سمت‌وسوی تحقیقات فناوری نانو برای نیازهای جامعه در سال ۲۰۲۰

نگاه به گذشته و دورنمای آینده

مسائل ایمنی، بهداشتی و زیست‌محیطی فناوری‌نانو

ترجمه و تلخیص: رضا ابراهیمی[1]، امین چوخاچی‌زاده مقدم[2]

۱. کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی- بیومواد، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گزارش «سمت‌وسوی تحقیقات فناوری نانو برای نیازهای جامعه در ۲۰۲۰» که به‌وسیله‌ی مرکز جهانی ارزیابی فناوری[1] و با حمایت بنیاد ملی علوم[2] تهیه شده است، دومین گزارش در مورد سمت‌و سوی تحقیقات فناوری‌نانو است که بعد از اولین گزارش به‌نام «نانو۱» که در سال ۱۹۹۹ منتشر شد در سال ۲۰۱۱ منتشر شده است.

این گزارش که به گزارش «نانو۲» موسوم است به بررسی پیشرفت‌های علم وفناوری‌نانو در دهه گذشته می‌پردازد و فرصت‌های پیش رو برای توسعه فناوری نانو در ۱۰ سال آینده را نشان می دهد. در این گزارش دستاوردهای فناوری نانو از سال ۲۰۰۰ خلاصه شده است. از آن مهم تر هدف‌های مورد انتظار برای تحقیقات فناوری‌نانو در ۱۰ سال آینده و چگونگی رسیدن به آنها در قالب نیازهای اجتماعی توضیح داده شده است.

گزارش«نانو۲» در برگیرنده دیدگاه‌های متخصصان برجسته دانشگاهی، صنعتی و دولتی است که در مجامع تخصصی برگزار شده در ایالات متحده و دیگر نقاط جهان بین مارس و جولای ۲۰۱۰ شرکت کرده‌اند. مخاطبین این گزارش جامعه دانشگاهی، بخش خصوصی، سیاست‌گذاران و کارگزاران دولتی و به طور عمومی تمام افراد مرتبط با فناوری‌نانو هستند.

مقاله حاضر به بررسی مسائل ایمنی، بهداشتی و زیست‌محیطی فناوری نانو شامل: چشم‌انداز، پیشرفت‌های حاصل شده و وضع کنونی، اهداف آینده، چالش‌ها و راه‌حل‌های آنها، نیازمندی‌های زیرساختی، سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز، مباحث جدید، اولویت‌های آینده، و الزامات اجتماعی می پردازد.

۱ چشم‌انداز دهه آینده

ایمنی، بهداشت و محیط زیست (EHS) نانو مواد به صورت زیرتعریف شده است: «مجموعه‌ای از حوزه‌های مرتبط با «بهداشت محیط‌زیست، بهداشت انسانی، بهداشت حیوانی و ایمنی»، هنگامی که این عبارات در متون ارزیابی و مدیریت ریسک مورد استفاده قرار می‌گیرند».

در اینجا برای راحتی، از عبارت «ایمنی نانو»[3] برای ارجاع به تحقیقات و فعالیت‌های صورت گرفته درباره ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست در حوزه علم، فناوری و مهندسی نانو مقیاس استفاده می‌شود. درادامه پیشرفت‌های اصلی در ایمنی نانو که طی ده سال گذشته حاصل شده و همچنین چالش‌های عمده، توسعه‌ها و موفقیت‌هایی که می‌توان انتظار حصول آن را در طی ده سال آینده داشت، به صورت مروری بر مسائل مهم بیان خواهد شد.

۱.۱ تغییرات در چشم‌انداز طی ده سال گذشته

در حال حاضر درک ما از مواجهه با نانو مواد

مهندسی شـده (ENM)[۴] در محل کار، آزمایشگاه، خانه، و در محیط بسـیار گسـترده‌تر از قبل شده اسـت، اما تا امروز هیچ نوع بیماری خاص انسانی یا رویداد ناگوار زیست‌محیطی تایید شده که ناشی از این مواد باشـد، گزارش نشـده است. شناخت و آگاهی از خطرات نانو ماده مهندسی شده به تدریج در طول زمان تغییر پیدا کرده و از مفهوم کلی «ریز خطرناک اسـت»، به این درک واقعی رسیده است که ایمنی نانو ماده مهندسی شده بایستی با توجه به مصرف خاص، کاربردها، مواجهه‌ها، و ویژگی‌های خاص هر نانو ماده بررسی شود.

به‌دلیـل اینکه مـواد آلی، غیرآلـی، و هیبریدی مختلف، می‌توانند با تنوع در اندازه، شکل، مساحت سطح، نوع عامل‌های سطحی، و ترکیب شیمیایی تولید شـوند و به‌دلیل قابلیت دستکاری گسترده در ترکیبات و ساختارها که در کاربردهای مختلف زیسـت‌محیطی و بیولوژیکـی می‌تواند به صورت دینامیک اصلاح شود، بیشتر نانومواد مهندسی شده را نمی‌توان به عنوان یک گونه یکسـان مولکولی، شـیمیایی، یا مواد توصیف نمود. یک پیشـرفت مفهومی عمده در ارزیابی ایمنی نانو تشخیص این مسـاله بوده اسـت که ویژگی‌های دینامیک مواد نقش تعیین‌کننده‌ای در وضعیت، انتشار، مواجهه، و ایجاد خطر در حد فاصـل نانو- بیو ایفا می‌کند. چون تعداد زیـادی از مـواد و ویژگی‌های جدید برای آنها بـه طور مداوم در حـال معرفی و ورود می‌باشند، توسعه چهارچوب علمی قوی برای درک ارتباط این ویژگی‌ها با نتایج ایمنی الزامی اسـت. به دلیل اینکه تولید دانـش نیازمند زمان و توافق است، تصمیم‌گیری منطقی درایمنی نانو تدریجی خواهد بود. البته این فرایند می‌تواند با پیاده‌سازی چارچوب‌های غربالگری نانوماده مهندسـی شـده با سـرعت و بازدهـی بالا و همچنین اسـتفاده از روش‌های محاسـباتی برای کمک به مدل‌سازی و ارزیابی خطرات شتاب بگیرد.

به‌دلیـل ویژگی‌های گوناگون و منحصربه‌فرد نانو مواد مهندسی شده، پیاده‌سازی ایمن فناوری نانو، کاری چند رشـته‌ای اسـت که فراتر از مدل‌های متعارف ارزیابی ریسـک و مواجهه می‌باشد. علاوه بر تحقیقات درباره ویژگی‌ها، جامعه فعالان ایمنی نانو نیازمند اطلاعات نانو مواد مهندسـی شده در زمینه مصارف تجاری، سرنوشـت و حمل و نقل، انباشتگی زیستی، آنالیزهای چرخه عمر است که تمامی اینها برای پیاده‌سـازی ایمن فناوری نانو، نیازمند هماهنگی دقیق، تصمیم‌گیری سـازگار و تدریجی دارنـد. در حال حاضر ضرورت و اهمیت جمـع‌آوری داده‌هـا و اطلاعات بـرای محققان، تولیدکننـدگان، مصرف‌کنندگان، و قانون‌گذاران، جهت تنظیم سیاسـت‌های مقرراتی مناسب برای نانو مواد مهندسی شده درک شده است.

۲.۱ چشم‌انداز برای ده سال بعد

با توجه به رشـد سـریع فناوری نانو در جامعه (به دلیل کاربردهای بسـیار زیـاد آن) و احتمال اینکه مواجهه‌های: اکوسیستمی، حیوانی و انسانی وسیعی در حال رخ دادن باشند، توسعه چهارچوب علمی معتبـر و یکپارچه بـرای ارزیابی خطرات، مواجهه‌هـا، و ریسـک‌ها در ابعادی متناسـب با رشـد این فناوری ضروری اسـت. به جای انجام آزمون‌هـای ایمنـی نانو برای یک مـاده در یک دوره زمانی، در آینـده چهارچوب‌های غربالگری با ظرفیت و توان عملیاتی بالا ایجاد خواهند شـد که بررسـی مقادیر زیادی از نانو مواد را به صورت همزمان فراهم خواهند نمود.

بنابراین، چشـم‌انداز ده سال آینده شامل کشف و توسـعه: رابطه بین ویژگـی و فعالیت نانو ماده مهندسی شده، دسـتگاه‌های تولید داده با حجم بالا، و روش‌های محاسـباتی مورد اسـتفاده برای ایجـاد حوزه‌های دانش، مدل‌سـازی ریسـک، و قابلیت‌هـای نانو - انفورماتیک بـه منظور کمک بـه تصمیم‌گیری مطمئن اسـت. ایـن اطلاعات باید بـا علم آینده‌نگری و چهارچوب‌های مدیریت ریسک تجمیع شوند تا ارتباط ویژگی‌های نانومواد مهندسی شده و مواد خاص به خطرات، سرنوشت و حمـل ونقـل، مواجهـه، و بیماری‌های حاصله مشخّص شود. اطمینان از توسـعه ایمن فناوری نانـو در طی دهه بعد، نیازمند توسـعه روش‌های تحلیلی حسـاس و جدید، ابزارهـا و پروتکل‌های پذیرفته شده برای غربالگری، تشخیص، شناسایی، و پایش مواجهه نانو ماده مهندسی شده در محل کار، آزمایشـگاه، خانه، و محیط‌زیسـت است. ما همچنین نیازمند توسعه نظارت موثر، بازدارندگی، و روش‌های حذف نانو مواد در سیسـتم‌های دفع زباله می‌باشیم. جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد دانش جدید به طراحی مواد ایمن‌تـر منجر می‌گردد و تولید سـبز می‌تواند فناوری نانو را به سنگ بنای توسـعه پایدار تبدیل نماید. توسعه ایمن فناوری نانو به همـکاری نزدیک بین دانشـگاه، صنعت، دولت، و عمـوم مردم نیـاز دارد. در این صورت همگی این شانس را دارند تا موفقیت این فناوری در سودرسـانی به جامعه، اقتصاد و محیط زیست را ببینند.

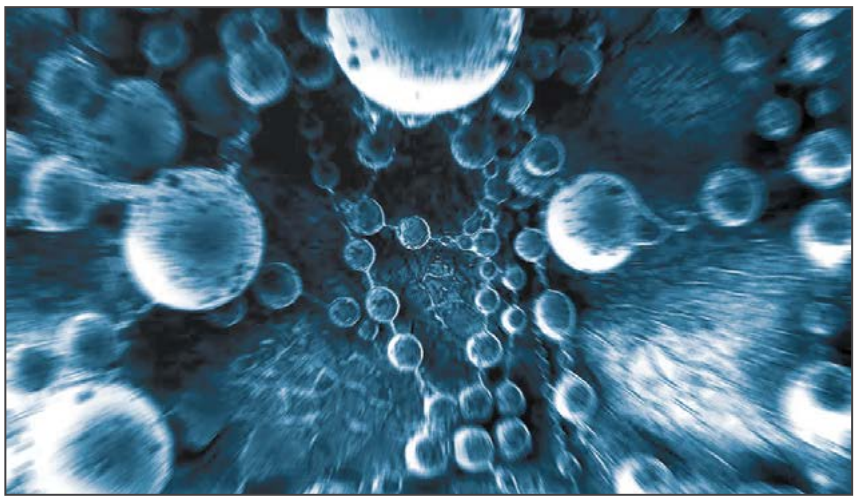
۲ پیشرفت‌های به دسـت آمده طی ده سال گذشته و وضعیت فعلی

طی ده سال گذشته، فناوری نانو به دلیل پتانسیل عظیـم در ایجاد پیشـرفت‌های متحول‌کننده در الکترونیـک، سـلول‌های خورشـیدی کم‌هزینه، نسل بعدی ذخیره‌ساز انرژی، و روش‌های درمانی هوشـمند بـرای سـرطان، در میـان حوزه‌های کاربردی به رسـمیت شناخته شـده است. اولین تلاش‌هـای جمعی در آگاهـی از ایمنی نانو، بعد از ایجـاد طرح ملی فناوری نانو (NNI) در سـال ۲۰۰۰ با سـازمان‌دهی چندین کارگاه آموزشـی آغاز شـد که محیط زیست، نانو زیست فناوری، و پیامدهای اجتماعی را مورد توجه قرار داده بود. به هر حال، زمان قابل ملاحظه‌ای برای درک و ادغام رشـته‌های علمی مورد نیاز برای شناخت تاثیرات مخرب ممکن این فناوری جدید بر روی انسـان و محیط زیسـت مورد نیاز است. برخی از مراحل اولیه این فرایند شـناخت و ادغام درکشور امریکا به شرح ذیل است:

- در سـال ۲۰۰۳، برنامـه ملـی سم‌شناسـی اولیـن آزمون‌ها بر روی نانـو ذرات، نانولوله‌ها، و نقاط کوانتومی را انجـام داد و آژانس حفاظت از محیط‌زیست (EPA) اولین برنامه در حوزه ایمنی نانو را اعلام کرد.
- در دسـامبر سـال ۲۰۰۴، زیـر کمیته فرعی علوم، مهندسـی، و فناوری نانو مقیاس (NSET) از کمیته فناوری در شـورای علوم و فناوری ملی، برنامه راهبردی طـرح ملی فناوری نانو (NNI) را برای سـال‌های فدرال مالی ۲۰۱۰-۲۰۰۶منتشر نمود که در آن علم و فناوری زیسـت‌محیطی به خوبی ارائه شده است.
- در اوایـل دهه‌ای که تمرکز بر روی ایمنی نانو شروع شـد، چندین مرکز دانشـگاهی هماهنگ مانند مرکز بیولوژیکی و زیسـت محیطی فناوری نانـو (CBEN) در دانشـگاه رایـس و برنامه‌های آموزشی تحقیقاتی نانو سـم شناسی در دانشگاه کالیفرنیا تشکیل شد.
- از پایـان سـال ۲۰۰۸، سـرعت پژوهش‌ها و اقدامات سیاست‌های نظارتی در حوزه ایمنی نانو افزایش یافت. همچنین تعداد مقالات منتشر شده که ارزیابی ریسـک ایمنی نانو را مورد توجه قرار می‌دهند، افزایش پیدا کرد وبه بیش از ۲۵۰ مقاله در سـال ۲۰۰۹ در مقایسه با نزدیک به ۵۰ مقاله در سال ۲۰۰۴ رسید.

از نقطه نظر ایمنی نانو، محققان پیشرفت‌هایی در توسـعه غربالگری سم‌شناسی برای پرکاربردترین نانو مواد مهندسـی شـده داشـته‌اند و داده‌های جدیـدی دربـاره اهمیت چند ویژگـی مواد که ممکن اسـت در سـطح نانو مقیاس خطراتی را ایجاد نمایند، به دسـت آمده اسـت. این مساله نگرانی‌های جدیـدی را در مورد خطرات ممکن، سرنوشت و حمل ونقل، مواجهه، و تجمع زیستی برانگیخته است. چالش قابل توجه در حال حاضر استانداردسـازی، هماهنگ‌سـازی، و پیاده‌سازی غربالگـری و پایش ایمنی نانو، جمع‌آوری داده‌ها، روش‌های کارآمـد کاهش خطـر، و یک راهبرد حاکمیتی هماهنگ برای اطمینان از پیاده‌سـازی ایمن این فناوری می‌باشـد. با توجـه به معرفی قریب الوقوع نانو سیسـتم‌های فعال و وسایل نانو مهندسی شده (شامل مجموعه یکپارچه‌ای از چند نانو مواد مختلف کـه کارکردهای پیچیده‌تری را نسبت به آن مواد در حالت منفرد انجام می‌دهد)، توسعه روش‌های مضاعف بررسی ایمنی نانو برای مواد کامپوزیتی ضروری خواهد بود.

سیاست‌گذاران در سراسـر جهان نشان داده‌اند که بـرای انجام تغییرات منطقی در چارچوب‌های



موجود برای مدیریت ریسک مواد شیمیایی و نانو مواد اطلاعات کافی وجود ندارد. پس از یک دوره نسبتا طولانی عدم فعالیت، نهادهای ملی و بین‌المللی شروع به همکاری کرده‌اند و در حال حاضر در زمینه قانون‌گذاری فعال‌تر می‌باشند. عمده فعالیت‌های قانون‌گذاری شامل تلاش برای جمع‌آوری داده‌های سنجیده‌تر، استانداردسازی جهانی، و هماهنگ‌سازی ارزیابی ریسک برای فعال کردن سازمان‌های قانون‌گذار برای تنظیم سیاست‌ها می‌باشند. نمونه‌هایی از سازمان‌هایی که برنامه‌های جمع‌آوری داده‌ها و طرح‌های بهترین اقدام[5] برای مدیریت ریسک را در دستور کار خود دارند، می‌توان سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) و سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO) را نام برد.

در ادامه عمده پیشرفت‌های انجام شده در زمینه مطالعه ایمنی نانو برای چند نانو ماده اصلی بررسی خواهد شد.

۱.۲ جمع‌آوری داده، پایش و نظارت بر نانولوله‌های کربنی

مواجهه تنفسی نانولوله‌های کربنی در محل کار به دلیل: استفاده گسترده نانولوله‌های کربنی در فرایندهای تولید، حجم بالای تولید، سهولت آئروسل شدن آنها بر اثر فعالیت‌هایی مانند بسته‌بندی، توزیع، خردسازی، و جابجایی، یک نگرانی بالقوه است. تولید انبوه و رواج استفاده از نانولوله‌های کربنی و قابلیت توزیع بالا، همراه با گسترش پایگاه‌های محصول و مصرف‌کننده منجر به افزایش قابل ملاحظه در تعداد مطالعات و راهنماها و دستورالعمل‌های ایمنی نانو شده است. با وجود آنکه هیچ شواهد بالینی مبنی بر اینکه مواجهه نانو لوله‌کربنی موجب فیبروز ریوی یا مزوتلیوم در انسان شود، تا به امروز وجود ندارد، موسسه ملی ایمنی و بهداشت حرفه آمریکا (NIOSH) پس از بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی جوندگان متعدد به این نتیجه رسیده است که بر اساس شواهد جمعی، مواجهه انسان با نانو لوله کربنی در محل کار امکان خطر برای ریه‌های انسان به همراه خواهد داشت. موسسه ملی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای (NIOSH) نسل جدیدی از شمارنده ذرات موجود در هوا را برای پایش و تعیین کمی نانولوله‌های کربنی معلق در هوا در محل کار راه اندازی کرده است. ارزیابی‌های شغلی نه تنها سطوح ذرات موجود در هوا، بلکه حدود ردیابی(LOD) را می‌تواند تثبیت نماید. موسسه ملی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای (NIOSH) با انجام ارزیابی ریه حیوانی و برون یابی داده‌ها به انسان با استفاده از نسبت‌های مساحت سطح حفره دار مخاطی[6]، حد مواجهه را معین کرده است و نشان داده است که اقدامات کنترلی مانند تهویه، ماسک طبی، و فیلترهای HEPA، می‌توانند مواجهه در محل کار را به طور موثری به کمتر از حدود تشخیص (LOD) کاهش دهند. لازم به ذکر است که دستورالعمل‌های عمومی موسسه ملی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای (NIOSH) برای نانولوله‌های کربنی بدین معنی نیست که تمام فرمولاسیون‌های نانولوله کربنی مضر هستند. در متونی که تعداد آنها نیز رو به افزایش است، آمده است که در مطالعات حیوانی صورت گرفته نانو لوله‌های کربنی می‌توانند عاملدار شده و به طور ایمن در تصویر برداری و به عنوان ابزارهای دارو رسانی مورد استفاده قرار بگیرند.

۲.۲ جمع‌آوری داده، پایش، و نظارت بر نانوذرات ZnO، TiO_2، و SiO_2

نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، اکسید روی (ZnO)، و سیلیکا نیز نسبتا به خوبی تعیین مشخصات شده‌اند که اطلاعات در دسترس و کاملی در مورد آنها موجود است و تنظیم کنندگان مقررات برای مورد توجه قرار دادن نگرانی‌های ریسک و خطرات در این مواد آمادگی خوبی دارند. برای مثال، دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) چندین دهه به عنوان رنگدانه مورد استفاده قرار گرفته و شکل نانو ذره آن از سال ۱۹۸۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. موسسه ملی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای (NIOSH) برای ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)راهبردهای مدیریت ریسک موثری را تعیین کرده است.

تحقیقات گسترده در مورد استفاده از دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی در کرم‌های ضدآفتاب و لوازم آرایش بهداشتی نشان داده است که این نانومواد خطرات کمی را برای مصرف‌کنندگان به همراه خواهند داشت. در حالی که برخی از پرسش‌های بی‌پاسخ درباره خطر پایان عمر[7] دی‌اکسید تیتانیوم وجود دارد، هیچ مدرکی وجود ندارد که نشان دهد گسترش این ذرات به سیستم‌های تصفیه آب یا محیط‌زیست، خطرات بیشتری را نسبت به مواد میکرونی با گرید رنگ دانه (که مصرف آنها گستردگی بیشتری نیز دارند) به همراه داشته باشد. البته دی‌اکسید تیتانیوم نانوساختار، هنوز رسماً با عنوان «ماده بالقوه مضر» برای محیط‌زیست درنظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که خطر پایان عمر برای نانو اکسید روی با دی اکسید تیتانیوم متفاوت است و در متون از آن با عنوان «بسیار سمی» برای محیط زیست درنظر گرفته شده است.

۳.۲ جمع‌آوری داده، پایش، و نظارت بر نقره نانو ساختار

محققان و تنظیم کنندگان در حال بررسی دقیق‌تر نانو نقره هستند، زیرا که یکی از رایج‌ترین نانو مواد مهندسی شده در محصولات با فناوری نانو می‌باشد. نقره نانو ساختار به عنوان آفت کش برای فعالیت‌های ضد میکروبی کاربرد دارد. به دلیل آنکه محصولات حاوی نانو نقره اغلب مدعی خواص آفت کشی هستند، EPA این نوع محصولات تحت قانون مصوبه فدرال مواد کشنده حشرات، قارچها و جوندگان (FIFRA)[8] ارزیابی می‌شوند. از دیدگاه سم شناسی، در نگرانی‌های اعلام شده، به همان اندازه که به خطرات مربوط به کارگران و مصرف کنندگان پرداخته شده، به پتانسیل خطرات آن در محیط زیست به ویژه برای گونه‌های آبزیان پرداخته نشده است.

۳ اهداف، موانع و راه‌حل‌ها برای ۱۰-۵ سال بعد

۱.۳ توسعه روش‌های معتبر غربالگری ایمنی نانو و پروتکل‌های هماهنگ که مدیریت ریسک استاندارد نانو ماده را متناسب با رشد فناوری نانو ارتقاء دهد

با وجود آنکه برخی از پیشرفت‌ها در توسعه غربالگری سم شناسی نانو مواد مهندسی شده که به وفور تولید شده‌اند صورت پذیرفته است، هنوز هم فقدان پروتکل‌ها و روش‌های استاندارد برای ارزیابی و مدیریت مسائل ایمنی نانو وجود دارد. این مساله منجر به ارزیابی خطرات نانو ماده مهندسی شده، با نتایج متناقض و غیر قابل تکرار شده و بحث‌های زیادی را در مورد بهترین روش انجام

شکل ۱. مثالی از یک رویکرد تکرار شونده و سازگارپذیر برای سیاست مقرراتی نانو

غربالگری سمیت برای ارزیابی ریسک و اهداف قانون‌گذاری موجب شده است. موانع اصلی برای توسعه پروتکل‌های غربالگری معتبر و هماهنگ عبارتند از:عدم دانش کافی، فقدان اصطلاحات استاندارد برای تقسیم بندی نانو مواد، فقدان مواد استاندارد برای استفاده به عنوان شاهد، نرخ بالای تولید مواد با ویژگی‌های جدید، و بحث در مورد اینکه آیا آزمون‌های برون‌تن و درون‌تن روشی معتبر برای غربالگری خطر را ارائه می‌دهند. برای پرداختن به این موانع، راه حل‌هایی که احتمالا در ده سال آینده ایجادخواهند شد، وجود دارد. این راه حل‌ها عبارتند از:

- توسعه پروتکل‌ها و راهبردهای معتبر برای ارزیابی خطر که تعادل بین آزمون درون تن و برون تن، چارچوب‌های غربالگری بیولوژیکی مرتبط، و روش‌های با بازدهی بالا را مدنظر قرار دهند.
- توسعه ابزار مناسب برای دوزیمتری نانو مواد مهندسی شده که فراتر از بررسی‌های متعارف دوز-جرم، تعداد ذرات، و دوز- مساحت سطحی (SAD) باشد
- فناوری بهبود یافته برای ردگیری حضور، سرنوشت، و حمل و نقل نانو مواد و بهبود ارزیابی مواجهه
- آنالیز چرخه عمر

۲.۳ توسعه راهبردهای کاهش ریسک که بتواند به طور تدریجی از طریق جمع آوری داده‌های تجاری محصولات‌نانویی،فعالیت‌های‌قانون‌گذاری،وتحقیقات ایمنی که‌به‌طور‌مستقیم‌به‌تصمیم‌گیری‌مرتبط‌باشند، اجرا گردد

مانع اصلی برای اجرای تشخیص جامع ریسک‌ها، کمبود دانش کافی درباره: خطرات نانو مواد مهندسی شده، سرنوشت و حمل و نقل، دوز سنجی، و چگونگی انجام ارزیابی مواجهه نانو مواد مهندسی شده است. این موارد از پیاده‌سازی منطقی راهبردی فراگیر و کامل در زمینه مدیریت ریسک برای اکثر نانو مواد مهندسی شده جلوگیری می‌کند.

برای کاهش خطرات شناخته شده، ترویج برای پذیرش عمومی و گسترده فناوری نانو همراه با توسعه راهبردهای پیاده‌سازی ایمن آن با استفاده از زیرساخت‌ها و قابلیت‌های موجود و در دسترس ضروری است. برای مدیریت خطرات مرتبط با نانو مواد مهندسی شده، بهتر است داده‌های کاربردی تجاری جمع‌آوری و منتشر گردد تا محققان ایمنی بتوانند به طور مستقل آنالیزهای مواجهه و چرخه عمر انجام دهند. تحقیقات ایمنی بهتر است بر اساس نیازهای موجود برای تصمیم‌گیری آگاهانه در زمینه مدیریت ریسک و خطر و همچنین تصمیم‌گیری‌های مقرراتی انجام شوند. عدم ارتباط موثر میان تحقیقات در زمینه ریسک با تصمیم‌گیری‌ها منجر به اقدامات و راهبردهایی شده است که نیازمندی‌های سیاست‌گذاری را به طور کامل در بر نمی‌گردد. در نهایت، توجه به سهم روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری برای رتبه بندی و مدل‌سازی ریسک نیز مهم و ضروری است.

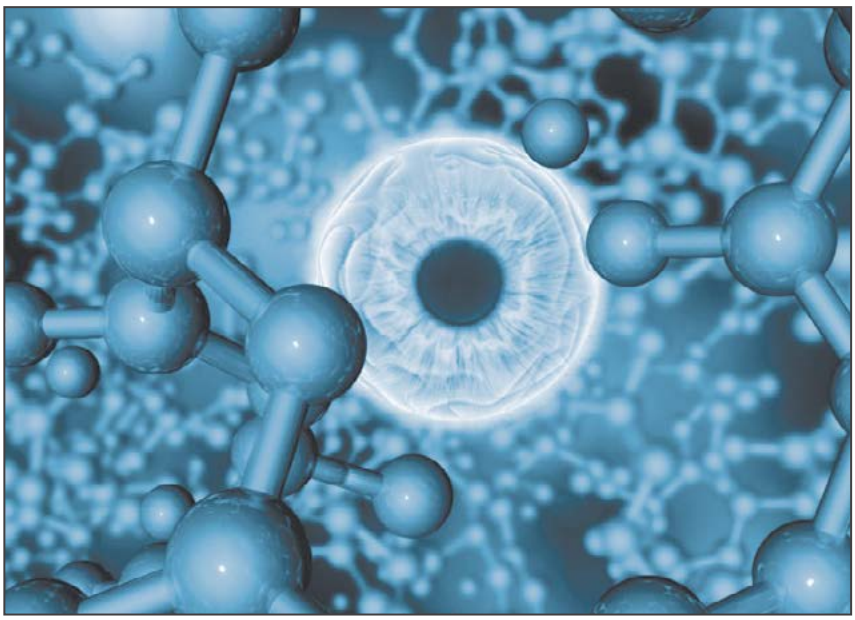
۳.۳ توسعه یک‌راهبرد‌کاملا‌تعریف‌شده‌برای‌نظارت بر ایمنی نانو که برای تولید دانش و تصمیم‌گیری گام‌به‌گام سازگار و مناسب باشد

در میان ذینفعان مختلف بین‌المللی جایگاه‌های متنوعی به لحاظ سیاست‌گذاری مقرراتی برای نانو مواد مهندسی شده وجود دارد. این جایگاه‌ها به طور کلی به سیاست‌گذاران، بنگاه‌ها، دانشگاه‌ها، و سازمان‌های جامعه مدنی (CSO) تقسیم می‌گردند در حال حاضر یک راهبرد یکپارچه برای نظارت برایمنی نانو در آمریکا وجود ندارد. بر اساس شواهد بهترین رویکرد برای تصمیم‌گیری است، اما برخی از موانع آن شامل عدم دانش کافی در زمینه خطرات نانو ماده مهندسی شده، دوزسنجی، مواجهه، و تعیین بهترین روش در مدیریت ریسک است.

طبق اصول لازم برای یک فرایند مطلوب تنظیم مقررات در حوزه فناوری نانو و با توجه به اینکه تولید دانش در حوزه حیاتی ایمنی نانو به احتمال زیاد به صورت تدریجی است، هدف ده سال آینده می‌تواند دنبال کردن یک رویکرد تکرارشونده و سازگارپذیر برای سیاست‌های مقرراتی نانو باشد (شکل ۱).

۴.۳ توسعه روش‌های آنالیز محاسباتی که قادر به مدل‌سازی کامپیوتری برای ارزیابی ریسک ایمنی نانو باشد

موانع چالش بر انگیز برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در حوزه ایمنی نانو عبارتند از: پیچیدگی سیستم‌ها در پستانداران و محیط زیست؛ تعدد متغیرها در طراحی و تولید نانو مواد؛ عدم وجود دانش درباره نحوه انجام آنالیز ریسک؛ نرخ رشد بالای توسعه فناوری نانو؛ عدم توانایی کار با پایگاه داده‌های بزرگ؛ عدم نامگذاری استاندارد برای طبقه‌بندی نانو مواد مهندسی شده. روشن است که مبنای پژوهش در ایمنی نانو باید مطالعات نظام مند وکمی باشد و برای اطلاع‌رسانی و ترویج استفاده از مدل‌های پیش بینی دقیق و شبیه‌سازی قابل اعتماد مرتبط طراحی شود. این مدل‌ها باید به طور موثر و دقیقی انواع گوناگون نانو مواد را از نظر رهایش و اثر متقابل آنها بر سیستم‌های پیچیده و متنوع زیست محیطی و بیولوژیکی را مورد توجه قرار دهند. به کارگیری صحیح این مدل‌ها می‌تواند تجاری‌سازی ایمن فناوری نانو را شتاب بخشد. مدل‌هایی که به توصیف فصل مشترک بین نانو و محیط زیست می‌پردازند، مهندسان را در ایجاد نانو سیستم‌های «طراحی ایمن»[۹] کمک خواهد نمود. همچنین شرکت‌ها را برای طراحی و ایجاد راهبردهای رفع آلودگی و پسماند برای به حداقل رساندن مواجهه نانو مواد



تجهیز خواهند کرد. روش های: شبیه‌سازی کمی گرافیکی و قابل دسترس تطبیقی از جابجایی نانو مـواد، بر هم کنش در فصل مشـترک نانو - بیو، آنالیز چرخه عمر، و مدل‌سـازی ریسک می‌تواند اطلاعاتی را که در حال حاضر از آزمایشـات قابل حصول نیست، ارائه دهد.

سـازمان OECD، مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها را برای اعتبار بخشـی مدل‌های بـا رابطه کمی فعالیت-سـاختار (QSAR)[10] برای اهداف نظارتی منتشـر کرده است. مدل‌سـازی QSAR نیاز به محاسـبه توصیفگرهای شـیمیایی و ساختاری و همچنیـن پایـگاه داده تجربی بـزرگ از خواص فیزیکی و شـیمیایی دارد. در مقایسه با QSAR، مفهـوم nano-QSAR بـرای مواد شـیمیایی در ابتدای توسعه خود قرار دارد.

۵.۳ توسـعه غربالگری با محتوا و عملکرد بالا[11] به عنوان ابزار جهانی برای مطالعه سـمیت نانو مواد، رتبه‌بندی خطرات، اولویت مطالعه حیوانی و مدل‌های nano-QSAR، و راهنمـای طراحی ایمن نانو مواد

موانع عمده در ارزیابی پتانسـیل خطر نانو مواد مهندسـی شده عبارت است از: نبود ظرفیت برای انجـام غربالگری ایمنی در بسـته‌های بزرگ نانو مواد؛ فقـدان اطلاعات در مـورد روابط فعالیت-ساختار اصلی که سمیت را پیش بینی نماید؛ عدم توانایی برای پوشش دادن همه مواد با خطر بالقوه یا ویژگی‌های مواد با یک آزمایش؛ عدم توانایی در اولویت بندی انجام آزمایش‌های حیوانی پرهزینه؛ محدویت‌های استفاده از پارامترهای تک- پاسخ[12] (به عنوان مثال، کشـندگی) بدون درنظر گرفتن محدوده کامل پارامترهای دوز-پاسـخ کشنده یا کمتر از کشنده می‌باشد.

یک راه حل ممکن برای این مشـکلات، استفاده از روش‌هـای غربالگـری محتوای بالا اسـت که درک پدیده‌های زیسـتی در سلول‌ها و همچنین غربالگری بهبودیافته دارو را تسـهیل کرده است. اخیراً غربالگری سـلولی چند پارامتری با عملکرد بالا به عنوان یک ابزار مهم برای سـمیت شناسی اثبات شده است. آزمون‌های غربالگری در شرایط برون تن تنها یکـی از مراحل گوناگون مورد نیاز بـرای اعتباربخشـی و مدیریت ایمنـی نانو مواد مهندسی شـده را تشکیل می‌دهد. هدف ده سال آینده در این حوزه، توسعه و پیاده‌سازی ابزارهای غربالگری جدید برای افزایش بهره‌وری و سـرعت ارزیابی خطرات نانو مواد مهندسی شده است.

۶.۳ بهبود غربالگری ایمنی و طراحی ایمن نانو مواد مورد استفاده برای درمان و تشخیص

فناوری نانو در پزشکی معاصر به ویژه در داروهای نانو سـاختار و عوامل کنتراسـت فراگیر شـده است. به دلیل مواجهه انسـانی مستقیم و عمیق در اسـتفاده از آنها، ایمنـی ابزارهای نانو مقیاس در درجـه اول اهمیت قـرار دارد. در حال حاضر درباره ایمنی ابزارهـای نانو که به طور فزاینده‌ای برای داروررسـانی، تصویربرداری، یا ترانوسـتیک (ترکیبی از تشخیص و درمان) مورد استفاده قرار می‌گیرند، اطلاعات نسـبتاً کمتری وجود دارد. در مورد ویژگی‌های خطرناک مواد نانو مقیاس فقدان اطلاعات دقیق وجـود دارد، لذا روش‌های جدید آزمون ایمنـی که در حال حاضـر در روش‌های غربالگری سـنتی بـه کار نرفته اسـت،موردنیاز اسـت. برای نانو ذرات مورد استفاده در درمان و ایجاد کنتراست تا به امروز عوارض جانبی گزارش نشده است. به طور مشـابه، شواهد علمی درباره خطرات سلامت یا عوارض جانبی بر روی پرسنل شاغل در بخش تولید، حمل و نقل، دفع پسماند، ذخیره‌سـازی، مدیریت پزشـکی، یـا توزیع نانو ذرات مورد استفاده به صورت بالینی وجود ندارد. بنابراین، نگرانی‌های موجود در مورد طراحی ایمن نانو مواد تا حد زیادی مربوط به مشـکلات فرضی می‌باشد که ممکن است در نسل‌های آینده ابزارها و داروهای نانو مقیاس به وجود آید.

۷.۳ بررسی ارزیابی ایمنی نانومواد مهندسی شده‌ای که پیچیده‌تر می‌شوند و به صورت مواد عامل‌دار شده، جاسازی شده یا کامپوزیت وارد می‌شوند

با وجود آنکه تاکنون بیشترین تلاش‌ها در ارزیابی ریسک و خطرات بر روی نانو مواد مهندسی شده اولیه‌ای مانند نانـو ذرات، نانو لوله‌ها، و نانو الیاف تمرکز یافته اسـت، مواد پیچیده‌تـر کامپوزیتی، جداسـازی شـده، هیبریدی و عاملـدار به طور فزاینده‌ای در حال ورود هسـتند. برای این گونه نانو مواد مهندسـی شـده جدید، سازگاری میان رویکردهـای مطالعه و تصمیم‌گیـری در این باره که کدام مـواد و محصولات تجاری برای آزمایش اولویـت دارنـد، ضـروری خواهد بـود. بنابراین ابزارهای ارزیابی ریسک و خطر نیز باید به ترکیب رویکردها و روش‌ها بـرای تعیین ویژگی‌های این مواد جدید بپردازند. این مساله انجام مطالعاتی را ضروری می‌سـازد که بتواند به ارزیابی محصولات تجاری و جداسـازی مـواد در مقیاس نانو پس از تولید و همچنین تجزیه، دفع و یا رهایش نانو مواد مهندسی شـده در محیط زیست و فضای زندگی انسـان بپردازد. صنعت نقش مهمـی را در تولید داده‌ها و تحقیقات در زمینه ایمنی این محصولات ایفا می‌نماید.

۴ نیازمندی‌ها در زیرساخت‌های علم و فناوری

زیرساخت‌های مورد نیاز برای توسعه حوزه ایمنی نانو شامل موارد زیر است:

- توسـعه روش‌های پیشـرفته آنالیز و سـاخت تجهیزات برای تعیین مشخصات، ارزیابی و شناسایی نانو مواد مهندسـی شـده به صورت مطمئن‌تر و بـا کیفیت‌تر، در محیط‌های بیولوژیک و زیسـت محیطی زیست؛ ابزارهای قطعی، حساس و سریع برای تعیین مقادیر و انواع نانو ذرات مهندسی شده در نمونه‌های پیچیده هنوز به عنوان یک چالش و نیاز باقی مانده اسـت. ابزارهای تعیین مشخصات جدیدی مورد نیاز است که مستقیماً مقادیر اندکی از نانو ذرات مهندسـی شده در محیط‌های واقعی مواجهـه و بیولوژیـک (مانند تکه‌های دسـتمال کاغذی، غذا، نمونه‌های زیسـت محیطی، خون) را شناسـایی نماید و دینامیک برهم کنش‌های نانو مواد در فصل مشترک بیولوژیکی را برای تحقیقات ایمنی نانو بهتر ارزیابی نماید. مثال‌هایی از ابزارها و توانمندی‌ها در زمینه تعیین مشخصات بیومواد که اخیرا ایجاد شـده‌اند یا در حال توسعه هستند، عبارتنـد از: ردیابی بهبود یافته جذب سـلولی و بافتی نانو مواد مهندسی شده با استفاده از SEM و

TEM؛ روش‌های بهبود یافته برای تفکیک و تمایز ذرات نانو مقیاس در حجم‌های بسیاربالای بیومواد؛ روش‌های جدید در تصویربرداری فلوئورسانس؛ پیشرفت‌ها در روش آزمون CARS[13]؛ روش تفرق رامان با سطح بهبود یافته (SERS)[14].

به همین ترتیب ابزارها و روش‌های تعیین مشخصات جدیدی برای ارزیابی ساختار و دینامیک فصل مشترک زیست محیطی مانند موارد زیر در حال ظهور هستند: طیف‌سنجی LC-APPI-MS[15]؛ روش‌های طیف سنجی مانند EXAFS[16]، XANES[17]، EXAFS[18]؛ میکروسکوپ الکترونی روبشی زیست محیطی (ESEM)[19].

□ توسعه مدل‌های محاسباتی، الگوریتم‌ها، و منابع چند رشته‌ای برای مدل‌سازی پیشگویی بسیار پیچیده؛ ابزارها و روش‌های محاسباتی جدید امکان پیش بینی و پیشگویی (برای مواد متغیر، کاربردهای متنوع، و خطرات جدید)، ساخت روابط کمی ساختار- فعالیت (nano-QSAR)، منطق فازی، خود آموزی، شبکه‌های عصبی، و هوش مصنوعی، را فراهم می‌آورد.

کمبودهای کنونی در زمینه نامگذاری موجب سردرگمی و پریشانی در تفسیر داده‌ها شده است و پیشرفت رو به جلو و ارزیابی ریسک را دچار اختلال نموده است. لذا یک نامگذاری سیستماتیک برای طبقه بندی نانو ساختارهای مهندسی شده جهت آنالیز محاسباتی موردنیاز است. سازمان‌ها و مراکز بین‌المللی مانند IUPAC و CAS یک سیستم دسته بندی را برای مواد شیمیایی توسعه داده‌اند، اما هیچ یک از نامگذاری آنها برای نانو ساختارها مناسب نیست. یک نامگذاری سیستماتیک بر اساس ترکیب ماده و ویژگی‌های نانو مقیاس مانند: اندازه، شکل، شیمی سطح/پوسته، و انحلال‌پذیری به فعالیت‌های ایمنی نانو مورد نیاز است.

□ توسعه ظرفیت نیروی کار از طریق تحصیل و آموزش بین رشته‌ای، به ویژه در زمینه ایمنی نانو که تعداد زیادی از حوزه‌های تحقیقاتی همگرا می‌شوند؛ مشابه بسیاری از حوزه‌های بسیار پیشرفته علم و فناوری، آینده فناوری نانو ناگزیر به تحصیلات و یادگیری بین رشته‌ای وابسته است. مثلا برای ساخت یک نانو ماده مهندسی شده هوشمند و جدید برای کاربرد دارویی، محققان از حوزه‌های مختلف، از علم مواد، شیمی، و فیزیک تا علوم زیستی، فیزیولوژی، داروشناسی، و مهندسی باید با یکدیگر همکاری کنند.

بدین منظور برنامه‌های متنوعی توسط سازمان‌ها و مراکز مختلف در امریکا تعریف شده است که از طریق آنها محققان و مهندسان بین رشته‌ای تربیت می‌شوند، مانند: برنامه‌های NUE، NSEE و REU و RET توسط NSF؛ و برنامه T32 و R25 توسط NIH. این نوع آموزش و تحصیلات بین رشته‌ای برای مقابله با چالش‌های مهمی که در حوزه ایمنی نانو به عنوان یک حوزه نوظهور ایجاد می‌شوند، کاملاً ضروری است.

۵ سرمایه‌گذاری بر روی تحقیق و توسعه و پیاده‌سازی راهبردها

در حوزه های زیر باید سرمایه‌گذاری مناسبی در راستای تحقیق و توسعه و اجرای راهبردها انجام گردد:

□ افزایش نقش صنعت در سرمایه‌گذاری بر روی تحقیق و توسعه ایمنی نانو؛ برای تحقیق و توسعه در مرحله کشف اولیه و دوره رشد،بودجه کافی و زیادی مورد نیاز است. اما بودجه تحقیق و توسعه ایمنی نانو باید با مشارکت بخش خصوصی باشد که در آن پیاده‌سازی دانش ایمنی نانو باید به محصولات بهبودیافته با ارزش تجاری بالاتر منجر شود.صنعت به عنوان یک شریک، مسئولیت ویژه‌ای در توسعه آزمون‌های استاندارد و نانو مواد ایمن دارد. برای کمک به توسعه پایدار لازم است بودجه ایمنی نانو به عنوان بخش جدایی ناپذیر از تولید و طراحی محصول جدید و نه به عنوان لوازم رسمی، الزام ایمنی، و یا هزینه پاکسازی تحمیل شده و اجباریدر نظر گرفته شود.

□ افزایش تمرکز بر روی ایجاد یک زیرساخت قابل دسترس برای درک سمیت نانو مواد مهندسی شده؛ در حال حاضر بودجه کافی برای آنالیز و تحقیقات گسترده درباره پیامدهای بهداشتی نانو مواد مهندسی شده در مواد غذایی، محصولات کشاورزی و فرایندهای صنعتی مانند چاپ وجود ندارد. یکی دیگر از سرمایه‌گذاری‌های کلیدی باید بر روی زیرساخت‌های فناوری نانو و ابزارهای جدید به منظور توجه به نیازهای متنوع آنالیزی در حوزه ایمنی نانو صورت پذیرد. اگر چه چندین آزمایشگاه ملی و موسسه علمی دارای زیرساخت و امکانات برجسته‌ای برای انجام پژوهش در زمینه فناوری نانو هستند، هیچ استفاده مشترکی از امکانات برای تحقیقات ایمنی نانو وجود ندارد. در نتیجه انتقال دانش و تبادل پروتکل‌ها اصلا وجود ندارد یا به مقدار خیلی کم وجود دارد. این امر به عدم همکاری و عدم افشاء و پنهان کاری تلاش‌های ایمنی نانو در بخش خصوصی کمک کرده است. علاوه بر این در تحقیقات کشاورزی و غذایی، ماده تحت بررسی اغلب «آلوده» است و به تجهیزات اختصاصی برای آنالیز ترکیب و ساخت سیستم‌های تست پیچیده‌تر نیاز دارد.

□ ارتقای همکاری متقابل در کارهای تحقیق و توسعه ایمنی نانو؛ ارتقای همکاری‌های مشترک بین دانشگاه، دولت و صنعت برای خلق، طراحی، توسعه و کسب ارزش برای پیشرفت‌های فناوری نانو همراه با پذیرش عمومی ضروری است. این همکاری‌ها نه تنها برای تولید و تجمیع دانش، بلکه برای فراهم کردن گزینه‌های سرمایه‌گذاری با تولید دانش نیاز محور ضروری است. به منظورغلبه بر سکون صنعت برای همکاری فعال در حوزه ایمنی نانو، خصوصا در مراحل شکل‌گیری و توسعه برنامه راهبردی به گفتگو و مذاکره نیاز است. دراین راستا، بررسی تلاش‌های صورت گرفته توسط برخی از صنایع و شرکت‌هایی که ایمنی فناوری نانو را ترویج داده‌اند و همچنین دلایل عدم مشارکت در بررسی‌های صنعتی توسط دیگر بخش‌های صنعت و تجارت، کمک بزرگی برای این منظور است. موارد مهمی که تا به امروز در بررسی‌ها آشکار شده عبارتند از: نبود پروتکل‌های غربالگری استاندارد برای نانو مواد مهندسی شده، عدم قطعیت و ابهام در قوانین زیست محیطی، انجام بررسی‌های غیر ضروری، عوامل هزینه- سود، و افکار عمومی. صنعت نیاز به این دارد که دولت و دانشگاه‌ها پیوسته در حال شنیدن و پرداختن به این نوع از نگرانی‌ها باشند. نمونه‌ای از آنچه که ممکن است در اثراعلان اطلاعات محصول به دست آید در شکل ۲ (هرم اطلاعاتی نانو) نشان داده شده است.

۶ موضوعات نوظهور و اولویت‌ها

موضوعات نوظهوری که در حوزه ایمنی نانو مطرح هستند شامل موارد زیر می‌گردد:

□ نقش فناوری نانو در اصلاح محیط زیست و پایداری[20]، شامل استفاده از تولید سبز

□ رویکردهای طراحی ایمن برای ترویج توسعه پایدار فناوری نانو

□ نقش فناوری نانو در سیستم‌های کشاورزی و غذایی، شامل بهبود ایمنی غذا و توانایی اثبات ایمنی نانو مواد مهندسی شده در غذا

به علاوه اولویت‌های کلیدی زیر برای دهه آینده شناسایی شده‌اند:

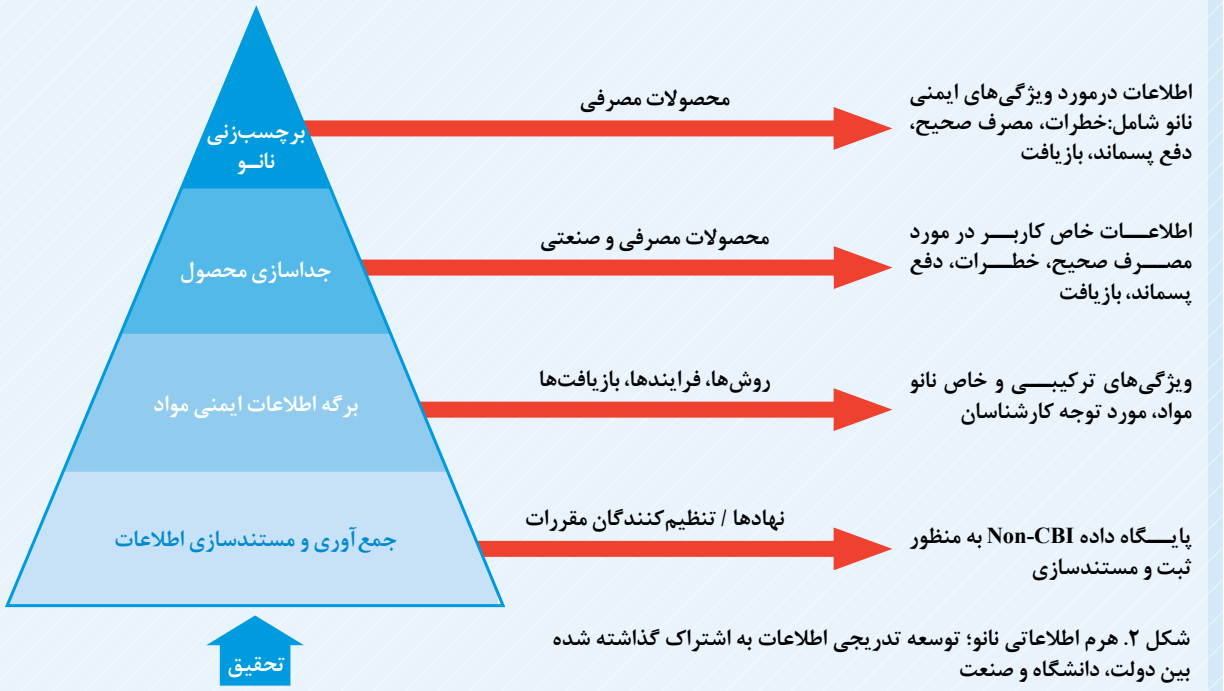
□ توسعه پروتکل‌های هماهنگ و روش‌های غربالگری معتبر برای ایمنی نانو که مدیریت ریسک استانداردی را برای نانو مواد مهندسی شده و در سطحی متناسب با رشد فناوری نانو ترویج نماید.

□ ایجاد مشارکت فعال صنعت و سازمان‌های غیر دولتی در ایمنی نانو به ویژه در حوزه های: ارزیابی ریسک و خطر، آنالیز چرخه عمر، افشای اطلاعات غیر محرمانه محصول برای ارزیابی انواع مواجهه، و استفاده از روابط ویژگی- فعالیت نانو مواد جهت پیاده‌سازی طراحی ایمن برای راهبردهای چرخه عمر محصول

□ معرفی روش‌های تولید نانو که سازگار با محیط زیست باشد و استفاده از فناوری نانو به منظور جایگزین کردن با محصولات، ترکیبات و فرایندهای مورد استفاده رایج که عوارض جانبی برای سلامت انسان و محیط زیست دارند

□ توسعه راهبردهای کاهش ریسک که از طریق تحقیقات ایمنی نانو، جمع‌آوری داده‌های تجاری محصولات نانو و استفاده از ابزار تصمیم‌گیری کارآمد، می‌تواند به تدریج پیاده‌سازی گردد.

□ توسعه رویکردهای با کارایی بالا، نانو انفورماتیک و ابزارهای تصمیم‌گیری کامپیوتری که می‌توانند در مدل‌سازی و پیش بینی خطرات



شکل ۲. هرم اطلاعاتی نانو؛ توسعه تدریجی اطلاعات به اشتراک گذاشته شده بین دولت، دانشگاه و صنعت

نانو مواد، ارزیابی خطر، و طراحی ایمن نانو مواد، به عنوان بخشـــی جدایی ناپذیر به توسعه برنامه جدید کمک کنند

□ توسعه راهبردهای شفاف و کاملا تعریف شده بـــرای قانون‌گذاری درایمنـــی نانو که جمع‌آوری دانـــش و تصمیم‌گیری گام به گام را مد نظر قرار دهد و در نهایت منجر به تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و ارتقاء پایداری گردد

۷ الزامات گسترده برای جامعه

اگر چه دانشگاه، صنعت و دولت با مسائل ریسک واقعی روبروهســـتند، عموم مردم بیشتر مستعد برای واکنش نشـــان دادن به ریسک اثبات نشده هستند، و نظراتشـــان اغلب بر اساس گزارش‌های بی اساســـی اســـت کـــه از رســـانه‌های خبری و سازمان‌های غیر دولتی دریافت می‌کنند. تا زمانی که شکاف داده‌ها درایمنی نانو باقی باشد، تهدیدات ریسک‌های شناخته شـــده با وجود فقدان شواهد لازم وکافی پابرجاست که این مساله به طور بالقوه مانع از توســـعه بازار و فناوری اســـت. یک مسئله کلیدی برای دانشـــگاه، صنعـــت و دولت برقراری ارتباط، اطلاع رسانی و درگیر کردن مردم به طور موثر به گفتگو در مـــورد پیامدهای مفید فناوری نانو، پتانسیل ریسک، و آنچه که برای اطمینان از پیاده‌سازی ایمن فناوری نانو در حال انجام است، می‌باشد. با توجه به ماهیت پیچیده و چند رشته‌ای علم و فناوری نانو، انتقال دانش و آموزش عمومی به تنهایی موثر نبوده و نیازمند توجه فوری است.

ایمنـــی محصـــولات مصرفی رایج حـــاوی مواد اولیه مبتنـــی بر فناوری نانـــو، در ارتباط نزدیک با ریســـک‌های شناخته شده اســـت. از جمله این محصـــولات مصرفـــی می‌توان بـــه کرم‌های ضد آفتـــاب، صابون‌هـــا، خمیردندان‌ها، لبـــاس، مواد غذایی و لوازم آرایشی نام برد. شفافیت بیشتری در تشخیص حضور نانو مواد در این محصولات مورد نیاز اســـت، از جمله داده‌های خاص فنی ترکیب و فرمولاسیون شان و اینکه چرا افزودن واستفاده از آنهـــا محصول بهتری را فراهم می‌آورد. به دلیل ریسک‌های شناخته شـــده، برخی از اطلاعات در مورد محصولات بر پایه فناوری نانو به جای افشا، به طور عمدی مخفی نگه داشـــته شده است که در دراز مدت می‌تواند برای اعتبار، شفافیت، درک و تصویر فناوری نانو زیان‌بار باشـــد. هرم اطلاعاتی نانو و توصیه‌های پیشگیرانه در مورد چگونگی درج بسته بندی یا برچسب‌زنی می‌تواند با احتیاط ارائه شود و کمی دوراندیشـــی می‌تواند در حذف این ابهامات کمک نماید. همچنین مهم اســـت که به مردم توضیح داده شـــود که فناوری نانو می‌تواند نقش مهمی در ارتقاء ایمنی مواد غذایی، حفظ و بازسازی محیط زیست، درمان‌های پزشکی بهتر، و ارتقای محصولات ایفا نماید.

پی‌نوشت‌ها:

1. World Technology Evaluation Center (WTEC)
2. National Science Foundation (NSF)
3. nano-EHS
4. Engineered Nano Material
5. best practice
6. alveolar epithelial
7. end-of-life risk
8. Federal Insecticide ,Fungicide, and Rodenticide Act
9. safe-by-design
10. Quantitative Structure-Activity Relationship
11. High-Throughput and High-Content Screening
12. single-response
13. Coherent Anti-stokes Raman Scattering
14. Surface-Enhanced Raman Scattering
15. Liquid Chromatography-Atmospheric Pressure Photo Ionization Mass Spectrometry
16. X-ray Absorption Fine Structure
17. X-ray Absorption Near-Edge Spectroscopy
18. Extended X-ray Absorption Fine-Structure Spectroscopy
19. Environmental Scanning Electron Microscope
20. sustainability