19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

استفاده از نانوذرات در تصفیه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین: مروری علمی

علیرضا آل ابراهیم[1*]، سید حسین بنی طبا[2]

۱و۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

Alebrahimali94@gmail.com

چکیده:

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر است که سلامت انسان، گیاهان و اکوسیستم‌های طبیعی را تهدید می‌کند. فلزاتی نظیر سرب، کادمیوم، جیوه و کروم به‌دلیل پایداری بالا و تجزیه‌ناپذیری زیستی، در خاک تجمع می‌یابند و وارد زنجیره غذایی می‌شوند. فناوری نانو با ارائه نانوذراتی با سطح ویژه بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی زیاد و توانایی هدف‌گیری انتخابی آلاینده‌ها، به‌عنوان روشی نوین و مؤثر برای پالایش خاک‌های آلوده مطرح شده است. در این مقاله، ضمن معرفی انواع نانوذرات مورد استفاده مانند آهن صفر ظرفیتی(nZVI) ، اکسیدهای فلزی، نانولوله‌های کربنی و نانوکامپوزیت‌ها، مکانیسم‌های اصلی عملکرد آن‌ها شامل جذب سطحی، احیا، تثبیت و کلات‌سازی بررسی شده است. همچنین مزایا و چالش‌های کاربرد این فناوری در مقایسه با روش‌های سنتی، به‌ویژه در زمینه پایداری زیست‌محیطی و امکان بازیافت، تحلیل شده است. مطالعات موردی داخلی و بین‌المللی نیز نشان می‌دهند که نانوذرات می‌توانند به‌صورت مؤثر در کاهش غلظت فلزات سنگین در خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات، به‌ویژه در ترکیب با روش‌های زیستی مانند فیتورمیدییشن، افق‌های نوینی را در بازسازی خاک و حفظ منابع طبیعی کشور فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی :آلودگی خاک، فلزات سنگین، نانوذرات، فیتورمدیشن، بازسازی خاک، پایداری زیست‌محیطی

مقدمه

با گسترش فعالیت‌های صنعتی، استفاده بی‌رویه از کودها و سموم کشاورزی، و دفع غیراصولی فاضلاب و پسماندهای صنعتی، آلودگی خاک به عناصر سنگین به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهانی تبدیل شده است. فلزات سنگینی مانند سرب(Pb) ، کادمیوم(Cd) ، جیوه(Hg) ، آرسنیک (As) و کروم (Cr) دارای پایداری بالا، غیرقابل تجزیه زیستی بوده و در محیط انباشته می‌شوند. این عناصر از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان و حیوان شده و می‌توانند منجر به بیماری‌های جدی مانند آسیب به سیستم عصبی، کلیه، کبد و سرطان شوند (Ahmad et al., 2014). آلودگی خاک با عناصر سنگین همچنین موجب کاهش فعالیت‌های زیستی مفید در خاک، کاهش حاصلخیزی و تخریب ساختار فیزیکی آن می‌گردد (Li & Zhang, 2007). تاکنون روش‌های مختلفی برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از جمله شست‌وشوی خاک، استخراج شیمیایی، تثبیت و بی‌حرکت‌سازی، و روش‌های گیاه‌پالایی. با وجود کاربرد گسترده این روش‌ها، مشکلاتی مانند هزینه‌های بالا، زمان‌بر بودن، کارایی پایین در غلظت‌های زیاد آلاینده، و پتانسیل آسیب‌های ثانویه به محیط‌زیست وجود دارد (Zhang et al., 2010).فناوری نانو، به‌عنوان رویکردی نوین و امیدبخش، با بهره‌گیری از نانوذرات با سطح ویژه زیاد، فعالیت سطحی بالا، و توانایی واکنش‌دهی مناسب با آلاینده‌ها، قابلیت مؤثری در حذف یا تثبیت فلزات سنگین از خاک نشان داده است. نانوذراتی نظیر نانوذرات آهن صفرظرفیتی(nZVI) ، نانوذرات اکسید فلزی) مانندZnO ، TiO_2و (Fe_2O_3) و نانوکربن‌ها، توانایی بالایی در کاهش زیست‌دسترسی فلزات سنگین دارند (Li & Zhang, 2007). همچنین، استفاده از نانوذرات سنتز شده به روش‌های سبز، که در آن از منابع طبیعی همچون عصاره گیاهان برای تولید نانوذرات استفاده می‌شود، می‌تواند به کاهش اثرات جانبی زیست‌محیطی منجر شود. ترکیب فناوری نانو با روش‌های گیاه‌پالایی (نانو-فیتورمیدیشن) یکی از رویکردهای نوظهور و کارآمد در این زمینه به شمار می‌رود (Ahmad et al., 2014). با توجه به موارد فوق، هدف این مقاله بررسی جامع نقش و عملکرد فناوری نانو در حذف فلزات سنگین از خاک، تحلیل مکانیسم‌های اصلی عملکرد نانوذرات، مرور مزایا و معایب این فناوری، و ارائه پیشنهاداتی برای توسعه آتی آن می‌باشد.

تعریف فلزات سنگین و اثرات آن‌ها بر خاک، گیاه و انسان

تعریف فلزات سنگین

فلزات سنگین به عناصری گفته می‌شود که چگالی بالاتر از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارند و معمولاً سمی و غیرقابل تجزیه زیستی هستند .(Alloway, 2013) از جمله فلزات سنگین رایج در آلودگی خاک می‌توان به سرب(Pb) ، کادمیوم(Cd) ، جیوه(Hg) ، کروم(Cr) ، نیکل(Ni) ، آرسنیک (As) و مس (Cu) اشاره کرد. این فلزات به طور طبیعی در خاک وجود دارند، اما فعالیت‌های انسانی باعث افزایش غلظت آن‌ها تا سطوح خطرناک شده است.(Tchounwou et al., 2012)

منابع آلودگی و اثرات فلزات سنگین در خاک

آلودگی خاک به فلزات سنگین عمدتاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی، معادن، فاضلاب‌ها و مصرف کودها و سموم کشاورزی است. برای نمونه، سرب از صنایع باتری‌سازی و سوخت‌های فسیلی، و کادمیوم از کودهای فسفاته و فاضلاب‌های صنعتی وارد خاک می‌شود (Kabata-Pendias, 2011). فلزات سنگین با تغییر ساختار خاک و کاهش تنوع میکروبی، فعالیت‌های آنزیمی را مهار کرده و تعادل زیستی خاک را مختل می‌کنند (Giller et al., 2009).

اثرات فلزات سنگین بر گیاهان و انسان ها

فلزات سنگین در گیاهان باعث اختلال در جذب آب و مواد غذایی، آسیب به غشاء سلولی و ایجاد استرس اکسیداتیو می‌شوند که به کاهش رشد، زردی برگ‌ها و افت عملکرد محصول منجر می‌گردد (Clemens, 2006). مهم‌ترین نگرانی ورود این فلزات به زنجیره غذایی است که می‌تواند مشکلاتی چون اختلالات عصبی، آسیب کلیوی و کبدی، تضعیف سیستم ایمنی و حتی سرطان ایجاد کند (Jaishankar et al., 2014).

فناوری نانو و انواع نانوذرات مورد استفاده در پاکسازی خاک‌های آلوده

معرفی فناوری نانو

فناوری نانو دانشی میان‌رشته‌ای است که به بررسی و استفاده از مواد در مقیاس نانومتری (۱ تا ۱۰۰ نانومتر) می‌پردازد. در این مقیاس، مواد دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی منحصربه‌فردی هستند که آن‌ها را برای کاربردهای گوناگون، از جمله در محیط‌زیست، بسیار مؤثر می‌سازد.(Klaine et al., 2008) نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، فعالیت سطحی بیشتر، و قابلیت واکنش‌پذیری ویژه، توانایی تعامل قوی‌تری با آلاینده‌های فلزی در خاک دارند و می‌توانند به روش‌های مختلف از جمله جذب سطحی، احیا یا تثبیت، به کاهش آلودگی کمک کنند.(Nowack & Bucheli, 2007)

انواع نانوذرات مورد استفاده در پاک‌سازی فلزات سنگین

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی(nZVI)

این نانوذرات به دلیل خاصیت احیایی بالا و سازگاری زیست‌محیطی، یکی از پرکاربردترین نانوذرات در پاکسازی فلزات سنگین به‌شمار می‌آیند nZVI .می‌تواند یون‌های فلزی را احیا کرده و به فرم‌های کم‌تحرک یا غیرسمی تبدیل کند (Li & Zhang, 2007).برای مثال، nZVIدر حذف فلزاتی مانند کروم(VI) ، کادمیوم و سرب عملکرد قابل توجهی نشان داده است.

نانوذرات اکسید فلزی

نانوذرات اکسید فلزی مانند نانوTiO_2 ، ZnO، Fe_2O_3و MnO_2 نیز به‌طور گسترده در جذب و حذف فلزات سنگین استفاده می‌شوند. این نانوذرات دارای ظرفیت جذب بالا و پایداری شیمیایی قابل توجهی هستند. برای مثال، ZnOقابلیت جذب فلزات دو ظرفیتی مانند Cd^{2+} و Pb^{2+} را دارد.(Zhang et al., 2010)

نانوکربن‌ها (نانولوله‌های کربنی، گرافن اکسید و نانوفیبرهای کربنی)

نانوکربن‌ها به دلیل سطح ویژه بالا و ساختار متخلخل، توانایی خوبی در جذب یون‌های فلزی دارند. مطالعات نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) می‌توانند به‌طور مؤثر یون‌های فلزات سنگین مانند Pb^{2+} و Cu^{2+} را از محیط جذب کنند.(Liu et al., 2007)

نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها موادی هستند که از ترکیب چند نوع نانوذره ساخته شده‌اند تا مزایای آن‌ها را همزمان داشته باشند. به عنوان مثال، ترکیب nZVI با گرافن اکسید، موجب افزایش پایداری، قابلیت پراکنش بهتر در خاک و بازده بالاتر جذب فلزات می‌شود (He & Zhao, 2005).

مکانیسم عملکرد نانوذرات در حذف فلزات سنگین از خاک

جذب سطحی(Adsorption)

یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های حذف فلزات سنگین توسط نانوذرات، جذب سطحی است. نانوذرات به دلیل داشتن سطح ویژه بسیار بالا و گروه‌های عاملی فعال روی سطح خود، قادر به جذب یون‌های فلزی از محلول‌های خاک هستند. این فرآیند به صورت پیوندهای شیمیایی یا فیزیکی بین نانوذرات و یون‌های فلزی انجام می‌شود و منجر به تثبیت فلزات در محلول و کاهش زیست‌دسترسی آن‌ها می‌گردد.(Gupta & Suhas, 2009)

احیاء(Reduction)

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی (nZVI) به دلیل توانایی احیاء بالایی که دارند، می‌توانند فلزات سنگین را به فرم‌های کمتر سمی یا غیرمحلول تبدیل کنند. به عنوان مثال، کروم شش ظرفیتی (Cr^{6+}) که بسیار سمی است، توسط nZVI به کروم سه ظرفیتی (Cr^{3+})که کم‌ضررتر است، احیاء می‌شود.(Li & Zhang, 2007)

تثبیت و رسوب‌گذاری(Immobilization and Precipitation)

نانوذرات می‌توانند یون‌های فلزی را به صورت ترکیبات پایدار شیمیایی مانند هیدروکسیدها یا اکسیدهای فلزی تثبیت کنند که در خاک رسوب می‌کنند و از دسترس زیستی خارج می‌شوند. این فرآیند باعث کاهش حرکت فلزات در خاک و نفوذ آن‌ها به آب‌های زیرزمینی می‌شود.(Jiang et al., 2011)

کلات‌سازی(Chelation)

برخی نانوذرات به ویژه نانوکربن‌ها و نانوکامپوزیت‌ها، دارای گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل، هیدروکسیل و آمین هستند که می‌توانند یون‌های فلزی را به صورت کلات‌های پایدار در سطح خود نگه دارند.(Liu et al., 2007)

مقایسه ویژگی‌های انواع نانوذرات

نوع نانوذره	مکانیسم اصلی	مزایا	محدودیت‌ها
nZVI	احیای فلزات	فعالیت بالا، فراوانی	ناپایداری در خاک، اکسیداسیون سریع
ZnO, TiO_2	جذب سطحی	پایداری شیمیایی بالا	احتمال سمیت به میکروارگانیسم‌ها
نانوکربن‌ها	جذب فیزیکی و شیمیایی	سطح ویژه بالا، زیست‌سازگار	هزینه بالا، بازیابی دشوار
نانوکامپوزیت‌ها	ترکیبی	عملکرد تقویت‌شده	پیچیدگی تولید
روش سبز	متنوع	کم‌هزینه، بدون مواد سمی	نیازمند بهینه‌سازی بیشتر

مزایا و محدودیت‌های فناوری نانو در پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

مزایای فناوری نانو

بازدهی بالا :نانوذرات به دلیل سطح ویژه زیاد و واکنش‌پذیری بالا، قادرند فلزات سنگین را با کارایی بالاتری نسبت به روش‌های سنتی جذب و حذف کنند.(Nowack & Bucheli, 2007)

- **سرعت عملکرد :**واکنش‌های حذف آلاینده‌ها در حضور نانوذرات سریع‌تر انجام می‌شود که می‌تواند زمان پاکسازی را کاهش دهد.(Li & Zhang, 2007)
- **تنوع کاربرد :**نانوذرات متنوعی وجود دارند که می‌توانند در شرایط مختلف خاک و آلاینده‌ها به کار گرفته شوند. علاوه بر این، امکان اصلاح سطح نانوذرات برای افزایش کارایی وجود دارد.(Iravani, 2011)
- **زیست‌سازگاری :**با استفاده از روش‌های سبز سنتز نانوذرات، می‌توان اثرات زیست‌محیطی فناوری نانو را کاهش داد (Ahmad et al., 2014).

محدودیت‌ها و چالش‌ها

با وجود مزایای متعدد نانوذرات در بازسازی خاک‌های آلوده، چالش‌های مهمی نیز وجود دارد. ناپایداری و تجمع نانوذرات در خاک ممکن است در اثر اکسیداسیون یا واکنش با سایر ترکیبات عملکرد آن‌ها را کاهش دهد (He & Zhao, 2005). همچنین، برخی نانوذرات می‌توانند اثرات منفی بر میکروارگانیسم‌های خاک گذاشته و تعادل زیستی را برهم زنند که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است (Klaine et al., 2008). هزینه بالای تولید و اصلاح نانوذرات با کیفیت مناسب نیز یکی از موانع اصلی تجاری‌سازی این فناوری محسوب می‌شود (Nowack & Bucheli, 2007). علاوه بر این، بازیابی و دفع نانوذرات پس از فرآیند پالایش دشوار بوده و در صورت باقی‌ماندن در محیط می‌توانند خود به منبعی جدید از آلودگی تبدیل شوند (Gupta & Suhas, 2009).

مطالعات موردی در استفاده از فناوری نانو برای پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

پاکسازی خاک آلوده به کروم با نانوذرات آهن صفر ظرفیتی(nZVI)

در مطالعه‌ای که توسط Li و Zhang (2007) انجام شد، استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی برای احیای کروم شش ظرفیتی (Cr^{6+})به کروم سه ظرفیتی (Cr^{3+}) در خاک آلوده بررسی شد. نتایج نشان داد که nZVI توانست بیش از ۹۰٪ Cr^{6+} موجود در خاک را طی چند روز به فرم کمتر سمی تبدیل کند و باعث کاهش قابل توجه آلودگی شود. این روش نسبت به روش‌های سنتی سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر بود.

حذف سرب و کادمیوم از خاک کشاورزی با نانوذرات اکسید روی(ZnO)

در تحقیق انجام شده توسط Zhang و همکاران (۲۰۱۰)، نانوذرات ZnO به عنوان جاذب فلزات سنگین به خاک‌های آلوده اضافه شدند. نتایج نشان داد که این نانوذرات توانستند تا ۸۵٪ سرب (Pb) و ۷۸٪ کادمیوم (Cd) را از خاک جذب و تثبیت کنند. همچنین استفاده از ZnO باعث بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش قابلیت جذب فلزات سنگین گردید.

استفاده از نانولوله‌های کربنی برای حذف مس و سرب

Liu و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای تأثیر نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) را در حذف یون‌های مس (Cu^{2+}) و سرب (Pb^{2+}) از خاک‌های آلوده بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که MWCNTs قادر به جذب موثر یون‌های فلزی بودند و این فناوری می‌تواند به عنوان یک روش مکمل در پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده شود.

به‌کارگیری نانوکامپوزیت‌های آهن-گرافن اکسید

در یک مطالعه دیگر، بهینه‌سازی عملکرد نانوکامپوزیت‌های ترکیبی nZVI/گرافن اکسید جهت حذف آلاینده‌های فلزی مورد بررسی قرار گرفت .(He & Zhao, 2005) نتایج نشان داد که حضور گرافن اکسید موجب افزایش پایداری و قابلیت پراکنش نانوذرات آهن شده و بازده حذف فلزات سنگین تا ۲۰٪ افزایش یافت. این ترکیب برای کاربردهای محیط‌زیستی بسیار امیدوارکننده است.

مطالعات موردی در ایران درباره استفاده از فناوری نانو برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین

جذب فلزات سنگین از خاک آلوده با استفاده از اکسید گرافن

در مطالعه‌ای توسط پژوهشگران دانشگاه لرستان و دانشگاه تربیت مدرس، از **اکسید گرافن (GO)** برای حذف فلزات سنگین از خاک آلوده به لجن فاضلاب استفاده شد. نتایج نشان داد که GO می‌تواند به‌طور مؤثر فلزاتی مانند **سرب(Pb) ، کادمیوم (Cd)و روی (Zn)** را از خاک جذب کند و باعث کاهش معنی‌دار زیست‌دسترسی این عناصر گردد. این مطالعه پتانسیل بالای نانوذرات کربنی در شرایط خاک ایران را تأیید می‌کند.(Ghasemi et al., 2022)

بررسی فلزات سنگین در خاک‌های اولترامافیک کردستان

در مطالعه‌ای زمین‌شناسی–محیط‌زیستی در استان کردستان، وجود عناصر سنگین مانند **نیکل(Ni) ، کروم(Cr) ، کبالت (Co)، سرب (Pb)** و **وانادیوم (V)** در خاک‌های منشأ گرفته از سنگ‌های اولترامافیک بررسی شد. نتایج نشان داد که این

فلزات، چه از منابع طبیعی و چه انسانی، می‌توانند در خاک تجمع یافته و نیاز به روش‌های پالایش پیشرفته نظیر فناوری نانو وجود دارد.(Mokhtari et al., 2019)

استفاده از فیتورمیدییشن تقویت‌شده با نانوذرات در منطقه خاتون‌آباد

در منطقه خاتون‌آباد (نزدیکی مجتمع مس سرچشمه)، پژوهشی برای بررسی توان گیاهان بومی در استخراج فلزات سنگین از خاک انجام شد. در این مطالعه، نانوذرات زیست‌سازگار به بستر خاک اضافه شد تا جذب فلزات سنگین توسط گیاهان افزایش یابد. نتایج نشان داد که نانوذرات می‌توانند اثربخشی گیاه‌پالایی (فیتورمیدییشن) را تا ۲ برابر افزایش دهند (Rahimi et al., 2022).

نتیجه گیری:

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی به شمار می‌رود که سلامت انسان، گیاه و پایداری اکوسیستم‌ها را تهدید می‌کند. نانوذرات به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود از جمله سطح ویژه بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی زیاد و قابلیت هدف‌گیری انتخابی آلاینده‌ها، به‌عنوان روشی نوین و مؤثر در بازسازی خاک‌های آلوده مطرح شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوذراتی مانند آهن صفر ظرفیتی (nZVI)، اکسیدهای فلزی، نانولوله‌های کربنی و نانوکامپوزیت‌ها توانسته‌اند در کاهش غلظت فلزات سنگین در خاک به‌طور چشمگیری مؤثر باشند. با این حال، چالش‌هایی نظیر سمیت بالقوه، هزینه بالا و مشکلات مقیاس‌پذیری همچنان مانع کاربرد گسترده این فناوری است. ترکیب نانوذرات با روش‌های زیستی همچون فیتورمیدییشن می‌تواند رویکردی پایدارتر و کارآمدتر برای بازسازی خاک فراهم آورد. در نهایت، توسعه پژوهش‌های بومی و مطالعات میدانی در شرایط واقعی کشور می‌تواند نقش مهمی در بومی‌سازی این فناوری و حفاظت از منابع طبیعی ایفا کند.

فهرست منابع

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. Chemosphere, 99, 19–33. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Vol. 22). Springer Science & Business Media.

Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. Biochimie, 88(11), 1707-1719. https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003

Ghasemi, A., Zarei, M., & Kord, M. (2022). Efficiency of graphene oxide nanoparticles in removal of heavy metals from sewage sludge-amended soil. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 19(1), 1–10. https://journals.iau.ir/article_708837.html

Giller, K. E., Witter, E., & Mcgrath, S. P. (2009). Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: A review. Soil Biology and Biochemistry, 43(10), 2010-2027. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.005

Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal–A review. Journal of Environmental Management, 90(8), 2313-2342.

He, F., & Zhao, D. (2005). Preparation and characterization of a new class of starch-stabilized bimetallic nanoparticles for degradation of chlorinated hydrocarbons in water. Environmental Science & Technology, 39(9), 3314-3320.

Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. Green Chemistry, 13(10), 2638–2650.

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. Interdisciplinary Toxicology, 7(2), 60-72. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

Jiang, J., Oberdörster, G., & Biswas, P. (2011). Characterization of size, surface charge, and agglomeration state of nanoparticle dispersions for toxicological studies. Journal of Nanoparticle Research, 11(1), 77–89.

Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants. CRC Press.

Klaine, S. J., Alvarez, P. J., Batley, G. E., Fernandes, T. F., Handy, R. D., Lyon, D. Y., ... & Lead, J. R. (2008). Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. Environmental Toxicology and Chemistry, 27(9), 1825-1851.

Li, X., & Zhang, W. X. (2007). Sequestration of metal cations with zerovalent iron nanoparticles—A study with high resolution X-ray photoelectron spectroscopy (HR-XPS). Journal of Physical Chemistry C, 111(15), 5774–5780.

Liu, Y., Wang, J., & Zheng, Y. (2007). Removal of copper (II) and lead (II) from aqueous solution by carboxylated carbon nanotubes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 302(1-3), 1-7.

Mokhtari, M., Amini, H. R., & Zare, M. R. (2019). Assessment of heavy metals in ultramafic soils of Kurdistan Province and their environmental implications. Iranian Journal of Geology and Environmental Sciences, 11(4), 45–58. https://journals.ut.ac.ir/article_71335.html

Nowack, B., & Bucheli, T. D. (2007). Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. Environmental Pollution, 150(1), 5–22.

Rahimi, R., Ghorbani, H., & Movahedi, N. (2022). Enhancement of phytoremediation using engineered nanoparticles in heavy metal contaminated soils near Khatoun Abad copper site. Water, 14(22), 3597. https://www.mdpi.com/2073-4441/14/22/3597

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology, 101, 133-164.

Zhang, L., Jiang, Y., Ding, Y., Povey, M., & York, D. (2010). Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). Journal of Nanoparticle

Application of Nanoparticles in the Remediation of Heavy Metal–Contaminated Soils: A Scientific Review

Alireza Aleebrahim[1]*, Seyad Hossein Banitaba[2]

[1,2]Departments of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

Abstract

Soil contamination with heavy metals is one of the most pressing environmental challenges of the present era, posing threats to human health, plants, and natural ecosystems. Metals such as lead, cadmium, mercury, and chromium accumulate in the soil due to their high stability and resistance to biodegradation, eventually entering the food chain. Nanotechnology, by offering nanoparticles with high surface area, enhanced chemical reactivity, and the ability to selectively target pollutants, has emerged as a novel and effective approach for remediating contaminated soils. This article introduces various types of nanoparticles used for this purpose, including zero-valent iron (nZVI), metal oxides, carbon nanotubes, and nanocomposites, and examines their primary mechanisms of action, such as surface adsorption, reduction, stabilization, and chelation. The advantages and challenges of applying this technology, particularly regarding environmental sustainability and recyclability, are also analyzed in comparison with conventional methods. Both domestic and international case studies indicate that nanoparticles can effectively reduce heavy metal concentrations in contaminated soils. The findings of this study suggest that the use of nanoparticles, especially in combination with biological methods such as phytoremediation, opens new horizons for soil restoration and the conservation of the country’s natural resources.

Keywords: Soil contamination, Heavy metals, Nanoparticles, Phytoremediation, Soil restoration, Environmental sustainability.