

اثرات زیست محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی و امکان انتقال سمیت این مواد به بدن انسان از طریق زنجیره غذایی

نوع مقاله: مروری

علیرضا رادخواه^۱، سهیل ایگدری^{۲*}، هادی پورباقر^۲، صدیقه آتش افرازه^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. کارشناسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

soheil.eagderi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

صفحه ۷۲-۱۰۸

چکیده

امروزه فناوری نانو به عنوان یکی از زمینه های مهم در تحقیقات مدرن به شمار می رود که با طراحی و سنتز ساختارهای ذرات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر سروکار دارند. یکی از فلزات مورد توجه طی سال های اخیر در حوزه فناوری نانو، نقره است. نانو ذرات نقره به دلیل خواص فلزی مانند رسانایی در صنایع مختلف و اثر ضد میکروبی در علم پزشکی به طور گسترده استفاده می شود و رهاسازی آن در محیط های مختلف از جمله اکوسیستم های آبی آتری افزایش یافته است. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد که نانوذرات نقره می توانند اثرات کشنده ای مانند افزایش تنش اکسیداتیو، سمیت قلبی، سمیت عصبی، سمیت کبدی، سمیت خونی و آسیب دی ان ا در موجودات آبی به ویژه ماهیان داشته باشند. علاوه بر این، انتقال نانوذرات نقره از طریق مصرف ماهیان به بدن انسان می تواند زمینه ساز مشکلات متعددی در رابطه با سلامت انسان باشد و نانوذرات نقره می تواند به دستگاه گوارش، عصبی، تولید مثل، ایمنی و دی ان ا آسیب بزند. با توجه به اهمیت اکوسیستم های آبی و نقش موجودات مختلف از جمله ماهیان در تامین امنیت غذایی انسان، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات زیست محیطی نانوذرات نقره در اکوسیستم های آبی و امکان انتقال سمیت این مواد به بدن انسان از طریق زنجیره غذایی در قالب یک تحقیق مروری انجام گرفت.

واژه های کلیدی: تنش اکسیداتیو، سمیت سیستم ایمنی، سمیت عصبی، ماهیان، نانوذرات نقره

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

مقدمه

امروزه فناوری نانو به عنوان یکی از زمینه‌های مهم در تحقیقات مدرن به شمار می‌رود که با طراحی، سنتز و دست‌ورزی ساختارهای ذرات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر سروکار دارند (Radkhah and Sadeghinejad Masouleh, 2021). تحقیقات نانوذرات در حال حاضر به دلیل کاربردهای بالقوه متنوع در زمینه‌هایی مانند مراقبت‌های بهداشتی، آرایشی، غذا و خوراک، بهداشت محیط، مکانیک، اپتیک، علوم زیست‌پزشکی، صنایع شیمیایی، الکترونیک، صنایع فضایی، دارو، تحویل ژن، علم انرژی، اپتوالکترونیک، کاتالیز، ترانزیستورهای تک‌الکترونی، ساطع کننده‌های نور و غیره مورد توجه قرار گرفته است (Gupta et al. 2023).

فناوری نانو به عنوان یکی از فعال‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی در علم مواد به شمار می‌رود. نانوذرات (NPs) دارای خواص کاملاً جدید یا بهبود یافته‌ای هستند که بر اساس ویژگی‌های خاصی مانند اندازه، شکل، ساختار کریستالی و مورفولوژی تعریف می‌شوند. هنگامی که فلزات در ابعاد نانو تعریف می‌شوند، خواص منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند (Abbas et al. 2024). یکی از این فلزات که در طی سال‌های اخیر در حوزه فناوری نانو مورد توجه قرار گرفته است، فلز نقره می‌باشد. نقره به دلیل خواص فلزی آن مانند رسانایی در صنایع مختلف و همچنین،

به دلیل اثر ضد میکروبی آن در علم پزشکی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ramirez et al. 2022).

تولید و استفاده از نانوذرات نقره (AgNPs) در محصولات صنعتی و تجاری در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است. در طول تولید، ساخت، استفاده و دفع محصولات حاوی نانوذرات نقره، این مواد می‌توانند به طور اجتناب ناپذیری در محیط آزاد (Radkhah and Eagderi, 2023). علاوه بر این، نانوذرات نقره همچنین می‌توانند به طور طبیعی در محیط از طریق فرآیندهای کاهش زیستی و شیمیایی حضور یابند (Yin et al. 2015). با توجه به تولید و کاربرد گسترده نانوذرات نقره در صنایع مختلف و افزایش انتشار این مواد به پیکره‌های آبی، بررسی اثرات زیست‌محیطی ناشی از رهائش نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبی و پیامدهای منفی آن بر موجودات آبی شامل فیتوپلانکتون‌ها، ژئوپلانکتون‌ها و علی‌الخصوص ماهیان از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است (Radkhah and Eagderi, 2022b). از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبی در قالب یک تحقیق مروری به اجرا درآمد. مجموعه اطلاعات ارائه شده در این مطالعه می‌تواند در جهت پایش اکوسیستم‌های آبی و جلوگیری از اثرات

جبران ناپذیر نانوذرات نقره بر موجودات آبی به ویژه ماهیان و همچنین، به منظور پیشگیری از انتقال این نانومواد سمی به بدن انسان از طریق زنجیره غذایی مورد توجه مدیران و سیاست‌گذاران بخش‌های مختلف کشور از جمله سازمان محیط زیست و وزارت بهداشت قرار گیرد.

۲- نانوذرات

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

۲-۱- نانوذرات مبتنی بر مواد آلی

نانوذرات مبتنی بر مواد آلی (ارگانیک) غیرخطرناک و دوستدار محیط زیست هستند. فریتین، لیپوزوم‌ها، میسل‌ها و دندریمرها، پلیمرها یا ذرات آلی در اندازه نانو هستند که پس از قرار گرفتن در معرض نور و گرما، حساسیت بالایی دارند. به دلیل این ویژگی‌های متمایز، نانوذرات مبتنی بر ارگانیک از نظر محققان جایگزین بسیار بهتری برای تحویل دارو هستند (Roy et al. 2023). پایداری، توانایی حمل دارو و ویژگی جذب یا به دام انداختن دارو، این مواد را به واسطه‌هایی کارآمد و بالقوه برای تحویل مواد فعال دارو تبدیل می‌کند. این نانوذرات مورفولوژی، اندازه، شکل و ترکیب سطحی خاصی

دارند. نانوذرات ارگانیک به منظور تزریق مواد فعال در سیستم دارورسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kumari et al. 2014).

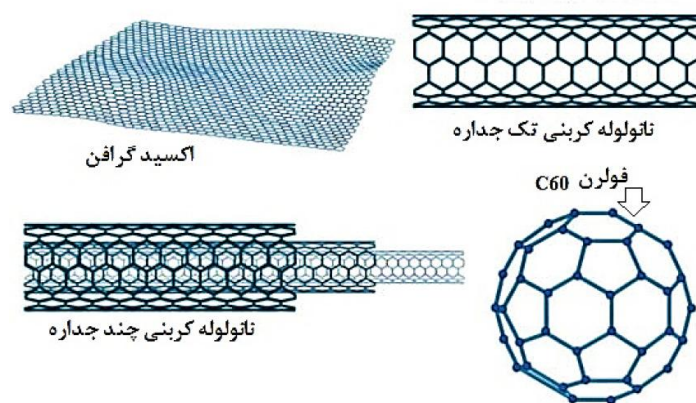
۲-۲- نانوذرات مبتنی بر کربن

کربن یکی از فراوان‌ترین مواد معدنی روی زمین است. این ماده یکی از اجزای مهم در تعداد زیادی از دُرشت مولکول‌ها از جمله قندها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و غیره می‌باشد که برای زندگی ضروری هستند. کربن خالص به اشکال مختلفی مانند آلوتروپ وجود دارد. شناخته شده‌ترین آلوتروپ‌های کربن که به شکل کریستالی و طبیعی هستند شامل الماس و گرافیت می‌باشند (Holmannova et al. 2022). آلوتروپ‌های کربن به صورت آمورف نیز می‌توان به زغال سنگ و زغال چوب اشاره کرد. امروزه، از خواص خارق‌العاده کربن در ساخت بسیاری از نانومواد استفاده می‌شود. اولین نانوذرات کربن (Carbon Nanoparticles, CNPs) در دهه ۱۹۸۰ کشف شد (Kroto, 1985). این نانوذرات طیف وسیعی از ساختار کربن را نشان می‌دهند که از جمله آن‌ها می‌توان به نانوذرات کربن آمورف (ذرات کربن فوق ریز، نانوذرات کربن و نقاط کربن) و نانومواد کربن (sp² فولرن، نانولوله‌های کربنی، گرافن، نقاط کوانتومی گرافن) اشاره کرد (Holmannova et al. 2022).

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

(Choudhary et al. 2014). یکی از نانوذرات کربن مورد مطالعه، گرافن است که والد ساختاری چندین آلوتروپ کربن (گرافنوئیدها)، از جمله نانورینگ‌ها، نانولوله‌های تک، دو و چندجداره، گرافیت، الیاف کربن و گرافین می‌باشد (Lu and Li, 2013; Holmannova et al. 2022). (شکل ۱).

نانوذرات کربن (CNPs) از کربن خالص تشکیل می‌شوند، از این‌رو، پایداری بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی و خواص مکانیکی برجسته‌ای (استحکام و چقرمگی فوق العاده) دارند و با سمیت پایین، بسیار زیست‌سازگار هستند. علاوه بر این، نانوذرات کربن بسیار آب‌گریز می‌باشند



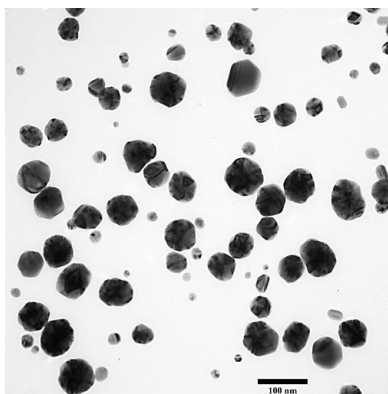
شکل ۱- انواع اصلی نانوذرات کربنی (Holmannova et al. 2022)

روی سطح، شکل استوانه‌ای و کُروی، رنگ، ساختارهای بی‌شکل و بلوری، دارای خواص منحصر به فردی هستند. لازم به ذکر است که خواص نانوذرات تحت تاثیر عوامل محیطی از جمله هوا، گرما، نور خورشید و رطوبت تغییر می‌یابند (Abbas et al. 2024).

در ادامه، سنتز نانوذرات نقره (شکل ۲) به عنوان یکی از نانوذرات مبتنی بر مواد معدنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳- نانوذرات مبتنی بر مواد معدنی

نانوذراتی که در ترکیب خود اتم کربن ندارند، مانند اکسید فلزی و ذرات با اندازه نانو مبتنی بر فلز، به عنوان 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 منبسط شده، اندازه منافذ، چگالی بار



شکل ۲- نمونه‌ای از تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscope, TEM) از نانوذرات نقره. قطر نانوذرات حدوداً ۸۰ نانومتر و نوار مقیاس نشان‌دهنده ۱۰۰ نانومتر می‌باشد (NISE Network, 2016).

پایین و مصرف انرژی بالا، آلودگی با حلال و عدم توزیع یکنواخت اشاره کرد (Nyabadza et al. 2023).

۳- سنتز نانوذرات نقره

۳-۱- روش‌های فیزیکی و شیمیایی

روش‌های شیمیایی از آب یا حلال‌های آلی برای تهیه نانوذرات نقره استفاده می‌کنند. این فرآیند معمولاً از سه جزء اصلی مانند پیش‌سازهای فلزی، عوامل کاهنده و عوامل تثبیت‌کننده استفاده می‌کند (Duman et al. 2024). اساساً کاهش نمک‌های نقره شامل دو مرحله (۱) هسته‌زایی و (۲) رشد بعدی است. به‌طور کلی، نانومواد نقره را می‌توان با دو روش به دست آورد، که به عنوان روش‌های «بالا به پایین» و «پایین به بالا» طبقه‌بندی می‌شوند (Duman et al. 2024). روش «بالا به پایین» آسیاب مکانیکی فلزات حجیم با تثبیت بعدی با استفاده از عوامل محافظ کلوئیدی است. روش‌های «پایین به بالا» شامل احیای شیمیایی، روش‌های الکتروشیمیایی و تجزیه

به‌طور کلی سنتز نانوذرات با استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی انجام می‌گیرد (Xu et al. 2020; Radkhah and Eagderi, 2023; Duman et al. 2024) (شکل ۲). در روش‌های فیزیکی، نانوذرات با تبخیر-تراکم با استفاده از یک کوره لوله‌ای در فشار اتمسفر تهیه می‌شوند (Iravani et al. 2014). روش‌های فیزیکی مرسوم از جمله تخلیه جرقه و تجزیه در اثر حرارت برای سنتز نانوذرات نقره استفاده می‌شوند (Zhang et al. 2016). از مزایای روش‌های فیزیکی می‌توان به سرعت، تشعشع مورد استفاده به‌عنوان عوامل کاهنده و عدم دخالت مواد شیمیایی خطرناک اشاره کرد (Duman et al. 2024)، اما از نکات منفی آن می‌توان به بازده

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

۳-۲- روش زیستی (رویکرد شیمی سبز)

برای غلبه بر کاستی‌های ناشی از روش‌های شیمیایی، روش‌های زیستی به‌عنوان گزینه‌های قابل‌اجرا برای سنتز نانوذرات نقره شناخته شده‌اند (Xu et al. 2020; Duman et al. 2024). اخیراً، سنتز نانوذرات با از طریق زیستی، رویکردهای ساده، مقرون‌به‌صرفه، قابل‌اعتماد و سازگار با محیط‌زیست نشان داده شده است و توجه زیادی به تولید نانوذرات نقره با بازده بالا در اندازه‌های تعریف‌شده با استفاده از سیستم‌های زیستی مختلف از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و گیاهان معطوف شده است (Zhang et al. 2016).

فعالیت زیستی نانوذرات نقره به مورفولوژی و ساختار نانوذرات نقره بستگی دارد که توسط اندازه و شکل ذرات کنترل می‌شود (Radkhah and Sadeghinejad Masouleh, 2021). تا آنجایی که به اندازه و شکل مربوط می‌شود، به‌نظر می‌رسد که نانوذرات با اندازه کوچک‌تر دارای خواص برتر و موثرتری هستند (Zhang et al. 2016; Radkhah and Sadeghinejad Masouleh, 2021). اگرچه بسیاری از تحقیقات با موفقیت نانوذرات نقره را با دامنه‌های شکل و اندازه متفاوت سنتز کردند، اما هنوز محدودیت‌های خاصی دارند. برای دستیابی به کنترل مورفولوژی و ساختار، مقدار زیادی از عامل احیاءکننده مانند بوروهیدرید سدیم (NaBH_4) برای سنتز

صوتی است. بهترین مزیت روش‌های شیمیایی بر خلاف روش‌های فیزیکی که بازده پایینی دارند، عملکرد بالا است. روش‌های فوق‌بسیار گران هستند. علاوه بر این، مواد مورد استفاده برای سنتز نقره نانوذرات، مانند سیترات، بوروهیدرید، تیو گلیسرول و ۲- مرکاپتواتانول سمی و خطرناک هستند (Abbas et al. 2024; Duman et al. 2024). جدای از این معایب، ذرات تولیدشده خلوص مورد انتظار را ندارند، زیرا سطوح آن‌ها با مواد شیمیایی رسوب داده شده است. همچنین تهیه نانوذرات نقره با اندازه مشخص بسیار دشوار است و نیاز به گام دیگری برای جلوگیری از تجمع ذرات دارد. علاوه بر این، در طول فرآیند سنتز، بسیاری از محصولات جانبی سمی و خطرناک تولید می‌شوند. روش‌های شیمیایی از تکنیک‌هایی مانند سنتز کرایوشیمیایی، فرسایش لیزری، لیتوگرافی، احیای الکتروشیمیایی، تابش لیزر، تجزیه سونو، تجزیه حرارتی و احیای شیمیایی استفاده می‌کنند (Cormier et al. 2006; Zhang et al. 2016). مزیت سنتز شیمیایی نانوذرات سهولت تولید، هزینه پایین و بازده بالا است. با این حال، استفاده از عوامل کاهش‌دهنده شیمیایی برای موجودات زنده مضر است (Zhang et al. 2016).

کلوئیدهای نقره به صورت یکنواخت استفاده می شود. در مقایسه با روش های شیمیایی، روش های زیستی با بهینه سازی روش های سنتز شامل میزان پیش سازها، دما، pH و میزان عوامل کاهش دهنده و تثبیت کننده، سهولت بیشتری در کنترل شکل، اندازه و توزیع نانوذرات تولیدی دارند (Zhang et al. 2016; Duman et al. 2024).

۴- کاربرد نانوذرات نقره در سیستم های آبی پروری

امروزه پرورش آبزیان با چالش های متعددی روبه رو است که می تواند به طور مستقیم بر محیط زیست تأثیر بگذارد. از جمله مهم ترین چالش های مطرح در این زمینه می توان به مصرف نکردن خوراک توسط آبزیان، انباشت تولیدات دفعی (مدفوع) و استفاده از محصولات شیمیایی، داروها و آنتی بیوتیک ها اشاره کرد که مقادیر زیادی از ترکیبات سمی و خطرناک را در طول تولید آبزیان ایجاد می کنند که در نهایت می توانند به محیط پیرامون این سیستم های تولیدی رها شوند (Radkhah and Eagderi, 2019 and 2020). در سیستم های آبی پروری، کیفیت پایین آب به دلیل تجمع ترکیبات سمی از جمله آمونیاک، نیتريت و سولفید هیدروژن، همراه با اکسیژن محلول پایین، رشد جلبک های مضر و گسترش باکتری ها، ویروس ها و انگل های مختلف می تواند

سلامت آبزیان را از طریق عفونت های بیماری زا تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به این موضوع، بهبود کیفیت آب در سیستم های آبی پروری امری مهم و کلیدی تلقی می شود (Yusoff et al. 2024). در حال حاضر، بیشترین روشی که برای مدت طولانی به منظور بهبود کیفیت آب استفاده می شود، تغییر مداوم آب حوضچه ها با آب جدید و تازه می باشد. در این شیوه غیر صحیح به مقادیر زیادی آب نیاز است که این منبع روز به روز در سراسر جهان کاهش می یابد. در این شرایط، حجم آب لازم برای سیستم های آبی پروری با مقیاس کوچک یا متوسط می تواند به چند صد متر مکعب در روز برسد (Radkhah and Eagderi, 2019). در این زمینه، فناوری نانو به راه حل های نوآورانه ای برای ضد عفونی آب با استفاده از نانوذرات نقره و همچنین، حذف مواد آلی و ضایعات با استفاده از نانوذرات دست یافت. در تحقیقات اخیر، نقش نانوذرات نقره (AgNPs) در گندزدایی آب، اجتناب از حضور باکتری ها و پاتوژن های ویروسی مطالعه شده است که نتایج مثبتی نیز در بر دارد (Radkhah et al. 2020). با این حال، در کنار نقش مهم نانوذرات نقره در گندزدایی سیستم های آبی پروری نباید از اثرات زیست محیطی و سمیت ناشی از این مواد برای موجودات آبی غفلت کرد (Radkhah and Sadeghinejad, 2021). با انتشار نانوذرات نقره در

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

سیستم‌های آبی‌پروری، امکان تجمع و انباشته شدن این مواد در بدن موجودات آبی به‌ویژه ماهیان که به‌طور عمده مورد مصرف انسان قرار می‌گیرند، وجود دارد. از این رو، انباشته شدن نانوذرات نقره در پیکره بدن ماهیان ممکن است سبب انتقال این نانومواد به بدن انسان شود و در نهایت، مشکلات مختلفی برای سلامت انسان ایجاد کند.

۵- انتشار نانوذرات در محیط

در طول تولید، ساخت، استفاده و دفع محصولات حاوی نانوذرات نقره، این مواد دیر یا زود وارد محیط می‌شوند. برخی از پژوهشگران از قبیل گاتاسچالک و نواک (۲۰۱۱) تخمین زدند که از ۰ تا ۲ درصد نانوذرات تولید شده در محیط آزاد می‌شوند. فعالیت‌هایی از قبیل نمونه‌برداری برای کنترل کیفیت، نشست مواد از داخل بسته‌بندی‌ها و حوادث ایجاد شده در حین حمل و نقل نیز می‌تواند منجر به انتشار غیرعمدی نانوذرات نقره شود (John et al. 2017).

نانوذرات نقره به‌طور گسترده در زندگی روزمره ما استفاده می‌شوند. آن‌ها به اسپری‌های ضد عفونی‌کننده اضافه می‌شوند، در جوراب‌های مقاوم در برابر بو، رنگ‌های فضای باز، پلاستیک‌های ضد میکروبی و منسوجات گنجانده می‌شوند. شستشوی مکرر، سایش مکانیکی و

فرسودگی فیزیکوشیمیایی مواد می‌تواند باعث فرار نانوذرات نقره به محیط طبیعی شود (Abbas et al. 2024). بیشتر نانوذرات نقره ممکن است در طول استفاده آزاد شوند. مقدار و سطح نقره آزاد شده به طول عمر، استفاده از مواد و نحوه جاسازی نانوذرات نقره در محصولات بستگی دارد. به‌طور کلی، نانوذرات نقره اضافه شده در محصولات مایع مانند اسپری‌ها و ضد عفونی‌کننده‌ها خیلی راحت و سریع به اتمسفر منتشر می‌شوند، در حالی که نانوذرات نقره موجود در بستر جامد مانند منسوجات به آرامی انتشار می‌یابند (Ferdous and Nemmar, 2020). روی و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که پلاستیک‌ها و منسوجات تا ۱۵ درصد از کل نقره آزاد شده در آب اتحادیه اروپا را در سال ۲۰۲۲ تشکیل می‌دهند.

در برخی از تحقیقات گزارش شده است که لجن حاصل از فاضلاب تصفیه نشده به عنوان کود کشاورزی استفاده می‌شود و در محل‌های دفن زباله، دفع می‌شود (Buta et al. 2021). در نتیجه، نانوذرات نقره مجدداً وارد سیستم زمینی می‌شوند یا پس از استفاده در مزرعه یا دفن زباله، در زیر خاک و آب‌های زیرزمینی شسته می‌شوند. موارد ذکر شده، روند انتشار نانوذرات مهندسی شده مانند نانوذرات نقره را در محیط نشان می‌دهد (Mahdi et al. 2018).

۶- ورود نانوذرات نقره به بدن موجودات

آبزی

نانوذرات نقره از دو طریق می‌توانند وارد بدن موجودات آبزی شوند. این مواد مستقیماً از طریق آب یا به واسطه غذا وارد بدن می‌شوند. نانوذرات نقره با توجه به اندازه کوچک که دارند، به راحتی می‌توانند به موانع زیستی مختلف (مانند آبشش‌ها یا سایر اپیتلیوم-های سطحی) نفوذ کرده و وارد بدن شوند. نانوذرات نقره میکروسکوپی می‌توانند به غشای نیمه‌تراوای باکتری‌ها و قارچ‌ها، دیواره سلولی فیتوپلانکتون، کوتیکول موجود در خارج از بدن زئوپلانکتون یا آبشش‌ها و اپیتلیوم روده حیوانات بزرگ آبزی نفوذ می‌شود. بنابراین، نانوذرات نقره در سطوح مختلف تغذیه‌ای وارد بدن موجودات زنده می‌شوند. نانوذرات نقره پس از ورود به درون بدن، در بدن تجمع می‌یابند یا در طی فرآیند خاصی دفع می‌شوند (Banu et al. 2021). هر گاه نانوذرات نقره در ارگان‌های انباشته شوند، غلظت آن‌ها در زنجیره غذایی افزایش یافته و سمیت بیشتری نشان می‌دهند.

۷- سمیت نانوذرات نقره بر موجودات

آبزی

نانوذرات نقره (AgNPs) می‌توانند یون‌های نقره را با شکستن غشای سلولی برای ورود به داخل سلول آزاد کنند. یون‌های نقره که به داخل سلول وارد می‌شوند می‌توانند تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را القا کنند و باعث ایجاد تنش اکسیداتیو در داخل سلول و آسیب به غشای سلولی و اندامک‌ها (میتوکندری، کلروپلاست و لیزوزوم) شوند (Mo et al. 2022). لازم به ذکر است تنش اکسیداتیو پدیده‌ای است که به دلیل عدم تعادل بین تولید و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، رادیکال‌های آزاد و آنتی‌اکسیدان‌ها در سلول‌ها و بافت‌ها و توانایی یک سیستم زیستی برای سم‌زدایی این محصولات ایجاد می‌شود (Pizzino et al. 2017). علاوه بر آنچه گفته شد، نانوذرات نقره می‌توانند جهش‌های دی‌ان‌ا را القا کنند که منجر به ناهنجاری‌های کروموزومی و دنا توره شدن پروتئین می‌شود و باعث اختلال در عملکرد سلول و آسیب به ارگان‌های می‌شود (Du et al. 2018; Kang et al. 2022).

نانوذرات نقره پس از ورود به موجودات مختلف رفتار متفاوتی دارند و اثرات سمی آن‌ها روی همه موجودات یکسان نیست. همچنین سمیت نانوذرات نقره بین موجودات ساکن آب شیرین و دریا متفاوت است (Radkhah and

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

2021). در نتیجه، سمیت نانوذرات نقره روی باکتری‌های گرم مثبت کمتر است (More et al. 2023). یک مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که نانوذرات نقره کوچکتر از ۵ نانومتر می‌توانند رشد باکتری‌های نیتروژنیک کننده را کاهش دهند (Banu et al. 2021).

۸-۲- فیتوپلانکتون‌ها

زنجیره غذایی اکوسیستم‌های آبی با فیتوپلانکتون‌ها آغاز می‌شود. بنابراین، اثرات مضر نانوذرات نقره بر فیتوپلانکتون‌ها تأثیر قابل توجهی بر کل اکوسیستم آبی خواهد داشت. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که ظرف یک تا دو ساعت پس از تماس نانوذرات نقره با فیتوپلانکتون‌ها، این ذرات می‌توانند مورفولوژی سلول‌های فیتوپلانکتون را تغییر دهند، استرس اکسیداتیو را افزایش دهند، آسیب غشایی را افزایش دهند، تعداد تیلاکوئید را کاهش دهند، محتوای کلروفیل را کاهش دهند، سرعت فتوسنتز را کاهش دهند، پراکسیداسیون لیپیدی را افزایش دهند و زنجیره انتقال الکترون را مهار کنند. با انجام این مراحل، مختل شدن رشد و مرگ و میر نیز افزایش می‌یابد (Tsiola et al. 2017).

ناوارو و همکاران (۲۰۰۸) در آزمایشی که بر روی *Chlamydomonas reinhardtii* انجام شد، بیان کردند که نانوذرات نقره سرعت فتوسنتز خود

(Sadeghinejad Masouleh, 2021)، به همین دلیل است که سمیت نانوذرات نقره روی هر موجود زنده باید به‌طور جداگانه مورد بحث قرار گیرد تا درک جامعی از میزان و شدت سمیت آن به‌دست آید. در این بخش، تحقیقات انجام گرفته پیرامون سمیت نانوذرات نقره در برخی از گونه‌های آبی مورد اشاره قرار می‌گیرد.

۸-۱- اثرات نانوذرات نقره بر موجودات آبی

۸-۱-۱- باکتری‌ها

در اکوسیستم‌های آبی، باکتری‌ها عمدتاً به‌عنوان تجزیه‌کننده عمل می‌کنند و نقش مهمی در چرخه مواد مغذی ایفا می‌نمایند (Radkhah et al. 2023). نانوذرات نقره با گروه‌های تیول پروتئین‌های مختلف باکتری برهم‌کنش می‌کنند تا آن‌ها را غیرفعال نمایند. نانوذرات نقره نفوذپذیری غشا را تغییر داده و زنجیره انتقال الکترون باکتری‌ها را مختل می‌کنند. همچنین نانوذرات نقره نفوذپذیری غشای باکتری و همانندسازی دی‌ان‌ا باکتری را مختل می‌نمایند (Roy et al. 2023; Barros et al. 2024). تاکنون، تحقیقات مختلفی پیرامون اثرات سمی نانوذرات نقره بر روی باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی انجام گرفته است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که باکتری‌های گرم منفی نسبت به باکتری‌های گرم مثبت حساسیت بیشتری به یون‌های نقره دارند (Banu et al.

۸۲

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

نقره را چندین بار به سطح تغذیه‌ای بعدی در زنجیره غذایی انتقال می‌دهد. نتایج مشابهی نیز در مورد کک آبی (*Moina macrocopa*) و لارو کرم خونی (*Chironomus sp.*) گزارش شده است (Yoo-Iam et al. 2014). در آزمایشی که توسط آرولواسو و همکاران (۲۰۱۴) پیرامون اثرات منفی نانوذرات نقره روی ناپلی آرتیمیا انجام شد، مشخص گردید که این نانومواد باعث آسیب دی‌ان‌ا، تغییر تفریخ و حتی مرگ در ناپلی آرتیمیا می‌شوند. دمارچی و همکاران (۲۰۲۰) در آزمایش صورت گرفته بر روی *A. salina* نشان دادند که نانوذرات نقره اندکی تنش اکسیداتیو ارگانسیم را افزایش می‌دهد، مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی را تغییر می‌دهد. علاوه بر این، نانوذرات نقره در روده و سایر بخش‌های بدن ارگانسیم انباشته می‌شود، اما باعث مرگ و میر این گونه از زئوپلانکتون‌ها نمی‌شود.

۸-۵- جانوران آبی در رده‌های بالاتر شبکه

غذایی

در اکوسیستم‌های آبی، کرم‌های حلقوی، بندپایان، نرم تنان و ماهیان سطوح تغذیه مصرف‌کننده اولیه، ثانویه و سوم را اشغال می‌کنند. این موجودات از فیتوپلانکتون‌ها، ماکروفیت‌ها و زئوپلانکتون‌ها تغذیه می‌کنند و از این طریق، انتقال هر ماده سمی به بدن پرندگان و پستانداران

می‌کند (Lomartire et al. 2021). دافنی نمونه‌ای از گروه‌های زئوپلانکتونی به‌شمار می‌رود که دانشمندان مختلف سمیت نانوذرات نقره را روی آن مورد آزمایش قرار داده‌اند. تحقیقات انجام شده نشان داده‌اند که نانوذرات نقره در غلظت‌های بسیار پایین می‌توانند باعث مهار رشد و سمیت مجدد در دافنی شوند (Lekamge et al. 2019). لازم به ذکر است که وجود نانوذرات نقره در غلظت‌های بالاتر می‌تواند حتی باعث مرگ دافنی شود (Newton et al. 2013). پژوهشگران مختلف به نقش فاکتورهای محیطی در میزان سمیت نانوذرات نقره روی دافنی تاکید داشتند و برخی از آن‌ها دریافتند که اگر مقدار مواد آلی طبیعی در آب زیاد باشد، سمیت نانوذرات نقره برای دافنی کاهش می‌یابد (Cupi et al. 2016). علاوه بر این، بر اساس مطالعات صورت گرفته، سمیت نانوذرات نقره بر روی دافنی نیز با افزایش میزان نور خورشید کاهش می‌یابد (Zhang et al. 2015). از سوی دیگر، اگر مقدار کربن آلی محلول در آب افزایش یابد، سمیت نانوذرات نقره بر روی دافنی افزایش می‌یابد (Pokhrel et al. 2013). نانوذرات نقره نه تنها به زئوپلانکتون‌ها آسیب می‌رسانند، بلکه به راحتی از طریق زئوپلانکتون‌ها به سطوح تغذیه‌ای بعدی نیز انتقال می‌یابند. بابایی و همکاران (۲۰۲۲) در تایید این موضوع اظهار داشتند که زئوپلانکتون *Artemia salina* نانوذرات

(*D. rerio*) آسیب بزنند و باعث مرگ و میر وابسته به دوز شوند. در غلظت‌های بالاتر، این نانوذرات می‌توانند باعث کاهش کیسه زرده در جنین ماهی گورخری شوند (Osborne et al. 2013). در ماهی گورخری بالغ نیز نانوذرات نقره انواع مختلفی از آسیب‌ها شامل اختلال در کانال‌های یونی سدیم-پتاسیم آبشش و تغییر در میکروبیوتای دستگاه گوارش را ایجاد می‌کنند (Katuli et al. 2014). در مطالعه‌ای که اخیر توسط سیدی و همکاران (۲۰۲۱) انجام گرفت، مشخص گردید که نانوذرات نقره باعث ایجاد سمیت در مغز، تخمک، کبد و بافت ماهیچه‌ای ماهی گورخری بالغ می‌شود و در نتیجه باعث تخریب آسان زنجیره‌های اسیدهای چرب غیراشباع و حتی بر سرعت تولید مثل می‌شود.

نانوذرات نقره در ماهی رهو (*Labeo rohita*) سلول‌های کبدی را تخریب می‌کنند، اجسام آپوپتوتیک را در کبد تشکیل می‌دهند، باعث نکروز و هیپرپلازی سلول‌های لایه‌ای آبشش می‌شوند، باعث آسیب دی‌ان‌ا می‌شوند (Khan et al. 2018). در ماهی کپور معمولی (*Cyprinus carpio*)، بیشترین آسیب ناشی از نانوذرات نقره روی روده و آبشش مشاهده شد. اسیدهای چرب غیراشباع امگا ۳ با زنجیره طولانی اکسید می‌شوند و در نتیجه، سیالیت غشاء کاهش می‌یابد که از عملکرد طبیعی فیزیولوژیکی آبشش‌ها جلوگیری

امکان‌پذیر می‌شود (Capa and Hutchings, 2021). بنابراین نقش موجودات مذکور در اکوسیستم آبی بسیار مهم است و بررسی اثر سمی نانوذرات نقره بر روی آن‌ها نیز بسیار حائز اهمیت است. در شکل ۳ اثرات سمی نانوذرات نقره در موجودات مختلف آبزی نشان داده شده است (Silva Brito et al. 2024).

در آزمایشی که بر روی کرم *Eudrilus eugeniae* انجام گرفت، محققان دریافتند که نانوذرات نقره با اندازه ۱۸۰ تا ۲۰۰ نانومتری باعث فیروز، رسوبات لیپوفوسین و اختلال در بافت روده این کرم خاکی می‌شوند (Samrot et al. 2018). در مطالعه‌ای که روی صدف *Dreissena bugensis* انجام شد، محققان دریافتند که نانوذرات نقره سینتیک استیل کولین استراز را تغییر می‌دهند و باعث تجمع پروتئین و لیپید می‌شوند (Auclair et al. 2022). ماهی گورخری (*Danio rerio*) یک مدل بسیار رایج برای مطالعات سم‌شناسی در سیستم‌های آبی است (Radkhah and Eagderi, 2021 and 2022c). آزمایش‌ها نشان داده‌اند که منافذ کوریونی در جنین‌های ماهی گورخری بزرگ هستند و به نانوذرات نقره اجازه می‌دهند به راحتی نفوذ کنند (Bambino and Chu, 2017).

نانوذرات نقره می‌توانند در غلظت‌های پایین به غشای کیسه زرده در جنین‌های ماهی گورخری

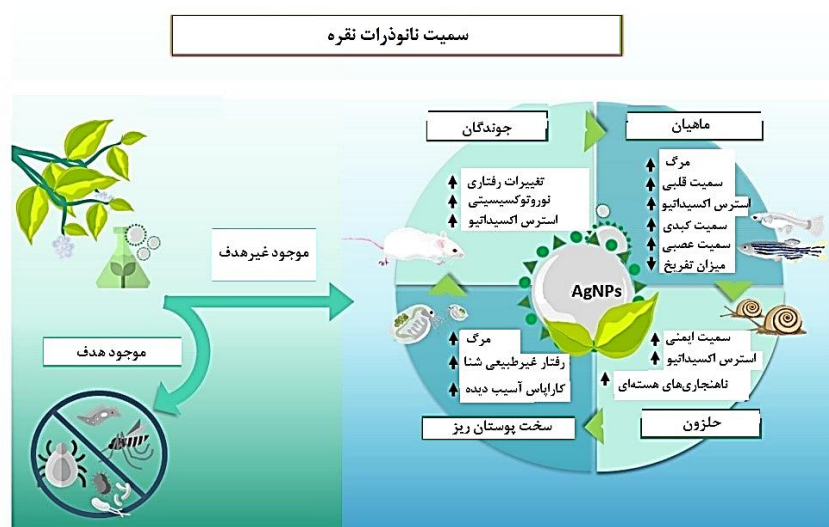
"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

همکاران (۲۰۲۲) اظهار داشتند که نانوذرات نقره موجود در ماهی تیلاپیا (*Oreochromis mossambicus*) باعث آسیب به بافت آبشش، افزایش تنش اکسیداتیو، افزایش فعالیت کربونیل پروتئین، ایجاد هیپرپلازی اپیتلیال و تلانژکتازی می‌شود.

۸-۶- سمیت نانوذرات نقره برای ماهیان

تاکنون سمیت یون نقره در بخش‌های مختلف گونه‌های ماهی آب شیرین مورد بررسی قرار گرفته است. یون‌های نقره در غلظت‌های پایین و در حالت محلول می‌توانند از طریق کانال Na^+ متصل به پروتون ATPase در غشای آپیکال آبشش‌ها به سلول‌های اپیتلیال شاخه‌ای برسند، به غشای قاعده‌ای جانبی آبشش برسند و پمپ سدیم/پتاسیم ($\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$) را مسدود کنند که بر تنظیم یونی یون‌های Cl^- و Na^+ در سراسر آبشش‌ها تأثیر می‌گذارد (Ferdous and Nemmar, 2020).

می‌کند و متعاقباً التهاب و آسیب لایه‌ای مشاهده می‌شود (Xiang et al. 2020). همچنین، بر طبق مطالعات انجام شده، افزایش سطح آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی با افزایش حساسیت به تشکیل تومور مرتبط است (Zalewska-Ziob et al. 2019). نانوذرات نقره موجود در فاضلاب شهری می‌تواند باعث التهاب و سرکوب سیستم ایمنی در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*) شود (Banu et al. 2021). استاسزوسکی و همکاران (۲۰۱۸) بیان داشتند که غلظت ۱۵/۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات نقره می‌تواند باعث سمیت سلولی، نکروز هسته و آسیب میتوکندری در سلول‌های کبدی ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان شود. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره به مقدار ۹/۸ میلی‌گرم در لیتر، مورفولوژی سلول‌های خون را در قزل‌آلای رنگین‌کمان تغییر داد، میزان گونه‌های اکسیژن فعال را افزایش داد و مسیرهای سیگنال‌دهی سلولی را تغییر داد (Shabrangharehdasht et al. 2020). سیبیا و

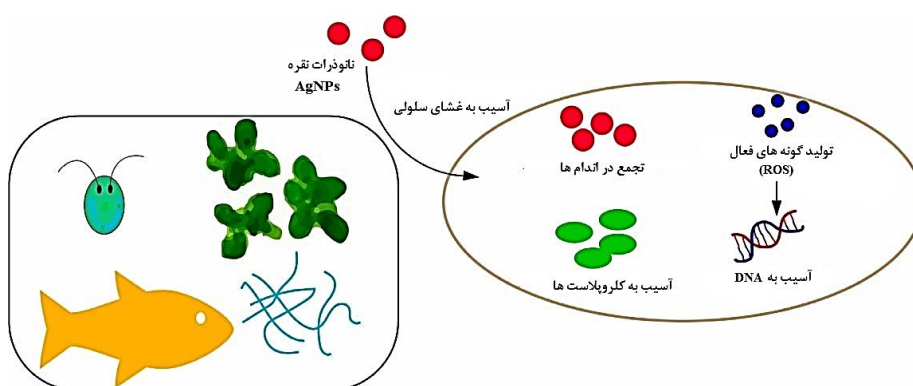


شکل ۳- اثرات سمی نانوذرات نقره در موجودات مختلف آبی (Silva Brito et al. 2024)

پایین اکسیژن و ایجاد تنش اکسیداتیو تأثیر بگذارند (شکل ۴). با این حال، در بین این مطالعات، آستانه‌ای که در آن چنین اثراتی رخ می‌دهد، حتی برای گونه‌های مشابه، متغیر است. چنین تنوعی می‌تواند انعکاس‌دهنده تفاوت در انتخاب شرایط تجربی و یا تفاوت در رفتار یا ویژگی‌های ذرات باشد که تعریف نشده است. به طور مثال، بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که دو گونه‌ی ماهی گورخری جوان (*D. rerio*) و مداکای ژاپنی (*Oryzias latipes*) نسبت به غلظت‌های مشابه نیترات نقره در مقایسه با نانوذرات نقره حساس‌تر هستند که این امر می‌تواند به تفاوت در ویژگی‌ها و رفتار نانوذرات ذکرشده مرتبط باشد (Roy et al. 2023).

اثرات ناشی از سمیت نانوذرات نقره در غلظت‌های زیاد (μM) می‌تواند متفاوت باشد و پیامدهای فیزیولوژیک مهمی مانند اسیدوز خون به همراه داشته باشد که در نهایت می‌تواند منجر به فروپاشی گردش خون و مرگ ماهی شود (Abbas et al. 2024). فقط تعداد کمی از مطالعات در داخل بدن اثرات نانوذرات نقره در ماهیان را بررسی کرده‌اند. به طور کلی، بررسی نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات نقره ۱۰ تا ۸۰ نانومتری بر رشد مراحل اولیه زندگی تأثیر می‌گذارند که شامل ناهنجاری‌های نخاعی، آریتمی قلبی و بقا می‌شود (Noga et al. 2023). این نانومواد همچنین می‌توانند در آبشش‌ها و بافت کبد تجمع یابند و بر توانایی ماهی برای مقابله با سطوح

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."



شکل ۴- سمیت نانوذرات نقره در موجودات آبی (Kang et al. 2023)

اختلافات مشاهده شده در نتایج و اثرات نانوذرات نقره روی بدن ماهیان می‌توانند بسته به گونه ماهی و شرایط آزمایش (دما، pH، زمان استقرار و غیره) متفاوت باشند.

در جدول ۱ جزئیات مربوط به اثرات منفی و کشنده نانوذرات نقره بر بدن ماهیان ارائه شده است. این جدول شامل نوع اثرات و مقادیر آماری مرتبط با مطالعات مختلف می‌باشد. بررسی یافته‌های ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که

جدول ۱- مروری بر یافته‌های آماری در مورد اثرات زیان‌بار نانوذرات نقره بر ماهیان

منبع	مقدار/آمار	توضیحات	نوع اثرات
Younas et al. 2022	کاهش ۳۰-۴۰ درصدی فعالیت ماهی در غلظت‌های بالای ۱۰-۵۰ میلی گرم در لیتر	نانوذرات نقره می‌توانند باعث کاهش سطح فعالیت و حرکات ماهی شوند	سمیت عمومی
Carrola et al. 2018	آسیب‌های بافتی مشهود در کبد در غلظت‌های حدوداً ۱۰ میلی گرم نقره در لیتر	ایجاد آسیب‌های بافتی در اندام‌هایی مانند کبد، کلیه و آرواره	تأثیر بر ساختار بافتی
Babaei et al. 2022	۵۰ درصد مرگ و میر در غلظت ۵۰ میلی گرم نقره در لیتر در مدت ۹۶ ساعت	مرگ و میر ماهیان بعد از قرار گرفتن در معرض نانوذرات نقره	مرگ و میر
Bilberg et al. 2011	کاهش ۴۰ درصد در فعالیت سلول‌های ایمنی در غلظت‌های ۲۰ میلی گرم در لیتر	کاهش پاسخ ایمنی و افزایش احتمال عفونت	تأثیر بر سیستم ایمنی
Younas et al. 2022	کاهش ۲۵-۳۰ درصد در میزان اکسیژن جذب شده در غلظت‌های ۱۰ میلی گرم در لیتر	اختلال در کارایی تنفس و جذب اکسیژن از آب	تأثیر بر سیستم تنفسی
Kalbassi et al. 2011	زمان واکنش به محرک‌ها افزایش یافته و میزان غذاخوردن ۲۰ درصد کاهش یافته است	تغییرات غیر طبیعی در رفتار مانند ناتوانی در شنا و غذا خوردن	تأثیر بر رفتار
Younas et al. 2022	کاهش ۱۵-۵۰ درصد در وزن و طول در پرورش ماهی در غلظت‌های ۵-۵۰ میلی گرم در لیتر	کاهش رشد و تکثیر در ماهیان در معرض نانوذرات نقره	تأثیر بر رشد و نمو

۹- مسیرهای تماس انسان با نانوذرات نقره

مسیرهای اصلی ورود نانوذرات به بدن انسان می تواند شامل مصرف خوراکی، استنشاق ریوی، تماس پوستی و مستقیماً در سیستم گردش خون از طریق تزریق داخل صفاقی یا داخل وریدی باشد (Gaillet and Rouanet, 2015; Ferdous and Nemmar, 2020). در شکل ۵ مسیرهای مختلف تماس انسان با نانوذرات نقره نشان داده شده است. از آنجایی که نانوذرات نقره به طور گسترده در محصولات مختلف خانگی و زیست پزشکی مورد استفاده قرار می گیرند (Xu et al. 2020)، بخش زیر مسیرهای بالقوه مختلف برای ورود این نانوذرات را مورد بحث قرار می دهد.

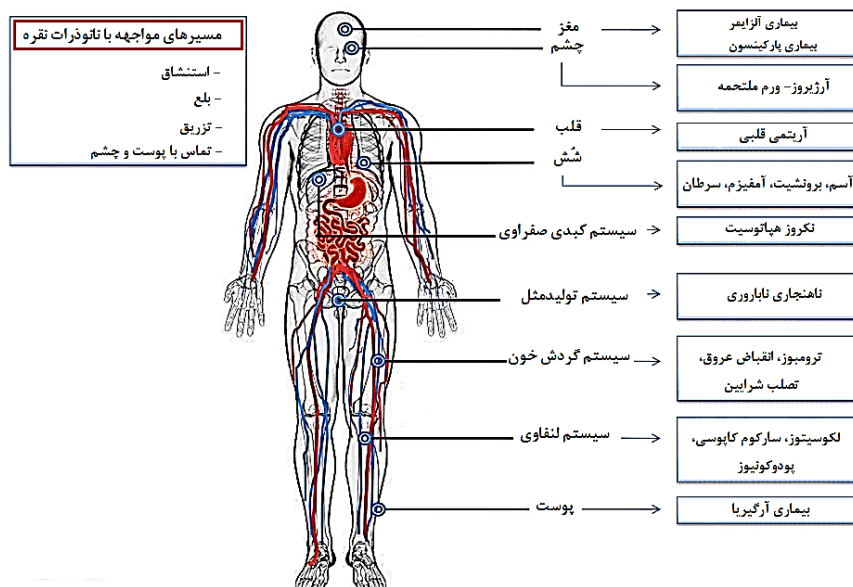
پس از قرار گرفتن در معرض نانوذرات نقره، این مواد قادر به القای التهاب و تنش اکسیداتیو در محل تماس هستند. علاوه بر این، آن هами توانند از موانع زیستی مختلف عبور کرده و وارد گردش خون شوند. نانوذرات نقره ای که به صورت داخل وریدی تجویز می شوند، مستقیماً به درون سیستم گردش خون راه پیدا می کنند. از آن زمان به بعد،

این نانومواد در اندام های مختلف توزیع می شوند و باعث ایجاد اثرات پاتوفیزیولوژیک خاص در اندام های بدن می شوند (Vidyasagar et al. 2023).

۹-۱- تماس از طریق تنفس (استنشاق ریوی)

انتشار نانوذرات نقره در محیط در طول ساخت، شستشو یا دفع محصولات، نانوذرات را قادر می سازد تا از طریق استنشاق وارد سیستم تنفسی انسان شوند. انتقال نانوذرات نقره از طریق تنفس به بدن انسان می تواند مسیرهای متنوعی داشته باشد. یکی از رایج ترین این مسیرها در تحقیقات مختلف از جمله فردوس و نمار (۲۰۲۰) مورد اشاره قرار گرفته است. این پژوهشگران گزارش دادند که استفاده از اسپری های مصرفی مبتنی بر فناوری نانو که حاوی نانوذرات نقره هستند، می توانند منجر به تولید ذرات معلق در هوا در ابعاد نانو و انتشار نانوذرات در نزدیکی منطقه تنفس انسان شوند.

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."



شکل ۵- طرح شماتیکی از مسیرهای ورود نانوذرات نقره به بدن انسان و سمیت احتمالی آن‌ها. نانوذرات نقره می‌توانند از طریق تماس پوستی، مصرف خوراکی، استنشاق ریوی و تزریق داخل وریدی، در معرض بدن انسان قرار گیرند (Vidyasagar et al. 2023)

۹-۲-تماس از طریق دهان (مصرف خوراکی)

خاص از بخش بسته‌بندی به درون مواد غذایی نفوذ کنند.

قرار گرفتن انسان در معرض استنشاق در طول تولید نیز می‌تواند در نهایت منجر به تماس انسان با نانوذرات نقره از طریق دهان شود. تخمین زده می‌شود که میزان مصرف روزانه نقره در انسان از طریق بلع حدود ۲۰ تا ۸۰ میکروگرم است (Korani et al. 2015). پس از مصرف، سد مخاطی دستگاه گوارش به عنوان یک مانع عمل می‌کند که به طور انتخابی باعث تخریب و جذب مواد مغذی مانند کربوهیدرات‌ها، پپتیدها و چربی‌ها می‌شود. نانوذرات می‌توانند بر روی لایه مخاطی عمل کنند، به جریان خون منتقل شوند و

در صنایع غذایی از نانوذرات نقره در بسته‌بندی و نگهداری به منظور افزایش ماندگاری و کیفیت مواد غذایی استفاده می‌شود. علاوه بر این، پساب‌های شهری و صنعتی وارد اکوسیستم آبی می‌شوند و در امتداد زنجیره‌های تغذیه‌ای تجمع می‌یابند. بنابراین، وجود نانوذرات نقره در مکمل‌های غذایی، آلودگی آب یا غذای ماهی و سایر موجودات آبی منابع بالقوه قرار گرفتن در معرض نانوذرات نقره را فراهم می‌کند (Jaswal and Gupta, 2023). مطالعات اخیر همچنین نشان داده‌اند که نانوذرات نقره گنجانده شده در بسته‌بندی مواد غذایی می‌توانند تحت شرایط

به طور مستقیم به سیستم گردش خون دسترسی پیدا می کنند (Vidyasagar et al. 2023). علاوه بر این، توسعه داروهای مبتنی بر نانوذرات نقره یا حامل های دارو می تواند ورود مستقیم این ذرات را به سیستم گردش خون انسان امکان پذیر سازد (Hsu et al. 2023).

۱۰- انتقال نانوذرات نقره از طریق مصرف ماهیان به بدن انسان و ایجاد سمیت

بررسی های صورت گرفته در سطح جهانی نشان داده است که مصرف خوراکی جانوران آبی به ویژه ماهیان موجب انتقال انواع آلودگی ها از جمله انتقال فلزات سنگین و نانوذرات سمی مانند نانوذرات نقره به بدن انسان شده است (Radkhah et al. 2022). در این بخش، اثرات سمی ناشی از ورود نانوذرات نقره به بدن انسان که به واسطه مصارف خوراکی از جمله مصرف ماهیان آلوده صورت گرفته است، مورد بحث قرار می گیرد. انتقال نانوذرات نقره از طریق مصرف ماهیان آلوده به بدن انسان می تواند موجب بروز سمیت های گوناگون در بخش های مختلف بدن انسان از جمله دستگاه گوارش، ریه، کبد، کلیه، سیستم عصبی، سیستم تولیدمثل و رشد، سیستم ایمنی و بخش ژنتیک شود (Zhang et al. 2022). در شکل ۶ طرح شماتیکی از انواع سمیت نانوذرات نقره در

در نتیجه با عبور از اپیتلیوم به هر اندامی دسترسی پیدا کنند. گزارش های واصله نشان داده است که جذب نانوذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر عمدتاً توسط اندوسیتوز در سلول های اپیتلیال صورت می گیرد (Barua and Mitragotri, 2014; Korani et al. 2015). در داخل انتروسیست ها، نانوذرات نقره می توانند تنش اکسیداتیو، آسیب دی ان ا و التهاب را تحریک کنند (Ferdous and Nemmar, 2020; Vidyasagar et al. 2023).

۹-۳- تماس از طریق پوست

قرار گرفتن انسان در معرض نانوذرات نقره ممکن است از طریق پوست، بزرگ ترین عضو بدن و اولین خط دفاعی بین محیط خارجی و محیط داخلی صورت گیرد (Korani et al. 2015). پتانسیل نانوذرات جامد برای نفوذ به پوست سالم و التهاب یافته انسان و همچنین توانایی آن ها برای انتشار در ساختارهای زیرین به خوبی در پژوهش های مختلف نشان داده شده است. در این زمینه، استفاده از نانوذرات نقره در تولید لوازم آرایشی تا ۲۰ درصد برآورد شده (Ferdous and Nemmar, 2020). علاوه بر لوازم آرایشی، تماس پوستی با پانسمان زخم و منسوجات ضدباکتری نیز انتشار زیادی از نانوذرات نقره را نشان داده است. در شرایط آزمایشگاهی، تزریق داخل وریدی، داخل رحمی و زیرجلدی، نانوذرات نقره

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

بدن انسان و سیستم‌ها و اندام‌های مورد هدف ارائه شده است.

۱۰-۱-سمیت ریوی

مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که انواع مختلف نانوذرات نقره وابسته به دوزی که دارند، میزان سمیت خود را نسبت به رده‌های سلولی ریه نشان می‌دهند (González-Vega et al. 2022) و بیان ارتباط بین سلولی اتصال شکاف (GJIC) و کانکسین ۴۳ (Cx43) در رده سلولی آدنوکارسینوم ریه انسان A549 افزایش یافت و محققین نشان دادند که Cx43 و GJIC می‌توانند تحت تاثیر نانوذرات نقره باعث ایجاد سمیت در ریه شوند (Deng et al. 2010). تاکنون، در بسیاری از مطالعاتی که با هدف بررسی تاثیرات منفی و سمیت نانوذرات نقره روی بدن انسان صورت گرفته است، از مدل‌های جانوری مانند موش آزمایشگاهی و غیره برای انجام آزمایش‌هایشان استفاده کرده‌اند (Radkhah and Eagderi, 2022c). به عنوان مثال، در یک مطالعه درون‌تنی که بر روی موش‌های آزمایشگاهی نر و ماده انجام شد، عملکرد ریه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که موش‌های ماده توانستند به تدریج از التهاب ریه بهبود یابند (Kim et al. 2008)، در حالی که موش‌های نر در گروه دوز بالا التهاب مداوم را در طول ۱۲ هفته نشان دادند. قرار گرفتن

در معرض حاد و تحت حاد با نانوذرات نقره باعث ایجاد فیبروز ریوی خفیف و التهاب می‌شود و انتشار مداوم این نانوذرات می‌تواند منجر به پاسخ‌های آسیب تحت مزمن شود (Ferdous and Nemmar, 2020). مطالعات جانوری نشان داد که تنش اکسیداتیو در این فرآیند دخیل است و باعث آسیب بافت ریه می‌شود (Bezerra et al. 2023). یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند بر روی سمیت ریه توسط نانوذرات نقره تاثیر بگذارد، سرعت آزادسازی یون نقره داخل سلولی است. تحقیقات انجام شده با اندازه‌های مختلف نانوذرات نقره نشان داده است که نانوذرات کوچکتر (۱۰ نانومتر) ذرات سمی بیشتری در سلول‌های ریه انسان نسبت به نانوذرات بزرگتر ایجاد می‌کنند (Gliga et al. 2014). در مجموع، عوامل متعددی می‌توانند بر سمیت ریه توسط نانوذرات نقره تاثیر بگذارند که از جمله این عوامل می‌توان به فراهمی زیستی، اندازه و سطح پوشش و همچنین دوره مواجهه یا تماس نانوذرات نقره اشاره کرد (Korani et al. 2015; Radkhah and Sadeghinejad Masouleh, 2021).

۱۰-۲-سمیت دستگاه گوارش

سیستم گوارش نشان‌دهنده مسیر مهمی برای ورود نانوذرات نقره به بدن انسان می‌باشد. بر طبق مطالعات انجام شده، تجویز خوراکی نانوذرات

۱۰-۳-سمیت کبدی

مطالعات آزمایشگاهی روی سلول‌های کبد انسان نشان داد که نانوذرات نقره حداکثر سطح سمیت سلولی را در بخش کبد برانگیختند. کبد ارگان و هدف اصلی سم‌زدایی و سمیت شیمیایی است (Zhang et al. 2022). تحقیقات نشان داده شده است که نانوذرات نقره پس از تماس با انسان از طریق تنفس می‌توانند در کبد تجمع یابند (Radkhah et al. 2020, 2022). بر طبق مطالعه تیواری و همکاران (۲۰۱۱)، بیومارکرهای کبدی مانند آسپاراتات آمینو ترانسفراز (AST)، آلانین آمینوترانسفراز (ALT) و گاما-گلاکتوزیل ترانسفراز و پارامترهای هیستوپاتولوژیک پس از تجویز نانوذرات نقره افزایش یافت. بر این اساس، فعالیت چندین آنزیم سیتوکروم (P450 (CYP مانند CYP1A، CYP2C، CYP2D، CYP2E1 و CYP3A به واسطه قرار گرفتن در معرض نانوذرات نقره مهار گردید (Christen and Fent, 2012). به نظر می‌رسد که نانوذرات نقره قادر به القای تنش اکسیداتیو و آسیب سلولی و آپوپتوز در سلول‌های کبد انسان از طریق مکانیسم‌های مختلف هستند (Piao et al. 2011). جی و همکاران (۲۰۰۷) واکوئولاسیون سیتوپلاسمی و نکروز کبدی را پس از قرار گرفتن در معرض نانوذرات نقره گزارش کردند. محققان مختلف از قبیل کاواتا و همکاران (۲۰۰۹) اظهار داشتند که

نقره اثرات سمی از خود نشان می‌دهد (Xu et al. 2020). در مطالعه جونگ و همکاران (۲۰۱۰)، افزایش وابسته به دوز نانوذرات نقره در لامینا پروپریا (یک لایه نازک از بافت همبند است که در زیر سطح اکثر بافت‌هایی مانند دهان، گلو و دستگاه گوارش که در معرض محیط خارجی قرار دارند، یافت می‌شود) در هر دو روده کوچک و بزرگ، در نوک پُرزهای فوقانی و سطح کولون گزارش شد. در یک مطالعه حیوانی دیگر که توسط ملنیک و همکاران (۲۰۱۳) انجام گرفت، نانوذرات نقره با ایزوتوپ رادیواکتیو نقره برچسب گذاری شدند و به صورت داخل معده به موش های ماده باردار تزریق شدند. سپس تجمع نانوذرات نقره در جنین موش بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نانوذرات نقره می‌توانند از طریق جفت به بدن جنین نفوذ کرده و در کبد، خون، مغز و عضلات جنین تجمع یابند. نفوذ نانوذرات نقره از حلقه روده به سایر اندام‌ها نیز گزارش شده است (Korani et al. 2015). نانوذرات نقره می‌توانند از طریق دستگاه گوارش به بدن انسان نفوذ کرده و در سایر اندام‌ها تجمع یابند. اگرچه اطلاعات ارائه شده در نوع خود قابل توجه است، اما با این حال، برای اثبات اثرات موضعی و سیستمیک نانوذرات نقره بر سیستم گوارش، داده‌های انسانی و تجربی بیشتری مورد نیاز است.

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

غلظت سمی نانوذرات نقره با القای آپوپتوز و افزایش تشکیل میکرونوکلئوس و آسیب کروموزومی مرتبط می‌باشد.

۱۰-۴-سمیت کلیوی

از آنجایی که کلیه‌ها ارگان اصلی حذف دارو هستند، به همان اندازه می‌توانند اهداف بالقوه سمیت برای نانوذرات نقره نیز باشند. نانوذرات نقره می‌توانند وابسته به دوزشان در کلیه‌ها تجمع یابند. برخی از وسایل پزشکی که دارای نانوذرات نقره هستند، می‌توانند یون‌های نقره را به تدریج آزاد کنند. یون‌های آزاد شده سپس می‌توانند به گردش خون منتقل شده و در کلیه‌ها تجمع یابند (Gaillet and Rouanet, 2015). کیم و همکاران (۲۰۰۸) بیان داشتند که کلیه‌های بدن انسان در صورت مواجهه با نانوذرات نقره پاسخ‌های متعددی از خود نشان خواهد داد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دژنراسیون لوله پیچیده پروگزیمال، ضخیم شدن کپسولی و غشایی و ناهنجاری مزانشیال اشاره کرد.

در برخی از تحقیقات، رابطه مشخصی بین تماس نانوذرات نقره با پوست انسان و تجمع این نانومواد در کلیه‌ها گزارش شد. کورانی و همکاران (۲۰۱۳) پس از ارزیابی کلیه حیوانات متاثر از نانوذرات نقره و مقایسه سطوح آن با گروه کنترل، ۶ پاسخ سمی عمده ثبت کردند. این پژوهشگران

اظهار داشتند که داده‌های هیستوپاتولوژیک علائم مهمی از قبیل التهاب، چسبندگی به کپسول بومن، دژنراسیون لوله پیچیده پروگزیمال، ضخیم شدن کپسول، ضخیم شدن غشاء و افزایش سلول‌های مزانشیال در حیوانات متاثر از AgNPs را نشان داد.

۱۰-۵-سمیت سیستم تولیدمثلی و رشد

اثرات بالقوه نانوذرات نقره بر روی زنان باردار و رشد جنین موضوع بسیار مهمی است که تاکنون در تحقیقات مختلف مورد توجه قرار گرفته است. تاثیر نانوذرات نقره بر عملکرد مناسب سیستم تولیدمثل در چندین مطالعه آزمایش شده است. بر طبق نتایج به‌دست آمده، باروری مردان می‌تواند تحت تأثیر نانوذرات قرار گیرد، زیرا فرآیند اسپرم‌زایی به این مواد شیمیایی بسیار حساس است. تاثیر دوز، اندازه و پوشش نانوذرات نقره به‌منظور تحریک تکثیر سلول‌های بنیادی اسپرماتوگونیال در موش مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، بقای سلول‌های بنیادی اسپرماتوگونیال در موش وابسته به اندازه و دوز کاهش یافت، در حالی که پوشش نانوذرات نقره هیچ تاثیری بر رشد سلول نداشت (Zhang et al, 2015). در یک مطالعه کوتاه مدت درون‌تنی که توسط گارسیا و همکاران (۲۰۱۴) انجام گرفت موش‌های نر CD1 به مدت ۱۲ روز تحت غلظت‌های پایین نانوذرات نقره به صورت داخل

2013). در مجموع، بررسی مطالب ارائه شده حاکی از این است که همچنان اطلاعات کافی و قابل قبولی پیرامون سمیت تولیدمثلی و رشدی نانوذرات نقره روی بدن انسان وجود ندارد.

۱۰-۶- سمیت سیستم ایمنی

تحقیقات صورت گرفته نشان داده شده است که نانوذرات نقره پس از قرار گرفتن در معرض استنشاق، در طحال موش‌ها تجمع می‌یابند (Antsiferova et al. 2021). محققین ارتباط نزدیکی بین قرار گرفتن نانوذرات نقره در معرض پوست و تجمع آن‌ها در طحال یافتند. در برخی از پژوهش‌ها، وجود نانوذرات نقره در غلظت‌های بالا در سیستم تنفسی که با پاسخ‌های التهابی موضعی مرتبط بود گزارش گردید. اثرات این نانومواد روی سیستم ایمنی انسان نیز گزارش شده است (Silva et al. 2016). پژوهشگران اظهار داشتند که نانوذرات نقره بزرگتر از ۱۰۰ نانومتر می‌توانند به آسانی توسط ماکروفاژهای آلوئولی فاگوسیت شوند، اما نانوذرات کوچکتر (>۱۰۰ نانومتر) تمایل به تجمع و مهار فعالیت ماکروفاژهای آلوئولی دارند (Takenaka et al. 2001). شایان ذکر است که ماکروفاژهای آلوئولی فراوان‌ترین سلول‌های ایمنی ذاتی در پارانشیم دیستال ریه هستند که در سطح مجرای فضای آلوئولی قرار دارند. ماکروفاژهای آلوئولی اولین

وریدی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که نانوذرات نقره قادر به کاهش قابل توجه وزن بیضه و تعداد اسپرم نیستند، اما می‌توانند عملکرد سلولی لیدینگ را تغییر دهند که منجر به افزایش سطح تستوسترون بیضه می‌شود.

در پژوهشی که توسط آستین و همکاران (۲۰۱۲) بر روی موش‌های باردار CD-1 (یک مدل حیوانی تحقیقاتی چندمنظوره است که می‌تواند در زمینه‌های مختلف مانند سم‌شناسی و سرطان‌شناسی استفاده شود) انجام شد، نانوذرات نقره به صورت داخل وریدی تجویز شد و پس از روزهای بارداری، نمونه‌های بافتی برای ارزیابی محتوای نقره در اندام‌های مختلف جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره به طور قابل توجهی در کیسه زرده تجمع یافته‌اند. در مطالعه دیگری، سمیت تولیدمثلی و رشدی نانوذرات نقره در موش‌های آزمایشگاهی نر و ماده مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، هیچ نشانه قابل توجهی از سمیت تولیدمثلی و رشدی نانوذرات نقره در موش‌های آزمایشگاهی مشاهده نشد (Hong et al. 2014)، این در حالی است که در مدل جانوری دیگر مانند ماهی گورخری (*Danio rerio*) نانوذرات نقره در مغز، قلب، زرده و خون جنین توزیع شده و چندین ناهنجاری رشدی را القا کردند که شانس بقای جنین ماهی گورخری (*D. rerio*) را محدود می‌کرد (Osborne et al.

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

موانعی هستند که با پاتوژن‌ها و آلاینده‌های ورودی مواجه می‌شوند و به تنظیم شروع و رفع پاسخ ایمنی در ریه کمک می‌کنند. با توجه به این یافته‌ها، نانوذرات نقره در اندازه کوچکتر می‌توانند برای درمان بیماری‌های التهابی موثر واقع شوند (Korani et al. 2015).

۱۰-۷- سمیت سیستم عصبی

تاکنون، در تحقیقات مختلف نقش گیرنده گلوتاماترژیک (NMDA) N-methyl-d-aspartate در سمیت عصبی برانگیخته شده توسط نانوذرات نقره مورد بررسی قرار گرفته است و پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که فعال شدن NMDA در سمیت عصبی نانوذرات نقره نقش دارد (Ziemińska et al. 2014). همچنین پژوهش‌های مختلف نشان داده است که نانوذرات نقره می‌توانند از سد خونی مغزی (BBB) عبور کرده و باعث التهاب مغز و سمیت عصبی شوند (Trickler et al. 2010). همچنین، بر اساس گزارش‌های به‌دست آمده، نقره را می‌توان در سد خونی مغزی یافت، اما یون ذکر شده نمی‌تواند از این سد عبور کند (Korani et al. 2013, 2015). با این حال، تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که نانوذرات نقره برای سلول‌های مغز سمی هستند، به‌طوری‌که پژوهشگران مختلف از جمله هو و یوان (۲۰۲۳) بیان داشتند که سطوح بالای

نقره در پلاسما، گلبول‌های قرمز و مایع مغزی-نخاعی همراه با تشنج، صرع و کُما پس از مصرف روزانه نقره کلوئیدی گزارش شده است. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز دریافتند که قرار گرفتن در معرض نقره می‌تواند مسمومیت عصبی غیرقابل برگشتی را القا کند که در نهایت می‌تواند منجر به مرگ شود. با این حال، تحقیقات دیگر به نتایج متناقضی دست یافتند. به‌عنوان مثال، جی و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای که روی موش‌های آزمایشگاهی انجام داده بودند، دریافتند که هیچ علامت قابل توجهی در مغز موش‌هایی که از طریق استنشاق در معرض نانوذرات نقره قرار گرفتند، مشاهده نشد. در مجموع، بررسی اطلاعات به‌دست آمده گواه این مطلب است که دانش فعلی بشر در مورد اثرات ناشی از سمیت نانوذرات نقره روی سیستم عصبی انسان بسیار محدود است و به داده‌های بالینی و تجربی بیشتری نیاز است.

۱۰-۸- سمیت ژنی

مواد ژنوتوکسیک از طریق فعل و انفعالات با توالی و ساختار دی‌ان‌ا باعث آسیب به مواد ژنتیکی در سلول‌ها و در نهایت منجر به سرطان زایی می‌شوند. امروزه در سراسر جهان، مرگ و میر و بروز سرطان در حال افزایش است. بر طبق برآورد GLOBOCAN 2018، تعداد موارد جدید سرطان به ۱۸ میلیون نفر و تعداد مرگ و میرهای

آزمایشگاهی مورد مطالعه مشاهده نشد (Kim et al. 2008). با این حال، در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر، ترکیبات افزایشی دی‌ان‌ا و تشکیل میکرونوکلئوس در رده‌های سلولی انسان مشاهده گردید (Korani et al. 2015). جالب توجه است که نانوذرات نقره برای سلول‌های سرطانی، سمی‌تر از سلول‌های طبیعی هستند و این امر می‌تواند برای توسعه داروهای ضدسرطان در تحقیقات آینده بسیار ارزشمند باشد. از این نظر، مطالعات انسانی و حیوانی به‌طور قابل توجهی محدود است و تحقیقات بیشتری برای نتیجه‌گیری نهایی مورد نیاز است. در نتیجه، شواهد کافی در مورد سرطان‌زایی نانوذرات نقره در انسان وجود ندارد، اما با این حال، شواهد محدودی در حیوانات و مطالعات آزمایشگاهی به ثبت رسیده است.

۱۱- سهم آماری بیماری‌های انسانی از

نانوذرات نقره

در جدول ۲ اطلاعات آماری مربوط به اثرات منفی نانوذرات نقره بر روی بدن انسان ارائه شده است. نانوذرات نقره با وجود خواص مفیدی که دارند، می‌توانند عوارض جدی برای سلامت انسان ایجاد کنند. این اثرات شامل سمیت سلولی، التهاب، آسیب به دی‌ان‌ا، سرکوب سیستم ایمنی، اثرات نوروтокسیک، تأثیرات منفی بر باروری و

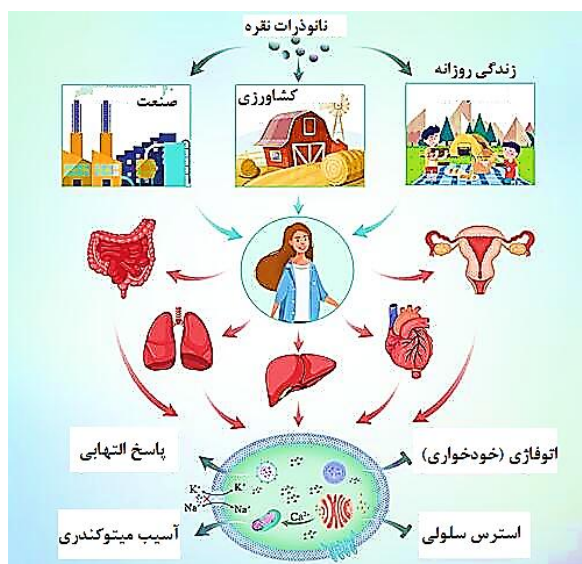
مرتبط با سرطان ۶/۹ میلیون نفر خواهد بود (Bray et al. 2018). پیش بینی‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۳۰، ۳۰ میلیون نفر در هر سال بر اثر سرطان جان خود را از دست خواهند داد (Lancet, 2018; Zhang et al. 2019).

بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که اثرات ژنوتوکسیک نانوذرات نقره بر روی دی‌ان‌ا انسان گزارش شده است. نتایج حاصل از مطالعه آوالوس و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که نانوذرات نقره قادر به تداخل با تکثیر مولکول‌های دی‌ان‌ا و ایجاد جهش و القای فعالیت ژنوتوکسیک در مگس سرکه بودند. همچنین، گزارش‌های دیگر نشان داد که با تجویز زیرجلدی نانوذرات نقره، تشکیل تومور در بدن انسان مشاهده شده است (Xu et al. 2020). غلظت سمی نانوذرات نقره با افزایش تشکیل میکرونوکلئوس و آسیب کروموزومی مرتبط است (Patlolla et al. 2015). علی‌رغم گزارش اثرات ژنوتوکسیک نانوذرات نقره در برخی از تحقیقات، مطالعات دیگر اثرات قابل ملاحظه‌ای از سمیت ژنتیکی و سرطان‌زایی این نانومواد گزارش نکردند. به‌عنوان مثال، در تحقیقی که توسط کیم و همکاران (۲۰۰۸) صورت گرفت، تجویز درون‌تنی نانوذرات نقره با اندازه ۶۰ نانومتر به مدت ۲۸ روز بر روی موش‌های آزمایشگاهی انجام شد. نتایج نهایی این تحقیق نشان داد که اثرات ژنوتوکسیک قابل توجهی در موش‌های

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

انباشته شدن در ارگان‌ها است. نیاز به تحقیقات
بیشتر جهت مشخص کردن شدت و چگونگی این
عوارض و همچنین نیاز به تدوین استانداردهای

ایمنی برای استفاده از این نانوذرات احساس
می‌شود.



شکل ۶- نمای شماتیکی از سمیت‌های مختلف نانوذرات نقره در بدن انسان و اندام‌های آسیب‌دیده
(Zhang et al. 2022)

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۲،
مکانیسم‌های عمل نانوذرات نقره به این صورت
است که عمدتاً از طریق تنش اکسیداتیو، التهاب و
تولید رادیکال‌های آزاد سمیت را القا می‌کنند.
علاوه بر این، بررسی روابط بین دوز-پاسخ نشان
می‌دهد که نانوذرات نقره در غلظت‌های بالاتر (۵۰
میکروگرم در میلی‌لیتر) تمایل به افزایش قابل

توجه اثرات نامطلوب دارند. از محدودیت‌های
تحقیق در زمینه تأثیرات منفی نانوذرات نقره روی
بدن انسان می‌توان به این موضوع اشاره کرد که
بیشتر مطالعات به صورت برون‌تنی یا در مدل‌های
حیوانی انجام شده و داده‌های بالینی انسانی
محدود است.

جدول ۲- اثرات منفی نانوذرات نقره بر روی سلامت انسان با اتکا بر داده‌های آماری

مطالعه	اثر	توضیحات	داده‌های آماری
Zhang et al. 2014	سم‌زدایی	نانوذرات نقره می‌توانند اثرات سیتوتوکسیک روی سلول‌های انسانی ایجاد کنند و به حیات تکثیر سلول آسیب برسانند.	مطالعات مختلف کاهش حیات سلولی تا درصد ۵۰ میکروگرم در بالا (مثلاً) گزارش کرده‌اند. میلی‌لیتر)
Murphy et al. 2016	التهاب	نانوذرات نقره می‌توانند پاسخ‌های التهابی در بافت‌های انسانی ایجاد کنند.	افزایش سطح $TNF-\alpha$ و IL-6 بعد از مواجهه مشاهده شده است.
Rim et al. 2013	ژنوتوکسیک	نانوذرات نقره ممکن است باعث آسیب به دی‌ان‌ا در سلول‌های انسانی شوند.	تحریک شکست دی‌ان‌ا در تا ۳۰ درصد از سلول‌های درمان‌شده.
Ninan et al. 2020	ایمونوتوکسیک	نانوذرات نقره می‌توانند پاسخ ایمنی را تغییر داده و منجر به سرکوب ایمنی شوند.	کاهش تکثیر لنفوسیت‌ها تا ۴۰-۲۰ درصد در آزمایش‌های خاص.
Costa et al. 2014	نوروتوکسیک	اثرات نوروتوکسیک بالقوه در مطالعات حیوانی مشاهده شده، ممکن است بر عملکرد عصبی انسان تأثیر بگذارد.	تغییرات رفتاری قابل توجه و آسیب به نورون‌ها در مدل‌های جوندگان مشاهده شده است.
Alaraby et al. 2024	سم‌زدایی تولید مثل	نانوذرات نقره می‌توانند بر سلامت تولید مثل و توسعه تأثیر بگذارند.	کاهش تحرک و زنده‌مانی اسپرم در مطالعات متاثر تا ۲۵ درصد.
Ferdous and Nemmar, 2020	انباشته شدن در ارگان‌ها	نانوذرات نقره می‌توانند در ارگان‌های اصلی (مثلاً کبد و کلیه‌ها) انباشته شوند.	انباشته شدن تا ۱۵ درصد در کبد و کلیه‌ها پس از مواجهه سیستمیک.

نانو ذرات نقره به دلیل خواص ضد میکروبی خود به طور گسترده در صنایع مختلف به ویژه در کاربردهای پزشکی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، افزایش استفاده از آنها نانوذرات نقره آورده شده است.

جدول ۳- خطرات بهداشتی مرتبط با نانوذرات نقره (Ferdous and Nemmar, 2020)

اثر سلامتی	توضیحات	شیوع/تأثیر تخمینی
سمیت سلولی	آسیب سلولی ناشی از سمیت نانوذرات نقره	۲۰ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند
التهاب	القای پاسخ‌های التهابی	۱۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند
سمیت ژنتیکی	آسیب به دی‌ان‌ا مرتبط با قرارگیری در معرض نانوذرات نقره	۲۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند
اثرات ایمنی	سرکوب یا تغییر در پاسخ‌های ایمنی	۱۰ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند
نوروتوکسیک	اثرات منفی بر سلول‌های عصبی و عملکردهای شناختی	۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند
سلامت باروری	تأثیرات بر باروری	۱۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند
تجمع در اندام‌ها	تجمع در کبد، کلیه‌ها و سایر اندام‌ها	۱۰ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می‌کنند

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

در عصر حاضر، تولید گسترده نانوذرات نقره در بین انواع نانوذرات موجب شده است تا بسیاری از محققین در مورد سمیت این مواد اظهارنظر نمایند. امروزه پساب‌های کارخانه‌های صنعتی که از نانوذرات نقره استفاده می‌کنند، به راحتی اکوسیستم‌های آبی را هدف قرار می‌دهند. علاوه بر این، محصولات ناشی از فعالیت‌های خانگی نیز که حاوی نانوذرات نقره می‌باشند، می‌توانند به راحتی پس از استفاده با سیستم فاضلاب مخلوط شوند و در نهایت به درون اکوسیستم‌های آبی راه پیدا کنند. کودها و آفت‌کش‌های حاوی نانوذرات نقره در مزارع کشاورزی نیز می‌توانند به راحتی به واسطه شسته شدن توسط آب باران، وارد اکوسیستم‌های آبی شوند. با توجه به موارد ذکر شده، آگاهی از آسیب‌هایی که به واسطه نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبی ایجاد می‌شود، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. تحقیقات انجام شده در طول سال‌های گذشته نشان داده است که نانوذرات نقره اثرات مضر بر موجودات زنده در تمام سطوح تغذیه‌ای دارند. با تجمع زیستی نانوذرات نقره در بخش‌های مختلف بدن موجودات آبی از جمله ماهیان مقدار این مواد در سطوح تغذیه‌ای بعدی نیز افزایش خواهد یافت، چراکه امکان انتقال این

نانومواد سمی از طریق زنجیره غذایی به بدن انسان امکان‌پذیر خواهد بود.

از آنجایی که ماهیان ساکن در اکوسیستم‌های آبی به طور گسترده برای تامین پروتئین در رژیم غذایی انسان استفاده می‌شوند، نانوذرات نقره از طریق پروتئین ماهی امکان ورود به بدن انسان را پیدا می‌کنند و می‌توانند باعث ایجاد سمیت در اندام‌های حیاتی شوند. بر طبق بررسی‌های صورت گرفته، نانوذرات نقره می‌توانند اثرات کشنده‌ای مانند افزایش استرس اکسیداتیو، سمیت قلبی، سمیت عصبی، سمیت کبدی، سمیت خونی و آسیب دی‌ان‌ا در موجودات آبی به ویژه ماهیان داشته باشند. علاوه بر این، انتقال نانوذرات نقره از طریق مصرف ماهیان به بدن انسان می‌تواند زمینه‌ساز مشکلات متعددی در رابطه با سلامت انسان باشد. ورود نانوذرات نقره به بدن انسان می‌تواند موجب بروز انواع سمیت‌ها در بخش‌های مختلف بدن انسان از جمله دستگاه گوارش، ریه، کبد، کلیه، سیستم عصبی، سیستم تولیدمثل و رشد، سیستم ایمنی و بخش ژنتیک را فراهم نماید.

به عنوان چشم‌انداز آتی، در اینجا برخی از استراتژی‌های بالقوه و راهکارهای عملی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره در

موجودات آبی و مدیریت خطر آن‌ها در آینده
ارائه می‌گردد:

بهبود شیوه‌های تولید نانوذرات: اعمال

کنترل‌های سخت‌گیرانه در طول تولید نانوذرات
نقره برای به حداقل رساندن ضایعات این مواد و
اطمینان از کاربرد مواد کم‌خطر.

استفاده از سنتز سبز برای تولید نانوذرات

نقره: سنتز سبز یک روش پایدار و دوست‌دار
محیط‌زیست است که به جای استفاده از
روش‌های شیمیایی سنتی، از منابع طبیعی برای
تولید نانوذرات نقره بهره می‌برد. مزایای سنتز سبز
شامل کاهش آلودگی، هزینه‌های کمتر و تولید
نانوذرات با ویژگی‌های مطلوب می‌باشد.

توسعه نانوذرات ایمن: توسعه نانوذرات ایمن

و زیست‌سازگار برای کاربرد موفقیت‌آمیز آن‌ها در
زمینه‌های مختلف مانند پزشکی، الکترونیک و
انرژی بسیار مهم است. از این‌رو، تولید نانوذرات
نقره با پوشش‌های محافظ یا تغییرات سطحی به-
منظور کاهش سمیت و زیست‌فراهمی این مواد در
موجودات آبی ضروری به نظر می‌رسد.

مقررات و استانداردها: حمایت و پشتیبانی از

اجرای مقررات و استانداردهایی که انتشار
نانوذرات نقره در محیط‌های آبی را محدود
می‌کنند، امری ضروری و مهم تلقی می‌شود.

تصفیه فاضلاب: استفاده از فن‌آوری‌های

پیشرفته تصفیه فاضلاب مانند فیلتراسیون غشایی،

جذب سطحی و انعقاد برای حذف موثر نانو ذرات
نقره از فاضلاب صنعتی و شهری قبل از تخلیه این
مواد در اکوسیستم‌های آبی.

بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌های موجود:

بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای
افزایش راندمان حذف نانوذرات نقره

پالایش مناطق آلوده: استفاده از تکنیک‌های

پالایش در محل مانند گیاه پالایی (با استفاده از
گیاهان برای جذب آلاینده‌ها) یا پاک‌سازی زیستی
(استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه
آلاینده‌ها) برای حذف یا خنثی کردن اثرات منفی
نانوذرات نقره در محیط‌های آبی.

سیستم‌های انتشار کنترل‌شده: استفاده از

سیستم‌های کنترل‌شده برای به حداقل رساندن
انتشار نانوذرات نقره در محیط‌های آبی.

ارزیابی و پایش خطر: ارزیابی جامع و پایش

خطر به منظور شناسایی مسیرهای احتمالی مواجهه
با نانوذرات نقره و اثرات آن‌ها.

برنامه‌های پایش محیطی: استفاده از برنامه‌های

پایش محیطی به منظور ردیابی حضور و غلظت
نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبی.

آزمایش سمیت زیست محیطی: لازم است که

برای ارزیابی اثرات نانوذرات نقره بر روی انواع
گونه‌های آبی از جمله ماهیان، آزمایش سمیت
زیست محیطی انجام گیرد.

References

فهرست منابع

- Abbas R, Luo J, Qi X, Naz A, Khan IA, Liu H, Yu S, Wei J. 2024.** Silver nanoparticles: Synthesis, structure, properties and applications. *Nanomaterials*. 14(17): 1425. <https://doi.org/10.3390/nano14171425>.
- Antsiferova AA, Kopaeva MY, Kochkin VN, Kashkarov PK. 2021.** Kinetics of silver accumulation in tissues of laboratory mice after long-term oral administration of silver. *Nanomaterials*. 11(12): 3204. <https://doi.org/10.3390/nano11123204>.
- Alaraby M, Abass D, Gutiérrez J, Velázquez A, Hernández A, Marcos R. 2024.** Reproductive toxicity of nanomaterials using silver nanoparticles and drosophila as models. *Molecules*. 29(23): 5802. <https://doi.org/10.3390/molecules29235802>.
- Arulvasu C, Jennifer SM, Prabhu D, Chandhirasekar D. 2014.** Toxicity effect of silver nanoparticles in brine shrimp *Artemia*. *Scientific World Journal*. 2014:256919. <https://doi.org/10.1155/2014/256919>.
- Auclair J, Peyrot C, Wilkinson KJ, Gagné F. 2022.** The influence of silver nanoparticle form on the toxicity in freshwater mussels. *Applied Sciences*. 12(3): 1429. <https://doi.org/10.3390/app12031429>.
- Austin CA, Umbreit TH, Brown KM, Barber DS, Dair BJ, Francke-Carroll S. 2012.** Distribution of silver nanoparticles in pregnant mice and developing embryos. *Nanotoxicology*. 6: 912-922. <https://doi.org/10.3109/17435390.2011.626539>.
- Ávalos A, Haza AI, Drosopoulou E, Mavragani-Tsipidou P, Morales P. 2015.** In vivo genotoxicity assessment of silver nanoparticles of different sizes by the somatic mutation and recombination test (SMART) on drosophila. *Food and Chemical Toxicology*. 85: 114-9. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.06.024>.
- Babaei M, Tayemeh MB, Jo MS, Yu IJ, Johari SA. 2022.** Trophic transfer and toxicity of silver nanoparticles along a phytoplankton-zooplankton-fish food chain. *Science the Total Environment*. 842: 156807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156807>.
- Bambino K, Chu J. 2017.** Zebrafish in toxicology and environmental health. *Current Topics in Developmental Biology*. 124: 331-367. <https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2016.10.007>.
- Banu AN, Kudesia N, Raut AM, Pakrudheen I, Wahengbam J. 2021.** Toxicity, bioaccumulation and transformation of silver nanoparticles in aqua biota: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 19(6): 4275-4296. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01304-w>.
- Barros J, Ben-Tanfous S, Seena S. 2024.** Aquatic fungi as bioindicators of freshwater ecosystems. *Water*. 16(23): 3404. <https://doi.org/10.3390/w16233404>.
- Barua S, Mitragotri S. 2014.** Challenges associated with penetration of nanoparticles across cell and tissue barriers: A review of current status and future prospects. *Nano Today*. 9(2): 223-243. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2014.04.008>.
- Bezerra FS, Lanzetti M, Nesi RT, Nagato AC, Silva CPE, Kennedy-Feitosa E, Melo AC, Cattani-Cavaliere I, Porto LC, Valenca SS. 2023.** Oxidative stress and inflammation in acute and chronic lung injuries. *Antioxidants*. 12(3): 548. <https://doi.org/10.3390/antiox12030548>.
- Bilberg K, Hovgaard MB, Besenbacher F, Baatrup E. 2012.** In vivo toxicity of silver nanoparticles and silver ions in zebrafish (*Danio rerio*). *Journal of Toxicology*. 2012: 293784. <https://doi.org/10.1155/2012/293784>.
- Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, Siegel RL, Torre LA, Jemal A. 2018.** Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer Journal for Clinicians*. 68(6): 394-424. <https://doi.org/10.3322/caac.21492>.
- Buta M, Hubeny J, Zieliński W, Harnisz M, Korzeniewska E. 2021.** Sewage sludge in agriculture – the effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops – a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 19(6): 4275-4296. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01304-w>.

- Carrola J, Pinto RJB, Nasirpour M, Freire CSR, Gil AM, Santos C, Oliveira H, Duarte LF. 2018.** NMR metabolomics reveals metabolism-mediated protective effects in liver (HepG2) cells exposed to subtoxic levels of silver nanoparticles. *Journal of Proteome Research*. 17(4): 1636-1646. <https://doi.org/10.1021/acs.jproteome.7b00905>.
- Capa M, Hutchings P. 2021.** Annelid diversity: Historical overview and future perspectives. *Diversity*. 13(3): 129. <https://doi.org/10.3390/d13030129>.
- Choudhary N, Hwang S, Choi W. 2014.** Carbon nanomaterials: A review. In: Bhushan B, Luo D, Schricker S, Sigmund W, Zauscher S. (Eds.) *Handbook of nanomaterials properties*. Springer, Germany. 709-769. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31107-9_37.
- Christen V, Fent K. 2012.** Silica nanoparticles and silver-doped silica nanoparticles induce endoplasmic reticulum stress response and alter cytochrome P4501A activity. *Chemosphere*. 87: 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.046>.
- Cormier SA, Lomnicki S, Backes W, Dellinger B. 2006.** Origin and health impacts of emissions of toxic by-products and fine particles from combustion and thermal treatment of hazardous wastes and materials. *Environmental Health Perspectives*. 114(6): 810-817. <https://doi.org/10.1289/ehp.8629>.
- Costa LG, Cole TB, Coburn J, Chang YC, Dao K, Roque PJ. 2014.** Neurotoxicants are in the air: convergence of human, animal, and in vitro studies on the effects of air pollution on the brain. *BioMed Research International*. 2014: 736385. <https://doi.org/10.1155/2014/736385>.
- Cupi D, Hartmann NB, Baun A. 2016.** Influence of pH and media composition on suspension stability of silver, zinc oxide, and titanium dioxide nanoparticles and immobilization of *Daphnia magna* under guideline testing conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 127: 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.028>.
- Dash A, Singh AP, Chaudhary BR, Singh SK, Dash D. 2012.** Effect of silver nanoparticles on growth of eukaryotic green algae. *Nano-Micro Letters*. 4(3): 158-165. <https://doi.org/10.1007/BF03353707>.
- Demarchi CA, da Silva LM, Niedźwiecka A, Ślawska-Waniewska A, Lewińska S, Dal Magro J, Calisto JF, Martello R, Rodrigues CA. 2020.** Nanoecotoxicology study of the response of magnetic O-Carboxymethylchitosan loaded silver nanoparticles on *Artemia salina*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 74: 103298. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103298>.
- Deng F, Olesen P, Foldbjerg R, Dang DA, Guo X, Autrup H. 2010.** Silver nanoparticles up-regulate Connexin43 expression and increase gap junctional intercellular communication in human lung adenocarcinoma cell line A549. *Nanotoxicology*. 4(2): 186-95. <https://doi.org/10.3109/17435390903576451>.
- Du J, Tang J, Xu S, Ge J, Dong Y, Li H, Jin M. 2018.** A review on silver nanoparticles-induced ecotoxicity and the underlying toxicity mechanisms. *Regulatory Toxicology Pharmacology*. 98: 231-239. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.08.003>.
- Duman H, Eker F, Akdaşçi E, Witkowska AM, Bechelany M, Karav S. 2024.** Silver nanoparticles: A comprehensive review of synthesis methods and chemical and physical properties. *Nanomaterials*. 14(18): 1527. <https://doi.org/10.3390/nano14181527>.
- Ferdous Z, Nemmar A. 2020.** Health impact of silver nanoparticles: A review of the biodistribution and toxicity following various routes of exposure. *International Journal of Molecular Sciences*. 21(7): 2375. <https://doi.org/10.3390/ijms21072375>.
- Gaillet S, Rouanet JM. 2015.** Silver nanoparticles: Their potential toxic effects after oral exposure and underlying mechanisms – A review. *Food and Chemical Toxicology*. 77: 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.12.019>.
- Garcia TX, Costa GM, Franca LR, Hofmann MC. 2014.** Sub-acute intravenous administration of silver nanoparticles in male mice alters Leydig cell function and testosterone levels. *Reproductive Toxicology*. 45: 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2014.01.006>.
- Glavaš Ljubimir K, Domijan AM, Radić Brkanac S. 2023.** Phytotoxic action of silver nanoparticles on *Lemna minor*: Multi-parameter analysis of different physiological processes. *Plants*. 12(2): 343.

<https://doi.org/10.3390/plants12020343>.

Glga AR, Skoglund S, Wallinder IO, Fadeel B, Karlsson HL. 2014. Size-dependent cytotoxicity of silver nanoparticles in human lung cells: the role of cellular uptake, agglomeration and Ag release. *Particle and Fibre Toxicology*. 11: 11. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-11>.

González-Vega JG, García-Ramos JC, Chavez-Santoscoy RA, Castillo-Quinones JE, Arellano-García ME, Toledano-Magaña Y. 2022. Lung models to evaluate silver nanoparticles' toxicity and their impact on human health. *Nanomaterials*. 12(13): 2316. <https://doi.org/10.3390/nano12132316>.

Gottschalk F, Nowack B. 2011. The release of engineered nanomaterials to the environment. *Journal of Environmental Monitoring*. 13: 1145-1155.

Gupta RK, Abd El Gawad F, Ali EAE, Karunanithi S, Yugiani P, Prakash Srivastav P. 2023. Nanotechnology: Current applications and future scope in food packaging systems. *Measurement: Food*. 13: 100131. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2023.100131>.

Holmannova D, Borsky P, Svadlakova T, Borska L, Fiala Z. 2022. Carbon nanoparticles and their biomedical applications. *Applied Sciences*. 12(15): 7865. <https://doi.org/10.3390/app12157865>.

Hong JS, Kim S, Lee SH, Jo E, Lee B, Yoon J. 2014. Combined repeated-dose toxicity study of silver nanoparticles with the reproduction/developmental toxicity screening test. *Nanotoxicology*. 8: 349-362. <https://doi.org/10.3109/17435390.2013.780108>.

Hsu CY, Mahdi Rheima A, Kadhim MM, Nadhim Ahmed N, Hashim Mohammed S, Ali FK, Mahmoud ZH, Kianfar E. 2023. An overview of nanoparticles in drug delivery: Properties and applications. *South African Journal of Chemical Engineering*. 46: 233-270. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.08.009>.

Hu D, Yuen C. 2023. Seizures following self-medication with colloidal silver: A case report. *Hospital Pharmacy*. 58(4): 350-352. <https://doi.org/10.1177/00185787231151862>.

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

Jaswal T, Gupta J. 2023. A review on the toxicity of silver nanoparticles on human health. *Materials Today*. 81(2): 859-863. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.266>.

Jeong GN, Jo UB, Ryu HY, Kim YS, Song KS, Yu IJ. 2010. Histochemical study of intestinal mucins after administration of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Archives Toxicology*. 84: 63-69. <https://doi.org/10.1007/s00204-009-0469-0>.

Ji JH, Jung JH, Kim SS, Yoon JU, Park JD, Choi BS. 2007. Twenty-eight-day inhalation toxicity study of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhalation Toxicology*. 19: 857-571. <https://doi.org/10.1080/08958370701432108>.

John AC, Küpper M, Manders-Groot AMM, Debray B, Lacome JM, Kuhlbusch TAJ. 2017. Emissions and possible environmental implication of engineered nanomaterials (ENMs) in the atmosphere. *Atmosphere*. 8(5): 84. <https://doi.org/10.3390/atmos8050084>.

Kalbassi MR, Salari-Joo H, Johari SA. 2011. Toxicity of silver nanoparticles in aquatic ecosystems: Salinity as the main cause in reducing toxicity. *Iranian Journal of Toxicology*. 5(12 and 13): 436-443.

Kang J, Zhou N, Zhang Y, Wang Y, Song C, Gao X, Song G, Guo J, Huang L, Ma T, Yu X. 2023. Synthesis, multi-site transformation fate and biological toxicity of silver nanoparticles in aquatic environment: A review. *Environmental Technology and Innovation*. 32: 103295. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103295>.

Katuli KK, Massarsky A, Hadadi A, Pourmehran Z. 2014. Silver nanoparticles inhibit the gill Na⁺/K⁺-ATPase and erythrocyte AChE activities and induce the stress response in adult zebrafish (*Danio rerio*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 106: 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.001>.

Kawata K, Osawa M, Okabe S. 2009. In vitro toxicity of silver nanoparticles at noncytotoxic doses to HepG2 human hepatoma cells. *Environmental Science & Technology*. 43: 6046-6051. <https://doi.org/10.1021/es900754q>.

- Khan MS, Qureshi NA, Jabeen F, Shakeel M, Asghar MS. 2018.** Assessment of waterborne amine-coated silver nanoparticle (Ag-NP)-induced toxicity in *Labeo rohita* by histological and hematological profiles. *Biological Trace Element Research*. 182(1): 130-139. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-1080-5>.
- Kim YS, Kim JS, Cho HS, Rha DS, Kim JM, Park JD. 2008.** Twenty-eight-day oral toxicity, genotoxicity, and gender-related tissue distribution of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhalation Toxicology*. 20: 575-583. <https://doi.org/10.1080/08958370701874663>.
- Korani M, Rezayat SM, Arbabi Bidgoli S. 2013.** Sub-chronic dermal toxicity of silver nanoparticles in guinea pig: special emphasis to heart, bone and kidney toxicities. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*. 12:511-519.
- Korani M, Ghazizadeh E, Korani S, Hami Z, Mohammadi-Bardbori A. 2015.** Effects of silver nanoparticles on human health. *European Journal of Nanomedicine*. 7(1): 51-62. <https://doi.org/10.1515/ejnm-2014-0032>.
- Kroto HW, Heath JR, Brien SCO, Curl RF, Smalley RE. 1985.** C60: Buckminsterfullerene. *Nature*. 318: 162-163.
- Kumari A, Singla R, Guliani A, Yadav SK. 2014.** Nanoencapsulation for drug delivery. *EXCLI J*, 13:265-286.
- Lancet. 2018.** The Lancet. GLOBOCAN 2018: counting the toll of cancer. *Lancet*. 392(10152): 985. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32252-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32252-9).
- Lekamge S, Miranda AF, Ball AS, Shukla R, Nugedoda D. 2019.** The toxicity of coated silver nanoparticles to *Daphnia carinata* and trophic transfer from alga *Raphidocelis subcapitata*. *PLoS One*. 14(4): e0214398. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214398>.
- Lomartire S, Marques JC, Gonçalves AMM. 2021.** The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecological Indicators*. 129: 107867. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107867>.
- Lu H, Li SD. 2013.** Two-dimensional carbon allotropes from graphene to graphyne. *Journal of Materials Chemistry*. 1: 3677-3680. <https://doi.org/10.1039/C3TC30302K>.
- Maranho LT, Gomes MP. 2024.** Morphophysiological adaptations of aquatic macrophytes in wetland-based sewage treatment systems: Strategies for resilience and efficiency under environmental stress. *Plants*. 13(20): 2870. <https://doi.org/10.3390/plants13202870>.
- Mahdi KNM, Peters R, van der Ploeg M, Ritsema C, Geissen V. 2018.** Tracking the transport of silver nanoparticles in soil: A saturated column experiment. *Water, Air, & Soil Pollution*. 229(10): 334. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3985-9>.
- Melnik EA, Buzulukov YP, Demin VF, Demin VA, Gmshinski IV, Tyshko NV. 2013.** Transfer of silver nanoparticles through the placenta and breast milk during in vivo experiments on rats. *Acta Naturae*. 5: 107-115. <https://doi.org/10.32607/20758251-2013-5-3-107-115>.
- Miao AJ, Luo Z, Chen CS, Chin WC, Santschi PH, Quigg A. 2010.** Intracellular uptake: A possible mechanism for silver engineered nanoparticle toxicity to a freshwater alga *Ochromonas danica*. *PLoS One*. 5: e15196. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015196>.
- Mo F, Li H, He Y, Zhou Q. 2022.** An updated review on Ag NP effects at organismal level: Internalization, responses, and influencing factors. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 260(1): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s44169-022-00019-5>.
- More PR, Pandit S, Filippis A, Franci G, Mijakovic I, Galdiero M. 2023.** Silver nanoparticles: Bactericidal and mechanistic approach against drug resistant pathogens. *Microorganisms*. 11(2): 369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>.
- Murphy A, Casey A, Byrne G, Chambers G, Howe O. 2016.** Silver nanoparticles induce pro-inflammatory gene expression and inflammasome activation in human monocytes. *Journal of Applied Toxicology*. 36(10): 1311-1320. <https://doi.org/10.1002/jat.3315>.

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

Mylona Z, Panteris E, Moustakas M, Kevrekidis T, Malea P. 2020. Physiological, structural and ultrastructural impacts of silver nanoparticles on the seagrass *Cymodocea nodosa*. Chemosphere. 248: 126066. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126066>.

Navarro E, Piccapietra F, Wagner B, Marconi F, Kaegi R, Odzak N, Sigg L, Behra R. 2008. Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. Environmental Science & Technology. 42(23): 8959-8964.

Newton KM, Puppala HL, Kitchens CL, Colvin VL, Klaine SJ. 2013. Silver nanoparticle toxicity to *Daphnia magna* is a function of dissolved silver concentration. Environmental Toxicology and Chemistry. 32(10): 2356-2364. <https://doi.org/10.1002/etc.2300>.

Ninan N, Goswami N, Vasilev K. 2020. The impact of engineered silver nanomaterials on the immune system. Nanomaterials. 10(5): 967. <https://doi.org/10.3390/nano10050967>.

NISE Network. 2016. The National Informal STEM Education Network (NISE Network). <https://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-silver-nanoparticles>.

Noga M, Milan J, Frydrych A, Jurowski K. 2023. Toxicological aspects, safety assessment, and green toxicology of silver nanoparticles (AgNPs)-critical review: State of the Art. International Journal of Molecular Sciences. 24(6): 5133. <https://doi.org/10.3390/ijms24065133>.

Nyabadza A, McCarthy É, Makhesana M, Heidarinasab S, Plouze A, Vazquez M, Brabazon D. 2023. A review of physical, chemical and biological synthesis methods of bimetallic nanoparticles and applications in sensing, water treatment, biomedicine, catalysis and hydrogen storage. Advances in Colloid and Interface Science. 321: 103010. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103010>.

Osborne OJ, Johnston BD, Moger J, Balousha M, Lead JR, Kudoh T. 2013. Effects of particle size and coating on nanoscale Ag and TiO₂ exposure in zebrafish (*Danio rerio*) embryos. Nanotoxicology. 7: 1315-1324. <https://doi.org/10.3109/17435390.2012.737484>.

Ostaszewska T, Śliwiński J, Kamaszewski M, Sysa P, Chojnacki M. 2018. Cytotoxicity of silver and copper nanoparticles on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hepatocytes. Environmental Science and Pollution Research. 25(1): 908-915. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0494-0>.

Patlolla AK, Hackett D, Tchounwou PB. 2015. Genotoxicity study of silver nanoparticles in bone marrow cells of Sprague-Dawley rats. Food and Chemical Toxicology. 85: 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.05.005>.

Pham TL. 2019. Effect of silver nanoparticles on tropical freshwater and marine microalgae. Journal of Chemistry. 1: 1-20. <https://doi.org/10.1155/2019/9658386>.

Piao MJ, Kang KA, Lee IK, Kim HS, Kim S, Choi JY, Choi J, Hyun JW. 2011. Silver nanoparticles induce oxidative cell damage in human liver cells through inhibition of reduced glutathione and induction of mitochondria-involved apoptosis. Toxicology Letters. 201(1): 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2010.12.010>.

Pizzino G, Irrera N, Cucinotta M, Pallio G, Mannino F, Arcoraci V, Squadrito F, Altavilla D, Bitto A. 2017. Oxidative stress: Harms and benefits for human health. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2017: 8416763. <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>.

Pokhrel LR, Dubey B, Scheuerman PR. 2013. Impacts of select organic ligands on the colloidal stability, dissolution dynamics and toxicity of silver nanoparticles. Environmental Science & Technology. 47(22): 12877-12885. <https://doi.org/10.1021/es403462j>.

Radkhah AR, Eagderi S. 2019. Investigation of biological characteristics and breeding potentials of some species of surgeonfish (Family: Acanthuridae) inhabiting the Persian Gulf for exploitation in the ornamental fish breeding industry. Journal of Ornamental Aquatics. 6(4): 1-11. <https://ornamentalaquatics.ir/article-1-212-en.html>.

Radkhah AR, Eagderi S. 2020. Book review: Fish protection technologies and fish ways for downstream migration. Schwevers U, Adam B. Fish and fisheries. Springer, Switzerland. 2020. <https://doi.org/10.1111/faf.12492>.

- Radkhah AR, Eagderi S, Sadeghinejad Masouleh E. 2020.** Investigation of antimicrobial properties of silver nanoparticles (AgNPs) to control diseases and health management in aquaculture systems. *Journal of Ornamental Aquatics*. 7(1): 7-15. <http://ornamentalaquatics.ir/article-1-219-fa.html>.
- Radkhah AR, Eagderi S. 2021.** Evaluation of the performance of the zebrafish (*Danio rerio*) model in nanotoxicology studies with emphasis on embryo pathology. *Journal of Ornamental Aquatics*. 8(4): 27-36. <http://ornamentalaquatics.ir/article-1-265-fa.html>.
- Radkhah AR, Sadeghinejad Masouleh E. 2021.** Investigation of the effect of physicochemical factors of water on bioavailability, toxicity and the level of effectiveness of metal nanoparticles in aquatic ecosystems. *Journal of Water and Sustainable Development*. 8(2): 71-90. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i2.1019>.
- Radkhah AR, Eagderi S. 2022a.** Biosecurity in aquaculture systems as one of the requirements for sustainable development. *Journal of Biosafety*. 15(2): 97-118. <http://journalofbiosafety.ir/article-1-467-en.html>. (In Farsi with English abstract)
- Radkhah AR, Eagderi S. 2022b.** Prevalence of fish lice, Argulus (Crustacea: Branchiura) in freshwater and two ornamental fishes of Iran. *Journal of Fisheries*. 10(3): 103301. <https://doi.org/10.17017/j.fish.383>.
- Radkhah AR, Eagderi S. 2022c.** A review of the performance of zebrafish (*Danio rerio*) as a model organism in nanotoxicological research and its differences with other animal models. *Journal of Ornamental Aquatics*. 9(2): 15-27. <http://ornamentalaquatics.ir/article-1-268-fa.html>.
- Radkhah AR, Eagderi S, Sadeghinejad Masouleh E. 2022.** Accumulation of heavy metals in fish: A serious threat to food security and public health. *Journal of Marine Medicine*. 3(4): 236-245. <http://jmarmed.ir/article-1-226-en.html>.
- Radkhah AR, 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): 109-126. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i2.2301-1209>.
- Radkhah AR, Eagderi S, Poorbagher H. 2023.** Investigating some common bacterial pathogens between humans and aquatic organisms: Maintaining the biosecurity of workers in aquaculture centers: A Review. *Journal of Biosafety*. 16(1): 73-92. <http://journalofbiosafety.ir/article-1-515-en.html>. (In Farsi with English abstract)
- Ramirez R, Martí V, Darbra RM. 2022.** Environmental risk assessment of silver nanoparticles in aquatic ecosystems using fuzzy logic. *Water*. 14(12): v1885. <https://doi.org/10.3390/w14121885>.
- Rim KT, Song SW, Kim HY. 2013.** Oxidative DNA damage from nanoparticle exposure and its application to workers' health: a literature review. *Safety and Health at Work*. 4(4): 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2013.07.006>.
- Roy M, Roy A, Rustagi S, Pandey N. 2023.** An overview of nanomaterial applications in pharmacology. *BioMed Research International*. 2023: 4838043. <https://doi.org/10.1155/2023/4838043>.
- Samrot AV, Burman U, Yamini P, Rabel AM. 2018.** A study on toxicity of chemically synthesised silver nanoparticle on *Eudrilus eugeniae*. *Toxicology and Environmental Health Sciences*. 10(3): 162-167. <https://doi.org/10.1007/s13530-018-0360-6>.
- Shabrangharehdasht M, Mirvaghefi A, Farahmand H. 2020.** Effects of nanosilver on hematologic, histologic and molecular parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic Toxicology*. 225: 105549. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105549>.
- Sibiya A, Gopi N, Jeyavani J, Mahboob S, Al-Ghanim KA, Sultana S, Mustafa A, Govindarajan M, Vaseeharan B. 2022.** Comparative toxicity of silver nanoparticles and silver nitrate in freshwater fish *Oreochromis mossambicus*: A multi-biomarker approach. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology Pharmacology*. 259: 109391. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109391>.
- Silva RM, Anderson DS, Peake J, Edwards PC, Patchin ES, Guo T, Gordon T, Chen LC, Sun X, Van Winkle LS, Pinkerton KE. 2016.** Aerosolized silver nanoparticles in the rat lung and pulmonary responses over time. *Toxicology Pathology*. 44(5): 673-86. <https://doi.org/10.1177/0192623316629804>.

"راخواه و همکاران، اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره (AgNPs) در موجودات آبی ..."

Silva Brito R, João Bebianno M, Rocha TL. 2024. Plant-based silver nanoparticles ecotoxicity: Perspectives about green technologies in the one health context. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 54(16): 1218-1235. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2303298>.

Takenaka S, Karg E, Roth C, Schulz H, Ziesenis A, Heinzmann U. 2001. Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats. *Environmental Health Perspectives*. 109(4): 547-551. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109s4547>.

Tiwari DK, Jin T, Behari J. 2011. Dose-dependent in vivo toxicity assessment of silver nanoparticle in Wistar rats. *Toxicology Mechanisms and Methods*. 21: 13-24. <https://doi.org/10.3109/15376516.2010.529184>.

Trickler WJ, Lantz SM, Murdock RC, Schrand AM, Robinson BL, Newport GD, Schlager JJ, Oldenburg SJ, Paule MG, Slikker WJ, Hussain SM, Ali SF. 2010. Silver nanoparticle induced blood-brain barrier inflammation and increased permeability in primary rat brain microvessel endothelial cells. *Toxicological Sciences*. 118(1): 160-170. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq244>.

Tripathi DK, Singh S, Singh S, Pandey R, Singh VP, Sharma NC, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. 2017. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*. 110: 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>.

Tsiola A, Pitta P, Junyer Callol A, Kagiorgi M, Kalantzi I, Mylona K, Santi I, Toncelli C, Pergantis S, Tsapakis M. 2017. The impact of silver nanoparticles on marine plankton dynamics: Dependence on coating, size and concentration. *Science of the Total Environment*. 601-602: 1838-1848. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.042>.

Vidyasagar A, Patel RR, Singh SK, Singh M. 2023. Green synthesis of silver nanoparticles: methods, biological applications, delivery and toxicity. *Materials Advances*. 4: 1831-1849. <https://doi.org/10.1039/D2MA01105K>.

Xiang QQ, Wang D, Zhang JL, Ding CZ, Luo X, Tao J, Ling J, Shea D, Chen LQ. 2020. Effect of silver nanoparticles on gill membranes of common carp: Modification of fatty acid profile, lipid peroxidation and membrane fluidity. *Environmental Pollution*. 256: 113504. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113504>.

Xu L, Wang YY, Huang J, Chen CY, Wang ZX, Xie H. 2020. Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety. *Theranostics*. 10(20): 8996-9031. <https://doi.org/10.7150/thno.45413>.

Yin Y, Yu S, Yang X, Liu J, Jiang G. 2015. Source and pathway of silver nanoparticles to the environment. In: Liu J, Jiang G. (Eds.) *Silver nanoparticles in the environment*. Springer, Germany. 43-72. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46070-2_3.

Yoo-Iam M, Chaichana R, Satapanajaru T. 2014. Toxicity, bioaccumulation and biomagnification of silver nanoparticles in green algae (*Chlorella* sp.), water flea (*Moina macrocopa*), blood worm (*Chironomus* spp.) and silver barb (*Barbonymus gonionotus*). *Chemical Speciation & Bioavailability*. 26(4): 257-265. <https://doi.org/10.3184/095422914X14144332205573>.

Younas W, Khan FU, Zaman M, Lin D, Zuberi A, Wang Y. 2022. Toxicity of synthesized silver nanoparticles in a widespread fish: A comparison between green and chemical. *Science of the Total Environment*. 845: 157366. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157366>.

Yusoff FM, Umi WAD, Ramli NM, Harun R. 2024. Water quality management in aquaculture. *Cambridge Prisms: Water*. 2:e8. <https://doi.org/10.1017/wat.2024.6>.

Zalewska-Ziob M, Adamek B, Kasperczyk J, Romuk E, Hudziec E, Chwalińska E, Dobija-Kubica K, Rogoziński P, Bruliński K. 2019. Activity of antioxidant enzymes in the tumor and adjacent noncancerous tissues of non-small-cell lung cancer. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2019: 2901840. <https://doi.org/10.1155/2019/2901840>.

Zhang T, Wang L, Chen Q, Chen C. 2014. Cytotoxic potential of silver nanoparticles. *Yonsei Medical Journal*. 55(2): 283-291. <https://doi.org/10.3349/ymj.2014.55.2.283>.

Zhang Z, Yang X, Shen M, Yin Y, Liu J. 2015. Sunlight-driven reduction of silver ion to silver

nanoparticle by organic matter mitigates the acute toxicity of silver to *Daphnia magna*. Journal of Environmental Sciences. 35: 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.007>.

Zhang XF, Liu ZG, Shen W, Gurunathan S. 2016. Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. International Journal of Molecular Sciences. 17(9): 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>.

Zhang Y, Li M, Gao X. 2019. Nanotechnology in cancer diagnosis: progress, challenges and opportunities. Journal of Hematology and Oncology. 12: 137. <https://doi.org/10.1186/s13045-019-0833-3>.

Zhang J, Wang F, Yalamarty SSK, Filipczak N, Jin Y, Li X. 2022. Nano silver-induced toxicity and associated mechanisms. International Journal of Nanomedicine. 17: 1851-1864. <https://doi.org/10.2147/IJN.S355131>.

Ziemińska E, Stafiej A, Strużyńska L. 2014. The role of the glutamatergic NMDA receptor in nanosilver-evoked neurotoxicity in primary cultures of cerebellar granule cells. Toxicology. 315: 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2013.11.008>.

Environmental Effects of Silver Nanoparticles (AgNPs) on Aquatic Organisms and the Potential Transfer of Their Toxicity to the Human Body Through the Food Chain

Ali Reza Radkhah¹, Soheil Eagderi^{2*}, Hadi Poorbagher², Sedigheh Atash Afraze³

1. Ph.D. Student, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Environmental Expert, Faculty of Natural Resources, Birjan University, Birjand, Iran
soheil.eagderi@ut.ac.ir

Abstract

Nanotechnology is a rapidly advancing field focused on the design, synthesis, and manipulation of materials at the nanoscale (1–100 nm). Its applications span numerous sectors, including medicine, healthcare, food, cosmetics, environmental science, electronics, energy, and biotechnology. Among nanomaterials, silver nanoparticles (AgNPs) have gained significant attention due to their excellent electrical conductivity and strong antimicrobial properties. As a result, their widespread industrial and medical use has led to a rapid increase in production and a growing risk of environmental release, particularly into aquatic ecosystems. Aquatic environments play a critical role in ecological balance and human food security, especially through fish consumption. This review study examines the environmental effects of AgNPs on aquatic organisms and the potential transfer of their toxicity to humans via the food chain. Evidence from scientific literature indicates that AgNPs can cause severe toxic effects in aquatic organisms, particularly fish, including oxidative stress, cardiotoxicity, neurotoxicity, hepatotoxicity, hematotoxicity, and DNA damage. The accumulation of AgNPs in fish raises concerns about human exposure through dietary intake. In humans, AgNP toxicity has been linked to adverse effects on multiple systems, including the digestive tract, lungs, liver, kidneys, nervous, reproductive, immune, and genetic systems, and may contribute to carcinogenesis. Given the increasing global cancer burden, these findings highlight the importance of regulating AgNP use. The results of this study can assist policymakers and environmental managers in minimizing ecological damage and preventing the transfer of AgNP toxicity through the food chain.

Keywords: Oxidative stress, Immunotoxicity, Neurotoxicity, Fish, Silver nanoparticles