مجله بوم شناسی آبزیان

Journal homepage: http://jae.hormozgan.ac.ir

اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر سمیت حاد نانوذرات نقره در ماهی دانیو گورخری (*Danio rerio*)

سید علی جوهری*

گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۹۴/۰۴/۱۳
اصلاح: ۹۴/۰۷/۰۲
پذیرش: ۹۴/۰۷/۰۴

کلمات کلیدی:
دی‌اکسید تیتانیوم
نقره
سم‌شناسی
ماهی گورخری

چکیده

نانومواد علاوه بر تأثیرات مستقیم بر آبزیان، می‌توانند باعث تأثیر در سمّیت سایر آلاینده های شیمیایی در موجودات آبزی شوند. در این مطالعه اثر حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در آب بر سمیت حاد نانوذرات نقره در ماهی دانیو گورخری (*Danio rerio*) مورد بررسی قرار گرفت. ماهیان به صورت همزمان و به مدت ۹۶ ساعت در معرض غلظت‌های متفاوت هر یک از این نانوذرات قرار گرفتند، به طوری که در هر یک از تیمارها، غلظت نانوذرات TiO_2، ۱۰ برابر غلظت نانوذرات نقره در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در آب باعث کاهش بیش از ۳ برابری میزان سمیت حاد نانوذرات نقره در ماهی گورخری می‌شود، به طوری که غلظت کشنده میانی نانوذرات نقره از ۰/۰۱۴ (بدون حضور نانوذرت TiO_2) به ۰/۰۴۴ (در حضور نانوذرت TiO_2) افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد کاهش سمّیت نانوذرات نقره در حضور نانوذرات TiO_2 در این پژوهش، احتمالاً به دلیل کاهش دسترسی زیستی نانوذرات نقره از طریق اتصال به نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ته‌نشینی آن در محیط آبی اتفاق افتاده باشد.

مقدمــه

در دهه‌های اخیر، فناوری نانو با رشد بسیار سریعی همراه بوده است و امروزه از آن در بسیاری از کالاهای مورد مصرف انسان استفاده می شود؛ به‌طوری‌که بررسی بازار ۳۰ کشور در سراسر جهان نشان داده است تا اکتبر ۲۰۱۳ تعداد محصولات مبتنی بر فناوری نانو به ۱۶۲۸ محصول رسیده است (Woodrow Wilson Database, 2014). بر این اساس نانوذرات نقره، دی‌اکسید تیتانیوم، کربن، دی‌اکسید سیلیسیوم، روی و طلا جزو پُرمصرف‌ترین نانومواد ساخت دست بشر هستند. از نظر میزان تولید نیز نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم با میانگین ۵۵۰۰ تن، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با میانگین ۳۰۰۰ تن، نانوذرات اکسید روی با میانگین ۵۵۰ تن، نانو لوله‌های کربنی با میانگین ۳۰۰ تن، نانوذرات نقره، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و اکسید سریوم هر یک با میانگین ۵۵ تن و فولرن و نقاط کوانتومی هر یک با میانگین تولید ۶۰۰ کیلوگرم در سال جزو پُرتولیدترین نانومواد ساخت دست بشر هستند (Piccinno *et al*., 2012). بیشترین استفاده از نانوذرات نقره به دلیل داشتن ویژگی‌های ضد میکروبی قوی آن می‌باشد که باعث گردیده است در محصولات مختلف همچون مواد شوینده، پوشاک، کفش، افزودنی‌های غذایی، مواد آرایشی و نیز به

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: a.johari@uok.ac.ir

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

صورت پوشش ماسک‌های تنفسی، اسباب‌بازی، فیلترهای تصفیه آب، گوشی‌های تلفن، لپ‌تاپ و غیره کاربرد داشته باشد (Abbasi *et al*., 2014). نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز به دلیل داشتن ویژگی جذب اشعه فرابنفش در کرم‌های ضد آفتاب و به دلیل داشتن خواص فوتوکاتالیستی قوی در تصفیه آلاینده‌ها و همچنین پوشش‌های خود تمیز شونده استفاده می‌شوند (Banerjee *et al*., 2015). همزمان با افزایش تولید و استفاده از نانو مواد در محصولات تجاری، امکان رهایش آن‌ها به محیط‌زیست و از جمله به بوم‌سازگان‌های آبی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که Keller و همکاران (۲۰۱۳)، میزان ورود نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و نقره به محیط‌های آبی را به ترتیب ۱۵۶۰۰ و ۶۳ تن در سال برآورد کرده‌اند.

افزایش حضور نانومواد در بوم‌سازگان‌های آبی می‌تواند باعث تأثیر آن‌ها بر آبزیان شود که این اثرات یا به صورت مستقیم و از طریق ایجاد سمّیت در زیستمندان آبزی (Hosseini *et al*., 2014; Mazarei *et al*., 2015) و یا به صورت غیر مستقیم و از طریق اثرگذاری بر سمّیت سایر آلاینده‌های شیمیایی موجود در آب (همچون فاضلاب انسانی و شهری، هیدروکربن‌های معطر، فلزات، علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز، مواد داروئی، میکروپلاستیک‌ها و سایر نانومواد) می‌باشد. اگرچه در بسیاری از مطالعات، سمّیت انواع مواد شیمیایی به صورت تک تک در آبزیان مورد بررسی قرار گرفته است، اما محیط‌زیست آبی در معرض مجموعه‌ای از ترکیبات شیمیایی طبیعی و یا ساخت دست بشر قرار دارد و حضور همزمان این آلاینده‌های شیمیایی در بوم‌سازگان‌های آبی، می‌تواند دارای اثرات متفاوت (افزایشی یا کاهشی) نسبت به اثرات انفرادی هر یک از آن‌ها بر آبزیان باشد و بنابر این لازم است که علاوه بر مطالعه تک به تک سمیت آلاینده‌ها در آبزیان، پژوهش در مورد اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر نیز مورد توجه قرار گیرد.

در سال‌های اخیر حدود ۳۰ مطالعه در رابطه با اثرات متقابل نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و سایر آلاینده‌های آلی و معدنی در آبزیان انجام پذیرفته است. اهمیت این نوع مطالعات به این دلیل است که بر اثر واکنش میان نانوذرات با آلاینده‌های شیمیایی ممکن است سمیت این آلاینده‌ها افزایش یا کاهش یابد. از میان ۳۰ مطالعه مذکور، تنها در یک مطالعه اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر سمیت نانوذرات نقره مورد بررسی قرار گرفته است (Zou *et al*., 2014). در مطالعه مورد اشاره، اثرات متقابل نانوذرات نقره و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر یک نوع مژه‌دار آب شیرین (*Tetrahymena pyriformis*) مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که اگرچه در نور طبیعی نانوذرات TiO_2 باعث کاهش سمیت نانوذرات نقره می‌شوند، اما در شرایط تابش مداوم نور، نانوذرات TiO_2 باعث افزایش سمیت نانوذرات نقره می‌گردند؛ همچنین این دو نانو ماده در شرایط عدم تابش نور (تاریکی) اثر متقابلی بر سمیت یکدیگر در آبزی مورد بررسی نداشتند. به تازگی استفاده از ماهی دانیو گورخری (*Danio rerio*) در مطالعات ایمنی شناسی، رفتارشناسی و سم شناسی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و از این ماهی به عنوان مدلی برای مطالعه بیماری های انسان، بررسی اثرات داروها و نیز بررسی اثرات آلاینده های زیست محیطی استفاده می شود. نگهداری و تکثیر سریع و ساده، تولید تعداد زیادی نوزاد در هر بار تکثیر و داشتن جنین های شفاف این ماهی را به عنوان یک مدل بسیار مناسب برای مطالعه اثرات آلاینده ها و سموم شیمیایی تبدیل کرده است (Hill *et al*., 2005). از آنجا که تا به امروز مطالعه‌ای در مورد اثرات متقابل نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و نقره بر آبزیان عالی انجام نپذیرفته است، هدف از پژوهش حاضر انجام این مطالعه در ماهی دانیو گورخری به عنوان یک مدل مهره‌دار آبزی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نانوذرات نقره استفاده شده در این پژوهش یک نوع کلوئید با نام تجاری نانوسید L2000 بود که از شرکت نانونصب‌پارس خریداری گردید. ویژگی‌های این کلوئید در مطالعات Asghari و همکاران (۲۰۱۲) و Johari و همکاران (۲۰۱۳)، به طور کامل مورد سنجش قرار گرفته و گزارش شده است. بر اساس نتایج مطالعات مذکور، به طور خلاصه کلوئید مورد استفاده حاوی نانوذرات نقره با غلظت ۳۹۸۰ میلی‌گرم در لیتر، میانگین پتانسیل زتای ۷/۸۶ ± ۵۳/۳۳ میلی‌ولت، اسیدیته ۲/۴ و میانگین هندسی قطر برابر با ۱/۴۶ ±

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

۱۲/۶۵ نانومتر بود. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شده در این پژوهش نیز از نوع آناتاز[1] و به حالت پودری و ساخت کارخانه US NANO آمریکا بود که از شرکت نانوپارس‌لیما خریداری گردید (لازم به ذکر است که دی‌اکسید تیتانیوم در طبیعت با ساختارهای کریستالی آناتاز، روتایل[2] و یا بروکیت[3] موجود می‌باشد). ویژگی‌های این نانوماده نیز در مطالعه Tavana و همکاران (۲۰۱۴)، به طور کامل گزارش گردیده است. بر اساس نتایج مطالعه مذکور، میانگین هندسی قطر این نانوذرات در حالت خشک برابر با ۱/۷۱ ± ۱۷/۵۰ نانومتر بود. به منظور انجام آزمایشات سم‌شناسی، طبق روش ذکر شده در مطالعه Tavana و همکاران (۲۰۱۴)، از این پودر سوسپانسیونی با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه شد و به دلیل حساسیت به تابش نور، این سوسپانسیون در شیشه تیره رنگ در دمای اتاق نگهداری گردید.

ماهیان گورخری استفاده شده در این پژوهش از میان یک جمعیت ۵۰۰ عددی موجود در یک کارگاه خصوصی تکثیر ماهیان تزئینی به صورت تصادفی انتخاب و خریداری شده و پس از انتقال به سالن نگهداری آبزیان دانشگاه کردستان به منظور سازگاری با شرایط آزمایشگاه، به مدت یک هفته در یک حوضچه پانصد لیتری همراه با هوادهی و دوره نوری ۱۲ ساعت روشنایی نگهداری شدند. طی دوره سازگاری ماهیان روزانه یک بار و در حد سیری با غذای مخصوص ماهیان آکواریومی تغذیه می‌شدند و میانگین وزن ماهیان در پایان دوره سازگاری ۰/۴۱ ± ۱/۲۷ گرم بود. آب مورد استفاده برای نگهداری ماهیان در طی دوره سازگاری و همچنین انجام آزمایش‌های سم‌شناسی، آب شرب شهر بود که برای کلر زدایی از آن، حداقل به مدت ۲ هفته هوادهی شدید شده بود. برخی از ویژگی های آب هوادهی شده با استفاده از کیت سنجش ویژگی‌های شیمیایی آب (شرکت Sera، ایتالیا) اندازه‌گیری گردید؛ بر این اساس میزان آمونیاک و کلر آب صفر میلی گرم در لیتر، میزان کلسیم ۱۰۰ میلی گرم در لیتر و میزان اسیدیته آن برابر ۸/۵ بود.

آزمون‌های سم‌شناسی حاد به مدت ۹۶ ساعت و بر اساس رهنمود استاندارد شماره ۲۰۳ "سازمان توسعه و همکاری اقتصادی" انجام شد (OECD, 1992). در مدت زمان انجام آزمایش‌ها، میانگین دمای آب ۱ ± ۲۵ درجه سانتی‌گراد و میزان اکسیژن محلول همواره بالاتر از ۸ میلی‌گرم در لیتر بود. بر اساس استاندارد فوق، غذادهی به ماهیان، ۲۴ ساعت قبل از شروع آزمایش‌های سم‌شناسی و در طی انجام آن قطع شد. همچنین دوره روشنایی مورد استفاده در طول آزمایشات به میزان ۱۶ ساعت روشنایی تنظیم شد. آزمایش‌های تعیین محدوده کشندگی[4] و آزمایش‌های اصلی در بشرهای شیشه‌ای محتوی ۱ لیتر آب هوادهی شده انجام گرفت.

از آنجا که در مورد محدوده کشندگی کلوئید نانوذرات نقره ساخت شرکت نانونصب‌پارس در ماهی گورخری اطلاعاتی از قبل وجود داشت (Johari *et al*., 2014)، در راستای حفظ حقوق حیوانات و عدم کشتن ماهی‌های بیشتر، در این مطالعه آزمایش تعیین محدوده کشندگی این نانوماده انجام نگردید و از اطلاعات قبلی استفاده شد. برای انجام آزمایشات اصلی، تعداد ۲۱۶ قطعه ماهی در ۹ تیمار ۸ عددی و هر تیمار در ۳ تکرار، به مدت ۹۶ ساعت در معرض ۸ غلظت شامل ۰/۰۱۰۰، ۰/۰۱۲۵، ۰/۰۱۵۰، ۰/۰۱۷۵، ۰/۰۲۰۰، ۰/۰۲۲۵، ۰/۰۲۵۰، ۰/۰۲۷۵ و ۰/۰۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات نقره به همراه گروه شاهد (آب فاقد نانوذرات) قرار گرفتند. در مورد نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز ابتدا یک آزمون محدود[5] با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر انجام پذیرفت و با توجه به عدم مشاهده مرگ و میر طی ۹۶ ساعت در این غلظت و طبق رهنمود استاندارد شماره ۲۰۳ OECD، آزمایشات بیشتر ضروری به نظر نرسید.

[1] Anatase
[2] Rutile
[3] Brookite
[4] Range finding test
[5] Limit test

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]
[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

در مرحله بعد به منظور بررسی اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر سمیت حاد نانوذرات نقره، تعداد ۲۱۶ عدد ماهی گورخری در ۱۸ تیمار ۶ عددی و هر تیمار در ۲ تکرار، به مدت ۹۶ ساعت در معرض غلظت‌های متفاوت هر یک از این نانوذرات قرار گرفتند، به طوری که در هر یک از این تیمارها، غلظت نانوذرات TiO_2 ۱۰ برابر غلظت نانوذرات نقره در نظر گرفته شد (جدول ۱).

در تمام آزمایشات بعد از رویارویی ماهیان با ترکیبات شیمیایی مورد مطالعه، تلفات ماهیان طی ۹۶ ساعت و هر ۲۴ ساعت یک بار شمارش و ثبت می‌شد و ماهیان مرده از آب خارج می‌شدند. در پایان، نتایج به دست آمده از شمارش مرگ و میر ماهیان با استفاده از نسخه ۱/۵ نرم افزار EPA Probit Analysis (منتشر شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیر غلظت های کشنده محاسبه گردید.

جدول ۱. غلظت‌های نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و نانوذرات نقره در تیمارهای مختلف به منظور بررسی اثر همزمان سمیت این دو نانوماده در ماهی دانیو گورخری (*Danio rerio*)

شماره تیمار	غلظت ماده مورد آزمایش (میلی‌گرم در لیتر)	
	نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم	نانوذرات نقره
۱	۰/۱۰	۰/۰۱
۲	۰/۱۲	۰/۰۱۲
۳	۰/۱۴	۰/۰۱۴
۴	۰/۱۶	۰/۰۱۶
۵	۰/۱۸	۰/۰۱۸
۶	۰/۲۰	۰/۰۲۰
۷	۰/۲۲	۰/۰۲۲
۸	۰/۲۴	۰/۰۲۴
۹	۰/۲۶	۰/۰۲۶
۱۰	۰/۳۰	۰/۰۳۰
۱۱	۰/۳۵	۰/۰۳۵
۱۲	۰/۴۰	۰/۰۴۰
۱۳	۰/۴۵	۰/۰۴۵
۱۴	۰/۵۰	۰/۰۵۰
۱۵	۰/۵۵	۰/۰۵۵
۱۶	۰/۶۰	۰/۰۶۰
۱۷	۰/۶۵	۰/۰۶۵
۱۸	۰/۷۰	۰/۰۷۰

نتایـج

در ماهیان گروه شاهد در مطالعه حاضر هیچ نوع مرگ و میری مشاهده نگردید. در ماهیان تیماری که در معرض پایین‌ترین غلظت نانو ذرات نقره (۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر) و بدون حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم قرار گرفته بودند نیز تلفات مشاهده نگردید و تلفات در این گروه از غلظت ۰/۰۱۲۵ نانوذرات نقره شروع گردید. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، غلظت کشنده میانی نانوذرات نقره در ماهیانی که بدون حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، در معرض آن ماده قرار گرفته بودند، برابر ۰/۰۱۴ برآورد گردید. در نقطه مقابل در گروهی که ماهیان در معرض هم‌زمان نانوذرات نقره و دی‌اکسید تیتانیوم قرار گرفته بودند، تا غلظت ۰/۰۲۶ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات نقره، هیچگونه تلفاتی مشاهده نشد و تلفات در این گروه از غلظت ۰/۰۳ میلی‌گرم در لیتر

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

نانوذرات نقره شروع شد. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، غلظت کشنده میانی نانوذرات نقره در ماهیانی که همزمان در معرض نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم نیز قرار گرفته بودند، برابر ۰/۰۴۴ برآورد گردید. بر این اساس، حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در آب باعث کاهش بیش از ۳ برابری میزان سمیت حاد نانوذرات نقره در ماهی دانیو گورخری می‌شود. با دقت بیشتر در اعداد جداول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که غلظتی از نانوذرات نقره که در حالت عادی باعث مرگ حدود ۹۹ درصد جمعیت ماهیان می‌شود، در حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تنها باعث مرگ کمتر از ۵ درصد ماهیان می‌گردد.

جدول ۲. مقادیر غلظت‌های کشنده (LC) ۹۶ ساعته نانوذرات نقره و حدود اطمینان مربوط به هر یک از آن‌ها در ماهی دانیو گورخری (*Danio rerio*).

شاخص سمیت	غلظت (میلی‌گرم در لیتر)	حدود اطمینان (۹۵٪) (میلی‌گرم در لیتر)	
		حد پایین	حد بالا
LC 1	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۱۰
LC 5	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱
LC 10	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲
LC 15	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲
LC 50	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۵
LC 85	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۲۰
LC 90	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱
LC 95	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۴
LC 99	۰/۰۲۵	۰/۰۲۲	۰/۰۳۰

جدول ۳. مقادیر غلظت‌های کشنده (LC) ۹۶ ساعته نانوذرات نقره در حضور نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و حدود اطمینان مربوط به هر یک از آن‌ها در ماهی دانیو گورخری (*Danio rerio*).

شاخص سمیت	غلظت (میلی‌گرم در لیتر)	حدود اطمینان (۹۵٪) (میلی‌گرم در لیتر)	
		حد پایین	حد بالا
LC 1	۰/۰۲۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۷
LC 5	۰/۰۲۸	۰/۰۲۲	۰/۰۳۲
LC 10	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵	۰/۰۳۴
LC 15	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸	۰/۰۳۶
LC 50	۰/۰۴۴	۰/۰۴۰	۰/۰۴۷
LC 85	۰/۰۵۹	۰/۰۵۴	۰/۰۶۸
LC 90	۰/۰۶۳	۰/۰۵۷	۰/۰۷۴
LC 95	۰/۰۷۰	۰/۰۶۲	۰/۰۸۶
LC 99	۰/۰۸۵	۰/۰۷۲	۰/۱۱۲

بحث

هدف پژوهش حاضر بررسی اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر سمیت حاد نانوذرات نقره در ماهی دانیو گورخری به عنوان یک گونه مدل مهره‌دار آبزی بود. نتایج این پژوهش نشان داد که حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در آب باعث کاهش سمیت نانوذرات نقره می‌گردد. همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد، تنها مطالعه مشابه که در آن به بررسی اثر هم‌زمان این دو نانو ماده پرداخته

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

شده است، توسط Zou و همکاران (۲۰۱۴) و بر روی یک موجود تک یاخته انجام شده است که نتایج آن مطالعه نیز بسته به تابش یا عدم تابش نور، متفاوت بوده است. علاوه بر مطالعه مذکور، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در مورد اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر سمیت سایر آلاینده‌های شیمیایی در آبزیان انجام شده است که نتایج این مطالعات نیز بسته به نوع ماده شیمیایی و گونه‌ی آبزی مورد بررسی متفاوت بوده است. به عنوان مثال Rosenfeldt و همکاران (۲۰۱۴)، نشان دادند که حضور نانوذرات TiO_2 باعث افزایش سمیت حاد یون‌های نقره و کاهش سمیت حاد یون‌های مس و آرسنیک در کک آبی (*Daphnia magna*) می‌گردد. در نقطه مقابل، Fan و همکاران (۲۰۱۱)، نشان داده بودند که حضور نانوذرات TiO_2 باعث افزایش سمیت حاد یون‌های مس در دافنی می‌گردد. همچنین Tan و همکاران (۲۰۱۲)، نشان دادند که حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در آب باعث افزایش جذب و نگهداری یون‌های روی و کادمیوم در دافنی می‌شود. Hartmann و همکاران (۲۰۱۰)، نیز نشان دادند که اگرچه حضور ذرات ۱۰ نانومتری دی‌اکسید تیتانیوم در آب احتمالاً به دلیل جذب سطحی و کاهش دسترسی زیستی، باعث کاهش سمیت کادمیوم در جلبک آب شیرین (*Pseudokirchneriella subcapitata*) می شود، اما حضور ذرات ۳۰ نانومتری TiO_2 احتمالاً به دلیل عملکرد به عنوان حامل، سبب افزایش سمیت این فلز سنگین می‌گردند. در مطالعه دیگری Balbi و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که حضور نانوذرات TiO_2 تأثیری بر دسترسی زیستی و تجمع کادمیوم در دوکفه‌ای دریایی (*Mytilus galloprovincialis*) ندارد. Rosenfeldt و همکاران (۲۰۱۵)، نشان دادند که حضور نانوذرات TiO_2 در آب باعث کاهش سمّیت مس در *Gammarus fossarum* می‌گردد و علت احتمالی این پدیده را جذب سطحی یون‌های آزاد مس بر روی ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بیان نمودند. Miao و همکاران (۲۰۱۵)، نشان دادند که حضور نانوذرات TiO_2 در آب باعث افزایش تجمع زیستی و سمّیت سرب در ماهی دانیو گورخری می‌شود و بیان کردند که احتمالاً نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان یک ناقل عمل کرده و باعث افزایش انتقال سرب به بدن ماهی می‌شوند. مطالعات Sun و همکاران (۲۰۰۷) و Zhang و همکاران (۲۰۰۷)، نیز به ترتیب نشان دهنده افزایش تجمع زیستی آرسنات و کادمیوم در ماهی کپور معمولی در حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بود؛ این پژوهشگران علت این پدیده‌ها را افزایش انتقال این فلزات به بدن ماهی از طریق جذب بر روی آبشش‌ها و همچنین ورود به دستگاه گوارش (بر اثر بلعیده شدن ذرات) بیان نمودند. Tan و Wang (۲۰۱۴)، نیز نشان دادند که سمّیت یون‌های روی و کادمیوم در دافنی در حضور نانوذرات دی‌اکسید افزایش می‌یابد. نتایج یک مطالعه دیگر نیز نشان داد که اگرچه حضور یا عدم حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم باعث تغییر در سمیت یا جذب زیستی کادمیوم در کرم سیاه کالیفرنیایی (*Lumbriculus variegates*) نمی‌شود ولی حضور این نانوماده بدون تأثیر بر سمّیت کادمیوم، باعث افزایش جذب و تجمع زیستی این فلز در دافنی می‌شود (Hartmann *et al*., 2012). Chen و همکاران (۲۰۱۵)، نیز با بررسی اثر حضور همزمان نانوذرات TiO_2 و یون مس در یک نوع سیانوباکتری آب شیرین (*Microcystis aeruginosa*) نشان دادند که این نانوماده باعث کاهش دسترسی زیستی به مس شده و در نتیجه سمیت آن را کاهش می‌دهد. از طرفی Yang و همکاران (۲۰۱۴)، نشان دادند که نانوذرات TiO_2 به عنوان حامل یون‌های فلز سنگین کادمیم عمل کرده و تجمع زیستی این ماده را در بدن تک یاخته مژه‌دار (*Tetrahymena thermophila*) افزایش می‌دهد. Della Torre و همکاران (۲۰۱۵)، احتمال می‌دهند که کاهش اثرات سمی کادمیوم بر دوکفه‌ای *Mytilus galloprovincialis* در حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، به دلیل رقابت این دو ماده در جذب از طریق آبشش باشد. بر اساس مطالعه Dalai و همکاران (۲۰۱۴)، غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم عاملی تعیین کننده در کاهش یا عدم کاهش شدت سمّیت کروم در یک نوع ریزجلبک آب شیرین (*Scenedesmus obliquus*) می‌باشد.

همانطور که از مرور نتایج این مطالعات برمی‌آید، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم عملکردی متفاوت در ایجاد سمّیت سایر آلاینده‌های فلزی در آبزیان دارند، به طوری که حضور این نانوذرات در آب در بعضی موارد سبب کاهش و در بعضی باعث افزایش سمیت فلزات در موجودات آبزی شده است. بر این اساس به نظر می‌رسد که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوذرات (همچون غلظت و اندازه)، گونه‌ی آبزی مورد بررسی، نوع آلاینده فلزی و مدت زمان انجام آزمایش از جمله عوامل تأثیرگذار بر نحوه‌ی عملکرد کاهشی یا افزایشی نانوذرات TiO_2 می‌باشند. همچنین با مرور این مطالعات به نظر می‌رسد که افزایش سمّیت آلاینده‌های شیمیایی در حضور نانوذرات TiO_2 به دلیل نقش این نانوماده به عنوان حامل ماده آلاینده و تسهیل ورود آن به بدن آبزی می‌باشد و در نقطه مقابل

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

کاهش سمّیت مواد شیمیایی در حضور نانوذرات TiO_2، احتمالاً به دلیل کاهش دسترسی زیستی ماده آلاینده از طریق اتصال به نانوماده و ته‌نشین شدن آن در محیط آبی اتفاق می‌افتد. در مجموع با توجه به نتایج پژوهش حاضر و مرور نتایج مطالعات پیشین به نظر می‌رسد که اگرچه با اطمینان می‌توان گفت که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر سمّیت سایر آلاینده‌های شیمیایی تأثیرگذار هستند، اما شناخت کامل ساز و کارهای مؤثر در این رابطه نیازمند انجام بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر می‌باشد. در این رابطه باید به نوع ماده آلاینده، نوع موجود زنده مورد بررسی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذرات TiO_2 توجه نمود. همچنین از آنجا که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در حضور نور و به ویژه اشعه فرابنفش فعال‌تر می‌شوند، پیشنهاد می‌شود که اثرات تاریکی، حضور نور مرئی و نور ماوراء بنفش بر سمّیت آلاینده‌های شیمیایی در حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد بررسی قرار گیرد.

منابـع

Abbasi, E., Milani, M., Fekri Aval, S., Kouhi, M., Akbarzadeh, A., Tayefi Nasrabadi, H., Nikasa, P., Joo, S.W., Hanifehpour, Y., Nejati-Koshki, K. 2016. Silver nanoparticles: synthesis methods, bio-applications and properties. Critical reviews in microbiology. 42(2): 173-180..

Asghari, S., Johari, S.A., Lee, J.H., Kim, Y.S., Jeon, Y.B., Choi, H.J., Moon, M.C., Yu, I.J. 2012. Toxicity of various silver nanoparticles compared to silver ions in *Daphnia magna*. Journal of Nanobiotechnology. 10: 10-14.

Balbi, T., Smerilli, A., Fabbri, R., Ciacci, C., Montagna, M., Grasselli, E., Brunelli, A., Pojana, G., Marcomini, A., Gallo, G., Canesi, L. 2014. Co-exposure to n-TiO_2 and Cd^{2+} results in interactive effects on biomarker responses but not in increased toxicity in the marine bivalve *M. galloprovincialis*. Science of the Total Environment. 493: 355-364.

Banerjee, S., Dionysiou, D.D., Pillai, S.C. 2015. Self-cleaning applications of TiO_2 by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. Applied Catalysis B: Environmental. 176: 396-428.

Chen, J., Qian, Y., Li, H., Cheng, Y., Zhao, M. 2015. The reduced bioavailability of copper by nano-TiO2 attenuates the toxicity to *Microcystis aeruginosa*. Environmental Science and Pollution Research. 22(16): 12407-12414.

Dalai, S., Pakrashi, S., Bhuvaneshwari, M., Iswarya, V., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A. 2014. Toxic effect of Cr(VI) in presence of n-TiO_2 and n-Al_2O_3 particles towards freshwater microalgae. Aquatic Toxicology. 146: 28-37.

Della Torre, C., Balbi, T., Grassi, G., Frenzilli, G., Bernardeschi, M., Smerilli, A., Guidi, P., Canesi, L., Nigro, M., Monaci, F., Scarcelli, V., Rocco, L., Focardi, S., Monopoli, M., Corsi, I. 2015. Titanium dioxide nanoparticles modulate the toxicological response to cadmium in the gills of *Mytilus galloprovincialis*. Journal of Hazardous Materials. 297: 92-100.

Fan, W., Cui, M., Liu, H., Wang, C., Shi, Z., Tan, C., Yang, X. 2011. Nano-TiO_2 enhances the toxicity of copper in natural water to *Daphnia magna*. Environmental Pollution. 159(3): 729-734.

Hartmann, N.B., Legros, S., Von der Kammer, F., Hofmann, T., Baun, A. 2012. The potential of TiO2 nanoparticles as carriers for cadmium uptake in *Lumbriculus variegatus* and *Daphnia magna*. Aquatic Toxicology. 118: 1-8.

Hartmann, N.B., Von der Kammer, F., Hofmann, T., Baalousha, M., Ottofuelling, S., Baun, A. 2010. Algal testing of titanium dioxide nanoparticles--testing considerations, inhibitory effects and modification of cadmium bioavailability. Toxicology. 269(2-3): 190-197.

Hill, A.J., Teraoka, H., Heideman, W., Peterson, R.E. 2005. Zebra fish as a model vertebrate for investigating chemical toxicity. Toxicological Sciences. 86(1): 6-19.

Hosseini, S.J., Habibi, L., Johari, S.A., Sourinejad, I. 2014. Acute toxicity of synthetic colloidal silver nanoparticles produced by laser ablation method to Eastern mosquitofish, *Gambusia holbrooki*. Journal of Aquatic Ecology. 4(2): 30-34.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]

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

Johari, S.A., Sourinejad, I., Bärsch, N., Saed-Moocheshi, S., Kaseb, A., Nazdar, N. 2014. Does physical production of nanoparticles reduce their ecotoxicity? A case of lower toxicity of AgNPs produced by laser ablation to zebrafish (*Danio rerio*). International Journal of Aquatic Biology. 2(4): 188-192.

Keller, A.A., McFerran, S., Lazareva, A., Suh, S. 2013. Global life cycle releases of engineered nanomaterials. Journal of Nanoparticle Research. 15(6): 1-17.

Mazarei, S., Sajjadi, M.M., Sourinejad, I., Johari, S.A., Asadi, M. 2015. Effect of lethal concentration of nano silver in *Aphanius dispar*. Journal of Aquatic Ecology. 4(4): 110-115.

Miao, W., Zhu, B., Xiao, X., Li, Y., Dirbaba, N.B., Zhou, B., Wu, H. 2015. Effects of titanium dioxide nanoparticles on lead bioconcentration and toxicity on thyroid endocrine system and neuronal development in zebrafish larvae. Aquatic Toxicology. 161: 117-126.

OECD. 1992. OECD guidelines for the testing of chemicals. Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France.

Piccinno, F., Gottschalk, F., Seeger, S., Nowack, B. 2012. Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials for Europe and the world. Journal of Nanoparticle Research. 14: 1109-1120.

Rosenfeldt, R.R., Seitz, F., Schulz, R., Bundschuh, M. 2014. Heavy metal uptake and toxicity in the presence of titanium dioxide nanoparticles: a factorial approach using *Daphnia magna*. Environmental Science and Technology. 48(12): 6965-6972.

Rosenfeldt, R.R., Seitz, F., Zubrod, J.P., Feckler, A., Merkel, T., Lüderwald, S., Bundschuh, R., Schulz, R., Bundschuh, M. 2015. Does the presence of titanium dioxide nanoparticles reduce copper toxicity? A factorial approach with the benthic amphipod *Gammarus fossarum*. Aquatic Toxicology. 165: 154-159.

Sun, H., Zhang, X., Niu, Q., Chen, Y., Crittenden, J.C. 2007. Enhanced accumulation of arsenate in carp in the presence of titanium dioxide nanoparticles. Water, Air, & Soil Pollution. 178: 245-254.

Tan, C., Fan, W.H., Wang, W.X. 2012. Role of titanium dioxide nanoparticles in the elevated uptake and retention of cadmium and zinc in *Daphnia magna*. Environmental Science and Technology. 46(1): 469-476.

Tan, C., Wang, W.X. 2014. Modification of metal bioaccumulation and toxicity in *Daphnia magna* by titanium dioxide nanoparticles. Environmental Pollution. 186: 36-42.

Tavana, M., Kalbassi, M.R, Abedian Kenari, A., Johari, S.A. 2014. Assessment of assimilation and elimination of silver and TiO2 nanoparticles in *Artemia franciscana* in different dalinities. Journal of Oceanography. 5(19): 91-103.

Woodrow Wilson Database. 2014. Nanotechnology consumer product inventory. http://www.nanotechproject.org/ cpi/about/analysis/. Accessed September. 24, 2015.

Yang, W.W., Wang, Y., Huang, B., Wang, N.X., Wei, Z.B., Luo, J., Miao, A.J., Yang, L.Y. 2014. TiO_2 nanoparticles act as a carrier of Cd bioaccumulation in the ciliate *Tetrahymena thermophila*. Environmental Science and Technology. 48(13): 7568-7575.

Zhang, X., Sun, H., Zhang, Z., Niu, Q., Chen, Y., Crittenden, J.C. 2007. Enhanced bioaccumulation of cadmium in carp in the presence of titanium dioxide nanoparticles. Chemosphere. 67(1): 160-166.

Zou, X., Shi, J., Zhang, H. 2014. Coexistence of silver and titanium dioxide nanoparticles: enhancing or reducing environmental risks? Aquatic Toxicology. 154: 168-175.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-07-03]

[DOR: 20.1001.1.23222751.1395.5.4.11.2]