نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد ششم، شماره چهارم، ۱۳۹۵
http://ejsms.gau.ac.ir

اثر بافت و ساختمان خاک و گیاه تربچه بر مقدار نیکل در خاک، زه‌آب و گیاه

حمیدرضا الماسی[۱]، *آزاده صفادوست[۲] و علی‌اکبر صفری‌سنجانی[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، [۲]استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا،
[۳]استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا

تاریخ دریافت: ۹٤/۸/۲٦ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/٤/۱٤

چکیده

سابقه و هدف: در بسیاری از کشورها از فاضلاب و پساب صنعتی در آبیاری زمین‌های کشاورزی بهره‌گیری می‌شود و آلودگی خاک این مناطق با فلزهای سنگین یکی از دلایل نگرانی انسان‌ها می‌باشد. آلودگی خاک از طریق فعالیت‌های انسانی به‌عنوان یک مشکل شایع شناخته شده است. معمولاً فلزهای سنگین به‌علت جذب شدید به فاز جامد خاک تحرک کمی دارند و به همین دلیل از آلاینده‌های ماندگار در خاک می‌باشند، ولی عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی زیادی حرکت فلزهای سنگین در خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. هدف از این پژوهش بررسی پیامد هم‌زمان بافت و ساختمان خاک و کشت گیاه بر مقدار نیکل در خاک، آب زهکشی شده و گیاه در شرایط آبیاری با آب حاوی نیکل بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه ستون‌هایی به قطر ۲۲/۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از خاک دست‌خورده (بدون ساختمان) و دست‌نخورده (دارای ساختمان) از دو خاک لوم‌رسی (CL) و لوم‌شنی (SL) استفاده شد. در نیمی از ستون‌های خاک (دست‌خورده و دست‌نخورده) تربچه (*Raphanus sativus* L.) کاشته شد و آبیاری همه ستون‌های خاک با آب حاوی نیکل انجام شد. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. در هر دوره آبیاری از زه‌آب خروجی ستون‌های خاک نمونه‌برداری شد. پس از برداشت جداگانه بخش‌های هوایی و ریشه گیاه تربچه، از سه لایه ۰–۱۰، ۱۰–۲۰ و ۲۰–۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام شد. سپس غلظت نیکل در آب زهکشی شده، لایه‌های خاک و همچنین اندام هوایی و ریشه گیاه تربچه با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت نیکل در خاک‌های لوم‌شنی دست‌نخورده حدود ۳٤ درصد بیش‌تر از خاک‌های لوم‌رسی دست‌نخورده بود، که این امر نشان‌دهنده اهمیت ساختمان و پیوستگی بهتر منافذ در خاک‌های لوم‌رسی و جذب کم‌تر نیکل توسط کلوئیدهای خاک در مقایسه با خاک لوم‌شنی است. غلظت نیکل در خاک‌های دست‌خورده ۱/۵ برابر بیش‌تر از خاک‌های دست‌نخورده بود که ممکن است به‌علت تماس کم‌تر نیکل با کلوئیدهای خاک و جذب کم‌تر آن در این خاک‌ها به‌علت داشتن مسیرهای ترجیحی برای جریان آب باشد. همچنین غلظت نیکل در زه‌آب ستون‌های خاک با کشت تربچه در برابر ستون‌های بدون کشت گیاه بیش‌تر بود. که می‌توان دلیل آن را با

* مسئول مکاتبه: safadoust@basu.ac.ir

پیدایش خاکدانه‌های درشت و درز و ترک‌های ساختمانی و همچنین کانال‌های ریشه در ستون‌های همراه با کشت گیاه مرتبط دانست. در این پژوهش فاکتور ترابری نیکل در گیاه تربچه بیش‌تر از یک بود، بنابراین تربچه می‌تواند یک گیاه بیش‌اندوز نیکل به‌شمار رود.

نتیجه‌گیری: غلظت بالای نیکل در آب و خاک نشان‌دهنده توان جابجایی این آلاینده در این خاک‌ها با کشت گیاه بیش‌اندوز تربچه است. بنابراین مدیریت کشاورزی می‌تواند نقش ویژه‌ای در تعیین آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به فلزهای سنگین داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، بیش‌اندوز، فاکتور ترابری، نیکل

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل در تخریب بخش‌های گوناگون بیوسفر، آلودگی زیستگاه‌ها به فلزهای سنگین گزارش شده است. به‌گونه‌ای که جابجایی، زمان ماندگاری و سرنوشت این آلاینده‌ها در هر اکوسیستم از جمله نگرانی‌های زیست‌محیطی می‌باشد (٢١). سیاست‌های تولید محور در قرن بیستم، مانند بهره‌برداری از زمین‌ها برای استخراج معادن، کارخانه‌ها و پخش زباله و فاضلاب‌ها به افزایش مقدار آلاینده‌ها به‌ویژه فلزهای سنگین در خاک‌ها می‌انجامد (١٩). محیط متخلخل خاک بستر حرکت و جابه‌جایی این آلاینده‌ها از سطح آن تا ژرفای خاک می‌باشد. از ویژگی‌های گوناگون فیزیکی، شیمیایی و زیستی که بر توان جابجایی این عناصر در خاک اثر دارد، می‌توان به نوع فلز، بافت خاک، ساختمان خاک، مواد آلی، رطوبت خاک، شیوه بهره‌وری از خاک و گیاه اشاره کرد (٣٣).

بافت خاک جایگاه ویژه‌ای در جذب و جابجایی عناصر سنگین دارد. به گونه‌ای که هرچه بافت خاک ریزتر باشد، جذب عناصر افزایش یافته و در پی آن حرکت آن‌ها تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. داوز (٢٠٠٤) گزارش کرد که تغییر خصوصیات خاک در منطقه‌ای که از فاضلاب برای آبیاری بهره‌گیری می‌شد به ویژگی‌هایی مانند نفوذپذیری، مقدار رس و نوع رس بستگی دارد (٩). همچنین در پژوهشی نوری و همکاران (٢٠٠١) با افزودن فاضلاب به خاک‌های کشاورزی با بافت‌های گوناگون، گزارش کردند که خاک‌های شنی با ظرفیت جذب پایین و نفوذپذیری بالایی که دارند اجازه انتقال سریع آب، نمک‌ها و ذرات معلق در آب را می‌دهند (٢٩).

ساختمان خاک یک ویژگی پویا می‌باشد که بسته به ویژگی‌های زیستی خاک و گیاه با زمان و مکان تغییر می‌کند (٥). این ویژگی با تغییر توزیع اندازه منافذ و پیوستگی آن‌ها در نیم‌رخ خاک، بسته به پیچیدگی درز و ترک‌ها، فرآیند جابجایی و انتقال آلاینده‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (٢٠). صفادوست و همکاران (٢٠١٢) در بررسی پیامد ساختمان خاک بر جابجایی نمک‌ها، آلودگی زه‌آب یک خاک لوم‌رسی را بیش‌تر از یک خاک لوم‌شنی گزارش نمودند. آن‌ها این پدیده را وابسته به درز و ترک‌های بزرگ‌تر و پیوستگی بیش‌تر منافذ در خاک لوم‌رسی گزارش کردند (٣١). امامی و همکاران (٢٠٠٥) مواد آلی خاک، ساختمان خاک و منافذ درشت را از عوامل مؤثر بر غلظت فلزهای سنگین در محلول خروجی خاک دانستند. آن‌ها گزارش کردند که در محلول خروجی از خاک‌های دارای ساختمان، به‌علت حرکت

سریع آب در منافذ درشت، غلظت سه عنصر کادمیوم، سرب و روی بیش‌تر از محلول خروجی از خاک‌های دست‌خورده بود (۱۲). در پژوهش دیگری که سلیم‌اختر و همکاران (۲۰۱۱) انجام دادند، دیده شد که اثر ساختمان خاک و شدت جریان بر سرعت انتقال یون‌های مولیبدات، آرسنات و کرومات در سه خاک با بافت و ساختمان گوناگون بسیار مهم است. این پژوهش نشان داد که خاک‌هایی با ساختمان منشوری در لایه سطحی، با کاهش میزان جریان می‌تواند میزان جذب را نسبت به آبشویی افزایش دهند (۳۲).

وجود گیاهان در خاک نیز می‌تواند بر جابجایی و مقدار عناصر سنگین مانده در خاک تأثیرگذار باشد. از یک سو منافذ درشتی که ریشه‌های پوسیده گیاهان در خاک پدید می‌آورند و تا ژرفای خاک نیز دیده می‌شوند، می‌توانند مسیرهای ترجیحی برای جابجایی مواد آلاینده، افزایش سرعت جابجایی آن‌ها در خاک را در پی داشته باشند (۲٦)؛ از سوی دیگر پالایش پساب و بهسازی خاک‌های آلوده با گیاهان، امروزه یکی از روش‌های نوین و امیدبخش برای زدودن و یا کاهش زیان آلاینده‌ها از آب و خاک می‌باشد که به آن گیاه بهسازی می‌گویند. در این روش پاکسازی محیط زیست، با هزینه پایین در برابر دیگر، بهره‌گیری درجا برای زدودن آلاینده‌های محیطی مانند فلزهای سنگین آب و خاک، با کم‌ترین دست‌خوردگی و بهم‌زدن ساختار محیط زیست برتری‌هایی دارد و در سال‌های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (۳٤). توانایی گیاهان در جذب آلودگی عناصر سنگین به ویژگی‌های ژنتیکی آن‌ها از یک‌سو و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بستگی دارد (۲۷). لنت و همکاران (۲۰۱٤) در بررسی آلودگی فلزهای سنگین در سبزی‌های آبیاری شده با فاضلاب دریافتند که آبیاری با فاضلاب می‌تواند به انباشتگی فلزهای سنگین در خاک بیانجامد، بنابراین هنگامی که بیش از اندازه به‌کار رود می‌تواند مایه پیدایش آلودگی در سبزی‌ها نیز گردد (۲۳). گوپتا و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی به بررسی انباشتگی فلزهای سنگین در سبزی‌های رشد کرده در زمین‌های کشاورزی که برای مدت زمانی طولانی با آب فاضلاب آبیاری شده بودند، پرداختند. پژوهش آن‌ها نشان داد غلظت عناصر سرب، روی و کادمیوم در اسفناج و تربچه در بالاترین مقدار بود که نشان‌دهنده توانایی این گیاهان در جذب فلزهای سنگین به اندازه فراوان می‌باشد (۱۷). پژوهش هارگوینتگوی و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی انباشتگی فلزهای نیکل و سرب در محیط‌های زیستی آبی آلوده در دو گونه گیاهی *M. aquaticum* و *E. densa* نشان داد که با افزایش غلظت این فلزها در آب طی مدت ۷ روز تجمع آن‌ها در گیاهان بیش‌تر شد و سبب تغییر فیزیولوژیکی برگ‌های آن‌ها گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که گیاه *M. aquaticum* دارای ظرفیت تحمل بیش‌تر برای جذب نیکل می‌باشد (۱۸). داوری و همایی (۲۰۱۲) در بررسی مدل‌سازی مقدار گیاه بهسازی آلاینده‌های توأمان نیکل و کادمیوم از خاک‌های آلوده به این آلاینده‌ها گزارش کردند که می‌توان از گیاه کلم زینتی برای پالایش آلودگی‌های کم تا نسبتاً متوسط توأمان این آلاینده‌ها استفاده کرد (۸). رفعتی و همکاران (۲۰۱۲) نیز در بررسی توانایی گونه‌های توت سفید و سپیدار در تثبیت و برداشت کادمیوم، کروم و نیکل، سپیدار را بری برداشت عناصر کادمیوم و نیکل و توت سفید را برای برداشت نیکل مناسب معرفی کردند (۳۰). در میان گیاهان بررسی شده، گیاهان خانواده شب‌بو (*Brassicaceae*) بهترین انباشته‌کننده‌ها شناسایی شده‌اند و از این خانواده گیاه تربچه (*Rhphanus sativus*) برای گیاه بهسازی پیشنهاد شده است (۷).

از آن‌جا که کشور ما و بیش‌تر کشورهای خاورمیانه در کمربند خشک جهان هستند و با توجه به کمبود منابع آب و سرانه کاربرد آب، ایران از دسته کشورهایی است که در گروه کشورهای روبرو شونده با دشواری‌های کمبود آب است. با نگاه به این‌که ایران کشوری کشاورزی است و سهم بزرگی از کاربرد آب در بخش کشاورزی است، در آینده‌ای نه چندان دور ناگزیر به بهره‌گیری دوباره از فاضلاب و پساب کارخانه‌ها در بخش کشاورزی می‌باشیم. بنابراین انجام پژوهش در زمینه آلودگی آب‌ها و پاکسازی محیط زیست از آلاینده‌ها و عوامل مؤثر بر آن لازم و ضروری می‌باشد. اگرچه پژوهش‌های بسیاری در رابطه با گیاه بهسازی عناصر سنگین انجام شده است اما بررسی پیامدهای هم‌زمان بافت و ساختمان خاک و گیاه بر جذب فلزهای سنگین از آب آبیاری بررسی چندانی انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش پیامد هم‌زمان بافت خاک و ساختمان خاک در توانایی جذب نیکل در گیاه تربچه از خاکی که با آب حاوی نیکل آبیاری شده بررسی گردید تا میزان آلودگی آب‌های زهکش شده و چگونگی نگهداشت آلاینده‌های فلزی در خاک مقایسه شود. بدیهی است که شناخت ویژگی‌های کارا در نگهداری فلزها در خاک و یا برداشت آن با گیاه می‌تواند برای کاهش آلودگی زیستگاه‌ها به این گونه آلاینده‌ها سودمند باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی ستون‌های خاک دست‌خورده (D) و دست‌نخورده (U) از دو خاک لوم‌رسی (CL) و لوم‌شنی (SL) برداشت شده از استان همدان، که در نیمی از آن‌ها گیاه تربچه کشت شده بود (R) و نیمی بدون گیاه (N) بودند، به‌صورت آزمایش فاکتوریل در پایه طرح کاملاً تصادفی با ٣ تکرار انجام شد. نمونه‌برداری از دو خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی کشتزارهای آیشی به گونه دست‌نخورده با بهره‌گیری از سیلندرهای فلزی به ضخامت ٤ میلی‌متر، قطر درونی ٢٢/٥ و ارتفاع ٣٠ سانتی‌متر انجام شد. همچنین از هر بافت، به مقدار کافی خاک به‌صورت دست‌خورده نیز برداشته و به آزمایشگاه خاکشناسی انتقال داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ١ آورده شده است.

در آزمایشگاه برای آماده ساختن ستون‌های خاک دست‌خورده، خاک برداشت شده از کشتزارها از الک ٤/٧٥ میلی‌متری گذرانده شدند. این کار برای جدا کردن سنگ‌های درشت، شکستن کلوخه‌ها و جدا کردن ریشه‌ها و مانده‌های گیاهی انجام شد (٣١). سپس هر یک در درون سیلندرهای فلزی مشابه خاک دست‌نخورده ریخته شد. پر کردن ستون‌های خاک دست‌خورده بر پایه جرم مخصوص ظاهری هر منطقه برابر با ١/٣ مگاگرم بر مترمکعب برای خاک لوم‌رسی و ١/٥ مگاگرم بر مترمکعب برای خاک لوم‌شنی انجام شد. برای انجام نمونه‌برداری دست‌نخورده پیش از نمونه‌برداری، جدار درونی سیلندرها به پارافین مایع آغشته شد تا در حد امکان از ایجاد جریان ترجیحی در مکان تماس خاک با سیلندر جلوگیری شده و همچنین اصطکاک بین خاک و دیواره درونی سیلندر در هنگام نمونه‌برداری کاهش یابد. برای جلوگیری از تخریب ساختمان خاک و فشرده شدن آن در هنگام نمونه‌برداری، دقت شد که رطوبت خاک در حدود حد خمیری باشد. برای این منظور کرت مورد نظر چندین بار آبیاری شد تا با مرطوب شدن خاک تا عمق بیش‌تر، مقاومت مکانیکی خاک کاهش و

نمونه‌برداری به آسانی انجام شود. پس از آن سیلندرها به گونه یکنواخت وارد خاک شدند، تخته چوبی با ضخامت مناسب بر روی سیلندرها قرار داده شد و با بهره‌گیری از ضربه چکش بر روی آن، سیلندرها تا عمق ۳۰ سانتی‌متری در خاک فرو رفتند. سپس خاک پیرامون سیلندرها را کنار زده و به‌وسیله کاردک بزرگ تیزی سطح زیرین آن‌ها بریده و از خاک خارج گردید. سطح زیرین و پایینی این ستون‌ها با یک توری از جنس آهن گالوانیزه سفت و سخت بسته شد تا از ریزش خاک جلوگیری شود. برای بررسی پیامد کاشت گیاه تربچه در جذب و ترابری و برداشت نیکل با اندام‌های هوایی، در نیمی از ستون‌های خاک (دست‌خورده و دست‌نخورده) بذرهای تربچه بر پایه تراکم ۱۵ کیلوگرم در ۱۰۰ مترمربع کشت گردید (۲٤) و در نیمی گیاهی کشت نشد (شاهد). در کل آزمایش‌ها بر روی ۱۲ ستون خاک دست‌خورده و ۱۲ ستون خاک دست‌نخورده از دو خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی انجام شد.

آبیاری ستون‌های خاک با بهره‌گیری از محلول حاوی نیکل با غلظت ۰/۰۵ مولار (از محلول کلرید نیکل)، که بر اساس استاندارد WHO (۲۰۰۱) به اندازه ۲۰ برابر حد استاندارد این عنصر در آب آلوده بود، انجام شد (۱٤). به‌گونه‌ای که مقدار نیکل در آب آلوده برابر با ۰/۳۲ گرم در لیتر بود. انجام آبیاری یکنواخت، تعیین دقیق حجم آب آبیاری و کنترل میزان آب ورودی در هر ستون به‌وسیله یک شیر تعبیه شده قابل تنظیم بود. زمان آبیاری بر اساس میزان رطوبت خاک برابر با ٪٦٥ آب قابل استفاده گیاه با استفاده از تانسیومتر و منحنی مشخصه رطوبتی تعیین گردید. با توجه به شرایط ثابت گلخانه‌ای از نظر دما و میزان رطوبت، هر چهار روز آبیاری و در هر دور آبیاری از ٤ لیتر از محلول ساخته شده استفاده گردید. هم‌زمان با آبیاری ستون‌های خاک دارای گیاه، ستون‌های خاک بدون گیاه نیز آبیاری شد. پس از هر دوره آبیاری میزان آب خروجی از زهکش ستون‌ها جمع‌آوری شد؛ به‌طوری‌که در طول دوره رشد ٤۰ روزه تربچه، پنج مرحله زه‌آب جمع‌آوری گردید.

پس از برداشت گیاه تربچه (٤۰ روز پس از کشت) و گذاشتن نمونه‌های گیاه در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس، وزن خشک غده و ریشه (اندام‌های زیرزمینی) و همچنین برگ و ساقه (اندام‌های هوایی) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نیکل جذب شده در اندام‌های یاد شده، عصاره‌گیری از آن‌ها به کمک اسید نیتریک غلیظ و به روش کاو و همکاران (۲۰۱۰) انجام گرفت (٦).

پس از برداشت تربچه از لایه‌های ۱۰–۰، ۲۰–۱۰ و ۳۰–۲۰ سانتی‌متری ستون خاک، نمونه خاک تهیه شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های خاک از روش هضم اسیدی بهره‌گیری شد (۳۵). برای اندازه‌گیری زیست‌فراهمی نیکل در هر یک از نمونه‌های خاک از عصاره‌گیر DTPA بهره‌گیری شد (۲۵). مقدار نیکل در زه‌آب، خاک و گیاه با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AA-220-Varian) اندازه‌گیری شد.

در این پژوهش از فاکتور ترابری (Translocation Factor) و فاکتور غنی‌سازی زیستی (Bioconcentration Factor) برای بررسی توانایی گیاه تربچه در پالایش نیکل از خاک استفاده شد. فاکتور ترابری از نسبت غلظت فلز در برگ و ساقه گیاه (C_{Shoots})، به غلظت همان فلز در ریشه گیاه (C_{Roots}) برآورد شد (۱۷):

$$TF=C_{Shoots}/C_{Roots} \qquad (۱)$$

برای تعیین فاکتور غنی‌سازی زیستی (BF) از نسبت غلظت فلزهای سنگین در بخش هوایی گیاه (C_{Plant}) به غلظت فراهم این فلز در خاک (C_{Soil}) پس از برداشت گیاه بهره‌گیری شد (٣٤):

$$BF=C_{Plant}/C_{Soil} \quad (٢)$$

آنالیز واریانس و مقایسه میانگین‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار SAS انجام شد.

بحث و نتیجه‌گیری

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های بررسی شده در جدول ١ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، هر دو خاک از دیدگاه ویژگی‌های شیمیایی مانند مقدار کربنات کلسیم، ماده آلی و اسیدیته تفاوت معنی‌داری ندارند. از آن‌جا که ویژگی‌های یاد شده از عوامل تأثیرگذار در انحلال و تحرک فلزهای سنگین می‌باشند، تلاش شد که گزینش دو خاک با بافت ناهمانند بر پایه این ویژگی‌ها انجام شود.

جدول ١- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های بررسی شده.

Table 1. Some physical and chemical properties of studied soils.

بافت خاک Soil texture	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	کربنات کلسیم Calcium carbonate	ماده آلی Organic matter	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	اسیدیته Acidity
	٪	٪	٪	٪	٪	μSm^{-1}	-
لوم‌رسی Clay loam	32	33	35	2.16	1.4	205	7.76
لوم‌شنی Sandy loam	18	21	61	3.08	1.1	201	7.81

نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارهای آزمایشی بر غلظت نیکل در لایه‌های گوناگون خاک در جدول ٢ آورده شده است. اثر بافت خاک بر انباشتگی نیکل در هیچ‌یک از لایه‌ها از دیدگاه آماری معنی‌دار نبود، اما پیامد ساختمان خاک در هر سه لایه در سطح ١ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر گیاه بر انباشتگی نیکل تنها در لایه نخست بر پایه آماری ٥ درصد معنی‌دار بود در حالی‌که در لایه‌های دوم و سوم معنی‌دار نبود. شاید این یافته وابسته به عمق کم ریشه‌دهی گیاه و ریشه‌دهی سطحی آن باشد.

بررسی داده‌های به‌دست آمده از برهم‌کنش تیمارها بر غلظت نیکل در خاک نشان داد که برهم‌کنش تیمارهای بافت و ساختمان خاک (S×T) و ساختمان خاک و گیاه (P×S) در هر سه لایه بررسی شده بر پایه آماری ١ درصد از دیدگاه آماری معنی‌دار بود؛ و برهم‌کنش تیمارهای بافت خاک و گیاه (P×T) تنها در لایه سوم معنی‌دار نبود. همچنین برهم‌کنش سه‌گانه هر سه تیمار بافت، ساختمان خاک و گیاه (P×S×T) بر غلظت نیکل نیز در هر سه لایه معنی‌دار بود (جدول ٢).

جدول ۲- تجزیه واریانس پیامد تیمارهای بافت خاک (T)، ساختمان خاک (S) و کشت گیاه (P) و برهم‌کنش آن‌ها بر غلظت نیکل در خاک در لایه‌های ۰-۱۰ سانتی‌متر (L_1)، ۱۰-۲۰ سانتی‌متر (L_2)، ۲۰-۳۰ سانتی‌متر (L_3) و در زه‌آب در دوره‌های آبیاری نخست (D_1)، دوم (D_2)، سوم (D_3)، چهارم (D_4) و پنجم (D_5).

Table 2. Analysis variance of soil texture (T), soil structure (S) and plant cultivation (P) and their interaction on Ni concentration in soil for layers of 0-10 cm (L_1), 10-20 cm (L_2), 20-30 cm (L_3) and in effluent for irrigation cycles of first (D_1), second (D_2), third (D_3), fourth (D_4) and fifth (D_5).

منبع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	نسبت F F ratio							
		خاک Soil			زه‌آب Effluent				
		L_1	L_2	L_3	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
T	1	0.21^{ns}	0.02^{ns}	0.02^{ns}	0.57^{ns}	0.18^{ns}	0.05^{ns}	0.01^{ns}	0.009^{ns}
S	1	24.9**	78.86**	30.09**	47.76**	34.89**	37.52**	20.90**	19.86**
P	1	4.81*	1.9^{ns}	2.78^{ns}	74.04**	40.46**	39.37**	21.76**	10.42**
S×T	1	13611**	3812**	3321**	242**	230**	507**	472**	61.56**
P×S	1	2943**	135**	342**	456**	367**	644**	699**	35.93**
P×T	1	169**	95.21**	3.45^{ns}	1.56^{ns}	0.66^{ns}	18.45**	1.69^{ns}	0.01^{ns}
P×S×T	1	402**	34.6**	29.7**	0.61^{ns}	0.45^{ns}	3.13^{ns}	49*	3.98^{ns}

^{ns}، * و ** به‌ترتیب بیانگر عدم وجود اثر معنی‌دار بر پایه آماری ۵ درصد، اثر معنی‌دار بر پایه آماری ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

^{ns}, * and ** Represent non significant and significant at probability levels of P<0.05 and P<0.01, respectively.

پیامد بافت، ساختمان خاک و کشت گیاه بر غلظت نیکل در خاک: نتایج آزمون میانگین پیامد تیمارها بر غلظت نیکل در لایه‌های گوناگون خاک در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد در همه تیمارها افزایش عمق نمونه‌برداری سبب کاهش معنی‌دار غلظت نیکل در لایه‌ها گردید، و مقدار آن را به‌صورت لایه نخست> لایه دوم> لایه سوم تغییر داد. به‌گونه‌ای که غلظت نیکل (میانگین همه تیمارها) در لایه نخست ٪۸۶ بیش‌تر از لایه دوم و در لایه دوم ٪۵۹ بیش‌تر از لایه سوم بود (جدول ۳). به سخن دیگر با دورشدن از منبع آلودگی، با افزایش سطوح جذب‌کننده، غلظتی از نیکل که به لایه‌های پایین‌تر می‌رسد کم‌تر شده است و انباشتگی نیکل در لایه نخست به‌علت نزدیکی به منبع آلودگی، بیش‌تر دیده شد. در مقایسه خاک ستون‌های دارای گیاه و ستون‌هایی که در آن‌ها گیاهی کشت نشده بود، همان‌گونه که دیده می‌شود غلظت نیکل در ستون‌های همراه با کشت تربچه به مقدار قابل‌توجهی از ستون‌های همسان که در آن‌ها گیاهی کشت نشده بود، کم‌تر بود، که نشان از جذب زیاد نیکل با گیاه است. به‌گونه‌ای که در ستون‌هایی که گیاه کشت نشده بود، غلظت نیکل (میانگین تیمارهای بافت و ساختمان خاک) در لایه نخست نزدیک ٪۴۰ بیش‌تر از ستون‌هایی که تربچه کشت شده بود، دیده شد. ولی در لایه دوم این ناهمانندی برابر با ٪۸ بود و در لایه سوم نتیجه کاملاً برعکس شد و مقدار نیکل در ستون‌هایی که گیاه داشت نزدیک ٪۱۲ بیش‌تر بود، که نشان‌دهنده پیامد تیمارهای دیگر (بافت و ساختمان خاک) می‌باشد. احتمالاً پیدایش منافذ درشت به‌علت رشد ریشه و تر و خشک شدن‌های بیش‌تر به‌دلیل جذب رطوبت توسط گیاه در لایه اول، سبب انتقال بیش‌تر نیکل به لایه‌های پایین‌تر و تجمع آن‌ها در لایه سوم گردیده است.

جدول ۳- اثر تیمارهای بافت خاک (SL، لوم‌شنی و CL، لوم‌رسی)، ساختمان خاک (D، دست‌خورده و U، دست‌نخورده) و کشت گیاه (R، گیاه تربچه و N، بدون گیاه) بر غلظت نیکل (میلی‌گرم در گیلوگرم) در خاک در لایه‌های ۰-۱۰ سانتی‌متر (L_1)، ۱۰-۲۰ سانتی‌متر (L_2)، ۲۰-۳۰ سانتی‌متر (L_3).

Table 3. Effects of soil texture (SL, sandy loam and CL, clay loam), soil structure (D, disturbed and U, undisturbed) and plant cultivation (R, radish and N, without plant) on Ni concentration (mg Kg^{-1}) in soil for layers of 0-10 cm (L_1), 10-20 cm (L_2), 20-30 cm (L_3).

غلظت نیکل (mg Kg^{-1}) Ni concentration			کشت گیاه	ساختمان	بافت خاک
			Plant cultivation	Soil structure	Soil texture
L_3	L_2	L_1			
42.32[a]	65.12[a]	101.13[b]	R	D	CL
37.20[b]	61.92[b]	128.43[a]	N	D	CL
21.20[g]	49.82[e]	50.45[h]	R	U	CL
18.16[h]	30.27[g]	60.09[g]	N	U	CL
33.21[c]	57.35[c]	81.06[e]	R	D	SL
30.22[d]	52.57[d]	94.26[c]	N	D	SL
29.15[e]	36.08[f]	69.46[f]	R	U	SL
25.06[f]	35.82[f]	82.09[d]	N	U	SL

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای دست‌کم یک واژه همسان می‌باشند از دیدگاه آماری بر پایه ۵ درصد معنی‌دار نیستند.

The same letters in each column are not statistically significant ($P<0.05$).

در بررسی پیامد بافت خاک (میانگین تیمارهای ساختمان و رشد گیاه)، غلظت نیکل در خاک لوم‌رسی بیش‌تر از خاک لوم‌شنی دیده شد. از آن‌جا که خاک‌های رسی دارای سطح ویژه و گنجایش تبادلی بیش‌تر برای جذب و نگهداری نیکل می‌باشند، در خاک‌های دارای رس بالاتر، مقدار نیکل بیش‌تر بود. به هر گونه نبود تفاوت معنی‌دار در مقدار نیکل نگهداری شده در خاک لوم‌رسی نسبت به خاک لوم‌شنی را می‌توان وابسته به پیامد ساختمان خاک دانست. همان‌طور که مشاهده می‌شود در خاک‌های لوم‌رسی و دست‌نخورده مقدار نیکل جذب شده کم‌تر از خاک‌های لوم‌شنی دست‌نخورده و دارای ساختمان بود، به‌گونه‌ای که مقدار نیکل در خاک لوم‌رسی دست‌نخورده با کشت گیاه (CL,U,R) و بدون گیاه (CL,U,N) به‌ترتیب ٤٤٪ و ٢٧٪ کم‌تر از خاک لوم‌شنی دست‌نخورده با کشت گیاه (SL,U,R) و بدون گیاه (SL,U,N) بود (جدول ۳). رس با داشتن سطح ویژه بالا و ویژگی‌های الکترواستاتیکی، ازدیدگاه فیزیکی و شیمیایی کاراتر است و نقش ویژه‌ای در به هم پیوستن دانه‌های خاک و پیدایش خاکدانه‌ها دارد و پس از ماده آلی، یکی از مهم‌ترین عوامل در پیدایش و پایداری خاک می‌باشد. خاکدانه‌سازی و پیدایش ساختمان در خاک‌های ریز بافت می‌تواند سبب سرعت بخشیدن به جریان آب و آلاینده‌ها در این خاک‌ها شود. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده نقش ویژه بافت در پیدایش ساختمان خاک است. این نتایج با

یافته‌های مصدقی و همکاران (۲۰۰۹) و صفادوست و همکاران (۲۰۱۲) هم‌خوانی دارد (۲۸ و ۳۱). آن‌ها نیز دریافتند که پیدایش ساختمان بهتر و شکاف‌های بیش‌تر سبب ایجاد جریان‌های ترجیحی در خاک‌های ریزبافت شده که افزایش حرکت عناصر از این خاک‌ها در برابر خاک‌های درشت‌بافت را در پی دارد. همچنین کیسل و همکاران (۱۹۷۳) نیز گزارش کردند که حرکت نمک‌ها در خاک‌های رسی با ساختمان خوب، در برابر خاک‌های شنی بدون ساختمان، در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود (۲۲). بجات و همکاران (۲۰۰۰) نیز پیامد ساختمان خاک و شیوه بهره‌وری از زمین را بر حرکت آب و کلرید در خاک دست‌نخورده بررسی کردند. آن‌ها پی بردند که ساختمان خاک به گونه غیرمستقیم بر جابجایی نمک‌ها اثر دارد (٤). همان‌گونه که در جدول ۳ دیده می‌شود مقدار نیکل جذب شده در خاک‌های لوم‌رسی دست‌خورده و بدون ساختمان حدود ۲/٦ برابر آن در خاک‌های لوم‌رسی دست‌نخورده و دارای ساختمان بود (۱۱٤/۷۸ در برابر ٤٤/٤۹ میلی‌گرم در کیلوگرم)، که نشان از وجود مسیرهای ترجیحی برای حرکت سریع‌تر نیکل در خاک دست‌نخورده و در نتیجه تماس کم‌تر آن با سطوح جذب‌کننده ذرات جامد خاک می‌باشد.

همچنین مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار نیکل در لایه نخست (L_1) تیمار بافت لوم‌رسی، ساختمان دست‌خورده و بدون کشت گیاه (CL,D,N) با غلظت ۱۲۸/٤۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کم‌ترین اندازه آن نیز در لایه سوم (L_3) تیمار بافت لوم‌رسی، ساختمان دست‌نخورده و بدون کشت گیاه (CL,U,N) با غلظت ۱۸/۱٦ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۳).

پیامد بافت، ساختمان خاک و کشت گیاه بر غلظت نیکل در زه‌آب: نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارهای آزمایشی بر غلظت نیکل در زه‌آب‌های خروجی ستون خاک در جدول ٤ آمده است. با نگاه به داده‌ها، غیر از بافت خاک پیامد همه تیمارها بر غلظت نیکل در زه‌آب خروجی در پایه آماری ۱ درصد معنی‌دار بود. همچنین پیامد برهم‌کنش میان تیمارهای بافت و ساختمان خاک (S×T) و ساختمان خاک و گیاه (P×S) نیز بر غلظت نیکل در خروجی ستون‌های خاک معنی‌دار بود، ولی برهم‌کنش تیمارهای بافت خاک و گیاه (P×T) تنها در زه‌آب سوم معنی‌دار (P<۰/۰۱) شد. همچنین برهم‌کنش سه‌گانه هر سه تیمار بافت، ساختمان خاک و گیاه (P×S×T) تنها در زه‌آب چهارم در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.

نتایج آزمون میانگین پیامد تیمارها بر غلظت نیکل در زه‌آب‌های خروجی از ستون خاک در جدول ٤ آمده است. بیش‌ترین مقدار نیکل در زه‌آب‌های خروجی ستون خاک از تیمار بافت لوم‌رسی، ساختمان دست‌نخورده و با کشت گیاه (CL,U,R) و کم‌ترین مقدار آن از تیمار بافت لوم‌رسی، ساختمان دست‌خورده و بدون کشت گیاه (CL,D,N) مشاهده شد (جدول ٤).

جدول ٤- اثر تیمارهای بافت خاک (SL، لوم‌شنی و CL، لوم‌رسی)، ساختمان خاک (D، دست‌خورده و U، دست‌نخورده) و کشت گیاه (R، گیاه تربچه و N، بدون گیاه) بر غلظت نیکل (میلی‌گرم در لیتر) در زه‌آب در دوره‌های آبیاری اول (D_1)، دوم (D_2)، سوم (D_3)، چهارم (D_4) و پنجم (D_5).

Table 4. Effects of soil texture (SL, sandy loam and CL, clay loam), soil structure (D, disturbed and U, undisturbed) and plant cultivation (R, radish and N, without plant) on Ni concentration (mg L^{-1}) in effluent for irrigation cycles of first (D_1), second (D_2), third (D_3), fourth (D_4) and fifth (D_5).

غلظت نیکل (mg Kg^{-1}) Ni concentration					کشت گیاه Plant cultivation	ساختمان Soil structure	بافت خاک Soil texture
D_5	D_4	D_3	D_2	D_1			
0.22^{e}	0.21^{e}	0.18^{cd}	0.17^{d}	0.14^{d}	R	D	CL
0.17^{f}	0.14^{g}	0.12^{f}	0.11^{f}	0.10^{g}	N	D	CL
0.49^{a}	0.39^{a}	0.26^{a}	0.23^{a}	0.20^{a}	R	U	CL
0.32^{c}	0.23^{d}	0.19^{c}	0.19^{c}	0.15^{c}	N	U	CL
0.31^{c}	0.25^{c}	0.20^{c}	0.19^{c}	0.16^{c}	R	D	SL
0.23^{e}	0.17^{g}	0.15^{e}	0.13^{e}	0.11^{f}	N	D	SL
0.35^{b}	0.32^{b}	0.22^{b}	0.20^{b}	0.18^{b}	R	U	SL
0.26^{d}	0.19^{f}	0.17^{d}	0.16^{d}	0.13^{e}	N	U	SL

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای دست‌کم یک واژه همسان می‌باشند از از دیدگاه آماری بر پایه ٥ درصد معنی‌دار نیستند.

The same letter in each column are not statistically significant ($P<0.05$).

مقدار نیکل در زه‌آب همه ستون‌هایی که در آن‌ها گیاه کشت شده بود، بیش‌تر از ستون‌های همانندی بود که در آن‌ها گیاه کشت نشده بود، که آن را می‌توان وابسته به پیدایش منافذ درشت و شکاف‌ها و کانال‌های وابسته به نفوذ ریشه و مسیرهای ترجیحی آب برای جابجایی نیکل در خاک دانست. دودی و همکاران (١٩٩١) گزارش کردند که با پیدایش شکاف‌ها و سوراخ‌های درشت (ماکروپورها)، فلزهای سنگین از راه فرآیندهایی که جریان آب غیرماتریکسی یا جریان ترجیحی نامیده می‌شوند، به آب‌های زیرزمینی می‌رسند (١١).

غلظت نیکل در زه‌آب به خوبی پیامدهای هم‌زمان بافت و ساختمان خاک را بر جابجایی آلاینده‌ها نشان داد (جدول ٤). همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد هنگامی که خاک ساختمان نداشت و دست‌خورده بود، بسته به تماس بیش‌تر آلاینده‌ها با سطوح جذب‌کننده و نگهدارنده بیش‌تر رس در خاک لوم‌رسی و در نتیجه جذب بیش‌تر نیکل در این خاک‌ها، اندازه نیکل در زه‌آب این خاک‌ها (خاک‌های لوم‌رسی دست‌خورده) حدود ٪١١ کم‌تر از خاک‌های لوم‌شنی دست‌خورده بود. در حالی‌که در خاک‌های دست‌نخورده، گسترش بیش‌تر و بهتر ساختمان خاک در خاک‌های رسی و گسترش منافذ درشت و پیوستگی آن‌ها سبب آسانی حرکت نیکل به سوی لایه‌های پایینی و در پی آن در زه‌آب گردید؛ به‌گونه‌ای که مقدار آلودگی زه‌آب در خاک‌های لوم‌رسی دست‌نخورده (میانگین پیامد کشت گیاه و دوره‌های آبیاری) ٪٢٣ بیش‌تر از خاک‌های لوم‌شنی دست‌نخورده بود. اندازه کوچک‌تر منافذ، پیچیدگی بیش‌تر، از بین رفتن منافذ

بزرگ و پیوستگی آن‌ها در ساختمان دست‌خورده، سبب جذب بیش‌تر آلاینده‌ها در این خاک‌ها می‌شود (۱۳). نتایج این پژوهش با یافته‌های استین‌هویس و همکاران (۱۹۹۵) همخوانی دارد؛ آن‌ها گزارش کردند که در خاک‌های بدون ساختمان، با بودن منافذ ریز و پیچ و خمدار، سرعت جابجایی محلول در خاک کم‌تر است. بنابراین برای جذب فلزهای محلول خاک بر ذرات خاک زمان بیش‌تری خواهد بود و در نتیجه غلظت فلزها در محلول زه‌کش شده از خاک کاهش می‌یابد (۳۶).

پیامد بافت و ساختمان خاک بر غلظت نیکل در گیاه: نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارهای بافت و ساختمان خاک بر غلظت نیکل در ریشه و اندام‌های هوایی تربچه و همچنین فاکتورهای زیست انباشتگی (BF) و ترابری (TF) در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- تجزیه واریانس پیامد تیمارهای بافت خاک (T) و ساختمان خاک (S) و برهم‌کنش آن‌ها (S×T) بر غلظت نیکل در ریشه و اندام‌های هوایی گیاه تربچه و فاکتورهای زیست انباشتگی و ترابری.

Table 5. Analysis variance of soil texture (T), soil structure (S) and their interaction (T×S) on Ni concentration in root and shoot of radish and bioconcentration and translocation factors.

فاکتور ترابری Translocation factor	فاکتور زیست انباشتگی Bioconcentration factor	اندام هوایی Soot	ریشه Root	درجه آزادی Df	منبع تغییرات Source of variations
30.81**	0.06^{ns}	0.03^{ns}	0.67^{ns}	1	T
5.51*	23.87**	14.9**	18.01**	1	S
12.37**	860**	185**	235**	1	S×T

^{ns}، * و ** به‌ترتیب بیانگر عدم وجود اثر معنی‌دار در سطح خطای ۵ درصد، اثر معنی‌دار در پایه آماری ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

^{ns}, * and ** Represent non significant, and significant at probability levels of P<0.05 and P<0.01, respectively.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد پیامد بافت خاک تنها بر فاکتور ترابری معنی‌دار بود، در حالی‌که ساختمان خاک و برهمکنش بافت و ساختمان خاک دارای اثرات معنی‌دار بر همه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده بودند (جدول ۵).

مقایسه میانگین پیامد تیمارهای آزمایشی بر غلظت نیکل در ریشه و اندام‌های هوایی گیاه تربچه و فاکتورهای ترابری و زیست انباشتگی در جدول ٦ آمده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که بیش‌ترین مقدار نیکل در اندام‌های هوایی خاک لوم‌رسی دست‌خورده (CL,D) برابر با ۲٤/٤۳ میکروگرم در گرم و کم‌ترین مقدار آن در ریشه خاک لوم‌رسی دست‌نخورده (CL,U) برابر با ۱۰/۰۲ میکروگرم در گرم دیده شد. بر پایه داده‌های به‌دست آمده، در خاکی که انباشتگی نیکل در خاک کم‌تر بود (CL,U)، گیاه نیز مقدار کم‌تری را در برابر خاکی که در آن انباشتگی نیکل بیش‌تر بود (CL,D) جذب کرده است. ترتیب انباشتگی نیکل در ریشه و اندام هوایی گیاه تربچه به‌ترتیب لوم‌رسی دست‌خورده > لوم‌شنی دست‌خورده> لوم‌شنی دست‌نخورده > لوم‌رسی دست‌نخورده دیده شد (جدول ٦). در خاک‌های دست‌نخورده یا به سخن دیگر خاک‌های دارای ساختمان، چون نیکل به مقدار کم‌تری در دسترس گیاه بود، مقدار جذب نیز کم‌تر بود. بررسی‌های دلگن و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که غلظت کادمیوم، کروم، مس، سرب، نیکل و روی در

گیاهانی مانند کلم، اسفناج، تربچه و فلفل قرمز رشد یافته در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب در برابر گیاهانی که در خاک بدون لجن فاضلاب رشد کردند، بیش‌تر بود. بنابراین بهره‌گیری درازمدت از لجن فاضلاب می‌تواند سبب انباشتگی فلزهای سنگین در خاک و در پی آن گیاه گردد (١٠). همچنین بانژاد و همکاران (٢٠١٤) گزارش کردند غلظت روی در تربچه آبیاری شده با آب آلوده به روی و آرسنیک رابطه مستقیم دارد و بین جذب روی و آرسنیک در گیاه رقابت وجود دارد (٣).

جدول ٦- اثر تیمارهای بافت خاک (SL، لوم‌شنی و CL، لوم‌رسی) و ساختمان خاک (D، دست‌خورده، U، دست‌نخورده) بر غلظت نیکل (میکروگرم در گرم) در ریشه و اندام هوایی گیاه تربچه و فاکتورهای زیست انباشتگی و ترابری

Table 6. Effects of soil texture (SL, sandy loam and CL, clay loam) and soil structure (D, disturbed and U, undisturbed) on Ni concentration (μg g^{-1}) in root and shoot of radish and bioconcentration and translocation factors.

بافت خاک Soil texture	ساختمان خاک Soil structure	ریشه Root	اندام هوایی Shoot	فاکتور زیست انباشتگی Bioconcentration factor	فاکتور ترابری Translocation factor
CL	D	19.26^{a}	24.43^{a}	2.29^{a}	1.26^{ab}
CL	U	10.02^{d}	13.51^{d}	1.46^{d}	1.33^{a}
SL	D	17.27^{b}	20.22^{b}	1.92^{b}	1.17^{c}
SL	U	14.35^{c}	17.21^{c}	1.75^{c}	1.19^{bc}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای دست‌کم یک واژه همسان می‌باشند از دیدگاه آماری بر پایه ٥ درصد معنی‌دار نیستند.

The same letter in each column are not statistically significant ($P<0.05$).

بیش‌ترین مقدار فاکتور زیست انباشتگی در تربچه کشت شده در خاک لوم‌رسی دست‌خورده دیده شد (٢/٢٩)، که شاید به‌دلیل فراوانی و در دسترس بودن بیش‌تر نیکل برای جذب گیاه در این خاک نسبت به سایر تیمارها باشد (جدول ٦). پاسخ گیاهان در محیط‌هایی با غلظت فراوان فلزهای سنگین، به دو گونه است. ساز وکاز نخست دوری است که گیاهان از جذب و ترابری فلزها به درون خود جلوگیری می‌کنند و این گیاهان غیرانباشت‌کننده نامیده می‌شوند. سازوکار دوم انباشتگی فلزها است که گیاهان دارای این سازوکار، گنجایش بسیار بالایی برای جذب فلزها با ریشه‌ها و ترابری و آکندن آن در اندام‌های هوایی دارا می‌باشند و این گیاهان را بیش‌اندوز می‌نامند (٢). بر پایه فاکتور زیست‌انباشتگی توان گونه گیاهی برای تثبیت و برداشت گیاهی ارزیابی می‌شود (١٤)؛ به‌گونه‌ای که بزرگ‌تر بودن این فاکتور از یک (BF>1) نشان‌دهنده توانایی گیاه در جذب و انباشتگی فلز در اندام‌های گیاه می‌باشد. با نگاه به مقدار فاکتور زیست‌انباشتگی (BF) و ترابری (TF) در جدول ٦ می‌توان دریافت که تربچه از توان جذب و ترابری خوبی برای عنصر نیکل از خاک به اندام‌های هوایی برخوردار بوده و همانند یک گیاه بیش‌اندوز برای نیکل می‌تواند شناخته شود. بنابراین بهره‌گیری از گیاه تربچه برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به نیکل می‌تواند مناسب باشد. همان‌گونه که داده‌ها نشان می‌دهد، تربچه گیاهی می‌باشد که بیش‌تر کشش به انباشتگی نیکل در اندام‌های هوایی خود را دارد که با بهره‌گیری از فاکتور ترابری (غلظت عنصر در اندام‌های هوایی به آن در اندام‌های زیرزمینی) آشکار می‌شود (٣). بدین‌گونه که بزرگ‌تر بودن این فاکتور از یک

نشان‌دهنده جذب و رساندن بهتر این عنصر در اندام‌های هوایی و برداشت شدنی گیاه می‌باشد. یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش شده آزادی و همکاران (۲۰۱٤) درباره توان گیاه تربچه در آکندن فلزهای سنگین در اندام‌های هوایی هم‌خوانی دارد (۱).

نتیجه‌گیری کلی

ساختمان خاک همانند یک ویژگی ناپایدار یکی از مهم‌ترین عوامل در ارزیابی آلودگی محیط زیست می‌باشد. در بررسی پیامدهای هم‌زمان بافت، ساختمان و گیاه بر میزان آلودگی خاک، زه‌آب و گیاه آشکار شد که ساختمان خاک یا به سخنی توزیع اندازه منافذ و پیوستگی آن‌ها یکی از مهم‌ترین و غالب‌ترین ویژگی‌ها در ارزیابی زیان آلودگی یا بهداشت محیط زیست می‌باشد. به‌گونه‌ای که منافذ ساختمانی خاک با کنترل سرعت جریان آب و آلاینده‌ها و تعیین مسیر حرکت آن‌ها در خاک می‌توانند سرنوشت آلودگی خاک یا آب‌های زیرزمینی را نشان دهد. یافته‌های این پژوهش نشان داد هنگامی که خاک دست‌خورده و بدون ساختمان بود، هرچه مقدار رس خاک بیش‌تر بود، چون گنجایش و سطوح جاذب برای جذب نیکل بیش‌تر در دسترس بود، جذب آلاینده نیز در خاک بیش‌تر و آلودگی زه‌آب کم‌تر بود. در برابر آن هنگامی که خاک دست‌نخورده و ساختمان داشت، خاک‌های لوم‌رسی در برابر خاک‌های لوم‌شنی مقدار جذب کم‌تری داشتند و بیش‌تر آلاینده را به سوی زه‌آب خروجی از ستون خاک هدایت کردند. همچنین یافته‌های این پژوهش نشان داد که با این‌که گیاه بهسازی امروزه یکی از روش‌های نوین و سودمند در پالایش آب‌ها و خاک‌های آلوده می‌باشد، بهره‌گیری از این روش در بهسازی خاک‌هایی که با آب‌های آلوده آبیاری می‌شوند همواره باید با احتیاط صورت گیرد. زیرا هر چند کاشت گیاه کمک به برداشت آلاینده از خاک می‌کند ولی پیامد سودمند گیاه بر خاکدانه‌سازی و ریشه‌دهی بسته به ویژگی‌های ریشه گیاه می‌تواند سبب افزایش سرعت نفوذ آب آلوده و به‌دنبال آن آلودگی خاک‌های زیرین و آب‌های زیرزمینی شود.

منابع

1.Azadi, F., Kasraian, A., and Karimian, N. 2014. Effect of soil contamination by cadmium on growth factors of spinach and radish in relation to human health. Iran. J. Soil Res. 28: 3. 521-530. (In Persian)

2.Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. J. Biophys. Chem. 3: 643-654.

3.Banejad, H., Zarei, A., Safari Sinegani, A.A., and Dashti, F. 2014. Consequence of irrigation with arsenic and zinc contaminated water on accumulation of zinc in radishes plant. Iran J. Health Environ. 7: 2. 195-203.

4.Bejat, L., Perfect, E., Quisenberry, V.L., Coyne, M.S., and Haszler, G.R. 2000. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 818-826.

5.Bronick, C.J., and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma. 124: 3-22.

6.Cao, H., Chen, J., Zhang, J., Zhang, H., Qiao, L., and Men, Y. 2010. Heavy metal in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. J. Environ. Sci. 22: 11. 1792-1799.

7.Chaoui, A., and El Ferjani, E. 2005. Effects of cadmium and copper on antioxidant capacities, lignification and auxin degradation in leaves of pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. C. R. Biol. 328: 23-31.

8.Davari, M., and Homaee, M. 2012. A new yield multiplicative model for simultaneous phytoextraction of Ni and Cd from contaminated soils. J. Water Soil. 25: 6. 1332-1343. (In Persian)
9.Dawes, L., and Goonetilleke, A. 2004. Assessing changes in soil physical and chemical properties under long term effluent disposal. Proceedings of the Tenth National Symposium on Individual and Small Community Sewage System: Sacremento, California, Pp: 349-357.
10.Dolgen, D., Alpaslan, M.N., and Delen, N. 2007. Agriculture recycling of treatment-plant sludge: A case study for a vegetable processing factory. J. Environ. Manag. 84: 274-281.
11.Dowdy, R.H., Latterell, J.J., Hinesley, T.D., Grossman, R.B., and Sullivan, D.L. 1991. Trace metal movement in an Aeric Ochraqualf following 14 years of annual sludge applications. J. Environ. Qual. 20: 119-123.
12.Emami, H., Savaghebi, M., and Shorafa, M. 2005. Study of preferential floe and organic matter on cadmium, lead and zinc in a Cakcareous loamy soil. J. Scie. Technol. Agr. Natur. Resour. 9: 2. 63-75. (In Persian)
13.Emmerich, W.E., Lund, L.J., Page, A.L., and Chang, A.C. 1982. Movement of heavy metals in sewage sludge-treated soils. J. Environ. Qual. 11: 174-178.
14.FAO/WHO. 2001. Codex Alimentarius Commission. Food additive and contaminants. Joint FAO/ WHO Food Standards Programme. Alinorm 01/12(A). Pp: 1-289.
15.Ghosh, M., and Singh, S.P. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. J. Appl. Ecol. Environ. Res. 3: 1-18.
16.Gupta, N., Khan, D.K., and Santra, S.C. 2008. An assessment of heavy metal contamination in vegetable grown in waste water irrigated areas of Titagarh, West Bengal, India. B. Environ. Contam. Tox. 80: 115-118.
17.Gupta, N., Khan, D.K., and Santra, S.C. 2012. Heavy metal accumulation in vegetables grown in long term waste water irrigated agricultural land of tropical, India. Environ. Monit. Assess. 184: 6673-6682.
18.Harguinteguy, C.A., Pignata, M.L., and Fernández-Cirelli, A. 2015. Nickel, lead and zinc accumulation and performance in relation to their use in phytoremediation of macrophytes *Myriophyllum aquaticum* and *Egeria densa.* Ecol. Eng. 82: 512-516.
19.Hooda, P.S. 2010. Trace elements in soils. Blackwell Publishing Ltd, United Kingdom, 596p.
20.Hunter, C., Perkins, J., Tranter, J., and Hardwick, P. 2000. Fecal bacteria in the waters of an upland area in Derbyshire, England: The influence of agricultural land use. J. Environ. Qual. 29: 1253-1261.
21.Kabata-Pendias, A. 2011 .Trace elements in soils and plants. (4^{th} Ed), CRC Press, Boca Raton, New York.
22.Kissel, D.E., Ritchie, J.T., and Burnett, E. 1973. Chloride movement in undisturbed swelling clay soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 37: 21-24.
23.Lente, I., Ofosu-Anim, J., Brimah A.K., and Atiemo, S. 2014. Heavy metal pollution of vegetable crops irrigated with wastewater in Accra, Ghana. West Afr. J. Appl. Ecol. 22: 1. 41-58.
24.Lewis, A.L., Ojeda, O., Zalaza, R., and Cumpbell, J. 1995. Effect of population density on growth, development and yield of radish. Proceedings of the Annual Meeting of the Interamerican Society for Tropical Horticulture. Santa Marta, Colombia, Pp: 23-26.
25.Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganes and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
26.Meek, B.D., De Tar, W.R., Rolph, D., Rechel, E.R., and Carter, L.M. 1990. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 505-508.
27.Mishra, S., Srivastava, S., and Tripathi, P.D. 2006. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Baccopa monnieri* L. Plant Physiol. Biochem. 44: 25-37.

28.Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Zandsalimi, S., and Unc, A. 2009. Influence of waste type and soil structure on the bacterial filtration rates in unsaturated intact soil columns. J. Environ. Manag. 90: 730-739.
29.Nouri, J., Alloway, B.J., and Peterson, P.J. 2001. The vertical movement of Cd, Ni and Pb through undisturbed cores having a surface amended of sewage sludge. J. Biol. Sci. 1: 10. 986-988.
30.Rafati, M., Khorasani, N., Moraghebi, F., and Shirvany, A. 2012. Phytoextraction and phytostabilization potential of cadmium, chromium and nickel by *Populus alba* and *Morus alba* Species. J. Natur. Environ. Iran. J. Natur. Resour. 65: 2. 181-191. (In Persian)
31.Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Voroney, P., Unc, A., and Khodakaramian, Gh. 2012. Significance of physical weathering of two-texturally different soils for the saturated transport of *Escherichia coli* and bromide. J. Environ. Manag. 107: 147-158.
32.Saleem Akhtar, M., Stuben, D., Norra, S., and Memon, M. 2011. Soil Structure and flow rate-controlled molybdate, arsenate and chromium (III) transport through field columns. Geoderma. 161: 227-237.
33.Salmasi, R., and Tavassoli, A. 2005. Using different amendments to reduce heavy metals movement in soils. Int. J. Environ. Sci.Technol. 4: 295-300.
34.Sinegani, A., Tahmasbian, I., and Sinegani, M. 2015. Chelating Agents and Heavy Metal Phytoextraction. P 367-393, In: I. Sherameti and A. Varma (Eds.), Heavy Metal Contamination of Soils. Soil Biology. Springer International Publishing.
35.Sposito, G., Luud, J., and Change, A.C. 1983. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
36.Steenhuis, T.S., Parlange, J.Y., and Aburime, S.A. 1995. Preferential flow in structured and sandy soils: Consequences for modeling and monitoring. P 61-77, In: L. Everett, S. Cullen and L. Wilson (Eds.), Handbook of vadose zone characterization and monitoring. Lewis Publishers, Chelsea, MI.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 6(4), 2017
http://ejsms.gau.ac.ir

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Effects of soil texture and structure and radish plant on nickel content in soil, effluent drainage and plant

H.R. Almasi[1], *A. Safadoust[2] and A.A. Safari Sinegani[3]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Bu-Ali Sina Uiversity, [2]Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Bu-Ali Sina Uiversity, [3]Professor, Dept. of Soil Science, Bu-Ali Sina Uiversity
Received: 11/17/2015; Accepted: 07/04/2016

Abstract
Background and Objectives: Sewage and wastewater from industry are used for irrigating farmland in many countries and contamination of these areas with heavy metals has become one of the major causes of concern for human. Contamination of soil by human activities is recognized as a widespread problem. The mobility of heavy metals is usually low due to their strong affinity for the solid phase and thus they are very persistent contaminants in soils but physical, chemical and biological parameters can affect heavy metal mobility in soil. The aim of this study was to evaluate the interactive effects of soil texture and structure and plant cultivation on Ni content of soils, effluent drainage and plant being irrigated by Ni-contaminated water.
Materials and Methods: Columns with 22.5 cm diameter and 30 cm height of disturbed (unstructured) and undisturbed (structured) soils of sandy loam (SL) and clay loam (CL) were used in this study. Half of columns (undisturbed and disturbed) were cultivated by radish (*Raphanus sativus* L.) and all soil columns were irrigated by Ni-contaminated water. The experiments were carried out using randomized complete design and factorial arrangement in three replications. The drained water was sampled after each irrigation cycle. Radish were harvested and divided into shoots and roots and the soil was sampled from 3 layers of 1-10, 10-20 and 20-30 cm. Then the concentration of nickel (Ni) in drained water, soil layers and plant (shoots and roots) was determined by atomic adsorption.
Results: Result showed that the concentration of Ni in the undisturbed soil columns was greater about 34% in the SL than in the CL soil texture. This indicates a predominant role of pore continuity than retention at adsorptive site in structured clay loam soils. In the disturbed soil columns, average Ni concentration was greater about 1.5 times more than undisturbed soil columns, likely due to enhanced Ni/soil particle interactions due to presence of preferential paths for water flow. Accelerated water velocities through preferential flow pathways were likely responsible for the smaller adsorption of Ni in undisturbed soil columns. The effluent concentration under radish cultivation showed higher Ni concentration contents when compared to soil without plant. In the soils under plant cultivation, structural cracks and root channels were the cause of higher leached concentrations when compared to the soil without plant cultivation. Our results also showed translocation factor of Ni was more than one and hence, radish could be considered as an accumulator of Ni.
Conclusion: The high concentration of Ni in soil and effluent water drainage indicates the potential for pollution transfer from these media even in presence of radish as an accumulator; and also show that agricultural management can play an important role in soil and groundwater-heavy metals contamination.

Keywords: Contamination, Accumulator, Translocation factor, Nikcel

* Corresponding Author; Email: safadoust@basu.ac.ir