مروری بر تاثیرات منفی نانو مواد مهندسی‌ساز در محیط زیست

جابر اعظمی

گروه علوم محیط زیست، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

چکیده

فناوری نانو درک و کنترل ماده در ابعادی تقریباً بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است که در آن مفاهیم منحصر به فردی از کاربردهای جدیدی را ممکن می‌سازد. اگرچه دامنه کاربرد نانومواد مهندسی‌ساز در علوم مختلف در حال افزایش است، اما نگرانی‌های زیادی در رابطه با پتانسیل خطرات نانو ذرات برای سلامتی انسان و محیط زیست وجود دارد. به طوری‌که مطالعات حاکی از آن است که برخی از نانو مواد مهندسی‌ساز می‌توانند موجب بروز آسیب‌های از جمله: شکستن ملکول DNA و موتاسیون کروموزومی، استرس‌های اکسیداتیو، التهاب و فیبریوزیس سیستم تنفسی و ... در موجودات زنده شوند. هدف از این مطالعه بررسی آثار منفی نانومواد مهندسی‌ساز در اجزا مختلف محیط زیست است که با توجه به تعداد مقالات منتشر شده، در بازه زمانی ۲۰۱۰ – ۲۰۰۰ بیان گردیده است. تعداد مطالعاتی که در زمینه آثار منفی نانومواد مهندسی‌ساز گزارش شده است، نسبت به پژوهشهای که درباره اثرات مثبت این مواد صورت گرفته، بسیار محدود می‌باشد. لذا قبل از استفاده از این مواد، ضرورت تام دارد تا مطالعه‌ی پیرامون پیامدهای منفی و آثار منفی احتمالی استفاده از آنها بر محیط زیست و موجودات زنده به خوبی انجام شود و بدین وسیله از بروز فاجعه‌های زیست محیطی در آینده جلوگیری گردد. در این راستا تدوین استانداردهای زیست محیطی استفاده از نانو مواد مختلف ضرورت دارد.

واژه‌های کلیدی: *: نانو مواد مهندسی‌ساز، ایمنی زیستی، تاثیرات منفی.*

ایمیل نویسنده مسئول : j.aazami@znu.ac.ir

۱. مقدمه

نانو مواد مهندسی به هر ماده‌ی می‌گویند که دقیقاً طوری ساخته شده است که اجزای ساختاری و علمی در سطح یا درون خود دارد که خیلی از آنها در یک بعد یا بیشتر در محدوده ۱۰۰ نانومتر به پایین هستند [۱]. نانوذرات در مقایسه با ذرات بزرگتر از خود و مواد شیمیایی مشابه می‌توانند دارای خصوصیات متفاوت فیزیکی و شیمیایی باشند، بطوریکه مقدار مشخصي از ماده در مقیاس نانومتري به دلیل داشتن ۵۰-۴۰ درصد اتمها در سطح خود، بسیار فعال تر از همان مقدار ماده با ابعاد بزرگتر است [۲-۴]. نانو ذرات را از لحاظ منشأ مي‌توان به سه دسته ذیل تقسیم کرد :

نانو ذرات طبیعي که از طرق مختلف مانند آتش‌سوزي جنگل‌ها و یا فوران آتشفشان‌ها ساخته مي‌شوند.

نانو ذرات مهندسی‌ساز (ENPs[1]) که به علت خواص جدید فیزیکي - شیمیایي، واکنش‌پذیري بالاتر و ... تهیه مي‌شوند.

طی سالهای اخیر فناوری جدید نانو در ایران و کشورهای مختلف جهان وارد عرصه‌های مختلف علمی و صنعتی شده است و به دلیل خواص شگرفی که در نانو مواد می‌باشد، این فناوري به سرعت رو به گسترش است. به طوری که سرمایه گذاری‌های زیادی در بخش‌های خصوصی و دولتی در بکارگیری نانوتکنولوژی توسعه یافته و شبیه دیگر تکنولوژی‌های مدرن، نانوتکنولوژی دارای پتانسیل بالایی در جهت سودآوری برای بشر است [۵]. اگرچه دامنه کاربرد نانوتکنولوژی در علوم مختلف در حال افزایش است، اما نگرانی‌های زیادی در رابطه با پتانسیل خطرات نانو ذرات برای سلامتی انسان و محیط زیست وجود دارد که این نگرانی‌ها بیشتر به خاطر اندازه‌ی کوچک آنها و خصوصیات جدید آنهاست [۶]. ضمناً در تکاپوی تحولات علوم و فناوری‌های نانو، مطالعات پایه ای در زمینه خطرات احتمالی نانومواد برای سلامتی انسان و محیط زیست بسیار حائز اهمیت است. بنابراین در این مطالعه به معرفی مختصری از اثرات منفی برخی نانو مواد مهندسی‌ساز در محیط زیست پرداخته می‌شود.

۱- مواد و روش‌ها:

تحقیق حاضر براساس بررسی آثار منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰ انجام گرفته است. تعداد مقالات از اطلاعات به ثبت رسیده در پایگاه‌های داده SCI[2], Scopus, Google Scholar & SID[3] بدست آمده است. همچنین تجزیه و تحلیل داده‌های این مطالعه، در فضای نرم افزار Excel 2007 انجام شد.

[1] Engineering Nano Particles

[2] Science Citation Index

[3] Scientific Information Database

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۲۳

۲- بحث و نتیجه‌گیری:

هرچند، امروزه نانوتکنولوژی کاربردهای گسترده ای دارد (جدول شماره ۱)؛ اما با توسعه روز افزون تولید انواع مختلف نانومواد مهندسی‌ساز، افزایش پتانسیل رهایش آنها به محیط زیست و تاثیر آنها روی سلامتی اکوسیستم‌ها موجبات افزایش نگرانی‌هایی را در رابطه با اثرات منفی این مواد در پی داشته است. لذا توجه به آثار منفی این مواد نوپا در محیط زیست و خصوصاً موجودات زنده حائز اهمیت است و این گونه نگرانی‌ها منجر به ارائه راه حل‌هایی توسط آژانس‌های حفاظتی شده است.

جدول شماره ۱ : حوزه‌های کاربردی نانومواد مهندسی‌ساز [۷]

حوزه	کاربردهای مهم
خودرو سازی	کاتالیست، رنگ، لاستیک، حسگر، اطاق خودرو
مصالح ساختمانی	مواد اولیه، عایق کاری، پوشش‌های سطحی
الکترونیک	نمایشگر، حافظه اطلاعات، دیودهای لیزری، فیبر نوری، ترانسفور، عایق الکتریکی
مهندسی مواد	پوشش حفاظتی برای وسایل، ماشین‌ها و روغن موتور
صنایع غذایی	بسته بندی، حسگرهای بهداشتی، افزودنی‌ها، آب میوه گیر
پزشکی	انتقال دارو، سیستم‌های فوریت‌های پزشکی، کاشت دارو، عوامل آنتی باکتری، سنسور درمان داخلی
منسوجات	پوشش لباس، تولید پوشاک‌های مدرن
شیمی	فیلترهای برای رنگ، مواد ترکیبی، آماده سازی کاغذ، چسبنده، سیال‌های جاذب
آرایشی	ضد آفتاب، خمیر دندان، کرم‌های پوستی و سایر مواد آرایشی
انرژی	وسایل روشنایی، سلول‌های سوخت، سلول‌های خورشیدی، باتری‌ها، خازن
محیط زیست	ردیاب زیست محیطی، پالایش آب‌های زیرزمینی، حسگرهای حساس به سموم
منازل	پوشش‌های سرامیکی برای فلزات، خوشبوکننده، شیشه شوی، سرامیک، فلزات
ورزشی	راکت‌های تنیس، توپ گلف، توپ تنیس، قایق‌های غریق نجات، عایق‌های ورزشی
نظامی	مواد خنثی کننده برای سلاح‌های شیمیایی، ضد گلوله

به طور کلی نانومواد مهندسی‌ساز را به پنج دسته تقسیم می‌کنند [۸] که در ذیل به آثار منفی هر یک، اشاره مختصری می‌شود.

یک دسته از نانومواد مهندسی‌ساز، نانولوله‌های کربنی (CNTs[4]) هستند که اولین بار در سال ۱۹۸۵ ساخته شدند. این نانومواد در صورت تماس با انسان می‌توانند همانند آزبست عمل کرده و موجب اختلال در سیستم تنفسی انسان شوند. در بعضی از مطالعات نشان داده شده که نانولوله‌های کربنی می‌توانند باعث التهاب، فیبریوزیس، استرس اکسیداتیو و تغییرات توکسیکولوژیک و مولکولی در شش‌ها و سلولهای داخلی حیوانات خشکی داشته باشند [9]. از جمله نانو لوله‌های کربنی، نانو لوله‌های کربنی تک دیواره (SWCNT[5]) هستند که تولید این مواد در سال ۲۰۱۱، برابر ۱۰۰۰ تن تخمین زده می‌شود [7].

بنابراین احتمال رهایش این نانولوله‌های کربنی به محیط زیست و متعاقب آن، تاثیرات منفی این مواد بر محیط زیست بسیار زیاد می‌باشد. همچنین در مطالعه ای که Carreo-Sanchez و همکاران در سال ۲۰۰۷ انجام دادند به این نتیجه رسیدند که نانولوله‌های کربنی چند دیواره موجب التهاب در بافت‌های موش می‌شود [۱۰]. همچنین در مطالعه ای که Smith و همکاران در سال ۲۰۰۷روی بچه ماهی قزل آلای رنگین کمان انجام دادند به این نتیجه رسیدند که نانولوله‌های کربنی تک دیواره باعث ادم ، هیپرپلازیا و تغییر سلولهای موکوسی سلولهای آبششی می‌شود [۱۱]. همچنین استرس اکسیداتیو در آبشش، مغز و کبد این ماهیان شد. فولرن‌های C60 موجب استرس‌های اکسیداتیو، پراکسیداسیون لیپیدها در مغز بچه ماهی باس می‌شود [۱۲].

دومین دسته از نانومواد، نانومواد اکسیدهای فلزی هستند و از جمله این مواد که به میزان زیادی در صنعت تولید و مصرف می‌شوند، می‌توان نانوذرات تیتانیوم اکسید، آلومینیوم اکسید، اکسیدهای آهن، اکسیدسیلیس، اکسید روی و اکسید سلنیوم اشاره کرد. به عنوان مثال مصرف نانوذرات تیتانیوم اکسید در لوازم آرایشی ، سالانه ۱۰۰۰ تن در بازده زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۵ تخمین زده شده است. از جمله آثار منفی این دسته نانومواد می‌توان به آسیب‌های ریوی اشاره کرد. همچنین عبور این نانومواد از سدهای هوایی- خونی و ورود آنها به درون خون به اثبات رسیده است. با قرار گرفتن موش در معرض نانوذرات تیتانیوم اکسید نشان داده شد که این نانوذرات می‌توانند موجب آسیب‌های ریوی همچون التهاب، فیبروزیس و تومور در شش‌های این موجود شوند. نانوذرات روی (Zn) می‌تواند موجب جراحت گلو و تنگی نفس و سردرد و تب و چایمان در انسان شود [۱۳]. Warheit و همکاران در سال ۲۰۰۶ در مطالعه ای که روی موش انجام دادند به این نتیجه رسیدند که سیلیسیم دی اکسید (Sio2) موجب التهاب طولانی مدت در شش‌های آن می‌شود [۱۴]. همچنین نانوذرات اکسید آهن (FeO) موجب بد شکلی اسکلت خرگوش و موش می‌شود [۱۵].

سومین دسته از نانومواد مهندسی‌ساز، کوانتوم دات‌ها هستند که به عنوان نانوکریستالهای نیمه رسانا نیز شناخته شدند. این دسته از نانومواد دارای هسته فعال می‌باشند که توسط پوششی مثل سیلیکا احاطه شده است و این پوشش از اکسیداسیون هسته جلوگیری کرده و باعث افزایش میزان نور تولیدی می‌شود(۸). سمیت حاصل از نانومواد کوانتوم دات توسط فاکتورهای اندازه، بار سطحی، ترکیب و نوع پوشش تعیین می‌گردند. در معرض قرار گرفتن موش با کوانتوم دات CdSe/ZnS پوشش داده شده با آلبومین موجب تاثیرات نامطلوبی روی لنفوسیت‌های این موجود می‌شود [۱۶]. در مطالعه ای Green & Howman در سال ۲۰۰۵ بیان شده که ا گر نور UV همراه با کوانتوم دات CdSe/ZnS به موجود تابانده شود، موجب آسیب به ۵۶% از کل DNA موجود زنده می‌شود. نور و دما مهمترین عوامل تاثیر گذار روی میزان سمیت این نانومواد خواهند بود [۱۷].

[4] Carbon Nano Tubes
[5] Single Wall Carbon Nano Tube

دسته دیگر از نانومواد مهندسی‌ساز فلزی zero valent می‌باشند. این مواد معمولاً با کاهش نمک‌های فلزی تولید می‌شوند. خصوصیات فیزیکی این نانومواد به نوع ماده کاهنده و شرایط کاهشی آنها وابسته است. از جمله این مواد نانوذرات نقره ، آهن، مس و طلا می‌باشد. به طوریکه نانوذرات نقره به دلیل داشتن خواص ضد میکرواورگانیسمی به میزان خیلی زیادی در صنعت تولید و به مصرف می‌رسد. به طوری که ۵۶% نانو مواد تولید شده در جهان را نانو ذرات نقره تشکیل می‌دهند [۱۸] (نمودار شماره یک). با بررسی تاثیر نانو ذرات نقره بر روی جنین ماهی گورخری (Zebra fish) متوجه شدند که این نانو ذرات می‌توانند از کانال کوریون تخم عبور کرده و به فضای کوریون تخم وارد شوند و تاثیراتی در بدشکلی ماهیان تفریخ شده داشته باشند. در این مطالعه مشخص شد که هر یک از ماهیان گورخری بررسی شده نسبت به مقادیر مختلف نانو ذرات نقره عکس العمل‌های فردی متفاوتی نشان می‌دهند [۲]. مطالعه سم‌شناسی سلولی روی سلولهای کبدی ماهی قزل آلای رنگین‌کمان در شرایط in vitro نشان داد که نانوذرات نقره موجب کاهش قابل ملاحظه قوام غشای سلولهای کبدی و فعالیت‌های متالولیکی آنها می‌شود [۱۹]. قرار گرفتن ماهی مداکای ژاپنی (Oryzias latipes) در معرض نانوذرات نقره باعث تنش‌های سرطان زا و همچنین آسیب به DNA سلولهای این ماهی می‌شود [۲۰].

نمودار شماره ۱ : درصد تولید مهمترین نانومواد مهندسی‌ساز در جهان

پنجمین دسته از نانومواد مهندسی‌ساز دندریمرها (dendrimers) می‌باشند. این دسته از نانومواد پلیمرهایی با عملکردهای مختلف را شامل می‌شوند که اندازه، توپولوژی، انعطاف پذیری و وزن مولکولی آنها قابل کنترل است. دندریمرها بر حسب گروههاي عاملي داراي سمیت متفاوت هستند. براي مثال دندریمرهاي پلی آمیدوآمین (PAMAM) باعث تغییرات مورفولوژيكي در گلبول‌هاي قرمز بعد از يك ساعت می‌شود. در بررسي سمیت دندریمرها در شرایط invitro پارامترهائي همچون سمیت سلولي، اثرات خون شناسی، جذب سلولي دندریمرها و سرنوشت آنها در درون سلول‌ها را مورد بررسي قرار مي‌دهند.

همچنین این دسته از نانومواد به شدت موجب اختلال در فعالیت‌های کبدی می‌شوند [۹, ۲۱].

۳- سرنوشت نانو مواد در محیط زیست

سرنوشت نانومواد در هوا : مطالعات انجام شده نشان دادند انتقال نانوذرات در هوا در نهایت به بدن موجودات زنده نفوذ می‌کنند. ذرات نانو با ابعاد ایرودینامیکی <۱۰۰ نانومتر بخوبی از قوانین انتشار گازها پیروی کرده و پتانسیل بالای برای ورود به بدن موجودات زنده از طریق استنشاق دارند [۲۲]. بنابراین نانومواد با ابعاد کوچکتر دارای پتانسیل بیشتری جهت جذب از طریق استنشاق توسط انسان و دیگر موجودات زنده می‌باشند بطور کلی نانو مواد می‌توانند به مدت طولانی در هوا به حالت معلق باقی بمانند، اما در نهایت توسط قطرات ریز آب موجود در هوا جذب و به زمین رسوب می‌کنند [۲۳]. خیلی از نانوذرات موجود در اتمسفر تحت تاثیر نور خورشید فعال می‌شوند ودر نتیجه مستعد برای تخریب می‌شوند که هنوز مطالعه و بررسیهای کافی در این زمینه انجام نشده است [۲۳, ۲۴]. همچنین این نانومواد علاوه براینکه می‌توانند خود به طور مستقیم روی موجودات زنده تاثیر بگذارند، می‌توانند به عنوان یک کاتالیزور عمل کرده و سمیت دیگر مواد آلاینده موجود در اتمسفر را به مراتب افزایش دهند [۲۵].

سرنوشت نانومواد در خاک : سرنوشت نانومواد‌ی که به محیط‌های خشکی (خاک) وارد می‌شوند به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها بستگی دارد. به دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم این مواد، جذب زیادی توسط خاک صورت می‌گیرد [۲۶]. به طور کلی ورود اکثر نانومواد مهندسی‌ساز به خاک باعث تاثیر روی فون باکتریایی، پوشش گیاهی و سایرموجودات زنده می‌شود. با ورود برخی نانومواد‌ی که دارای خواص ضد میکرواورگانیسمی هستند اثرات منفی بسیاری روی سایر موجودات خواهد داشت. از بین رفتن باکتریهای مفید خاک برای مثال باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن ، جهش ژنتیکی و در نهایت تولید باکتریهای جدید، نابودی قارچها، گیاهان و ... در محیط‌های خاک می‌شوند. در نتیجه‌ی هر کدام از این تاثیرات مضر ناشی از این نانومواد روی موجودات زنده باعث اختلال در تعادل اکولوژیکی می‌شود [۲۷]. به عنوان مثال نانوذرات آلومینیوم و اکسید روی با ورود به خاک از رشد ریشه گیاهان جلوگیری کرده و می‌توانند پوشش گیاهی آن منطقه را از بین ببرند [۲۶].

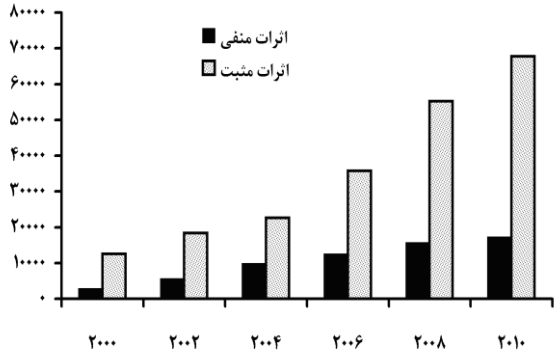
سرنوشت نانومواد در آب : سرنوشت نانومواد در محیط‌های آب شور و شیرین به دلیل تفاوت فشار اسمزی و میزان املاح آنها می‌تواند بسیار متفاوت باشد [۹]. بطور کلی عوامل زیر در چگونگی عمل و سرنوشت نانومواد در محیط‌های آبی موثر باشند [۷].

۴- انحلال پذیری آنها در آب

واکنش پذیری نانومواد مهندسی‌ساز با مواد شیمیایی موجود در آب

میان کنش نانومواد و پروسه‌های بیولوژیکی

در اکوسیستم‌های آب شور به دلیل نیروهای کشش یونی بسیار بالایی که وجود دارد نانومواد با ورود به این آب‌ها تشکیل توده می‌دهند و از ستون آب به رسوبات کف انتقال می‌یابند. بنابراین در محیطهای دریایی موجودات کف زی بیشتر مستعد تاثیرات احتمالی نانومواد می‌باشند [۹]. نانومواد به خاطر کاهش نسبت سطح به حجم خود به آسانی به رسوبات کف می‌رسند و همچنین این قابلیت را دارند که از سطح رسوبات جدا شده و دوباره به ستون آب وارد شوند [۱۱]. بعضی از نانومواد می‌توانند توسط موجودات زنده و غیر زنده موجود در آب جذب شوند و از ستون آب خارج شوند. همچنین برخی از نانومواد تجزیه یا تخریب آنها توسط هیدرولیز و تجزیه نوری صورت می‌گیرد، بنابراین تعدادی از نانومواد موجود در سطح آب، توسط نور خورشید تجزیه و خواص شیمیایی و نانویی خود را از دست می‌دهند [۲۴]. علی رغم اینکه بعضی نانومواد در محیط آبها ممکن است تجزیه شوند ولی نانومواد دیگری وجود دارد که مدت‌ها ممکن است در محیط آب و ستون آب باقی مانده و خواص خود را حفظ نمایند [۷]. به عنوان مثال فولرن‌های C60 می‌توانند به مدت طولانی در ستون و محیط آب بدون هیچ گونه تغییری باقی بمانند. یکی دیگر دلایلی که موجب ثبات نانومواد مهندسی‌ساز در ستون آب می‌شود جذب آنها توسط هومیک اسید است. میکرو لایه‌های سطحی آب دریاها که دارای میزان بالایی از ترکیبات کربوهیدرات و لیپیدی و پروتئینی است می‌توانند به نانومواد چسبیده و آنها را مسافت‌های زیادی جابجا نمایند [۷, ۲۶]. در بررسی‌های که در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰ انجام گرفت، مشخص شد که مقالات و مطالعات زیادی در ارتباط با کاربردها (اثرات مثبت) نانومواد مهندسی‌ساز در جهان انجام شده است؛ اما پژوهش‌های که به بررسی آثار و پیامدهای منفی این مواد بپردازند، در مقایسه با کاربردهایشان بسیار اندک است. (نمودار شماره ۲)



نمودار شماره ۲ : تعداد مطالعات انجام شده پیرامون نانو مواد مهندسی‌ساز در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰

همان گونه که در بالا اشاره گردید این مواد علاوه بر داشتن فواید و سودمندی‌های زیاد برای بشر، می‌توانند اثرات جبران ناپذیری بر محیط زیست داشته باشند، بنابراین مطالعه سمیت و خطرات نانومواد، راه‌های احتمالی ورود این مواد به اکوسیستم‌ها، موجودات زنده و سرنوشت آنها در محیط زیست برای تعیین یک برنامه سالم، حفاظتی و علمی بسیار ضروری است و باید از هم اکنون اثرات بالقوه کاربردهاي گوناگون نانو ذرات بر سلامت انسانها و محیط زیست به درستي مورد مطالعه قرار گيرد تا در آينده پيامدهاي منفي اين فناوري و كنترل آن جهت تامين ايمني زيستی به حداقل رسد.

۵- منابع:

[1] Kreyling WG, Semmler-Behnke, M, Chaudhry, Q; A complementary definition of nanomaterial. Nano Today. 5:165-8, 2010.

[2] Farkas J, Christian, P, Urrea, JAG, Roos, N, Hassellöv, M, Tollefsen, KE, et al.; Effects of silver and gold nanoparticles on rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) hepatocytes. Aquatic Toxicology. 96:44-52, 2010.

[3] Farré M, Gajda-Schrantz, K, Kantiani, L, Barceló, D; Ecotoxicity and analysis of nanomaterials in the aquatic environment. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 393:81-95, 2009.

[4] Gagné F, André, C, Skirrow, R, Gélinas, M, Auclair, J, Van Aggelen, G, et al.; Toxicity of silver nanoparticles to rainbow trout: a toxicogenomic approach. Chemosphere. 89:615-22, 2012.

[5] Klaine SJ, Alvarez, PJ, Batley, GE, Fernandes, TF, Handy, RD, Lyon, DY, et al.; Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. Environmental Toxicology and Chemistry. 27:1825-51, 2008.

[6] Chaudhry Q, Castle, L; Food applications of nanotechnologies: an overview of opportunities and challenges for developing countries. Trends in Food Science & Technology. 22:595-603, 2011.

[7] Tiede K, Hassellöv, M, Breitbarth, E, Chaudhry, Q, Boxall, AB; Considerations for environmental fate and ecotoxicity testing to support environmental risk assessments for engineered nanoparticles. Journal of Chromatography A. 1216:503-9, 2009.

[8] Hristozov D, Malsch, I; Hazards and risks of engineered nanoparticles for the environment and human health. Sustainability. 1:1161-94, 2009.

[9] Macnaghten P, Kearnes, MB, Wynne, B; Nanotechnology, governance, and public deliberation: what role for the social sciences? Science communication. 27:268-91, 2005.

[10] Smith CJ, Shaw, BJ, Handy, RD; Toxicity of single walled carbon nanotubes to rainbow trout,(Oncorhynchus mykiss): respiratory toxicity, organ pathologies, and other physiological effects. Aquatic toxicology. 82:94-109, 2007.

[11] Oberdörster E; Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass. Environmental health perspectives.1058-62, 2004.

[12] Gordon T, Chen, LC, Fine, JM, Schlesinger, RB, Su, WY, Kimmel, TA, et al.; Pulmonary effects of inhaled zinc oxide in human subjects, guinea pigs, rats, and rabbits. The American Industrial Hygiene Association Journal. 53:503-9, 1992.

[13] Warheit DB, Webb, TR, Sayes, CM, Colvin, VL, Reed, KL; Pulmonary instillation studies with nanoscale TiO2 rods and dots in rats: toxicity is not dependent upon particle size and surface area. Toxicological sciences. 91:227-36, 2006.

[14] Bourrinet P, Bengele, HH, Bonnemain, B, Dencausse, A, Idee, J-M, Jacobs, PM, et al.; Preclinical safety and pharmacokinetic profile of ferumoxtran-10, an ultrasmall superparamagnetic iron oxide magnetic resonance contrast agent. Investigative radiology. 41:313-24, 2006.

[15] Hoshino A, Hanaki, K-i, Suzuki, K, Yamamoto, K; Applications of T-lymphoma labeled with fluorescent quantum dots to cell tracing markers in mouse body. Biochemical and biophysical research communications. 314:46-53, 2004.

[16] Green M, Howman, E; Semiconductor quantum dots and free radical induced DNA nicking. Chem Commun.121-3, 2005.

[17] Choi O, Clevenger, TE, Deng, B, Surampalli, RY, Ross, L, Hu, Z; Role of sulfide and ligand strength in controlling nanosilver toxicity. Water research. 43:1879-86, 2009.

[18] Lee KJ, Nallathamby, PD, Browning, LM, Osgood, CJ, Xu, X-HN; In vivo imaging of transport and biocompatibility of single silver nanoparticles in early development of zebrafish embryos. ACS nano. 1:133-43, 2007.

[19] Chae YJ, Pham, CH, Lee, J, Bae, E, Yi, J, Gu, MB; Evaluation of the toxic impact of silver nanoparticles on Japanese medaka (Oryzias latipes). Aquatic Toxicology. 94:320-7, 2009.

[20] Rejeski D, Lekas, D; Nanotechnology field observations: scouting the new industrial west. Journal of Cleaner Production. 16:1014-7, 2008.

[21] Aitken R, Creely, K, Tran, C. Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review, Institute of Occupational Medicine, Health and Safety Executive (HSE). UK, Research Report 274; 2004.

[22] Colvin VL; The potential environmental impact of engineered nanomaterials. Nature biotechnology. 21:1166-70, 2003.

[23] HANDY RO, RICHARD; Viewpoint: formulating the problems for environmental risk assessment of nanomaterials. Environmental Science & Technology. 41:5582-8, 2007.

[24] Yang L, Watts, DJ; Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. Toxicology letters. 158:122-32, 2005.

[25] Hyung H, Fortner, JD, Hughes, JB, Kim, J-H; Natural organic matter stabilizes carbon nanotubes in the aqueous phase. Environmental Science & Technology. 41:179-84, 2007.

[26] Moore M; Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the health of the aquatic environment? Environment International. 32:967-76, 2006.

[27] Carrero-Sanchez J, Elias, A, Mancilla, R, Arrellin, G, Terrones, H, Laclette, J, et al.; Biocompatibility and toxicological studies of carbon nanotubes doped with nitrogen. Nano Letters. 6:1609-16, 2006.