



تاثیر نانوذره آهن صفر ظرفیتی (nZVI) بر شاخص توزیع کاهش یافته (I_R) مس در خاک

رقیه حمزه نژاد^۱، ابراهیم سپهر^{۲*}، عباس صمدی^۳، میرحسن رسولی صدقیانی^۲، حبیب خداوردیلو^۲
دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، استاد گروه
علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ارومیه،
e.sepehr@urmia.ac.ir

چکیده

بمنظور بررسی تاثیر نانوذره آهن صفر ظرفیتی بر شکل‌های شیمیایی مس در خاک، آزمایشی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با ۴ سطح نانوذره (۰، ۱، ۲ و ۴ درصد) در ۳ تکرار انجام گرفت و توزیع عناصر مذکور در زمان‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ هفته با روش عصاره‌گیری متوالی تعیین و شاخص توزیع کاهش یافته (I_R) محاسبه گردید. کاربرد نانوذره آهن صفر ظرفیتی موجب کاهش معنی‌دار ($P \leq 0.05$) مس در بخش‌های تبادل و کربناتی و افزایش معنی‌دار مس در بخش‌های پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز نسبت به خاک شاهد گردید. با افزایش درصد نانوذره افزوده شده به خاک و زمان انکوباسیون، مقدار I_R افزایش یافت که بیانگر توزیع فلز در بخش‌های پایدار خاک است. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن نانوذره آهن صفر ظرفیتی به خاک، منجر به کاهش تحرک مس در خاک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانوذره آهن صفر ظرفیتی، شکل‌های شیمیایی عناصر، عصاره‌گیری متوالی، مس.

مقدمه

فلزات سنگین با توجه عدم زیست تخریب پذیری آنها، تجمع آنها در موجودات زنده و جذب آنها در زنجیره‌های غذایی و آثار زیان بار فیزیولوژیک بر جانداران اهمیتی ویژه در آلودگی محیط زیست و سلامت بشر دارند. مس یک عنصر غذایی کم مصرف ضروری برای انسان، بیشتر حیوانات و گیاهان می‌باشد. اما مقدار زیاد آن برای تمامی موجودات زنده سمیت ایجاد می‌کند (khan and Wahab, 2007). غلظت معمول مس در خاک به طور کلی بین ۲۵۰-۲ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد جذب مقدار زیادی مس در انسان منجر به مشکلاتی از قبیل مشکلات گوارشی، آسیب کبد، اختلالات کلیه و حتی مرگ می‌شود (AZOOZ et al., 2012). یکی از روش‌های مناسب برای پاک‌سازی خاک آلوده به فلزات سنگین، تثبیت عناصر توسط افزودن ماده اصلاح‌کننده به خاک است که طی فرآیندهای جذب، کمپلکس، یا رسوب دادن، منجر به کاهش تحرک و زیست‌فراهمی آنها می‌شود. (Kumpiene et al., 2006). جذب سطحی و یا تثبیت فلزات سنگین به وسیله نانو ذرات یک فناوری سازگار با محیط زیست است که در سالیان اخیر به عنوان عاملی موثر برای از کاهش آلودگی‌های آلی و یون‌های فلزات سنگین از آب و خاک بررسی گردیده است (Chen and Li, 2010; Zhang et al., 2010). در بین نانو ذرات نیز، آهن صفر ظرفیتی (ZVI) به دلیل فراوانی، ارزانی، غیرسمی بودن، واکنش سریع و توانایی و بازده بالا در تجزیه آلاینده‌هایی نظیر کادمیم، سرب، مس و روی از آب‌های زیر زمینی بیشتر مورد توجه بوده است (Wan et al., 2012; Shafaei et al., 2011) از نانوذره آهن صفر ظرفیتی برای حذف کادمیم، سرب، روی و نیکل با نسبت ۰ و ۲ درصد نانوذره و خاک استفاده نمودند و نشان دادند که غلظت فلزات سنگین قابل استخراج با DTPA در خاک تحت تیمار نانوذره آهن صفر ظرفیتی نسبت به خاک شاهد کاهش معنی‌داری داشت. Kumpiene (2005) نیز نشان داد با افزودن ذرات آهن صفر ظرفیتی با اندازه ۱۰۰ میکرومتر به خاک آلوده به فلزات سنگین، میزان آبشویی روی پس از دو هفته، ۹۹ درصد کاهش یافت که بیانگر تثبیت روی در خاک است. با توجه به کارایی بالای نانوذره آهن صفر ظرفیتی در حذف عناصر سنگین از آب‌های آلوده و مطالعات اندک در مورد تثبیت و غیرمترک‌سازی فلزات

سنگین توسط نانوذره آهن صفر ظرفیتی در خاک، در این پژوهش کاربرد این نانو ذره بر توزیع شکل‌های شیمیایی مس در خاک آلوده بررسی شد.

مواد و روش‌ها

گزینش خاک و آزمایشات فیزیکوشیمیایی

خاک آلوده به عناصر سنگین از حوالی معدن انگوران در استان زنجان نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها هوا-خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، pH و EC در سوسپانسیون ۱:۵ خاک و آب، کربن آلی به روش والکلی و بلک (Nelson and Sommers, 1982)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Rayment and Higginson, 1992)، کربنات کلسیم فعال با روش اگزالات آمونیوم (Drouineau, 1942)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش اسستات آمونیوم یک نرمال (Chapman, 1965) و میزان عناصر سنگین کل در خاک با روش هضم با اسید (Soon and Abboud, 1993) اندازه‌گیری شد.

تهیه نانوذره آهن صفر ظرفیتی

برای سنتز نانوذره آهن، ابتدا مقدار ۰/۵۴۰۶ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ در محلولی حاوی ۲۴ میلی‌لیتر اتانول و ۶ میلی‌لیتر آب دیونیزه حل شد. سپس مقدار ۰/۳۷۸۳ گرم سدیم بروهیدرید در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه حل گردید و قطره قطره به محلول اولی افزوده و پیوسته هم زده شد (هر قطره در عرض ۲ ثانیه). پس از مشاهده ذرات سیاه، هم‌زدن به مدت ۱۰ دقیقه ادامه یافت. ذرات آهن سیاه رنگ تولید شده توسط فیلتر جدا شده و ۳ بار با استفاده از ۲۵ میلی‌لیتر اتانول شستشو داده شد و در نهایت نمونه به مدت یک شب در آن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید (Rashmi et al., 2013). برای تعیین اندازه ذرات از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل (SEM, AIS-2100, 5.0 kV, Korea) استفاده شد.

آزمایش انکوباسیون

به مقدار مشخصی از نمونه خاک‌های هوا-خشک شده، مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۴ درصد از نانوذره آهن صفر ظرفیتی اضافه گردید و پس از مخلوط شدن، نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی ریخته شده و رطوبت نمونه‌ها در رطوبت ظرفیت زراعی تنظیم شدند. نمونه‌ها به مدت ۲ ماه در انکوباتور با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در طول مدت انکوباسیون، درصد رطوبت نمونه (۶۰٪ ظرفیت نگهداری خاک) ثابت نگه داشته شد. سپس در زمان‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ هفته بعد از انکوباسیون، از هریک از تیمارها مقدار مشخصی از خاک برداشت شده و شکل‌های شیمیایی عناصر سنگین با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی تسییر استخراج شد. خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی (Tessier et al., 1979) در جدول ۱ نشان داده شده است.

تعیین شاخص توزیع کاهش‌یافته^۱ در خاک

برای کمی‌سازی شدت پیوند فلزافزوده شده به خاک از شاخص توزیع کاهش‌یافته (I_R) استفاده شد:

$$I_R = \frac{\sum_{i=1}^k (F_i \times (i)^n)}{k^n} \quad (1)$$

که در آن i شماره مرحله‌ی عصاره‌گیری (۱: بخش تبدالی، ۲: بخش پیوندشده با کربنات‌ها، ۳: بخش پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، ۴: بخش پیوندشده با ماده آلی و ۵: بخش باقیمانده)، F_i سهم نسبی بخش i از کل غلظت فلز در خاک، k تعداد مراحل عصاره‌گیری و n عددی صحیح (عموماً بین ۱ تا ۲) است. انتخاب مقدار n اختیاری است و رابطه‌ای با توان دو ($n=2$)، بیانگر افزایش قدرت جذب فلز با افزایش i در فرایند عصاره‌گیری متوالی خواهد بود. در این مطالعه مقدار n برابر

با ۲ و مقدار k نیز برابر با ۵ (معادل با تعداد مراحل عصاره‌گیری) در نظر گرفته شد، لذا مقدار I_R از ۰/۰۴ تا ۱ می‌تواند متغیر باشد (Han et al., 2003).

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم افزارهای SAS و مقایسه میانگین از طریق آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel صورت گرفت.

جدول ۱- خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی (Tessier et al., 1979) برای جزءبندی عناصر سنگین برای یک گرم خاک

جزء	عصاره‌گیر	دما (سلسیوس)	زمان (ساعت)
F ₁ تبدالی	۱۰ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۱ مولار (pH=۸/۵)	۲۵	۱
F ₂ پیوند شده با کربنات‌ها	۱۰ میلی‌لیتر استات سدیم ۱ مولار (pH=۵)	۲۵	۵
F ₃ پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز	۲۰ میلی‌لیتر NH ₂ OH.HCl ۰/۰۴ مولار (در اسید استیک ۲۰٪ با pH=۲)	۹۵	۵-۶
F ₄ پیوند شده با ماده آلی	۳ میلی‌لیتر HNO ₃ ۰/۰۲ مولار + ۵ میلی‌لیتر H ₂ O ₂ (۳۰٪ با pH=۲)	۸۵	۲-۳
	۳ میلی‌لیتر H ₂ O ₂ (۳۰٪ با pH=۲)	۸۵	۳
	۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۳/۲ مولار (در اسید نیتریک ۲۰٪)	۲۵	۰/۵
F ₅ بخش باقیمانده	هضم با اسید کلریدریک به اسید نیتریک (۳/۱)	۹۵	۰/۵

بحث و نتایج

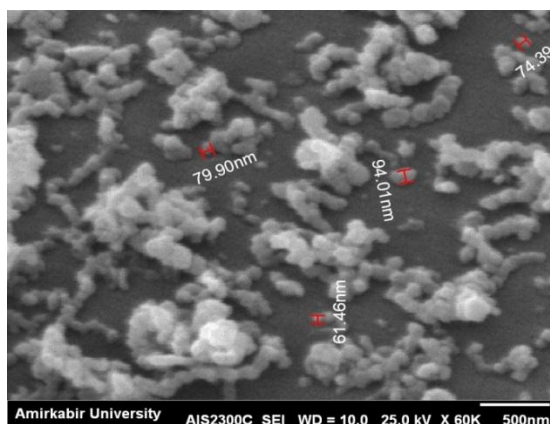
با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه شده در جدول ۲، خاک مورد مطالعه دارای بافت لومی شنی، آهکی با pH قلیایی و آلوده به فلز مس به میزان بیشتر از حداکثر غلظت مجاز آن‌ها در خاک بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌باشد (WHO, 1984).

شکل ۱ تصویر نانوذره آهن صفر ظرفیتی با میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. با توجه به تصویر SEM، نانوذره آهن صفر ظرفیتی دارای ذرات کروی و مجزا با اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

مس کل mg kg ⁻¹	CCE	OM	CEC	EC	pH	بافت خاک	رس سیلت شن %
۱۵۹۶	۷/۵	۱/۴۸	۲۲/۱	۰/۲۷	۷/۶۱	لومی شنی	۶۵ ۲۵ ۱۰

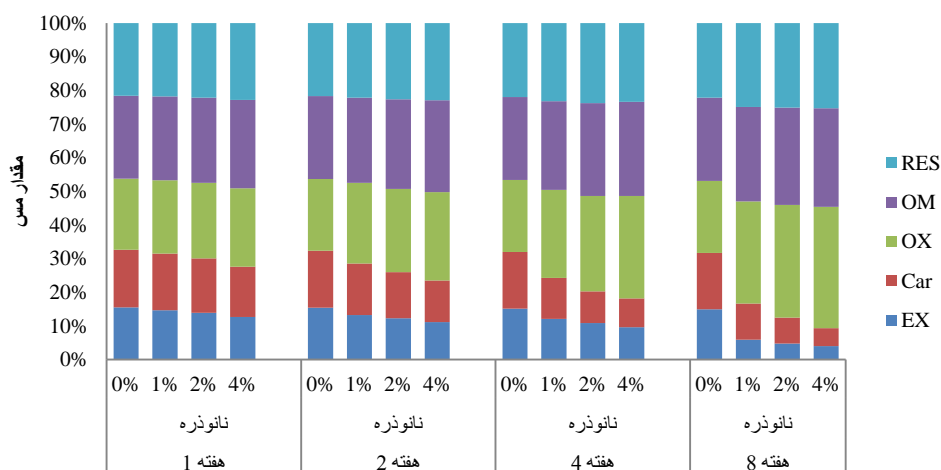
EC: هدایت الکتریکی؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ OM: ماده آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل.



شکل ۱- تصویر نانوذره آهن صفر ظرفیتی (nZVI) با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تاثیر نانوذره بر شکل‌های مختلف مس در خاک

توزیع کادمیم در بخش‌های مختلف خاک بصورت آلی (۲۵٪) < باقیمانده (۲۲٪) ~ اکسیدی (۲۱٪) < کربناتی (۱۷٪) < تبادلی (۱۶٪) بود (شکل ۲). بخش آلی بیشترین بخش مس در خاک را تشکیل داد که علت آن تمایل شدید مس به ماده آلی و تشکیل کمپلکس پایدار مس با ماده آلی می‌باشد (Gusiatin and Kulikowska, 2015). کاربرد نانوذره آهن صفر ظرفیتی به طور معنی‌داری ($P \leq 0.05$) اجزای تبادلی و کربناتی را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد، به طوری‌که با افزایش درصد نانوذره، میزان بخش تبادلی از ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میزان بخش کربناتی از ۲۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۴٪ پس از ۸ هفته انکوباسیون کاهش یافت که بخش تبادلی به میزان ۷۳ درصد و بخش کربناتی به میزان ۶۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. کاهش جزء تبادلی در خاک تیمار شده با نانوذره آهن صفر ظرفیتی به دلیل تشکیل اکسید آهن، و در نتیجه افزایش جذب و یا رسوب مس در خاک‌ها می‌باشد. همچنین هیدرولیز آهن صفر منجر به کاهش شدید pH در مجاورت نانوذره و در نتیجه موجب انحلال بخشی از فاز کربناته می‌شود.



شکل ۲. شکل‌های شیمیایی مس در خاک با نسبت‌های مختلف نانوذره آهن صفر ظرفیتی در زمان‌های مختلف انکوباسیون

بخش پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز با افزایش درصد نانوذره و زمان انکوباسیون، افزایش معنی داری ($P \leq 0.05$) یافت. با افزایش درصد نانوذره از ۱٪ به ۴٪، میزان بخش پیوند با اکسیدهای آهن و منگنز از ۳۴۰ به ۵۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم در افزایش یافت. افزودن نانوذره آهن صفر ظرفیتی به خاک باعث تشکیل اکسیدهای آهن آمورف توسط فرایند اکسید شدن می شود. اکسیدهای فلزی مانند اکسیدهای آهن و منگنز، فلز را در سطح گروه های عامل OH از طریق تبادل پروتونی فلز یا در سایت های سطحی با بار منفی جذب می کنند (Naidu et al., 1994).

بررسی مقادیر مختلف نانوذره بر شاخص توزیع کاهش یافته (I_R) در خاک

پارامتر I_R برای بیان کمی شدت نسبی پیوند یک فلز در خاک های مختلف و یا فلزات مختلف در یک خاک کاربرد دارد. بطوریکه مقادیر پایین I_R (یعنی مقادیر نزدیک به حداقل) بیانگر الگویی از توزیع است که در آن بیشتر فلز در اجزای محلول و تبادلپذیر جای گرفته اند، در حالیکه مقادیر بالای I_R یعنی (مقادیر نزدیک به ۱) ناشی از سهم بالای فلز در جز باقیمانده است. مقادیر بینابینی بیانگر الگویی هستند که فلز به طور نسبی در بین همه اجزای فاز جامد توزیع شده است. شاخص I_R از سطوح آلودگی، نوع آلودگی و ویژگی های خاک تاثیر می پذیرد (Han et al., 2003).

جدول ۳ تغییرات مقادیر I_R عناصر در اثر اعمال نسبت های مختلف نانوذره آهن صفر ظرفیتی در زمان های مختلف انکوباسیون را نشان می دهد. با افزایش درصد نانوذره افزوده شده به خاک و زمان انکوباسیون، مقدار I_R به طور معنی داری ($P \leq 0.05$) افزایش یافت که بیانگر افزایش مقدار فلز موجود در جزء های پایدار با افزایش درصد نانوذره است. با افزایش درصد نانوذره افزوده شده به خاک و زمان انکوباسیون، مقادیر I_R از ۰/۴۸ تا ۰/۵۸ افزایش یافت. بالاترین مقدار I_R در سطح ۴ درصد نسبت نانوذره به خاک و در زمان ۸ هفته پس از انکوباسیون مشاهده گردید که نسبت به تیمار شاهد ۱/۲۰ برابر افزایش داشت. (جدول ۳).

جدول ۳- مقادیر شاخص توزیع کاهش یافته (I_R) برای نسبت های مختلف نانوذره آهن صفر ظرفیتی در زمان های مختلف انکوباسیون

هفته ۱	هفته ۲	هفته ۴	هفته ۸	
۰/۴۸ c	۰/۴۹ c	۰/۴۹ c	۰/۴۹ c	شاهد
۰/۴۹ bc	۰/۵۰ bc	۰/۵۲ b	۰/۵۶ b	۱٪
۰/۵۰ ab	۰/۵۱ ab	۰/۵۴ a	۰/۵۷ ab	۲٪
۰/۵۱ a	۰/۵۲ a	۰/۵۴ a	۰/۵۸ a	۴٪

در هر ستون، اعداد با حروف کوچک نامشابه تفاوتی معنی دار در سطح احتمال پنج درصد دارند.

مطالعه شکل های مختلف شیمیایی عناصر در خاک های مورد بررسی نشان داد که شکل آلی، شکل غالب خاک بود. کاربرد نانوذره آهن صفر ظرفیتی موجب کاهش معنی دار عناصر در بخش های تبادلپذیر و کربناتی و افزایش معنی دار عناصر در بخش های پیوند خورده با اکسیدهای آهن و منگنز نسبت به خاک شاهد گردید، در حالی که تاثیر معنی داری بر روی بخش های آلی و باقیمانده نداشت. با افزایش درصد نانوذره افزوده شده به خاک و زمان انکوباسیون، مقدار I_R افزایش یافت که بیانگر توزیع فلز در بخش های پایدار خاک است. در نهایت می توان نتیجه گیری کرد که افزودن نانوذره آهن صفر ظرفیتی به خاک، منجر به کاهش تحرک مس در خاک های آلوده می شود.

منابع

- Azooz M.M., Abou-Elhamd M.F. and Al-Fredan M.A. 2012. Biphase effect of copper on growth, proline, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum aestivum* cv. *Hasaawi*) at early growing stage. *Australian Journal of Crop Science*, 6: 688-694.
- Chapman H.D. 1965. Cation-exchange capacity. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, (methodsofsoilanb)*, Pp. 891-901.



- Chen Y. and Li F. 2010. Kinetic study on removal of copper(II) using goethite and hematite nano-photocatalysts. *Journal of Colloid and Interface Science*, 347: 277–281.
- Drouineau G. 1942. Dosage rapide du calcaire actif du sol: Nouvelles données sur la separation et la nature des fractions calcaires. *Annals of Agronomy*, 12: 441-50.
- Gee G.W. and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods, (methodsofsoilan1)*, Pp. 383-411.
- Gusiatin Z.M. and Kulikowska D. 2015. Influence of compost maturation time on Cu and Zn mobility (*MF*) and redistribution (*IR*) in highly contaminated soil. *Environmental Earth Sciences*, 74(7): pp.6233-6246.
- Han F.X., Banin A., Kingery W.L., Triplett G.B., Zhou L.X. and Zheng S.J. 2003. New approach to studies of heavy metal redistribution in soil. *Advances in Environmental Research*, 8(1): 113-120.
- Khan M.N. and Wahab M.F. 2007. Characterization of chemically modified corncobs and its application in the removal of metal ions from aqueous solution. *Journal of hazardous materials*, 141(1): 237-244.
- Kumpiene J. 2005. Assessment of Trace Element Stabilization in Soil. PhD thesis, Division of Waste Science and Technology, Luleå University of Technology, Sweden.
- Kumpiene J., Ore S., Renella G., Mench M., Lagerkvist A. and Maurice C. 2006. Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper and arsenic in soil. *Environmental Pollution*, 144: 62-69.
- Naidu R., Bolan N.S., Kookana R.S. and Tiller K.G. 1994. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *European Journal of Soil Science*, 45(4): 419-429.
- Nelson D.W. and Sommers L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. (methodsofsoilan2)*, Pp. 539-579.
- Rashmi S.H., Madhub G.M., Kittura A.A. and Sureshc R. 2013. Synthesis, characterization and application of zero valent iron nanoparticles for the removal of toxic metal hexavalent chromium [Cr(VI)] from aqueous solution. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2013 (1): 37-42.
- Rayment G.E. and Higginson F.R. 1992. *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods*. Inkata Press, Melbourne.
- Shafaei Sh., Fotovat A. and Khorassani R. 2011. Evaluation of the efficiency of nanoscale zero-valent iron (nZVI) to stabilize heavy metals in a calcareous soil. In: *Proceedings of 11th international conference on the biogeochemistry at trace elements*. Florence, Italy-Guly.
- Soon Y.K. and Abboud S. 1993. Cadmium, chromium, lead and nickel. *Soil sampling and method of analysis*. Lewis publishers, Pp. 103 – 107.
- Tessier A., Campbell P.G.C. and Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace-metals. *Analytical Chemistry*, 51:844–851.
- Wan Y., Wan Z., Kamaruzaman N. and Samsudin A.R. 2012. Development of Nano-Zero Valent Iron for the Remediation of Contaminated Water. *Italian association of chemical engineering*, 28: 14-23.
- World Health Organization WHO. 1984. *The role of food safety in health and development*.
- Zhang Z., Li M., Chen W., Zhu S., Liu N. and Zhu L., 2010. Immobilization of lead and cadmium from aqueous solution and contaminated sediment using nano-hydroxyapatite. *Environmental Pollution*, 158(2): 514-519.



Effect of Nano Zero Valent Iron (nZVI) on Reduced Partition Index (I_R) of Copper in Soil

R.Hamzenejad¹, E. Sepehr^{2*}, A. Samadi³, MH. Rasouli-Sadaghiani², H. Khodaverdiloo²

- 1) PhD student, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia
 - 2) Associate Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia
 - 3) Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia, Iran
- *Corresponding author: e.sepehr@urmia.ac.ir

Abstract

In order to study the effect of nano zero valent iron (nZVI) on chemical forms of copper (Cu) in soil, a factorial experiment was conducted as a completely randomized design in three replications with 4 levels of nZVI (0, 1, 2 and 4 %). Chemical distribution of Cu in soil was determined using Tessier sequential extraction method during 1, 2, 4 and 8 weeks' incubation time and the reduced partition index (I_R) of metals were calculated. Application of nZVI significantly ($p \leq 0.05$) decreased the exchangeable and carbonate fractions and increased iron and manganese oxide bound fraction in comparison to the control treatment. The I_R Values increased with increasing in nZVI level and incubation time, demonstrating metal redistribution in more stable fractions of soil. It was concluded that addition of nZVI in soil lead to decrease the mobility of Cu in soil.

Keywords: Nano zero valent iron, Chemical forms of metal, Sequential extraction, Copper.