مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

ISSN 2716-9804 الکترونیکی، ISSN 2717-0632 چاپی

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

نوع مقاله: مروری 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4

علیرضا رادخواه[۱]، سهیل ایگدری[۲]*، هادی پورباقر[۲]، صدیقه آتش‌افرازه[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 ۱۱۰-۷۳

چکیده

امروزه فناوری نانو به‌عنوان یکی از زمینه‌های مهم در تحقیقات مدرن به‌شمار می‌رود که با طراحی و سنتز ساختارهای ذرات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر سروکار دارند. یکی از فلزات مورد توجه طی سال‌های اخیر در حوزه فناوری نانو، نقره است. نانو ذرات نقره به‌دلیل خواص فلزی مانند رسانایی در صنایع مختلف و اثر ضدمیکروبی در علم پزشکی به‌طور گسترده استفاده می‌شود و رهاسازی آن در محیط‌های مختلف از جمله اکوسیستم‌های آبزی افزایش یافته است. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد که نانوذرات نقره می‌توانند اثرات کُشنده‌ای مانند افزایش تنش اکسیداتیو، سمیت قلبی، سمیت عصبی، سمیت کبدی، سمیت خونی و آسیب دی‌انا در موجودات آبزی به‌ویژه 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 و نانوذرات نقره می‌تواند به دستگاه گوارش، عصبی، تولید مثل، ایمنی و دی‌انا آسیب بزند. با توجه به اهمیت اکوسیستم‌های آبی و نقش موجودات مختلف از جمله ماهیان در تامین امنیت غذایی انسان، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبزی و امکان انتقال سمیت این مواد به بدن انسان از طریق زنجیره غذایی در قالب یک تحقیق مروری انجام گرفت.

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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

مقدمه

امروزه فناوری نانو به‌عنوان یکی از زمینه‌های مهم در تحقیقات مدرن به‌شمار 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 به‌دلیل 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 به‌عنوان یکی از فعال‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی در علم مواد به‌شمار 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. هنگامی‌که فلزات در ابعاد نانو تعریف می‌شوند، خواص منحصر به‌فردی 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 به‌دلیل خواص فلزی آن مانند رسانایی در صنایع مختلف و همچنین، به‌دلیل اثر ضدمیکروبی آن در علم پزشکی به‌طور 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 به‌طور اجتناب ناپذیری در محیط آزاد (Radkhah and Eagderi, 2023). علاوه بر این، نانوذرات نقره همچنین می توانند 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 رهایش نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبزی و پیامدهای منفی آن بر موجودات آبزی شامل فیتوپلانکتون‌ها، زئوپلانکتون‌ها و علی الخصوص ماهیان از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است (Radkhah and Eagderi, 2022b). از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبزی در قالب یک تحقیق مروری به اجرا درآمد. مجموعه اطلاعات ارائه

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

شده در این مطالعه می‌تواند در جهت پایش اکوسیستم‌های آبزی و جلوگیری از اثرات جبران‌ناپذیر نانوذرات نقره بر موجودات آبزی به‌ویژه ماهیان و همچنین، به‌منظور پیشگیری از انتقال این نانومواد سمی به بدن انسان از طریق زنجیره غذایی مورد توجه مدیران و سیاست¬گذاران بخش‌های مختلف کشور از جمله سازمان محیط‌زیست 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 محیط‌زیست 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. به‌دلیل 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 به‌دام 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 به‌منظور تزریق مواد فعال در سیستم دارورسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kumari et al. 2014).

۲-۲- نانوذرات مبتنی بر کربن

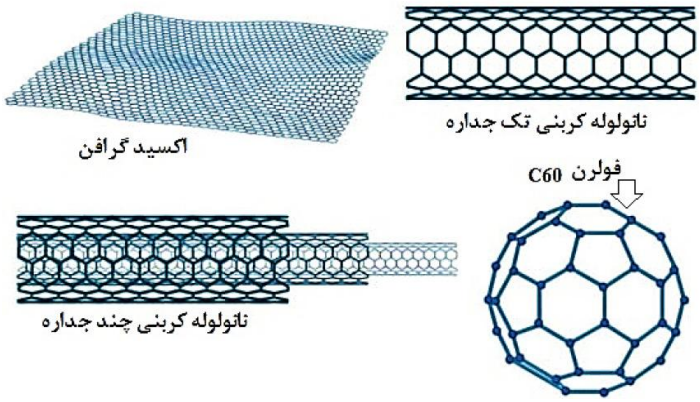
کربن یکی از فراوان‌ترین مواد معدنی روی زمین است. این ماده یکی از اجزای مهم در تعداد زیادی از دُرشت‌مولکول‌ها از جمله قندها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و غیره می‌باشد که برای زندگی ضروری هستند. کربن خالص به اشکال مختلفی مانند آلوتروپ وجود دارد. شناخته‌شده‌ترین آلوتروپ‌های کربن که به شکل کریستالی و طبیعی هستند شامل الماس و گرافیت می‌باشند (Holmannova et al. 2022). از آلوتروپ‌های کربن به صورت آمورف نیز می‌توان به زغال‌سنگ 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

کوانتومی گرافن) اشاره کرد (Holmannova et al. 2022).

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 (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).



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

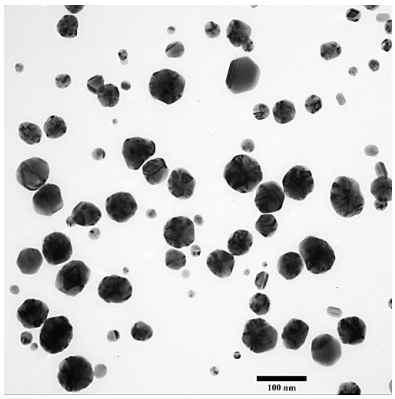
۳-۲-نانوذرات مبتنی بر مواد معدنی

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 منبسط شده، اندازه منافذ، چگالی بار روی سطح، شکل استوانه‌ای و کُروی، رنگ، ساختارهای بی‌شکل و بلوری، دارای خواص منحصر به‌فردی 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) به‌عنوان یکی از نانوذرات مبتنی بر مواد معدنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]



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).

۳-سنتز نانوذرات نقره

۳-۱-روش های فیزیکی و شیمیایی

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

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 روش های «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 صوتی است. بهترین مزیت روش‌های شیمیایی بر خلاف روش‌های فیزیکی که بازده پایینی دارند،

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

عملکرد بالا است. روش‌های فوق بسیار 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).

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، قابل اعتماد 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 آنجایی‌که 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 کلوئیدهای نقره به‌صورت یکنواخت استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های شیمیایی، روش‌های زیستی با بهینه‌سازی روش‌های سنتز

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

شامل میزان پیش‌سازها، دما، pH و میزان عوامل کاهش‌دهنده و تثبیت‌کننده، سهولت بیشتری در کنترل شکل، اندازه و توزیع نانوذرات تولیدی دارند (Zhang et al. 2016; Duman et al. 2024).

۴-کاربرد نانوذرات نقره در سیستم‌های آبزی‌پروری

امروزه پرورش آبزیان با چالش‌های متعددی روبه‌رو است که می‌تواند به‌طور مستقیم بر محیط‌زیست تأثیر بگذارد. از جمله مهم‌ترین چالش‌های مطرح در این زمینه می‌توان به مصرف نکردن خوراک توسط آبزیان، انباشت تولیدات دفعی (مدفوع) و استفاده از محصولات شیمیایی، داروها و آنتی‌بیوتیک‌ها اشاره کرد که مقادیر زیادی از ترکیبات سمی و خطرناک را در طول تولید آبزیان ایجاد می‌کنند که در نهایت می‌توانند به محیط پیرامون این سیستم‌های تولیدی رها شوند (Radkhah and Eagderi, 2019 and 2020). در سیستم‌های آبزی‌پروری، کیفیت پایین آب به دلیل تجمع ترکیبات سمی از جمله آمونیاک، نیتریت و سولفید هیدروژن، همراه با اکسیژن محلول پایین، رشد جلبک‌های مضر و گسترش باکتری‌ها، ویروس‌ها و انگل‌های مختلف می‌تواند سلامت آبزیان را از طریق عفونت‌های بیماری‌زا تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به این موضوع، بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری امری مهم و کلیدی تلقی می‌شود (Yusoff et al. 2024).

در حال حاضر، بیشترین روشی که برای مدت طولانی به‌منظور بهبود کیفیت آب استفاده می‌شود، تغییر مداوم آب حوضچه‌ها با آب جدید و تازه می‌باشد. در این شیوه غیرصحیح به مقادیر زیادی آب نیاز است که این منبع روز به روز در سراسر جهان کاهش می‌یابد. در این شرایط، حجم آب لازم برای سیستم‌های آبزی‌پروری با مقیاس کوچک یا متوسط می‌تواند به چند صد متر مکعب در روز برسد (Radkhah and Eagderi, 2019). 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. در تحقیقات اخیر، نقش نانوذرات نقره (AgNPs) در گندزدایی آب، اجتناب از حضور باکتری‌ها و پاتوژن‌های 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 سیستم‌های آبزی‌پروری نباید از اثرات زیست-محیطی و سمیت ناشی از این مواد برای موجودات آبزی غفلت کرد (Radkhah and Sadeghinejad Masouleh, 2021). با انتشار نانوذرات نقره در سیستم‌های آبزی‌پروری، امکان تجمع و انباشته‌شدن این مواد در بدن موجودات آبزی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

به‌ویژه ماهیان که به‌طور عمده مورد مصرف انسان قرار می‌گیرند، وجود دارد. از این‌رو، 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، نشت 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 ضدعفونی‌کننده اضافه می‌شوند، در جوراب‌های مقاوم در برابر بو، رنگ‌های فضای باز، پلاستیک‌های ضدمیکروبی 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 عفونی کننده‌ها خیلی راحت و سریع به اتمسفر منتشر می شوند، 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 مهندسی‌شده مانند نانوذرات نقره را در محیط نشان می‌دهد (Mahdi et al. 2018).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

۶-ورود نانوذرات نقره به بدن موجودات آبزی

نانوذرات نقره از دو طریق می‌توانندوارد 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، به‌راحتی می‌توانندبه موانع زیستی مختلف (مانند آبشش‌ها یا سایر اپیتلیوم-های سطحی) نفوذ کرده و وارد بدن شوند. نانوذرات نقره میکروسکوپی می‌توانندبه غشای نیمه‌تراوای باکتری‌ها و قارچ ها، دیواره سلولی فیتوپلانکتون، کوتیکول موجود در خارج از بدن زئوپلانکتون یا آبشش ها و اپیتلیوم روده حیوانات بزرگ آبزی نفوذ (Radkhah and Eagderi, 2022a). گاهی اوقات نانوذرات نقره در سطح بدن تجمع می‌کنند. بعداً با فرآیندهایی مانند اندوسیتوز، فاگوسیتوز وارد بدن 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 ارگانیسم انباشته شوند، غلظت آن‌هادر 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 به‌دلیل عدم تعادل بین تولید و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، رادیکال‌های آزاد و آنتی اکسیدآن‌هادر 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 دناتوره شدن پروتئین می‌شود و باعث اختلال در عملکرد سلول و آسیب به ارگانیسم می‌شود (Du et al. 2018; Kang et al. 2022).

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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

Sadeghinejad Masouleh, 2021) ، به‌همین 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 آبزی مورد اشاره قرار می‌گیرد.

۸-اثرات نانوذرات نقره بر موجودات آبزی

۸-۱-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 برهم‌کُنش می‌کنند تا آن‌هارا 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. 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 می‌توانندرشد باکتری‌های نیتریفیک 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 قابل‌توجهی 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

را کاهش می‌دهند. همچنین، تحقیق انجام‌گرفته بر روی *Ochromonas danika* نشان داد که نانوذرات نقره سرعت رشد جلبک‌ها را کاهش می‌دهند (Miao et al. 2010). بر طبق آزمایشی که روی جلبک‌های *Chara vulgaris* و *Pithophora oedogonia* انجام گرفت، دش و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که نانوذرات نقره در دیواره سلولی این جلبک‌ها اختلال ایجاد کرده و باعث ناهنجاری‌های سلولی مختلف می‌شود. با این حال، مکانیسم دقیق ورود نانوذرات نقره به درون پیکره جلبک هنوز مشخص نشده است. بر طبق پژوهش انجام شده توسط فام (۲۰۱۹)، مشخص گردید که نانوذرات نقره باعث مهار رشد، کاهش قطر سلول، کاهش محتوای کلروفیل a و افزایش تجمع لیپید در جلبک آب شیرین *Scenedesmus* sp. و دیاتومه دریایی *Thalassiosira* sp. می‌شوند.

۸-۳-ماکروفیت‌ها

گیاهان آبزی که به‌عنوان ماکروفیت نیز شناخته می‌شوند، جزء مهم و جدایی‌ناپذیر اکوسیستم‌های آبی به‌شمار می‌روند. ماکروفیت‌ها زیستگاه ارگانیسم‌های مختلف را فراهم می‌کنند، چرخه‌های مختلف بیوژئوشیمیایی را تنظیم می‌کنند و به‌عنوان تولیدکنندگان اولیه در اکوسیستم‌های آبی عمل می‌کنند (Maranho and Gomes, 2024). نانوذرات نقره به‌واسطه این ماکروفیت‌ها از آب جذب شده و در ریشه‌ها، برگ‌ها و سایر قسمت‌های گیاهان آبزی تجمع می‌یابند. نانوذرات نقره می‌توانند غشای سلولی ماکروفیت‌ها را تخریب کنند، تولید ROS را افزایش دهند، به دی‌انا آسیب وارد کنند و تولید ATP را کاهش دهند (Tripathi et al. 2017). در گونه‌های گیاهی *Lemna minor* و *Eichhornia crassipes*، نانوذرات نقره در ریشه، ساقه و بافت برگ تجمع می‌یابند و منجر به بروز نکروز می‌شوند، در نتیجه، سرعت رشد گیاه و سرعت متابولیسم آن کاهش می‌یابد (Glavaš Ljubimir et al. 2023). بر طبق پژوهش‌های انجام شده در سال‌های گذشته، در گیاهان آبزی *Spirodela polyrhiza* و *Cymodocea nodosa*، ورود نانوذرات نقره به درون پیکره گیاه باعث افزایش تنش اکسیداتیو، کاهش تعداد تیلاکوئیدها، تخریب اسکلت سلولی و آسیب ریزوم‌های برگ می‌شود (Mylona et al. 2020).

۸-۴-زئوپلانکتون‌ها

زئوپلانکتون‌ها نقش بسیار مهمی در اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کنند. اساساً این موجودات به‌عنوان پلی بین تولیدکننده و موجودات برتر در اکوسیستم‌های آبی عمل می‌کنند. در واقع، هر ماده سمی به‌واسطه این زئوپلانکتون‌ها به بدن موجودات بالاتر انتقال پیدا می‌کند (Lomartire et al. 2021). دافنی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 به‌ذکر 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 آن‌هادریافتند 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 به‌راحتی از طریق زئوپلانکتون‌ها به سطوح تغذیه‌ای بَعدی نیز انتقال می‌یابند. بابایی و همکاران (۲۰۲۲) در تایید این موضوع اظهار داشتند که زئوپلانکتون *Artemia salina* نانوذرات نقره را چندین بار به سطح تغذیه‌ای بَعدی در زنجیره غذایی انتقال می‌دهد. نتایج مشابهی نیز در مورد کَک 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 آرتمیا انجام شد، مشخص گردید که این نانومواد باعث آسیب دی‌ان‌ا، تغییر تفریخ و حتی مرگ در ناپلی آرتمیا می‌شوند. دمارچی و همکاران (۲۰۲۰) در آزمایش صورت گرفته بر روی *A. salina* نشان دادند که نانوذرات نقره اندکی تنش اکسیداتیوِ ارگانیسم را افزایش می‌دهد، مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی را تغییر می‌دهد. علاوه بر این، نانوذرات نقره در روده و سایر بخش‌های بدن ارگانیسم انباشته می‌شود، اما باعث مرگ و میر این گونه از زئوپلانکتون‌ها نمی‌شود.

۸-۵-جانوران آبزی در رده‌های بالاتر شبکه غذایی

در اکوسیستم‌های آبی، کرم‌های حلقوی، بَندپایان، 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 امکان‌پذیر می‌شود (Capa and Hutchings, 2021). بنابراین نقش

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

موجودات مذکور در اکوسیستم آبی بسیار مهم است و بررسی اثر سمی نانوذرات نقره بر روی آن‌هانیز 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 کِرم *Eudrilus eugeniae* انجام گرفت، محققان دریافتند که نانوذرات نقره با اندازه ۱۸۰ تا ۲۰۰ نانومتری باعث فیبروز، 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 (*D. rerio*) آسیب بزنند و باعث مرگ و میر وابسته به دوز شوند. در غلظت‌های بالاتر، این نانوذرات می‌توانندباعث 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 رُهو (*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 اُکسید می‌شوند و در نتیجه، سیالیت غشاء کاهش می‌یابد که از عملکرد طبیعی فیزیولوژیکی آبشش‌ها جلوگیری می‌کند و متعاقباً التهاب و آسیب لایه‌ای مشاهده

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

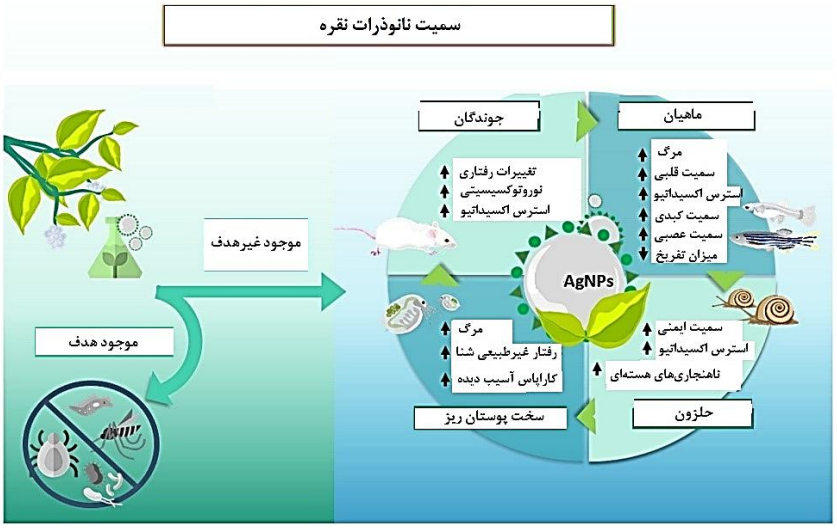
می‌شود (Xiang et al. 2020). همچنین، بر طبق مطالعات انجام شده، افزایش سطح آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی با افزایش حساسیت به تشکیل تومور مرتبط است (Zalewska-Ziob et al. 2019). نانوذرات نقره موجود در فاضلاب شهری می‌تواند باعث التهاب و سرکوب سیستم ایمنی در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*) شود (Banu 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 رنگین-کمان شود. نتایج نشان داد که نانوذرات نقره به مقدار ۹/۸ میلی‌گرم در لیتر، مورفولوژی سلول‌های خون را در قزل‌آلای رنگین کمان تغییر داد، میزان گونه‌های اکسیژن فعال را افزایش داد و مسیرهای سیگنال‌دهی سلولی را تغییر داد (Shabrangharehdasht et al. 2020). سیبیا و 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 اب شیرین مورد بررسی قرار گرفته است. یون‌های نقره در غلظت-های 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 (Na+/K+-ATPase) را مسدود کنند که بر تنظیم یونی یون‌های Cl^- و Na^+ در سراسر آبشش‌ها تأثیر می‌گذارد (Ferdous and Nemmar, 2020).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

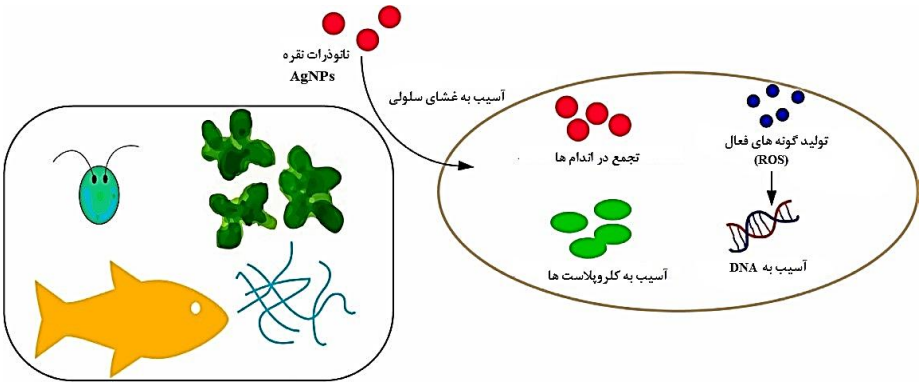


شکل ۳- اثرات سمی نانوذرات نقره در موجودات مختلف آبزی (Silva Brito et al. 2024)

اثرات ناشی از سمیت نانوذرات نقره در غلظت‌های زیاد (µM) می‌تواند متفاوت باشد و پیامدهای فیزیولوژیک مهمی مانند اسیدوز خون به‌همراه 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. به‌طور 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 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. به‌طور 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).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]



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

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 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.

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 ۴۰-۳۰ درصدی فعالیت ماهی در غلظت‌های بالای ۵۰-۱۰ میلی‌گرم 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 میلی‌گرم 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 میلی‌گرم 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 میلی‌گرم در لیتر.	کاهش پاسخ ایمنی و افزایش احتمال عفونت.	تأثیر بر سیستم ایمنی
Younas et al. 2022	کاهش ۳۰-۲۵ درصد در میزان اکسیژن جذب شده در غلظت‌های ۱۰ میلی‌گرم 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 ۵۰-۱۵ درصد در وزن و طول در پرورش ماهی در غلظت‌های ۵۰-۵ میلی‌گرم در لیتر.	کاهش رشد و تکثیر در ماهیان در معرض نانوذرات نقره.	تأثیر بر رشد و نمو

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

۹- مسیرهای تماس انسان با نانوذرات نقره

مسیرهای اصلی ورود نانوذرات به بدن انسان می‌تواند 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 آنجایی‌که نانوذرات نقره به‌طور گسترده در محصولات مختلف خانگی و زیست‌پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Xu et al. 2020)، بخش زیر مسیرهای بالقوه مختلف برای ورود این نانوذرات را مورد بحث قرار می‌دهد.

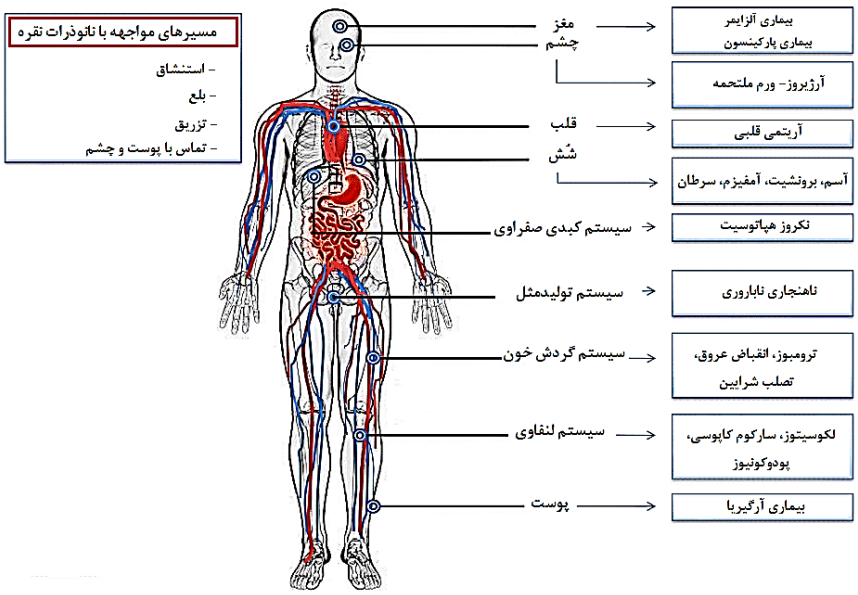
پس از قرار گرفتن در معرض نانوذرات نقره، این مواد قادر به القای التهاب و تنش اکسیداتیو در محل تماس هستند. علاوه بر این، آن‌هامی‌توانند از موانع زیستی مختلف عبور کرده و وارد گردش خون شوند. نانوذرات نقره‌ای که به‌صورت داخل وریدی تجویز می‌شوند، مستقیماً به درون سیستم گردش خون راه پیدا می‌کنند. از آن زمان به بعد، این نانومواد در اندام‌های مختلف توزیع می‌شوند و باعث ایجاد اثرات پاتوفیزیولوژیک خاص در اندام‌های بدن می‌شوند (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 می‌سازد تا از طریق استنشاق وارد سیستم تنفسی انسان شوند. انتقال نانوذرات نقره از طریق تنفس به بدن انسان می‌تواند مسیرهای متنوعی داشته باشد. یکی از رایج‌ترین این مسیرها در تحقیقات مختلف از جمله فردوس و نمار (۲۰۲۰) مورد اشاره قرار گرفته است. این پژوهشگران گزارش دادند که استفاده از اسپری‌های مصرفی مبتنی بر فناوری نانو که حاوی نانوذرات نقره هستند، می‌توانند منجر به تولید ذرات معلق در هوا در ابعاد نانو و انتشار نانوذرات در نزدیکی منطقه تنفس انسان شوند.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]



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)

در صنایع غذایی از نانوذرات نقره در بسته‌بندی و نگهداری به‌منظور 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 آبزی 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 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 می شود 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 می‌توانندبر روی لایه مخاطی عمل کنند، به جریان خون منتقل شوند و در نتیجه با عبور از اپیتلیوم به هر اندامی دسترسی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

پیدا کنند. گزارش‌های واصله نشان داده است که جذب نانوذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر عمدتاً توسط اندوسیتوز در سلول‌های اپیتلیال صورت می‌گیرد (Barua and Mitragotri, 2014; Korani et al. 2015). در داخل انتروسیت‌ها، نانوذرات نقره می‌توانند تنش اکسیداتیو، آسیب دی‌ان‌ا 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، بزرگ‌ترین 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 التهاب‌یافته انسان و همچنین توانایی آن‌ها برای انتشار در ساختارهای زیرین به‌خوبی در پژوهش‌های 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 به‌طور مستقیم به سیستم گردش خون دسترسی پیدا می‌کنند (Vidyasagar et al. 2023). علاوه بر این، توسعه داروهای مبتنی بر نانوذرات نقره یا حامل‌های دارو می تواند ورود مستقیم این ذرات را به سیستم گردش خون انسان امکان‌پذیر سازد (Hsu et al. 2023).

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

بررسی‌های صورت گرفته در سطح جهانی نشان داده است که مصرف خوراکی جانوران آبزی به‌ویژه ماهیان موجب انتقال انواع آلودگی‌ها 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 به‌واسطه مصارف خوراکی از جمله مصرف ماهیان آلوده صورت گرفته است، مورد بحث قرار می‌گیرد. انتقال نانوذرات نقره از طریق مصرف ماهیان آلوده به بدن انسان می‌تواند موجب بروز سمیت-های گوناگون در بخش‌های 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 بدن انسان و سیستم‌ها و اندام‌های مورد هدف ارائه شده است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 اتصالی شکاف (GJIC) و کانکسین ۴۳ (Cx43) در رده سلولی آدنوکارسینوم ریه انسان A549 افزایش یافت و محققین نشان دادند که Cx43 و GJIC می‌توانندتحت 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). به‌عنوان مثال، در یک مطالعه درون‌تَنی 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 حالی‌که 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 می شود 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 سلول-های ریه انسان نسبت به نانوذرات بزرگتر ایجاد می‌کنند (Gliga et al. 2014). در مجموع، عوامل متعددی می‌توانند بر سمیت ریه توسط نانوذرات نقره تأثیر 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 نقره اثرات سمی از خود نشان می‌دهد (Xu et al. 2020) .در مطالعه جونگ و همکاران (۲۰۱۰)،

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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.

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 اُرگان 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 آسپارتات آمینو ترانسفراز (AST)، آلانین آمینوترانسفراز (ALT) و گاما-گالاکتوزیل 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). به‌نظر می رسد 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) واکوئلاسیون 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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

۱۰-۴-سمیت کلیوی

از آنجایی‌که کلیه‌ها ارگان اصلی حذف دارو هستند، به‌همان اندازه می‌توانندداهداف بالقوه سمیت برای نانوذرات نقره نیز باشند. نانوذرات نقره می‌توانندوابسته به دوزشان در کلیه‌ها تجمع یابند. برخی از وسایل پزشکی که دارای نانوذرات نقره هستند، می‌توانندیون‌های نقره را به تدریج آزاد کنند. یون‌های آزاد شده سپس می‌توانندبه 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 آن‌هامی‌توان به دژنراسیون لوله پیچیده پروگزیمال، ضخیم شدن کپسولی و غشایی و ناهنجاری مزانژیال 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 مزانژیال 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 به‌مدت ۱۲ روز تحت غلظت‌های پایین نانوذرات نقره به صورت داخل

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

وریدی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که نانوذرات نقره قادر به کاهش قابل توجه وزن بیضه و تعداد اسپرم نیستند، اما می‌توانندعملکرد سلولی لیدیگ 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 به‌صورت 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 به‌طور 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. 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 آن‌هادر طحال یافتند. در برخی از پژوهش‌ها، وجود نانوذرات نقره در غلظت‌های بالا در سیستم تنفسی که با پاسخ‌های التهابیِ 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 می‌توانندبه‌آسانی 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 مجرایِ فضای آلوئولی قرار دارند. ماکروفاژهای آلوئولی اولین

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 می‌توانندبرای درمان بیماری‌های التهابی موثر واقع شوند (Korani et al. 2015).

۱۰-۷-سمیت سیستم عصبی

تاکنون، در تحقیقات مختلف نقش گیرنده گلوتاماترژیک N-methyl-d-aspartate (NMDA) 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 می توانند 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، صَرع 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 درون‌تَنی نانوذرات نقره با اندازه ۶۰ نانومتر به‌مدت ۲۸ روز بر روی موش‌های آزمایشگاهی انجام شد. نتایج نهایی این تحقیق نشان داد که اثرات ژنوتوکسیک قابل توجهی در موش‌های 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.

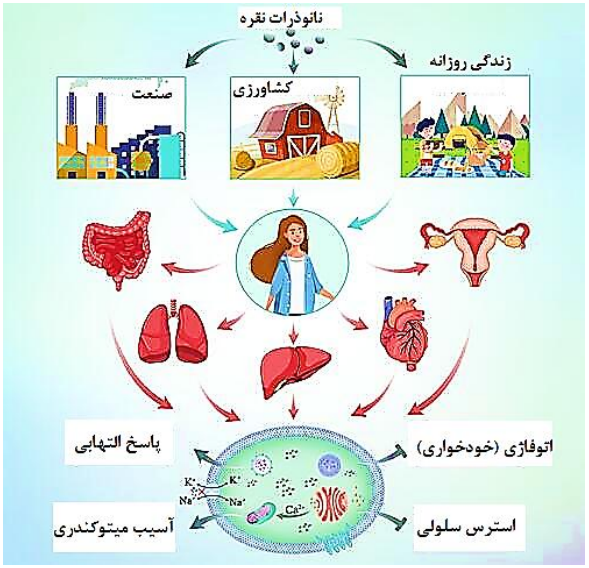
۱۱-سهم آماری بیماری‌های انسانی از نانوذرات نقره

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 نوروتوکسیک، تأثیرات منفی بر باروری و انباشته

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 تاثیرات 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 و تکثیر سلول آسیب برسانند.	مطالعات مختلف کاهش حیات سلولی تا درصد را در غلظت‌های بالا (مثلاً ≤ ۵۰ میکروگرم در میلی‌لیتر) گزارش کرده‌اند.
Murphy et al. 2016	التهاب	نانوذرات نقره می‌توانند پاسخ‌های التهابی در بافت‌های انسانی ایجاد کنند.	افزایش سطح TNF-α 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 می گیرند. با این حال، افزایش استفاده از آنها نگرانی هایی را در مورد سمیت بالقوه و اثرات نامطلوب سلامتی ایجاد می کند. در جدول ۳ یک مرور مفهومی از مسائل سلامت بالقوه مرتبط با 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 می کنند
التهاب	القای پاسخ های التهابی	۱۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می کنند

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

سمیت ژنتیکی	آسیب به دی‌ان‌ا مرتبط با قرارگیری در معرض نانوذرات نقره	۲۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می کنند
اثرات ایمنی	سرکوب یا تغییر در پاسخ‌های ایمنی	۱۰ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می کنند
نوروتوکسیک	اثرات منفی بر سلول‌های عصبی و عملکردهای شناختی	۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می کنند
سلامت باروری	تأثیرات بر باروری	۱۵ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می کنند
تجمع در اندام‌ها	تجمع در کبد، کلیه‌ها و سایر اندام‌ها	۱۰ درصد از مطالعات اثرات را گزارش می کنند

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، می‌توانندبه‌راحتی 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 به‌راحتی به‌واسطه شسته شدن توسط آب باران، وارد اکوسیستم‌های آبی شوند. با توجه به موارد ذکر شده، آگاهی از آسیب‌هایی که به‌واسطه 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 مضری بر موجودات زنده در تمام سطوح تغذیه‌ای دارند. با تجمع زیستی نانوذرات نقره در بخش‌های مختلف بدن موجودات آبزی از جمله ماهیان مقدار این مواد در سطوح تغذیه‌ای بَعدی نیز افزایش خواهد یافت، چراکه امکان انتقال این نانومواد سمی از طریق زنجیره غذایی به بدن انسان امکان‌پذیر خواهد بود.

از آنجایی‌که ماهیان ساکن در اکوسیستم‌های آبی به‌طور 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 می‌توانندباعث ایجاد سمیت در اندام‌های حیاتی شوند. بر طبق بررسی‌های صورت گرفته، نانوذرات نقره می‌توانند اثرات کُشنده‌ای مانند افزایش استرس اکسیداتیو، سمیت قلبی، سمیت عصبی، سمیت کبدی، سمیت خونی و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

آسیب دی‌ان‌ا در موجودات آبزی به‌ویژه 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 موجبات 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.

به‌عنوان چشم‌انداز آتی، در اینجا برخی از استراتژی‌های بالقوه و راهکارهای عملی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی نانوذرات نقره در موجودات آبزی 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 به‌منظور کاهش سمیت و زیست‌فراهمی این مواد در موجودات آبزی امری ضروری به‌نظر 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 فن‌آوری های 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 به‌منظور شناسایی مسیرهای احتمالی مواجهه با نانوذرات نقره و اثرات آن‌ها.

برنامه‌های پایش محیطی: استفاده از برنامه‌های پایش محیطی به‌منظور ردیابی حضور و غلظت نانوذرات نقره در اکوسیستم‌های آبی.

آزمایش سمیت زیست‌محیطی: لازم است که برای ارزیابی اثرات نانوذرات نقره بر روی انواع گونه‌های آبزی از جمله ماهیان، آزمایش سمیت زیست‌محیطی انجام گیرد.

فهرست منابع References

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 silvern. 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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-Cavalieri 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 endoplasmatic 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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.

Gliga 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-Quiñones JE, Arellano-Garcia 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.meafoo.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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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.

Lekamge S, Miranda AF, Ball AS, Shukla R, Nugegoda 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, Gmoshinski IV, Tyshko NV. 2013. Transfer of

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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.

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, Heidarinassab 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 TiO(2) 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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/101111/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 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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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.aqutox.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.

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 nnvironment. 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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

(*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.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]

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 Radkhah[1], Soheil Eagderi[2*], Hadi Poorbagher[2], Sedigheh Atash Afrazeh[3]

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

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-07-11]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1403.17.2.4.4]