भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका
वर्ष 31 अंक (1) जून 2023 पृ. 26-37
DOI: 10.56042/bvaap.v31i1.2725

नैनोकणों के दुष्प्रभावों का आकलन

रीना सिंह एवं नेहा चौधरी
परिवहन योजना और पर्यावरण प्रभाग, सीएसआईआर-केंद्रीय सड़क अनुसंधान संस्थान मथुरा रोड, नई दिल्ली 110025

सारांशः नैनोटेक्नोलॉजी के क्षेत्र में प्रगति से स्वास्थ्य, भोजन, दवा, उपभोक्ता, पर्यावरण और इलेक्ट्रॉनिक्स सहित लगभग सभी क्षेत्रों में नवाचार (इनोवैशन) का मार्ग प्रशस्त हुआ है। इसके असाधारण भौतिक और रासायनिक गुणों के कारण नैनो प्रौद्योगिकी आधारित उत्पादों की मांग है। इस मांग के कारण इंजीनियर नैनोकणों (ईएनपी)/नैनो सामग्री का बहिर्वाह दिन-बे-दिन बढ़ रहा है और इसने निर्मित/संश्लेषित नैनोकणों/नैनोपार्टिकल्स के विस्तारित निर्माण और उपयोग को प्रेरित किया है। नैनो TiO_2, सिल्वर (Ag) और गोल्ड (Au) नैनोपार्टिकल्स (एनपी) व्यापक रूप से उपयोग किए जाने वाले ईएनपी हैं क्योंकि 50% से अधिक उपभोक्ता और इलेक्ट्रॉनिक उत्पादों में इनका प्रभुत्व है। वैश्विक बाजार में, धातु और धातु ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स आधारित उत्पाद उपभोक्ता/इलेक्ट्रॉनिक वस्तुओं का लगभग 50% हिस्सा हैं और इसलिए यह अध्ययन करने के लिए इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) के महत्वपूर्ण वर्ग में हैं। इनके संश्लेषण, परिवहन उपयोग और निपटान के दौरान, इन इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) का एक महत्वपूर्ण हिस्सा पर्यावरण में छोड़ा (रिलीज किया) जाता है, जो अंततः मानव स्वास्थ्य को प्रभावित करता है।

संश्लेषण के अलावा, इन नैनोकणों का उपयोग विभिन्न पर्यावरणीय प्रबंधन के लिए भी किया जाता है, जैसे जल प्रबंधन, स्वयं सफाई पेंट का उपयोग करके वायु प्रदूषण को कम करना, जिससे यह अनजाने में स्रावित होता है और अंत में पर्यावरण के दूषित होने का कारण बनता है। आज तक हमारे पास पर्यावरण में जारी इन नैनोपार्टिकल्स की मात्रा निर्धारित करने के लिए पर्याप्त आंकड़े नहीं है। हालांकि नैनोटेक्नोलॉजी की प्रगति एक समय में बड़ी मात्रा में हुई है, ईएनपी के विषाक्त प्रभावों और खतरों के बारे में हमारी अंतर्दृष्टि उनके निर्माण और उपयोग की गति के पीछे एक लंबा रास्ता तय करती है। इनके पारिस्थितिक तंत्र और मानव स्वास्थ्य पर संभावित प्रभाव के कारण विभिन्न जैविक और पर्यावरणीय प्रणालियों में कई विषाक्तता जांच की गई है। वर्तमान में इन ईएनपी द्वारा मानव स्वास्थ्य को होने वाले खतरों के बारे में बहुत कम जानकारी है। इसलिए, पर्यावरण में नैनोमैटेरियल्स के एक्सपोजर का मूल्यांकन और विषाक्तता का अध्ययन अपेक्षाकृत नई और ध्यान देने वाला एक चिंता का विषय है क्योंकि इनसे उत्पन्न पर्यावरणीय प्रभाव को अभी न्यून समझा जाता है। इन कणों के संभावित स्वास्थ्य प्रभाव को समझने के लिए ईएनपी के मानव जोखिम (एक्सपोज़र) को समझना बहुत महत्वपूर्ण है, क्योंकि इन पर अभी तक बहुत कम शोध किया गया है। इस लेख में हमने ईएनपी की दो महत्वपूर्ण श्रेणियों की विषाक्तता (टाक्सिसटी) और जोखिम मूल्यांकन (इक्स्पोशर असेस्मन्ट) किया है।

Exposure assessment of nanoparticles

Rina Singh & Neha choudhary
Transport Planning and Environment Division, CSIR-Central Road Research Institute Mathura Road, New Delhi 110025

Abstract

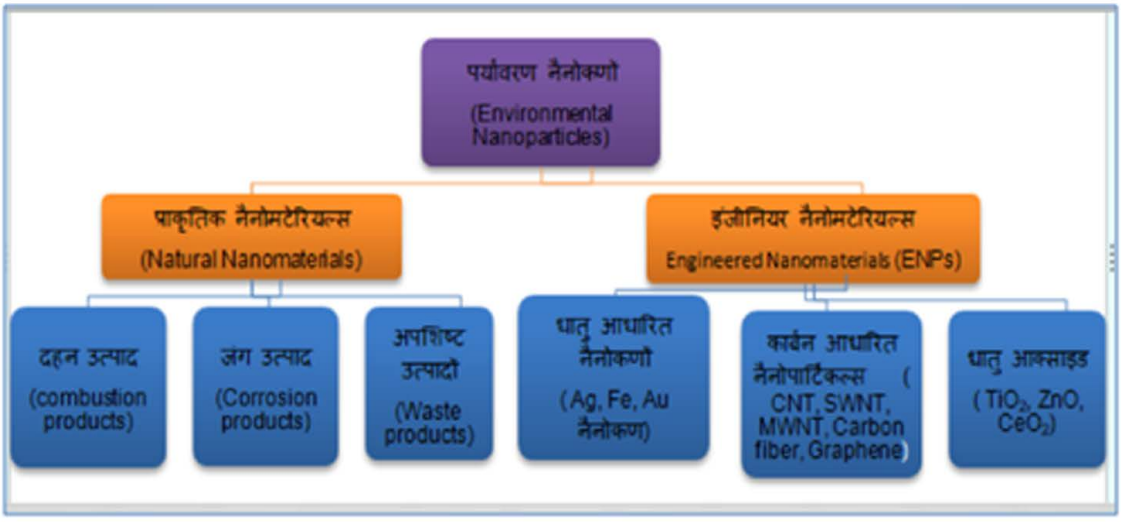
Nanotechnology's advancement has paved the path for innovation in almost all the sectors, including health, food, medicine, consumer, environment and electronics. There is a demand of nanotechnology based products because of their extraordinary physical and chemical properties. Because of this demand the outflow of engineered nanoparticles/ nanomaterials (ENPs/ ENMs) is increasing day by day and has prompted expanded creation and utilization of manufactured/synthesized nanoparticles (NPs). Nano TiO_2, silver (Ag) and gold (Au) nanoparticles are the widely used ENPs because of their dominancy in more than 50% of the consumer and electronic products. In the global market, metal and metal oxide nanoparticles (MNPs and MONPs) based product constitutes almost 50% of the consumer/electronic items and therefore they are the important class of ENPs to study. During their synthesis, transportation, usage, and disposal, a significant portion of these ENPs are released into the environment which finally affects the human health. Besides synthesis, these nanoparticles are also used for various environmental remediations like in water treatment, reducing air pollution by using self cleaning paints, which unintentionally led to their release and finally contamination of the environment. Till date we don't have adequate data to quantify the amount of these NPs released into the environment. Though the advancement of nanotechnology has progressed huge amounts at a time, however our insight into the toxicological impacts and dangers of ENPs falls a long ways behind the speed of their

creation and use. Numerous toxicity investigations in various biological and environmental systems have been conducted because of their potential impact on the ecosystem and human health. Little is known about the dangers that these ENPs pose to human health. Therefore, the exposure assessment and toxicity study of nanomaterials in the environment is a relatively new and pressing concern because their environmental impact is poorly understood. Understanding the human exposure of these ENPs are therefore very important in order to understand the possible health effect of these particles, because little research has been done on these ENPs till recently. In this paper we critically review the toxicity and exposure assessment of two important categories of ENPs: Metal and metal oxide based ENPs (MENPs and MOENPs) since there are considerable gaps in our knowledge of these ENP's toxicity.

प्रस्तावना

कम से कम एक आयाम (डाईमेन्शन) में 1 से 100nm की आकार सीमा में कुछ भी, नैनोकणों की श्रेणी में आता है। ये कण अपने विशाल आकर समकक्षों (बल्क काउंटर पार्ट) की तुलना में असामान्य भौतिक और रासायनिक व्यवहार दिखाते हैं, जैसे एल्यूमीनियम धातु इस स्तर पर सोने की तरह व्यवहार करना शुरू कर देती है इस पैमाने परए एल्यूमीनियम को नया सोना भी माना जाता है, क्योंकि एल्यूमीनियम के ऑप्टिकल गुण सोने के समान व्यवहार दिखाते हैं और इसीलिए इस पैमाने पर कीमती सोने की धातु को विभिन्न प्लास्मोनिक अनुप्रयोगों के लिए एल्यूमीनियम द्वारा प्रतिस्थापित किया जा सकता है और वास्तव में अब इसे प्रतिस्थापित किया जा रहा है। नैनोमैटेरियल्स की यह असाधारण गुण उन्हें लगभग सभी क्षेत्रों में उपयोगी बनाता है, जैसे कि कटैलिसीस, सेंसिंग, चिकित्सा क्षेत्र, सौंदर्य प्रसाधन, ऑप्टिकल डिवाइस, निर्माण सामग्री, आदि। लगभग सभी तकनीक अब अपने उत्पाद के लिए नैनो तकनीक का उपयोग करती है, जैसे सैमसंग इंडिया रेफ्रिजरेटर, वॉशिंग मशीन, एयर कंडीशनर में सिल्वर नैनोपार्टिकल्स (Ag NPs) का उपयोग करती है, क्योंकि सिल्वर नैनोपार्टिकल्स बैक्टीरिया के श्वसन को रोकते हैं। इसके अलावा रूम प्यूरीफायर में, अल्ट्रा फाइन पार्टिकल्स और वोलेटाइल ऑर्गेनिक कंपाउंड्स को हटाने के लिए सिल्वर और कार्बन आधारित नैनोपार्टिकल्स का उपयोग किया जाता है। कॉस्मेटिक उद्योग सनस्क्रीन लोशन और डेंटल फिलिंग के लिए धातु ऑक्साइड आधारित नैनोकणों जैसे ज़िंक ऑक्साइड (ZnO) और टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2) का उपयोग करता है। हालांकि, कई गुण जो ईएनपी को सभी उल्लिखित अनुप्रयोगों के लिए इतना अनूठा और उपयोगी बनाते हैं, साथ ही ये साइटोटोक्सिक और जीनोटॉक्सिक प्रभाव जैसे सूजन, डीएन, क्षति, फेफड़ों के फाइब्रोसिस, कोशिका मृत्यु के कारण, मानव स्वास्थ्य को भी नुकसान पहुंचा सकते हैं।

मानवीय गतिविधियां और प्राकृतिक प्रक्रियाएं दोनों नैनोपार्टिकल्स का उत्पादन करती हैं, जैसे ज्वालामुखी की धूल, सड़क की धूल, महीन रेत, वायरस और बैक्टीरिया प्राकृतिक रूप से पाए जाने वाले नैनोपार्टिकल्स की श्रेणियों में आते हैं। मानव निर्मित नैनोपार्टिकल्स दो श्रेणियों में आते हैंः आकस्मिक और इंजीनियर नैनोकण (चित्र 1)। आकस्मिक नैनोपार्टिकल्स मानवीय गतिविधियों के उपोत्पाद हैं, जैसे डीजल ईंधन जलाने से ब्लैक



मानव निर्मित नैनोपार्टिकल्स की श्रेणियां

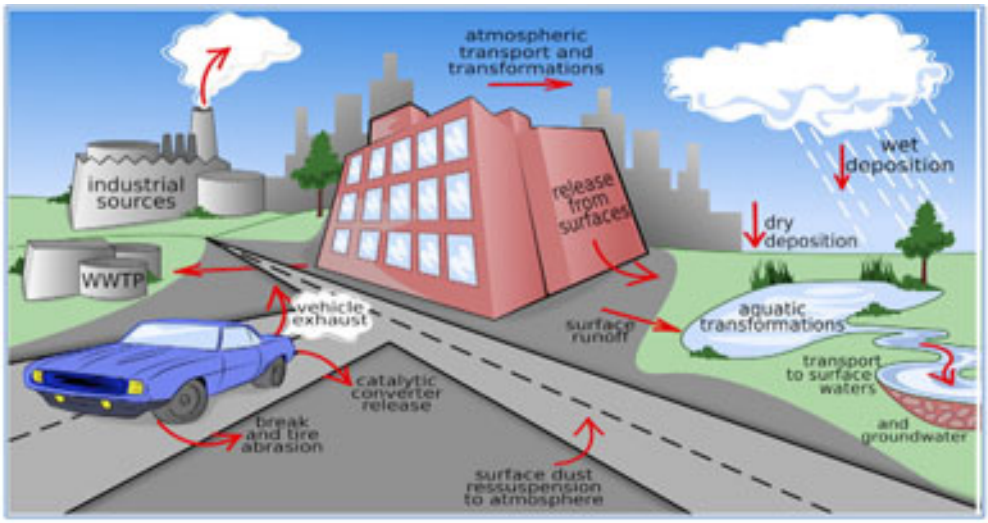
कार्बन, बहुत सारे दहन उत्पाद, निर्माण और विध्वंस गतिविधियां, अपशिष्ट उत्पाद (नैनोडिवाइस के निपटान से नैनोवेस्ट), जंग बनना आदि। इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स कुछ विशेष अनुप्रयोगों के लिए मानव द्वारा जानबूझकर संश्लेषित किया जाता है। निर्मित नैनोपार्टिकल्स जैसे टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2), कार्बन नैनोट्यूब (CNTs), सिंगल और मल्टीवॉल कार्बन नैनोट्यूब (SWNTs and MWNTs), फुलरीन, ग्रेफीन, सिल्वर (Ag), एल्युमिनियम (Al) और गोल्ड (Au) नैनोपार्टिकल्स, आदि हैं। नैनोमटेरियल्स के कचरे को नैनो डिवाइसेस के उपयोग या पुनर्चक्रण के दौरान और साथ ही नैनोमैटेरियल्स के निर्माण के दौरान पर्यावरण में छोड़ दिया जाता है। इन शामिल कणों के छोटे आकार और उच्च सतह क्षेत्र के कारण, इस तरह के निवारण खतरनाक हो जाते हैं क्योंकि वे हवा में तैरते (सस्पेंडेड) रहते हैं, जहां घर्षण और सतह तनाव (सरफेस टेंशन) जैसे बल अक्सर गुरुत्वाकर्षण बलों पर हावी रहते हैं, रासायनिक रूप से परिवर्तित हो सकते हैं, और हवा और पानी की गुणवत्ता को प्रभावित कर सकते हैं। साथ ही में नैनोमैटेरियल्स के कचरे मिट्टी में जमा हो जाते हैं। इसके अलावा, इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) को सीधे या परोक्ष रूप से मानव, पशु और पौधों की कोशिकाओं में आसानी से स्थानान्तरण किया जा सकता है, और यह अज्ञात दुष्प्रभाव पैदा कर सकता है। चूंकि नैनो टेक्नोलॉजी अभी अपनी प्रारंभिक अवस्था में है, इसलिए जीवों और पर्यावरण पर इंजीनियर नैनोकण के संभावित हानिकारक प्रभावों का विश्लेषण करना महत्वपूर्ण है।

नैनोमैटेरियल्स का उत्पादन हाल के वर्षों में एक घातीय दर से बढ़ रहा है, और 2020 से 2027 तक 13.1 प्रतिशत वार्षिक दर से विस्तार होने की उम्मीद है। नैनोमैटेरियल्स के उत्पादन और उपयोग में अपेक्षित बड़ी वृद्धि के कारण, परिणामस्वरूप नैनोमैटेरियल्स के लिए मानव और पर्यावरणीय जोखिम में भी वृद्धि हुई है। इस कारण नैनोपार्टिकल्स के संभावित नकारात्मक प्रभावों के बारे में बहस हाल के वर्षों में तेजी से बढ़ी है। विभिन्न रासायनिक संरचना वाले नैनोपार्टिकल्स में विभिन्न जैविक प्रभाव दिखाई देते हैं। क्रियाशील प्रजातियों (स्पीशीज़) को बनाने के लिए नैनोकणों की प्रवृत्ति और इसकी ऑक्सीकरण अवस्था जैसे रासायनिक मापदंडों को भी विषाक्तता को प्रभावित करने के लिए दिखाया गया है। नैनोकणों की घुलनशीलता भी विषाक्तता मूल्यांकन (टॉक्सिसिटी असेस्मेन्ट) में एक प्रमुख भूमिका निभाती है।

इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) मापन और इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) के विषाक्त परिणामों के बीच की कड़ी को समझना आवश्यक है, हालांकि वर्तमान में इसकी कमी है। इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स के विधि और परिवहन पर विभिन्न रिपोर्टें बनी हैं, इनकी विषाक्तता और स्वास्थ्य प्रभावों पर कुछ विवरण वर्तमान में उपलब्ध हैं। इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) के नैनोकचरे का उपयोग और प्रबंधन, उपयोग में आने वाले अधिकांश इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स का जीवन चक्र, मानव ऊतकों की विषाक्तता या जोखिम मूल्यांकन (रिस्क असेसमेंट) करने के लिए उचित दिशानिर्देश पर जानकारी का अभाव है जैसे कि विभिन्न इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) की विशिष्ट विषाक्तता (टाक्सिसटी) पर सटीक जानकारी के बावजूद, कोई सुव्यवस्थित विषाक्तता (टाक्सिसटी) डेटाबेस नहीं है, जिससे ईएनपी जोखिम और सुरक्षा मूल्यांकन (सेटी असेसमेंट) चुनौतीपूर्ण हो जाता है, क्योंकि अधिकांश सामग्रियों में व्यावसायिक स्थानों या अन्य परिवेश में इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स के जोखिम की जानकारी नहीं है। किसी के लिए भी कोई व्यावसायिक जोखिम सीमा (ऑक्यूपेशनल एक्सपोज़र लिमिट (ओईएल) परिभाषित नहीं की गई है। नतीजन, कार्यस्थल में, उपभोक्ता उत्पादों में इन इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी) की सुरक्षा और पर्यावरणीय प्रभाव उत्पन्न करने की चिंता स्वाभाविक है। जबकि कई विस्तृत सामग्रियों की विषाक्तता व्यापक रूप से प्रलेखित है, यह अज्ञात है कि किस सांद्रण या आकार में, वहीं सामग्री उनके नैनोस्कोपिक आयामों (डाइमेन्शन) के कारण नए विषाक्त गुणों को प्रदर्शित करना शुरू कर देती है। नैनोमैटेरियल्स उत्पादन और विषाक्तता आकलन पर वर्तमान डेटा के बीच एक महत्वपूर्ण विसंगति है। विषाक्तता डेटा का आभाव नैनोपार्टिकल्स के सुरक्षित डिजाइन को प्रतिबंधित कर सकती है। इसलिए इस लेख में, हमने पर्यावरण के लिए बड़े पैमाने पर औद्योगिक अनुप्रयोगों जैसे टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2), धातु आधारित और कुछ धातु ऑक्साइड के लिए उपयोग किए जाने वाले इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स के विषाक्तता मूल्यांकन की व्याख्या की है।

इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स (ईएनपी (ENPs): स्रोत और परिवर्तन

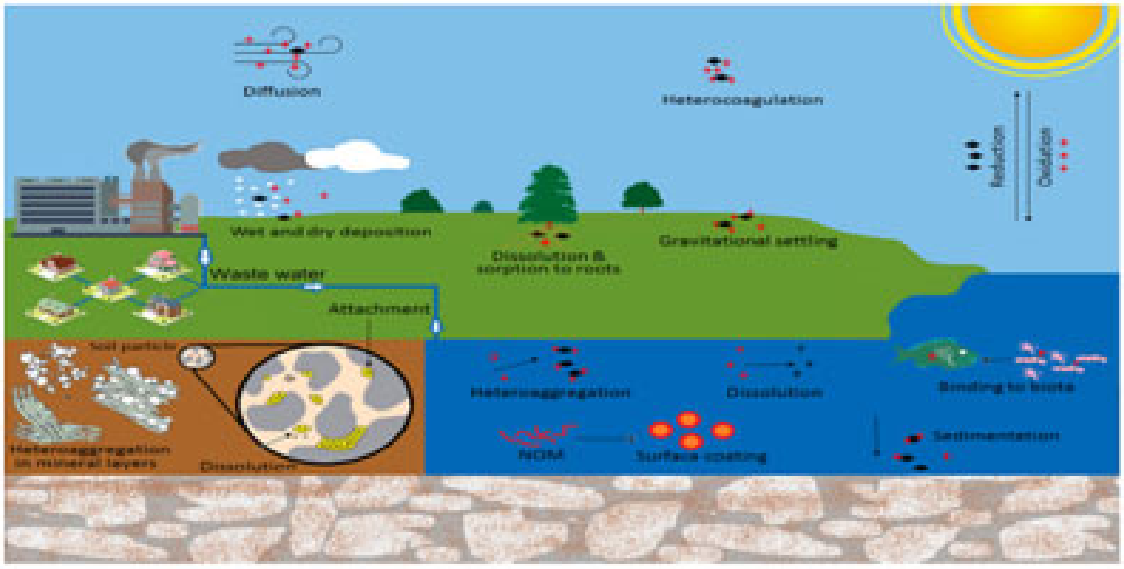
इंजीनियर नैनोमैटेरियल्स (ईएनपी) ऐसे नैनोमैटेरियल्स हैं जो मनुष्यों द्वारा निर्मित या सृजित किए गए हैं। नैनो-सक्षम वस्तुओं के पूरे जीवन चक्र के दौरान, ईएनपी को बिंदु (पॉइंट) और गैर-बिंदु (नॉन पॉइंट) स्रोतों (चित्र 2) दोनों से आन्तरिक (इंडोर) वायु और बाहरी (एम्बिएंट) वातावरण में छोड़ा जाता है। विनिर्माण संयंत्र, परिवहन प्रक्रियाएं, अपशिष्ट जल उपचार संयंत्र, अपशिष्ट भस्मीकरण (इन्सिनरेशन) और लैंडफिल साइट ईएनपी के सभी बिंदु (पॉइंट) स्रोत हैं। ईएनपी मुख्य रूप से कार्बन, धातु और



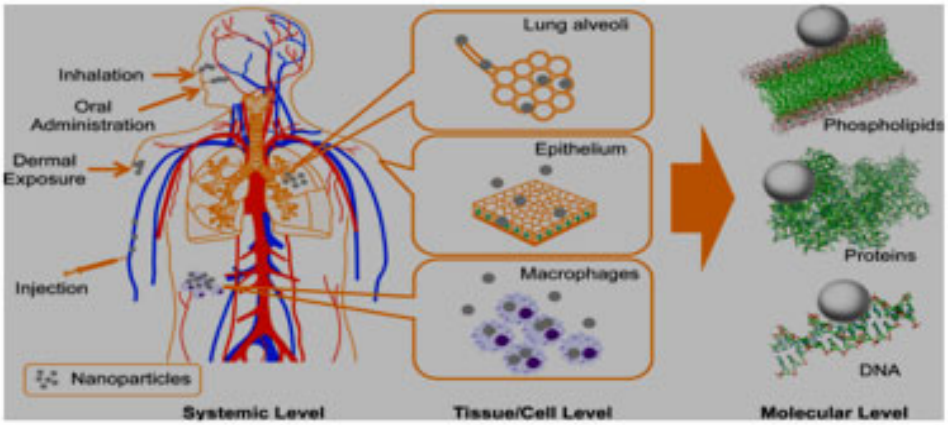
धातु-ऑक्साइड, अर्धचालक (क्वांटम डॉट्स और पॉलीमर से बने होते हैं। बाजार में विशेष रूप से इलेक्ट्रॉनिक्स और उपभोक्ता क्षेत्रों में धातु और धातु ऑक्साइड आधारित नैनोमटेरियल्स की मांग बहुत अधिक है। वातावरण में मौजूद होने पर ईएनपी को उनके आकार और व्यवहार के आधार पर वर्गीकृत किया गया है। छोटे कण (20nm से कम) गुच्छे और संकुलन के लिए प्रवण होते हैं। मध्यम आकार के कण (>20nm और 2000 nm) अधिक समय तक वातावरण में रहते हैं। बड़े कण (>2,000nm) मोटे होते हैं और अवसादन या गुरुत्वाकर्षण निपटान के अधीन होते हैं।

टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2) अनुप्रयोगों के संदर्भ में सबसे व्यापक रूप से उत्पादित और उपयोग किया जाने वाला ईएनपी है, जिसकी वार्षिक उत्पादन मात्रा 60,000 से 150,000 टन तक है। टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2) आमतौर पर विभिन्न उत्पादों जैसे, सेल्फ क्लीनिंग पेंट्स, सेल्फ क्लीनिंग ग्लास, कॉस्मेटिक्स, एयर प्यूरीफिकेशन, व्हाइटनिंग एजेंट्स, सन ब्लॉक्स, आदि में फोटोकैटलिटिक सामग्री का उपयोग किया जाता है। टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2) के बाद, सिल्वर नैनोपार्टिकल्स (Ag) अपने अद्वितीय जीवाणुरोधी और प्लास्मोनिक गुणों के कारण उपभोक्ता, स्वास्थ्य और इलेक्ट्रॉनिक क्षेत्र में व्यापक रूप से उपयोग किए जाने वाले ईएनपी का एक अन्य वर्ग है। सिल्वर (Ag) इंजीनियर नैनोमैटेरियल्स का अनुमानित वैश्विक उत्पादन प्रति वर्ष 400 से 800 टन है। पर्यावरण में ईएनपी कैसे व्यवहार करते हैं, यह निम्नलिखित कारकों पर निर्भर करता है जैसे प्रकार, विशेषता, (आकार और सतह के गुण), नैनोकणों को बनाने के लिए उपयोग की जाने वाली प्रक्रिया और जिस माध्यम में इसे फैलाया जाता है और माध्यम के भौतिक-रासायनिक गुण (पीएच (pH), आयनिक ताकत और विघटित आर्गेनिक कार्बनिक सामग्री) इत्यादि। ये ईएनपी पर्यावरण में विभिन्न प्रकार के घुलित पदार्थ, अकार्बनिक या कार्बनिक रसायनों के साथ परस्पर क्रिया करते हैं, जिससे नैनोमैटेरियल्स की एकत्रीकरण गतिकी (ऐग्रगेशन डायनैमिक्स) और फलस्वरूप स्थिरता प्रभावित होती है (चित्र 3)। कई परिवर्तन पर्यावरण और जैविक दोनों प्रणालियों में हो सकते हैं, जिसमें बायोमैक्रोमॉलीक्यूल्स, रेडॉक्स प्रतिक्रियाओं, एकत्रीकरण और विघटन के साथ प्रतिक्रियाएं शामिल हैं। रासायनिक परिवर्तन, एकत्रीकरण और पृथक्करण कुछ ऐसी प्रक्रियाएं हैं जिनसे ईएनपी पर्यावरण में समय के साथ गुजरता है। ईएनपी का एक्सपोजर अंततः, इसकी इकोटॉक्सिकोलॉजिकल क्षमता इन प्रक्रियाओं और ईएनपी रिलीज के बीच पारस्परिक प्रभाव से निर्धारित होती है। इनके परिवर्तन, परिवहन और जोखिम को प्रभावित करने वाले सबसे महत्वपूर्ण कारकों में से एक इनकी कोलाइडल स्थिरता है। पर्यावरण में ईएनपी का परिवहन प्राकृतिक कार्बनिक पदार्थ (NOM) की उपस्थिति से प्रभावित होता है। प्राकृतिक कार्बनिक पदार्थ (NOM) नैनोकणों के सोखने के लिए एक सतह प्रदान करता है। इस सोखने के परिणामस्वरूप ईएनपी का सतह आवेश (सरफेस चार्ज) और आवेश (चार्ज डेंसिटी) घनत्व भिन्न होता है, जो उनके परिवहन और प्रतिक्रियाशीलता को प्रभावित कर सकता है।

इनसे जुड़े पर्यावरणीय और मानव स्वास्थ्य खतरों की पर्याप्त भविष्यवाणी करने के लिए हमें ईएनपी संक्रमणों/परिवर्तनों की अपनी समझ को व्यापक बनाना चाहिए। विलयन, सल्फाइडेशन, एकत्रीकरण, और मैक्रोमॉलीक्यूल्स और अणुओं/आयनों को सोखना, साथ ही ऑक्सीकरण और कमी (रेडॉक्स) घटनाएं, पर्यावरण और



नैनोमैटेरियल्स की एकत्रीकरण गतिकी



जैविक प्रणालियों में होने वाले परिवर्तन

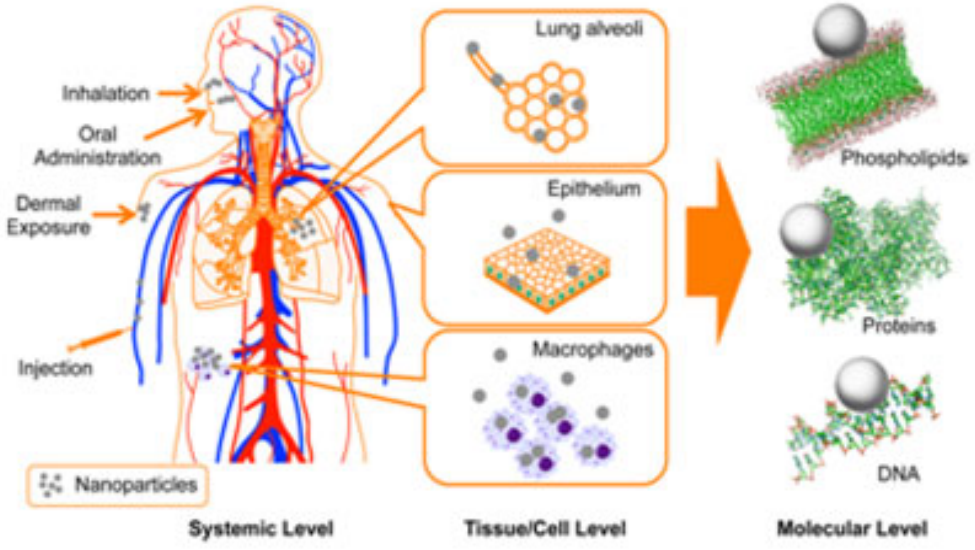
जैविक प्रणालियों (चित्र 4) में सभी आम हैं। विलयन का महत्व मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स (MONPs) के प्रकार और उनकी भौतिक-रासायनिक विशेषताओं से भी निर्धारित होता है। कुछ परिवर्तनो द्वारा पर्यावरण में ईएनपी की दृढ़ता को कम करने की क्षमता हो सकती है जैसे ZnO नैनोपार्टिकल्स का विघटन होना। इनके पूरे जीवन चक्र पर ईएनपी के जोखिम और जैविक परिणामों दोनों पर परिवर्तनों का प्रभाव अभी भी काफी हद तक अज्ञात है। इन मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स (MONPs) के पर्यावरणीय और मानव स्वास्थ्य प्रभावों का आकलन करने के लिए तीव्र और दीर्घकालिक एक्सपोजर से विभिन्न जोखिम मार्गों (एक्सपोज़र रूट) और विषाक्त प्रभावों को समझना आवश्यक है। उदाहरण के लिए, धात्विक चांदी के नैनोपार्टिकल्स, वातावरण में ऑक्सीकृत हो जाएंगे और सल्फिडाइज्ड हो सकते हैं। सल्फिडेशन कण की एकत्रीकरण स्थिति, सतह आवेश, साथ ही साथ Ag^+ आयनों को छोड़ने की उनकी क्षमता को प्रभावित करता है, जिससे उनकी स्थायित्व और विषाक्तता प्रभावित होती है। सामग्री के इस वर्ग में विषाक्तता अक्सर विषाक्त धनायन (टॉक्सिक कैटाइअन) के विघटन और रिलीज के माध्यम से व्यक्त की जाती है, जिसके परिणामस्वरूप कम दृढ़ता लेकिन उच्च विषाक्तता होती है। जारी किए गए ईएनपी के पर्यावरणीय भाग्य, जैवउपलब्धता और विषाक्तता को समझने के लिए, उनके व्यवहार की जांच करना महत्वपूर्ण है।

एक फोटोकैटलिटिक धातु ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स जब UV प्रकाश के संपर्क में आते हैं, तो प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियां (आरओएस) उत्पन्न होती हैं, जिससे जीवित जीवों पर प्रभाव

पड़ता है। फोटोऑक्सीडेशन/रिडक्शन फोटोलायिसिस और फोटोकटैलिसिस महत्वपूर्ण रासायनिक परिवर्तन हैं जो ईएनपी कोटिंग, ऑक्सीकरण अवस्था, फ्री रेडिकल उत्पादन और पर्यावरणीय दृढ़ता को प्रभावित करते हैं। प्रकाश के संपर्क में आने पर और अंधकार में फोटोकैटलिटिक सामग्री की विषाक्तता बहुत भिन्न होती है। UV प्रकाश की उपस्थिति कुछ इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स की विषाक्तता को भी प्रभावित करती है। इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स कोटिंग्स, ऑक्सीकरण स्थिति, प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियां (आरओएस) उत्पादन और दृढ़ता पर फोटो-प्रेरित फोटो इन्डूस्ट, प्रतिक्रियाओं का प्रभाव महत्वपूर्ण हो सकता है। सूर्य के प्रकाश के संपर्क में आने पर कई इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स फोटोएक्टिव हो जाते हैं और (आरओएस) उत्पन्न करते हैं। फोटोकैटलिटिक सामग्री को सूर्य के प्रकाश द्वारा ऑक्सीकृत या कम किया जा सकता है, जिससे उनकी रेडॉक्स अवस्था, आवेश और इसलिए उनकी विषाक्तता क्षमता में परिवर्तन होता है। कण मापदंडों का निर्धारण (जैसे, कण आकार, कैपिंग एजेंट, आदि) और पर्यावरण चर जैसे, रेडॉक्स स्थिति और मुक्त सल्फाइड की उपलब्धता जो उनके विघटन और/या सल्फाइडेशन दरों को प्रभावित करते हैं। पर्यावरण के लिए उनकी क्षमता का आकलन करने के लिए महत्वपूर्ण है। इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स का एकत्रीकरण सतह क्षेत्र (सरफेस एरिया) को आयतन प्रभाव तक कम कर देता है। कुल आकार में यह वृद्धि छिद्रित माध्यम, अवसादन (सेडमेन्टेशन), प्रतिक्रियाशीलता (रिएक्टिवटी), जीव अवशोषण (ऑर्गनिज़म अब्ज़ॉर्प्शन,) और विषाक्तता (टॉक्सिसिटी), में उनके गतिविधि पर प्रभाव डालती है। इसके अलावा, उपभोक्ता उत्पादों (TiO_2 and ZnO) में सबसे व्यापक रूप से उपयोग किए जाने वाले मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स (MONPs), आरओएस उत्पादन है और धातु आयन विघटन के कारण विशेष चिंता का विषय हैं। कुछ आंकड़ों में यह पाया गया है कि एंटीऑक्सिडेंट पॉलीमर के साथ लेपित मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स ((MONPs) ने आरओएस के गठन को कम करके विषाक्तता को कम किया है। मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स के कोटिंग्स और आकारिकी (मॉर्फोलॉजी) के प्रकार भी जीवों की विषाक्तता को प्रभावित करते हैं। उपयोग किए गए मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स (MONPs) के प्रकार, साथ ही साथ कल्चर मीडियम संरचना, एक्सपोज़र समय और MONP सांद्रण, कॉन्सन्ट्रेशन, सहित अन्य कारक, यह निर्धारित करते हैं कि वे कोशिकाओं के लिए साइटोटॉक्सिक या जीनोटॉक्सिक। विषाक्तता, मेटल ऑक्साइड नैनोपार्टिकल्स से धातु आयनों के निकलने, आरओएस की उत्पत्ति/या फोटोलिसिस के कारण है। इस प्रकार, जोखिम को कम करने के तरीकों की जांच करने के लिए, रिलीज तंत्र और परिवर्तन प्रक्रियाओं की समझ बढ़ाने के लिए, और उपभोक्ता/बाजार उत्पादों में आमतौर पर उपयोग किए जाने वाले ईएनपी के विषाक्तता आकलन का समर्थन करने के लिए अनुसंधान करना आवश्यक है।

3. एक्सपोजर आकलन : ईएनपी मनुष्यों के श्वसन और जठरांत्र (गैस्ट्रोइन्टेस्टाइनल) प्रणाली के लिए एक सीधा खतरा हैं क्योंकि ईएनपी जठरांत्र (गैस्ट्रोइन्टेस्टाइनल) और श्वसन प्रणाली के माध्यम से रक्तप्रवाह में अवशोषित होने के बाद मानव अंगों में प्रवेश करते हैं। पौधे, सूक्ष्मजीव और पशु के अंग सभी इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स को जमा करते हैं, जिसे पूरे खाद्य श्रृंखला में ले जाया और जमा किया जा सकता है। मानव और जैविक प्रणालियों में आकस्मिक प्रवेश के अलावा, इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स को जानबूझकर चिकित्सीय (थेरेप्यूटिक,) और नैदानिक (डायग्नॉस्टिक) उद्देश्यों के लिए मनुष्यों में इंजेक्ट किया जाता है। नतीजतन, जैविक प्रणालियों के साथ इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स का सम्बन्ध अनिवार्य है। ईएनपी एक अलग-अलग मार्ग से शरीर प्रणाली में प्रवेश कर सकते हैं जैसे हवा में सांस लेते समय, खाद्य पदार्थों का सेवन, पीने का पानी, कॉस्मेटिक उत्पादों और दवाओं को लेने या लगाने से। तीन मुख्य प्रवेश माध्यम, श्वसन पथ के माध्यम से सांस लेना, त्वचा के माध्यम से पारगमन (ट्रैन्सुडेशन), और पाचन तंत्र के माध्यम से अंतर्ग्रहण (चित्र 5) हैं। नैनोकणों से संपर्क, विकास और उत्पादन के साथ-साथ सिस्टम में प्रत्यक्ष अंतर्ग्रहण (इन्जेस्चन) या अंतः क्षेपण (इंजेक्शन,) और अपशिष्ट निपटान) जैसे अनुप्रयोगों के दौरान भी हो सकता है। अंतःशिरा (इन्ट्रवीनस) चमड़े के नीचे (सब्क्यूटेनीअस) सांस लेना, अंतर्गर्भाशयी (इंट्रापेरीटोनिअल) और मुख द्वारा संपर्क के कुछ अन्य तरीके हैं,। हालांकि मनुष्य में संपर्क के सबसे आम मार्ग है सांस लेना, अंतर्ग्रहण (इन्जेस्चन), त्वचा से संपर्क, और अंतःस्रावी इंजेक्शन हैं।

इस तरह से संपर्क उन्हें पर्यावरण में बने रहने और निर्माण करने में सक्षम बना सकते हैं, जिससे वे खाद्य श्रृंखला में शामिल हो सकते है और अजैविक और जैविक दोनों घटकों को प्रभावित कर सकते हैं। पर्यावरण में अन्य प्रजातियां, जैसे शैवाल और मछली, मेटल नैनोपार्टिकल्स को अवशोषित करने की अधिक संभावना रखते हैं, जिसे बाद में जानवरों और मनुष्यों द्वारा उपभोग किया जा सकता है। नैनोस्ट्रक्चर को प्रोटीन और कोशिकाओं जैसे जैविक घटकों के साथ अंतःक्रिया के माध्यम से शरीर में अवशोषित किया जा सकता है और फिर विभिन्न अंगों में स्थानांतरित किया जा सकता है, जहां वे एक ही संरचना में रह

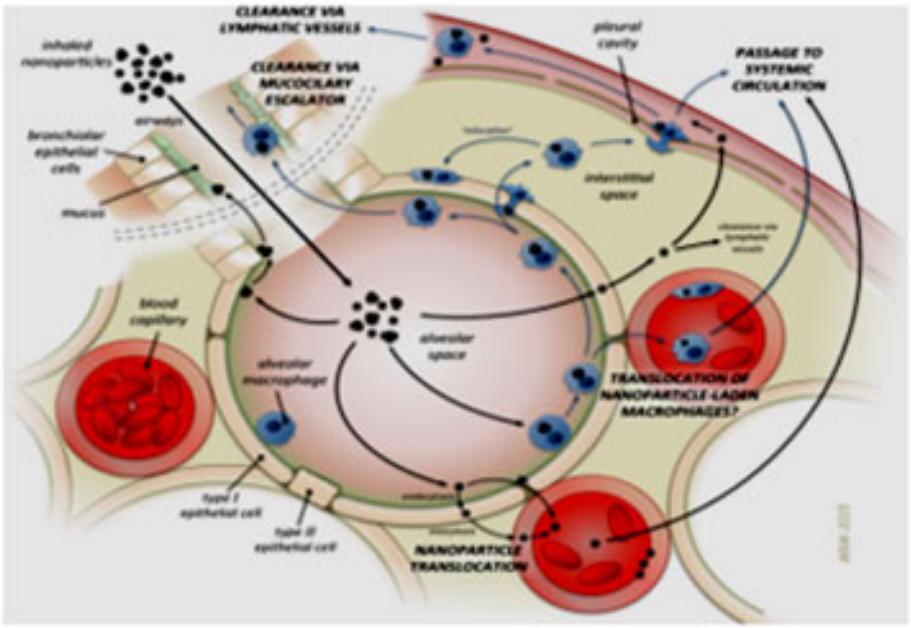


विभिन्न पैमानों पर जैविक प्रणालियों के साथ इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स की अंतःक्रिया

सकते हैं या परिवर्तित हो सकते हैं। चित्र 5 विभिन्न पैमानों पर जैविक प्रणालियों के साथ इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स की अंतःक्रिया को दर्शाता है।

संभव है कि पूरे शरीर में उनका वितरण उनके आकार और सतह की विशेषताओं द्वारा निर्धारित होता है। चूँकि कण का आकार घटने के साथ-साथ प्रति इकाई द्रव्यमान में सतह क्षेत्र बढ़ता है, नैनोकणों के शरीर में अधिक रासायनिक और जैविक गतिविधि होने की उम्मीद है। छोटे नैनोकण अपने बड़े समकक्षों की तुलना में अधिक हानिकारक हो सकते हैं। माना जाता है कि छोटे नैनोकण बड़ी कोशिकाओं की तुलना में तेजी से कोशिकाओं द्वारा ग्रहण किया जाता है। श्वसन तंत्र में कणों के आकार का शरीर में उनके संरचनात्मक फैलाव पर और साथ ही फेफड़ों में उनके संचय पर महत्वपूर्ण प्रभाव पड़ता है (चित्र 6)। फेफड़ों का महत्व इस तथ्य से उपजा है कि इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स एक एरोसोल के रूप में शरीर में सबसे आसानी से प्रवेश करता है, जिससे वे उचित आकार के होने पर फेफड़ों के वायुकोशीय क्षेत्र तक पहुंच सकते हैं।~ 34 नेनो मीटर से बड़े नैनोकण फेफड़ों में लगातार बने रहते हैं। जब व्यास ~ 6 नेनो मीटर से नीचे हो जाता है तब लगभग आधे नैनोपार्टिकल्स वायुकोशीय वायुक्षेत्र से रक्तप्रवाह में तेजी से प्रवेश करते हैं और ज्यादातर वृक्क निस्पंदन (रेनल फ़िल्टररेशन) के माध्यम से शरीर से साफ हो जाते हैं। कुल मिलाकर, कण का आकार वितरण का वायुमार्ग में नैनोकणों के संभावित लक्ष्य क्षेत्रों पर महत्वपूर्ण प्रभाव पड़ता है।

अंत में, कण आकार का प्रभाव इस बात पर पड़ता है कि कण फेफड़ों में कितनी गहराई तक प्रवेश कर सकते हैं। जब कण फेफड़ों में जैविक वातावरण के संपर्क में आते हैं, तो वे सर्फेक्टेंट में एल्ब्यूमिन और प्रोटीन जैसे जैव-अणुओं से घिरे होते है। इससे कण का व्यास बढ़ाता है, वायुमार्ग में कण की काइनैटिक्स को प्रभावित करता है, जैसे कि श्वसन मार्ग की दीवार या मैक्रोफेज में प्रभाव पड़ता है, या फिर वायुकोशीय क्षेत्र तक पहुंचता है, जहां इसे वायुकोशीय मैक्रोफेज द्वारा फैगोसाइट किया जा सकता है या वायुकोशीय दीवार से होकर प्रवेश कर सकता है और प्रणालीगत परिसंचरण में प्रवेश करता है (चित्र 6)। बड़े कणों को नाक या ऊपरी श्वसन पथ में रोक लिया जाता है और मैक्रोफेज द्वारा वायुमार्ग से निकाला जाता है, और बाद में निगल लिया जाता है (चित्र 6)। एयरब्लड बैरियर को पार करने के बाद, सांसों द्वारा खीचे गए नैनोकण रक्त परिसंचरण में पता लगाने योग्य स्तर तक पहुंच जाते हैं और विशिष्ट कोशिकाओं और ऊतकों में प्रवेश करने को दिखाया गया है (चित्र 6)। कृंतक (रोडन्ट) और मानव फेफड़े का वायुकोशीय क्षेत्र दसियों नैनोमीटर की सीमा में छोटे इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स के जमाव का प्रमुख स्थल है। कुछ नैनोमीटर की सीमा में एल्वियोली तक पहुंचने वाली सबसे छोटी इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स, वायुकोशीय दीवार से गुजर सकती है और प्रणालीगत परिसंचरण में प्रवेश कर सकती है। (चित्र 6)। कई इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स में उच्च सतह प्रतिक्रियाशीलता (हाई सरफेस रेअक्टिविटी) होती है, जो उत्तेजन और जमाव स्थल



पर प्रतिक्रियाशील कार्बनिक प्रजातियां (ROS) के गठन का कारण बन सकती है, जिसके परिणामस्वरूप स्थानीय क्षति हो सकती है। इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स का एक छोटा प्रतिशत जो वायुकोशीय क्षेत्र तक पहुंचता है, लसीका (लिम्फेटिक) और रक्त के माध्यम से आंतरिक अंगों और अंग प्रणालियों तक जा सकता है, जिससे प्रत्यक्ष और अप्रत्यक्ष मार्गों से नुकसान हो सकता है। इसके अलावा, यहां तक कि इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स स्थानान्तरण की अनुपस्थिति में, प्रणालीगत परिसंचरण (सिस्टेमिक सर्कुलेशन) में उत्तेजक मध्यस्थों की निर्गमन प्रणालीगत नुकसान हो सकता है। उपभोक्ताओं के लिए, जोखिम (एक्सपोज़र) का जठरांत्र मार्ग (गेस्ट्रो इन्टेस्टनल) अधिक हावी है। हालांकि, फुफुसीय मार्ग की तुलना में, यह श्रमिकों के लिए कम प्रासंगिक माना जाता है। यह ध्यान देने योग्य है कि म्यूकोसिलरी एस्केलेटर कोशिकाएं मौखिक गुहा (कैविटी) में सांस द्वारा अंदर लिए नैनोकणों के एक महत्वपूर्ण हिस्से को साफ करती हैं, जिन्हें बाद में निगल लिया जाता है और जठरांत्र (गेस्ट्रो इन्टेस्टनल) संबंधी मार्ग में अवशोषित कर लिया जाता है। त्वचा पर जमा इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स संभावित रूप से हाथ से मुंह तक के संपर्क के माध्यम से पेट के लुमेन में प्रवेश कर सकते हैं। आंत में प्रवेश करने के बाद इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स के स्थानीय हानिकारक प्रभाव हो सकते हैं। चूंकि मानव शरीर का सबसे बड़ा अंग त्वचा है, इसलिए इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स के त्वचीय जोखिम के संभावित महत्व को नजरअंदाज नहीं किया जाना चाहिए। हालांकि, इस बात का कोई पुख्ता सबूत नहीं है कि इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स क्षतिग्रस्त या घायल या सूजन वाली त्वचा के माध्यम से प्रणालीगत परिसंचरण में प्रवेश कर सकता है। हालांकि, यह संभव है कि त्वचा का नैनोकणों से एक्सपोजर नैनोकणों का त्वचा की सतही परतों में प्रवेश, डर्मिस में प्रवेश का कारण बनेगा, जिससे स्थानीय उत्तेजक (इन्फ्लैमटॉरी) प्रतिक्रिया शुरू हो जाएगी।

परिणाम एवं विवेचना

इक्कीसवीं सदी में नैनो तकनीक की मांग के साथ, लगभग हर क्षेत्र में नैनोकणों के संश्लेषण और अनुप्रयोग में नाटकीय वृद्धि हुई है। इसके परिणामस्वरूप उन व्यावसायिक अनुप्रयोगों का तेजी से विकास हुआ है जो निर्मित/इंजीनियर नैनोकणों (ENPs) की एक विस्तृत श्रृंखला का उपयोग करता है। नैनो-प्रौद्योगिकी के लिए व्यापक स्वीकार्यता प्राप्त करने के लिए नैनोकणों के निर्माण, विपणन, उपयोग, जोखिम मूल्यांकन और प्रबंधन के बीच संतुलन बनाना महत्वपूर्ण है। पर्याप्त नियम और कानून के आभाव से नैनो तकनीक के उपयोग से महत्वपूर्ण समस्याएं हो सकती हैं, जिससे पर्यावरण और मानव जाति को अपरिवर्त्य, क्षति हो सकती है। उत्पादित नैनोकणों के निर्माण, उपयोग और निपटान के परिणामस्वरूप अंततः हवा, मिट्टी और जलीय प्रणालियों में अनपेक्षित रिसाव होगा, जिससे एक संभावित पर्यावरणीय खतरा पैदा होगा। आकृति, आकार, सतह आवेश, क्रिस्टल प्रकार, संरचना जैसे भौतिक रासायनिक मापदंडों की प्रकृति का इसकी विषाक्तता पर प्रभाव पड़ता है। विभिन्न जानवरों, पौधों और मानव कोशिकाओं के साथ हुए प्रयोगों ने संकेत दिया है कि इंजीनियर नैनोपार्टिकल्स का विभिन्न प्रकार के सेलुलर मार्गों के

माध्यम से विषाक्तता का कारण बनता है जो ईएनपी के आकार, आकृति, सतह क्षेत्र, एकत्रीकरण क्षेत्र और सतही आवेश से संबंधित हैं। जिन प्रक्रियाओं से नैनोकणों का विभिन्न पारिस्थितिक तंत्रों तक पहुंचने के बाद हानिकारक प्रभाव पैदा होते हैं, उन्हें भविष्य में और अधिक शोध की आवश्यकता होगी। इस पेपर ने यह समीक्षा की कि कैसे धातु और धातु ऑक्साइड नैनोकणों की पौधों, मनुष्यों और जानवरों में विषाक्तता के अलग-अलग परिणाम हो सकते है।

सन्दर्भः

1. Ben R, Sumita P, Jesse A, 2008 'Nanotechnology Understanding Small Systems'. Taylor and Francis, London.
2. Knight M W, King N S & Liu L, H- O- Everitt, P. Nordlander , N- J- Halas, Aluminum for Plasmonics, *ACS Nano*, 2014, 8, 834-840
3. Jiang N, Zhuo X & Wang J, Active Plasmonics: Principles, Structures, and Applications, *Chem. Rev*., 2018, 118, 3054-3099
4. Cortie M B & McDonagh A M, Synthesis & Optical Properties of Hybrid and Alloy Plasmonic Nanoparticles, *Chem. Rev*., 2011, 111, 3713-3735.
5. Rycenga M, Cobley C M, Zeng J, W. Li, C. H. Moran, Zhang Q, Qin D & Xia Y, Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic Applications, *Chem. Rev*., 2011, 111, 6, 3669-3712
6. Ha M, Kim J H, You M, Li Q & Fan C, J.-M. Nam, Multicomponent Plasmonic Nanoparticles: From Heterostructured Nanoparticles to Colloidal Composite Nanostructures, *Chem. Rev*., 2019, 119, 24, 12208-12278
7. Krishnan S, Patel P N, Balasubramanian K K Chadha A, Yeast supported gold nanoparticles: an efficient catalyst for the synthesis of commercially important aryl amines, *New J. Chem*., 2021, 45, 1915-1923
8. Mayer K M & Hafner J H, Localized Surface Plasmon Resonance Sensors, *Chem. Rev*., 2011, 111, 3828-3857
9. K-&S- Lee & M. A. El-Sayed, Gold & Silver Nanoparticles in Sensing and Imaging:? Sensitivity of Plasmon Response to Size, Shape, and Metal Composition, *J. Phys*. Chem. B., 2006, 110, 19220-19225
10. Boriskina S V, Ghasemi H, Chen G, Plasmonic materials for energy: From physics to applications, *Mater. Today*., 2013, 16, 375-386
11. Lee J, Mahendra S, & Alvarez P J J, Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations, ACS Nano., 2010, 4, 7, 3580-3590
12. Ouay B L, Stellacci F, Antibacterial activity of silver nanoparticles: A surface science insight, Nano Today., 10, 339-354
13. Shah K W & Li W, A Review on Catalytic Nanomaterials for Volatile Organic Compounds VOC Removal and Their Applications for Healthy Buildings, Nanomaterials, 2019, 9, 910.
14. Ahamed A, Liang L, Lee M Y, Bobacka J, Lisak G, Too small to matter? Physicochemical transformation and toxicity of engineered $nTiO_2$, $nSiO_2$, nZnO, carbon nanotubes, and nAg, *J. Hazard. Mater.*, 2021, 404, 124107.
15. Abbas Q, Yousaf B, Habib Ullah, Muhammad Ubaid Ali,Yong Sik Ok, Jorg Rinklebe, Environmental transformation and nano-toxicity of engineered nano-particles (ENPs) in aquatic and terrestrial organisms, *Crit. Rev. Env. Sci. Tec*., 2020, 50, 2523-2581.
16. He X, Aker W G, Fu P P & Hwang H M, Toxicity of engineered metal oxide nanomaterials mediated by nano-bio-eco-interactions: a review and perspective, *Environ. Sci.: Nano*., 2015, **2**, 564-582.
17. Amde M, -fu Liu J, Tan Z Q, Bekana D, Transformation and bioavailability of metal oxide nanoparticles in aquatic and terrestrial environments. A review, *Environ. Pollut.*, 2017, 230, 250-267
18. Deline A R, Frank B P, Smith C L, Sigmon L R, Wallace A N, Gallagher M J, Goodwin D G, Jr., Durkin D P, Fairbrother D H, Influence of Oxygen-Containing Functional Groups on the Environmental Properties, Transformations, and Toxicity of Carbon Nanotubes, *Chem. Rev*., 2020, 120, 11651-11697.
19. Zhang Q, Xia T, Zhang C, Chronic Exposure to Titanium Dioxide Nanoparticles Induces Commensal-to-Pathogen Transition in Escherichia

coli, *Environ. Sci. Technol*., 2020, 54, 13186-13196.

20. Lead J R, Batley G E, Alvarez P J J, Croteau M N, Handy R D, McLaughlin M J, Judy J D & Schirmerh K, Nanomaterials in the Environment: Behavior, Fate, Bioavailability, and Effects-An Updated Review, *Environ Toxicol Chem*, 2018, 37, 2029-2063.
21. Fakhardo A F, Anastasova E I, Gabdullina S R, A. Solovyeva S, Saparova V B, Chrishtop V V, Koshevaya E D, Krivoshapkina E F, Krivoshapkin P V, Kiselev G O, Kalikina P A, Koshel E I, Shtil A A, & Vinogradov V V, Toxicity Patterns of Clinically Relevant Metal Oxide Nanoparticles, *ACS Appl. Bio Mater*., 2019, 2, 4427-4435.
22. Precupas A, Gheorghe D, Botea-Petcu A, Leonties A R, Sandu R, Popa V T, Mariussen E, Naouale E Y, Rundén-Pran E, Dumit V, Xue Y, Cimpan M R, Dusinska M, Haase A, Tanasescu S, Thermodynamic parameters at bio-nano interface and nanomaterial toxicity: A case study on BSA interaction with ZnO, SiO_2 and TiO_2, *Chem. Res. Toxicol*., 2020, 33, 2054-2071.
23. Simkó M, Mattsson M O, Risks from accidental exposures to engineered nanoparticles and neurological health effects: A critical review, *Part. Fibre. Toxicol.*, 2010, 7, 42.
24. Gnach A, Lipinski T, Bednarkiewicz A, Rybka J & John Capobianco A, Upconverting nanoparticles: assessing the toxicity, *Chem Soc Rev*, 2015,44, 1561-1584
25. Card J W, Zeldin D C, Bonner J C, Nestmann E R, Pulmonary applications and toxicity of engineered nanoparticles, *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol.*, 2008, 295, L400-L411.
26. Baalousha M, Yang Y, Vance M E, Colman B P, McNeal S, Xu J, Blaszczak J, Steele M, Bernhardt E, Hochella M F Jr., Outdoor urban nanomaterials: The emergence of a new, integrated, and critical field of study, *Sci. Total Environ*., 2016, 557-558, 740-753.
27. Bäuerlein P S, Emke E, Tromp P, Jan Hofman A M H, Carboni A, Schooneman F, de P. Voogt, van Wezel A P, Is there evidence for man-made nanoparticles in the Dutch environment?, *Sci. Total Environ*., 2017, 576, 273-283.
28. Yang Y, Vance M, Tou F, Tiwari A, Liu M & Hochella M F Jr. Nanoparticles in road dust from impervious urban surfaces: distribution, identification, and environmental implications, *Environ. Sci.: Nano*, 2016, 3, 534-544.
29. Gottschalk F, Sun T Y, Nowack B, Environmental concentrations of engineered nanomaterials: Review of modeling and analytical studies, *Environ. Pollut*., 2013, 181, 287-300.
30. Batley G E, Kirby J K, Mclaughlin M J, Fate & Risks of Nanomaterials in Aquatic and Terrestrial Environments, *Acc. Chem. Res*. 2013, 46, 3, 854-862
31. Cornelis G, Fate descriptors for engineered nanoparticles: the good, the bad, and the ugly, *Environ. Sci.: Nano*, 2015, 2, 19-26.
32. Bundschuh M, Filser J, Lüderwald S, McKee M S, Metreveli G, Schaumann G E, Schulz R & Wagner S, Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to?, *Environ. Sci. Eur*., 2018, 30, 6.
33. Hegde K, Brar S K, Verma M, Surampalli R Y, Current understandings of toxicity, risks and regulations of engineered nanoparticles with respect to environmental microorganisms, *Nanotechnol. Environ. Eng.*, 2016, 1, 5.
34. Karn B, Kuiken T & Otto M, Nanotechnology and in Situ Remediation: A Review of the Benefits and Potential Risks, *Environ. Health. Perspect*., 2009, 117,1823-1831.
35. Makhdoumi P, Karimi H, Khazaei M, Review on Metal-based Nanoparticles: Role of ROS in Renal Toxicity, *Chem. Res. Toxicol*., 2020, 33, 2503-2514.
36. Hwang H M, Ray P C, Yu H & He X, Toxicology of Designer/ Engineered Metallic Nanoparticles, *RSC Green Chem.*, 2012, DOI: 10-1039@9781849735469&00190
37. Corsi I, Winther M -Nielsen, Sethi R, Punta C, Della Torre C, Libralato G, Lofrano G, Sabatini L, Aiello M, Fiordi L, Cinuzzi F, Caneschi A,

Pellegrini D, Buttino I, Ecofriendly nanotechnologies and nanomaterials for environmental applications: Key issue and consensus recommendations for sustainable and ecosafe nanoremediation, *Ecotox. Environ. Safe.*, 2018, 154, 237-244.

38. Dwivedi A D, Dubey S P, Sillanpaa M, Kwon Y N, Lee C, Varma R S, Fate of Engineered Nanoparticles: Implications in the Environment, *Coord. Chem. Rev*., 2015, 287, 64-78.

39. Erdakos G B, Bhave P V, Pouliot G A, Simon H, & Mathur R, Predicting the Effects of Nanoscale Cerium Additives in Diesel Fuel on Regional-Scale Air Quality, *Environ. Sci. Technol*., 2014, 48, 12775-12782.

40. Espinasse B P, Geitner N K, Schierz A, Therezien M, Curtis John Richardson, Gregory V. Lowry, Lee Ferguson P, & Mark Wiesner R, Comparative persistence of engineered nanoparticles in a complex aquatic ecosystem, *Environ. Sci. Technol*. 2018, 52, 4072-4078

41. Montaño M D, Ranville J, Lowry G V, Detection and Characterization of Engineered Nanomaterials in the Environment: Current State-of-the-Art and Future Directions, EPA/600/R-14/244, August 2014.

42. Goswami L, Kim K H, Deep A, Das P, Bhattacharya S S, Kumar S, Adelodun A A, Engineered nano particles: Nature, behavior, and effect on the environment, *J. Environ. Manage.*, 2017, 196, 297-315.

43. Grillo R, Rosa A H, Fraceto L F, Engineered nanoparticles and organic matter: A review of the state-of-the-art, Chemosphere., 2019, 119, 608-619.

44. Hu X, Zhou Q, Health and Ecosystem Risks of Graphene, *Chem. Rev.*, 2013, 113, 3815-3835.

45. John A C, Küpper M, Manders-Groot A M M, Debray B, Lacome J M & Kuhlbusch T A J, Emissions and Possible Environmental Implication of Engineered Nanomaterials (ENMs) in the Atmosphere, *Atmosphere*, 2017, 8, 84.

46. Keller A A & Lazareva A, Predicted Releases of Engineered Nanomaterials: From Global to Regional to Local, *Environ. Sci. Technol. Lett*., 2014, 1, 65-70.

47. Petersen E J, Zhang L, Mattison N T, O'Carroll D M, Whelton A J, Uddin N, Nguyen T, Huang Q, Henry T B, Holbrook D & Chen K L, Potential Release Pathways, Environmental Fate, And Ecological Risks of Carbon Nanotubes, *Environ. Sci. Technol*., 2011, 45, 9837-9856.

48. Mu Q, Jiang G, Chen L, Zhou H, Fourches D, Tropsha A & Yan B Chemical Basis of Interactions Between Engineered Nanoparticles and Biological Systems, *Chem. Rev*., 2014, 114, 7740-7781.

49. Khlebtsov N, Dykman L, Biodistribution and toxicity of engineered gold nanoparticles: a review of in vitro and in vivo studies, *Chem. Soc. Rev.*, 2011, 40, 1647-1671.

50. Angel B M, Batley G E, Jarolimek C V, Rogers N J, The impact of size on the fate and toxicity of nanoparticulate silver in aquatic systems, *Chemosphere*, 2013, 93, 359-365.

51. Verma A & Stellacci F, Effect of Surface Properties on Nanoparticle-Cell Interactions, Small, 2010, 6, 12-21.

52. Hou J, Wang L, Wang C, Zhang S, Liu H, Li S, Wang X, Toxicity and mechanisms of action of titanium dioxide nanoparticles in living organisms, J. Environ. Sci.,2019,75, 40-53

53. Sekeryan S T & Hicks A L, Emerging investigator series: calculating size- and coating-dependent effect factors for silver nanoparticles to inform characterization factor development for usage in life cycle assessment, Environ. Sci.: Nano., 2020,7, 2436.

54. Ganguly P, Breen A & Pillai S C, Toxicity of Nanomaterials: Exposure, Pathways, Assessment, and Recent Advances, ACS Biomater. Sci. Eng., 2018, 4, 2237?2275.

55. Sani A C-Cao Cui D, Toxicity of gold nanoparticles (AuNPs): A review, Biochem. Biophys. Rep., 2021, 26, 100991

56. Singh A K, Engineered Nanoparticles Structure, Properties and Mechanisms of Toxicity, Book: Engineered Nanoparticles, Elsevier, 2016, http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801406-6.00001-7

57. Yong K T, Law W C, Hu R, Ye L, Liu L, Swiharte M T & Prasad P N, Nanotoxicity assessment of

quantum dots: from cellular to primate studies, Chem. Soc. Rev., 2013,42, 1236-1250

58. Waghmode M S, Gunjal A B, Mulla J A, Patil N N, Nawani N N, Studies on the titanium dioxide nanoparticles: biosynthesis, applications and remediation, SN Appl. Sci., 2019, 1, 310

59. Jones M R, Osberg K D, Macfarlane R J, Langille M R & Mirkin C A, Templated Techniques for the Synthesis and Assembly of Plasmonic Nanostructures, Chem. Rev., 2011, 111, 3736-3827

60. Lim W Q, Ga Z, Plasmonic nanoparticles in biomedicine, Nano Today, 2016, 168-188