–779. <https://doi.org/10.1023/A:1012508625017>
6. Chirkov, S.N. (2002). The antiviral activity of chitosan (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 38(1), 1–8. <https://doi.org/10.1023/A:1013206517442>
7. Davydova, V.N., Nagorskaya, V.P., Gorbach, V.I., Kalitnik, A.A., Reunov, A.V., Solov'eva, T.F., & Yermak, I.M. (2011). Chitosan antiviral activity: Dependence on structure and depolymerization method. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47(1), 103–108. <https://doi.org/10.1134/S0003683811010042>
8. El Gamal, A.Y., Atia, M.M., El Sayed, T., Abou-Zaid, M.I., & Tohamy, M.R. (2022). Antiviral activity of chitosan nanoparticles for controlling plant-infecting viruses. *South African Journal of Science*, 118(1-2), 1-9. <https://doi.org/10.17159/sajs.2022/10693>
9. El-Ganainy, S.M., Soliman, A.M., Ismail, A.M., Sattar, M.N., Farroh, K.Y., & Shafie, R.M. (2023). Antiviral activity of chitosan nanoparticles and chitosan silver nanocomposites against alfalfa mosaic virus. *Polymers*, 15(13), 2961. <https://doi.org/10.3390/polym15132961>
10. Gangireddygar, V.S.R., Chung, B.N., Cho, I.S., & Yoon, J.Y. (2021). Inhibitory effect of chitosan and phosphate cross-linked chitosan against cucumber mosaic virus and pepper mild mottle virus. *The Plant Pathology Journal*, 37(6), 632–640. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.10.2021.0155>
11. Ghasemi Nejad Rayeni, H., Pahlavan Yali, M., & Bozorg Amir-Kalaei, M. (2025). Evaluation of chitosan, gamma-aminobutyric acid and potassium silicate on some biochemical parameters of pistachio tree to induce resistance against pistachio psyllid (*Agonosoma pistaciae*). *Iranian Plant Protection Research*, 39(3), 269–282. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jpp.2025.91135.1212>
12. He, X., Xing, R., Liu, S., Qin, Y., Li, K., Yu, H., & Li, P. (2019). The improved antiviral activities of amino-modified chitosan derivatives on Newcastle virus. *Drug and Chemical Toxicology*, 44(4), 335–340. <https://doi.org/10.1080/01480545.2019.1620264>
13. Iriti, M., & Varoni, E.M. (2015). Chitosan-induced antiviral activity and innate immunity in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2935–2944. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3571-7>

14. Jaber, N., Al-Remawi, M., Al-Akayleh, F., Al-Muhtaseb, N., Al-Adham, I.S.I., & Collier, P.J. (2022). A review of the antiviral activity of chitosan, including patented applications and its potential use against COVID-19. *Journal of Applied Microbiology*, 132(1), 41-58. <https://doi.org/10.1111/jam.15202>
15. Jain, A., Gulbake, A., Shilpi, S., Jain, A., Hurkat, P., & Jain, S.K. (2013). A new horizon in modifications of chitosan: Syntheses and applications. *Critical Reviews™ in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 30(2), 91-181. <https://doi.org/10.1615/critrevtherdrugcarriersyst.2013005678>
16. Komarova, T., Shipounova, I., Kalinina, N., & Taliansky, M. (2024). Application of chitosan and Its derivatives against plant viruses. *Polymers*, 16(22), 3122. <https://doi.org/10.3390/polym16223122>
17. Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(7), 996. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
18. Mesas, F.A., Terrile, M.C., Silveyra, M.X., Zuñiga, A., Rodriguez, M.S., Casalongué, C.A., & Mendieta, J.R. (2021). The water-soluble chitosan derivative, N-methylene phosphonic chitosan, Is an effective fungicide against the phytopathogen *Fusarium eumartii*. *Plant Pathology Journal*, 37(6), 533-542. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.06.2021.0090>
19. Pospieszny, H., Chirkov, S., & Atabekov, J. (1991). Induction of antiviral resistance in plants by chitosan. *Plant Science*, 79, 63–68. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(91\)90070-O](https://doi.org/10.1016/0168-9452(91)90070-O)
20. Rendina, N., Nuzzaci, M., Scopa, A., Cuyper, A., & Sofo, A. (2019). Chitosan-elicited defense responses in cucumber mosaic virus (CMV)-infected tomato plants. *Journal of Plant Physiology*, 234-235, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.01.003>
21. Román-Doval, R., Torres-Arellanes, S.P., Tenorio-Barajas, A.Y., Gómez-Sánchez, A., & Valencia-Lazcano, A.A. (2023). Chitosan: Properties and its application in agriculture in context of molecular weight. *Polymers*, 15, 2867. <https://doi.org/10.3390/polym15132867>
22. Saberi Riseh, R., Hassanisaadi, M., Vatankhah, M., Abdani Babaki, S., & Ait Barka, E. (2022). Chitosan as a potential natural compound to manage plant diseases. *International Journal of Biological Macromolecules*, 220, 998-1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.109>
23. Salati, M., Bananej, K., Kazemi Moghdam, M., Housseini, M., Vahid Housseinnia, S., Hadizadse, M.H., & Afzali, H. (2016). Evaluation of chitosan and salicylic acid application in reducing severity of two main cucumber viral diseases. Agriculture Research, Education and Promotion Organization. Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research and Training Center, 49534.
24. Salati, M., & Bananej, K. (2021). Feasibility study on application of different polyethylene mulch types to control of important virus diseases and sucking pests in melon. *Applied Field Crops Research*, 34(2), 99–119. <https://doi.org/10.22092/aj.2021.341671.1452>
25. Salati, M., Bananej, K., & Rastegar, A. (2021). Identification of viral agent associated in yellowing symptoms in melon seed fields in Khorasan Razavi province. Agriculture Research, Education and Promotion Organization. Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research and Training Center, 59549.
26. Salati, M., Bananej, K., Gharouni, S., Houseini, M.R., & Gholampou, Z. (2023). Enhancing melon tolerance to cucurbit aphidborne yellows virus and cucurbit yellow stunting disorder virus using defense activator. *Journal of Applied Research in Plant Protection*, 13(2), 167–177. <https://doi.org/10.22034/arpp.2024.17688>
27. Shahid Ul, I., Butola, B.S., & Verma, D. (2019). Facile synthesis of chitosan-silver nanoparticles onto linen for antibacterial activity and free-radical scavenging textiles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 1134–1141. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.186>
28. Shariatnia, Z. (2018). Carboxymethyl chitosan: properties and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120(Pt B), 1406–1419. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.131>
29. Sofy, A.R., Hmed, A.A., Alnaggar, A.E.A.M., Dawoud, R.A., Elshaarawy, R.F.M., & Sofy, M.R. (2020). Mitigating effects of bean yellow mosaic virus infection in faba bean using new carboxymethyl chitosan-titania nanobiocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1261-1275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.066>
30. Surguchova, N.A., Varitsev, Yu. A., & Chirkov, S.N. (2000). The inhibition of systemic viral infections in potato and tomato plants by chitosan treatment. *Journal of Russian Phytopathological Society*, 1, 59-62.
31. Warghane, A., Saini, R., Shri, M., Andankar, I., Ghosh, D.K., & Chopade, B.A. (2024). Application of nanoparticles for management of plant viral pathogen: current status and future prospects. *Virology*, 592, 109998. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2024.109998>
32. Wong, M., Salati, M., & Kwan, Y. (2014). Nitric Oxide in Relation to Plant Signaling and Defense Responses. In M. Nasir Khan, J. C. Francisco, & M. Firoz, (eds.) Nitric Oxide in plants: metabolism and role in stress physiology. (pp.265-281). Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06710-0_16