2023, Vol.10, No.2, Pages 109 to 125
Journal of Water and Sustainable Development

سال دهم، شماره ۲، ۱۴۰۲، صفحات ۱۰۹ تا ۱۲۵
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review Article

نوع مقاله: مروری

The Use of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) in Water Disinfection in Aquaculture Systems and the Effects of Its Release in the Environment

A.R. Radkhah[1*], S. Eagderi[2]

1,2-Ph.D. Graduate and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*(Corresponding Author Email: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

Received: 23-01-2023 Revised: 05-04-2023
Accepted: 03-05-2023 Available Online: 21-09-2023

کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب‌زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهایش آن در محیط

علیرضا رادخواه[1*]، سهیل ایگدری[2]

۱و۲- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

Abstract

The present research was conducted in order to investigate the role of silver nanoparticles (Ag-NPs) in water disinfection in aquaculture systems and also the environmental effects caused by its release in the environment. The literature review showed that very few studies have been recorded about the antiviral effects of silver nanoparticles in aquaculture systems. Meanwhile, silver nanoparticles showed positive effects against many bacterial pathogens such as Aeromonas and Vibrio as well as fungal agents such as Aspergillus and Candida. Since the mentioned microbial strains are among the most important and common pathogenic agents in Iran's breeding systems, the use of silver nanoparticles with the appropriate amount (provided that more than not allowed) can be useful. Examination of various scientific sources showed that the safe and permissible level of silver nanoparticles has been studied in many farmed fish species, including rainbow trout, silver carp, common carp and zebra fish. Considering this issue, breeders can use these substances to control and prevent the spread of infectious diseases in breeding systems, considering the safe and permissible level of silver nanoparticles for each aquatic species. Based on the comparisons, the antimicrobial effects of silver nanoparticles are very high among metal nanoparticles. In general, the release of these substances into aquatic ecosystems can affect the health of many aquatic animals, including fish, and even have negative effects on human health due to the transfer of silver nanoparticles in the food chain.

Keywords: Silver Nanoparticles, Aquaculture, Fish, Toxicity, Antibacterial Properties.

چکیده

تحقیق حاضر به‌منظور بررسی نقش نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب‌زدایی آب در سیستم‌های آبزی‌پروری و همچنین اثرات زیست‌محیطی ناشی از رهایش آن در محیط، صورت گرفت. بررسی‌ها نشان داد که مطالعات بسیار اندکی پیرامون اثرات ضدویروسی نانوذرات نقره در سیستم‌های پرورشی آبزیان ثبت شده است، این در حالی است که نانوذرات نقره در برابر بسیاری از عوامل بیماری‌زای باکتریایی مانند Aeromonas و Vibrio و همچنین، عوامل قارچی مانند Aspergillus و Candida، تأثیرات مثبتی نشان دادند. از آنجایی‌که سویه‌های میکروبی مذکور، از مهم‌ترین و شایع‌ترین عوامل بیماری‌زا در سیستم‌های آبزی‌پروری ایران به‌شمار می‌روند، استفاده از نانوذرات نقره با مقدار مناسب (به‌شرطی که بیش از حدِ مُجاز نباشد) می‌تواند مفید باشد. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد که سطح ایمن و مجاز نانوذرات نقره در بسیاری از گونه‌های پرورشی ماهی از جمله قزل‌آلای رنگین‌کمان، کپور نقره‌ای، کپور معمولی و ماهی گورخری مورد مطالعه قرار گرفته است. با نظر به این موضوع، پرورش‌دهندگان می‌توانند با توجه به سطح ایمن و مجاز نانوذرات نقره برای هر کدام از گونه‌های آبزی، از این مواد به‌منظور کنترل و پیشگیری از شیوع بیماری‌های عفونی در سیستم‌های پرورشی استفاده نمایند. بر اساس مقایسه‌های انجام شده، اثرات ضدمیکروبی نانوذرات نقره در بین نانوذرات فلزی بسیار بالا است. با توجه به این مسأله، رهایش این مواد به درون اکوسیستم‌های آبزی می‌تواند سلامت بسیاری از آبزیان از جمله ماهیان را تحت تأثیر قرار دهد و حتی به‌واسطهٔ انتقال نانوذرات نقره در زنجیره غذایی، اثرات منفی بر سلامت انسان داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات نقره، آبزی‌پروری، ماهیان، سمیّت، خواص ضدباکتریایی.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: Radkhah A.R., & Eagderi S. (2023). The Use of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) in Water Disinfection in Aquaculture Systems and the Effects of Its Release in the Environment. Journal of Water and Sustainable Development, 10(2): 109-125. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2301-1209

مقدمه

طی سال‌های اخیر، صنعت آبزی‌پروری به‌طور قابل توجهی در سراسر جهان توسعه یافته است (Ogunfowora و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، شیوع و گسترش بیماری‌ها از معضلات و چالش‌های عمده در این صنعت مهم به‌شمار می‌رود که بسیار پیچیده است و تاکنون باعث خسارات اقتصادی زیادی در کشورهای مختلف شده است. به‌طور ویژه، آئروموناس (*Aeromonas spp*) و ویبریو (*Vibrio spp*) دو گروه از باکتری‌ها هستند که باعث بیماری در آبزیان آب شیرین و شور می‌شوند. این عوامل میکروبی که در سیستم‌هایِ پرورشیِ با تراکم بالا و محیط‌های آلوده حضور دارند، به‌راحتی به درون بدن موجود زنده نفوذ کرده و موجب بیماری آبزیان می‌شوند. از این‌رو، بسیاری از ضدعفونی‌کننده‌ها و آنتی‌بیوتیک‌ها برای جلوگیری از اثرات مضر این دو گروه از باکتری‌ها در سیستم‌های آبزی‌پروری استفاده می‌شوند (Khanh و Cu، ۲۰۱۹)، این درحالی است که در وضعیت فعلی استفاده از مواد شیمیایی و آنتی‌بیوتیک‌ها به‌دلیل عواقب بسیار از جمله آلودگی محیط‌زیست، بقایای آنتی‌بیوتیک‌ها در آبزیان و همچنین، مقاومت آنتی‌بیوتیکی که ایجاد می‌کنند (Villella، ۲۰۱۶)، دیگر راهکار بهینه‌ای برای حل معضلات و بیماری‌های زیست‌محیطی در آبزی‌پروری نیست. از این‌رو، جستجوی راه‌حلی جدید برای رفع آلودگی‌های محیطی و پیشگیری از بیماری‌ها به یکی از ضروریات در صنعت آبزی‌پروری تبدیل شده است (Van و همکاران، ۲۰۱۵؛ Khanh و Cu، ۲۰۱۹).

امرزوه، فناوری نانو به‌عنوان یکی از فعال‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی در علم مواد به‌شمار می‌رود. نانوذرات دارای خواص کاملاً جدید یا بهبود یافته‌ای هستند که بر اساس ویژگی‌های خاصی مانند اندازه، شکل، ساختار کریستالی و مورفولوژی تعریف می‌شوند (Jahn، ۱۹۹۹). هنگامی که فلزات در ابعاد نانو تعریف می‌شوند، خواص منحصر به‌فردی از خود نشان می‌دهند. یکی از این فلزات که در سال‌های اخیر در حوزه فناوری نانو مورد توجه قرار گرفته است، فلز نقره[1] (Ag) می‌باشد. نقره به‌دلیل خواص فلزی آن مانند رسانایی در صنایع مختلف و همچنین، به دلیل اثر ضدمیکروبی آن در علم پزشکی به‌طور گسترده، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Alexander، ۲۰۰۹). این فلز در برابر ارگانیسم‌های مختلف، فعالیت ضدباکتریایی از خود نشان می‌دهد و این اثر حتی در غلظت‌های پایین نیز مشاهده می‌شود (Nakamura و همکاران، ۲۰۱۹). موید این موضوع گزارش‌های مستندی است که توسط محققین مختلف در سراسر جهان ارائه شده است. از جملهٔ این گزارش‌ها می‌توان به تحقیقات Alexander (۲۰۰۹) و Nakamura و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد که بیان داشتند رشد عوامل میکروبی از قبیل اشریشیا کُلی (*Escherichia coli*)، استافیلوکوکوس (*Staphylococcus*)، پرووِیدنسیا (*Providencia*)، سراشیا (*Serratia*) و سودوموناس آئروژینوزا (*Pseudomonas aeruginosa*) با حضور یک میکروگرم در میلی‌لیتر یون‌های نقره، مهار می‌شود.

در چند دههٔ گذشته، نانوذرات حاصل از فلزات نجیب مانند نقره خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قابل توجهی در مقایسه با همتایان خود نشان داده‌اند (Abou El-Nour، ۲۰۱۰). براساس مطالعات Kim و همکاران (۲۰۰۷) و Soltani و همکاران (۲۰۰۹)، امروزه چندین نوع از ترکیبات نقره از قبیل نیترات نقره، زئولیت نقره و نانوذرات نقره برای طیف قابل توجهی از اهداف ضدمیکروبی استفاده می‌شوند. Kathiresan و همکاران (۲۰۱۰) اظهار کردند که نانوذرات نقره (AgNP) از لحاظ تاریخی برای کنترل میکروبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و اثرات ضدمیکروبی آن‌ها حتی در برابر باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک در شرایط برون‌تنی[2] نشان داده شده است. از این‌رو کاملاً اثبات شده است که این مواد برای میکروارگانیسم‌ها بسیار سمّی هستند و به‌عنوان ترکیبات ضدباکتری استفاده می‌شوند (Sivaramasamy و همکاران، ۲۰۱۶؛ Kathiresan و همکاران، ۲۰۱۰). Zorraquín-Peña و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان داشتند که نانوذرات نقره به‌دلیل برخورداری از خاصیت ضدمیکروبی به‌طور گسترده در زمینه‌های پزشکی و بیوتکنولوژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این نظر، مطالعات متعددی پیرامون اثربخشی این مواد در جلوگیری از رشد باکتری‌های بیماری‌زا از قبیل *Proteus vulgaris*، *Escherichia coli*، *Staphylococcus aureus*، *Streptococcus pyogenes* و *Streptococcus mutans* صورت گرفته است.

اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره از جمله اثرات آن‌ها بر موجودات مختلف در محیط‌های آبی هنوز تا حد زیادی ناشناخته باقی‌مانده است (Sharma و همکاران، ۲۰۱۴). سمیّت نانوذرات برای ارگانیسم‌ها به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها بستگی دارد (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). در سیستم‌های آبی، نانوذرات تحت تأثیر دگرگونی‌های فیزیکی و شیمیایی (مانند تجمع، ته‌نشینی) قرار می‌گیرند و از این منظر می‌توانند روی موجودات مختلف در اکوسیستم‌های آبزی تأثیر بگذارند. با توجه به این مسأله، توصیف و ارزیابی سرنوشت و رفتار نانوذرات فلزی از جمله نانوذرات نقره در محیط آزمایشی، امری ضروری است. این مسأله زمانی اهمیت فراوانی پیدا می‌کند که سمیّت یون‌های نقره (Ag^+) که احتمالاً از نانوذرات نقره آزاد می‌شوند، دلیلی برای نگرانی است؛ چراکه یون‌های Ag^+ به‌عنوان سمّی‌ترین شکل نقره در آب در نظر گرفته می‌شوند (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). خواص پیچیده و تا حدزیادی ناشناختهٔ نانومواد مانند نانوذرات نقره همراه با فقدان داده‌های کافی پیرامون سمّیت این مواد در اکوسیستم‌های آبزی موجب شده است که بسیاری از محققان به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی این مواد در بسیاری از مناطق بپردازند و سطح ایمن نانوذرات برای گونه‌های مختلف ماهی را تعیین نمایند. از جمله تحقیقات شاخص در این زمینه می‌توان به بررسی سطح

ایمن نانوذرات نقره در قزل‌آلای رنگین‌کمان (Johari و همکاران، ۲۰۱۳)، کپور نقره‌ای (Jahanbakhsh و همکاران، ۲۰۱۲)، کپور معمولی (Hedayati و همکاران، ۲۰۱۲) و ماهی گورخری (Choi و همکاران، ۲۰۰۹) اشاره کرد.

با توجه به قرارگیری کشور ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک، کنترل و مدیریت منابع آبی به‌عنوان یک اصل مهم، شناخته می‌شود. این امر سبب شده که تصفیه و بازیابی آب در بخش‌های مختلف کشور از قبیل صنعت آبزی‌پروری به یک رویکرد ضروری در جهت حفظ و مدیریت منابع آبی کشور تبدیل شود. از این‌رو، در پژوهش حاضر، کاربرد نانوذرات نقره در تصفیه سیستم‌های آبزی‌پروری، کنترل عوامل بیماری‌زا و همچنین بهداشت محیط، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، در ابتدا توضیحات کلی پیرامون نانوذرات، طبقه‌بندی و سنتز آن‌ها ارائه می‌گردد، سپس، با معرفی نانوذرات نقره، به نقش این مواد در کنترل عوامل میکروبی در سیستم‌های آبزی‌پروری اشاره می‌شود. مجموعه این اطلاعات می‌تواند نقش بارز فناوری نانو را در پیشرفت صنعت آبزی‌پروری و همچنین، رفاه اجتماعی جامعه منعکس نماید.

نانوذرات

امروزه فناوری نانو به‌عنوان یکی از زمینه‌های مهم در تحقیقات مدرن به‌شمار می‌رود که با طراحی، سنتز و دستکاری ساختارهای ذرات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر سروکار دارند (Jahn، ۱۹۹۹؛ Nikalje، ۲۰۱۵؛ CDC، ۲۰۲۲). تحقیقات نانوذرات در حال حاضر به‌دلیل کاربردهای بالقوه متنوع در زمینه‌هایی مانند مراقبت‌های بهداشتی، آرایشی، غذا و خوراک، بهداشت‌محیط، مکانیک، اُپتیک، علوم زیست‌پزشکی، صنایع شیمیایی، الکترونیک، صنایع فضایی، دارو، تحویل ژن، علم انرژی، اپتوالکترونیک، کاتالیز، ترانزیستورهای تک‌الکترونی، ساطع‌کننده‌های نور و غیره مورد توجه قرار گرفته است (Güzel و Erdal، ۲۰۱۸؛ Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱).

• طبقه‌بندی نانوذرات

نانوذرات به انواع معدنی، کربنی و آلی طبقه‌بندی می‌شوند. در ادامه، توضیحات مختصری از هر کدام از نانوذرات ارائه می‌گردد:

۱- نانوذرات مبتنی بر مواد معدنی:

نانوذراتی که در ترکیب خود اتم کربن ندارند، مانند اکسید فلزی و ذرات با اندازه نانو مبتنی بر فلز، به‌عنوان نانوذرات معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. نانوذرات فلزی در این دسته قرار می‌گیرند. از جمله فلزات معروف و کاربردی می‌توان به کادمیوم (Cd)، آلومینیوم (Al)، مس (Cu)، کبالت (Co)، طلا (Au)، آهن (Fe)، نقره (Ag)، روی (Zn) و سرب (Pb) اشاره کرد. این دسته از مواد بر اساس اندازه و ویژگی‌های خود از جمله سطح منبسط‌شده، اندازه منافذ، چگالی بار روی سطح، شکل استوانه‌ای و کروی، رنگ، ساختارهای بی‌شکل و بلوری، دارای خواص منحصربه‌فردی هستند. لازم به ذکر است که خواص نانوذرات تحت تأثیر عوامل محیطی از جمله هوا، گرما، نور خورشید و رطوبت تغییر می‌یابند (Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱).

۲- نانوذرات مبتنی بر مواد آلی (ارگانیک):

نانوذرات مبتنی بر ارگانیک، غیرخطرناک و دوست‌دار محیط‌زیست هستند. فریتین، لیپوزوم‌ها، میسل‌ها و دندریمرها، پلیمرها یا ذرات آلی در اندازه نانو هستند (Jin و همکاران، ۲۰۲۰) که پس از قرار گرفتن در معرض نور و گرما، حساسیت بالایی دارند. به‌دلیل این ویژگی‌های متمایز، نانوذرات مبتنی بر ارگانیک از نظر محققان جایگزین بسیار بهتری برای تحویل دارو هستند. پایداری، توانایی حمل دارو و ویژگی جذب یا به‌دام‌انداختن دارو، این مواد را به‌واسطه‌هایی کارآمد و بالقوه برای تحویل مواد فعالِ دارو تبدیل می‌کند (Patra و همکاران، ۲۰۱۸). این نانوذرات مورفولوژی، اندازه، شکل و ترکیب سطحی خاصی دارند. نانوذرات ارگانیک به‌منظور تزریق مواد فعال در سیستم دارورشانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Patra و همکاران، ۲۰۱۸؛ El-Sayed، ۲۰۲۰).

۳- نانوذرات مبتنی بر کربن:

نانوذراتی که اسکلت آن‌ها کاملاً از کربن سازماندهی شده است، به‌عنوان نانوذرات مبتنی بر کربن شناخته می‌شوند (Jeevanandam و همکاران، ۲۰۱۸). از مهم‌ترین نانوذرات مبتنی بر کربن می‌توان به گرافن، فولرن‌ها، نانوالیاف کربنی، نالوله‌های کربنی، کربن سیاه و کربن فعال اشاره کرد (Maiti و همکاران، ۲۰۱۹؛ Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱؛ Slepičková و همکاران، ۲۰۲۱).

ملاحظات اقتصادی در کاربرد ترکیبات نانو

فناوری نانو می‌تواند اثر شگرفی بر حوزه‌های گوناگون اجتماعی از اقتصاد گرفته تا بهداشت، محیط‌زیست، امنیت، رفاه و آموزش بگذارد تا به درک بهتر روابط بین جامعه و این فناوری کمک کرده و روش‌های مناسب برای انسجام بخشیدن به توسعه این فناوری را شناسایی کند. ماهیت فرارشته‌ای فناوری نانو به‌عنوان توانمندی تولید مواد، ابزار و سیستم‌های جدید با دقت اتم و مولکول، موجب تعریف کاربردهای بسیاری در عرصه‌های مختلف علمی و صنعتی شده است (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). امیری و بهمنش (۱۳۸۹) در پژوهشی با عنوان «تأثیر فناوری نانو بر جوامع در حال توسعه با نگرش ویژه به ایران» بیان کردند که فناوری نانو کاربردهای بسیاری در حوزه‌های دارو، غذا، بهداشت، درمان بیماری‌ها، محیط‌زیست، انرژی، الکترونیک، رایانه، اطلاعات، مواد، ساخت، تولید، هوافضا، بیوتکنولوژی، کشاورزی، امنیت ملی و دفاع نیز دارد. با توجه به آنچه اشاره شد، فناوری نانو یک حوزه بسیار مهم است که به شدت در رشد اقتصاد و توسعه فضاهای کارآفرینی نقش به‌سزایی ایفا می‌کند.

نانوذرات نقره

نقره کاربردهای صنعتی بسیار زیادی دارد و به‌عنوان ثروت ذخیره محسوب می‌شود. این فلز دارای ویژگی‌های بسیاری بود که آن را برای مردمان اولیه بسیار ارزشمند کرد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به قابلیت چکش‌خواری، انعطاف‌پذیری، براقیّت، خاصیت ارتجاعی، رسانایی و ضدباکتریایی آن اشاره کرد. همچنین، از نقره به‌عنوان یک کالای گران‌بها در ارزها، زیورآلات، جواهرات، کنتاکت‌های الکتریکی[۳]، عکاسی و غیره استفاده می‌شد. اگرچه فلز نقره به‌طور گسترده به‌دلیل سطوح و رنگ‌های درخشان خود شناخته شده است، اما با این حال، زمانی‌که ابعاد این فلز کاهش می‌یابد، تفاوت رنگی شدیدی ایجاد می‌شود (Güzel و Erdal، ۲۰۱۸).

نانونقره (شکل ۱) یکی از رایج‌ترین نانومواد مورد استفاده است که اندازه ذرات آن از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰). این گروه از نانوذرات به‌دلیل برخورداری از نسبت سطح به حجم بالا و همچنین، قابلیت رسانایی عالی در زمینه‌های شیمی و شاخه‌های مرتبط، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Khan و همکاران، ۲۰۱۷). نانوذرات نقره جزء ضروری بسیاری از صنایع هستند و از سوئیچ‌های الکتریکی و پنل‌های خورشیدی گرفته تا کاتالیزورهای تولیدکننده مواد شیمیایی و فعالیت ضدمیکروبی قابلیت کاربرد دارند (Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱). خواص منحصر به فرد این ماده جایگزینی آن را تقریباً غیرممکن می‌کند و کاربردهای آن طیف وسیعی از صنایع را در برگرفته است. در عین حال، بسیاری از محصولات مصرفی که ادعا می‌کنند دارای نانو مواد هستند، حاوی نانو نقره می‌باشند. از جمله محصولات مصرفی که حاوی نانو نقره می‌باشند، می‌توان به رایانه، تلفن همراه، لوازم خودرو، مواد بسته‌بندی مواد غذایی، مکمل‌های غذایی، منسوجات، لوازم الکترونیکی، لوازم خانگی، لوازم آرایشی، تجهیزات پزشکی، تکنیک‌های تصویربرداری، و ضدعفونی‌کننده‌های آب و محیط اشاره کرد. بیشتر این محصولات که حاوی نانو نقره هستند، در آمریکای شمالی، خاور دور، به‌ویژه در چین، کره جنوبی، تایوان، ویتنام و هند، روسیه و اروپای غربی تولید می‌شوند (Güzel و Erdal، ۲۰۱۸؛ Zahoor و همکاران، ۲۰۲۱). مجموعه اطلاعات فوق کاربرد وسیع نانوذرات نقره را در طیف وسیعی از صنایع نشان می‌دهد.

شکل ۱- نانوذرات نقره (AZOM، ۲۰۲۲)

• کاربرد نانوذرات نقره

خواص جدید نانوذرات در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های پزشکی، آرایشی، انرژی‌های تجدیدپذیر، اصلاح محیط و دستگاه‌های زیست‌پزشکی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در میان نانوذرات، نانوذرات نقره (Ag-NPs یا نانونقره) به‌دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی منحصربه‌فرد خود در مقایسه با هم‌تایان خود در مقیاس ماکرو بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که نانوذرات نقره از ارزش بالقوه‌ای در میکروالکترونیک و تصویربرداری پزشکی برخوردار باشند. علاوه بر این، نانوذرات نقره طیف وسیعی از فعالیت‌های باکتری‌کُشی و قارچ‌کُشی را نشان می‌دهند که موجب شده است در بخش متنوعی از محصولات مصرفی، از جمله پلاستیک، صابون، خمیر، موادغذایی و منسوجات مورد استفاده قرار گیرند و ارزش بازاری آن‌ها را افزایش دهند (García-Barrasa و همکاران، ۲۰۱۱). تا به امروز، کاربرد نانونقره در انواع فرآیندهای تولید و محصولات نهایی ظهور یافته است (Tran و همکاران، ۲۰۱۳).

نانونقره در بسیاری از محصولات مصرفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌طوری‌که کاربردهای مرتبط با نانونقره در حال حاضر بالاترین درجه تجاری‌سازی را دارند. طیف وسیعی از کاربردهای نانونقره در محصولات مصرفی از ضدعفونی‌کردن دستگاه‌های پزشکی و لوازم خانگی گرفته تا تصفیه آب پدیدار شده است (Tran و همکاران، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر، برخی از نانومواد از قبیل نانوذرات اکسید روی (ZnO)، نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)، نانوذرات اکسید قلع (TiO_2)، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و نانوذرات نقره (AgNPs)، به‌منظور مدیریت کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

• خصوصیات ضدمیکروبی سطوح پوشش داده‌شده با نانوذرات نقره

سطوح ضدمیکروبی یکی از نویدبخش‌ترین نوآوری‌ها برای جلوگیری از عفونت‌های باکتریایی و انتقال باکتری در محیط هستند. ترکیبات مختلف فلزات سنگین، از جمله ZnO، Cu_2O، TiO_2 و Ag خواص ضدمیکروبی دارند؛ زیرا با مهار پمپ‌های پروتون دیواره سلولی، مهار تکثیر و رونویسی DNA و ایجاد آسیب به غشای سلولی، رشد باکتری را مختل می‌کنند. فلز نقره در ۱۰۰۰ سال قبل از میلاد برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها و قابل شرب ساختن آب استفاده می‌شد (Sibiya و همکاران، ۲۰۲۲). امروزه نانوذرات فلزی، به‌ویژه نانوذرات نقره، پتانسیل خود را در کاربردهای مختلف ضدمیکروبی از جمله پوشش‌های زیست‌پزشکی و منسوجات نشان داده‌اند (Sharma و همکاران، ۲۰۰۸). آنزیم‌ها را غیرفعال می‌کنند یا می‌توانند با افزایش نفوذپذیری غشا باعث مرگ سلولی شوند و با تغییر ساختار غشا، نانوذرات نقره نیز می‌توانند به‌عنوان جایگزینی برای درمان ضدمیکروبی استفاده شوند (Dube و Okuthe،

۲۰۲۳). مزیت استفاده از نانوذرات نقره بر اساس ساختار آن‌ها است. نانوذرات (اندازه ۰/۲ تا ۱۰۰ نانومتر) نسبت سطح به حجم بالایی دارند، بنابراین ذرات کوچک برهم‌کُنش خوبی با میکروب‌ها دارند و ساختار فعالیت ضدمیکروبی را افزایش می‌دهند. نانوذرات و سطوح پوشش داده‌شده با نانوذرات را می‌توان با روش‌های مختلفی تولید کرد (Muller و همکاران، ۲۰۱۶).

• بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری

استفاده از شیوه‌های نادرست آبزی‌پروری، می‌تواند به‌طور مستقیم بر محیط‌زیست تأثیر بگذارد. در این شیوه‌های غیرصحیح به مقادیر زیادی آب نیاز است که این منبع، روز به روز در سراسر جهان کاهش می‌یابد (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰b). همچنین، مصرف نکردن خوراک توسط آبزیان، تولیدات دفعی، مدفوع، محصولات شیمیایی و آنتی‌بیوتیک‌ها، مقادیر زیادی ضایعات را در طول تولید ارگانیسم ایجاد می‌کنند (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹) که در نهایت، ممکن است به محیط پیرامون این سیستم تولیدی رها شود (Márquez و همکاران، ۲۰۱۸).

برای مدت طولانی، بیشترین روشی که به‌منظور بهبود کیفیت آب استفاده می‌شد، تغییر مداوم آب حوضچه‌ها با آب جدید و تازه بود (Chindris، ۲۰۱۰). در این شرایط، حجم آب لازم برای سیستم‌های آبزی‌پروری با مقیاس کوچک یا متوسط، می‌تواند به چند صد متر مکعب در روز برسد. در این زمینه، فناوری نانو به راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای ضدعفونی آب با استفاده از نانوذرات نقره، و همچنین، حذف مواد آلی و ضایعات با استفاده از نانوذرات دست یافت (Que و همکاران، ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر، تحقیقات مختلفی در مورد نانوذرات مورد استفاده در گندزدایی آب، اجتناب از حضور باکتری‌ها و پاتوژن‌های ویروسی انجام شد که نتایج مثبت آن‌ها گزارش شد. با این حال، این پژوهش‌ها نشان داد که ایجاد تعادل بین هزینه و مزایا در این رویکرد ضروری است، چراکه روش مورد استفاده می‌تواند یک فناوری گران‌قیمت باشد (Márquez و همکاران، ۲۰۱۸).

• خواص ضدباکتریایی نانوذرات نقره

بیماری‌های عفونی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات بهداشتی در سراسر جهان هستند. اگرچه، آنتی‌بیوتیک‌های متعددی برای استفاده تجاری در دسترس هستند، اما عمدتاً فاقد قدرت در برابر پاتوژن‌های مقاوم به چند دارو[۴] (MDR) هستند که باعث افزایش دوزهای هنگفت آنتی‌بیوتیک‌ها و نیاز به توسعه مداوم آنتی‌بیوتیک‌های جدید می‌شود. اخیراً قدرت نانوذرات فلزی برای کنترل پاتوژن‌های مختلف، هم به‌طور مستقل و هم به‌طور مشترک با آنتی‌بیوتیک‌های موجود ثابت شده است (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰).

خواص ضدمیکروبی نقره (Ag^+) در مطالعاتی که در چندین دهه صورت گرفت، به‌خوبی آشکار گردید (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰). خواص ضدمیکروبی نانوذرات نقره از ماهیت شیمیایی یون Ag^+ به شرح زیر ناشی می‌شود: ۱) یون‌های Ag^+ به‌شدت با پپتیدوگلیکان، که دیواره سلولی باکتری را تشکیل می‌دهد، مرتبط می‌شوند (Rai و همکاران، ۲۰۰۹) و از انتقال اکسیژن به داخل سلول برای فلج کردن باکتری‌ها جلوگیری می‌کند. ۲) پس از اینکه یون‌های Ag^+ بر روی غشای سلولی باکتری اثر می‌کنند، به داخل سلول نفوذ می‌کنند و با گروه‌های سولفیدریل مولکول‌های آنزیم متابولیسم اکسیژن واکنش می‌دهند تا آنزیم را غیرفعال کنند (Lee و Jeong، ۲۰۰۵) و در نتیجه تنفس سلولی باکتری را مهار می‌کنند. ۳) یون‌های Ag^+ به پایه مولکول DNA متصل می‌شوند و قدرت فسفات را از کار می‌اندازند و بنابراین از فرآیند همانندسازی DNA جلوگیری می‌کنند (Khanh و Cu، ۲۰۱۹؛ Galatage و همکاران، ۲۰۲۱).

نانوذرات نقره (AgNPs) به‌دلیل خواص بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فردی که از خود نشان می‌دهند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از نقاط قوت نانوذرات نقره در مقابل آنتی‌بیوتیک‌های سنتی، برهم‌کنش آن‌ها با واکنش‌های سلولی مختلف باکتریایی است، به‌طوری‌که مقاومت باکتری‌ها در برابر آن‌ها کم‌تر می‌شود (رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰؛ رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰a). مکانیسم‌های دقیق درباره عملکرد ضدباکتریایی نانوذرات نقره نامشخص است؛ با این وجود، محققان مختلف چندین روش عمل را شناسایی کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به تداخل با دیواره سلولی باکتری، تولید گونه‌های اکسیژن فعال، تولید یون‌های Ag^+، و برهم‌کنش با DNA یا رسوب درون‌سلولی نانوذرات اشاره کرد. علاوه بر این، فعالیت باکتری‌کُشی در درجه اول به‌دلیل مهار سنتز نوکلئیک اسید، پروتئین، و دیواره سلولی و همچنین اختلال در سلول‌های میکروبی است (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰).

علی‌رغم افزایش پیوسته وجود محصولات حاوی نقره در بازار و همچنین، گزارشات گسترده در مورد فعالیت ضدمیکروبی نانوذرات نقره، در حال حاضر اطلاعات کافی در مورد استفاده از نانوذرات نقره به‌عنوان عوامل درمانی در شرایط درون‌تنی در دسترس نیست. استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها خطر اختلالات جدی و پُرهزینه در سلامت حیوانات را به‌همراه دارد و همچنین منجر به مقاومت سریع عوامل میکروبی می‌شود. ظهور مقاومت میکروبی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها یکی از چالش‌های عمده در جهان امروز است. بنابراین، لازم است که از رویکردهای ایمن و جایگزین برای مهار بیماری‌های آبزیان استفاده شود (Farouk و همکاران، ۲۰۲۰).

Khanh و Cu (۲۰۱۹) اظهار داشتند که در آبزی‌پروری از نانوذرات در بخش‌های مختلف مانند تغذیه، تصفیه پساب و کنترل بیماری‌های عفونی استفاده می‌شود. این محققان به بررسی خواص ضدمیکروبی نانوذرات نقره بر روی سویه‌های باکتریایی *Vibrio harveyi*، *Aeromonas caviae*، *Aeromonas hydrophyla*

و *Vibrio alginoliticus* که از مزارع آبزی‌پروری برداشت شده بودند، پرداختند. آن‌ها بیان کردند که محلول نانوذره نقره با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر سویه‌های باکتریایی *A. caviae* و *A. hydrophila* را مهار می‌کند و زمان کاهش اثرگذاری آن، ۲۴ ساعت پس از قرارگرفتن در معرض باکتری بود. همچنین، محلول با غلظت ۱۲/۵ پی.پی.ام نیز سویه‌های باکتریایی *V. harveyi* و *V. alginoliticus* را مهار می‌کند که زمان کاهش اثربخشی آن، ۴۸ ساعت پس از مواجهه با عامل باکتریایی بود.

Vaseeharan و همکاران (۲۰۱۰) از نانوذرات نقره سنتزشده با عصاره برگ چای برای از بین بُردن *Vibrio harveyi* بیماری‌زا برای میگوی هندی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که تعداد کُلنی‌های *V. harveyi* با غلظت نانوذرات نقره نسبت معکوس داشت و *V. harveyi* در غلظت ۳۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر نانوذرات نقره رشد نمی‌کند (Vaseeharan و همکاران، ۲۰۱۰). Ogunfowora و همکاران (۲۰۲۱) اظهار داشتند که فناوری نانو در تصفیه پساب‌های آبزی‌پروری بسیار مفید است، چراکه استفاده از این روش، شاخص‌های فیزیکوشیمیایی در پساب را عادی می‌کند، و علاوه بر این، فلزات سنگین مانند سرب و ترکیبات آلی مانند پُلی‌کلره بی‌فنیل‌ها، هیدروکربن‌های معطر چندحلقه‌ای، آفت‌کش‌ها و غیره را حذف می‌کند. همچنین، با استفاده از فناوری نانو، بار آلودگی میکروارگانیسم‌هایی مانند سالمونلا، اشریشیا کلی، کمپیلوباکتر و ویبریو در پساب کاهش می‌یابد. حتی با وجود این اثرات مثبت، نانوذرات مورد استفاده در تصفیه این پساب‌ها نیز اثرات منفی بر موجودات آبزی داشته و باعث افزایش شوری محیط می‌شود. شایان ذکر است که استفاده از نانوذرات ساده و دارای برچسب فلورسنت و همچنین، پوشش نانوذرات با تیروزین موجب کاهش سمّیت این مواد می‌شود (Barakat و همکاران، ۲۰۱۶).

پژوهشگران، نانوذرات نقره را به‌عنوان یکی از مؤثرترین نانوذرات فلزی معرفی می‌کنند که فعالیت ضدباکتری‌شان در مواجهه با برخی از پاتوژن‌ها از جمله پاتوژن‌های مرتبط با ماهیان، مثل قزل‌آلای رنگین کمان و باس دریایی تأیید شده است. Soltani و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای که به منظور بررسی اثر ضدباکتریایی نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی که برای ماهیان قزل‌آلا پاتوژنیک هستند، انجام شده بود، بیان کردند که نانوذرات نقره به طور کلی، موجب کاهش رشد سویه‌های باکتریایی *Aeromonas hydrophila*، *Lactococcus garvieae*، *Streptococcus iniae* و *Yersinia ruckeri* می‌شوند. در پژوهشی دیگر که Barakat و همکاران (۲۰۱۶) روی باس دریایی (*D. labrax*) انجام داده‌اند بیان نمودند که این گونه یکی از اقتصادی‌ترین گونه‌های پرورشی است و در عین حال حساس‌ترین گونه به *Vibrio anguillarum* می‌باشد. آنها همچنین بیان داشتند که عامل *V. anguillarum* که باعث ایجاد بیماری vibriosis می‌شود، یک سپتی‌سمّی‌هموراژیک است و باعث ایجاد خسارات اقتصادی قابل توجهی در تولید این گونه می‌شود. این خسارات به حدی است که میزان مرگ و میر لاروهای باس دریایی آلوده به سویه *V. anguillarum* با گذشت زمان افزایش می‌یابد. Barakat و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه خود، پتانسیل ضدباکتریایی نانوذرات نقره-کیتوزان سنتز شده را در غلظت‌های ۵٪ و ۱۰٪ در مواجهه با عامل میکروبی *V. anguillarum* مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد که نانوذرات نقره-کیتوزان سنتز شده با غلظت ۵٪ برای سرکوب عفونت کافی است و می‌تواند به‌عنوان یك جایگزین برای آنتی بیوتیك‌ها در کنترل پاتوژن‌های ماهیان در نظر گرفته شود.

اگرچه نانوذرات نقره ثابت کرده‌اند که انواع مختلف پاتوژن‌های آلوده‌کننده انسان را مهار می‌کنند، با این حال، اطلاعات در مورد عملکرد نانوذرات نقره روی بیماری‌های میگو هنوز محدود است. تمام شواهد حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات نقره با ویژگی‌های متنوع، اثرات ضدمیکروبی عمدتاً علیه ویروس سندروم لکه سفید[۵] (WSSV) و باکتری‌های جنس ویبریو (*Vibrio*) دارند. بیماری لکه سفید ناشی از سندروم ویروسی WSSV، می‌تواند به‌سرعت گسترش یابد و باعث از بین رفتن کامل پرورش میگو شود و آن را به یک خطر پنهان برای مزارع تبدیل کند. از سوی دیگر، باکتری ویبریو که در همه اکوسیستم‌های ساحلی جهان وجود دارد، ممکن است باعث ایجاد بیماری‌های جدی در میگو مانند ویبریوز، سندرم نکروز حاد کبدی پانکراس[۶] (AHPNS)، بیماری لکه‌های قهوه‌ای و غیره شود که ضررهای اقتصادی قابل‌توجهی را در لارو ماهیان ایجاد می‌کند.

به‌طور کلی، از دو رویکرد اصلی می‌توان به‌منظور کاربرد نانوذرات برای مقابله با عفونت‌های ویروسی و باکتریایی در سیستم‌های پرورش میگو استفاده نمود که شامل کاربردهای پیشگیرانه و درمانی می‌باشند. کاربردهای پیشگیرانه، مستلزم تجویز داروها به افراد سالم قبل از شروع بیماری است، در حالی‌که کاربردهای درمانی مربوط به برنامه‌های کاربردی برای تغییر مسیر یک بیماری فعال است (Bhardwaj و همکاران، ۲۰۲۰).

نانوذرات نقره سنتز شده با روش‌های شیمیایی یا بیولوژیکی، قادر به مهار رشد گونه‌های ویبریو در شرایط آزمایشگاهی هستند. گونه‌های ویبریو که برای میگوهای دریایی بیماری‌زا هستند، منجر به تلفات قابل توجه میگو در سیستم‌های پرورشی در کشورهای مختلف شده‌اند (Alvarez-Cirerol و همکاران، ۲۰۱۹). نانوذرات تا حدودی از بیماری‌های ناشی از ویبریو مانند ویبریوز در میگوی هندی (*Fenneropenaeus indicus*)، میگوی ببری بزرگ (*Penaeus monodon*) و میگوی پاسفید نوجوان (*Litopenaeus vannamei*) و همچنین سندرم نکروز حاد کبدی پانکراس (AHPNS) در پُست‌لارو میگوی پاسفید (*L. vannamei*) جلوگیری می‌کنند (Alvarez-Cirerol و همکاران، ۲۰۱۹). در این موارد، اثرات پیشگیرانه نانوذرات

به بقای بیشتر افراد در معرض باکتری پس از تجویز نانوذرات نقره طی یک دوره زمانی منجر شد. این در حالی بود که سایر افرادی که از اثرات پیشگیرانه نانوذرات نقره استفاده نکرده بودند، مرگ‌ومیر بالایی در یک بازه زمانی نشان دادند (Alvarez-Cirerol و همکاران، ۲۰۱۹؛ Camacho-Jiménez و همکاران، ۲۰۲۰).

• خواص ضدقارچی

تاکنون کارآیی نانوذرات نقره (AgNP) در مقایسه با نقره آزاد در برابر طیف وسیعی از قارچ‌ها مانند آسپرژیلوس، کاندیدا و ساکارومایسس اثبات شده است. این کارایی به‌عنوان خاصیت قارچ‌کُشی توسط پژوهش‌گران مختلف از جمله Ramya و Subapriya (۲۰۱۲) گزارش شده است. اثر ضدقارچی نانوذرات نقره در ارتباط با ترکیبات هتروسیکلیک مانند پیرازولو، تیازولیدین، تترازول، فتالازین و مشتقات پیریدازین در برابر *Aspergillus flavus* و *Candida albicans* آزمایش شده است. خواص ضدقارچی نانوذرات نقره در برابر سویه‌های قارچی شایع مانند *C. albicans* و *C. glabrata*، از ۰/۴ تا ۳/۳ میکروگرم در میلی‌لیتر متغیر است.

Johari و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثرات نانوذرات نقره کلوئیدی بر رشد پاتوژن تخم قزل‌آلا (*Saprolegnia sp.*) در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. سپس فعالیت ضدقارچی نانوذرات نقره با تعیین حداقل غلظت‌های بازدارنده[۷] (MICs) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره دارای یک اثر بازدارنده بر رشد قارچ‌های موردآزمایش هستند. حداقل غلظت بازدارنده نانوذرات نقره برای ساپرولگنیا (*Saprolegnia sp.*)، ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، معادل ۰/۱۸ درصد محاسبه شد. به‌نظر می‌رسد نانوذرات نقره می‌توانند جایگزین مناسبی برای عوامل سمّی مانند مالاشیت‌گرین باشند. علاوه بر این، استفاده غیرمستقیم از نانوذرات نقره می‌تواند یک روش مفید برای ارائه فعالیت ضدقارچی جدید در سیستم‌های آبزی‌پروری باشد.

در یکی از مطالعات اخیر، اثر ضدقارچی AgNPs انکپسوله شده[۸] با کیتوزان در شرایط آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نهایی این تحقیق که Dananjaya و همکاران (۲۰۱۷) ارائه نمودند، حاکی از اثرات ضدمیکروبی این مواد در مواجهه با گونه قارچی *Fusarium oxysporum* بود.

• خواص ضدانگلی

مونوژنه‌آ (Monogenea) گروه متنوعی از انگل‌ها هستند که معمولاً در ماهیان یافت می‌شوند. برخی از گونه‌های مونوژنه‌آ برای ماهیان پرورشی بسیار بیماری‌زا هستند. کنترل مونوژنه‌آ در مزارع پرورش ماهی یا آکواریوم‌ها بسیار دشوار است. از جمله تیمارهای اصلی برای کنترل این انگل‌ها می‌توان به پراکسید هیدروژن، فرمالین، پرمنگنات پتاسیم، سولفات مس، شوری (NaCl) و حمام پرازیکوانتل (praziquantel) اشاره کرد که می‌توانند در برابر افراد جوان یا بالغ انگل بسیار موثر باشند، اما در برابر تخم‌ها نمی‌توانند نقش قابل توجهی ایفا نمایند (Zhang و همکاران، ۲۰۱۴). Pimentel-Acosta و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات ضدانگلی نانوذرات نقره (AgNPs) بر روی بالغین و تخم‌های گونه‌ای از مونوژنه‌آ در آب شیرین (*Cichlidogyrus spp.*) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت ۳۶ میکروگرم در لیتر نانوذرات نقره به‌مدت یک ساعت، ۱۰۰ درصد در برابر تخم‌ها و انگل‌های بالغ مؤثر بوده و موجب تورم و اختلال در بافتِ انگل می‌شود. Pimentel-Acosta و همکاران (۲۰۱۹) اظهار داشتند، از آنجایی‌که تخم‌های مونوژنه‌آ معمولاً به داروهای ضدانگل و عوامل شیمیایی متحمل هستند، این نتیجه جالب به‌نظر می‌رسد.

Saleh و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثرات ضدانگلی نانوذرات نقره بر روی *Ichthyophthirius multifiliis* که عامل انگلی بیماری لکه سفید یا ایک (Ich) در ماهیان آب شیرین می‌باشد، پرداختند. در این مطالعه، اثرات نانوذرات فلزی بر تولیدمثل و عفونت‌پذیری مراحل زندگی *I. multifiliis* بررسی شد. نتایج نشان داد که ۵۰ درصد از ترونت‌ها را می‌توان ظرف ۳۰ دقیقه پس از قرارگرفتن در معرض ۱۰ نانوگرم در میلی‌لیتر نقره از بین برد. همچنین بر اساس یافته‌های به‌دست آمده، نانوذرات نقره در غلظت‌های ۱۰ و ۵ نانوگرم در میلی‌لیتر به‌ترتیب ۱۰۰ و ۹۷ درصد ترونت‌ها[۹] را از بین بردند و تولیدمثل تومونت‌ها[۱۰] را پس از ۲ ساعت تماس، مهار کردند.

در مطالعه‌ای دیگر، Pimentel-Acosta و همکاران (۲۰۱۹) اثر آنتلمینتیک[۱۱] (ضدانگلی) نانوذرات نقره (AgNPs) را در مواجهه با نمونه‌های بالغ و تخم یکی از گونه‌های انگلی آب شیرین (Cichlidogyrus) بررسی نمودند. نتیجه این تحقیق نشان داد که نانوذرات نقره موجب اختلال در انگل‌های بالغ شدند، در صورتی که تخم‌ها به مواد ضدپلاسما و مواد شیمیایی تحمل نشان دادند. محققین ابراز داشتند که قبلاً در هیچ گزارشی تأثیر AgNP ها بر انگل‌های متازوآن ماهیان ارزیابی نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر را مبنایی برای تحقیقات آینده در مورد کنترل بیماری‌های انگلی ماهیان معرفی کردند.

در چندین مطالعه اثرات ضدقارچی و ضدانگلی نانوذرات نقره به‌طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. Daniel و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی که به‌منظور کنترل و درمان بیماری‌های لکه سفید (white spot) و لکه قرمز (red spot) در ماهی گُلدفیش (*Carassius auratus*) انجام شده بود، جذب نانوذرات نقره، تبادلات بیوشیمیایی و سمّیت حاصل از آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. بیماری لکه سفید (Ichthyophthiriasis-Ich) در واقع ناشی از تک‌یاخته *Ichthyophthirius multifiliis* است که با لکه‌های نمکی‌مانند، روی باله‌های بدن ایجاد می‌شود (رادخواه و همکاران، ۱۳۹۹). سندرم زخم اپیزوتیک[۱۲] (EUS) یا بیماری «لکه قرمز» نیز ناشی از قارچ بیماری‌زای *Aphanomyces invadans* می‌باشد. در

مطالعه Daniel و همکاران (۲۰۱۶) علائم درمانی بیماری‌های لکه قرمز و لکه سفید در مدت ۳ روز بدون نشان دادن سمّیت مشخص گردید. ماهیان درمان فوری عفونت را نشان دادند و از این‌رو، محققان این پژوهش بیان نمودند که یک بار دوز ممکن است با غلظت بسیار کم (۱۰ نانوگرم بر گرم وزن بدن) با استفاده از روش حمام کردن ساده محافظت طولانی‌مدت ایجاد کند. آن‌ها همچنین تأکید کردند که این مطالعه اولین گزارش در مورد اثربخشی نانوذرات نقره برای درمان تک‌یاخته‌ها و قارچ‌ها در ماهیان می‌باشد.

• خواص ضدویروسی

بیماری‌های ویروسی در حال ظهور، تهدید اصلی برای بخش انسانی و دام‌پزشکی هستند. اگرچه نانوذرات نقره از نظر خواص ضدمیکروبی توجهات زیادی را به سوی خود جلب کرده‌اند، اما با این حال، از نظر خواص ضدویروسی همچنان ناشناخته باقی مانده‌اند. با توجه به این موضوع، یک تکنیک جدید، منحصربه‌فرد و توسعه‌یافته برای غلبه بر مشکل مقاومت ضدویروسی مورد نیاز است. با این حال، برخی از مطالعات، درمان عفونت‌های ویروسی را در مراحل خاصی از بیماری‌های HIV-1 و آنفلوانزا تأیید کرده‌اند (Jasni و همکاران، ۲۰۲۱).

مکانیسم دقیقی که نانوذرات نقره (AgNP) از طریق آن ویروس‌ها را از بین می‌برند، نامشخص است. نانوذرات نقره را می‌توان برای جلوگیری از عفونت‌های ویروسی متعدد یا با مهار عفونت ویروس در سلول‌ها یا با غیرفعال کردن مستقیم ویروس‌ها، مانند ویروس هرپس سیمپلکس (HSV)، ویروس سنسیشیال تنفسی و آدنوویروس نوع ۳ به‌کار برد. نانوذرات نقره به‌دلیل سطح وسیعی که دارند، فعالیت ضدویروسی بالایی از خود نشان می‌دهند که تماس با ذرات ویروسی را تسهیل می‌کند. معمولاً عوامل ضدویروسی مستقیماً روی ذرات ویروس با اتصال به پروتئین پوششی و ممانعت از فعل و انفعالات یا عملکردهای ساختاری عمل می‌کنند. در اینجا، اندازه نانوذرات نقره نقش مهمی در فعل و انفعالات بین نانوذرات-ویروس دارد (Khandelwal و همکاران، ۲۰۱۴). در ابتدا، نانوذرات نقره با سطح ویروس برهم‌کُنش می‌کنند، که در نهایت منجر به تخریب ماده ژنومی ویروس یا جلوگیری از نفوذ آن به غشای سلولی می‌شود. نانوذرات نقره در تعامل ویروس با غشای سلولی تداخل ایجاد می‌کنند. این مواد همچنین به‌عنوان بازدارنده نوکلئوکپسیدهای ویروسی در داخل سلول عمل می‌کنند. علاوه بر این، نانوذرات نقره با مواد ژنومی ویروس تعامل دارند و از تکثیر ژنوم در داخل سلول میزبان جلوگیری می‌کنند. در نهایت، آن‌ها عوامل سلولی مانند سنتز پروتئین را متوقف می‌کنند تا از تکثیر ویروس جلوگیری کنند. اگرچه انواع مختلف فلزات دارای خواص ضدویروسی هستند، اما نانوذرات نقره (AgNP) موثرترین نقش را ایفا کرده‌اند (Galdiero و همکاران، ۲۰۱۱؛ Ratan و همکاران، ۲۰۲۱).

شایان ذکر است که در مورد تأثیرات ضدویروسی نانوذرات نقره بر روی گونه‌های آبزی نیز گزارش‌های قابل‌ملاحظه‌ای ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه Sivaramasamy و همکاران (۲۰۱۶) و Ochoa-Meza و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. Sivaramasamy و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه‌ای را با هدف بررسی تأثیر نانوذرات نقره سنتزشده از *B. subtilis* بر رشد، بقا، فعالیت ضدویروسی و بیان ژن ایمنی در میگوی پاسفید اقیانوس آرام (*L. vannamei*) در برابر پاتوژن‌های مختلف انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیان ژن‌های مرتبط با ایمنی (سطوح mRNA) در میگوهایی که از رژیم غذایی AgNPs استفاده می‌کردند، بر خلاف *B. subtilis* و شاهد، به‌طور قابل توجهی تنظیم شد. در مجموع، این مطالعه نشان داد که AgNP ها یک ابزار بالقوه برای مهار vibriosis در پرورش میگو هستند.

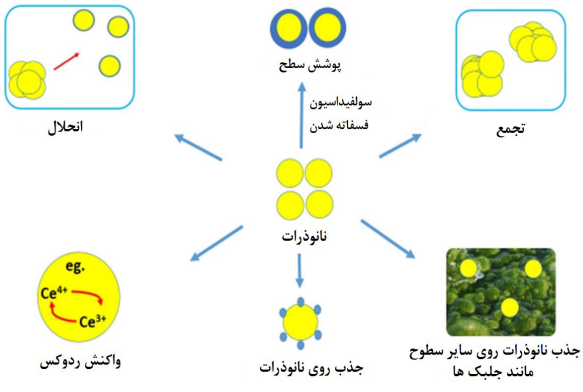
مطالعه Ochoa-Meza و همکاران (۲۰۱۹) جزو پژوهش‌های تقریباً جدید محسوب می‌شود که می‌تواند در درک پتانسیل ضدویروسی نانوذرات نقره، مفید باشد. در این پژوهش، پتانسیل ضدویروسی نانوذرات نقره در مواجهه با ویروس سندرم لکه سفید (WSSV) که یکی از مهم‌ترین پاتوژن‌های ویروسی در صنعت پرورش میگو است، در میگوی پاسفید (*Penaeus vannamei*) بررسی شده است. نتایج حاصله از این پژوهش نشان داد که مقدار کمی از نانوذرات نقره قادر به افزایش پاسخ سیستم ایمنی میگو بدون اثرات سمّی در میگوهای سالم است. محققان این پروژه بیان کردند که این پاسخ ایمنی با استفاده از دوزهای دیگر قابل افزایش است و می‌تواند جایگزین بسیار مهمی برای درمان بیماری سندرم لکه سفید باشد.

رهایش نانوذرات نقره به محیط‌های آبی و سمّیت آن برای موجودات آبزی

• سرنوشت نانوذرات نقره در محیط‌های آبی

محیط آبی از موجودات زنده‌ای مانند ماهی، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها تشکیل شده است که برای بقا به آب شیرین وابسته هستند. هنگامی‌که نانوذرات وارد اکوسیستم‌های آبی می‌شوند، احتمالاً تحت تأثیر دگرگونی‌های مختلفی قرار می‌گیرند که حالت اولیه آن‌ها را تغییر می‌دهد (Siddiqi و Husen، ۲۰۱۷؛ Siddiqi و همکاران، ۲۰۱۸). این دگرگونی‌ها به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی نانوذرات نقره است و علاوه بر این می‌تواند تحت تأثیر شیمی محیط آب قرار گیرد. این دگرگونی‌ها شامل فرآیندهایی مانند انحلال، جذب، تجمع، ته‌نشینی و سایر واکنش‌هایی هستند (شکل ۲) که اغلب در یک زمان اتفاق می‌افتد و بر سرنوشت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. با این حال باید توجه داشت که در سیستم‌های آبی، اجزای جذب شده روی نانوذرات نقره می‌توانند خواص سطحی این مواد را تغییر دهند و در نتیجه، بر تجمع، انحلال آن‌ها و بالعکس تأثیر بگذارند

(Navaladian و همکاران، ۲۰۰۸؛ Iravani و همکاران، ۲۰۱۴). این دگرگونی‌ها پیامدهای زیادی بر انتقال، جذب، زیست‌فراهمی، ماندگاری و اثرات سمّی نانوذرات نقره دارند.



شکل ۲- نمایی از تبدیل نانوذرات نقره در سیستم‌های آبی (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳)

۱- فرآیند انحلال:

انحلال نانوذرات منجر به رهاشدن و پراکندگی این مواد در محیط‌های آبی می‌شود. الگوی انحلال و رهاسازی نانوذرات نقره تحت تأثیر ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها و همچنین، خصوصیات فیزیکوشیمیایی محیط تغییر می‌یابد. Yadav و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که ویژگی‌های آب بر انحلال نانوذرات تأثیر می‌گذارد. آن‌ها شاهد انحلال بیشتر نانوذرات در آب دیونیزه شده (۰/۰۵۴ میلی‌گرم در لیتر) نسبت به آب حوضچه طبیعی (۰/۰۳۵ میلی‌گرم در لیتر) بودند. لازم به ذکر است که آب حوضچه طبیعی برخلاف آب دیونیزه دارای مواد معدنی، مواد آلی طبیعی (NOM) و سایر آلاینده‌ها است که می‌تواند بر سطح انحلال و سینتیک انحلال نانوذرات تأثیر بگذارد. مواد آلی طبیعی از طریق برهم‌کُنش فضایی و الکترواستاتیکی، گاهی اوقات، یک پوشش محافظ ایجاد می‌کند که مانع انحلال می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۱۶). افزایش قدرت یونی (IS) و کاهش pH محیط، باعث افزایش انحلال نانوذرات نقره می‌شود (Yadav و همکاران، ۲۰۲۲). مشاهدات مشابهی توسط Mbanga و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد که نشان داد، درجه و سرعت انحلال نانوذرات نقره در IS بالا و pH پایین افزایش یافت. همچنین، سینتیک انحلال بر فراوانی نانوذرات نقره در محیط تأثیر می‌گذارد و از این‌رو، سمّیت آن‌ها را برای موجودات آبزی تعیین می‌نماید (Mbanga و همکاران، ۲۰۲۲).

۲- تراکم و تجمع:

انباشتگی و تجمع به‌دلیل نیروهای جاذب بین ذرات شکل می‌گیرد و باعث می‌شود که آن‌ها با هم در یک جِرم جمع شوند. تشکیل آگلومراها و سنگدانه‌ها به خواص ذرات و همچنین، ویژگی‌های شیمیایی محیط‌های آبی بستگی دارد. در غلظت‌های بالا، برخورد ذرات با سرعت بیشتری رخ می‌دهد که منجر به تجمع می‌شود (Daniel و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیقات انجام‌شده نشان داده که تجمع وابسته به غلظت است (Sharma و همکاران، ۲۰۰۸). بر طبق مطالعه Senapati (۲۰۰۵)، مورفولوژی ذرات بر سرعت تجمع نانوذرات نقره تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، Dube و Okuthe (۲۰۲۳) نشان دادند که نانوذرات با شکل نامنظم تجمع کم‌تری دارند، در حالی‌که تجمع نانوذرات اکسید روی که به شکل گُروی است به‌شدت به قدرت یونی محلول وابسته است.

تحقیقات نشان داده است که دما، اندازه ذرات و pH بر تجمع تأثیر می‌گذارد (Fernando و Zhou، ۲۰۱۹). Lee و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که افزایش دما باعث کاهش اندازه نانوذرات نقره می‌شود که در نهایت سطح تجمع را کاهش می‌دهد و باعث انحلال و آزادسازی یون‌های Ag^{+} در محیط می‌شود. بیشتر سطوح نانوذرات نقره عامل‌دار هستند و گروه‌های عاملی با یون‌های H^{+} یا OH^{-} در تعامل هستند. بنابراین pH محیط بر بار سطحی و انحلال اکسیداتیو نانوذرات نقره تأثیر می‌گذارد (Sharma و همکاران، ۲۰۰۸؛ Dube و Okuthe، ۲۰۲۳).

۳- واکنش‌های ردوکس[۱۳]:

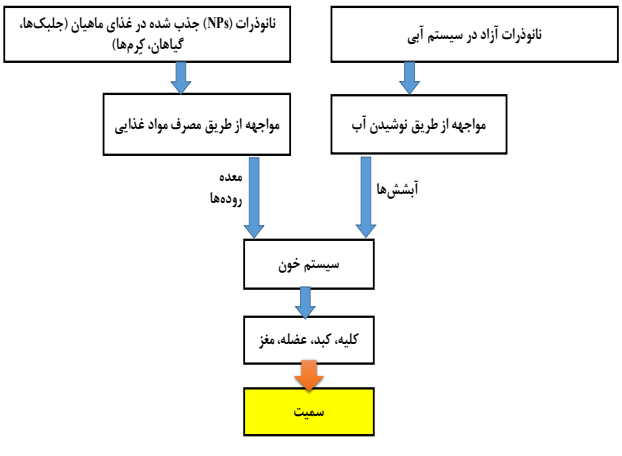
واکنش‌های ردوکس در سیستم‌های آبی طبیعی، فرآیند ترکیبی اکسیداسیون-کاهش را درگیر می‌کند. این واکنش‌ها با حضور عوامل اکسیدکننده یا کاهنده و شرایطی مانند pH کنترل می‌شوند. در حضور گونه‌های فعال ردوکس در محیط‌های آبی، نانوذرات فعال ردوکس از طریق واکنش‌های ردوکسی که متعاقباً انجام می‌شوند، خواص فیزیکوشیمیایی خودشان را تغییر می‌دهند (Galatage و همکاران، ۲۰۲۱). واکنش‌های ردوکس می‌تواند منجر به یک پوشش سطحی نامحلول حولِ نانوذرات نقره شود که باعث بهبود پایداری این مواد در محیط آبی می‌شود. از طرف دیگر، پایداری نانوذرات نقره را می‌توان با ایجاد یک پوشش سطحی فعال کاهش داد که برهم‌کُنش نانوذرات با سایر اجزای سیستم آبی را امکان‌پذیر می‌کند و از این رو اکسیداسیون بیشتر را مهار می‌کند (Senapati، ۲۰۰۵).

۴- جذب به سطوح دیگر:

نانوذرات نقره می‌توانند روی سطوح مختلف جذب شوند. این رفتار به‌طور قابل توجهی بر انتقال آن‌ها و همچنین سرنوشت آن‌ها در محیط‌های آبی تأثیر می‌گذارد. نانوذرات نقره می‌توانند با جذب به سطوح جامد در سیستم‌های آبی، به‌عنوان یک جاذب، عمل کنند و حرکت و در نتیجه برهم‌کُنش‌هایشان را تغییر دهند. در روش دیگر، نانوذرات نقره می‌توانند با جذب موادی از محیط‌های آبی که بر رفتار و ویژگی‌های نانوذرات تأثیر می‌گذارد، به‌عنوان جاذب عمل کنند. این حالت بیشتر زمانی مشاهده می‌شود که مواد آلی طبیعی (NOM) روی سطح نانوذرات نقره در محیط‌های آبی جذب می‌شود. جذب مواد آلی طبیعی در Al_2O_3-NPs و CuO-NPs، انحلال این مواد در محیط‌های آبی را کاهش می‌دهد (Nanja و همکاران، ۲۰۲۰).

۵- انباشت نانوذرات نقره در بدن آبزیان:

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، نانوذرات نقره را می‌توان به صورت رسوب یا معلق در سیستم‌های آبی یافت که به‌شدت بر موجودات آبزی، مانند ماهیان تأثیر می‌گذارند. ماهی‌ها به وجود آلاینده‌های طبیعی در آب بسیار حساس هستند و از این‌رو، از آن‌ها به‌عنوان نشانگرهای زیستی سمّیت در محیط‌های آبی استفاده می‌شود (Lawson، ۱۹۹۵). شکل (۳) مسیرهای مواجهه، زیست‌فراهمی و تأثیر بالقوه نانوذرات نقره بر ماهی را تعیین می‌کند. جذب نانوذرات توسط ماهی از طریق قرارگرفتن در معرض رژیم غذایی صورت می‌گیرد، زیرا غذاهای ماهی مانند جلبک‌ها، گیاهان آبزی، حشرات و کِرم‌ها نیز می‌توانند نانوذرات نقره را در بدن خود انباشته کنند. این در حالی است که گونه‌های کف‌زی نیز در معرض نانوذرات و امکان بلع آن‌ها می‌باشند. لازم به ذکر است که مسیر دیگر برای انتقال نانوذرات نقره به بدن ماهیان از طریق ورود آب به درون بدن می‌باشد. هنگامی‌که نانوذرات نقره در سیستم‌های آب طبیعی آزاد می‌شوند، ویژگی‌های سطحی و فیزیکوشیمیایی آن‌ها، امکان انباشت این مواد در آبشش یا پوست ماهیان را افزایش می‌دهند (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳).



شکل ۳- جذب و انباشت نانوذرات نقره در بدن ماهیان (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳)

نانوذرات نقره پس از جذب روی ماهی، از طریق انتشار یا اندوسیتوز به محیط داخل سلولی یا در سراسر اپیتلیوم منتقل می‌شوند (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳). آن‌ها به مکان‌های گیرنده روی غشای بیولوژیکی متصل می‌شوند و با آن‌ها واکنش نشان می‌دهند، و به‌دنبال آن انتقال در سراسر غشا (داخلی‌سازی) انجام می‌شود. در نتیجه نانوذرات نقره در اندام‌هایی مانند کلیه، آبشش، ماهیچه‌ها، مغز، غدد جنسی، هپاتوپانکراس و کبد گزارش شده است. اندازه این نانوذرات بر میزان انباشتگی و جابه‌جایی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. نانوذرات نقره کوچک (۲۰ نانومتر) به غشای قاعده جانبی منتقل شدند، در حالی‌که نمونه‌های بزرگ (۱۱۰ نانومتر) روی غشای آپیکال باقی ماندند (Gurunathan و همکاران، ۲۰۰۹). هنگامی که نانوذرات داخل سلول هستند، با اجزای مختلف درون سلولی برهم‌کُنش و فرآیندهای سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جذب، انباشت و جابه‌جایی نانوذرات نقره می‌تواند به‌میزان متفاوتی در موجودات رخ دهد و منجر به سطوح مختلف سمّیت شود (Khodashenas و Ghorbani، ۲۰۱۵؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

• اثرات سمّی نانوذرات نقره بر ماهیان

نانوذرات نقره به‌دلیل خواص عالی خود در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به‌ویژه برای فعالیت‌های باکتری‌کُشی و ویروس‌کُشی با ایجاد اختلال در غشاها، تولید ROS، اکسیداسیون، بی‌ثباتی پروتئین‌ها، آسیب‌رساندن به DNA و آزادسازی ترکیبات خطرناک بر روی میکروب‌ها تأثیر می‌گذارند. لازم به ذکر است که همین اثرات می‌تواند بر سایر موجودات از جمله ماهیان تأثیر بگذارد.

رفتار سمّیت نانوذرات در سیستم‌های آب طبیعی با سمّیت گزارش شده در آزمایشگاه‌ها متفاوت است. سطوح غلظتی که بیشتر در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود، بسیار بیش‌تر از سیستم آبزیان طبیعی است. تقلید از سیستم آبی طبیعی که از مکانی به مکان دیگر به‌دلیل تفاوت در عوامل غیرزیستی و زیستی، همراه با شرایط اکولوژیکی-زمین‌شناختی متفاوت است، دشوار است. تعامل و تبدیل نانوذرات نقره با اجزای پیچیده در محیط‌های آبی طبیعی، می‌تواند سمّیت این مواد را تغییر دهد. Lee و همکاران (۲۰۲۲)، سمّیت حاد کم Ag-NPs یا ZnO-NPs را برای رشد جنین گورخرماهی در سیستم‌های آبی طبیعی و سمّیت حاد بالا را زمانی‌که جنین‌ها در Ag-NPs یا ZnO-NPs در آب خوشه‌ای رشد می‌کنند، گزارش کردند. در حال حاضر، سطوح نانوذرات نقره در سیستم‌های آب طبیعی ممکن است پایین باشد، با این حال، برخی از این ذرات تجمع می‌یابند و تهدیدی بالقوه برای سیستم آبی محسوب می‌شوند. سمّیت نانوذرات نقره می‌تواند بسته به ویژگی‌های محیط آبی و ماهیت نانوذرات پس از تجمع در بدن ماهیان، کاهش یا افزایش یابد. اندازه ذرات، شکل، بار سطحی، پوشش‌های سطحی و ویژگی‌های محیطی در سمّیت ماهی نقش دارند (Khan و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این، غلظت نانوذرات نقره، پایداری در ماهی پس از جذب، برهم‌کُنش آن‌ها با اندام‌ها/سلول‌ها ماهی و ظرفیت تجمع در بافت‌ها و اندام‌ها نیز سمّیت ماهی را تعیین می‌کند (Radkhah و Eagderi، ۲۰۲۰؛ Radkhah و Sadeghinejad Masouleh، ۲۰۲۰).

علی‌رغم چندین دهه استفاده، شواهد دقیقی مبنی بر سمّیت نقره آشکار نشده است و محصولات ساخته‌شده با AgNP را طیف وسیعی از نهادهای معتبر از جمله سازمان غذا و دارو[۱۴] (FDA) و سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا[۱۵] (USEPA) نموده‌اند (Abou El-Nour و همکاران، ۲۰۱۰؛ Zhong و همکاران،

۲۰۰۷). این در حالی است که تأثیرات ضدمیکروبی این مواد به‌واسطهٔ بسیاری از مطالعات به‌اثبات رسیده است و همچنان نگرانی‌های زیادی در مورد کاربرد آن‌ها در سیستم‌های پرورشی وجود دارد. در این بخش به برخی از پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون این موضوع اشاره می‌شود.

Johari و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی که به‌منظور بررسی میزان سمّیت نانوذرات نقره کلوئیدی (AgNPs) در سه مرحله مختلف زندگی قزل‌آلای رنگین‌کمان انجام گرفته بود، بیان کردند که ارزش تخمین‌زده شده LC_{50} در ۹۶ ساعت برای افراد eleutheroembryos، لاروی (larvae) و جوان (juvenile) به‌ترتیب ۰/۲۵، ۰/۷۱ و ۲/۱۶ میلی‌گرم در لیتر بود که حساسیت بالاتری را در مراحل اولیه زندگی نشان می‌داد (جدول ۱). نویسندگان در این پژوهش AgNP های کلوئیدی را به‌ترتیب به‌عنوان «بسیار سمّی» و «سمّی» در مرحله‌هایeleutheroembryo-larva و جوانی طبقه‌بندی نمودند، به این معنی‌که انتشار نانوذرات نقره در محیط‌های آبی یا کاربرد مستقیم آن‌ها به‌عنوان یک ماده ضدمیکروبی در صنعت آبزی‌پروری، دیگر مجاز نیست.

Sohn و همکاران (۲۰۱۵) برای درک بهتر اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) و نانوسیم‌های نقره‌ای (AgNWs) در محیط‌های آب شیرین، سمّیت این نانومواد را در گونه‌های دافنی (*Daphnia magna*)، ماهی (*Oryzias latipes*) و جلبک (*Raphidocelis subcapitata*) با استفاده از دستورالعمل‌های سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[۱۶] (OECD) بررسی و مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد که حساسیت به نانومواد در بین ارگانیسم‌های آزمایش (دافنی> جلبک> ماهی) متفاوت است. بر اساس یافته‌های ارائه‌شده در این تحقیق، نانوذرات نقره به‌عنوان «دسته حاد ۱» برای *D. magna* و *R. subcapitata* و «دسته حاد ۲» برای *O. latipes* طبقه‌بندی می‌شوند، این در حالی است که نانوسیم‌های نقره‌ای به‌عنوان «دسته حاد ۱» برای *D. magna* و «دسته حاد ۲» برای *O. latipes* و *R. subcapitata* دسته‌بندی می‌شوند. نتایج حاضر نشان داد که برای جلوگیری از انتشار تصادفی یا عمدی نانومواد نقره در محیط‌های آب شیرین باید توجه بیشتری شود. لازم به ذکر است که در جدول (۱) سطح قابل تحمل و ایمن نانوذرات نقره در برخی از گونه‌های آبزی، گزارش شده است.

اگر چه امثال تحقیقات ارائه شده تأثیرات سمّی نانوذرات را نشان می‌دهند، اما با این حال نباید نقش عوامل محیطی را در میزان سمّیت این مواد انکار نمود. Yung و همکاران (۲۰۱۴) اظهار می‌نمایند هنگامی‌که نانوذرات اکسید شده وارد محیط آبزیان می‌شوند، رفتار آن‌ها توسط عوامل محیطی مانند سطح اکسیژن، pH، استحکام یونی و میزان مواد آلی کنترل می‌شود. آن‌ها همچنین تأکید می‌کنند که به‌دلیل استحکام یونی زیاد در آب دریا، نانوذرات اُکسیدشده تمایل به تجمع و کم‌تحرک شدن دارند، در حالی‌که در آب شیرین تمایل به حل شدن سریع دارند که خطر سمّیت حاد را برای موجودات آبزی افزایش می‌دهد (Franklin و همکاران، ۲۰۰۷؛ Shaalanو همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۱- سطح قابل تحمل و ایمن نانوذرات نقره در گونه‌های مختلف آبزی‌پروری (Khan و همکاران، ۲۰۱۵)

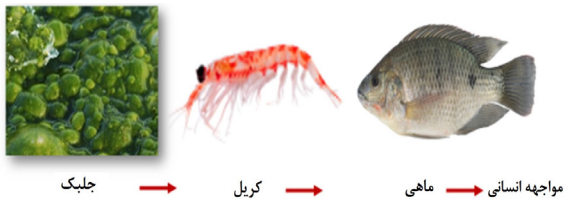
ردیف	شکل نانوذرات نقره	گونه ماهی	ارزش قابل تحمل (LC_{50})
۱	Nanocid	کپور نقره‌ای	۰/۳۴ ppm
۲	Nanocil	کپور نقره‌ای	۶۶/۴ ppm
۳	Nanpcid (61nm)	کپور نقره‌ای	۰/۲۰۲ mgl^{-1}
۴	Nanocid	کپورمعمولی(نوجوان)	۰/۴۹ ppm
۵	Nanosil	کپورمعمولی(نوجوان)	۷۳/۸ ppm
۶	$AgNO_3$	کپورمعمولی(نوجوان)	۰/۳۳ ppm
۷	Ag-NPs (50-100)	ماهی روهو	۱۰۰/۰ $mgkg^{-1}$
۸	Ag-NPs (powder)	گورخرماهی(جنین)	۲۵۰ mgl^{-1}
۹	Ag-NPs (3nm)	گورخرماهی(نوجوان)	۹۳/۱۱ µM
۱۰	Ag-NPs (100nm)	گورخرماهی(نوجوان)	۱۳۷/۲۱ µM
۱۱	Colloidal	گورخرماهی(بالغ)	۷/۰ mg AgL^{-1}
۱۲	Colloidal	قزل‌آلای رنگین‌کمان (جنین)	۰/۲۵ mgl^{-1}
۱۳	Colloidal	قزل‌آلای رنگین‌کمان (لارو)	۲/۱۶ mgl^{-1}

تجمع زیستی نانوذرات نقره در زنجیره غذایی

موجودات آبزی مانند ماهی منبع مهمی از مواد مغذی هستند. تجمع زیستی نانوذرات نقره در ماهیان، تهدیدی برای بقای انسان محسوب می‌شود. اولاً نانوذرات انباشته شده از طریق اثرات سمّی خود می‌توانند رشد و تولیدمثل ماهیان را تغییر دهند. ثانیاً، این مواد انباشته شده، می‌توانند از طریق رژیم ماهی به سطوح تغذیه‌ای بعدی (انسان) منتقل شوند (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳).

فیتوپلانکتون‌ها و جلبک‌ها منبع غذایی برای ماهیان کوچک، سخت‌پوستان و زئوپلانکتون‌ها (مصرف‌کنندگان اولیه) هستند که به‌نوبه خود منبعی از مواد مغذی برای جانوران آبزی بزرگ‌تر از جمله ماهی‌ها (مصرف‌کنندگان ثانویه) هستند. هنگامی که نانوذرات نقره در این موجودات آبزی تجمع می‌یابند، می‌توانند از طریق رژیم غذایی از سطوح تغذیه‌ای پایین‌تر به سطوح بالاتر منتقل شوند و متعاقباً در طول زنجیره غذایی انتقال یابند (Zhang، ۲۰۱۳). شکل (۴) نمایی از انتقال نانوذرات نقره از طریق زنجیره غذایی سیستم‌های آبی را نشان می‌دهد. انتقال از طریق زنجیره غذایی منجر به تجمع

زیستی نانوذرات می‌شود. در نتیجه بر مصرف‌کنندگان سطوح بالاتر به‌طور ویژه بر انسان‌ها که بخشی از زنجیره غذایی هستند، تأثیر می‌گذارد (Babaei و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۴- نمایی از انتقال نانوذرات نقره از طریق زنجیره غذایی سیستم‌های آبی (Dube و Okuthe، ۲۰۲۳)

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

نانوذرات خواص جدیدی را نشان می‌دهند که به اندازه، شکل و مورفولوژی آن‌ها بستگی دارد. نانوذرات نقره (AgNPs) خواص ضدباکتریایی عالی در برابر طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها نشان داده‌اند. اگرچه برخی از پژوهش‌گران، نانوذرات نقره را به‌دلیل کاربرد آن‌ها در الکترونیک، کاتالیز، داروها و در کنترل رشد میکروارگانیسم‌ها، به‌عنوان دوست‌دار محیط‌زیست معرفی کرده‌اند، اما با این حال، برخی از کارشناسان نیز نظرات متناقض و مخالفی با آنچه بیان گردید، دارند. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد که اثرات ضدمیکروبی نانوذرات نقره در بین نانوذرات فلزی، بالا است. با توجه به این مسأله، رهایش این مواد به درون اکوسیستم‌های آبزی، می‌تواند سلامت بسیاری از آبزیان از جمله ماهیان را تحت تأثیر قرار دهند و حتی به‌واسطهٔ انتقال نانوذرات نقره در زنجیره غذایی، اثرات منفی بر سلامت انسان داشته باشند.

کاربرد گسترده نانوذرات نقره (AgNP) منجر به انتشار اجتناب‌ناپذیر آن‌ها در محیط می‌شود. نانوذرات نقره به‌عنوان عوامل ضدمیکروبی عالی شناخته می‌شوند، بنابراین، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان مواد ضدعفونی‌کننده جایگزین استفاده کرد. مطالعه حاضر به‌طور کلی نقش اثرگذار فناوری نانو و همچنین، کاربرد نانوذرات نقره را در سیستم‌های تصفیه فاضلاب ناشی از فعالیت‌های آبزی‌پروری، منعکس نمود. این پژوهش با تکیه بر یافته‌های پیشین نشان داد که نانوذرات نقره علاوه بر اهمیتی که در فرآیند تصفیه فاضلاب دارند، می‌توانند در جهت بهبود کیفیت آب و همچنین، حذف عوامل بیماری‌زای ماهیان مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از بیماری‌های آبزیان در سیستم‌های پرورشی کشور مرتبط به عوامل باکتریایی سالمونلا و هیدروفیلا می‌باشد، بنابراین، می‌توان از نانوذرات در حد استاندارد، به‌طوری‌که اثرات زیست‌محیطی به‌همراه نداشته باشد، استفاده نمود. با توجه به این مسأله، اگرچه کاربرد نانوذرات در تحقیقات مختلف مورد تأیید قرار گرفته است، اما با این حال، لازم است که برنامه‌ها و اقدامات محتاطانه در جهت جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از این مواد در دستور کار قرار گیرد.

پی‌نوشت

1-Silver
2-In vitro
3-Electrical contacts
4-Medical Device Reporting
5-White Spot Syndrome Virus
6-Acute Hepatopancreatic Necrosis Syndrome
7-Minimum inhibitory concentrations
8-Encapsulated
9-Theronts
10-Tomonts
11-Anthelmintic
12-Epizootic Ulcerative Syndrome
13-Redox reactions
14-Food and Drug Administration
15-United States Environmental Protection Agency
16-Organisation for Economic Cooperation and Development

منابع

امیری، محمد، و بهمنش، مهسا. (۱۳۸۹). تأثیر فناوری نانو بر جوامع در حال توسعه با نگرش ویژه به ایران. چهارمین کنفرانس ملی مدیریت تکنولوژی ایران، انجمن مدیریت تکنولوژی ایران. شهر تهران، ۹ صفحه.

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۳۹۹). بررسی خواص ضد میکروبی نانوذرات نقره (AgNPs) به منظور کنترل بیماری‌ها و مدیریت بهداشت در سیستم‌های آبزی‌پروری. مجله آبزیان زینتی، ۷(۱)، ۷-۱۵.

رادخواه، علیرضا، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانو ذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبزی. آب و توسعه پایدار، ۸(۲)، ۷۱-۹۰. doi: 10.22067/jwsd.v8i2.1019

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و موسوی ثابت، حامد. (۱۴۰۰a). مروری بر فواید و مضرات فناوری نانو در صنعت آبزی‌پروری. مجله آبزیان زینتی، ۸(۲)، ۴۳-۵۸.

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰b). مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری مداربسته (RAS). آب و توسعه پایدار، ۸(۳)، ۸۱-۸۸. doi: 10.22067/jwsd.v8i3.2105.1050

Abou El-Nour, K.M.M., Eftaiha, A., Al-Warthan, A., & Ammar, R.A.A. (2010). Synthesis and applications of silver nanoparticles. Arabian Journal of Chemistry, 3, 135-140. doi: 10.1016/j.arabjc.2010.04.008

Alexander, J.W. (2009). History of the medical use of silver. Surgical Infections, 10, 289-292. doi: 10.1089/sur.2008.9941

Alvarez-Cirerol, F.J., López-Torres, M.A., Rodríguez-León, E., Rodríguez-Beas, C., Martínez-Higuera, A., Lara, H.H., Vergara, S., Arellano-Jimenez, M.J., Larios-Rodríguez, E., Martínez-Porchas, M., Vega, E., & Iñiguez-Palomares, R.A. (2019). Silver nanoparticles synthesized with Rumex hymenosepalus: a strategy to combat early mortality syndrome (EMS) in a cultivated white shrimp. Journal of Nanomaterials, 2019, 8214675. doi: 10.1155/2019/8214675

AZOM, A. (2022). Material Science news, applications, product information, and interviews. Effect of silver nanoparticle-containing fertilizer on crops. AZoMaterials, 5, 20-42.

Babaei, M., Behzadi, M., Seong, M., Je, I., & Ali, S. (2022). Trophic transfer and toxicity of silver nanoparticles along a phytoplankton- zooplankton- fi sh food chain. Science of the Total Environment, 842, 156807. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156807

Bhardwaj, P., Bhatia, E., Sharma, S., Ahamad, N., & Banerjee, R. (2020). Advancements in prophylactic and therapeutic nanovaccines. Acta Biomaterialia, 108, 1-21. doi: 10.1016/j.actbio.2020.03.020

Barakat, K.M., El-Sayed, H.S., & Gohar, Y.M. (2016). Protective effect of squilla chitosan–silver nanoparticles for Dicentrarchus labrax larvae infected with Vibrio anguillarum. International Journal of Aquatic Research, 8, 179-189. doi: 10.1007/s40071-016-0133-2

Camacho-Jiménez, L., Álvarez-Sánchez, A.R., & Mejía-Ruíz, C.H. (2020). Silver nanoparticles (AgNPs) as antimicrobials in marine shrimp farming: A review. Aquaculture Reports, 18, 100512. doi: 10.1016/j.aqrep.2020.100512

Chindris, A. (2010). Degradation of refractory organic compounds in aqueous wastes employing a combination of biological and chemical treatments [Thesis], University of Cagliari, Sardinia, Italy.

Dananjaya, S.H.S., Erandani, W.K.C.U., Kim, C.H., Nikapitiya, C., Lee, J., & De Zoysa, M. (2017). Comparative study on antifungal activities of chitosan nanoparticles and chitosan silver nano composites against Fusarium oxysporum species complex. International Journal of Biological Macromolecules, 105(Pt 1), 478-488. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.07.056

Daniel, S.C.G.K., Sironmani, T.A., & Dinakaran, S. (2016). Nano formulations as curative and protective agent for fish diseases: Studies on red spot and white spot diseases of ornamental gold fish Carassius auratus. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies, 4(4), 255-261.

El-Sayed, M.E. (2020). Nanoadsorbents for water and wastewater remediation. Science of the Total Environment, 739, 139903. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139903

Farouk, M.M., El-Molla, A., Salib, F.A., Soliman, Y.A., & Shaalan, M. (2020). The role of silver nanoparticles in a treatment approach for multidrug-resistant Salmonella species isolates. International Journal of Nanomedicine, 15, 6993-7011. doi: 10.2147/IJN.S270204

Galatage, S.T., Hebalkar, A.S., Dhobale, S.V., Mali, O.R., Kumbhar, P.S., Nikade, S.V., & Killedar, S.G. (2021). Silver Nanoparticles: Properties, Synthesis, Characterization, Applications and Future Trends. In S. Kumar, P. Kumar, & C. S. Pathak (Eds.), Silver micro-nanoparticles - properties, synthesis, characterization, and applications. IntechOpen, 1, 1-35. doi: 10.5772/intechopen.99173

Galdiero, S., Falanga, A., Vitiello, M., Cantisani, M., Marra, V. & Galdiero, M. (2011). Silver nanoparticles as potential antiviral agents. Molecules (Basel, Switzerland), 16(10), 8894-8918. doi: 10.3390/molecules16108894

Gurunathan, S., Kalishwaralal, K., Vaidyanathan, R., Venkataraman, D., Pandian, S.R., Muniyandi, J., Hariharan, N. & Eom, S.H. (2009). Biosynthesis, purifica-

Jahanbakhsh, A., Shaluei, F., & Hedayati, A. (2012). Detection of Silver Nanoparticles (Nanosil®) LC50 in Silver Carp (Hypophthalmichthys molitrix) and Goldfish (Carassius auratus). World Journal of Zoology, 7(2), 126-130. doi: 10.5829/idosi.wjz.2012.7.2.62129

Jahn, W. (1999). Chemical aspects of the use of gold clusters in structural biology. Journal of Structural Biology, 127, 106-108.

Jasni, A.H., Ali, A.A., Sagadevan, S., & Wahid, Z. (2021). Silver nanoparticles in various new applications. In S. Kumar, P. Kumar, & C. S. Pathak (Eds.), Silver micro-nanoparticles - properties, synthesis, characterization, and applications. IntechOpen, 2, 30-60. doi: 10.5772/intechopen.96105

Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y.S., Dufresne, A., & Danquah, M.K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. Beilstein Journal of Nanotechnology, 9, 1050-1074. doi: 10.3762/bjnano.9.98

Jin, C., Wang, K., Oppong-Gyebi, A., & Hu, J. (2020). Application of Nanotechnology in Cancer Diagnosis and Therapy - A Mini-Review. International Journal of Medical Sciences, 17(18), 2964–2973. doi: 10.7150/ijms.49801

Johari, S.A., Kalbassi, M.R., Soltani, M., & Yu, I.J. (2013). Toxicity comparison of colloidal silver nanoparticles in various life stages of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). Iranian Journal of Fisheries Sciences, 12(1), 76-95.

Johari, S.A., Kalbassi, M.R., Soltani, M., & Yu, I.J. (2015). Study of fungicidal properties of colloidal silver nanoparticles (AgNPs) on trout egg pathogen, Saprolegnia sp. International Journal of Aquatic Biology, 3(3), 191-198.

Kathiresan, K., Alikunhi, N.M., Pathmanaban, S., Nabikhan, A., & Kandasamy, S. (2010). Analysis of antimicrobial silver nanoparticles synthesized by coastal strains of Escherichia coli and Aspergillus niger. Canadian Journal of Microbiology, 56, 1050-1059.

Khan, M.S, Jabeen, F., Aziz Qureshi, N., Saleem Asghar, M., Shakeel, M., & Noureen, A. (2015). Toxicity of silver nanoparticles in fish: a critical review. Journal of tion and characterization of silver nanoparticles using Escherichia coli. Colloids Surf. B Biointerfaces, 74, 328-335. doi: 10.1016/j.colsurfb.2009.07.048

García-Barrasa, J., López-de-Luzuriaga, J.M., & Monge, M. (2011). Silver nanoparticles: synthesis through chemical methods in solution and biomedical applications. Central European Journal of Chemistry, 9, 7–19. doi: 10.2478/s11532-010-0124-x

CDC, B. (2022). Centers for Disease Control and Prevention. The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Nanotechnology, 2, 1-14.

Choi, J.E., Kim, S., Ahn, JH., Youn, P., Kang, J.S., Park, K., Yi, J., & Ryu, D. (2009). Induction of oxidative stress and apoptosis by silver nanoparticles in the liver of adult Zebrafish. Aquatic Toxicology, 100(2), 151-159. doi: 10.1016/j.aquatox. 2009.12.012

Dube, E., & Okuthe, G.E. (2023). Engineered nanoparticles in aquatic systems: Toxicity and mechanism of toxicity in fish. Emerging Contaminants, 9(2), 100212. doi: 10.1016/j.emcon.2023.100212

Franklin, N.M., Rogers, N.J., Apte, S.C., Batley, G.E., Gadd, G.E., & Casey, P.S. (2007). Comparative toxicity of nanoparticulate ZnO, bulk ZnO, and ZnCl2 to a freshwater microalga (Pseudokirchneriella subcapitata): the importance of particle solubility. Environmental Science and Technology, 41, 8484-8490. doi: 10.1021/es071445r

Fernando, I., & Zhou, Y. (2019). Impact of pH on the stability, dissolution and aggregation kinetics of silver nanoparticles. Chemosphere, 216, 297-305.

Güzel, R., & Erdal, G. (2018). Synthesis of Silver Nanoparticles. In (Ed.), Silver Nanoparticles - fabrication, characterization and applications. IntechOpen, 2, 30-50. doi: 10.5772/intechopen.75363

Hedayati, A., Shaluei, F., & Jahanbakhsh, A. (2012). Comparison of Toxicity Responses by Water Exposure to Silver Nanoparticles and Silver Salt in Common Carp (Cyprinus carpio). Global Veterinaria, 8(2), 179-184.

Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S.V., & Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. Research in Pharmaceutical Sciences, 9(6), 385-406.

Muller, M.P., MacDougall, C., & Lim, M. (2016). Ontario Agency for Health Protection and Promotion Public Health Ontario; Provincial Infectious Diseases Advisory Committee on Infection Prevention and Control; Provincial Infectious Diseases Advisory Committee on Infection Prevention and Control. Antimicrobial surfaces to prevent healthcare-associated infections: a systematic review. Journal of Hospital Infection, 92(1), 7-13. doi: 10.1016/j.jhin.2015.09.008

Nakamura, S., Sato, M., Sato, Y., Ando, N., Takayama, T., Fujita, M., & Ishihara, M. (2019). Synthesis and application of silver nanoparticles (Ag NPs) for the prevention of infection in healthcare workers. International Journal of Molecular Sciences, 20(15), 3620. doi: 10.3390/ijms20153620

Nanja, A.F., Focke, W.W., & Musee, N. (2020). Aggregation and dissolution of aluminium oxide and copper oxide nanoparticles in natural aqueous matrixes. SN Applied Sciences, 2, 1-16. doi: 10.1007/s42452-020-2952-4

Navaladian, S., Viswanathan, B., Varadarajan, T.K., & Viswanath, R.P. (2008). Microwave-assisted rapid synthesis of anisotropic Ag nanoparticles by solid state transformation. Nanotechnology, 19, 045603. doi: 10.1088/0957-4484/19/04/045603

Nikalje, A.P. (2015). Nanotechnology and its Applications in Medicine. Medicinal Chemistry, 5, 81-89. doi: 10.4172/2161-0444.1000247

Patra, J.K., Das, G., Fraceto, L.F., Campos, E., Rodriguez-Torres, M., Acosta-Torres, L.S., Diaz-Torres, L.A., Grillo, R., Swamy, M.K., Sharma, S., Habtemariam, S., & Shin, H.S. (2018). Nano based drug delivery systems: recent developments and future prospects. Journal of Nanobiotechnology, 16(1), 71. doi: 10.1186/s12951-018-0392-8

Pimentel-Acosta, C.A., Morales-Serna, F.N., Chávez-Sánchez, M.C., Lara, H.H., Pestryakov, A., Bogdanchikova, N., & Fajer-Ávila E.J. (2019). Efficacy of silver nanoparticles against the adults and eggs of monogenean parasites of fish. Parasitology Research, 118(6), 1741-1749. doi: 10.1007/s00436-019-06315-9

Ogunfowora, L.A., Iwuozor, K.O., Ighalo, J.O., & Igwegbe, C.A. (2021). Trends in the treatment of aquaculture Biodiversity and Environmental Sciences, 2, 1-18.

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2017). Nanoparticles: Properties, Applications and Toxicities. Arabian Journal of Chemistry, 12(7), 908-931. doi: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011

Khandelwal, N., Kaur, G., Kumar, N., & Tiwari, A. (2014). Application of silver nanoparticles in viral inhibition: A new hope for antivirals. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 9(1), 175-186.

Khanh, N.V., & Cu, P.V. (2019). Antibacterial activity of silver nanoparticles against Aeromonas spp. and Vibrio spp. isolated from aquaculture water environment at Thua Thien Hue. Hue University Journal of Science: Agriculture and Rural Development, 128(3), 5-16. doi: 10.26459/hueuni-jard.v128i3B.4615

Khodashenas, B., & Ghorbani, H.R. (2015). Synthesis of silver nanoparticles with different shapes. Arabian Journal of Chemistry, 12(8), 1823-1838. doi: 10.1016/j.arabjc.2014.12.014

Kim, J.S., Kuk, E., Yu, K.N., Kim, J.H., Park, S.J., Lee, H.I., Kim, S.H., Park, S.J., Park, Y.H., Hwang, C.Y., Kim, Y.K., Lee, Y.S., Jeong, D.H., & Cho, M.H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. Nanomedicine, Nanotechnology, Biology, and Medicine, 3, 95-101.

Lawson, T.B. (1995). Fundamentals of Aquaculture engineering. Chapman and Hall, New York, USA.

Lee, H.J., & Jeong, S.H. (2005). Bacteriostasis and Skin innoxiousness of nanosize silver colloids on textile fabrics. Textile Research Journal, 75(7), 551-556.

Maiti, D., Tong, X., Mou, X., & Yang, K. (2019). Carbon-Based Nanomaterials for Biomedical Applications: A Recent Study. Frontiers in Pharmacology, 9, 1401. doi: 10.3389/fphar.2018.01401

Márquez, J.C.M., Partida, A.H., Monroy, Dosta, M.D.C., Mejía, J.C., & Martínez, J.A.B. (2018). Silver nanoparticles applications (AgNPS) in aquaculture. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies, 6(2), 5-11.

Mbanga, O., Cukrowska E., & Gulumian, M. (2022). Dissolution kinetics of silver nanoparticles: behaviour in simulated biological fluids and synthetic environmental media. Toxicology Reports, 9, 788-796. doi: 10.1016/j.toxrep.2022.03.044

nanoparticles on zebrafish embryos in aquatic ecosystems. Nanomaterials, 12, 1-18. doi: 10.3390/nano12040717

Saleh, M., Abdel-Baki, A.A., Dkhil, M.A., El-Matbouli, M., & Al-Quraishy, S. (2017). Antiprotozoal effects of metal nanoparticles against Ichthyophthirius multifiliis. Parasitology, 144(13), 1802-1810. doi: 10.1017/S0031182017001184

Senapati, S. (2005). Biosynthesis and immobilization of nanoparticles and their applications. University of Pune, India.

Sibiya, A., Gopi, N., Jeyavani, J., Mahboob, S., Al-Ghanim, K.A., Sultana, S., Mustafa, A., & Govindarajan, M.B. (2022). Vaseeharan Comparative toxicity of silver nanoparticles and silver nitrate in freshwater fish Oreochromis mossambicus: a multi-biomarker approach Comp. Comparative Biochemistry and Physiology Part C., 259, 109-201. doi: 10.1016/j.cbpc.2022.109391

Sivaramasamy, E., Zhiwei, W., Li, F., & Xiang, J. (2016). Enhancement of Vibriosis Resistance in Litopenaeus vannamei by Supplementation of Biomastered Silver Nanoparticles by Bacillus subtilis. Journal of Nanomedicine and Nanotechnology, 7, 352. doi: 10.4172/2157-7439.1000352

Shaalan, M.I., El-Mahdy, M.M., Theiner, S., El-Matbouli, M., & Saleh, M. (2017). In vitro assessment of the antimicrobial activity of silver and zinc oxide nanoparticles against fish pathogens. Acta Veterinaria Scandinavica, 59, 49-58. doi: 10.1186/s13028-017-0317-9

Sharma, V., Yngard, R., & Lin, Y. (2008). Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities. Advances in Colloid and Interface Science, 145(1-2), 83-96. doi: 10.1016/j.cis.2008.09.002

Sharma, V.K., Siskova, K.M., Zboril, R., & Gardea-Torresdey, J.L. (2014). Organic-coated silver nanoparticles in biological and environmental conditions: fate, stability and toxicity. Advances in Colloid and Interface Science, 204, 15-34. doi: 10.1016/j.cis.2013.12.002

Siddiqi, K.S., & Husen, A. (2017). Recent advances in plant-mediated engineered gold nanoparticles and their application in biological system. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 40, 10-23. doi: 10.1016/j.jtemb.2016.11.012

effluents using nanotechnology. Cleaner Materials, 2, 100024. doi: 10.1016/j.clema.2021.100024

Ochoa-Meza, A.R., Álvarez-Sánchez, A.R., Romo-Quiñonez, C.R., Barraza, A., Magallón-Barajas, F.J., Chávez-Sánchez, A., García-Ramos, J.C., Toledano-Magaña, Y., Bogdanchikova, N., Pestryakov, A., & Mejía-Ruiz, C.H. (2019). Silver nanoparticles enhance survival of white spot syndrome virus infected Penaeus vannamei shrimps by activation of its immunological system. Fish and Shellfish Immunology, 84, 1083-1089. doi: 10.1016/j.fsi.2018.10.007

Que, Z.G., Torres, J.G.T., Pérez Vidal, H., Rocha, M.A.L., Pérez, J.C.A., López, I., De La Cruz Romero, D., De Los Monteros Reyna, A.E., Sosa, J.G.P., Pavón, A.A., & Hernández, J.S.F. (2018). Application of silver nanoparticles for water treatment. In (Ed.), Silver Nanoparticles - Fabrication, Characterization and Applications. IntechOpen, 1, 20-50. doi: 10.5772/intechopen.74675

Radkhah, A.R., & Eagderi, S. (2020). Book Review: B. Prideaux, A. Pabel. (Eds.), Coral Reefs: Tourism, Conservation and Management, Routledge Publishing, Taylor & Francis Group (2018). (288 p. ISBN: 978-1-315-53732-0 (ebook)). Biological Conservation, 241, 108403. doi: 10.1016/j.biocon.2019.108403

Radkhah, A.R., & Sadeghinejad Masouleh, E. (2020). Fish Diseases and Medicine. 2019. Edited by Smith, SA CRC Press, Taylor & Francis Group. 413 pages. ISBN: 978–1–4987–2786–0 (Hardback). Journal of Fish Diseases, 43(10), 1111-1113. doi: 10.1111/jfd.13236

Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. Biotechnology Advances, 27, 76-83. doi: 10.1016/j.biotechadv.2008.09.002

Ramya, M., & Subapriya, M.S. (2012). Green synthesis of silver nanoparticles. International Journal Pharmacy, Medical and Biology Sciences, 5, 2-22.

Ratan, Z.A., Mashrur, F.R., Chhoan, A.P., Shahriar, S.M., Haidere, M.F., Runa, N.J., Kim, S., Kweon, D.H., Hosseinzadeh, H., & Cho, J.Y. (2021). Silver Nanoparticles as Potential Antiviral Agents. Pharmaceutics, 13(12), 2034. doi: 10.3390/pharmaceutics13122034

Lee, Y.L., Shih, Y.S., Chen, Z.Y., & Wang, Y.J. (2022). Toxic effects and mechanisms of silver and zinc oxide

Siddiqi, K.S., Husen, A., & Rao, R.A.K. (2018). A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. Journal of Nanobiotechnology, 16, 14. doi: 10.1186/s12951-018-0334-5

Slepičková Kasálková, N., Slepička, P., & Švorčík, V. (2021). Carbon nanostructures, nanolayers, and their composites. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 11(9), 2368. doi: 10.3390/nano11092368

Sohn, E.K., Johari, A., Kim, T.G., Kim, J.K., Kim, E., Lee, J.H., Chung, Y.S., & Yu, I.J. (2015). Aquatic Toxicity Comparison of Silver Nanoparticles and Silver Nanowires. Biomed Research International. 2015, 1-12. doi: 10.1155/2015/893049

Soltani, M., Ghodratnema, M., Ahari, H., Ebrahimzadeh mousavi, H.A., Atee, M., Dastmalchi, F., & Rahmanya, J. (2009). The inhibitory effect of silver nanoparticles on the bacterial fish pathogens, Streptococcus iniae, Lactococcus garvieae, Yersinia ruckeri and Aeromonas hydrophila. Journal of Veterinary Research, 3(2), 137-142.

Tran, Q.H., Nguyen, V.Q., & Le, A.T. (2013). Silver nanoparticles: synthesis, properties, toxicology, applications and perspectives. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 4, 4033001. doi: 10.1088/2043-6262/4/3/033001

Van, T.Q.K., Son, N.H., & Vi, H.V. (2015). Effect of silver nanoparticles for Vibrio spp. causing luminous bacteria disease on Litopenaeus vannamei in Thua Thien Hue. Hue University Journal of Science, 104(5), 273-283.

Vaseeharan, B., Ramasamy, P., & Chen, J.C. (2010). Antibacterial activity of silver nanoparticles (AgNps) synthesized by tea leaf extracts against pathogenic Vibrio harveyi and its protective efficacy on juvenile Feneropenaeus indicus. Letters in Applied Microbiology, 50(4), 352-356.

Villella S. (2016). Manual on effluent treatment in aquaculture: Science and Practice. 1, 2-10.

Yadav, P.K., Kochar, C., Taneja, L., & Tripathy, S.S. (2022). Study on dissolution behavior of CuO nanoparticles in various synthetic media and natural aqueous medium. Journal of Nanoparticle Research, 24: 122. doi: 10.1007/s11051-022-05508-1

Yung M.M.N., Mouneyrac C. and Leung K.M.Y. 2014. Ecotoxicity of Zinc Oxide Nanoparticles in the Marine Environment. In: Bhushan B. (eds) Encyclopedia of Nanotechnology. Springer, Dordrecht.

Zahoor, M., Nazir, N., Iftikhar, M., Naz, S., Zekker, I., Burlakovs, J., Uddin, F., Kamran, A.W., Kallistova A., Pimenov N., & Ali Khan, F. (2021). A Review on silver nanoparticles: classification, various methods of synthesis, and their potential roles in biomedical applications and water treatment. Water, 13(16), 2216. doi: 10.3390/w13162216

Zhang, H. (2013). Application of silver nanoparticles in drinking water purification. Dissertations, 29, 1-20.

Zhang, X.F., Liu, Z.G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. International Journal of Molecular Sciences, 17(9), 1534. doi: 10.3390/ijms17091534

Zhang, X.P., Li, W.X., Ai, T.S., Zou, H., Wu, S.G., & Wang, G.T. (2014). The efficacy of four common anthelmintic drugs and traditional Chinese medicinal plant extracts to control Dactylogyrus vastator (Monogenea). Aquaculture, 420, 302-307. doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.09.022

Zhong, L., Hu, J., Cui, Z., Wan, L., & Song, W. (2007). In-situ loading of noble metal nanoparticles on hydroxyl-group-rich titania precursor and their catalytic applications. Chemistry of Materials, 19(18), 4557-4562.

Zorraquín-Peña, I., Cueva, C., Bartolomé, B., & Moreno-Arribas, M.V. (2020). Silver Nanoparticles against Foodborne Bacteria. Effects at Intestinal Level and Health Limitations. Microorganisms, 8, 132. doi: 10.3390/microorganisms8010132